

TESIS DOCTORAL

**Diseño de termosifones. Influencia de las
propiedades termofísicas del fluido de trabajo.**

MEMORIA

Presentada por:

D. Juan José Aguas Alcalde

Directores:

Dr. D. José María Sala Lizarraga

Dr. D. Luis Alfonso del Portillo Valdés

Bilbao, noviembre de 2015

A mis padres y hermanos

A mis hijos

A Lourdes

Agradecimientos

Todas las personas a las que quiero mostrar mi agradecimiento, por haberme acompañado en este viaje de conocimiento, ya lo saben.
Poner aquí sus nombres confinaría el valor de su apoyo sólo a este momento y a este escrito.

Resumen

La disipación del calor generado, con un gradiente de temperatura aceptable para muchas aplicaciones, se ha convertido en uno de los problemas fundamentales para el desarrollo de las tecnologías térmicas. Además, los problemas medioambientales, derivados de la actual situación energética, hacen cada vez más necesario la optimización de los sistemas de transporte de energía y la búsqueda de soluciones limpias y sostenibles.

Constantemente se desarrollan numerosos dispositivos para mejorar la transferencia de energía en su forma térmica. Un termosifón es un dispositivo sencillo, fiable y muy efectivo para el transporte de calor que no requiere un suministro externo de potencia.

La línea principal de trabajo de la tesis ha consistido en determinar cuál puede ser la influencia de las propiedades termofísicas del fluido de trabajo en la eficiencia y el diseño de un termosifón, cuyo rango de funcionamiento sea para bajas temperaturas.

En la primera parte del estudio se ha realizado una búsqueda sistemática de sustancias que cumplan las condiciones necesarias para poder ser ensayadas. Se han determinado las propiedades termofísicas a estudiar y se han hallado las ecuaciones de estado de cada una de ellas para todas las sustancias seleccionadas. Con el fin de ampliar las posibilidades del trabajo se ha experimentado, también, con mezclas azeotrópicas.

En la tesis se ha realizado una investigación, predominantemente experimental, sobre el comportamiento de cuatro termosifones, con distintos fluidos de trabajo, tres con forma cilíndrica y otro de forma prismática, diseñados para transportar potencias comprendidas entre 50 y 500 W contruidos con tres tipos distintos de metales: cobre, aluminio y acero inoxidable. Se ha trabajado con cuatro temperaturas próximas al ambiente y tres niveles de llenado.

Se ha desarrollado una metodología específica y un protocolo de ensayos muy detallado para realizar los experimentos que permitan medir con precisión la eficacia de los termosifones.

Se han utilizado métodos estadísticos, como el diseño de experimentos y análisis de regresión multivariable, para evaluar la influencia de las distintas propiedades termofísicas y las interacciones entre ellas en la eficiencia del termosifón.

Se ha encontrado la forma de generalizar los resultados en función de las propiedades de las sustancias, determinándose cuales son las características termofísicas más influyentes. Por último se ha encontrado una relación sencilla entre las propiedades y el punto óptimo de la eficiencia térmica de los termosifones.

Entre las aplicaciones más importantes de los termosifones, a desarrollar en un futuro inmediato, están la disipación de calor en todo tipo de equipos electrónicos y en módulos Peltier.

Palabras clave: Termosifón, fluidos de trabajo, flujo bifásico, propiedades termofísicas, eficacia.

Abstract

The dissipation of the generated heat, with a feasible temperature gradient for many applications, has turned out as one of the main obstacles for the development of thermal technologies. Moreover, the environmental problems have become a major challenge arising from the current energetic situation. As an aftermath, optimizing the energy's transport system and the quest for clean and sustainable energy systems are becoming more and more necessary.

Numerous mechanisms are being constantly developed in order to improve the transfer of energy in its thermal form. A thermosyphon is a simple, reliable and very effective device in terms of heat transport that does not require an external power source.

The main line of reasoning has consisted of determining the influence of the thermophysical properties of working fluid in the efficiency and in thermosyphons design, working in a low-temperature range.

Throughout all the first part, systematic searches of the appropriate substances have been made, selecting those that fulfil the requirements. Data has been collected from all these substances, determining the thermophysical properties under study. In addition, equations of state have been computed. In order to broaden the possibilities, which this job contributes, azeotropic mixtures have been studied.

During the thesis, a mainly experimental research has been carried out on the performance of four thermosyphons, with different working fluids. Three of them were cylindrical-shaped and one was prismatic-shaped. All of them were designed to conduct a power between 50 and 500W. They were made of three different metals: Copper, aluminium and stainless steel. Work has taken place under four temperatures around room temperature and three filling ratios.

To proceed towards a successful research, a protocol and a specific methodology have been developed in detail in order to carry out experiments, which will allow to measure accurately the efficiency of thermosyphons.

Statistical methods have been used, such as design of experiments and multivariable regression analysis, to evaluate the influence of different thermophysical properties and its interactions in the efficiency of the thermosyphon.

The way to generalize the results according to the properties of the fluid used has been found, determining the more influential thermophysical features. Finally, a relationship between the properties and the optimum point for the thermal efficiency of the thermosyphons has been found.

The heat dissipation in electronic devices and Peltier modules are the thermosiphons' applications more important to be developed in the near future.

Key words: Thermosyphon, working fluid, two-phase flow, thermophysical properties, efficiency.

Índice

Índice
Notación y símbolos

Capítulo 1 Estado actual de la técnica	1
1.1. Introducción	3
1.2. Tubo de calor.....	4
1.2.1. Principio de funcionamiento.....	4
1.2.2. Propiedades.....	8
1.2.3. Esquema teórico de funcionamiento.....	11
1.2.4. Clasificación de los tubos de calor	15
1.2.4.1. Forma de los tubos de calor.....	16
1.2.4.2. Fuerzas motrices, o de accionamiento, de la fase líquida	17
1.2.4.3. Rango de temperaturas de trabajo.....	18
1.2.5. Límites de funcionamiento.....	21
1.3. Termosifón.....	23
1.3.1. Principios de funcionamiento	26
1.3.1.1. Teoría de Nusselt de la condensación	29
1.3.1.2. Teoría de la ebullición.....	34
1.3.2. Esquema teórico de funcionamiento	38
1.3.3. Clasificación de los termosifones	40
1.3.4. Límites de funcionamiento.....	42
1.3.4.1. Límite sónico	43
1.3.4.2. Límite de secado	43
1.3.4.3. Límite de inundación o arrastre.....	46
1.3.4.4. Límite de ebullición	50
1.4. Aplicaciones de los tubos de calor y termosifones	54
1.4.1. Aplicaciones espaciales.....	54
1.4.2. Aplicaciones terrestres.....	55
1.4.2.1. Conservación del permafrost.....	55
1.4.2.2. Derretimiento de la nieve y deshielo	57
1.4.2.3. Fundición a presión e inyección de moldes.....	58
1.4.2.4. Aplicaciones en energía solar	59
1.4.2.5. Conservación de la energía.....	59
1.4.2.6. Refrigeración de componentes electrónicos.....	60
1.5. Breve reseña histórica.....	65
Referencias	70

Capítulo 2 Objetivos	75
2.1. Aproximación experimental	77
2.2. Objetivo general	78
2.3. Objetivos específicos	79
Referencias	81
Capítulo 3 Sustancias de trabajo	83
3.1. Introducción	85
3.2. Características de las sustancias a ensayar	85
3.3. Sustancias seleccionadas para los ensayos	88
3.3.1. Preselección	89
3.3.2. Selección intermedia	89
3.3.3. Selección definitiva	90
3.4. Propiedades termofísicas de las sustancias de trabajo	92
3.4.1. Obtención de las ecuaciones de estado	93
3.4.2. Validación de las ecuaciones de estado	96
3.5. Ecuaciones de estado de las propiedades termofísicas	97
3.5.1. Presión de vapor	97
3.5.2. Densidad	99
3.5.2.1. Densidad del líquido saturado	99
3.5.2.2. Densidad del vapor saturado	99
3.5.3. Entalpía de vaporización	100
3.5.4. Calor específico	101
3.5.4.1. Calor específico del líquido saturado	101
3.5.4.2. Calor específico del vapor saturado	102
3.5.5. Conductividad térmica	103
3.5.5.1. Conductividad térmica del líquido saturado	103
3.5.5.2. Conductividad térmica del vapor saturado	104
3.5.6. Viscosidad dinámica	104
3.5.6.1. Viscosidad dinámica del líquido saturado	105
3.5.6.2. Viscosidad dinámica del vapor saturado	105
3.5.7. Tensión superficial	106
3.6. Mezclas azeotrópicas	107
3.6.1. Obtención de las mezclas azeotrópicas	109
3.6.2. Estimación de las propiedades termofísicas de las mezclas	110
3.6.2.1. Presión de vapor	110
3.6.2.2. Densidad líquido	113
3.6.2.3. Densidad vapor	113

3.6.2.4.	Entalpía de vaporización	114
3.6.2.5.	Calor específico líquido.....	114
3.6.2.6.	Calor específico vapor.....	115
3.6.2.7.	Viscosidad dinámica del líquido	115
3.6.2.8.	Viscosidad dinámica del vapor	115
3.6.2.9.	Conductividad térmica líquido.....	116
3.6.2.10.	Conductividad térmica vapor.....	116
3.6.2.11.	Tensión superficial.....	116
Referencias		118
Capítulo 4 Prototipos de termosifón		121
4.1.	Descripción de un termosifón bifásico.....	123
4.2.	Modelo térmico	125
4.3.	Eficiencia de los termosifones	130
4.3.1.	Factor de calidad de ESDU.....	130
4.3.2.	Modelo de Imura.....	131
4.4.	Materiales de los recipientes	132
4.5.	Termosifón en cobre	133
4.5.1.	Dimensiones y características.....	134
4.5.2.	Colocación de las sondas de temperatura	141
4.5.3.	Sondas de presión	144
4.5.4.	Medida de la tensión e intensidad. Conexiones eléctricas	146
4.5.5.	Termografías	147
4.6.	Termosifón pequeño en acero inoxidable.....	148
4.6.1.	Dimensiones y características.....	148
4.6.2.	Sondas de medida: temperatura, presión, tensión e intensidad	152
4.6.3.	Termografías	153
4.7.	Termosifón grande en acero inoxidable	154
4.7.1.	Dimensiones y características.....	154
4.7.2.	Sondas de medida: temperatura, presión, tensión e intensidad	159
4.7.3.	Termografías	161
4.8.	Termosifón en aluminio.....	163
4.8.1.	Dimensiones y características.....	163
4.8.2.	Funcionamiento del elemento termoeléctrico Peltier	167
4.8.3.	Estudio estructural.....	170
4.8.4.	Colocación de las sondas de temperatura	175
4.8.5.	Sondas de presión	177
4.8.6.	Medida de la tensión e intensidad. Conexiones eléctricas	178

4.8.6.1.	Esquema de conexión para los ensayos sin control de potencia.....	178
4.8.6.2.	Esquema de conexión para los ensayos con control de potencia.....	179
4.8.7.	Termografías.....	180
Referencias.....		182
Capítulo 5 Metodología de ensayos		183
5.1.	Magnitudes medidas	185
5.1.1.	Temperatura ambiente y ciclo de ensayos.....	185
5.1.2.	Temperatura del fluido.....	187
5.1.3.	Isotermicidad	188
5.1.4.	Coeficiente de llenado o nivel de carga	191
5.1.4.1.	Termosifón cilíndrico de acero pequeño	191
5.1.4.2.	Termosifón cilíndrico de cobre	192
5.1.4.3.	Termosifón cilíndrico de acero grande.....	192
5.1.4.4.	Termosifón prismático de aluminio.....	193
5.1.5.	Potencia térmica disipada	193
5.1.6.	Salto térmico y resistencia térmica	195
5.2.	Equipos de trabajo	196
5.2.1.	Cámaras climáticas	196
5.2.2.	Otros equipos	198
5.3.	Equipos de medida	201
5.4.	Protocolo de los ensayos.....	203
5.4.1.	Puesta a punto y limpieza inicial.....	203
5.4.2.	Extracción del fluido de trabajo	204
5.4.3.	Limpieza intermedia del termosifón	205
5.4.4.	Procedimiento de ensayo y primera carga.....	206
5.4.5.	Procedimiento de ensayo con carga intermedia.....	209
Referencias.....		210
Capítulo 6 Resultados experimentales		211
6.1.	Presentación de los resultados	213
6.1.1.	Termosifones cilíndricos.....	214
6.1.1.1.	Gráficas del termosifón de cobre.....	214
6.1.1.2.	Tablas del termosifón de cobre	228
6.1.2.	Termosifón prismático.....	244
6.2.	Determinación de las propiedades termofísicas.....	247
6.3.	Otros ensayos realizados.....	251
6.3.1.	Ensayos con distintas potencias	251
6.3.2.	Ensayos con distintas inclinaciones	253

6.3.3.	Ensayos con coeficientes de llenado superiores al 100 %.....	255
6.3.4.	Ensayos con convección forzada	258
Referencias		262
Capítulo 7 Análisis de resultados y optimización		263
7.1.	Introducción al análisis estadístico	265
7.1.1.	Regresión múltiple	265
7.1.2.	Evaluación del modelo de regresión.....	265
7.1.2.1.	Coeficiente de determinación (R^2)	266
7.1.2.2.	Coeficiente de determinación corregido ($R^2_{ajustado}$).....	266
7.1.2.3.	Análisis de varianza.....	267
7.1.3.	Elección del conjunto de regresión.....	267
7.1.3.1.	Criterio del coeficiente de determinación múltiple R^2 ajustada.....	268
7.1.3.2.	Criterio C_p de Mallows	268
7.1.3.3.	Selección paso a paso	268
7.1.4.	Diagnos del modelo	268
7.1.4.1.	Puntos de nivel y puntos influyentes	269
7.1.4.2.	Residuales.....	269
7.1.4.3.	Medidas de influencia.....	271
7.1.5.	Multicolinealidad	272
7.1.5.1.	Detección de la multicolinealidad	272
7.1.5.2.	Corrección de la multicolinealidad.....	273
7.2.	Ensayos realizados	276
7.3.	Métodos estadísticos empleados para el análisis	278
7.4.	Análisis de la regresión por termosifón	280
7.4.1.	Estudio de regresión para el termosifón de cobre.....	281
7.4.1.1.	Regresión múltiple	281
7.4.1.2.	Regresión múltiple con las variables termofísicas más relevantes.....	287
7.4.1.3.	Regresión ridge.....	293
7.4.2.	Estudio de regresión para el termosifón prismático de aluminio con control de potencia (CCP).....	308
7.4.2.1.	Regresión múltiple	308
7.4.2.2.	Regresión múltiple con las variables termofísicamente relevantes	315
7.4.2.3.	Regresión ridge.....	321
7.4.3.	Estudio de regresión para el conjunto de los termosifones	343
7.4.3.1.	Regresión múltiple	343
7.4.3.2.	Regresión múltiple con las variables termofísicamente relevantes	350
7.4.3.3.	Regresión ridge.....	356

7.4.4.	Resultados del estudio de regresión	380
7.5.	Análisis de experimentos y superficies de respuesta.....	384
7.5.1.	Introducción al análisis de superficie de respuesta	384
7.5.2.	Estudio de superficie de respuesta para termosifón de cobre	384
7.5.3.	Estudio de superficie de respuesta para termosifón prismático de aluminio con control de potencia (CCP)	395
7.5.4.	Estudio de superficie de respuesta para el conjunto de los termosifones	405
7.5.5.	Resultados del estudio de superficie de respuesta	418
7.6.	Optimización	419
7.6.1.	Introducción a la optimización	419
7.6.2.	Optimización de las fórmulas obtenidas en la regresión ridge	42
7.6.3.	Variación de la resistencia térmica con la temperatura reducida.....	423
7.6.3.1.	Termosifón cilíndrico de acero pequeño	425
7.6.3.2.	Termosifón cilíndrico de cobre	427
7.6.3.3.	Termosifón cilíndrico grande de acero.....	429
7.6.3.4.	Termosifón prismático de aluminio sin control de potencia (SCP)	431
7.6.3.5.	Termosifón prismático de aluminio con control de potencia (CCP)	433
7.6.3.6.	Todos los termosifones en conjunto	435
7.6.4.	Comparación con el modelo de ESDU.....	438
7.6.5.	Variación de la resistencia térmica con la presión de vapor al aumentar la temperatura reducida	441
	Referencias	444
	Capítulo 8 Conclusiones y líneas futuras	447
8.1.	Conclusiones	449
8.2.	Líneas futuras de investigación	452
	Anexos	Tomo II

Notación y símbolos

Letras mayúsculas

A	Área	m^2
Bo	Número de Bond	adim.
C	Capacidad calorífica	J/K
D, d	Diámetro	m
FR	Coefficiente de llenado o <i>fill ratio</i>	adim.
F	Fuerza	N
G	Masa por unidad de tiempo y área	$\text{kg}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$
I	Intensidad	A
K	Número de Kutateladze	adim.
K	Permeabilidad	m/s
L	Longitud	m
Nu	Número de Nusselt	adim.
Pr	Número de Prandtl	adim.
P	Parachor	$\text{kg}^{1/4}\cdot\text{m}^3/(\text{s}^{1/2}\cdot\text{mol})$
P	Potencia	W
\dot{Q}	Potencia calorífica	W
R	Resistencia térmica	K/W
Re	Número de Reynolds	adim.
T	Temperatura absoluta	K
U	Velocidad adimensional	adim.
V	Tensión	V
V	Volumen	m^3
\dot{W}	Potencia	W

Letras minúsculas

c	Calor específico.....	J/(kg·K)
g	Aceleración de la gravedad	m/s ²
h	Coefficiente de transmisión del calor o de película.....	J/(m ² ·°C)
h_{fg}	Entalpía de vaporización	J/kg
k	Conductividad térmica	W/(m·K)
\dot{m}	Flujo másico	kg/s
p	Presión.....	Pa
\dot{q}	Flujo de calor.....	W/m ²
r	Radio	m
t	Temperatura.....	°C
u	Velocidad.....	m/s
x	Fracción molar.....	adim.
y	Fracción másica.....	adim.

Símbolos griegos

β	Ángulo con respecto a la vertical	°
γ	Coefficiente de actividad	adim.
δ	Espesor de película.....	m
λ	Longitud de onda.....	m
θ	Ángulo de mojado	°
μ	Viscosidad dinámica.....	Pa·s
ρ	Densidad.....	kg /m ³

σ	Tensión superficial	N/m
τ	Tiempo.....	s
ω	Factor acéntrico de Pitzer	adim.
ϕ	Factor de calidad	kg/K ^{3/4} ·s ^{5/2}

Superíndices y subíndices

a	ambiente, adiabático
amb	ambiente
arr	arrastré
b	burbuja
c	crítico, condensador
co	condensación
cp	capilar
e	evaporador
eb	ebullición
ef	efectivo
elec	eléctrica
exp	exponente del número <i>e</i>
g	gravedad
gl	hidrostática longitudinal
gt	hidrostática transversal
i	inferior, interno, componente
ic	inercia
l	líquido
m	mezcla

n	número de componentes
Pc	cara caliente del Peltier
pe	pared exterior
pF	pared
r	reducido, rozamiento
res	resistencia
s	superior, saturación
son	sónico
term	térmico
v	vapor
vis	viscoso

Capítulo 1

Estado actual de la técnica

1.1. Introducción

Uno de los problemas fundamentales para el desarrollo actual de la tecnología, debido al continuo crecimiento en tamaño de los equipos utilizados cotidianamente, es la gran dificultad para disipar el calor generado en muchas aplicaciones, con un gradiente de temperatura aceptable. El transporte de energía es un tema muy amplio ya que concierne, más o menos, a todos los procesos físicos. Constantemente se desarrollan numerosos dispositivos para mejorar la transferencia de energía en su forma térmica. Además, la utilización racional de la energía en los procesos industriales exige sistemas térmicos apropiados.

Entre el vasto conjunto de soluciones esta tesis se ha orientado hacia los sistemas que utilizan las propiedades termofísicas de un fluido cuando se produce un cambio de fase, de líquido a vapor. Así la cantidad de energía que se necesita para pasar un gramo de agua de 0 °C hasta 100 °C es, aproximadamente, 418 J. Si se compara con la energía absorbida para evaporar el mismo gramo de agua a 100 °C, su entalpía de vaporización, ésta resulta ser cinco veces más, aproximadamente 2 250 J. Además, se puede observar los elevados valores del coeficiente de transmisión del calor por convección, (véase, en Chapman [1], la tabla 1.1), para el cambio de fase, tanto en ebullición como en condensación. Se puede entrever, por tanto, todo el interés que presenta el fenómeno de cambio de fase para el transporte e intercambio de energía en forma térmica. Es suficiente evaporar un líquido en la zona que se desea extraer energía, transportar esta energía de forma casi isotérmica por medio del flujo en la fase de vapor y, finalmente, condensar este vapor en la zona de entrega de la energía. Queda, sin embargo, asegurar el flujo en la fase vapor y el retorno de la fase líquida para obtener un sistema en ciclo cerrado, que consiga autoalimentarse.

Tabla 1.1. Valores del coeficiente de transmisión del calor por convección.

Tipo de convección	h (W/m ² · °C)
Convección libre en el aire	5 - 25
Convección libre en el agua	500 - 1000
Convección forzada en el aire	10 - 500
Convección forzada en el agua	100 - 15 000
Agua en ebullición	2 500 - 25 000
Vapor con condensación	5 000 - 100 000

Los tubos de calor y, especialmente, los termosifones bifásicos consiguen estos objetivos y son cada vez más utilizados como intercambiadores y recuperadores de calor.

La concepción del termosifón bifásico es del siglo XIX, muy anterior a la del tubo de calor. Fueron L. P. Perkins y W. E. Buck, en 1892, quienes patentaron [2] y construyeron un termosifón bifásico, para los hornos de panadería. Sin embargo, no ha sido hasta el desarrollo del tubo de calor cuando el interés por los termosifones ha aumentado hasta suponer un importante número de aplicaciones y de trabajos teóricos y experimentales.

Estos dispositivos se llevan utilizando algunos años y presentan una relativa simplicidad en su construcción, pero los procesos que tienen lugar durante su funcionamiento no son en absoluto sencillos. Para poder utilizarlos de una forma técnicamente adecuada es necesario conocer sus características, sus límites y sus prestaciones de funcionamiento. El estudio de los tubos de calor y de los termosifones hoy en día es una disciplina muy extensa que, a través de sus principios de funcionamiento, se estudiará en el primer capítulo de este trabajo.

1.2. Tubo de calor

El fin fundamental del uso de un tubo de calor, o de un termosifón, es el de transferir calor entre dos fuentes, o dos focos, alejados. El principio de funcionamiento descansa en la circulación en un ciclo, o circuito cerrado, de un fluido caloportador que está en un equilibrio bifásico líquido - vapor. El calor es absorbido por el fluido de una fuente caliente por la vaporización de la fase líquida y es cedido a una fuente fría por la condensación del vapor formado. Se puede definir un tubo de calor como un sistema evaporador - condensador en el cual el líquido regresa al evaporador por capilaridad. En cambio, en un termosifón, que es un tipo especial de tubo de calor, el líquido vuelve al evaporador por la fuerza de la gravedad.

1.2.1. Principio de funcionamiento

Un tubo de calor (*heat pipe*) es un dispositivo sencillo, sin partes móviles, que puede transferir elevadas cantidades de calor, de forma rápida, a distancias bastante grandes. A menudo se denominan “superconductores” de calor, puesto que poseen gran capacidad y tasa de transferencia de calor, sin apenas pérdidas. Pueden transportar densidades de flujo

térmico, en forma axial, muy importantes, del orden de varios kW/cm^2 , con una diferencia de temperatura muy pequeña y con muy diferentes rangos de temperatura. Su conductividad térmica es mucho más elevada que la del cobre, en un factor que puede variar en varios cientos de veces para los tubos de calor de metales líquidos hasta algunas decenas para tubos de calor a baja temperatura. Sus prestaciones se pueden caracterizar por medio de una conductividad, o resistencia, térmica equivalente.

La utilización del término “tubo de calor” tiende a ser, cada vez más, de uso corriente en el seno de la industria a medida que aumenta la difusión de soluciones tecnológicas que utilizan su principio de funcionamiento. Si bien los primeros usos de este dispositivo datan de los años cuarenta, la idea fue sugerida en 1942 por Gaugler. No obstante, la utilización de los tubos de calor arranca con el inicio de la conquista espacial, hacia 1963, año en que la idea fue retomada en una patente, por Grover. Es a partir de ese momento cuando las aplicaciones, en todos los ámbitos, no sólo en el espacial, se multiplican.

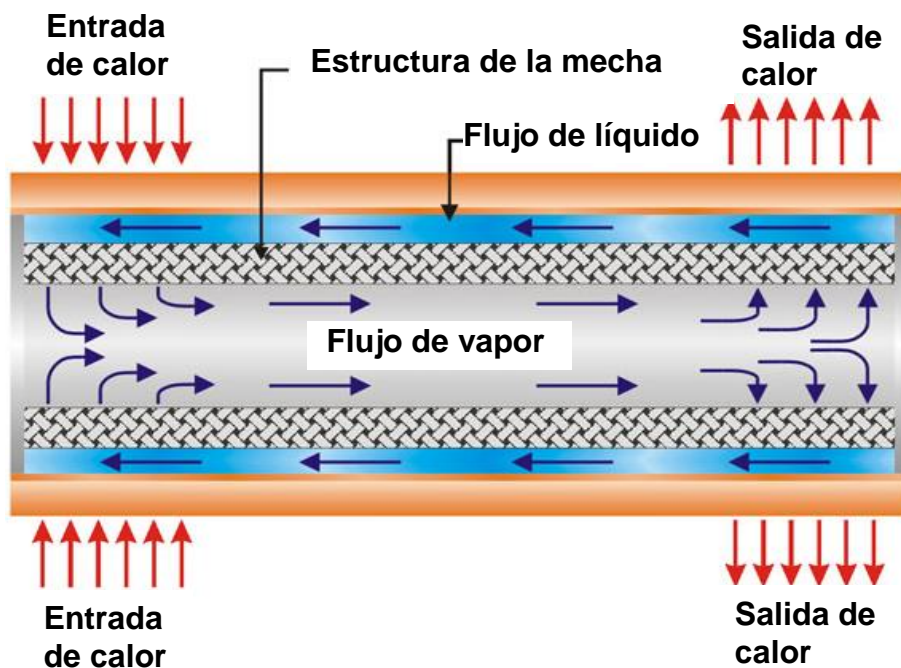


Figura 1.1. Esquema de funcionamiento de un tubo de calor.

Se trata básicamente de un tubo delgado y sellado que contiene una estructura porosa que recubre la superficie interior y con una pequeña cantidad de fluido, en estado saturado. Se compone de tres secciones: la del evaporador, situada en uno de los extremos, en donde el calor se absorbe y el fluido se vaporiza; la del condensador, en el otro extremo, en donde el

vapor se condensa y el calor se cede, y la adiabática, entre las dos anteriores, en donde las fases líquida y vapor del fluido se mueven, respectivamente y en direcciones opuestas, por el núcleo y la “mecha” o estructura porosa, para completar el ciclo sin una transferencia significativa de calor entre el fluido y el medio circundante. En la figura 1.1 se muestra su esquema de funcionamiento. Dado que en las condiciones de equilibrio, la temperatura permanece constante durante un proceso de cambio de fase para una presión fija, se pueden transferir grandes cantidades de calor durante la ebullición y la condensación, de forma isoterma, gracias al elevado valor de la entalpía, h_{fg} , de vaporización, o calor latente, intercambiado.

La transferencia de energía entre la zona del evaporador y la zona del condensador, utilizando el cambio de fase de un fluido, se hace siguiendo el ciclo de la figura 1.1 que se describe a continuación:

- a) El fluido se encuentra en el interior en un estado de equilibrio bifásico líquido - vapor. El líquido contenido en la estructura capilar se evapora cuando absorbe el calor suministrado en el evaporador.
- b) Esta vaporización provoca un aumento de la presión en la fase vapor lo que implica la aparición de un flujo de vapor hacia la zona del condensador, donde la presión es menor.
- c) El vapor se licua en la zona del condensador que está refrigerada, cediendo en esa parte la entalpía, o calor latente, de cambio de fase.
- d) En un tubo de calor, con bombeo capilar, el retorno del líquido entre la zona de condensación y la zona de evaporación está asegurado por el desplazamiento del mismo debido a fuerzas capilares en el seno de un medio poroso, el cual tiene características muy diversas.

Los principios físicos que rigen la transmisión de calor a través del tubo de calor son:

- En un conducto los fluidos se mueven en el sentido de la presión decreciente.
- La presión capilar desarrollada en una mecha moverá un líquido en ella, incluso en contra del campo gravitatorio, como resultado del efecto de capilaridad.

- A una presión o temperatura específicas, la cantidad de calor absorbido cuando se vaporiza una unidad de masa de líquido es igual a la cantidad de calor cedido cuando el vapor se condensa.
- A una presión específica, un líquido se vaporizará o un vapor se condensará a cierta temperatura, llamada temperatura de saturación. Por tanto, al fijar la temperatura en el interior de un tubo de calor se fija la presión a la cual ocurrirá el cambio de fase.

En la construcción de tubos de calor se han utilizado una gran diversidad de fluidos y de materiales para la envolvente. En la tabla 1.2 se resumen [3] algunas de las características típicas de su funcionamiento.

Tabla 1.2. Flujos de calor axial típicos de tubos de calor.

Temperatura (°C)	Fluido	Material del tubo de calor	Flujo de calor axial (kW/cm ²)
-160	Nitrógeno líquido	Acero inoxidable	0,067
-70 a +60	NH ₃ líquido	Acero inoxidable	0,3
-100	Metanol	Cobre	0,45
200	Agua	Cobre	0,67
750	Potasio	Níquel, acero inoxidable	5,6
850	Sodio	Níquel, acero inoxidable	9,3

Los flujos de calor obtenidos son muy altos, por esta razón, una parte importante de los trabajos de investigación están dedicados a los diseños óptimos de la mecha, con nuevas configuraciones para materiales que se extienden desde (véase Fig. 1.4) tamices de malla, fibras de acero inoxidable, fibras sinterizadas y polvos, hasta micro-ranuras o microcanales grabados con ácidos.

La estructura porosa proporciona el medio y la fuerza capilar impulsora del retorno del fluido, en fase líquida, del condensador al evaporador. Esta acción capilar permite que el tubo de calor opere en cualquier orientación dentro del campo gravitatorio. Sin embargo, su rendimiento será mejor cuando las fuerzas capilar y de la gravedad actúen en el mismo sentido (extremo del evaporador abajo) y será peor cuando estas dos fuerzas actúen en sentidos opuestos (extremo del evaporador arriba). En el primer caso, la acción de la gravedad sirve para acelerar, hacia abajo, la corriente de líquido por la mecha, ayudando a la acción capilar y duplicando la capacidad de transmisión del calor. Esto se denomina

inclinación favorable. En el caso opuesto, orientación vertical con el extremo del evaporador arriba, el rendimiento disminuye de manera considerable en relación con el caso horizontal, ya que la fuerza capilar debe trabajar contra la de la gravedad y se dice que el tubo de calor tiene una inclinación adversa. La gravedad no afecta a la fuerza capilar cuando el tubo se encuentra en posición horizontal. Por tanto, el tubo de calor puede funcionar con cualquier inclinación o, incluso, sin gravedad.

El movimiento del líquido en la mecha depende del equilibrio dinámico entre dos efectos contrapuestos: la presión debida a la capilaridad, que crea el efecto de succión para retornar el líquido, y la resistencia interna al flujo, como resultado de la fricción entre las superficies de la mecha y el líquido. Un tamaño pequeño de poro incrementa la acción capilar al ser inversamente proporcional al radio capilar efectivo de la malla. Pero al disminuir el tamaño del poro y, de este modo el radio capilar, también se incrementa la fricción que se opone al movimiento. Por lo tanto, el tamaño del poro de la malla se debe reducir mientras el incremento en la fuerza capilar sea mayor que el incremento en la fuerza de fricción.

Cabe destacar que el tamaño óptimo de poro será diferente según los fluidos de trabajo utilizados y las diferentes orientaciones que adopte el tubo de calor. Una mecha mal diseñada da como resultado un retorno inadecuado de líquido al evaporador y aumenta la posibilidad de que posteriormente se produzcan averías en su funcionamiento.

La estructura de la mecha tiene un importante efecto sobre el funcionamiento del tubo; su diseño y construcción están entre los aspectos más críticos del proceso de fabricación. A menudo, las mechas se fabrican de cerámica porosa o de malla tejida de acero inoxidable. También se producen junto con el tubo, extrusionadas con las ranuras axiales a lo largo de su superficie interior, pero este procedimiento presenta dificultades de fabricación.

1.2.2. Propiedades

Tanto los tubos de calor como los termosifones cumplen varias propiedades que determinan las áreas en las cuales se deben buscar sus aplicaciones. Se pueden destacar las siguientes:

- a) Los dispositivos que trabajan por el principio de transferencia de calor por medio del cambio de fase pueden tener una mayor capacidad de transmisión del calor, superior en varios órdenes de magnitud, que los mejores conductores metálicos, como la plata o el cobre.
- b) Una segunda propiedad de estos dispositivos es el llamado aplanamiento de temperatura (*temperature flattening*). Hay muchas aplicaciones de transmisión de calor en las que se necesita grandes áreas superficiales a una temperatura uniforme. Sin un tubo de calor, se requeriría mucho cuidado para asegurar una temperatura uniforme de la fuente de calor. Sin embargo, se podría acoplar un tubo de calor o un termosifón a una fuente de calor no uniforme y obtener una temperatura uniforme a la salida. Variaciones en la temperatura de la fuente afectan solamente al ritmo de evaporación; un aumento de la temperatura de la fuente de calor en un punto del evaporador causa una subida del ritmo de evaporación en ese punto, sin afectar a la temperatura de evaporación. La condensación del fluido de trabajo en la zona de entrega de calor tiene lugar a la temperatura a la que ocurrió la evaporación, sin importar la forma de entrada de calor. El tubo de calor es, por tanto, un dispositivo isotérmico para la mayoría de los propósitos prácticos en ingeniería.
- c) Los procesos de evaporación y condensación de un tubo de calor son operaciones independientes conectadas sólo por las corrientes de vapor y de líquido en el interior del tubo. Las condiciones y el área de la evaporación y la condensación son independientes. Por lo tanto el proceso en uno de los extremos del tubo puede ser uniforme o no uniforme, sobre una gran o pequeña área, sin que esto influya mucho en lo que esté ocurriendo en el otro extremo. Esta separación de funciones conduce a una de las propiedades más valiosas del tubo de calor: su capacidad para concentrar o dispersar el calor, llamada transformación de flujo de calor (*heat-flux transformation*). Se puede introducir una gran potencia sobre un área pequeña o una baja potencia sobre una gran área, evaporándose en ambos casos la misma cantidad de fluido de trabajo. De forma similar, una cantidad de vapor puede ser condensada rápidamente sobre una pequeña área o lentamente sobre una gran área. Es la razón de la superficie de evaporación frente a la superficie de condensación la que determina si la energía térmica está siendo dispersada o concentrada a una

temperatura constante. De esta manera, la potencia térmica disponible por unidad de superficie de intercambio de calor puede ser tanto aumentada como disminuida. Esta propiedad del tubo de calor hace posible unir fuentes y usuarios de calor anteriormente incompatibles por sus diferencias en la velocidad de la transferencia de calor natural. Esta propiedad resulta particularmente útil en el control térmico de componentes y sistemas electrónicos, porque permite reducir los grandes flujos de calor generados al nivel del componente y disipar sin problemas el calor por convección forzada o natural.

- d) Hace posible separar la fuente de calor del sumidero de calor. En muchas ocasiones no es deseable tener la fuente de calor y el sumidero del calor en contacto. En un reactor nuclear, sería necesario transportar el calor a través del blindaje contra la radiación hacia el punto de uso, sin tener disminución de la temperatura.
- e) Pueden trabajar de modo que la potencia calorífica y/o la temperatura a la que la potencia es evacuada por el condensador pueda mantenerse constante, a pesar de una gran variación de la potencia de entrada al tubo de calor. Esto se consigue con los llamados tubos de calor de conductancia variable.
- f) Es destacable, además, la rápida respuesta térmica de los tubos de calor en comparación con otros tipos de transmisores del calor, en particular de los conductores sólidos, con la importante característica de que no es función de la longitud del tubo de calor.

1.2.3. Esquema teórico de funcionamiento

Para mostrar de forma más precisa el principio de funcionamiento se considera el caso de un tubo de calor cilíndrico que funciona por bombeo capilar.

En el tubo de calor de la figura 1.2 el evaporador está situado en la parte superior. El calor absorbido por el fluido hace que éste se vaporice y, una vez convertido en vapor, fluya hacia abajo, a lo largo del núcleo central del tubo, hacia el condensador. Allí cede, en forma de calor, la energía contenida en la entalpía de vaporización. El líquido condensado es bombeado de nuevo al evaporador mediante la acción de la tensión superficial en la estructura capilar del revestimiento. La caída de presión en el vapor es relativamente baja, por lo que la diferencia de temperatura entre el evaporador y el condensador es pequeña y esto produce una conductividad equivalente muy elevada. En la figura se puede observar una característica esencial de los tubos de calor; la ausencia de sistemas mecánicos de bombeo del fluido, tanto en la fase líquida como en la fase vapor.

Para que pueda funcionar se debe cumplir que la máxima elevación de presión por capilaridad (límite de capilaridad) debe igualarse con la caída [4] de presión total en el tubo. Por tanto, se cumplirá la ecuación 1.1:

$$\Delta p_{cp} = \Delta p_v + \Delta p_i + \Delta p_l + \Delta p_{gt} + \Delta p_{gl} \quad (1.1)$$

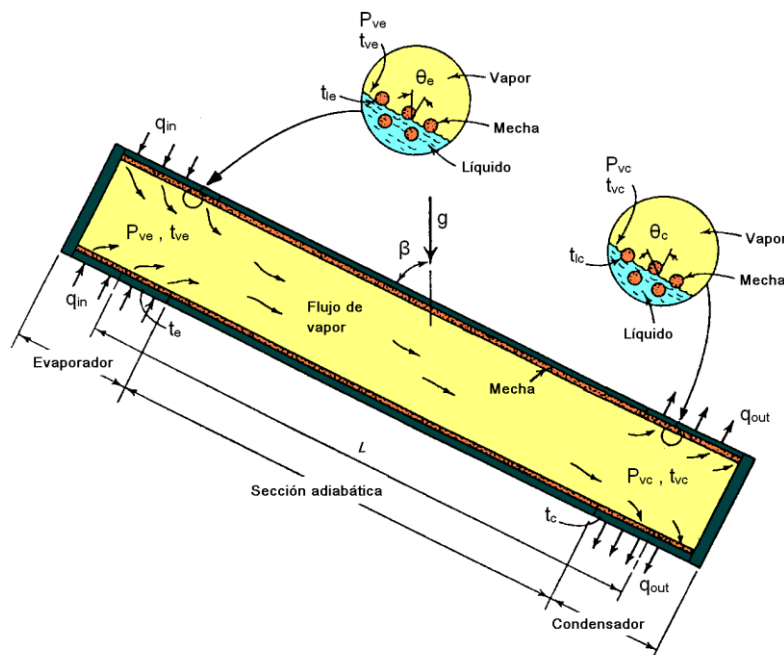


Figura 1.2. Esquema teórico de un tubo de calor.

donde:

Δp_{cp} ; es la presión de carga por bombeo capilar. La diferencia de presión dada por la ecuación es la presión motriz que transporta al líquido desde el condensador hasta el evaporador.

Δp_v ; es la caída de presión debida a la fricción en el vapor y se debe al flujo del vapor generado, que va del evaporador al condensador.

Δp_i ; es la caída de presión debida a la inercia del vapor. Su valor suele ser muy pequeño y, además, una gran parte se recupera en el condensador.

Δp_l ; es la caída de presión debida al rozamiento que aparece en el líquido cuando retorna del condensador al evaporador.

Δp_{gt} ; es la caída de presión hidrostática transversal. Su valor no es muy importante en la mayor parte de los casos.

Δp_{gl} ; es la caída de presión hidrostática longitudinal. Es la diferencia de presión debida al peso de la columna de líquido, la cual puede ser positiva, negativa o cero.

Si se tiene en cuenta que: $\Delta p_i \approx 0$ y $\Delta p_{gt} = \rho_l \cdot g \cdot d_v \cdot \text{sen}\beta \approx 0$, la ecuación se simplifica:

$$\Delta p_{cp} \approx \Delta p_v + \Delta p_l + \Delta p_{gl} \quad (1.2)$$

Es decir, la ecuación 1.2 queda, de manera simplificada:

$$\Delta p_l \approx \Delta p_{cp} - \Delta p_v - \Delta p_{gl} \quad (1.3)$$

Para determinar Δp_l se utiliza [1] la ley de Darcy. En este caso:

$$\Delta p_l = p_{lc} - p_{le} = \frac{\mu_l L_{ef} \dot{m}}{\rho_l A K} \quad (1.4)$$

siendo K la permeabilidad y L_{ef} la longitud efectiva del tubo de calor, cuya expresión es:

$$L_{ef} = \frac{L_e}{2} + L_a + \frac{L_c}{2}$$

La presión de bombeo debida a la capilaridad, siendo θ el ángulo de mojado, es:

$$\Delta p_{cp} = \frac{2\sigma}{r} (\cos \theta_e - \cos \theta_c) \quad (1.5)$$

La pérdida de presión en el vapor se halla por medio de la ecuación de Hagen-Poiseuille.

La expresión es:

$$\Delta p_v = p_{vc} - p_{ve} = -\frac{8\mu_v L_{ef} \dot{m}}{\pi \rho_v r_v^4} = -\frac{32\mu_v L_{ef} \dot{m}}{\rho_v A d_v^2}$$

Y la caída de presión hidrostática longitudinal, debida a la columna de líquido:

$$\Delta p_{gl} = g \rho_l L \cos \beta \quad (1.6)$$

La expresión que permite calcular el flujo máximo \dot{m} se puede obtener [5] si se supone:

- Estado estacionario y flujo laminar.
- Que las propiedades del líquido no se modifican a lo largo del tubo de calor.
- Que la mecha es uniforme en todo el tubo.
- Que la caída de presión en el vapor, Δp_v se puede despreciar.

El flujo másico de fluido en el tubo, obtenido con (1.4) será:

$$\dot{m} = \frac{\rho_l A K}{\mu_l L_{ef}} \Delta p_1 \quad (1.7)$$

Sustituyendo el valor de Δp_1 por las expresiones halladas para las caídas de presión dadas en la ecuación 1.3, se obtiene:

$$\dot{m} = \frac{AK}{L_{ef}} \frac{\rho_l}{\mu_l} \left[\frac{2\sigma(\cos \theta_e - \cos \theta_c)}{r} - g \rho_l L \cos \beta \right] \quad (1.8)$$

Se cumple que la potencia térmica [6] transportada será:

$$\dot{Q} = \dot{m} h_{fg} \quad (1.9)$$

Sustituyendo el flujo másico en la ecuación anterior:

$$\dot{Q} = \frac{AK}{L_{ef}} \frac{\rho_l}{\mu_l} \left[\frac{2\sigma(\cos \theta_e - \cos \theta_c)}{r} - g \rho_l L \cos \beta \right] \cdot h_{fg} \quad (1.10)$$

Para producir una velocidad positiva en el flujo, y de este modo el flujo de calor, la diferencia entre los dos cosenos debe ser positiva. La velocidad máxima de circulación y el máximo flujo de calor se producen cuando el $\cos \theta_e \rightarrow 1$ y el $\cos \theta_c \rightarrow 0$.

Ordenando términos se obtiene el calor máximo:

$$\dot{Q}_{max} = \frac{2AK}{rL_{ef}} \frac{\sigma \rho_l h_{fg}}{\mu_l} \left[1 - \frac{g \rho_l L r}{2\sigma} \cos \beta \right] \quad (1.11)$$

Aunque la ecuación se ha obtenido a partir de un análisis muy simplificado permite la identificación de parámetros importantes. Se puede observar que la potencia térmica máxima transportada es el producto de tres factores. El primero, $\frac{2AK}{rL_{ef}}$, es una combinación

de las propiedades de la mecha. El tercero, $\frac{g \rho_l L r}{2\sigma} \cos \beta$, lo es de las propiedades del revestimiento y del líquido. En situación de ingravidez, $g = 0$, o para un tubo en posición horizontal, $\beta = 90^\circ$, este término vale cero.

El segundo factor es importante y comprende una serie de propiedades termofísticas del líquido. Recibe el nombre de factor, o coeficiente, de transporte del líquido (*figure of merit*) y en el diseño de los tubos de calor lo que interesa es que sea lo mayor posible.

$$N = \frac{\sigma \rho_l h_{fg}}{\mu_l} \quad (1.12)$$

En la figura 1.3 se muestra el coeficiente de transporte [7] de varios fluidos de trabajo.

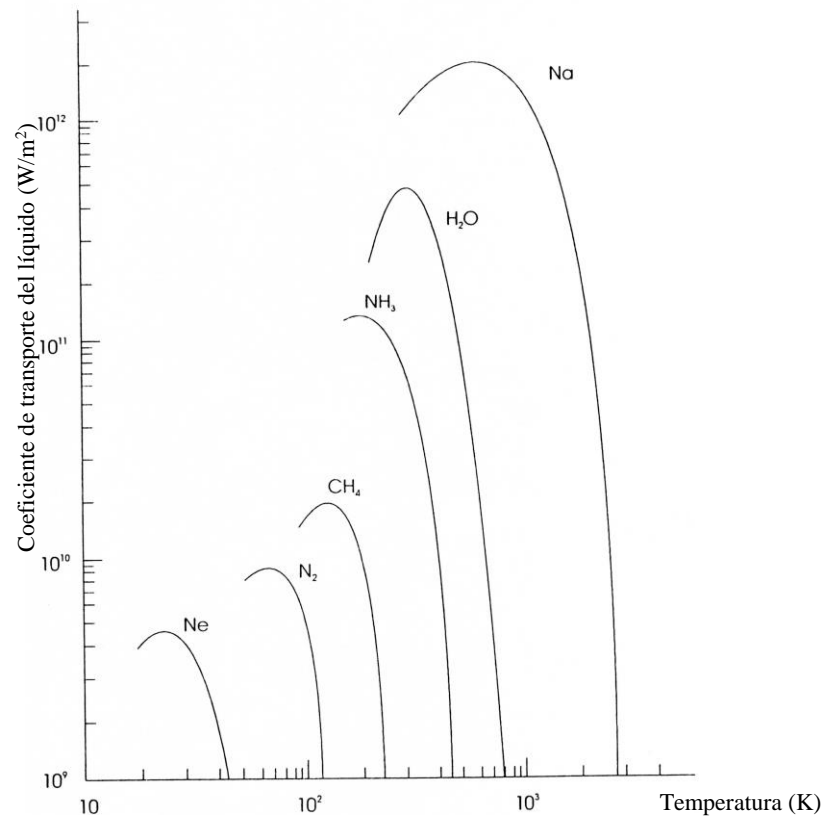


Figura 1.3. Coeficiente de transporte de fluidos de trabajo en función de la temperatura.

1.2.4. Clasificación de los tubos de calor

Dada la complejidad de los fenómenos físicos puestos en juego existen distintos criterios de clasificación. Los tubos de calor se pueden clasificar en tres tipos fundamentales, en función de tres parámetros que se pueden considerar fundamentales: según la forma y tamaño de la sección del flujo, las fuerzas motrices, o de accionamiento, de la fase líquida y según la temperatura de funcionamiento. Además, se pueden tener en cuenta otros factores como su tamaño hablándose, por ejemplo, de minitubos (mHPs) y microtubos [8] para aplicaciones de refrigeración de componentes electrónicos como sistemas pasivos. Otro tipo muy importante son los de conductancia variable, debida a la presencia de un tapón de gas no condensable en el condensador, que hace que varíe la superficie de intercambio en el condensador.

1.2.4.1. Forma de los tubos de calor

La forma del relleno determina en gran medida el rendimiento del tubo de calor, así como también la sección de paso. En varios casos se pretende que los flujos de vapor y líquido no entren en contacto. El término, tubo de calor cilíndrico, agrupa todos los sistemas que representan un flujo líquido-vapor a contracorriente. Los distintos casos [9] se pueden ver en la figura 1.4.

Tamiz enrollado; es una tela de alambre (*Wrapped Screen*) con una o más capas enrolladas de forma concéntrica dentro del tubo dejando un hueco cilíndrico en medio para que circule el vapor. Es uno de los más utilizados. No debe emplearse con fuerzas gravitacionales adversas.

Fibras metálicas; Se coloca de forma similar al anterior (*Sintered Felt*). Sus aplicaciones y rangos de trabajo son parecidos.

Polvo metálico sinterizado; Es uno de los más eficaces (*Sintered metal*) y puede trabajar con fuerzas gravitatorias adversas.

Ranuras axiales; Es el más sencillo pero no puede trabajar contra la gravedad. Las ranuras (*Axial Groove*) suelen ser rectangulares o triangulares y pueden estar cubiertas o descubiertas.

Espacio anular; El líquido fluye por el espacio anular (*Concentric Annulus*) contenido entre dos superficies cilíndricas. Es más sencillo pero menos eficaz que el anterior.

Con ranura anexa, fue desarrollado por Grumann y utiliza una sección transversal construida por extrusión (*Monogroove*), la cual separa el espacio destinado al vapor de la senda de retorno del líquido.

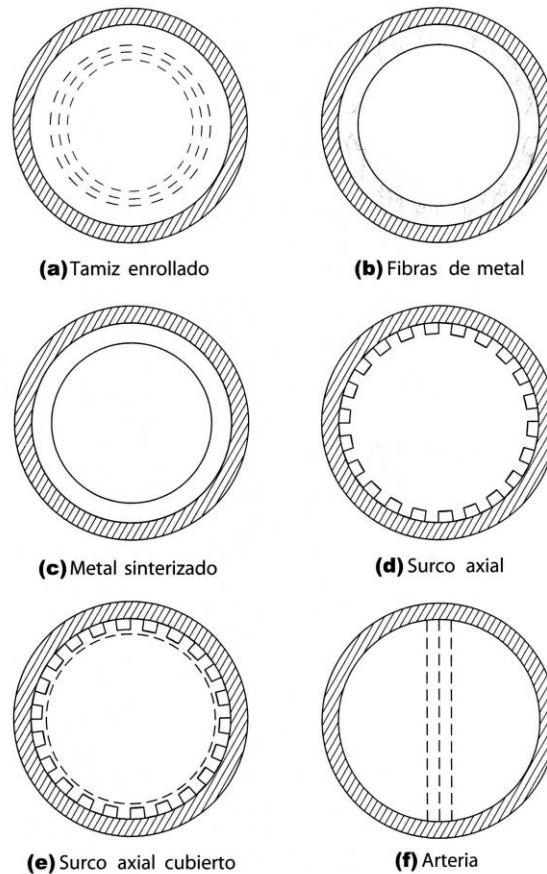


Figura 1.4. Formas y tipos de mecha.

1.2.4.2. Fuerzas motrices, o de accionamiento, de la fase líquida

Las aplicaciones espaciales utilizan fundamentalmente las presiones capilares para asegurar la presión en el fluido. En las aplicaciones terrestres las fuerzas debidas a campos constituyen un elemento esencial pues actúan directamente sobre el fluido y, especialmente, sobre la fase líquida que tiene una densidad más elevada.

- **Fuerzas de bombeo capilar:** Éstas aseguran el retorno del líquido del condensador al evaporador, lo que permite realizar una circulación en un bucle cerrado sin aportación de energía mecánica. La forma en que actúan las fuerzas de bombeo capilar ha sido estudiada en el apartado 1.2.3.

Cuando las fuerzas debidas a la capilaridad son muy inferiores, despreciables, a las fuerzas engendradas por otros fenómenos las causas físicas que originan el desplazamiento del fluido son muy diferentes:

- Fuerzas gravitatorias (termosifones)
- Fuerzas de inercia debidas a la rotación, el giro o aceleraciones longitudinales
- Fuerza de ósmosis
- Campos magnéticos o electrostáticos

1.2.4.3. Rango de temperaturas de trabajo

Cada tipo de tubo de calor tiene su rango particular de temperaturas de trabajo, que a su vez está relacionado con el fluido que utiliza y las presiones de trabajo.

Pueden y deben usarse distintos fluidos de trabajo según el rango de temperaturas en el que se vaya a operar. De esta forma, en la construcción de tubos de calor, habrá que analizar previamente cuáles van a ser las condiciones específicas en las que va a trabajar la sustancia. Estas condiciones pueden variar desde las que se tienen en aplicaciones en criogenización hasta las que aparecen en la evacuación de calor en altos hornos. En Faghri [10] se muestran (véase la tabla 1.3) los rangos apropiados de la temperatura de trabajo para algunos fluidos comunes en los tubos de calor.

Cabe destacar que el rango total de temperatura se extiende desde casi el cero absoluto para fluidos criogénicos, como el helio, hasta más de 1600 °C, para metales líquidos, como el litio. Los últimos límites de temperatura para un fluido son las temperaturas del punto triple y del punto crítico. Sin embargo, en la práctica se usa un rango más estrecho de temperaturas para evitar las presiones extremas y los bajos calores de vaporización que se tienen cerca del punto crítico. Otras características deseables de los fluidos son que tengan una elevada tensión superficial para mejorar el efecto de capilaridad. En el capítulo 3 de la tesis se analizarán detenidamente todas las propiedades que deben tener los fluidos de trabajo.

Según el rango de temperaturas de funcionamiento se habla de tubos de calor criogénicos, de baja temperatura, de temperatura media y de alta temperatura.

Criogénicos. Son los que operan desde 4 K hasta 200 K. Entre los fluidos habituales están los gases nobles como el helio o el neón y el oxígeno. La cantidad de calor que se puede

transmitir es muy pequeña debido a los bajos calores de vaporización, altas viscosidades y pequeñas tensiones superficiales.

Baja temperatura. Trabajan desde 200 K hasta 550 K. Es en esta zona donde aparece el mayor número de aplicaciones. Entre los fluidos más importantes están el amoníaco, el metanol, los refrigerantes fluorados y el agua.

Tabla 1.3. Características e intervalos apropiados de temperatura para algunos fluidos.

Fluido de trabajo	Punto de fusión (K), a 1 atm	Punto de ebullición (K), a 1 atm	Rango de trabajo (K)
Helio	1,0	4,21	2-4
Hidrógeno	13,8	20,38	14-31
Neón	24,4	27,09	27-37
Nitrógeno	63,1	77,35	70-103
Argón	83,9	87,29	84-116
Oxígeno	54,7	90,18	73-119
Metano	90,6	111,4	91-150
Kriptón	115,8	119,7	116-160
Etano	89,9	184,6	150-240
Freón 22	113,1	232,2	193-297
Amoníaco	195,5	239,9	213-373
Freón 21	138,1	282,0	233-360
Freón 11	162,1	296,8	233-393
Pentano	143,1	309,2	253-393
Freón 113	236,5	320,8	263-373
Acetona	180,0	329,4	273-393
Metanol	175,1	337,8	283-403
Etanol	158,7	351,5	273-403
Heptano	182,5	371,5	273-423
Agua	273,1	373,1	303-473
Tolueno	178,1	383,7	323-473
Naftaleno	353,4	490	408-478
Mercurio	234,2	630,1	523-923
Azufre	385,9	717,8	530-947
Cesio	301,6	943,0	723-1173
Rubidio	312,7	959,2	800-1275
Potasio	336,4	1032	773-1273
Sodio	371,0	1151	873-1473
Litio	453,7	1615	1273-2073
Calcio	1112	1762	1400-2100
Plomo	600,6	2013	1670-2200
Indio	429,7	2353	2000-3000
Plata	1234	2485	2073-2573

Media temperatura. El rango está comprendido entre 550 K y 750 K y los fluidos más destacados son el mercurio y el azufre. El mercurio es especialmente atractivo por ser metal y su alta conductividad térmica.

Alta temperatura. Los metales alcalinos tales como el sodio y el potasio son utilizados, frecuentemente, en esta zona cuando la temperatura es superior a 750 K. En general el transporte de calor con metales líquidos, a estas temperaturas, es mejor que en los rangos anteriores dado que, tanto el calor de vaporización como la conductividad térmica son muy elevados.

Es muy importante la elección del fluido de trabajo, material de la mecha, material del tubo de calor y el utilizado en las soldaduras, pues pueden verse afectados su vida útil y su funcionamiento. Puede ocurrir que las distintas partes reaccionen químicamente o que establezcan una pila galvánica. La compatibilidad [10] entre materiales y fluidos de trabajo puede observarse en la tabla 1.4.

Tabla 1.4. Resultados de ensayos experimentales de compatibilidad.

Fluido de trabajo	Material compatible	Material incompatible
Agua	Acero inoxidable, Cobre, Sílice, Níquel, Titanio	Aluminio, Inconel
Amoniaco	Aluminio, Acero inoxidable, Acero frío, Hierro, Níquel	Cobre
Metanol	Acero inoxidable, Hierro, Cobre, Latón, Sílice	Aluminio
Acetona	Aluminio, Acero inoxidable, Cobre, Latón Sílice	
Freón-11	Aluminio	
Freón-21	Aluminio, Hierro	
Freón-113	Aluminio	
Heptano	Aluminio	
Litio	Tungsteno, Tántalo, Molibdeno, Niobio	Acero inoxidable, Níquel, Inconel, Titanio
Sodio	Acero inoxidable, Níquel, Inconel, Niobio	Titanio
Cesio	Titanio, Niobio	
Mercurio	Acero inoxidable	Molibdeno, Níquel, Tántalo, Inconel, Titanio, Niobio
Plomo	Tungsteno, Tántalo	Acero inoxidable, Níquel, Inconel, Titanio, Niobio
Plata	Tungsteno, Tántalo	Renio

1.2.5. Límites de funcionamiento

Las limitaciones al funcionamiento en un tubo de calor son:

- **Límite viscoso**, a bajas temperaturas, y especialmente en el arranque, puede suceder que la diferencia de presión entre las zonas del evaporador y del condensador sea demasiado pequeña. Cuando esto ocurre el gradiente de presión en el interior de la región de vapor podría no equilibrar la caída de presión del vapor debida a las fuerzas viscosas en el evaporador, por lo que se interrumpirá el flujo de vapor. Aparece en tubos de calor criogénicos, aquellos que tiene un condensador extremadamente largo o si el arranque está por debajo de la zona de congelación.

El máximo calor axial, hallado por Busse [11], que puede transportar un tubo de calor previamente a alcanzar el límite viscoso, viene dado por la expresión:

$$\dot{Q}_{\text{vis}} = \frac{Ar^2 h_{\text{fg}} \rho_v p_v}{16\mu_v L_{\text{ef}}} \quad (1.13)$$

- **Límite sónico**, si la velocidad del vapor a la salida del evaporador llegase hasta el valor de la del sonido los cambios de presión en el condensador no se transmitirían al evaporador, produciéndose un estrangulamiento del flujo de fluido. Ocurre a veces con metales líquidos como el potasio.

El flujo de calor para el límite sónico [11] se puede calcular por la expresión:

$$\dot{Q}_{\text{son}} = 0,474 \cdot A_v h_{\text{fg}} (\rho_v p_v)^{1/2} \quad (1.14)$$

- **Límite capilar**, también llamado de circulación, aparece en el caso de que la diferencia de presiones debida al efecto capilar no sea suficiente para vencer a las distintas caídas de presión, produciéndose el secado del evaporador y el cese de su funcionamiento. Supone el límite superior de temperaturas.

Como se ha visto en 1.2.3, la condición que se debe cumplir es la ecuación 1.1:

$$\Delta p_{\text{cp}} = \Delta p_v + \Delta p_i + \Delta p_l + \Delta p_{\text{gt}} + \Delta p_{\text{gl}}$$

donde las expresiones son las mismas que en dicha ecuación. Este límite es el que permite hallar una primera aproximación al factor de transporte, en función de las

propiedades termofísicas del fluido, de un tubo de calor. El flujo de calor máximo está dado por la ecuación 1.11. Si no se hubiesen hecho simplificaciones en su deducción, la expresión hallada de forma más general sería:

$$\dot{Q}_{cp} = \frac{r \left(\frac{2\sigma}{r} - g(\rho_1 L_{ef} \cos \beta - \rho_1 d_v \sin \beta) \right)}{\frac{L_{ef} \mu_1}{KA_1 \rho_1 h_{fg}} + \frac{32 L_{ef} \mu_v}{A_v d_v^2 \rho_v h_{fg}}} \quad (1.15)$$

- **Límite de arrastre**, dado que hay dos fases de fluido moviéndose en sentidos opuestos puede suceder que se provoque el arrastre del líquido si la velocidad del vapor es muy elevada. Se puede llegar a detener el flujo de fluido en el condensador y la aparición del secado (*dry out*) en la zona del evaporador

El número de Weber, We , establece la relación entre las fuerzas de inercia y la tensión superficial. Si, según Cotter [12], se asume que debe ser menor que la unidad para prevenir el arrastre de gotas de líquido en el flujo de vapor, el valor máximo del calor se puede expresar como:

$$\dot{Q}_{arr} = Ah_{fg} \left(\frac{\sigma \rho_v}{2r_{h,w}} \right)^{1/2} \quad (1.16)$$

donde $r_{h,w}$ es el radio hidráulico de la estructura porosa.

- **Límite de ebullición**, la formación de burbujas en la fase líquida de un flujo bifásico es un fenómeno que favorece el proceso de convección. Ahora bien, en un tubo de calor no se necesita la convección y la formación de burbujas puede provocar la existencia de puntos calientes y contrarrestar la acción capilar de la estructura porosa, pudiendo dañarse el tubo de calor por recalentamientos (*burnout*). Depende del flujo de calor radial aplicado al evaporador y no del flujo de calor axial transportado por el tubo de calor.

La siguiente expresión, debida a Chi [13] es función de las propiedades del fluido y se cumple que k_{eff} es la conductividad térmica efectiva de la combinación mecha-líquido, r_i es el radio interior de la pared del tubo de calor y r_n es el radio de nucleación.

$$\dot{Q}_{\text{eb}} = A \left(\frac{L_e k_{\text{eff}} T_v}{\rho_v h_{\text{fg}} \ln(r_i/r_v)} \right) \left(\frac{2\sigma}{r_n} - \Delta p_{\text{c,m}} \right) \quad (1.17)$$

Todas estas limitaciones [7] se pueden expresar en función de la potencia calorífica utilizada por el tubo de calor, pudiéndose obtener los flujos de calor dentro de las cuales es posible su funcionamiento, y las temperaturas, según el fluido utilizado. Las limitaciones al flujo máximo de calor están representadas en [7] la figura 1.5. La elección del fluido debe ser tal que el tubo de calor trabaje bien más allá del límite viscoso, incluso en el arranque.

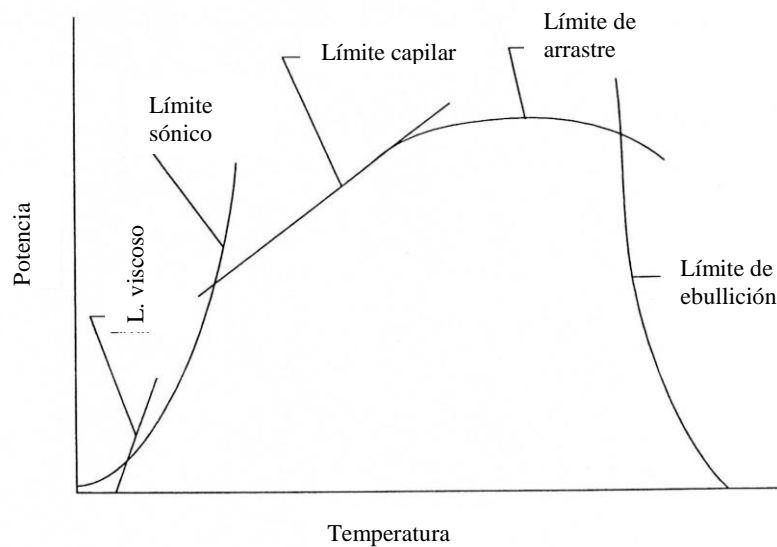


Figura 1.5. Limitaciones del flujo máximo de calor para un tubo de calor en función de la temperatura de trabajo.

1.3. Termosifón

Un termosifón bifásico (en inglés, *thermosiphon* o *thermosyphon*) es un tipo particular de tubo de calor, que consiste en un recinto estanco, cerrado y sin mecha que contiene un fluido en su interior y que se coloca verticalmente.

La diferencia entre un tubo de calor y un termosifón radica en que mientras en el primero el líquido vuelve al evaporador, a través del material poroso que recubre la pared interna del tubo, por capilaridad, en el segundo retorna por gravedad al no tener mecha. De este modo, así como el tubo de calor puede instalarse, sin problemas, en posición horizontal, el termosifón tiene que permanecer necesariamente en posición vertical o con un determinado ángulo de inclinación. Al no presentar estructura capilar el condensado es devuelto hacia el evaporador por gravedad. Esto restringe la utilización del termosifón a aplicaciones donde exista un campo gravitatorio y obliga a que el evaporador esté situado más bajo que el condensador.

Se trata de un tipo especial de intercambiador con más ventajas que los tradicionales, simple en diseño, fiable y sin partes móviles, mayor campo de aplicación y más bajo coste. Un intercambiador de calor es un dispositivo diseñado para transferir de manera eficiente el calor de un fluido a otro, tanto si están separados por una barrera sólida como si se encuentran en contacto. Son parte esencial de los equipos de refrigeración, acondicionamiento de aire, producción de energía y procesamiento químico.

Para muchos autores el termosifón, más que un intercambiador de calor, es un disipador de calor, pues se ajusta más a la definición de disipador de calor, como un elemento físico, sin partes móviles, destinado a eliminar el exceso de calor de cualquier elemento.

Contiene en su interior una sustancia en estado líquido en equilibrio con su vapor y con ausencia total de aire o de otro gas inerte. El líquido situado en el evaporador, parte inferior del termosifón, recibe el calor que se desea disipar y se transforma en vapor. Dada la diferencia de densidades entre la fase líquida y la fase vapor de la sustancia, dicho vapor se elevará hasta llegar a la parte superior, donde condensa, debido a que esta parte del termosifón se encuentra más fría que la parte inferior. En la figura 1.6 se ve un esquema de su funcionamiento.

El termosifón permite el transporte de una gran cantidad de energía debido a que el fluido de trabajo cambia de fase. Existe una transferencia de calor de manera continua por la transformación de calor sensible en calor latente. Uno de los aspectos a destacar de este sistema de transporte de calor es que, al estar basado en el cambio de fase, no tiene necesidad de ningún tipo de equipo que aporte energía externa para lograr su funcionamiento. Respecto de otros sistemas, su objetivo es el de simplificar el bombeo del líquido y la transmisión de calor, evitando la complejidad y el coste de una bomba convencional de líquido. Según Larkin [14] encaja bien con el epigrama acuñado para el láser: “una solución a la búsqueda de problemas”.

Sus propiedades más importantes son similares a las de un tubo de calor y se han expuesto en 1.2.2. Además, los termosifones funcionan de manera muy sencilla como diodos térmicos pues el proceso es térmicamente asimétrico y el flujo de calor se da preferentemente [15] en un único sentido, dado que si se cambia la posición del evaporador por el condensador el líquido queda retenido en su depósito. En este caso el termosifón no funciona y cesa la transferencia de calor. También es posible que actúe como interruptor térmico, funcionando solamente en un rango de temperaturas dado.

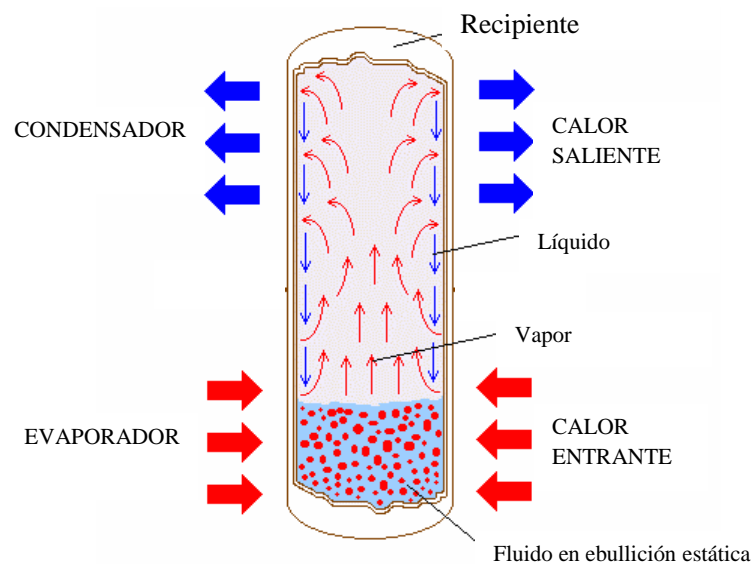


Figura 1.6. Esquema de funcionamiento de un termosifón bifásico.

1.3.1. Principios de funcionamiento

En el interior del termosifón el fluido de trabajo circula gracias a las diferencias de densidad entre el líquido y el vapor. El principio de funcionamiento es muy simple, puesto que se trata de un ciclo de evaporación-condensación de un fluido de trabajo. En el evaporador el líquido recibe el calor y sufre un cambio de fase. El vapor formado se desplaza hacia el condensador, a causa de la diferencia de presión creada por la caída de temperatura entre la parte caliente (evaporador) y la parte refrigerada (condensador). En el condensador, el vapor cede el calor al exterior y se condensa. El condensado es devuelto hacia el evaporador por gravedad; es preciso, por tanto, que esté colocado más bajo que el condensador. Entre el evaporador y el condensador se encuentra la zona adiabática en la cual el líquido y el vapor circulan a contracorriente. Esta parte, cuya longitud es muy variable en función del tipo de aplicación, únicamente sirve para conectar las dos zonas antes citadas.

Su nombre deriva del “efecto termosifón”. Un fluido que se encuentra únicamente en fase líquida, al calentarse y absorber energía, aumenta su temperatura y disminuye su densidad. Este hecho hace que en un circuito cerrado el líquido frío y, por tanto, de mayor densidad, que se encuentre en la parte alta del mismo tienda a ser sustituido (descendiendo por gravedad) por otro más caliente, que se encuentre en la parte baja. Ello origina un movimiento natural de circulación que se denomina efecto termosifón y los equipos reciben el nombre de termosifones monofásicos. Actualmente muchos equipos de producción de energía solar térmica están calculados para utilizar el efecto termosifón y almacenar el agua calentada por el Sol, en la parte alta de la instalación.

El ciclo termodinámico [10] de un termosifón bifásico está descrito en la figura 1.7. El diagrama entrópico permite ver las pérdidas por rozamiento en los flujos las cuales se materializan en un aumento de entropía. La transferencia de calor se realiza de la fuente caliente a la temperatura T_2 (temperatura de evaporación) hacia la fuente fría o sumidero, a T_4 (temperatura de condensación).

El ciclo puede ser descrito según cuatro etapas principales:

- Proceso 1-2: Corresponde a la evaporación y se produce en dos etapas. La primera entre 1 y 1' en el que se produce un calentamiento isobárico del líquido subenfriado. Posteriormente entre 1' y 2 el líquido pasa al estado de vapor.
- Proceso 2-3: Es el flujo de la fase de vapor. Este flujo necesita una diferencia de presión que está en el origen de la diferencia de temperatura entre el condensador y el evaporador. Se generan, también, pérdidas viscosas que se reflejan en un aumento de entropía (el efecto de la gravedad es despreciable). Debido a la presencia simultánea de la fase vapor y la fase líquida se considera que la transformación sigue la curva de vapor.
- Proceso 3-4: Condensación de la fase de vapor. El líquido en el punto 4 puede estar incluso subenfriado según la configuración del condensador.
- Proceso 4-1: Flujo de la fase líquida bajo el efecto de la gravedad. La presión aumenta a lo largo de toda la longitud del termosifón. Se puede observar que las fuerzas gravitatorias se utilizan para compensar las pérdidas de carga por rozamiento y disipaciones viscosas en el líquido. Estas pérdidas se traducen en un aumento de entropía entre 4 y 1. Se puede señalar que el líquido en 1 está subenfriado.

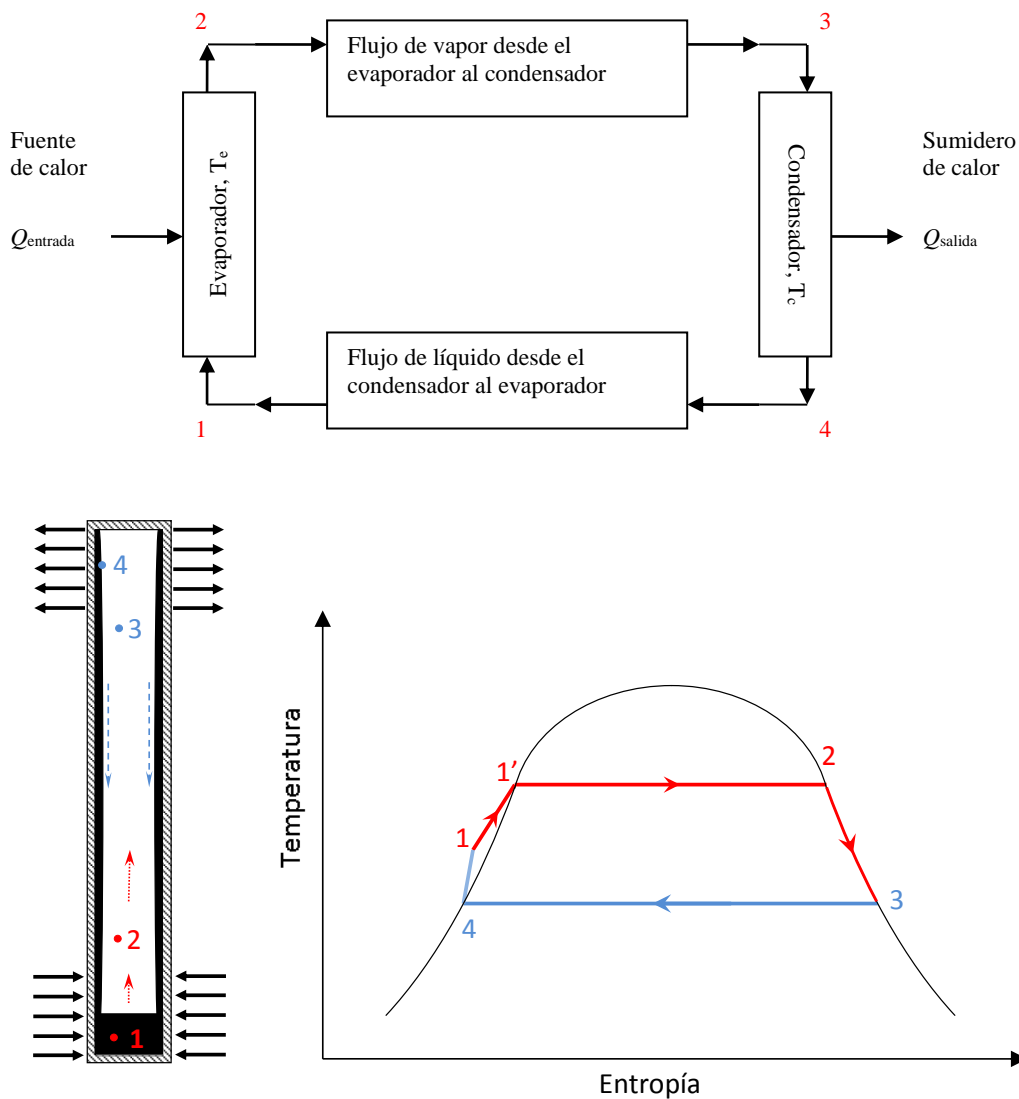


Figura 1.7. Ciclo termodinámico de un termosifón bifásico.

Así el flujo de vapor genera una diferencia de temperatura entre el evaporador y el condensador bajo los efectos del gradiente de presión necesario. Sin embargo, la presión estática es idéntica en el líquido y en el vapor para un termosifón, sin estructura capilar. Realmente el espesor de la película de líquido se adapta para generar unas pérdidas de carga que compensen exactamente la diferencia de presión creada por los efectos de la gravedad.

El trabajo realizado por el fluido durante su circulación a través del termosifón es el área encerrada en el ciclo representado en el diagrama $T-s$ de la figura. Cabe destacar que en la mayoría de los termosifones la diferencia de temperaturas entre los extremos es pequeña en comparación con otros sistemas de conducción del calor. Sin embargo, el termosifón ideal nunca podrá ser completamente isoterma, pues estaría en contradicción con la segunda ley de la termodinámica al tener un rendimiento del 100 %.

Una de las ventajas del termosifón bifásico con relación al tubo de calor es su flexibilidad para la adaptación geométrica y una concepción más sencilla pues no existe la estructura capilar. Así se pueden adoptar otras formas distintas de las tubulares, especialmente para el evaporador. En contrapartida, se tienen todos los límites relacionados con los tubos de calor monotubulares, con la notable excepción del límite capilar, ya que el termosifón funciona solamente por medio de la gravedad. En cambio, un termosifón bifásico tiene una densidad de flujo de calor crítica más alta que la de un tubo de calor. La temperatura de la fase vapor está relacionada con la presión, puesto que el fluido se encuentra en la zona de saturación. La diferencia de presión en la fase vapor es muy débil, obteniéndose un transporte de energía casi isoterma para el vapor. Es, precisamente, esa isothermicidad la que confiere a los termosifones sus excepcionales rendimientos en el transporte de energía entre dos zonas muy alejadas.

Sin embargo, bajo una aparente simplicidad en el funcionamiento, se oculta una gran complejidad en los fenómenos físicos puestos en juego. Éstos se siguen estudiando y sigue habiendo muchos trabajos que revisan, o vuelven a estudiar, desde un nuevo punto de vista el comportamiento fundamental de los termosifones.

1.3.1.1. Teoría de Nusselt de la condensación

En un termosifón bifásico entran en juego diferentes tipos de transferencia térmica. En la pared externa del evaporador tiene lugar un aporte de energía en forma de calor por conducción, convección y radiación en el que el flujo está impuesto exteriormente por motivos de diseño. Esta energía es transferida por conducción a través de la pared, la cual es cedida al fluido por convección natural o por ebullición nucleada, según el nivel del flujo térmico. El vapor se desplaza hacia el condensador por convección natural. En el condensador, los intercambios térmicos tienen lugar por condensación en película y después por conducción, a través de la película de condensado y en la pared.

Finalmente el flujo térmico es evacuado a la fuente fría. A continuación se van a analizar los aspectos teóricos de estos intercambios térmicos.

La condensación se produce cuando un vapor saturado, que se pone en contacto con una superficie a menor temperatura, se enfría hasta que la temperatura se hace inferior a su temperatura de saturación. Si el vapor es puro, la temperatura de saturación corresponde a la presión total; si se trata de una mezcla de vapor y gas no condensable (aire), la temperatura de saturación corresponderá a la presión parcial del vapor.

Condensación en forma de película: Si el condensado se forma sobre una pared vertical y la humedece, en condiciones normales se forma sobre la superficie un flujo continuo de fluido. El condensado fluye hacia abajo por acción de la gravedad, aumentando el espesor de la película de modo continuo desde arriba hacia abajo. Salvo que la velocidad del vapor sea muy alta, o que la película de líquido sea muy gruesa, el movimiento del condensado es laminar y se transfiere la entalpía de condensación desde la interfase vapor-líquido hacia la superficie simplemente por conducción.

La velocidad del flujo de calor depende principalmente del espesor de la película del condensado, la cual a su vez depende de la velocidad a la que condensa el vapor y de la velocidad con que se elimina el condensado. Cuando la placa es inclinada respecto a la posición vertical, disminuye la velocidad del condensado y la película de líquido se hace más gruesa, lo que origina una disminución de la velocidad de transferencia de calor.

Los coeficientes de transmisión de calor por convección para la condensación de vapores puros en forma de película, sobre tubos y placas, fueron obtenidas por primera vez por Nusselt [16] en 1916.

Proceso dinámico: Para una placa vertical (Fig. 1.8), a una distancia x de la parte superior de la placa de anchura unidad ($L_a = 1$), el espesor de la película es δ ; si el flujo de líquido es laminar y está producido sólo por la acción de la gravedad, se puede estimar la velocidad de líquido mediante un balance de fuerzas sobre el elemento, $1 \cdot dx$, de volumen.

La fuerza diferencial dF_1 que actúa sobre el líquido contenido en el volumen de espesor dx , a una distancia de la superficie entre y y δ es:

$$dF_1 = (\delta - y) \cdot 1 \cdot dx \cdot \rho_l \cdot g \quad (1.18)$$

El vapor que rodea al condensado crea un gradiente de presiones, por lo que se puede interpretar que el elemento de condensado $(\delta - y)$ se encuentra en una atmósfera de vapor saturado. Por lo que aparecerá sobre él una fuerza sustentadora diferencial dF_v (prácticamente despreciable), igual al peso del volumen de vapor desalojado de la forma:

$$dF_v = (\delta - y) \cdot 1 \cdot dx \cdot \rho_v \cdot g \quad (1.19)$$

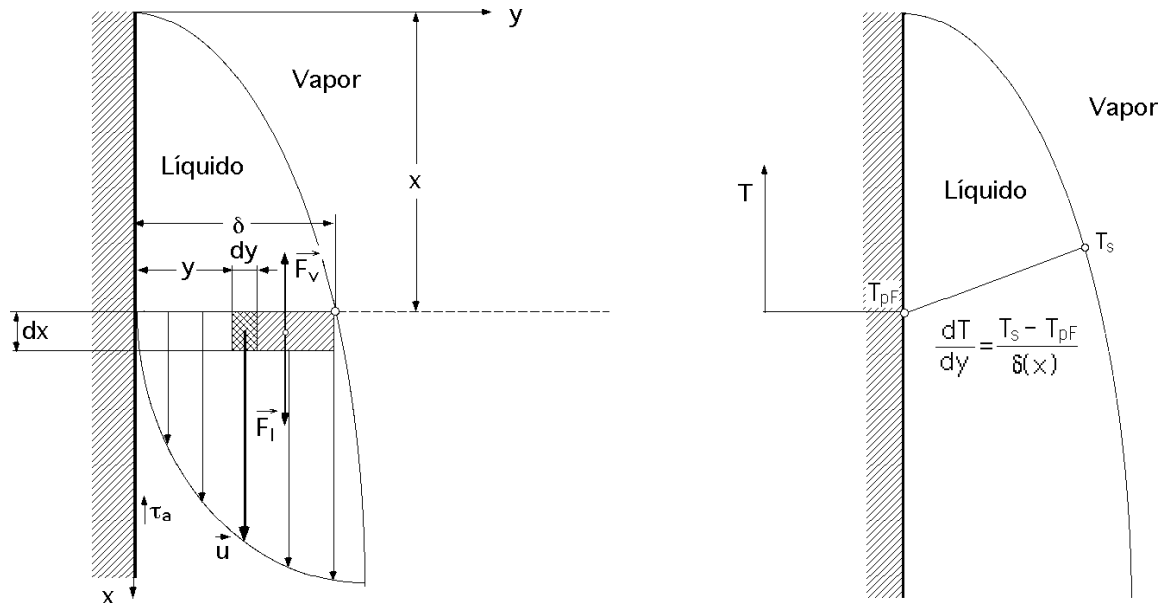


Figura 1.8. Condensación en forma de película sobre una superficie vertical.

Las fuerzas viscosas frenan el movimiento hacia abajo (rozamiento); por lo que respecta al vapor, a menos que fluya a una velocidad muy elevada, las tensiones de cortadura en la superficie libre son muy pequeñas, por lo que el rozamiento debido al vapor se puede despreciar; la fuerza diferencial de rozamiento generada dF_r será debida únicamente a la viscosidad del líquido, y se opone al deslizamiento del condensado de la forma:

$$dF_r = \mu_l \cdot \frac{du}{dy} \cdot 1 \cdot dx \quad (1.20)$$

En condiciones estacionarias habrá un equilibrio de fuerzas, por lo que:

$$(\delta - y) \cdot 1 \cdot dx \cdot \rho_l \cdot g - (\delta - y) \cdot 1 \cdot dx \cdot \rho_v \cdot g = \mu_l \cdot \frac{du}{dy} \cdot 1 \cdot dx$$

Si se simplifica la ecuación anterior queda:

$$(\delta - y) \cdot (\rho_l - \rho_v) \cdot g = \mu_l \cdot \frac{du}{dy} \quad (1.21)$$

siendo:

δ ; el espesor de la capa de condensado.

ρ_l ; la densidad del líquido.

ρ_v ; la densidad del vapor.

μ_l ; la viscosidad del líquido.

$u = u(y)$; la velocidad a la distancia x .

La distribución de velocidades en la película de condensado se obtiene integrando la expresión anterior (1.21):

$$u(y) = \frac{(\rho_l - \rho_v) \cdot g}{\mu_l} \left(\delta y - \frac{y^2}{2} \right)$$

La velocidad alcanza un valor máximo sobre la superficie de la película ($y = \delta$), en la forma:

$$u_{\max} = \frac{(\rho_l - \rho_v) \cdot g \cdot \delta^2}{2 \cdot \mu_l} \quad (1.22)$$

El flujo másico de condensado por unidad de anchura de la placa es:

$$\dot{m} = \int_0^{\delta} \rho_l \cdot u \cdot dy = \int_0^{\delta} \frac{\rho_l \cdot (\rho_l - \rho_v) \cdot g}{\mu_l} \left(\delta \cdot y - \frac{y^2}{2} \right) dy = \frac{\rho_l \cdot (\rho_l - \rho_v) \cdot g \cdot \delta^3}{3 \cdot \mu_l} \quad (1.23)$$

Proceso térmico: Como la velocidad del flujo másico del condensado \dot{m} sobre la placa depende de la velocidad a la que condensa el vapor, si se supone que el flujo de película es de tipo laminar y paralelo a la superficie y que el gradiente de temperatura es lineal de la forma

$$\frac{dT}{dy} = \frac{T_s - T_{pF}}{\delta(x)} \quad (1.24)$$

y dado que el calor se transfiere a través de la capa de condensado, únicamente por conducción, se tiene:

$$dq = k_1 \cdot dx \cdot \frac{dT}{dy} = k_1 \cdot dx \cdot \frac{T_s - T_{pF}}{\delta(x)} = h_{fg} \cdot d\dot{m} \quad \Longrightarrow \quad d\dot{m} = k_1 \cdot dx \cdot \frac{T_s - T_{pF}}{\delta(x)} \cdot \frac{1}{h_{fg}}$$

en la que $d\dot{m}$ es la cantidad de vapor condensado en el elemento $(\delta - y) \cdot dx$. Se supone que el calor diferencial de condensación es $h_{fg} \cdot d\dot{m}$ y se desprecia, según el criterio de Cotter [6], el término de calor sensible correspondiente al enfriamiento de líquido.

Espesor de la capa de condensado: Para hallar el espesor de la capa de condensado se igualan los valores de $d\dot{m}/dx$:

$$\frac{d\dot{m}}{dx} = \frac{k_1}{h_{fg}} \frac{T_s - T_{pF}}{\delta(x)} = \frac{g \cdot \rho_1 \cdot (\rho_1 - \rho_v)}{3 \cdot \mu_1} \frac{d(\delta^3)}{dx} = \frac{g \cdot \rho_1 \cdot (\rho_1 - \rho_v)}{\mu_1} \frac{\delta^2 \cdot d\delta}{dx};$$

Si se ordenan los términos e integra la ecuación, se halla el valor de δ :

$$\mu_1 \cdot \frac{k_1}{h_{fg}} \cdot \frac{T_s - T_{pF}}{g \cdot \rho_1 \cdot (\rho_1 - \rho_v)} \cdot dx = \delta^3 \cdot d\delta$$

$$\mu_1 \cdot \frac{k_1}{h_{fg}} \cdot \frac{T_s - T_{pF}}{g \cdot \rho_1 \cdot (\rho_1 - \rho_v)} \int_0^x dx = \int_0^\delta \delta^3 \cdot d\delta \quad \Longrightarrow \quad \mu_1 \cdot \frac{k_1}{h_{fg}} \cdot \frac{T_s - T_{pF}}{g \cdot \rho_1 \cdot (\rho_1 - \rho_v)} \cdot x = \frac{\delta^4}{4}$$

$$\delta = \left(\frac{4 \cdot k_1 \cdot \mu_1 \cdot (T_s - T_{pF}) \cdot x}{h_{fg} \cdot g \cdot \rho_1 \cdot (\rho_1 - \rho_v)} \right)^{1/4} \quad (1.25)$$

que muestra que el espesor de la película de condensado aumenta en función de la raíz cuarta de la distancia x recorrida a lo largo de la superficie.

Coefficiente de transferencia de calor: El flujo de calor evacuado en la condensación por conducción en el elemento de volumen de espesor dx a la distancia x es el mismo que el evacuado por convección, de la forma:

$$dq = h_{co_x} \cdot dx \cdot (T_s - T_{pF}) = k_1 \cdot dx \cdot \frac{dT}{dy} = k_1 \cdot dx \cdot \frac{T_s - T_{pF}}{\delta} \quad (1.26)$$

por lo que el coeficiente de convección local h_{cox} , por unidad de anchura ($L_a = 1$), es:

$$h_{\text{cox}} = k_1 \frac{T_s - T_{\text{pF}}}{\delta} \frac{1}{T_s - T_{\text{pF}}} = \frac{k_1}{\delta} = \left(\frac{g \cdot \rho_1 \cdot (\rho_1 - \rho_v) \cdot k_1^3 \cdot h_{\text{fg}}}{4 \cdot \mu_1 \cdot (T_s - T_{\text{pF}}) \cdot x} \right)^{1/4} \quad (1.27)$$

$$Nu_x = \frac{h_{\text{cox}} \cdot x}{k_1} = \left(\frac{g \cdot \rho_1 \cdot (\rho_1 - \rho_v) \cdot h_{\text{fg}} \cdot x^3}{4 \cdot \mu_1 \cdot k_1 \cdot (T_s - T_{\text{pF}})} \right)^{1/4} \quad (1.28)$$

El aumento del espesor de la película de condensado es semejante al crecimiento de la capa límite sobre una placa en la convección; un aumento de la diferencia ($T_s - T_{\text{pF}}$) de temperaturas produce una disminución de la conductancia superficial. Esto está originado por el aumento del espesor de la película, como resultado del incremento de la velocidad de condensación.

El valor medio del coeficiente de convección h_{co} correspondiente a una placa vertical de anchura unidad ($L_a = 1$) y altura L es:

$$h_{\text{co}} = \frac{1}{L} \int_0^L h_{\text{cox}} \, dx = \frac{4}{3} \left(\frac{g \cdot \rho_1 \cdot (\rho_1 - \rho_v) \cdot h_{\text{fg}} \cdot k_1^3}{4 \cdot \mu_1 \cdot (T_s - T_{\text{pF}}) \cdot L} \right)^{1/4} = \frac{4}{3} h_{\text{coL}} \quad (1.29)$$

Y simplificando $\rho_1 \cdot (\rho_1 - \rho_v) \approx \rho_1^2$, ya que $\rho_1 \gg \rho_v$, el coeficiente de convección para condensación quedaría como sigue:

$$h_{\text{co}} = 0,943 \left(\frac{g \cdot \rho_1^2 \cdot h_{\text{fg}} \cdot k_1^3}{\mu_1 \cdot (T_s - T_{\text{pF}}) \cdot L} \right)^{1/4} \quad (1.30)$$

Aunque el análisis anterior se ha hecho específicamente para una placa vertical, el desarrollo es válido para las superficies interior y exterior de tubos verticales, si éstos tienen diámetros grandes en comparación con el espesor de película.

1.3.1.2. Teoría de la ebullición

En la ebullición estática en un recipiente se observan, según Nukiyama, varias etapas en función del flujo de calor y la diferencia de temperaturas ($\dot{q} - \Delta T$). Para un termosifón la más importante es la de ebullición nucleada. La superficie de transferencia de calor está

cubierta por líquido y en ella se forman burbujas de vapor, mientras hay evaporación masiva en la superficie libre del fluido. Una vez establecido el régimen de ebullición, el líquido alcanza la temperatura de saturación, T_s , a la presión del sistema. Es decir, se cumple que: $T_1 = T_s$.

Para que la ebullición se mantenga, la temperatura de la superficie sumergida, T_{pF} debe estar algunos grados por encima de T_s , y la diferencia de temperatura entre ambas es $\Delta T = T_{pF} - T_s$. Además, es necesaria la existencia de microcavidades en la superficie del recipiente donde tenga lugar la formación de las burbujas. Resulta difícil que se inicie la ebullición en una superficie absolutamente lisa.

La ebullición estática nucleada es la zona donde se obtiene la mejor transferencia de calor y se ha descrito mediante múltiples correlaciones siendo la de Rohsenow (1952) una de las más aceptadas.

Ecuación de Rohsenow para ebullición nucleada: La obtención de esta ecuación [17] semiempírica es teórico-experimental, y se basa en los siguientes supuestos:

- La ebullición es un proceso convectivo que afecta al líquido.
- Las burbujas, desde que se desprenden de la superficie del recipiente, provocan agitación, corrientes convectivas, en el líquido.
- Debido a que las burbujas son de pequeñas dimensiones, se trata de una microconvección.
- La longitud característica de este proceso convectivo es el diámetro de la burbuja al desprenderse, d_b .
- Las dimensiones de la superficie calefactora no ejercen, por lo tanto, ninguna influencia.

Para hallar la ecuación de Rohsenow hay que tener en cuenta que la ebullición, por ser un proceso de convección que se efectúa en un líquido, se puede caracterizar por una ecuación del tipo:

$$Nu = C \cdot Re^a \cdot Pr_1^b \quad (1.31)$$

La convección es generada por el movimiento de las burbujas, que crecen adheridas a la superficie del recipiente. Durante el crecimiento la agitación que provocan es escasa y una vez que se han desprendido no pueden seguir creciendo, manteniendo su diámetro d_b . Como se sabe, el número de Nusselt se puede expresar en función del diámetro de burbuja d_b y de la conductividad térmica del líquido k_l :

$$Nu = \frac{h \cdot d_b}{k_l} = \frac{\dot{q} \cdot d_b}{\Delta T \cdot k_l} \quad (1.32)$$

donde ΔT es la diferencia de temperaturas ($T_{pF} - T_s$) y \dot{q} es el flujo de calor total transferido por la superficie al fluido en ebullición.

El número de Reynolds corresponde a:

$$Re = \frac{G \cdot d_b}{\mu_l} \quad (1.33)$$

donde G es la masa de vapor generada por unidad de área y tiempo sobre la superficie.

El flujo total de calor entregado al líquido \dot{q} se divide en dos partes, una empleada en generar vapor ($\dot{q}_v = G \cdot h_{fg}$) y otra transferida directamente al líquido, \dot{q}_l , por lo que:

$$\dot{q} = \dot{q}_v + \dot{q}_l \quad (1.34)$$

Al crecer G aumenta \dot{q}_v . Además, debido a la mayor agitación causada por un mayor G (mayor número de burbujas), \dot{q}_l , y en consecuencia el flujo de calor total \dot{q} también crecen con G . Si C_1 es la constante de proporcionalidad, entonces:

$$\dot{q} = C_1 \cdot G \cdot h_{fg} \quad \Longrightarrow \quad G = \frac{\dot{q}}{C_1 \cdot h_{fg}}$$

El número de Reynolds queda expresado por:

$$Re = \frac{\dot{q} \cdot d_b}{C_1 \cdot h_{fg} \cdot \mu_l} \quad (1.35)$$

Si se sustituyen las expresiones obtenidas para los números de Nu y Re , teniendo en cuenta la expresión del número de Prandtl, en la ecuación 1.31 y se reorganizan los términos, ésta quedaría:

$$\frac{\dot{q} \cdot d_b}{\Delta T \cdot k_1} = C \left(\frac{\dot{q} \cdot d_b}{C_1 \cdot h_{fg} \cdot \mu_1} \right)^a Pr_1^b \quad \Longrightarrow \quad \frac{c_{pl} \cdot \Delta T}{h_{fg}} = \frac{C_1^a}{C} \left(\frac{\dot{q} \cdot d_b}{h_{fg} \cdot \mu_1} \right)^{1-a} \cdot Pr_1^{1-b} \quad (1.36)$$

El único parámetro que aún queda por determinar es d_b . Una expresión para d_b se puede obtener teniendo en cuenta que las dos fuerzas que actúan sobre una burbuja en las fases finales de su crecimiento son:

- a) La tensión superficial, que tiende a mantener la burbuja en su sitio.
- b) La fuerza de empuje ocasionada por la diferencia entre la densidad del líquido y la densidad del vapor. Esta fuerza tiende a desprender la burbuja.

A partir de estos postulados, Fritz (1935), mediante filmaciones de alta velocidad determinó el siguiente valor para el diámetro de una burbuja al desprenderse:

$$d_b = C_2 \cdot \theta \cdot \left[\frac{\sigma}{g \cdot (\rho_1 - \rho_v)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1.37)$$

donde σ es la tensión superficial vapor-líquido y θ es el ángulo de contacto de la burbuja con la superficie. El ángulo θ depende de la naturaleza combinada de la superficie y el fluido. Es agudo si el fluido “moja” la superficie y obtuso si no la moja.

Usando esta expresión para d_b se llega a la expresión final

$$\frac{c_{pl} \cdot \Delta T}{h_{fg}} = C_{sf} \left[\frac{\dot{q}}{\mu_1 \cdot h_{fg}} \left(\frac{\sigma}{g \cdot (\rho_1 - \rho_v)} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^{1-a} \cdot Pr_1^{1-b} \quad (1.38)$$

Rohsenow realizó numerosos experimentos para determinar el valor de los exponentes, obteniendo que: $1 - a = 0,33 = 1/3$ y $1 - b = 1,7$. El coeficiente empírico C_{sf} está tabulado en función de la combinación superficie-fluido. La relación $\dot{q} - \Delta T$ variará con cada fluido y superficie.

La ecuación queda expresada como:

$$\frac{c_{pl} \cdot \Delta T}{h_{fg}} = C_{sf} \left[\frac{\dot{q}}{\mu_l \cdot h_{fg}} \left(\frac{\sigma}{g \cdot (\rho_l - \rho_v)} \right)^{1/2} \right]^{1/3} \cdot Pr_l^{1,7} \quad (1.39)$$

La ecuación de Rohsenow permite hallar órdenes de magnitud para los flujos de calor que aparecen en ebullición nucleada.

1.3.2. Esquema teórico de funcionamiento

El funcionamiento del termosifón se basa en un ciclo continuo de evaporación-condensación. En estado estacionario la pérdida de presión total del ciclo cerrado es la suma de las pérdidas de presión en ambas fases, de forma similar a lo expuesto en la ecuación (1.1) para el tubo de calor de la figura 1.2.

En este caso, al no haber mecha no existe la presión debida a la capilaridad, $\Delta p_{cp} = 0$, ni Δp_{gt} que también es nula. Además, se pueden considerar despreciable la variación de presión debida a la inercia del vapor, $\Delta p_i \approx 0$. Por tanto, para asegurar el funcionamiento del termosifón, las caídas de presión experimentadas por el vapor, Δp_v , y por el líquido, Δp_l , deben ser compensadas por las variaciones de presión debida a la gravedad, Δp_g . Es decir;

$$\Delta p_g + \Delta p_v + \Delta p_l = 0 \quad (1.40)$$

Esta condición se satisface prácticamente siempre y cuando el termosifón no tenga un ángulo de inclinación con la horizontal muy pequeño. Por tanto, las caídas de presión experimentadas por el vapor y el líquido deben ser compensadas por la presión motriz debida a la acción de la gravedad. Si se expresan en valor absoluto, se cumple

$$|\Delta p_g| \geq |\Delta p_v + \Delta p_l| \quad (1.41)$$

esto es, la presión debida a la acción de la gravedad debe ser mayor o igual a las pérdidas en el líquido y el vapor. La variación de presión debida a la acción gravitatoria es:

$$\Delta p_g = g \rho_l L \cos \beta \quad (1.42)$$

La pérdida de presión en la fase líquida del fluido de trabajo puede calcularse por medio de la relación de Darcy, si se tiene en cuenta que se toma forma cilíndrica, d_e es el diámetro equivalente, ($d_e = 4 \cdot A/P$) y se supone régimen laminar

$$\Delta p_l = -\frac{\mu_l \dot{m}_l L_{ef}}{\rho_l A_l d_e^2} \quad (1.43)$$

La pérdida de presión en la fase vapor se halla por la expresión de Hagen-Poiseuille:

$$\Delta p_v = -\frac{8\mu_v \dot{m}_v L_{ef}}{\rho_v \pi r_v^4} \quad (1.44)$$

Para este caso, se comprueba [18] que la diferencia de presión en las interfases líquido-vapor en el evaporador y condensador, respectivamente, se pueden despreciar:

$$(p_v - p_l)_e = (p_v - p_l)_c \approx 0$$

El flujo másico se obtiene de la condición de funcionamiento (1.40) y viene dado por la ecuación:

$$\Delta p_g = -\Delta p_l - \Delta p_v$$

Si se supone un termosifón vertical la presión de la gravedad es máxima y por tanto $\cos\beta = 1$:

$$g \rho_l L = \frac{\mu_l \dot{m}_l L_{ef}}{\rho_l A_l d_e^2} + \frac{8\mu_v \dot{m}_v L_{ef}}{\rho_v \pi r_v^4} \quad (1.45)$$

Y dado que para garantizar la continuidad, si se supone estado estacionario, se debe cumplir; $\dot{m} = \dot{m}_l = \dot{m}_v$, la ecuación anterior se puede escribir:

$$\dot{m} = \frac{gL\rho_l^2 A_l \rho_v \pi r_v^4}{L_{ef} (\mu_l \rho_v \pi r_v^4 + 8\mu_v \rho_l A_l d_e^2)} \quad (1.46)$$

El calor que puede ser transportado por un termosifón, como se ha visto, está determinado por la siguiente ecuación:

$$\dot{Q} = \dot{m}h_{fg} \quad \Longrightarrow \quad \dot{Q} = \frac{gL\rho_1^2 A_1 d_e^2 \rho_v \pi r_v^4}{L_{ef} (\mu_1 \rho_v \pi r_v^4 + 8\mu_v \rho_1 A_1 d_e^2)} h_{fg} \quad (1.47)$$

Esta ecuación permite calcular, de forma aproximada, el flujo de calor de un termosifón en posición vertical que trabaja en régimen laminar y estado estacionario, por medio de las dimensiones físicas del termosifón y las propiedades del fluido de trabajo.

1.3.3. Clasificación de los termosifones

Al ser los termosifones un caso particular de los tubos de calor, como en éstos, no existe una clasificación absoluta. Se pueden distinguir dos aspectos muy importantes; el primero se refiere al rango de temperaturas de trabajo y el segundo a la forma en que ocurre el flujo entre las dos fases, lo que diferencia a los termosifones cilíndricos propiamente dichos de aquellos que funcionan como bucles o anillos bifásicos. También se pueden tener en cuenta otros factores, como el tamaño o la forma de la sección transversal que no siempre es circular y puede tener forma plana, triangular, etc.

Cada termosifón tiene su rango particular de temperaturas de uso, que a su vez está relacionado con el fluido que utiliza y las presiones de trabajo. Según el rango de temperaturas de funcionamiento se habla de termosifones criogénicos, de baja temperatura y de alta temperatura. Los fluidos de trabajo [7] normalmente son gases en el rango criogénico, moléculas halocarbonadas, orgánicas o polares en el rango de baja temperatura y metales líquidos en el de alta temperatura, tal y como se aprecia en la figura 1.9.

El rango de temperaturas está limitado entre la temperatura del punto triple y la del punto crítico. Este límite recibe el nombre de límite termodinámico. Sin embargo, en la práctica se usa un rango más ajustado de temperaturas para evitar las presiones extremas y los bajos calores de vaporización que se tienen cerca del punto crítico. Como regla, el rango útil se extiende desde que la presión de saturación alcanza 0,1 bar hasta los 20 bar. Si está por debajo de 0,1 bar, la presión es tan débil que podría impedir el flujo de vapor. Por encima de 20 bar, el espesor del recipiente puede crecer hasta un punto en el que el funcionamiento del termosifón esté limitado por la resistencia térmica creada por las paredes del mismo.

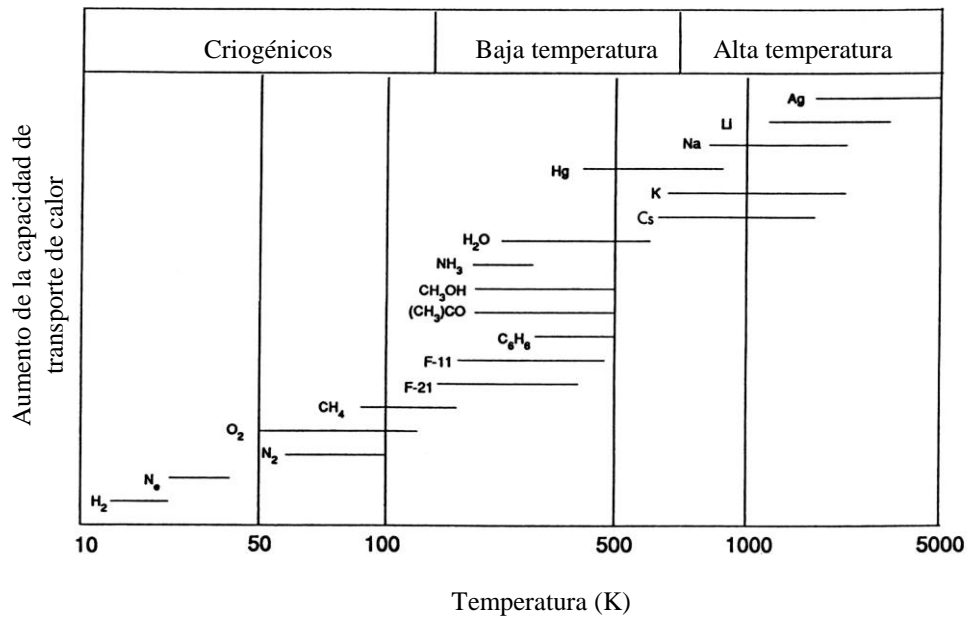


Figura 1.9. Rangos de temperatura de trabajo, en termosifones, para algunos fluidos.

Obviamente, cada aplicación presenta un rango particular de temperaturas entre las que va a operar el termosifón. En cuanto a estos rangos de temperatura y a la compatibilidad fluido de trabajo - material de construcción, se aplican criterios similares a los expuestos en el apartado correspondiente (véase la tabla 1.4) a los tubos de calor.

Por ser la vaporización y la condensación del fluido de trabajo la base de operación del tubo de calor (y en particular del termosifón), la elección de un fluido adecuado es un factor muy importante en el diseño de los mismos. En el capítulo 3 de la tesis se analizarán detenidamente todas las propiedades que deben tener los fluidos de trabajo.

Con respecto al flujo de los fluidos en los termosifones propiamente dichos (Fig. 1.6.) los dos flujos, líquido y vapor, coinciden a contracorriente y tienen una interfase entre ellos.

Para los que tienen forma de anillo, o bucle, los flujos de la fase líquida y la fase vapor se separan (Fig. 1.10) totalmente. Esto tiene la ventaja de disminuir las pérdidas de carga del flujo del líquido y eliminar los problemas relacionados con el flujo a contracorriente entre las fases. Esta configuración, con flujos separados, permite mayores prestaciones [19] de funcionamiento que en el primer tipo, especialmente en términos de distancia entre la fuente fría y la caliente. Sin embargo, su funcionamiento puede ser inestable y, paradójicamente, muchas veces es difícil hacerlo funcionar con bajas potencias.

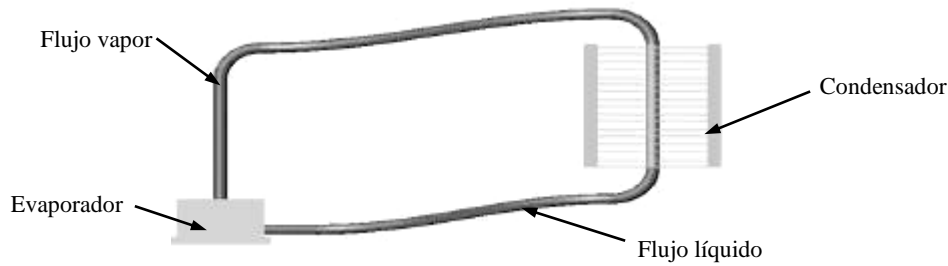


Figura 1.10. Esquema de un termosifón en bucle o anillo.

Existe un tercer tipo, el anular, intermedio entre el termosifón clásico y el de tipo anillo, con un segundo tubo interno para separar los flujos, y que mejora [20] los límites de operación.

1.3.4. Límites de funcionamiento

Los termosifones bifásicos presentan ciertos límites de funcionamiento [21] y [22], entre los que se encuentran principalmente:

- Límite sónico
- Límite de secado
- Límite de inundación o arrastre
- Límite de ebullición

Estos límites permiten determinar la máxima densidad de flujo de calor que puede transferir el dispositivo para una temperatura de funcionamiento dada y definen el dominio de funcionamiento del termosifón. El esquema de estos límites de funcionamiento es similar al mostrado en la figura 1.5 para el tubo de calor. Lógicamente se elimina el debido a la capilaridad. Las condiciones experimentales deben ser elegidas en el interior del recinto determinado en la figura por los distintos límites.

1.3.4.1. Límite sónico

Este límite aparece en el termosifón cuando la presión del vapor es muy débil. Tiene su origen en la caída de presión inercial debida al flujo de vapor hacia el condensador. Al haber poca presión la densidad es también pequeña, lo que lleva a que el vapor pueda alcanzar velocidades muy elevadas. Esto último da lugar, en el flujo de vapor, a una onda de choque acompañada de una caída de presión, lo que limita el funcionamiento.

La expresión 1.14, propuesta por Busse [11] para los tubos de calor, determina también el flujo de calor para el límite sónico en termosifones. Este límite interviene fundamentalmente en la fase de arranque en aquellos termosifones de temperatura media y elevada y en aquellos que trabajan con altas temperaturas, como los metales alcalinos, debido a que el fluido se encuentra, por lo general, solidificado antes del arranque. Para evitarlo y hasta que se alcanza la temperatura normal de funcionamiento, el flujo de calor debe ser pequeño. La consecuencia del límite sónico es una considerable caída de temperatura a lo largo del tubo; pero el termosifón continuará operando, lo que no sucede con otros límites

1.3.4.2. Límite de secado

El límite de secado (*dryout limit*) se manifiesta de dos maneras. La primera se da cuando se termina la reserva de líquido en el evaporador, al no ser suficiente la carga de fluido cuando se realiza con pequeños coeficientes de llenado (*fill ratio*) y para el caso de una densidad de flujo poco elevada. Toda la masa de fluido está en circulación, bien sea en forma de una película de líquido, bien sea bajo la forma de vapor y la altura del depósito de líquido podría llegar a ser cero y, por tanto, la cantidad de fluido de trabajo es insuficiente para completar el ciclo de evaporación-condensación. El coeficiente de llenado se suele definir comúnmente como el cociente entre el volumen de llenado de líquido y el volumen del evaporador ($FR = V_l/V_e$).

En el segundo caso, si la carga de fluido es suficiente, el límite de secado se manifiesta por una ruptura de la película de líquido. El mecanismo de aparición es el siguiente: Se va aumentando el flujo de calor y, a partir de un cierto valor, la cantidad de fluido vaporizado es tal que empieza a faltar líquido, lo que provoca un secado progresivo de la pared, desde la parte baja hacia la parte alta del evaporador, dejando de existir líquido en la parte inferior del evaporador, pues el espesor de la película de líquido que desciende en ese momento por el evaporador tiende a anularse. También puede ocurrir que, incluso habiendo líquido en el evaporador, el flujo másico de vapor sea superior al flujo másico de la película de líquido que retorna. Existe, por tanto, una zona seca en la pared del recipiente, por encima del depósito de líquido, lo cual provoca un sobrecalentamiento en la misma y la aparición de inestabilidades en el funcionamiento (régimen oscilatorio). Sobre la pared interna del evaporador, en su parte superior, se forman muchas zonas secas lo que origina una disminución del coeficiente de intercambio térmico y un aumento de la temperatura de la pared. Si el flujo radial no es demasiado importante y si la pared tiene una buena conductividad térmica, el flujo de calor es transmitido por conducción desde las zonas secas hacia las zonas húmedas. La temperatura de la pared se estabiliza entonces a un valor [23] más elevado.

El límite de secado se puede evitar introduciendo cantidades suficientes de fluido. Está demostrado que la capacidad de transmisión de calor de un termosifón aumenta con la cantidad de fluido de trabajo en su interior, pero sólo hasta un valor determinado.

Ma [24] y otros, realizaron un estudio experimental con dos termosifones de cobre, cargados con R-113 o con metanol y se distingue muy bien entre los dos tipos de secado. El termosifón tiene una longitud total de 1,1 m, con un evaporador de 0,5 m de longitud y diámetros internos de 11 ó 20,5 mm. El secado del depósito se manifiesta en el termosifón de pequeño diámetro, para una carga baja, inferior al 50 % del volumen del evaporador, o para temperaturas de saturación poco elevadas.

Según los autores, la ruptura de la película líquida está caracterizada por tres fenómenos:

- a) Un aumento importante de la temperatura de la pared situada en la parte superior del evaporador.

- b) Una variación de la temperatura de la pared en una sección del tubo, debida a la presencia de las zonas secas entre las capas de película de líquido.
- c) Una densidad de flujo inferior a la densidad del flujo crítico en el límite de ebullición.

Groll [25] y otros estudiaron experimentalmente los límites del funcionamiento de termosifones de cobre con diferentes diámetros, utilizando agua como fluido de trabajo. Para un tubo con un diámetro interno de 7 mm observaron que el límite de secado se da para un coeficiente de llenado del evaporador igual, o inferior, al 50 %.

En los estudios teóricos se han utilizado diferentes criterios para la obtención del límite de secado. Reed y Tien [26] o Zuo y Gunnerson [27] consideran el momento en el que hay una altura nula de líquido en el depósito del evaporador, lo que corresponde a la cantidad mínima de fluido necesario para las condiciones de funcionamiento dadas. Casarosa y Dobran [28] consideran que el límite se alcanza cuando una parte de la pared del evaporador no está mojada por la película de líquido y Reed y Tien [26] cuando el flujo de condensado que entra en el evaporador es nulo.

Cohen y Bayley [29] dan una expresión analítica para la determinación del calor crítico que se utiliza para hallar el límite de secado

$$\left(\frac{\dot{Q}_c}{\rho_v h_{fg}} \right) \left[\frac{\sigma g (\rho_1 - \rho_v)}{\rho_v^2} \right]^{-1/4} = \frac{g \rho_1^2}{3 \mu_1 L_e \left[\sigma g \rho_v^2 (\rho_1 - \rho_v) \right]^{1/4}} \left[\frac{\left(\frac{V}{\pi d} \right) \left[\left(\frac{V_l}{V_e} \right) \left(\frac{V_e}{V} \right) - \frac{\rho_v}{\rho_1} \right]}{\left(\frac{4L_c}{5} + L_a + \frac{3L_e}{4} \right) \left(1 - \frac{\rho_v}{\rho_1} \right)} \right]^3 \quad (1.48)$$

en donde V es el volumen total del termosifón.

Shiraishi [30] y otros han comparado este modelo con los resultados experimentales relativos al flujo máximo transferido por dos termosifones (TSF y TSP de la figura 1.11). Existe una buena concordancia entre el modelo y la experiencia para unos coeficientes de llenado comprendidos entre un 10 % y un 20 %, demostrando así la existencia de un límite de secado.

Ahora bien, cuando el coeficiente de llenado va más allá de un 20 %, el flujo está limitado por la obstrucción, o inundación, del condensador. Negishi [31] y otros en un trabajo posterior han llegado a una conclusión similar.

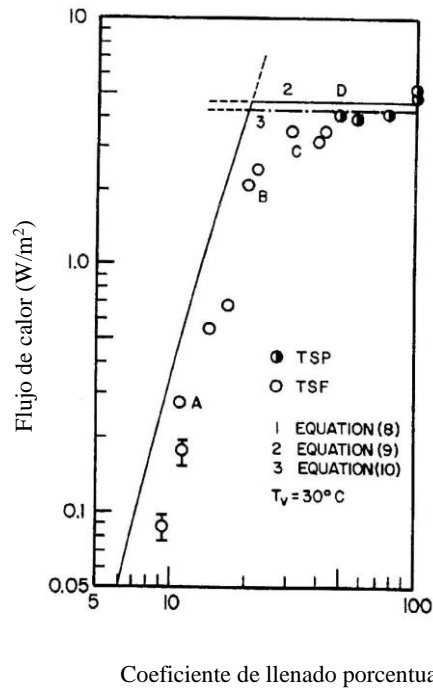


Figura 1.11. Flujo crítico de calor (CHF) en función del coeficiente de llenado.

Jiao [32] y otros han estudiado, más recientemente, la influencia del coeficiente de llenado sobre el límite de secado planteando distintos modelos de llenado del termosifón. Establecen un modelo para la existencia de este límite y denominan CFR (*critical filling ratio*) al valor mínimo del coeficiente de llenado, para un flujo de calor entrante dado, a partir del cual se mantiene en el termosifón una circulación continua de vapor y puede existir una película de líquido. Cuando el coeficiente de llenado es menor que el valor del CFR puede aparecer un secado local en el evaporador.

1.3.4.3. Límite de inundación o arrastre

El límite de arrastre se ha observado [33] con coeficientes de llenado importantes en termosifones de gran longitud y con elevadas densidades de flujo axial pero pequeñas de flujo radial. Este efecto es debido a la interacción entre la fase líquida y la fase vapor con flujo a contracorriente, en la zona adiabática. Sí la velocidad relativa entre las dos fases es

elevada, las fuerzas de rozamiento entre las interfases frenan la vuelta del líquido hacia el evaporador y gotitas de líquido son arrastradas por el vapor hacia el condensador. Cuando el esfuerzo cortante es superior a las fuerzas de la tensión superficial, la película de condensado se vuelve inestable y se generan ondas en la interfase líquido-vapor. Un nuevo aumento de la velocidad del vapor conduce a la obstrucción del condensador, por lo que recibe también el nombre de *flooding limit* y representa el *entrainment limit* de los tubos de calor. En este caso, el líquido se acumula al nivel del condensador y esto provoca el bloqueo del funcionamiento del termosifón. Suele ser la limitación más importante.

Este límite ha sido evidenciado [34] de forma experimental por Bezrodnyi y Volkov. Estos autores han distinguido tres regímenes de flujo en la zona adiabática en función de la velocidad del vapor:

- **Primer régimen:** El flujo es estacionario. Por tanto, se cumple que los flujos máscicos de líquido y de vapor son iguales. El límite superior en esta zona está caracterizado por el comienzo de una interacción entre las dos fases a contracorriente. La película de líquido llega a ser inestable, lo que se manifiesta por la formación de ondas en la interfase y por el arrastre de gotitas líquidas en el vapor. Las fuerzas de cizalladura entre las dos fases son, entonces, lo suficientemente elevadas como para vencer a la tensión superficial del líquido.
- **Segundo régimen:** La igualdad de los flujos se conserva. El límite superior de esta zona se traduce en un bloqueo en las proximidades de la interfase de la capa de la película de líquido, la cual tiene entonces una velocidad nula.
- **Tercer régimen:** La película de líquido es arrastrada en el sentido del flujo del vapor. El flujo máscico del líquido disminuye, lo que provoca un descenso del nivel en el evaporador y la obstrucción del condensador. Aparece un secado local en el evaporador, debido a una irrigación insuficiente de la pared, la cual se ve sometida a un recalentamiento. Progresivamente, la superficie seca va remojándose a causa de una disminución de la velocidad del vapor. Este fenómeno es periódico y creado por las oscilaciones de temperatura y presión.

Para predecir el límite de inundación, se utilizan correlaciones semiempíricas establecidas para los flujos bifásicos a contracorriente, en tubos abiertos y adaptados al caso de los termosifones.

La más comúnmente aceptada de estas correlaciones ha sido la de Wallis [35]

$$(U_v)^{1/2} + m(U_l)^{1/2} = C_w \quad (1.49)$$

en donde m y C_w son dos constantes adimensionales dependientes del fluido y la geometría. Para este caso [36] su valor es; $m \approx 1$ y $C_w \approx 0,9$.

Las velocidades adimensionales para el vapor y el líquido están definidas por:

$$U_v = \left[\frac{\rho_v}{gd(\rho_l - \rho_v)} \right]^{1/2} u_v; \quad U_l = \left[\frac{\rho_l}{gd(\rho_l - \rho_v)} \right]^{1/2} u_l \quad (1.50)$$

en las que d es el diámetro hidráulico ($d = d_i$) y u es la velocidad superficial, definida como el cociente entre el caudal y el área transversal del tubo, es decir

$$u_v = \frac{\dot{V}_v}{A} = \frac{\dot{m}_v}{\rho_v A}; \quad u_l = \frac{\dot{V}_l}{A} = \frac{\dot{m}_l}{\rho_l A}$$

Wallis indica que el flujo de la película de líquido puede ser ascendente si $U_v > 1$. En el caso de que $U_v = 1$ y $U_l = 0$, se corresponde con una obstrucción, lo que es equivalente al límite de inundación.

El calor transportado se puede escribir, en función del flujo másico y la entalpía de vaporización;

$$\dot{Q} = \dot{m}h_{fg} = \rho_v u_v \frac{\pi d_i^2}{4} h_{fg}$$

Sustituyendo las velocidades adimensionales por sus expresiones en función del flujo de calor se determina la siguiente [37] expresión para el flujo crítico de calor,

$$\dot{Q}_c = C_w^2 h_{fg} \frac{(\rho_l \rho_v)^{1/2} [gd_i(\rho_l - \rho_v)]^{1/4}}{(\rho_l^{1/4} + \rho_v^{1/4})^2} \quad (1.51)$$

La correlación de Wallis desprecia los efectos de la tensión superficial e introduce el efecto del diámetro lo cual no se evidencia bien en los ensayos. Para superar esta dificultad Tien y Chung [38] han modificado la correlación citada, sustituyendo d por una longitud de onda, λ , característica para las ondas de la interfase

$$\lambda = \left[\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)} \right]^{1/2}$$

donde σ es la tensión superficial.

Se obtiene entonces una correlación de forma similar a la de Wallis

$$(K_v)^{1/2} + (K_l)^{1/2} = C_k \quad (1.52)$$

donde K es el número de Kutateladze, cuyas expresiones para el vapor y el líquido son:

$$K_v = \left[\frac{\rho_v}{g\sigma(\rho_l - \rho_v)} \right]^{1/2} u_v; \quad K_l = \left[\frac{\rho_l}{g\sigma(\rho_l - \rho_v)} \right]^{1/2} u_l$$

Para la constante, $C_k = \sqrt{3,2} \tanh(0,5 \cdot Bo)^{1/4}$

y $Bo = d \left[\frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\sigma} \right]^{1/2}$, corresponde al número de Bond

Si se sustituyen los números de Kutateladze por sus expresiones como función de los flujos de calor se obtiene [39] otra expresión para el flujo crítico de calor.

$$\dot{Q}_c = C_k^2 h_{fg} \frac{(\rho_l \rho_v)^{1/2} [g\sigma(\rho_l - \rho_v)]^{1/4}}{(\rho_l^{-1/4} + \rho_v^{-1/4})^2} \quad (1.53)$$

Shatto y otros [40] comprobaron, experimentalmente y de forma visual, la validez de la expresión de Tien y el límite de inundación, con tres fluidos de trabajo; R-113, R-11 y etanol, llegando a la conclusión de que la incertidumbre era del orden del 15 %.

Bage y Peterson [41] analizaron experimentalmente varias de las correlaciones citadas y la comparación entre sus resultados se puede observar en la figura 1.12.

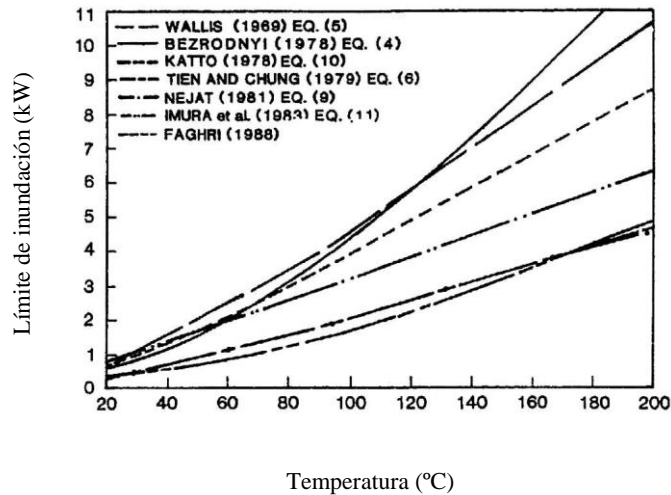


Figura 1.12. Comparación entre diversas correlaciones usadas para predecir el límite de inundación en un termosifón.

1.3.4.4. Límite de ebullición

El límite de ebullición (*boiling limit*) se produce cuando el flujo térmico radial en el evaporador es elevado y se da, habitualmente, con grandes coeficientes de llenado. Debido al alto valor del flujo de calor comienza la nucleación en el evaporador. Conforme aumenta la nucleación, las burbujas de vapor próximas a la pared del termosifón bloquean al líquido e impiden que éste toque la pared. Aparece un secado local, lo cual conduce a una disminución de la transferencia de calor que va acompañada de una brusca elevación de la temperatura en las proximidades del punto de secado con el riesgo de descomposición del fluido, especialmente si es orgánico, e incluso de la fusión (*burnout*) de la pared del recipiente. El valor del límite de ebullición depende del punto considerado. Este límite es análogo a la densidad de flujo crítica para la ebullición estática.

Gorenflo y otros [42] llegan a afirmar que "... la correcta predicción de las prestaciones de la ebullición del líquido en el interior del evaporador de un equipo de refrigeración es una de las características esenciales para el éxito del trabajo de la unidad completa". Por lo tanto, es fundamental determinar los límites de funcionamiento y, especialmente, el de ebullición.

En numerosos estudios los autores se han basado en observaciones visuales para correlacionar la aparición del límite de ebullición con los regímenes de ebullición y las condiciones de funcionamiento del termosifón. Otros investigadores han encontrado correlaciones para definir este límite, a partir de sus resultados experimentales.

En el trabajo [25] ya citado, Groll y otros han realizado un estudio experimental con varios termosifones de cobre, llenados con agua, de diferentes geometrías y superficies internas lisas. En posición vertical, el límite de ebullición aumenta con la disminución de la longitud del evaporador, con el aumento de la temperatura de funcionamiento y, también, con el aumento del diámetro interno del tubo. Se observó que para el termosifón vertical de diámetro más pequeño, el límite de ebullición aparece cuando el coeficiente de llenado es importante, mayor del 60 %. Si la inclinación varía, la densidad de flujo es máxima a 70° con respecto a la horizontal, dentro del rango de las temperaturas del ensayo, entre 30 y 60 °C.

En el estudio experimental de un termosifón que utilizaba R-113 y cuyo evaporador y zona adiabática estaban contruidos en vidrio para permitir observaciones visuales, Shiraishi [33] apunta como causa de la aparición del límite inferior de ebullición que la relación entre la longitud del evaporador y el diámetro del tubo sea inferior a cinco ($L_e/d_i < 5$).

En sus estudios teóricos y experimentales, Gorbis y Savchenkov [43] han establecido una correlación empírica para determinar el máximo flujo de calor radial a partir del cual comienza el límite de ebullición. Los ensayos se efectuaron con termosifones de 500 mm de longitud y un diámetro interno comprendido entre 5 y 22 mm, para inclinaciones que variaban, entre 90° y 4°, con respecto a la horizontal y con coeficientes de llenado entre el 2,9 % y el 60 % en relación al volumen total. Se ensayó con varios tipos de fluido (agua, etanol, R113 y perfluorodibutileter). Los puntos experimentales tienen una correspondencia con los valores teóricos obtenidos, con una incertidumbre del ± 20 %, según la relación siguiente:

$$\frac{\dot{q}_{\max}}{\dot{q}_{\max,\infty}} = C^2 \cdot \left[0,4 + 0,006 \cdot d \cdot \sqrt{\frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\sigma}} \right]^2 \quad (1.54)$$

donde C es un coeficiente dependiente de la geometría,

$$C = A \cdot \left(\frac{d}{L_c} \right)^{-0,44} \cdot \left(\frac{d}{L_e} \right)^{0,55} \cdot \left(\frac{V_1}{V} \right)^n$$

y $\dot{q}_{\max,\infty}$ es la relación de Zuber-Kutateladze [44] que da el límite de ebullición estática

$$\dot{q}_{\max,\infty} = 0,142 \cdot h_{fg} \left[g \sigma (\rho_v)^2 (\rho_l - \rho_v) \right]^{1/4};$$

Los coeficientes A y n se muestran en la tabla 1.5, siguiente

Tabla 1.5. Valores de los coeficientes A y n .

V_1 / V	A	n
$\leq 0,35$	0,538	0,13
$> 0,35$	3,540	-0,37

Esta correlación es válida para $1 \leq (d/2) \cdot (g(\rho_l - \rho_v)/\sigma)^{1/2} \leq 30$.

La inclinación no se ha tomado en cuenta pues, según los autores, tiene poca influencia sobre el flujo crítico. Sin embargo, señalan la existencia de un ligero máximo entre 45° y 65° .

Pirotto y Vorontsova [45] describen hasta 12 correlaciones, de diversos autores, para determinar el flujo de calor que da el límite de ebullición, siendo todas bastante similares en su formulación, aunque existen diferencias de opinión respecto a los motivos por los que aparece dicho límite. Unos autores opinan que la razón fundamental es que el vapor rompe la película de condensado mientras que otros consideran que es debido a la existencia de un flujo crítico de calor para la ebullición estática en un depósito.

La cantidad de fluido en el interior del termosifón aparece también como un parámetro importante, ya que una carga muy grande puede provocar un bloqueo del condensador mientras que una carga pequeña puede entrañar el sobrecalentamiento de la pared y el secado del evaporador, todo lo cual puede acabar dañando el equipo. Jiao y otros [46] han ampliado el trabajo anteriormente citado [32] y han estudiado (véase Fig. 1.13) los efectos del coeficiente de llenado de un termosifón vertical con respecto a los rangos de trabajo del flujo de calor y los límites de secado, inundación y ebullición.

Los autores establecen tres modelos distintos y tres transiciones entre ellos. Las transiciones están basadas en el coeficiente de llenado y se corresponden con los siguientes criterios:

- El llenado de líquido en el evaporador alcanza el valor mínimo (caso CFR), por debajo del cual podría aparecer el secado. Según los autores, las mejores prestaciones para refrigeración se dan cerca de este valor y por debajo del siguiente.
- La cantidad de líquido vertido llena completamente el evaporador o caso EFR (*Evaporator Filling Ratio*).
- El depósito de líquido llena completamente el evaporador y la zona adiabática. Es el máximo coeficiente de llenado, *Maximum Filling Ratio* o caso MFR, más allá del mismo las prestaciones para la transferencia de calor se deterioran y aparecen periódicamente zonas en el límite de ebullición y zonas quemadas.

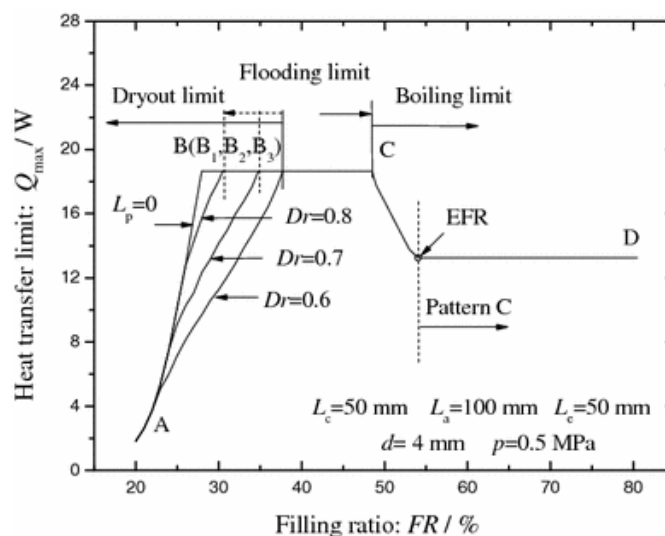


Figura 1.13. Dependencia de los límites de transferencia de calor con el coeficiente de llenado.

Para el termosifón estudiado, al ir aumentando el coeficiente de llenado aparece primero el límite de secado, entre un 25 y 35 %. Si continua el llenado aparece el límite de inundación y más adelante, por encima del 50 %, el de inundación. También están señalados los distintos modelos (CFR., EF. y MAR) y sus zonas de transición.

En la figura 1.14 se observa la zona de operación del termosifón, para lo que se han cambiado los ejes de coordenadas respecto a la figura 1.13, en función del flujo de calor y el coeficiente de llenado para el termosifón a estudio. Más allá del área delimitada por la línea continua, el termosifón no puede trabajar, pues aparecen los distintos límites.

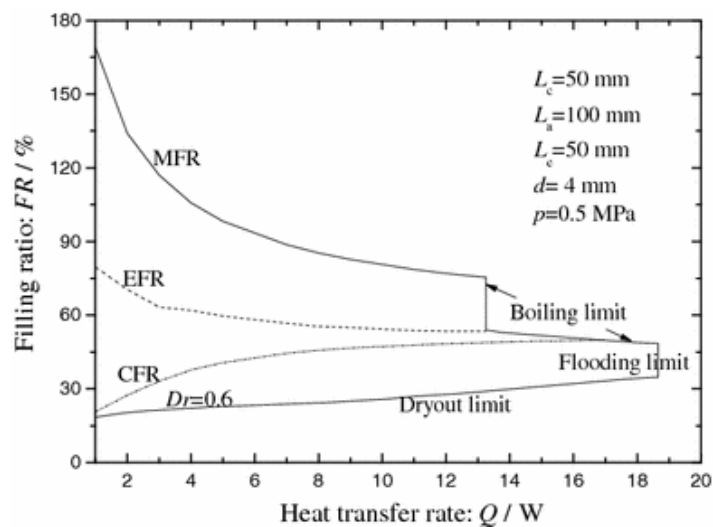


Figura 1.14. Zona de trabajo para un termosifón vertical.

1.4. Aplicaciones de los tubos de calor y termosifones

El campo de aplicación de los tubos de calor es muy amplio. Sin embargo, si los primeros estudios se remontan a mediados del siglo XIX, el primer uso importante es reciente, ya que proviene de su utilización en el campo espacial. Actualmente las aplicaciones en la superficie terrestre tienden a generalizarse cada vez más, tanto en el campo industrial como en el científico y de investigación.

1.4.1. Aplicaciones espaciales

El interés mostrado por la industria espacial por los tubos de calor descansa principalmente en los rendimientos y en el buen funcionamiento de este tipo de intercambiador de calor utilizado como refrigerador, especialmente. Su funcionamiento autónomo sin ningún elemento mecánico en movimiento le permite alcanzar fácilmente las especificaciones de

fiabilidad exigidas. Las numerosísimas aplicaciones en los satélites espaciales están relacionadas con la regulación térmica de elementos tales como las baterías y el transporte de flujos térmicos hacia los paneles radiantes.

La distribución uniforme de las temperaturas en la estructura de los satélites es un importante problema relacionado con experimentos de astronomía orbital debido a las posibles deformaciones por calentamiento solar. Durante la órbita, un observatorio espacial está fijado hacia un punto específico del espacio. Eso significa que un lado de la capsula estará expuesta a una intensa radiación solar, mientras que la opuesta lo estará hacia la oscuridad. Con el objeto de igualar y estabilizar la temperatura de la estructura se utilizan tubos de calor para transportarlo desde lado irradiado por el Sol hacia los paneles que lo disipan hacia el fondo del espacio que se encuentra a una temperatura de 3 K.

1.4.2. Aplicaciones terrestres

En el campo gravitatorio terrestre, el termosifón resulta ser un dispositivo muy útil para aplicaciones tales como: conservación del permafrost, eliminación del hielo en carreteras y equipos, aplicaciones solares, intercambiadores de calor y en particular los destinados a la recuperación de calor, en equipos criogénicos, refrigeración de equipos eléctricos y electrónicos, etc.

1.4.2.1. Conservación del permafrost

Fue una de las primeras aplicaciones industriales. Se denomina permafrost a la capa de suelo permanentemente congelado que se corresponde con una capa subterránea de hielo, en los niveles superficiales de las regiones muy frías de la Tierra, como es la tundra. Puede encontrarse en áreas circumpolares de Canadá, Alaska, Rusia y norte de Europa, entre otras.

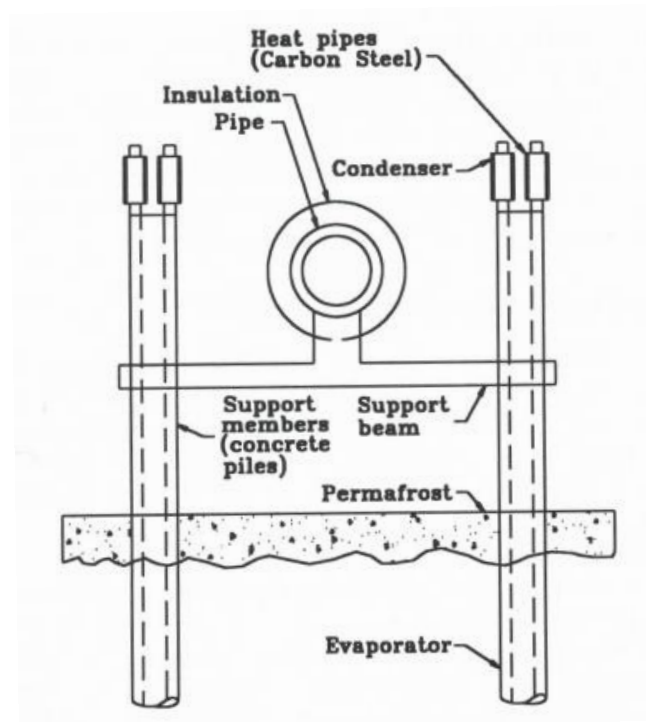


Figura 1.15. Esquema de los soportes del oleoducto Trans-Alaska, compuestos por termosifones.

Uno de los grandes contratos en la historia del termosifón lo llevó a cabo la Corporación McDonnell Douglas con la Alyeska Pipeline Service Company. Se construyeron, para el oleoducto Trans-Alaska, 120 000 termosifones, aproximadamente. Estos módulos tienen como función evitar la descongelación del permafrost alrededor de los soportes del oleoducto en sus secciones elevadas. Los diámetros de los termosifones usados son de 5 y 7,5 centímetros, y las longitudes varían entre 8 y 18 metros. El sistema desarrollado utiliza amoníaco como fluido de trabajo, y el calor proveniente del suelo es transmitido hacia el condensador localizado encima del nivel del suelo, tal y como se muestra en las Figuras 1.15 y 1.16.



Figura 1.16. Oleoducto Trans-Alaska.

La idea se utiliza, también, para mantener las cimentaciones de viviendas y diversas construcciones (Fig. 1. 17) en Alaska, donde existen varias empresas especializadas.



Figura 1.17. Termosifones utilizados como soportes en construcciones de Alaska.

1.4.2.2. Derretimiento de la nieve y deshielo

En sentido contrario, se pueden utilizar los termosifones para derretir nieve y evitar el hielo. El principio de funcionamiento del termosifón para deshelar está basado en el uso del calor almacenado en el suelo, como calor de entrada al evaporador. En Japón se ha trabajado en el desarrollo de estos dispositivos para la conservación de carreteras, en forma particularmente intensa. El modelo también se ha aplicado al deshielo de boyas [14], utilizando entonces el calor del mar.

1.4.2.3. Fundición a presión e inyección de moldes

La eliminación de calor durante el proceso de solidificación es un requisito obvio en la fundición. Posiblemente el aspecto más importante de la refrigeración del molde es la necesidad de minimizar el impacto térmico y asegurar así una vida razonable para los componentes. En la mayor parte de las fundiciones se utiliza un sistema de refrigeración mediante agua. Si la diferencia de temperaturas entre la colada y el agua de refrigeración es grande, la vida del material fundido se reduce. Estas partes requieren claramente un medio rápido de extracción del calor de las superficies de trabajo a una temperatura más cercana a la del metal fundido. Sin embargo, a veces se presentan dificultades a la hora de introducir canales de refrigeración en partes inaccesibles. Una solución muy común es la de usar inserciones de un material con mayor conductividad (por ejemplo, molibdeno) que conduce el calor a canales de refrigeración por agua más lejanos.

Otra solución pueden ser los termosifones que poseen propiedades que los hacen atractivos en dos áreas de aplicación de fundición: El primero compensar los gradientes de temperatura de la colada insertándolo en el cuerpo principal del molde, sin conectar éste a los circuitos de refrigeración por agua y el segundo, ayudar a la transferencia de calor entre la cara del molde y el recorrido del agua de recuperación en áreas donde se producen puntos calientes. Muchas veces es difícil enfriar las partes menos accesibles del molde, por lo que los tubos de calor se pueden utilizar para la extracción del calor durante este proceso.

En algunos procesos, puede ser deseable, e incluso necesario, calentar partes del molde para asegurar el flujo continuo del material fundido en las regiones más inaccesibles y lejanas respecto del punto de inyección. Para obtener una solidificación rápida, el cambio de calentar a refrigerar debe realizarse durante un pequeño intervalo de tiempo con el fin de obtener ciclos lo más breves posibles. Los tubos de calor pueden ser utilizados, aprovechando su reversibilidad natural, para precalentar el molde y así asegurar un flujo continuo de material fundido hacia todas las cavidades del mismo.

1.4.2.4. Aplicaciones en energía solar

En los últimos años se ha utilizado el termosifón para la construcción de paneles solares térmicos. El sistema por tubo de vacío contiene un termosifón en su interior (véase Fig. 1.18), lo que permite la obtención de mayores temperaturas, sin sobrecalentamientos peligrosos y en menos tiempo que los sistemas clásicos de placa plana que calientan el agua directamente. La forma cilíndrica de los tubos hace que durante la mayor parte del día la radiación incida perpendicularmente. En cambio, en un colector de placa plana la radiación sólo incide así en las horas del mediodía. Además, se aprovecha la radiación directa y la difusa. Esta característica, combinada con el hecho de que el vacío en los tubos minimiza las pérdidas de calor, los hace ventajosamente eficientes con respecto a los sistemas tradicionales y resultan más eficientes en las zonas frías y con inviernos nubosos.

Una última particularidad es que debido a su diseño los tubos, al ser modulares, trabajan de forma independiente.



Figura 1.18. Esquema de un termosifón para colector de energía solar y detalle de colocación.

1.4.2.5. Conservación de la energía

Dada la efectividad con la que el termosifón transmite calor, es un buen candidato para aplicaciones que implican que la energía se conserve y, por ello, se ha usado en sistemas de recuperación de calor y dispositivos de conversión de energía. Como es bien sabido, el ahorro de energía ha crecido mucho en importancia debido al aumento del coste de los combustibles y la disminución de las reservas. Esto ha convertido al termosifón en una herramienta muy útil para un gran número de aplicaciones asociadas a esta práctica. Por ejemplo, en hornos industriales y en climatización.

Debido a las características propias de los termosifones como no tener partes móviles, ni requerimientos externos de potencia, una amplia variedad de tamaños, etc., existen un gran número de técnicas que los utilizan para recuperar calor proveniente de gases de escape, corrientes de gases o de agua caliente.

Las aplicaciones del termosifón, para este caso, se dividen en tres categorías:

- a) Recuperación del calor sobrante en procesos para reutilizarlo en los mismos procesos o en otros, como pueden ser el precalentamiento del aire de combustión. Esta área de aplicación es muy variada e implica un amplio rango de temperaturas y de funciones.
- b) Recuperación del calor residual [47] de un proceso para precalentar aire.
- c) En sistemas de aire acondicionado donde se trabaja, normalmente, con temperaturas relativamente bajas, siendo una tecnología simple y poco costosa.

En este último caso la longitud de los tubos oscila entre 1 y 5 m y el diámetro de 15 a 50 mm, siendo las potencias térmicas de 1 a 10 kW, por termosifón. Se utilizan tubos aleteados [48] para aumentar la superficie y mejorar los bajos coeficientes de intercambio térmico por convección, del orden de 20 a 50 W/(m²·K).

1.4.2.6. Refrigeración de componentes electrónicos

Actualmente, la aplicación más extendida de los termosifones y tubos de calor (en términos de cantidades empleadas) es la refrigeración de componentes electrónicos tales como transistores, dispositivos semiconductores y circuitos integrados, así como en componentes de equipos informáticos como, por ejemplo, los microprocesadores. En este campo, además de su efectividad, una de sus principales ventajas es que, a diferencia de los ventiladores, no emite ruido alguno.

Cada día se construyen ordenadores más potentes, con procesadores más capaces y de mayor rendimiento. De la misma forma y junto con este aumento en la potencia se produce un aumento en la cantidad de calor a disipar. Este problema se intensifica con la tendencia a la miniaturización, una de las principales metodologías de la industria electrónica para satisfacer las demandas del mercado: tecnología más rápida, pequeña, ligera y barata. El resultado de esta miniaturización es el incremento en los flujos de calor.

En la figura 1.19 se muestra la evolución de la potencia consumida por los procesadores a lo largo de los años.

Existen dos formas posibles de usar los termosifones en la refrigeración de componentes electrónicos: La primera consiste en situar el componente directamente en el termosifón y la segunda en colocar el componente sobre una chapa, en la cual se inserta el termosifón.

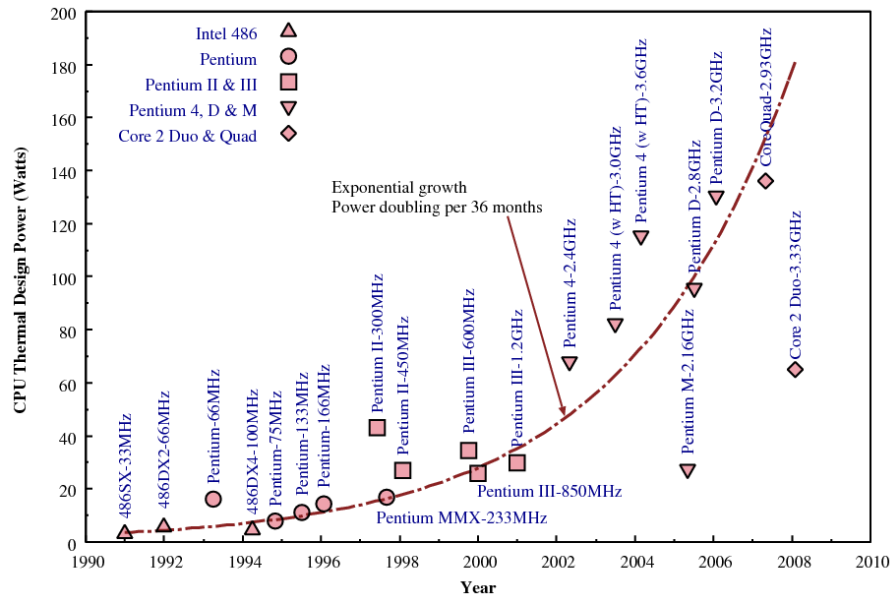


Figura 1.19. Evolución de la potencia de los microprocesadores. [Fuente: Intel]

En la figura 1.20 se puede ver todo el conjunto de la instalación [19] de un termosifón compacto, en anillo, con aletas de aluminio, colocado en un ordenador personal, HP Vectra, para la refrigeración de un microprocesador Pentium 4.

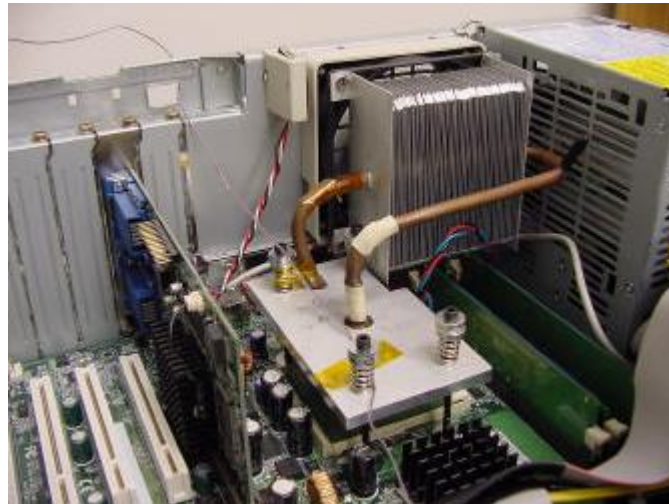


Figura 1.20. Termosifón en bucle instalado en un ordenador HP.

Los termosifones utilizados en los sistemas compactos, o empotrados, deben funcionar bajo diversos tipos de limitaciones, en particular con inclinación. Así Tuma y otros [49] ensayaron un termosifón, en posición casi vertical, y un disipador con cuatro tubos de calor integrados, en un ordenador con procesador Intel Pentium de 2,8 GHz, haciéndolo funcionar a 3,3 GHz.



Figura 1.21. Termosifón y tubos de calor para la refrigeración de un microprocesador.

En la figura 1.21 se puede ver a la derecha el termosifón, en su posición, y los tubos de calor a la izquierda. Aunque aquel era más ligero, 320 frente a 690 gramos, el termosifón conseguía entre 4 y 6 °C menos en las superficies de contacto y una resistencia térmica un 30 % menor.

También ensayaron la viabilidad del uso de un termosifón para la refrigeración de máquinas de videojuegos, véase la figura 1.22. Se sustituyó un conjunto de dos disipadores por un termosifón plano. Los autores admiten que aunque el condensador es bastante grande, la aplicación demuestra la utilidad de la tecnología para extraer calor en áreas amplias, sin necesidad de bombeo.

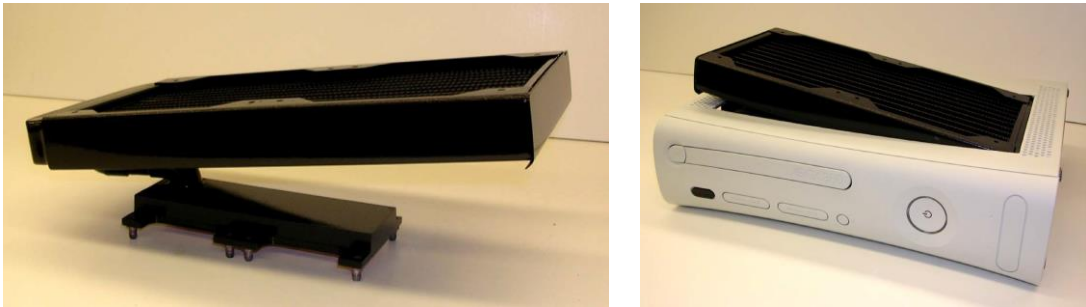


Figura 1.22. Termosifón solo e instalado en una Xbox 360.

En la figura 1.23 se ve un termosifón de diseño actual para la refrigeración de un microprocesador en un ordenador personal típico.



Figura 1.23. Termosifón para un ordenador personal.

En la figura 1.24 se muestra un nuevo diseño [50] de termosifón en bucle para la refrigeración de equipos electrónicos. El condensador, de acero, es un intercambiador de placas planas. La línea de vapor conecta la parte superior del cuerpo del evaporador por medio de una manguera de acero flexible de 3 m de longitud. Coaxial e internamente un

tubo de PVDF (fluoruro de polivinilideno) retorna el líquido al evaporador, de aluminio, que es modular y puede ir creciendo según la potencia a refrigerar. El fluido utilizado es pentafluoropropano R245fa.

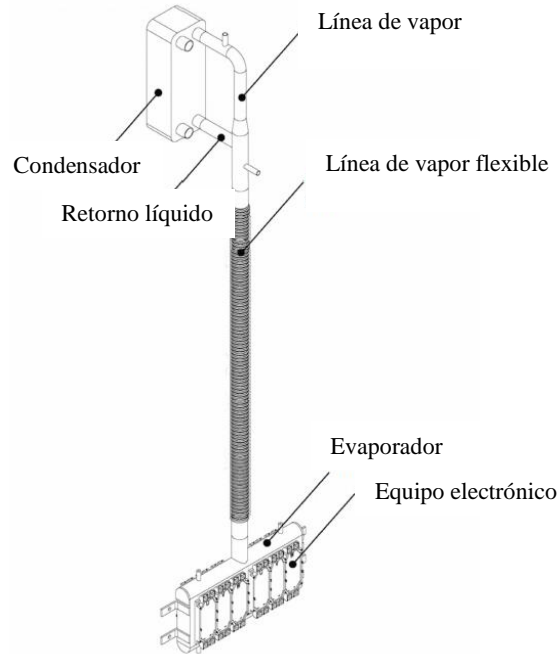


Figura 1.24. Termosifón flexible para refrigeración de un equipo electrónico.

En la figura 1.25 se ven varios tipos de termosifón desarrolladas para otras aplicaciones por la empresa Thermacore.



Figura 1.25. Tubo de calor de varios "dedos" y termosifones flexibles. [Catálogo Thermacore]

Todas las aplicaciones aquí mostradas permiten afirmar, como dice Srimuang, [51] que: "... hay numerosas razones para apoyar y financiar el estudio del uso de los termosifones en la recuperación de calor y para el ahorro de energía".

1.5. Breve reseña histórica

A lo largo de la historia, el desarrollo del termosifón y del tubo de calor ha seguido caminos paralelos, dada su similar configuración estructural y objetivos para su uso, (véase [5], [7], [10] y [22]). Las investigaciones se han encaminado a encontrar el material de la envolvente y el de la mecha, esto último sólo en el caso del tubo de calor, así como el fluido de trabajo ideal para cada temperatura.

El desarrollo del tubo de calor comenzó originalmente con Angier March Perkins, hijo de Jacob Perkins (patriarca de cuatro generaciones de ingenieros, que patentó en 1834 una máquina de hacer hielo, considerado el primer aparato impulsado mecánicamente capaz de fabricar hielo en cantidades importantes). Angier March trabajó inicialmente con el concepto de sistema de distribución de calor con un fluido de trabajo en una sola fase y obtuvo una patente en 1839, con la caldera de tubo hermético en ebullición, que trabajaba según este principio.

Ludlow Patton Perkins, descendiente del anterior, patentó el tubo Perkins en 1896 y amplió su uso para las calderas de las locomotoras y los hornos de panadería. El tubo Perkins era un sistema con un tubo largo y serpenteante que pasaba por un evaporador y un condensador, con lo que se conseguía que el agua en su interior trabajase en dos fases. El tubo Perkins fue el lanzamiento para el desarrollo del moderno tubo de calor, aunque realmente estos tempranos diseños para sistemas de transferencia de calor se correspondan con el termosifón, puesto que el retorno del líquido al evaporador es por gravedad.

La patente de un dispositivo similar al tubo de Perkins en el cual una serie de tubos verticales aleteados estaban colocados con el evaporador situado debajo del condensador fue obtenida, en 1929, por F. W. Gay.

Los equipos citados establecieron los principios del desarrollo de los termosifones actuales. Más tarde se desarrollaría el concepto de mecha, en el interior del termosifón, pasando a ser un tubo de calor.

La idea del tubo de calor, propiamente dicha, fue sugerida en un principio por R. S. Gaugler en 1942. En 1944, Gaugler solicitó, en colaboración con la General Motors, la primera patente de un dispositivo ligero de transmisión de calor el cual era, en esencia, el tubo de calor actual, al incorporar una mecha, o matriz porosa, para conseguir la acción capilar. Sin embargo, la tecnología de ese periodo no mostraba una clara necesidad de un dispositivo de este tipo y el proyecto no tuvo ninguna continuidad, permaneciendo inactivo durante dos décadas.

En otro contexto y entre 1939 y 1960, E. Schmidt, trabajó con termosifones llenos de dióxido de carbono o amoniaco, a temperaturas próximas a sus puntos críticos. Por otra parte, está reseñada, en 1960 en Alaska, la primera aplicación del termosifón para cimentaciones.

La idea fue resucitada, de forma más significativa, para el programa espacial, primero como sugerencia realizada por Trefethen, en 1962, que escribió un informe técnico para General Electric titulado “Sobre el bombeo de líquidos basado en la tensión superficial o el posible papel de la mecha de una vela en el espacio” y un año más tarde, en 1963, como una patente de aplicación, por Wyatt.

Sin embargo, no fue hasta finales de 1963 cuando empezaron a ser apreciadas las extraordinarias propiedades para la transmisión de calor mediante termosifones y tubos de calor, debido a la patente presentada por G. M. Grover. Él y sus colaboradores del laboratorio científico de Los Álamos, Nuevo México, redescubrieron este concepto y construyeron prototipos que supusieron una gran aportación para esta tecnología. A partir de ese momento, se llevó a cabo un importante desarrollo de esta tecnología. Grover [10] también acuñó el nombre tubo de calor (*heat pipe*) y explicaba “...con algunas limitaciones en el modo de uso, un tubo de calor puede verse como una estructura sinérgica de la ingeniería que es equivalente a un material con una conductividad térmica que supera ampliamente la de cualquier metal conocido.”

El primer tubo de calor construido por Grover utilizaba agua como fluido de trabajo y pronto fue seguido de un tubo de calor con sodio líquido en su interior, que operaba a 1100 K. En esta época se fabrican y ensayan numerosos prototipos, tanto para rangos de alta temperatura como para temperatura ambiente. En 1964, Grover, Cotter y Erickson [6] publicaron un importante artículo sobre estas investigaciones.

El reconocimiento del tubo de calor como un dispositivo térmico fiable se asentó gracias a una primera publicación, ya clásica, de Cotter [4] (1965), debido a sus resultados teóricos preliminares y al enunciarse, por vez primera, unos criterios básicos que van a permitir realizar el dimensionamiento de estos equipos. A partir de estos resultados, se comenzó a estudiar el tubo de calor y el termosifón en todo el mundo. Mientras tanto, otras aplicaciones establecieron firmemente que los tubos de calor podían resolver problemas críticos en transferencia de calor y en control de temperatura. El United Kingdom Atomic Energy Laboratory en Harwell comenzó a experimentar con sodio para convertidores termoiónicos de diodos. Además, científicos del Joint Nuclear Research Center en Ispra, Italia, iniciaron trabajos similares. Más tarde este centro se convertiría, bajo la dirección de Neu y Busse, en el núcleo investigador más activo fuera de EE.UU.

Pronto otros países como Alemania, Francia y la Unión Soviética se suman a la investigación de este campo y se realizan numerosos trabajos a partir de los años sesenta. En España, hasta la fecha, sólo ha habido un reducido número de trabajos y publicaciones.

El concepto de conductividad variable, o tubo de calor con control de temperatura, fue descrito por Hall en una patente de aplicación en octubre de 1964. Sin embargo, aunque el efecto de un gas no condensable fue demostrado en la publicación original de Grover, su importancia para conseguir conductividades variables no fue reconocida inmediatamente. En los años siguientes, gracias a los trabajos de Bienert y Brennan, en Dynatherm, y Marcus, en TRW, la teoría y la tecnología de los tubos de calor de conductancia variable avanzaron mucho. El primer tubo de calor criogénico fue desarrollado por Haskin en 1966 para el Laboratorio de Dinámica del Air Force Flight en la Base de la Fuerza Aérea Wright-Patterson.

El 5 de Abril de 1967, un grupo de ingenieros del Laboratorio Científico de Los Álamos realizaron la primera demostración de un tubo de calor en gravedad cero. Este exitoso primer vuelo experimental consiguió vencer la indecisión inicial que muchos diseñadores de naves espaciales tenían para usar esta nueva tecnología y solucionar así los siempre presentes problemas de control de la temperatura en dichas naves espaciales. Posteriormente, un mayor número de investigadores comenzaron a utilizar los tubos de calor en equipos espaciales, tanto para el control individual de la temperatura de los componentes, como para la estructura completa. El ejemplo más conocido de uso de esta tecnología es el Sky Lab.

Ya en 1964 la empresa Radio Corporation of America (RCA) se había constituido como la primera organización comercial para desarrollar la investigación de los tubos de calor. El desarrollo de las aplicaciones terrestres de los tubos de calor avanzó más despacio. En 1968, RCA desarrolló un tubo de calor para transistores usados en emisores de aeronaves, lo que probablemente, represente la primera aplicación comercial de los tubos de calor. La RCA trabajó con materiales tales como cobre, níquel, acero inoxidable y molibdeno para la envolvente y con agua, cesio, sodio, litio y bismuto como fluidos de trabajo. En estos estudios experimentales, se alcanzó la temperatura de 1650 °C.

A partir de los años sesenta se van sucediendo una serie de hitos que marcan la historia y el desarrollo de estos equipos. Entre ellos:

- En 1965, E. L. Long, patenta un termosifón para las cimentaciones en el permafrost y J. C Balch, lo hace para un sistema de refrigeración por suelo.
- 1966, F. J. Stenger, propone los tubos de calor con bombeo capilar en anillo (*CPL heat pipes*).
- 1969, V. H. Gray, propone los tubos de calor rotativos.
- 1972, Se introducen los tubos de calor en el observatorio astronómico orbital, (OAO-C).
- 1973, Primera International Heat Pipe Conference, en Stuttgart.
- 1974, Se ponen tubos de calor para el control térmico en satélites dando comienzo a las tecnologías de aplicación en satélites, (ATS-F).
- 1975, L. E. Wuelpern, patenta un equipo de convección de aire para la estabilización del permafrost.
- 1976, Aplicación de los tubos de calor de conductancia variable a la tecnología de comunicación en satélites, (CTS).
- 1977, Se instalan alrededor de 120 000 tubos de calor, Cryo-Anchor, en el sistema de oleoductos trans-Alaska (TAPS) por la compañía McDonnell Douglas Astronautics.
- 1984, T. P. Cotter, propone los microtubos de calor en la quinta Conferencia Internacional que tuvo lugar en Tsukuba, Japón.

- 1985, Primer Simposium Internacional sobre Tubos de Calor en Tokio.
- 1987, H. Akachi propone los tubos de calor oscilantes o pulsantes.

Para intentar ilustrar la importancia creciente de estos equipos se puede recordar que desde 1973, en que tuvo lugar la primera Conferencia Internacional en Stuttgart, las conferencias específicas se han sucedido, de forma regular, cada dos o tres años, en numerosos países. A partir de los años ochenta la abundancia de las distintas investigaciones y realizaciones prácticas abren el abanico de los campos de investigación sobre los tubos de calor.

En opinión de Schlitt [52], en una comunicación a la Décima Conferencia Internacional de Tubos de Calor, en 1997, el desarrollo de los últimos treinta años del siglo XX, se ha dividido según cada década. Así; los años setenta son los de la creatividad, los años ochenta de la puesta en funcionamiento (prototipos) y los años noventa vienen a desarrollar la investigación sobre los ciclos bifásicos. Conviene añadir que en el último decenio se ha dado un importante desarrollo de los tubos de calor con arterias

En los primeros años del siglo XXI se han escrito un gran número de publicaciones y estudios relacionados los tubos de calor y los termosifones y existe una constante revisión de los trabajos iniciales, por lo que se ha convertido en un importante tema de investigación. Ahora se producen en masa, a un ritmo de 10 millones por año, para gran cantidad de productos electrónicos como, por ejemplo, los ordenadores portátiles.

Como conclusión de esta breve historia se puede afirmar con Silverstein [53] que: "...uno puede maravillarse porque, en vista de su simplicidad conceptual y excepcional capacidad de transporte de calor sin necesidad de energía externa, la idea de tubo de calor no se haya tomado en serio antes. Una razón podría ser que dado que las fuerzas de tensión superficial, de las que depende la capilaridad son bastante débiles, era ilógico pensar que los sistemas basados en la capilaridad podían tener una capacidad de transporte de calor. Otra razón posible, y más convincente, es que con anterioridad al comienzo del programa espacial no había necesidad de un equipo para transporte de calor basado en la recirculación capilar para la transferencia de calor con fluidos".

REFERENCIAS

- [1] Chapman, A. J. *Transmisión del calor*. Madrid: Librería editorial Bellisco, 1990. 750 p. ISBN 84-85198-42-5.
- [2] Pioro, L. S., Pioro, I. L. *Industrial two-phase thermosyphons*. New York: Begell House, 1997. 288 p. ISBN 1-56700-064-9.
- [3] Holman, J. P. *Transferencia de calor*. Madrid: McGraw-Hill, 1998. 484 p. ISBN 84-481-2040-X.
- [4] Cotter, T. P. *Theory of Heat Pipes*. Los Alamos, N. M., 1965. Los Alamos Sci. Lab. Rep. LA-3246-MS.
- [5] Dunn, P. D., Reay, D. A. *Heat Pipes*. Oxford: Elsevier Science, Pergamon, 1994. 348 p. ISBN 0 08 041903 8.
- [6] Grover, G. M., Cotter, T. P., Erickson, C. F. *Structures of very high thermal conductance*. Journal of Applied Physic. 1964. Vol. 35, pp. 1990-1991.
- [7] Peterson, G. P. *An introduction to Heat Pipes. Modeling, testing and applications*. New York: John Wiley & Sons, 1994. 356 p. ISBN 0-471-30512-X.
- [8] Vasiliev, L. L. *Heat pipes in modern heat exchangers*. Applied Thermal Engineering, 2005, Vol. 25, pp. 1-19.
- [9] Miranda, A. L. *Tubos de calor. Una tecnología para el siglo XXI*. Barcelona: Ediciones CEAC, 2005. 168 p. ISBN 84-329-1094-5.
- [10] Faghri, A. *Heat Pipe Science and Technology*. Washington; Taylor Francis, 1995. 874 p. ISBN 1-56032-383-3.
- [11] Busse, C. A. *Theory of the ultimate heat transfer limit of cylindrical heat pipes*. International Journal of Heat Mass Transfer. 1973, Vol. 16, pp. 169-186.
- [12] Cotter, T. P. *Heat Pipes startup dynamics*. Proceedings SAE Thermionic Conversion Specialist Conference. Palo Alto, CA, 1967. Citado en Peterson, G. P. [7]
- [13] Chi, S. W. *Heat Pipes Theory and Practice*. Washington: Hemisphere, 1976. 242 p. ISBN 0 701 07181.
- [14] Larkin, B. S. *An experimental study of the two-phase thermosiphon tube*. Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering, 1971, Vol. 14, aug – sep, pp. 1-8.
- [15] Lee, Y., Mital, U. *A two-phase closed thermosyphon*. International Journal of Heat and Mass Transfer. Pergamon Press, 1972, Vol. 15, pp. 1695-1707.
- [16] Nusselt, W. *Die Oberflächenkondensation des Wasserdampfes*. Z. Ver.-Deutch. Ing. 1916. Vol. 60, pp. 541-569.
- [17] Rohsenow, W. A. *A method of correlating Heat Transfer data for surface Boiling of liquids*. ASME Transactions, 1952. Vol. 74, pp 969-975.
- [18] Sánchez, F., Carvajal, I., Tolentino, G., Abugaber J. *Diseño Térmico y Mecánico de un intercambiador de calor en base a Tubos Termosifones Bifásicos*. Información Tecnológica, 2001. Vol. 12, (3), pp. 63-70.

- [19] Pal, A., Joshi Y. K., Beitelmal M H., Patel C. D., Wenger T. M. *Design and Performance Evaluation of a Compact Thermosyphon*. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2002, Vol. 25, december, pp. 601-607.
- [20] Petroff, C., Beretta, G. P. *Experimental validation of a model for liquid levels and heat transfer rates in a closed two-phase thermosyphon*. Collected papers in Heat Transfer, ASME, New York, 1988, pp 169-175.
- [21] Noie, H. S., Sarmasti Emami, M. R., Khoshnoodi, M. *Effect of inclination angle and filling ratio on thermal performance of a Two-Phase thermosyphon under normal operating conditions*. Heat Transfer Engineering, 2007, Vol. 28, (4), pp. 365-371.
- [22] Lock, G. S. H. *The tubular thermosyphon, Variation on a Theme*. New York: Oxford University Press, 1992. 321 p. ISBN 0-19-856247-0.
- [23] Imura, H., Sasaguchi, K., Kozai, H., Numata, S. *Critical Heat Flux in closed two-phase thermosiphon*. International Journal of Heat Mass Transfer, 1983, Vol. 26, (8), pp. 1181-1188.
- [24] Ma, T., Liu, X., Wu, J. *Flow patterns and operating limits in two-phase closed thermosiphon*. Proceedings of the Sixth International Heat Pipe Conference, Vol. I, CNRS, Grenoble, France, 1987, pp. 424-429.
- [25] Groll, M., Nguyen-Chi, H., Kräling, H. *Reflux heat pipes as components in heat exchanger for efficient heat recovery*. Heat Recovery Systems & CHP, 1980, Vol. 1, pp. 55-63.
- [26] Reed, J. G., Tien, C. L. *Modeling of the two-phase closed thermosiphon*. Journal of Heat Transfer, 1987, Vol. 109, pp. 722-731.
- [27] Zuo, Z. J., Gunnerson, F. S. *Numerical modeling of the steady state two-phase closed thermosiphon*. International Journal of Heat Mass Transfer, 1994, Vol. 37, (17), pp. 2715-2722.
- [28] Casarosa, C., Dobran, F. *Experimental investigation and analytical modeling of a two-phase closed thermosiphon with imposed convection boundary conditions*. International Journal of Heat Transfer, 1988, Vol. 31, (9), pp. 1815-1833.
- [29] Cohen, H., Bayley, F. J. *Heat transfer problems of liquid-cooled gas-turbines blades*. Proceedings Institute of Mechanical Engineers, 1955, Vol. 169, (34), pp. 1063-1080.
- [30] Shiraishi, M., Yoneya, M., Yabe, A. *Visual study of operating limit in two-phase closed thermosyphon*. Proceedings of the Fifth International Heat Pipe Conference, Vol. I, Tsukuba, Japon, 1984, pp. 10-17.
- [31] Negishi, K., Kaneko, K., Matsuoka, T., Hirashima, M., Nishikawa, Y., Taguchi, M. *Heat-transfer performance of a corrugated-tube thermosyphon. Part 1. Evaporator performance*. Heat Transfer Japanese Research, 1991, Vol. 20, N° 2, pp. 144-157.
- [32] Jiao, B., Qiu, L. M., Zhang, X. B., Zhang, Y. *Investigation on the effect of filling ratio on the steady-state heat transfer performance of a vertical two-phase closed thermosyphon*. Applied Thermal Engineering, 2008, Vol. 28, pp. 1417-1426.
- [33] Shiraishi, M. *Influences of evaporator geometry on performance in two-phase closed thermosiphon*. Proceedings of the Sixth International Heat Pipe Conference, Vol. I, CNRS, Grenoble, France, 1987, pp. 609-613.
- [34] Bezrodny, M. K., Volkov, S. S. *Study of hydrodynamic characteristics of two-phase closed in closed thermosiphon*. Proceedings of the Fourth International Heat Pipe Conference, Vol. I, Oxford, England, 1981, pp. 115-123.

- [35] Wallis, G. B. *One dimensional two-phase Flow*. New York: McGraw-Hill, 1969. 408 p.
- [36] Bontemps, A., Goubier, C., Marquet, C., Solecki, J. C. *Heat transfer performance of a toluene loaded two-phase thermosyphon*. Heat Recovery Systems & CHP, 1989, Vol. 9, N° 4, pp. 285-297.
- [37] El-Genk, M. S., Saber, H. H. *Flooding limit in closed, two-phase flow thermosyphons*. International Journal Heat Mass Transfer, 1997, Vol. 40, (9), pp. 2147-2164.
- [38] Tien, C. L., Chung, K. S. *Entrainment limits in heat pipes*. AIAA Journal, 1979, Vol. 17, N° 6, pp. 643-646.
- [39] Park, Y. J., Kang, H. K., Kim, C. J. *Experimental study of the critical heat flux at the operating limit of a closed two-phase thermosyphon to the fill charge ratio*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, Vol. 45, pp. 4655-4661.
- [40] Shatto, D. P., Besly, J. A., Peterson, G. P. *Visualization study of flooding an entrainment in a closed two-phase thermosyphon*. Conference of Porous Media Mixture and Multiphase Heat Transfer, ASME, San Francisco, 1989, pp. 1-8.
- [41] Bage, B. K., Peterson, G. P. *A review of entrainment limits in thermosyphons and heat pipes*. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 1997, Vol. 11, N° 4, pp. 579-582.
- [42] Gorenflo, D., Chandra, U., Kothhoff, S., Luke, A. *Influence of thermophysical properties on pool boiling heat transfer of refrigerants*. International Journal of Refrigeration, 2004, Vol. 27, pp. 492-502.
- [43] Gorbis, Z. R., Savchenkov, G. A. *Low temperature two-phase closed thermosiphon investigation*. Proceedings of the Second International Heat Pipe Conference, Vol. I, Bolonia, Italia, 1976, pp. 37-45.
- [44] Incropera, F. P., DeWitt, D. P. *Fundamentos de transmisión del calor*. México: Prentice Hall, cuarta edición, 1999. 912 p. ISBN 0-471-30460-3.
- [45] Pioro, I. L., Vorontsova, M. V. *Calculation of the limiting heat flux for a liquid boiling in a two-phase thermal syphon*. Journal of Engineering Physics, 1987, Vol. 53, pp. 1003-1008.
- [46] Jiao, B., Qiu, L. M., Zhang, X. B., Zhang, Y. *Determination of the operation range of a vertical two-phase closed thermosyphon*. Heat and Mass Transfer, 2012, Vol. 48 (6), pp. 1043-1055.
- [47] Velasco, E., Rey, F. J. *Enfriamiento evaporativo y tubos de calor como sistemas de recuperación de energía*. Proceedings International Workshop Advances in Engineering of HVAC & R; 15-16 December 2005, Tordesillas, Valladolid, Spain.
- [48] Chaudourne, S. *Les échangeurs à caloducs*. Centre d'Etudes Nucléaires, Grenoble, 1987. 45 p.
- [49] Tuma P. E., Bamidele O. F., Stang L. J. *Condenser Design for Thermosyphons Utilizing Segregated Hydrofluoroether Working Fluid*. Proceedings 23rd IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, 18-22 March 2007, San Jose, CA, 6 pp.
- [50] Agostini, F., Agostini, B. *Flexible two-phase thermosyphon for power electronic cooling*. IEEE 33rd International Telecommunications Energy Conference (INTELEC), 9-13 October 2011, Amsterdam, Netherlands.
- [51] Srimuang, W., Rittidech, S., Bubphachot, B. *Heat transfer characteristics of a vertical flat thermosyphon*. Journal of Mechanical Science and Technology, 2009, Vol. 23, N° 2, pp. 2548-2554.

- [52] Schlitt, R. *Evolution of heat-pipe technology for satellite thermal control*. Proceedings of the Tenth International Heat Pipe Conference, Vol. I, Stuttgart, Alemania, 1997, pp. 409-414.
- [53] Silverstein, C. C. *Design and Technology of Heat Pipes for Cooling and Heat Exchange*. Taylor & Francis. 1992. 368 p. ISBN 0-89116-859-1.

Capítulo 2

Objetivos

2.1. Aproximación experimental

Un termosifón, como se ha explicado, es un tubo de calor, cerrado y sin mecha, que se coloca verticalmente y que contiene un fluido en su interior. Se trata de un intercambiador de calor no excesivamente complejo en su diseño, fiable y sin partes móviles. El termosifón permite el transporte de una gran cantidad de energía debido a que el fluido de trabajo cambia de fase. Uno de los aspectos a destacar de este sistema de transporte de calor es que, al estar basado en el cambio de fase, no tiene necesidad de ningún tipo de equipo que aporte energía externa para lograr su funcionamiento. Respecto de otros sistemas, su objetivo es el de simplificar el bombeo del líquido y la transmisión de calor, evitando la complejidad y el coste de una bomba convencional de líquido.

Desde los inicios en el estudio de los termosifones [1] se ha señalado que una de las dificultades más importantes que existen son el gran número de variables independientes a considerar, tales como: el diámetro del tubo, carga de fluido, ratio de las longitudes de evaporación y de condensación, flujo de calor y fluido de trabajo.

En la Tesis se plantea analizar el comportamiento de varios termosifones de pequeña potencia con distintos fluidos de trabajo. Como se puede intuir, la sustancia contenida en el interior del termosifón es uno de los factores que determina su comportamiento térmico y un aspecto importante será precisamente determinar la importancia que puede tener, en la mejora de la eficiencia global de cada termosifón, el fluido utilizado, así como poder dar unas pautas para determinar su elección en usos similares. En el estudio se trabajará con termosifones bifásicos de baja temperatura y los ensayos se harán a temperaturas próximas al ambiente, los cuales se utilizan actualmente, en refrigeración de componentes electrónicos, conservación de la energía por recuperación de calor residual o en energías renovables. Los trabajos de esta Tesis se iniciaron dentro de un proyecto de investigación [2] con una empresa.

Se ha diseñado la geometría de los termosifones y se han ido cambiando las sustancias de trabajo para llegar a conocer la modificación de su comportamiento térmico al variar éstas, a fin de optimizar la tecnología para la transferencia de calor por medio de termosifones. Dicho parámetro deberá valorarse frente a otros, tales como el material de construcción de la envolvente del termosifón, su tamaño y forma, coeficiente de llenado, inclinación, etc.

2.2. Objetivo general

Esta Tesis Doctoral tiene como objetivo principal el análisis de la influencia de las propiedades termofísicas de los fluidos de trabajo, contenidos en su interior, en el rendimiento del termosifón. Se ha estudiado cuál es el fluido que permite disipar un mayor flujo de calor para un mismo salto térmico, es decir, el fluido que menor resistencia térmica origina en el termosifón, lo cual implica un mayor rendimiento energético. Se han determinado las características fundamentales que deben poseer las sustancias de trabajo en el interior del termosifón para que, al acoplarlo a una fuente de calor (resistencia eléctrica, pastilla Peltier), éste se disipe de la manera más eficiente. Como fluidos de trabajo se utilizan sustancias comerciales, lo más puras posibles, con las que, también, se han hecho mezclas azeotrópicas.

Esta Tesis se ha basado en una aproximación experimental rigurosa. El método experimental adecuado a la instalación y los fenómenos a estudiar se han comprobado por técnicas estadísticas y, en concreto, se ha utilizado el diseño de experimentos y la regresión multivariable, como se detalla en el capítulo 7.

El estudio de las hipótesis se hace mediante análisis estadístico y se utiliza la técnica de diseño de experimentos. Mediante regresión múltiple se analizan las influencias de las siguientes propiedades termofísicas de las sustancias de trabajo: presión de vapor (p_v), densidad del líquido (ρ_l), densidad del vapor (ρ_v), entalpía de vaporización (h_{fg}), calor específico del líquido (c_l), calor específico del vapor (c_v), conductividad térmica del líquido (k_l), conductividad térmica del vapor (k_v), viscosidad del líquido (μ_l), viscosidad del vapor (μ_v), y tensión superficial (σ). Este análisis permite conocer qué propiedades influyen en la resistencia térmica del termosifón y de qué manera son más, o menos, influyentes. Así se puede saber qué hace que una sustancia sea mejor que otra para el buen funcionamiento del termosifón.

Se han hecho ensayos con varios prototipos de termosifones que incluyen diversos materiales y geometrías, tanto cilíndricas como prismáticas. Los ensayos, tanto con los prototipos cilíndricos como con el prismático, consisten básicamente en, primero, hacer funcionar al termosifón en unas condiciones estables de trabajo (estado estacionario) con diferentes fluidos y, segundo, en medir en estas condiciones de estabilidad el funcionamiento del termosifón. De estas mediciones se obtienen las diferencias de comportamiento en los termosifones con los distintos fluidos de trabajo.

El proceso de diseño de estos dispositivos de intercambio de calor, consiste en determinar la geometría (forma y tamaño), el material del recipiente y el tipo y cantidad de fluido de trabajo con el fin de satisfacer los requerimientos de capacidad de transferencia de calor a las temperaturas demandadas, de forma segura, estable en el tiempo y al menor coste posible.

2.3. Objetivos específicos

Entre los objetivos específicos a alcanzar en el desarrollo de la Tesis están, por una parte, comprobar si las hipótesis a las que se han basado proyectos y trabajos anteriores son válidas y por otra parte, estudiar qué propiedades de las sustancias con las que se han hecho los ensayos son influyentes y de qué manera.

Teniendo esto en cuenta, además de hacer funcionar los termosifones con diferentes fluidos de trabajo, en las investigaciones que recoge la Tesis se han realizado ensayos modificando otras variables que también gobiernan el rendimiento y la resistencia térmica de los prototipos como son: la temperatura ambiente, la geometría del termosifón, el coeficiente de llenado, la inclinación, la convección en las aletas del condensador, así como otra serie de experiencias que se han considerado de interés. Por lo tanto, también se van a presentar los resultados de estos ensayos, mostrándose los cambios de rendimiento de los prototipos al modificarse las mencionadas variables.

Los objetivos específicos de esta Tesis son pues los siguientes:

- a) Determinar la influencia de las propiedades termofísicas de los fluidos de trabajo, en el rendimiento del termosifón. Para ello se estudian las propiedades termofísicas de las sustancias, por medio de sus ecuaciones de estado, para ver en qué manera afectan éstas al comportamiento del termosifón y así poder conocer cuáles son más, o menos, influyentes.
- b) Encontrar cuales son las sustancias mas apropiadas para su uso, como fluidos de trabajo, en termosifones a baja temperatura, entre 0 °C y 100 °C.
- c) Hacer una comparación de los resultados obtenidos en los ensayos con los distintos prototipos de termosifón a ensayar.

- d) Evaluar la influencia de distintas variables y de las interacciones entre ellas mediante el conjunto de técnicas estadísticas de diseño de experimentos y análisis de regresión multivariable.
- e) Intentar obtener algunas reglas sencillas para la selección de los fluidos de trabajo.
- f) Buscar los valores óptimos de estas propiedades termofísicas, mediante métodos de optimización de funciones, tales que proporcionen la menor resistencia térmica para cada temperatura ambiente.
- g) Diseñar una metodología que permita ensayar los termosifones, verificándola y validándola.

REFERENCIAS

- [1] Larkin, B. S. *An experimental study of the two-phase thermosiphon tube*. Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering, 1971, Vol. 14, aug – sep, pp. 1-8.
- [2] Domínguez, M., González, J. *Desarrollo de refrigeradores domésticos empleando la termoelectricidad y los termosifones con cambio de fase*. Proyecto PETRI (PRT1995-0441-OP-02-02). Universidad Pública de Navarra, Instituto del Frío (CSIC) y la empresa BSH Fabricación, S.A.

Capítulo 7

Análisis de resultados y optimización

7.1. Introducción al análisis estadístico

El análisis estadístico constituye la herramienta esencial que va a permitir realizar el estudio detallado de los datos experimentales de esta tesis. Este análisis conducirá a la obtención de unos resultados y conclusiones de utilidad, de ahí que se haya considerado interesante hacer una introducción [1] y [2], en el presente capítulo, sobre las técnicas estadísticas que van a emplearse.

7.1.1. Regresión múltiple

La regresión múltiple implica los mismos supuestos que la regresión simple:

- a) Linealidad: la relación entre las variables es lineal.
- b) Independencia: los errores en la medición de las variables explicativas son independientes entre sí.
- c) Homocedasticidad: los errores tienen varianza constante.
- d) Normalidad: los errores aleatorios se distribuyen según una normal de media cero y varianza σ^2 .

Además hay que añadir otros dos supuestos más:

- e) Se requiere que el número de observaciones n , exceda al número de variables independientes p , en por lo menos dos.
- f) Ninguna de las variables independientes deben estar linealmente relacionadas. Si existe esta relación surge un problema grave conocido como multicolinealidad. Este fenómeno puede hacer que los signos algebraicos sean opuestos a lo que la lógica dicta, mientras que incrementa de forma notoria el error estándar de los coeficientes.

7.1.2. Evaluación del modelo de regresión

Una vez estimado el modelo de regresión es preciso evaluarlo para determinar si proporciona unos ajustes y explicaciones satisfactorias. Existen varias pruebas las cuales se detallan a continuación.

7.1.2.1. Coeficiente de determinación (R^2)

Indica qué porcentaje del cambio en la variable dependiente (y) es explicado por la variación en las variables independientes (x). Mide la fuerza de la relación entre la variable respuesta (dependiente) y las variables explicativas (independientes).

7.1.2.2. Coeficiente de determinación corregido ($R^2_{ajustado}$)

Debido a su importancia R^2 se incluye en la mayoría de los programas estadísticos. Es una forma rápida y fácil de evaluar el modelo de regresión para determinar cómo de bien se ajusta el modelo a los datos. Además de los coeficientes de regresión en sí mismos, R^2 es quizás el estadístico más comúnmente observado y el que se estudia más de cerca en el análisis de regresión.

Sin embargo, si no se tiene cuidado, R^2 puede inflarse artificialmente. Se puede incrementar simplemente adicionando otra variable independiente al modelo. Incluso si alguna variable absurda, sin un poder realmente explicativo, se incorpora al modelo, R^2 aumentará, pero puede dar resultados poco realistas al pronosticar el valor de la variable independiente.

Por consiguiente es una práctica común en regresión múltiple presentar el coeficiente de determinación corregido. Este estadístico se ajusta a la medida del poder explicativo para el número de grados de libertad. Esto es, agregar otra variable explicativa termina en la pérdida de otro grado de libertad y, por tanto, $R^2_{ajustado}$ decrecerá si se adiciona una variable que no ofrece suficiente poder explicativo como para justificar su pérdida en grados de libertad. La conclusión práctica es que si $R^2_{ajustado}$ se reduce demasiado al agregar un nuevo predictor, debe considerarse eliminar este último del modelo de regresión.

7.1.2.3. Análisis de varianza

Dado el modelo de regresión la primera pregunta que debe hacerse es si éste tiene algún valor explicativo. Esto puede responderse mejor realizando el análisis de varianza (ANOVA), que supone la evaluación del modelo como un todo. El procedimiento del ANOVA prueba si alguna de las variables independientes tiene una relación con la variable dependiente. Si una variable independiente (x_i) no está relacionada con la variable respuesta (y), su coeficiente (β_i) debería ser nulo. El procedimiento ANOVA prueba la hipótesis nula de que todos los coeficientes β son cero contra la alternativa de que por lo menos uno de ellos no lo es.

Si no se rechaza la hipótesis nula, entonces puede concluirse que no hay relación lineal entre y y cualquiera de las variables independientes. Por otra parte, si la hipótesis nula se rechaza, entonces al menos una variable independiente está linealmente relacionada con y .

Se emplea la prueba de significación F para probar la hipótesis nula, pero muchas veces es más intuitivo el uso del p-valor. Se puede decir que si el p-valor en la tabla ANOVA es inferior a 0,01, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables para un nivel de confianza del 99%. Si el nivel de confianza se hubiese situado en el 95%, lo que es más habitual, aunque también menos estricto, bastaría con que el p-valor fuese inferior a 0,05.

7.1.3. Elección del conjunto de regresión

La elección del mejor conjunto de regresión [3] comporta no pocos problemas y decisiones a tomar por parte del experimentador. En primer lugar debe decidirse el tipo de relación funcional de la regresión (si es lineal, cuadrática, etc.), y después se procede a elegir a priori el número de variables que intervienen en el modelo. Decidir definitivamente el mejor conjunto de variables que forman parte de la regresión es tarea difícil. Deben analizarse de forma conjunta y complementaria los resultados obtenidos con el test de la t-Student para los coeficientes individualizados, el análisis de varianza de la regresión y la detección de multicolinealidad.

Existen diferentes criterios que pueden usarse para la comparación de modelos de regresión. En la tesis se han empleado tres: el coeficiente de R^2 ajustada, el criterio de Cp de Mallows y el procedimiento de regresión paso a paso.

7.1.3.1. Criterio del coeficiente de determinación múltiple R^2 ajustada

Este criterio permite seleccionar como mejor conjunto de regresión aquel que maximiza el coeficiente de determinación múltiple corregido entre todos los posibles conjuntos de regresión.

7.1.3.2. Criterio C_p de Mallows

Es otro de los criterios que permite seleccionar un conjunto de k variables explicativas en problemas de regresión lineal múltiple. Se realizan todas las regresiones posibles y se comparan los resultados mediante el estadístico C_p de Mallows.

Para un modelo particular de p parámetros (incluyendo la ordenada en el origen) se eligen como adecuados aquellos subconjuntos de regresión con un valor bajo de C_p menor que p , pero próximo a él.

7.1.3.3. Selección paso a paso

Se suele utilizar la selección paso a paso hacia delante o hacia atrás cuando existe un número elevado de variables. El procedimiento hacia adelante selecciona de forma automática las variables que entran a formar parte de la regresión tomándolas una a una y contrastando su contribución en términos de la reducción de la suma de cuadrados del error. Este método presenta el inconveniente de que su selección puede no ser única e incluso puede llegar a obviar otros buenos conjuntos de regresión. De manera similar, el método hacia atrás realiza la selección en sentido contrario.

7.1.4. Diagnóstico del modelo

Se van a introducir algunos procedimientos que permiten comprobar si el modelo de regresión considerado es o no adecuado, teniendo en cuenta diversos aspectos: por ejemplo, comprobando si la forma funcional de la variable explicativa es correcta y detectando si existen observaciones atípicas (tanto en x como en y) y observaciones influyentes. De modo general se entiende por diagnóstico del modelo al proceso de validación del mismo, es decir, la verificación de las hipótesis básicas planteadas, tales como la normalidad de los errores y la detección de observaciones anómalas tanto en la variable respuesta como en las explicativas.

En la diagnosis del modelo juegan un papel predominante los puntos influyentes que se detectan utilizando las medidas de influencia. Por ello se definen en primer lugar puntos de nivel y puntos influyentes, y también diversos tipos de residuales con el objetivo de presentar medidas de influencia y validar el modelo de regresión con errores normales.

7.1.4.1. Puntos de nivel y puntos influyentes.

Aquellas observaciones cuyos residuales sean grandes son candidatas a una investigación posterior. Sin embargo, puede también darse el caso de que observaciones con residuales pequeños manifiesten un efecto muy marcado sobre los coeficientes del modelo.

Para estudiar estos fenómenos se introducen los conceptos de puntos de nivel y puntos influyentes.

Es frecuente que todos los valores de las variables explicativas (x) estén razonablemente repartidos a lo largo del rango de variación de la misma. Sin embargo, puede suceder que algunos los valores estén muy lejos del resto. Dichos valores aislados puede afectar en exceso al ajuste del modelo y se denominan puntos de nivel. Se define el nivel de un punto como una medida que determina la distancia de un punto al centroide del resto de puntos del espacio del diseño. La presencia de un punto de nivel no significa que dicho punto vaya a tener un efecto marcado sobre el ajuste del modelo. Esto depende de la magnitud de la respuesta observada para el punto en cuestión, no sólo de las variables explicativas. Si la eliminación de un punto de nivel proporciona un gran cambio en el ajuste del modelo, se dice que el punto es influyente.

Los puntos de nivel malos se llaman también observaciones atípicas. Si se presentan en la variable respuesta se les denomina outliers en y . Se detectan normalmente utilizando los residuales del modelo. Si se presentan en las variables explicativas se les denomina outliers en x y se detectan haciendo uso de la matriz de proyección cuya explicación teórica y definición matemática exceden las pretensiones básicas que se persiguen en este capítulo, sólo decir que da una idea de si el nivel de un determinado punto es grande o no.

7.1.4.2. Residuales.

Las representaciones gráficas de los residuales son herramientas adecuadas para examinar el modelo de regresión lineal con errores normales. Estas representaciones permiten evaluar los siguientes aspectos del modelo:

- a) Los errores muestran algún tipo de correlación y, por tanto, no son independientes o, en cambio, son independientes.
- b) Los errores no tienen varianza constante.
- c) Una o varias variables explicativas entran a formar parte del modelo pero de forma no lineal. Por ejemplo, en lugar de considerar x se ha de considerar un polinomio de grado dos o dicha variable al cuadrado.
- d) Existen observaciones atípicas.
- e) Los errores no siguen una distribución normal.

Las representaciones gráficas más habituales de los residuales para el modelo se exponen a continuación:

Diagrama de dispersión de los residuales; Pueden indicar presencia de conglomerados (agrupaciones de datos) o cierta correlación si es que hay, por ejemplo, grupos de residuales positivos agrupados por un lado y residuales negativos agrupados por otro, etc.

Estadístico de Durbin-Watson; Mide, también, la aleatoriedad de los residuos. Este parámetro examina los residuos determinando si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se han introducido los datos. Para poder descartar esta correlación, dicho estadístico deberá presentar un valor próximo a 2, tanto por exceso como por defecto.

Gráficos de los percentiles de la distribución normal –QQ-norms; Analiza si los residuales se distribuyen siguiendo una distribución normal; para que así sea deben ajustarse a una línea recta.

Gráficos de los residuales frente a los valores ajustados; La representación de los residuales frente a los valores ajustados debe aparecer como una banda en línea recta horizontal y no debe presentar tendencia alguna. De presentar alguna se estaría violando el supuesto de linealidad. También permite detectar heterocedasticidad (varianza no constante) y posibles puntos atípicos.

Gráficos de los residuales frente a las variables explicativas; Permiten detectar si alguna variable explicativa ha de incluirse en el modelo de forma no lineal. Saldrán tantas gráficas como variables explicativas tenga el modelo de regresión.

Valores observados frente a los valores ajustados; Cuanto más próximos estén ambos entre sí y por tanto cuanto más próximos estén a la diagonal del cuadrado, mejor será el ajuste del modelo lineal a los puntos.

7.1.4.3. Medidas de influencia

Hay varios estadísticos que miden la influencia en problemas de regresión y que permiten detectar puntos. Entre ellos se van a considerar algunos de los más empleados como:

Valor de influencia; Es un estadístico que indica lo influyente que es cada observación en la determinación de los coeficientes del modelo estimado. Miden el impacto “a priori” de cada caso. Como regla general valores menores que 0,2 se consideran poco influyentes, entre 0,2 y 0,5 son arriesgados y los valores superiores a 0,5 indican influencia.

Distancia de Mahalanobis; Es una medida de influencia a priori. Mide la distancia de cada caso respecto a las medias de las variables predictoras. No debe superar al valor de chi-cuadrado (distribución estadística de referencia para ciertos contrastes) para k grados de libertad y un nivel de significación (p-valor) de 0,001.

Dffits; Son también llamados distancias de Welsch-Kuh, miden la influencia de la i -ésima observación sobre el valor predicho. Miden por tanto el cambio en la predicción i -ésima relativa al error estándar cuando la i -ésima observación ha sido eliminada. Se aconseja investigar a posteriori aquellas observaciones cuyo dffits sea superior en valor absoluto a $2\sqrt{(p+1)/n}$ donde p es el número de variables independientes que constituyen el modelo de regresión y n es el número de observaciones.

7.1.5. Multicolinealidad

La colinealidad (o multicolinealidad) es un problema del análisis de regresión que consiste en que los predictores del modelo están relacionados constituyendo una combinación lineal. Este hecho tiene consecuencias fundamentales en el modelo de regresión: si los predictores se encuentran en combinación lineal, la influencia de cada uno de ellos en el criterio no puede distinguirse al quedar solapados unos con otros; no se consigue una explicación del fenómeno en cuestión; los pronósticos no son nada fiables, puesto que otra combinación de predictores introducida en el modelo variando el orden, produce predicciones en el criterio contradictorias; no se realiza una selección adecuada del orden de entrada de los regresores en el modelo, y un largo etcétera. Es un problema que no tiene fácil solución, ya que en definitiva se trata de pedirle a la muestra de datos más información de la que posee.

7.1.5.1. Detección de la multicolinealidad

Existen múltiples formas de detección de la multicolinealidad. Aquí se va a presentar un método de gran difusión que utiliza el factor de inflación de varianza. Estos factores miden el incremento que se produce en la varianza de los estimadores de los coeficientes de regresión, al comparar dicha varianza con la que deberían tener si las variables predictoras fuesen incorreladas.

Se cumple que el factor de inflación de la varianza $VIF_k = 1$ cuando $R_k^2 = 0$, es decir, cuando x_k no depende linealmente del resto de variables. Cuando $R_k^2 \neq 0$, entonces VIF_k es mayor que 1, indicando que la varianza del coeficiente de regresión se ha inflado, es decir, ha aumentado como consecuencia de la presencia de multicolinealidad. Si la asociación de x_k con el resto de variables es perfecta, entonces $R_k^2 = 1$ y VIF_k , al igual que la varianza del coeficiente de regresión, no están acotadas.

El proceso de detección de multicolinealidad consiste en calcular la media de los factores de inflación de varianza de los estimadores de los coeficientes del modelo de regresión estandarizado.

Si $\overline{\text{VIF}}$ es muy superior a 10, estamos ante un importante problema de multicolinealidad. Por ejemplo, $\overline{\text{VIF}} = 5$ indicaría que el valor esperado de la suma de cuadrados de los errores en la regresión mínimo cuadrática estandarizada es 5 veces mayor que lo que debería ser si las variables predictoras estuviesen incorreladas.

7.1.5.2. Corrección de la multicolinealidad

Para intentar solventar el problema de la multicolinealidad sólo cabe actuar en alguno de los siguientes sentidos:

- a) Eliminar variables predictoras, con lo que se reduce el número de parámetros a estimar.
- b) Incluir información externa a los datos originales.

Si se opta por el primero de ellos, se trata de suprimir, o bien ciertas variables que se encuentren altamente correlacionadas, o bien buscar combinaciones lineales mediante el Análisis de Componentes Principales aplicado a la regresión. La segunda alternativa conduce a trabajar con estimadores contraídos o bayesianos.

En ambas opciones se sustituyen los estimadores mínimos cuadrados de los coeficientes de regresión por estimadores sesgados. Estos procedimientos forman parte de la regresión sesgada, no lineal, pero que sigue cumpliendo el supuesto de los mínimos cuadrados. Además, estos estimadores, a pesar de ser sesgados, tienen un error cuadrático medio mucho menor, que es lo que se pretende al corregir la multicolinealidad.

Los más utilizados son:

Eliminación de alguna variable predictora; Es la solución más cómoda, ya que únicamente hay que eliminar aquellos predictores correlacionados con otros. Los estimadores que resultan tienen una varianza de error menor.

Análisis de Componentes Principales; El análisis de Componentes Principales (ACP) constituye una importante alternativa al ajuste por mínimos cuadrados junto con la regresión ridge.

El análisis de componentes principales reduce el número de variables del modelo de regresión construyendo nuevas variables como combinaciones lineales de las originales. Por ejemplo, con variables con alta dependencia, caso que ocupa este apartado, es frecuente que un pequeño número de nuevas variables, menos del 20 por 100 de las originales, expliquen la mayor parte, más del 80 por 100 de la variabilidad original.

La técnica de componentes principales es debida a Hotelling y su utilidad es doble:

- a) Permite representar óptimamente en un espacio de dimensión pequeña observaciones de un espacio general p -dimensional. En este sentido, el análisis de componentes principales es el primer paso para identificar las posibles variables latentes, o no observadas, que generan los datos.
- b) Permite transformar las variables originales, en general correladas, en nuevas variables incorreladas, facilitando la interpretación de los datos.

Regresión ridge (o en cadena); La regresión ridge es una modificación del procedimiento de regresión múltiple mediante mínimos cuadrados que permite evitar las perturbaciones causadas por una presencia bastante acusada de multicolinealidad en las variables explicativas. Los coeficientes de la ecuación de regresión estimados mediante este método se diferencian de los calculados mediante la regresión habitual en que son ligeramente sesgados, pero, a menudo, más exactos que los de la ecuación de regresión tradicional, sobre todo en el caso de variables correladas. Este método es el que se ha utilizado en la tesis.

Esta técnica utiliza un nuevo parámetro denominado parámetro de cadena que controla el tamaño del sesgo de los estimadores de los coeficientes de la ecuación de regresión. Para un valor de cadena nulo, los coeficientes son los mismos que los de la ecuación de regresión por mínimos cuadrados. Conforme el parámetro va creciendo (generalmente por debajo de 1), el sesgo se hace más pronunciado y los coeficientes de la ecuación más precisos.

Las curvas de los valores de los coeficientes de la ecuación, en función del parámetro de cadena, indican la forma de comportarse de los coeficientes al desviarse del estimador de mínimos cuadrados que calcula la regresión múltiple. A este respecto, hay que hacer notar que la horizontalidad en la curva de un coeficiente significa que, a pesar de aumentar el sesgo, el coeficiente sigue siendo el mismo.

Por otra parte, una curva que ascienda o descienda bruscamente conforme el parámetro de cadena aumenta, indica que el estimador de mínimos cuadrados para el coeficiente de la variable en cuestión no era en absoluto adecuado. Con ayuda de esta curva puede seleccionarse el valor más adecuado del coeficiente. Existen dos criterios principales que orientan sobre su elección:

- a) Aquel parámetro de cadena lo más pequeño posible que se encuentre en un tramo en que la curva ridge sea horizontal.
- b) Elegir el parámetro de cadena de modo que el máximo VIF sea menor de 10 y, preferiblemente, no mucho mayor que 1.

La elección es, por supuesto, subjetiva y depende en gran medida de la apreciación de quien realiza el estudio. Lo que sí que no tiene discusión es cómo la regresión múltiple habitual (con parámetro de cadena 0) no es adecuada para este modelo si se atiende a la gran variación de los valores de los coeficientes en el rango de parámetro de cadena 0 - 0,1.

La regresión ridge puede ser empleada también para seleccionar las variables que van a conformar el modelo de regresión. Como se parte del supuesto de multicolinealidad los estimadores de contraste habituales [3] no sirven y éstos se sustituyen por un proceso algo más subjetivo en el que hay que tener en cuenta algunas pautas:

- a) Eliminar las variables cuyos coeficientes sean estables pero de poco valor. Si se miran los coeficientes estandarizados se tendrá una idea más exacta de la magnitud relativa y, por tanto, de la importancia de éstos.
- b) Eliminar las variables con coeficientes inestables ya que no son capaces de mantener su poder predictivo.

7.2. Ensayos realizados

En el capítulo 6 se han expuesto los ensayos que se han realizado y sus resultados. Se recuerdan, a continuación en la tabla 7.1, de manera esquemática, con el fin de tener presente en todo momento de dónde han salido los datos que van a analizarse. La tabla refleja los cinco tipos de termosifones empleados junto con las sustancias que han sido ensayadas en cada uno de ellos.

Tabla 7.1: Relación del tipo de termosifón con las sustancias ensayadas.

TIPO DE TERMOSIFÓN	SUSTANCIAS ENSAYADAS
<p style="text-align: center;">Cobre (192 observaciones)</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) Agua 2) Ciclopentano 3) Dietil éter 4) Etanal 5) Metanoato metilo 6) Isopentano 7) Metanol 8) N-Hexano 9) N-Pentano 10) Perfluoroheptano 11) Propanal 12) R-141b 13) R-365mfc 14) Acetona + N-Pentano 15) Ciclopentano + Metanol 16) Dietil éter + Metanoato de metilo
<p style="text-align: center;">Pequeño de acero (168 observaciones)</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) Acetona 2) Agua 3) Ciclopentano 4) Dietil éter 5) Isopentano 6) Metanol 7) N-Hexano 8) N-Pentano 9) Perfluoroheptano 10) R-141b 11) R-365mfc 12) Acetona + N-Pentano 13) Ciclopentano + Metanol 14) Dietil éter + Metanoato de metilo

Tabla 7.1: Relación del tipo de termosifón con las sustancias ensayadas. (Continuación)

TIPO DE TERMOSIFÓN	SUSTANCIAS ENSAYADAS
<p align="center">Grande de acero (84 observaciones)</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) Agua 2) Dietil éter 3) Isopentano 4) N-Hexano 5) Perfluoroheptano 6) R-141b 7) R-365mfc
<p align="center">Prismático de aluminio con control de potencia (108 observaciones)</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) Agua 2) Dietil éter 3) Isopentano 4) N-Pentano 5) Perfluoroheptano 6) R-141b 7) R-365mfc 8) Acetona + N-Pentano 9) Dietil éter + Metanoato de metilo
<p align="center">Prismático de aluminio sin control de potencia (108 observaciones)</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) Agua 2) Dietil éter 3) Isopentano 4) N-Pentano 5) Perfluoroheptano 6) R-141b 7) R-365mfc 8) Acetona + N-Pentano 9) Dietil éter + Metanoato de metilo

Para cada combinación de termosifón con sustancia de trabajo de la tabla se ensayaron tres coeficientes de llenado o nivel de carga (baja, media y alta) y para cada coeficiente de llenado, a su vez, cuatro temperaturas ambiente (10, 25, 32 y 43°C) lo que supone un total de 660 observaciones. Tras la eliminación de las observaciones incorrectas debidas a diversas causas (fallos de sondas, mal funcionamiento de las cámaras, presencia de burbujas de aire...) el volumen de observaciones válidas se redujo a la cifra de 568.

Con los datos de cada una de estas observaciones se estimaron las propiedades termofísicas, que se han expuesto, en el anexo V, en las tablas elaboradas al efecto tal y como se estudió en detalle en el capítulo 6, obteniéndose, de esta forma, toda la información precisa para comenzar su tratamiento estadístico-matemático.

7.3. Métodos estadísticos empleados para el análisis

El objetivo final de los análisis de resultados que van a exponerse a continuación es la obtención de un conjunto de expresiones que relacionen la resistencia térmica (variable tomada como testigo de la transmisión del calor) con las propiedades termofísicas de los fluidos de trabajo ensayados y con las distintas condiciones de ensayo (temperatura ambiente, coeficiente de llenado, tipo de termosifón). Se buscarán, finalmente y a partir de ellas, los rangos de valores que permiten el trabajo óptimo de los termosifones en estudio.

La consecución de estos objetivos involucra una serie de técnicas estadístico-matemáticas que van a exponerse a continuación.

a) Obtención de expresiones que relacionen la resistencia térmica con las propiedades termofísicas y con las condiciones de ensayo.

En primer lugar hay que señalar cómo se han clasificado los datos experimentales identificándolos con las distintas variables que van a constituir las expresiones matemáticas finales. La resistencia térmica, R_{term} va a ser la variable dependiente, o variable respuesta, siendo el resto de variables (propiedades termofísicas, carga, temperatura ambiente, termosifón) las variables independientes o explicativas. Dentro de las variables explicativas cabe distinguir dos grupos: las variables cuyos valores han sido determinados previamente y que conforman las condiciones de ensayo (temperatura ambiente, carga, tipo de termosifón) y las variables cuyas magnitudes no son completamente controlables a priori (propiedades termofísicas de las sustancias) y resultan aleatorias.

Inicialmente se pensó en realizar esta tesis mediante un análisis de experimentos ya que la metodología de los ensayos estaba pensada para ello. Un análisis de experimentos requiere que las variables explicativas estén categorizadas, esto es, que los valores que van a tomar las variables sean determinados con anterioridad por el investigador, tal y como ocurre con las condiciones de ensayo (temperatura ambiente, carga, tipo de termosifón).

Sin embargo el grueso de los datos lo constituyen las propiedades termofísicas de las sustancias y estas variables no son totalmente controlables. Si bien el análisis de experimentos contempla esta posibilidad, la inclusión de éstas dificulta en gran medida su ejecución.

Debido a esto se ha optado por un modelo de regresión lineal múltiple que evalúe la relación entre las propiedades termofísicas y la resistencia térmica, independientemente de las condiciones de ensayo (temperatura ambiente y coeficiente de llenado). De esta forma se podrá conocer en qué grado influye por sí solo el tipo de sustancia en la transmisión del calor.

Se aplicará posteriormente un análisis de experimentos para examinar la relación entre las condiciones de ensayo excluidas en la regresión (T_{amb} , *Carga*, *Termosifón*) y la variable dependiente, R_{term} . Este análisis de experimentos formará parte del estudio de superficie de respuesta que se expondrá más adelante.

b) Búsqueda de los rangos de valores de las distintas variables que optimizan el funcionamiento de los termosifones.

Para la consecución de ese objetivo se emplearán dos técnicas distintas de análisis, una para cada uno de los dos grupos de variables independientes señalados anteriormente.

1) Análisis de superficie de respuesta.

Irá acompañado, tal y como se ha indicado antes, de un análisis de experimentos que relacionará la resistencia térmica únicamente con las variables categorizadas (tipo de termosifón, carga y temperatura ambiente) y tratará de mostrar en qué condiciones externas a la sustancia se maximiza la transferencia de calor (o se minimiza R_{term}).

2) Optimización de las expresiones de la regresión obtenidas a partir de la relación entre R_{term} y las propiedades termofísicas de las sustancias.

Inicialmente se pensó en usar el programa Lingo para hallar esta optimización y con ello determinar los rangos de valores de las propiedades termofísicas que minimizan la resistencia térmica. Sin embargo, era tal el número de variables involucradas en la optimización que el estudio resultó inabordable aún con los potentes medios informáticos de los que se dispone en la actualidad. Finalmente, ante la imposibilidad de este análisis detallado, se optó por estudiar, a partir de las fórmulas obtenidas en la regresión, la variación de la variable R_{term} respecto de la temperatura reducida T_r . El interés de este estudio radica en que T_r es, en última instancia y a la vista de las fórmulas de estimación de propiedades, la que determina el valor de cada propiedad termofísica y por ende el de la resistencia térmica, R_{term} .

7.4. Análisis de la regresión por termosifón

El estudio de regresión persigue evaluar, como se ha indicado anteriormente, la relación entre las propiedades termofísicas y la resistencia térmica. La finalidad última es conocer la influencia que presenta la sustancia por sí sola (independientemente de las condiciones que le rodeen) en la transmisión del calor para los dispositivos tipo termosifón.

Para ello se procederá, en todos los casos, de la siguiente manera. Inicialmente se realizará un estudio de regresión múltiple individual para cada termosifón obteniendo expresiones particulares de R_{term} . Y posteriormente se realizará una regresión múltiple que recoja las observaciones de todos los termosifones para alcanzar un resultado global.

Los datos se pasarán a escala logarítmica consiguiendo de esta manera expresiones en forma de cociente con los factores elevados a distintos exponentes, en vez de las habituales expresiones polinómicas de la regresión. Se obtiene así una formulación más intuitiva y que facilita el contraste de los resultados hallados con los de los estudios previos recogidos en la bibliografía que son también presentados de esta forma.

Posteriormente se verá cómo hay que recurrir a un tipo de regresión múltiple específico, la regresión ridge, debido a la particularidad de los datos.

A continuación se exponen los estudios particulares de regresión para cada termosifón y, al final, se presenta el estudio del conjunto de todos los datos para obtener un resultado general. Los estudios estadísticos se han realizado con el programa informático Statgraphics [4] y [5]. Se ha seguido el siguiente orden:

- a) Termosifón cilíndrico de cobre.
- b) Termosifón prismático de aluminio con control de potencia (CCP).
- c) Todos los termosifones en conjunto.

Dado que los estudios para todos los termosifones son similares y con el fin de no hacer excesivamente extenso el capítulo, se han pasado al Anexo VII los siguientes:

- d) Termosifón cilíndrico de acero pequeño.
- e) Termosifón cilíndrico de acero grande.
- f) Termosifón prismático de aluminio sin control de potencia (SCP).

7.4.1. Estudio de regresión para el termosifón de cobre

7.4.1.1. Regresión múltiple

A continuación se muestra la regresión lineal múltiple, de tipo clásico, que se ha realizado para el termosifón de cobre que se ha elegido como el más representativo. Como ya se ha apuntado y como se verá más adelante, debido a los problemas de multicolinealidad, hubo que recurrir a una regresión múltiple especial, denominada regresión ridge.

a) Datos estudiados

- Variable dependiente: R_{term} (resistencia térmica).
- Variables independientes: Propiedades termofísicas: ρ_l , ρ_v , h_{fg} , c_{pl} , c_{pv} , μ_l , μ_v , k_l , k_v , σ .

En total son 10 variables independientes + 1 variable dependiente. Las tablas se pasan a escala logarítmica.

Análisis de correlaciones

a) Entre R_{term} y las variables explicativas.

Se exponen las correlaciones de mayor magnitud entre la variable respuesta y las explicativas. Este análisis puede orientar en la determinación de qué variables deberían entrar en el modelo de regresión ya que a priori presentan una mayor relación con R_{term} .

Tabla 7.2: Correlaciones entre R_{term} y las variables explicativas.

Variable	Correlación
ρ_l	0,6942
h_{fg}	-0,3504
c_{pl}	-0,4267
c_{pv}	-0,6112
μ_l	0,6046
μ_v	0,4215
k_l	-0,2225
k_v	-0,1436

b) Se aprecian fuertes correlaciones entre las variables explicativas. Por resumir, se muestran aquellas que superan el 0,8.

Hay 11 correlaciones entre variables por encima del 80%; estas son:

- 1) ρ_l - c_{pv} (-0,8490); 2) ρ_v - h_{fg} (-0,8630); 3) ρ_v - k_l (-0,8516); 4) ρ_v - σ (-0,8945);
- 5) h_{fg} - c_{pl} (0,8614); 6) h_{fg} - k_l (0,9381); 7) h_{fg} - σ (0,8837); 8) c_{pl} - c_{pv} (0,8668);
- 9) c_{pl} - k_v (0,8338); 10) k_l - σ (0,9451);

Puede intuirse un importante problema de multicolinealidad.

b) Elección del mejor conjunto de regresión

Se persigue reducir el número de variables explicativas de forma que se eliminen aquellas con menor poder explicativo, las menos relevantes, y simplificar, de esta forma, el modelo de regresión.

B.1. Criterio de mayor R^2 ajustada

B.2. Criterio de menor Cp de Mallows

Estos dos apartados se han unido ya que el análisis ha dado los mismos resultados indistintamente del criterio empleado.

A continuación se muestran las salidas de Statgraphics para este estudio.

Tabla 7.3: Elección del conjunto de regresión.

Selección del Modelo de Regresión - ln Rterm				
Variable dependiente: ln Rterm				
Variables independientes:				
A=ln dl				
B=ln dv				
C=ln hfg				
D=ln Cpl				
E=ln Cpv				
F=ln ul				
G=ln uv				
H=ln kl				
I=ln kv				
J=ln ts				
Modelos con Mayor R-Cuadrada Ajustada				
<i>CME</i>	<i>R-Cuadrada</i>	<i>Ajustada</i>	<i>Cp</i>	<i>Variables Incluidas</i>
0,00178085	88,2984	87,8533	8,71236	ADEGHIJ
0,00197649	87,0129	86,5188	29,0049	ACDEHIJ
0,00199424	86,8251	86,3978	29,97	ADEHIJ
0,0019966	86,8808	86,3817	31,0903	ADEFHIJ
0,00199837	86,8692	86,3696	31,274	ABDEHIJ
0,00205434	86,5014	85,9879	37,0793	ADEFGHI
0,00214469	85,8311	85,3716	45,66	AEFGHI
Modelos con Menor Cp				
<i>CME</i>	<i>R-Cuadrada</i>	<i>Ajustada</i>	<i>Cp</i>	<i>Variables Incluidas</i>
0,00178085	88,2984	87,8533	8,71236	ADEGHIJ
0,00197649	87,0129	86,5188	29,0049	ACDEHIJ
0,00199424	86,8251	86,3978	29,97	ADEHIJ
0,0019966	86,8808	86,3817	31,0903	ADEFHIJ
0,00199837	86,8692	86,3696	31,274	ABDEHIJ
0,00205434	86,5014	85,9879	37,0793	ADEFGHI
0,00214469	85,8311	85,3716	45,66	AEFGHI

Las conclusiones de este estudio son:

- El mejor conjunto de regresión es el formado por las variables:

$$\rho_b, C_{pl}, C_{pv}, \mu_v, k_l, k_v, \sigma$$

- Las variables más relevantes, a tener en cuenta para la regresión lineal, son las mismas que constituyen el considerado como mejor conjunto de regresión pero añadiendo la variable h_{fg} . Se introduce dicha variable debido a que aparece incluida en el segundo conjunto de regresión más importante señalado por ambos criterios y porque se sabe que es una propiedad relevante en el proceso de cambio de fase.

$$\rho_l, h_{fg}, c_{pl}, c_{pv}, \mu_v, k_l, k_v, \sigma$$

B.3. Regresión paso a paso

Para aplicar este criterio se parte ya de la selección de variables hecha anteriormente con los criterios de mayor R^2 ajustada y menor Cp; esto es, se parte del siguiente conjunto:

$$\rho_l, h_{fg}, c_{pl}, c_{pv}, \mu_v, k_l, k_v, \sigma$$

- Hacia adelante.
- Hacia atrás.

Al igual que pasaba antes con los criterios de selección del mejor conjunto de variables, estos dos métodos de regresión arrojan el mismo resultado y será éste el que se tomará como final de la regresión. Se muestran, en la tabla siguiente, las salidas que ofrece Statgraphics.

Tabla 7.4: Resultados de la regresión múltiple.

Regresión Múltiple - ln Rterm					
Variable dependiente: ln Rterm					
Variables independientes:					
ln dl					
ln hfg					
ln Cpl					
ln Cpv					
ln uv					
ln kl					
ln kv					
ln ts					
Parámetro	Estimación	Error Estándar	Estadístico T	Valor-P	
CONSTANTE	-3,84427	0,254894	-15,0818	0,0000	
ln dl	0,434306	0,049088	8,8475	0,0000	
ln Cpl	0,539513	0,0784187	6,8799	0,0000	
ln Cpv	-0,336048	0,0298739	-11,2489	0,0000	
ln uv	-0,245352	0,0509736	-4,81331	0,0000	
ln kl	-0,503228	0,0494738	-10,1716	0,0000	
ln kv	0,440722	0,0616095	7,15346	0,0000	
ln ts	0,361342	0,0360514	10,023	0,0000	
Análisis de Varianza					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	2,4726	7	0,353229	198,35	0,0000
Residuo	0,327676	184	0,00178085		
Total (Corr.)	2,80028	191			
R-cuadrada = 88,2984 por ciento					
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 87,8533 por ciento					
Error estándar del est. = 0,0422001					
Error absoluto medio = 0,0316874					
Estadístico Durbin-Watson = 2,12842 (P=0,8125)					
Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0,0662804					

El modelo resultante es:

$$\ln R_{\text{term}} = -3,84427 + 0,434306 \cdot \ln \rho_1 + 0,539513 \cdot \ln c_{pl} - 0,336048 \cdot \ln c_{pv} - 0,245352 \cdot \ln \mu_v - 0,503228 \cdot \ln k_1 + 0,440722 \cdot \ln k_v + 0,361342 \cdot \ln \sigma$$

Eliminando los logaritmos y redondeando los coeficientes, el modelo quedaría:

$$R_{\text{term}} = 0,0214 \cdot \left(\frac{\rho_1^{4,34} \cdot c_{pl}^{5,4} \cdot k_v^{4,41} \cdot \sigma^{3,61}}{c_{pv}^{3,36} \cdot \mu_v^{2,45} \cdot k_1^{5,03}} \right)^{1/10} \quad (7.1)$$

El modelo obtenido es, obviamente, estadísticamente relevante, basta con fijarse en los valores de los estadísticos que muestra la pantalla de Statgraphics. Sin embargo, esta relación de variables es difícilmente explicable desde el punto de vista termofísico; de hecho, pueden reseñarse algunas características de este modelo que resultan poco lógicas:

- La tensión superficial, σ , que sí que es importante en los tubos de calor (la vuelta del líquido al evaporador se produce por capilaridad), no debería serlo en los termosifones, ya que la vuelta del líquido al evaporador tiene lugar por gravedad.
- Está presente la conductividad térmica del vapor, k_v , cuando no debería ser una variable relevante del sistema. Si se atiende a que el vapor viaja dentro del tubo a velocidades muy altas, la lógica indica que la convección debe prevalecer sobre la conductividad, en la fase gaseosa al menos.
- No se incluye la entalpía de vaporización, h_{fg} , que es fundamental para explicar, en primer lugar, el calor extraído en el evaporador durante la evaporación y, posteriormente, el calor liberado por condensación en el condensador.
- Aparece en el modelo la viscosidad del vapor, μ_v , y, sin embargo, no aparece la del líquido, μ_l , que podría ser ciertamente relevante para determinar la velocidad de regreso del líquido al evaporador ya que, principalmente, se produce resbalando por las paredes internas del termosifón.

Esta distorsión en el modelo puede explicarse por las altas correlaciones que aparecen entre las variables independientes; esto es, la distorsión se debe a la presencia de multicolinealidad.

En la matriz de correlaciones de la siguiente tabla, calculada por Statgraphics, pueden verse resaltadas en rojo, las elevadas correlaciones entre algunas variables explicativas.

Tabla 7.5: Correlaciones entre variables explicativas

Matriz de Correlación para las estimaciones de los coeficientes				
	CONSTANTE	ln dl	ln Cpl	ln Cpv
CONSTANTE	1,0000	-0,7979	0,2149	-0,6571
ln dl	-0,7979	1,0000	0,3590	0,6870
ln Cpl	0,2149	0,3590	1,0000	-0,0723
ln Cpv	-0,6571	0,6870	-0,0723	1,0000
ln uv	0,6523	-0,3450	0,5344	-0,1599
ln kl	-0,4608	-0,0378	-0,8482	0,2338
ln kv	-0,1739	-0,4006	-0,8217	-0,2996
ln ts	0,6590	-0,3665	0,4956	-0,4978

	ln uv	ln kl	ln kv	ln ts
CONSTANTE	0,6523	-0,4608	-0,1739	0,6590
ln dl	-0,3450	-0,0378	-0,4006	-0,3665
ln Cpl	0,5344	-0,8482	-0,8217	0,4956
ln Cpv	-0,1599	0,2338	-0,2996	-0,4978
ln uv	1,0000	-0,6903	-0,5566	0,6252
ln kl	-0,6903	1,0000	0,6052	-0,8531
ln kv	-0,5566	0,6052	1,0000	-0,2302
ln ts	0,6252	-0,8531	-0,2302	1,0000

La multicolinealidad desdibuja la verdadera influencia de las variables predictoras sobre la variable respuesta y, por tanto, puede dar lugar a conjuntos de regresión que, si bien parecen ser los más adecuados, lleven a conclusiones erróneas.

Habiendo presentado estos dos argumentos, el termofísico (falta de coherencia con la teoría aceptada por la literatura científica) y el estadístico (presencia de multicolinealidad), se rechaza el modelo resultante obtenido con esta regresión.

7.4.1.2. Regresión múltiple con las variables termofísicas más relevantes

A la vista de la que la regresión lineal clásica basada únicamente en criterios estadísticos, no ofrece resultados válidos, se procede a realizar una regresión múltiple que, con base en criterios estadísticos, tenga presente en mayor medida los fundamentos de la transferencia de calor

Se vuelven a introducir en el modelo todas las variables independientes en estudio:

$$\rho_l, \rho_v, h_{fg}, c_{pl}, c_{pv}, \mu_l, \mu_v, k_l, k_v, \sigma$$

Debido a que la multicolinealidad invalida los contrastes habituales que permiten inferir qué variables son las más influyentes, los criterios de salida y entrada de las variables se van a fundamentar en:

- a) Correlaciones entre variables explicativas: se eliminarán aquellas variables que estén fuertemente correladas y que no discrepen con los dos siguientes criterios.
- b) Teorías científicas aceptadas: se tomarán como referencia los modelos expuestos con anterioridad (Imura [6], Faghri [7], Nusselt [8]...) a la hora de elegir qué regresores entran o salen. Las variables consideradas como termofísicamente relevantes según lo que se puede deducir de la bibliografía consultada son:

$$\rho_l, \rho_v, h_{fg}, c_{pl}, \mu_l, k_l$$

- c) Variaciones en R^2 , $R^2_{ajustada}$ y el Error Absoluto Medio (EAM): servirán para saber cómo de acertada es la entrada y salida de una variable

A continuación se expone de forma somera el proceso de eliminación de variables partiendo del modelo de regresión que las incluye a todas.

1) Primera eliminación: σ

Presenta fuertes correlaciones con 4 variables independientes de las cuales 3 (en azul) pertenecen al grupo de las relevantes. Además, en principio no se trata de una variable de relevancia. Sí que lo sería si se estuviese trabajando con tubos de calor

Tabla 7.6: Correlaciones entre σ y las demás variables explicativas.

Correlaciones	ln ts
ln dl	-0,2055
ln dv	-0,0624
ln hfg	-0,0640
ln Cpl	0,5284
ln Cpv	-0,7467
ln ul	-0,5281
ln uv	0,4416
ln kl	-0,7934
ln kv	-0,2061
ln ts	1,0000

2) Segunda eliminación: μ_v

Presenta fuertes correlaciones con 3 variables independientes, no siendo tampoco una variable relevante.

Tabla 7.7: Correlaciones entre μ_v y las demás variables explicativas.

Correlaciones	ln uv
ln dl	-0,6576
ln dv	-0,7821
ln hfg	-0,7427
ln Cpl	-0,2925
ln Cpv	0,3492
ln ul	-0,3271
ln uv	1,0000
ln kl	0,2696
ln kv	-0,2396

3) Tercera eliminación: k_v

Existen fuertes correlaciones con 3 variables independientes. No se trata de una variable de relevancia ya que el vapor se mueve a velocidades elevadas dentro del termosifón, por lo que la transferencia de calor se da simultáneamente con la transferencia de masa (convección); la conductividad del vapor, por tanto, no debería presentar un papel significativo.

Tabla 7.8: Correlaciones entre k_v y las demás variables explicativas.

Correlaciones	ln kv
ln dl	-0,7185
ln dv	-0,3195
ln hfg	-0,4344
ln Cpl	-0,8671
ln Cpv	-0,4105
ln ul	-0,0825
ln kl	0,6995
ln kv	1,0000

4) Cuarta eliminación: c_{pv}

No presenta correlaciones elevadas pero atendiendo a los p-valores: presenta un valor muy superior al 0,05 que corresponde al nivel de confianza con el que se está trabajando (95%). Es también la única variable poco relevante que queda por excluir del modelo.

Tabla 7.9: P-valores de las variables que quedan en el modelo.

	Valor-P
ln dl	0,0000
ln dv	0,0010
ln hfg	0,0454
ln Cpl	0,0000
ln Cpv	0,5169
ln ul	0,0250
ln kl	0,0000

5) Modificación del conjunto de variables final: introducción de la variable ($\rho_v \cdot h_{fg}$)

Se vuelve a utilizar la variable, $\rho_v \cdot h_{fg}$, que en las gráficas que muestran las salidas de Statgraphics se denotará como D . Con esta variable se reducen las correlaciones entre regresores (ρ_v y h_{fg} presentaban correlaciones de relevancia con ρ_l además de con otras variables, tal y como se indica en la tabla siguiente) y mejora el valor de R^2 ajustada.

Tabla 7.10: Correlaciones entre ρ_v y h_{fg} y las demás variables explicativas

Correlaciones	ln dv	ln hfg
ln dl	-0,5231	0,5864
ln dv	1,0000	-0,0898
ln hfg	-0,0898	1,0000
ln Cpl	0,3698	-0,1113
ln ul	0,8427	-0,3767
ln kl	0,3428	-0,7930

Tras el proceso de eliminación - modificación, el conjunto final de variables resulta ser:

$$\rho_l, (\rho_v \cdot h_{fg}), c_{pl}, \mu_l, k_l$$

Validación del modelo

A continuación se muestra la salida de Statgraphics con los valores de los principales estadísticos que son testigo de la bondad del modelo.

Tabla 7.11: Resultado de la regresión.

Regresión Múltiple - ln Rterm

Variable dependiente: ln Rterm
 Variables independientes:
 ln dl
 ln D
 ln Cpl
 ln ul
 ln kl

Parámetro	Estimación	Error		Estadístico T	Valor-P
		Estándar			
CONSTANTE	-4,09278	0,227917		-17,9573	0,0000
ln dl	0,556436	0,0347529		16,0112	0,0000
ln D	-0,0513217	0,0122324		-4,19556	0,0000
ln Cpl	0,574088	0,0448094		12,8118	0,0000
ln ul	0,0878406	0,0303871		2,89071	0,0043
ln kl	-0,327116	0,0213761		-15,3029	0,0000

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	2,25069	5	0,450137	152,34	0,0000
Residuo	0,54959	186	0,00295478		
Total (Corr.)	2,80028	191			

R-cuadrada = 80,3737 por ciento
 R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 79,8461 por ciento
 Error estándar del est. = 0,0543579
 Error absoluto medio = 0,0428752
 Estadístico Durbin-Watson = 2,0915 (P=0,7362)
 Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0,0459192

a) Pruebas individuales de los coeficientes de regresión.

Aunque la multicolinealidad, que sigue presente también en este modelo, quita fiabilidad a los contrastes estadísticos, aquí se van a tener en cuenta como medida orientativa de la bondad del ajuste. De esta forma se observa que todos los p-valor de los coeficientes de regresión son menores a 0,05, lo que indica que son estadísticamente relevantes a un nivel de confianza del 95%. El mayor valor de este estadístico es 0,0043y corresponde a μ_1 .

b) ANOVA del modelo (análisis de varianza)

El p-valor del modelo es de 0,000, lo que señala que existe una relación estadísticamente significativa entre el conjunto de variables explicativas y la variable respuesta.

c) Estadísticos para la bondad del ajuste de regresión

A la vista de estos estadísticos puede afirmarse que el modelo de regresión, aunque incluye variables estadísticamente poco relevantes, resulta válido si se atiende al análisis de varianza realizado y a los estadísticos que se exponen a continuación. Se tiene:

- $R^2 = 80,3737 \%$;
- $R^2_{ajustada} = 79,8461 \%$;
- Error absoluto medio = 0,0428752;

Tras analizar los parámetros que marcan lo bueno o malo del ajuste se presenta el modelo de regresión:

$$\ln R_{\text{term}} = -4,09278 + 0,556436 \cdot \ln \rho_l - 0,0513217 \cdot \ln (\rho_v \cdot h_{fg}) + 0,574088 \cdot \ln c_{pl} + 0,0878406 \cdot \ln \mu_l - 0,327116 \cdot \ln k_l$$

Eliminando los logaritmos y redondeando los coeficientes, el modelo quedaría:

$$R_{\text{term}} = 0,1334 \cdot \left(\frac{\rho_l^{2,87} \cdot c_{pl}^{5,74} \cdot \mu_l^{0,88}}{(\rho_v \cdot h_{fg})^{0,51} \cdot k_l^{3,27}} \right)^{1/10} \quad (7.2)$$

Persisten algunas correlaciones fuertes entre las variables independientes, tal y como se puede apreciar en la tabla siguiente (las que presentan un valor superior a 0,5 aparecen resaltadas en rojo).

Tabla 7.12: Matriz de Correlación para las estimaciones de los coeficientes.

	ln dl	ln D	ln Cpl	ln ul	ln kl
ln dl	1,0000	-0,2475	0,6044	-0,4303	-0,4699
ln D	-0,2475	1,0000	0,2859	0,7854	-0,1837
ln Cpl	0,6044	0,2859	1,0000	0,3356	-0,9123
ln ul	-0,4303	0,7854	0,3356	1,0000	-0,3644
ln kl	-0,4699	-0,1837	-0,9123	-0,3644	1,0000

Otra manera de detectar la multicolinealidad [9] es mediante el uso del factor de inflación de varianza VIF. La multicolinealidad es severa cuando $VIF > 30$ e importante cuando $VIF > 10$. Statgraphics ofrece estos valores y, como puede verse en la tabla siguiente, la multicolinealidad no es especialmente relevante en este caso aunque sí que es ciertamente mejorable. Debido a esto se realiza a continuación la regresión ridge.

Tabla 7.13: Factores de Inflación de Varianza.

ln dl	ln D	ln Cpl	ln ul	ln kl
5,97932	3,55646	13,129	7,47523	8,12588

7.4.1.3. Regresión ridge

La regresión ridge es un método de regresión lineal múltiple que trata de paliar la inflación de varianza que causa la multicolinealidad. A cambio de esto introduce un cierto grado de sesgo en la estimación de los coeficientes de regresión.

A partir del supuesto de que existe multicolinealidad, para determinar la entrada o salida de las variables explicativas, no se emplean los estadísticos de contraste. Se procede de una forma algo más subjetiva en la que hay que tener en cuenta algunas pautas:

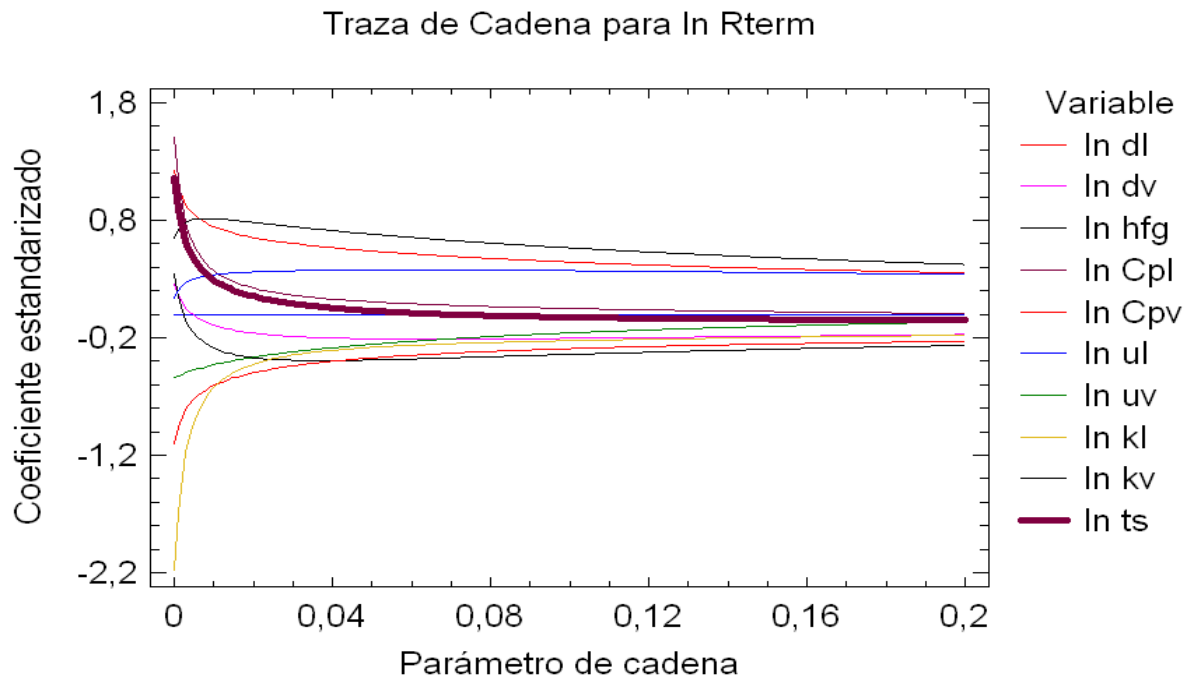
- a) Eliminar las variables cuyos coeficientes sean estables pero de poco valor.
- b) Eliminar las variables con coeficientes estandarizados inestables que tienden a cero.
- c) Eliminar las variables con coeficientes estandarizados inestables.

En este tipo de regresión se incluye un nuevo parámetro denominado parámetro de cadena. Éste ha de ser escogido por el investigador, tal y como se explicó en el apartado 7.1.5.2.

El proceso que se ha seguido para llevar a cabo la regresión ridge para este termosifón cilíndrico de cobre se detalla a continuación.

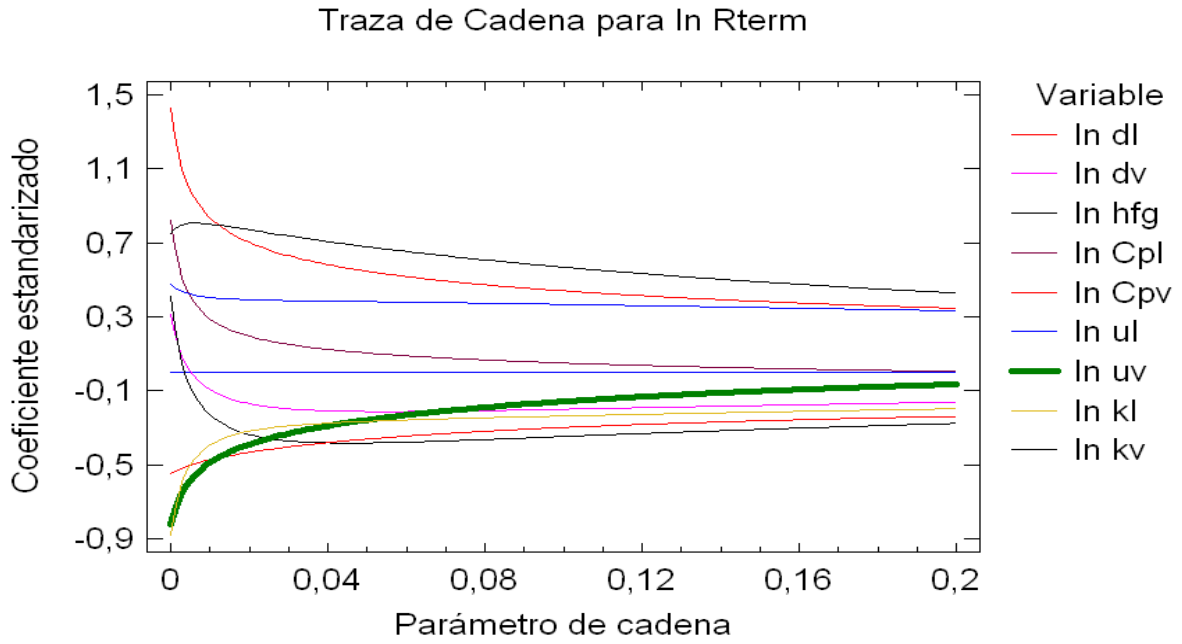
a) Selección de las variables mediante la curva ridge

Se parte de un modelo que incluye a todas las variables regresoras. Con la curva ridge presente se siguen las directrices de selección de variables expuestas anteriormente sin olvidar, claro está, los criterios termofísicos para evitar que salga un conjunto de variables poco coherente. De esta forma se tiene:



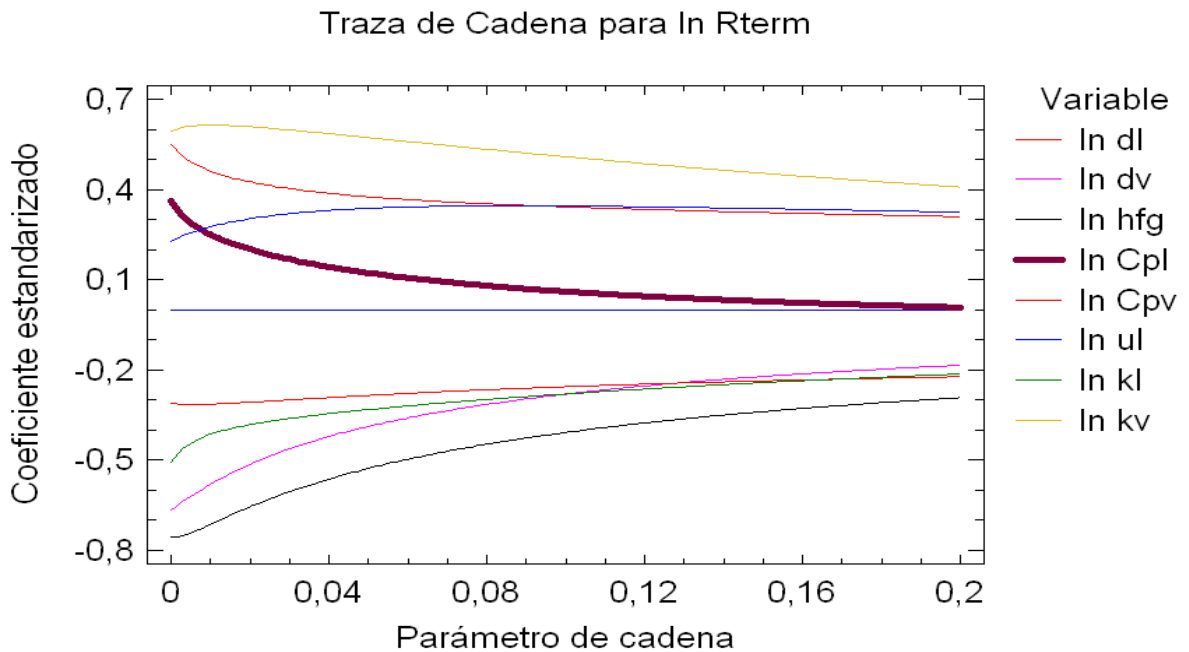
Gráfica 7.1: Curva ridge para termosifón de cobre.

Primeramente se elimina σ ($\ln ts$), que como se puede apreciar (línea granate más gruesa), tiende a anularse rápidamente.



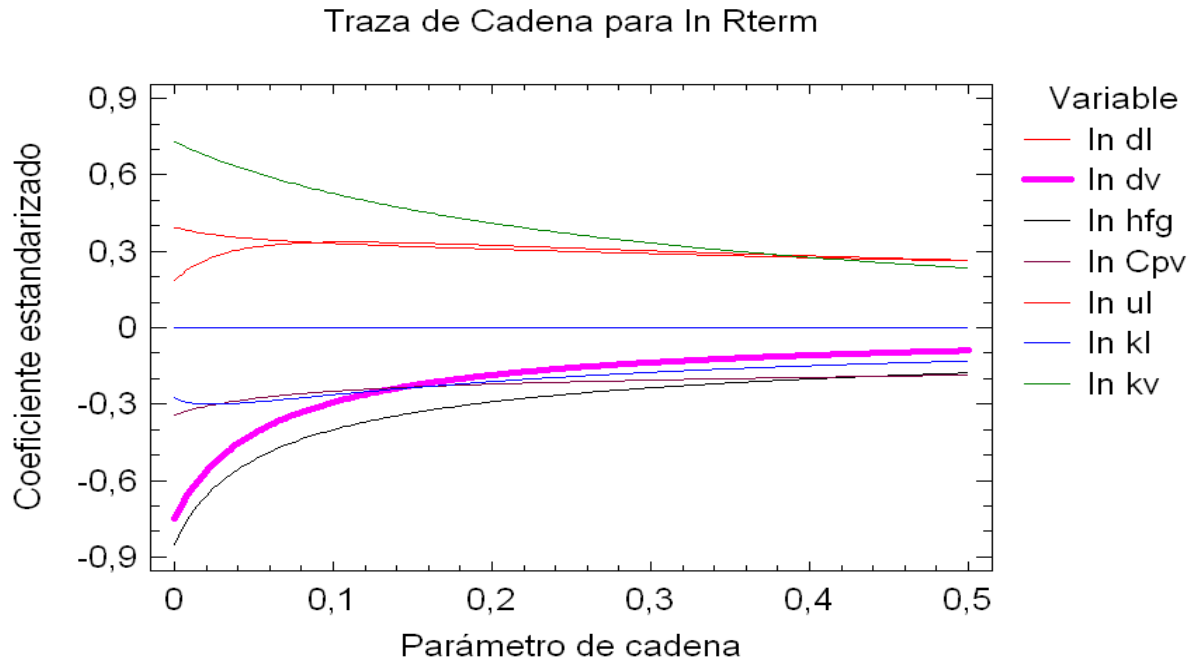
Gráfica 7.2: Curva ridge para termosifón de cobre.

Lo mismo ocurre para μ_v ($\ln u_v$) indicada con la línea verde oscuro, así que se elimina del modelo.



Gráfica 7.3: Curva ridge para termosifón de cobre.

La siguiente variable en ser eliminada es c_{pl} ($\ln c_{pl}$). Si bien, en principio, se trata de una variable relevante, observando la traza ridge parece no ser así.

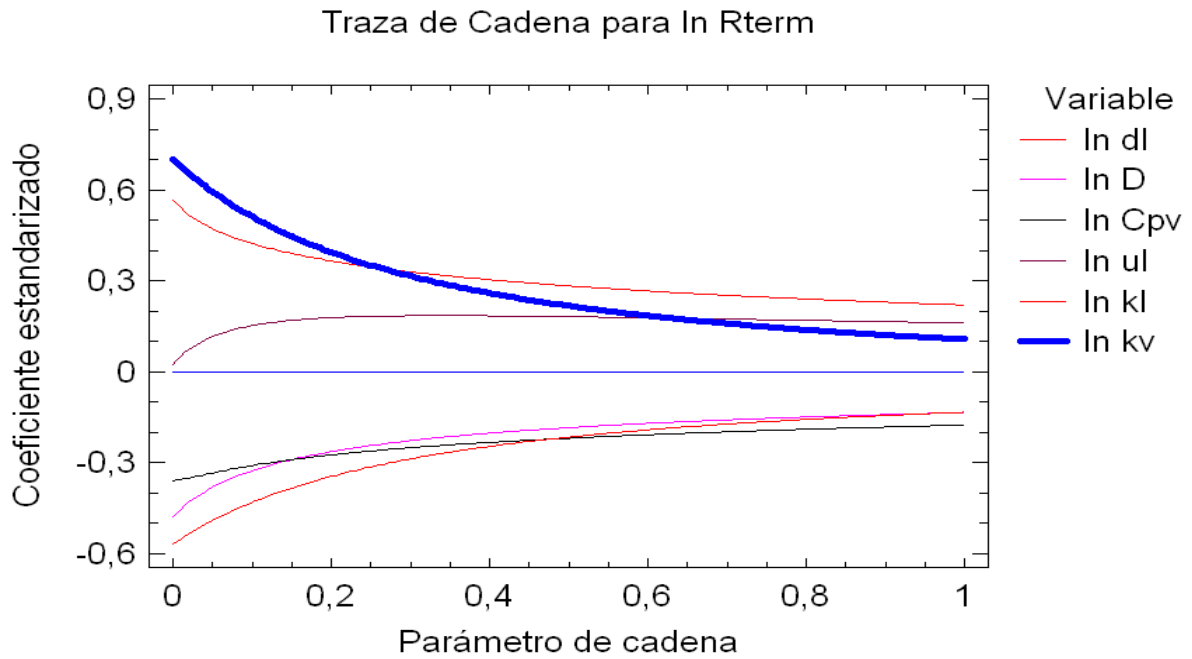


Gráfica 7.4: Curva ridge para termosifón de cobre.

La variable que debería salir ahora sería ρ_v (línea rosa); en vez de eliminarla lo que se hace es unirla con h_{fg} , puesto que se sabe que h_{fg} y ρ_v están muy relacionadas. Se unieron ambas variables definiendo una nueva variable, producto de ambas, ($D = \rho_v \cdot h_{fg}$) buscando una mayor estabilidad del modelo. Se puede apreciar cómo la nueva variable D (línea rosa) que contiene a h_{fg} , es más estable y presenta valores negativos, lo que es termofísicamente más razonable. Habiendo conseguido esto, se sigue con la eliminación de variables.

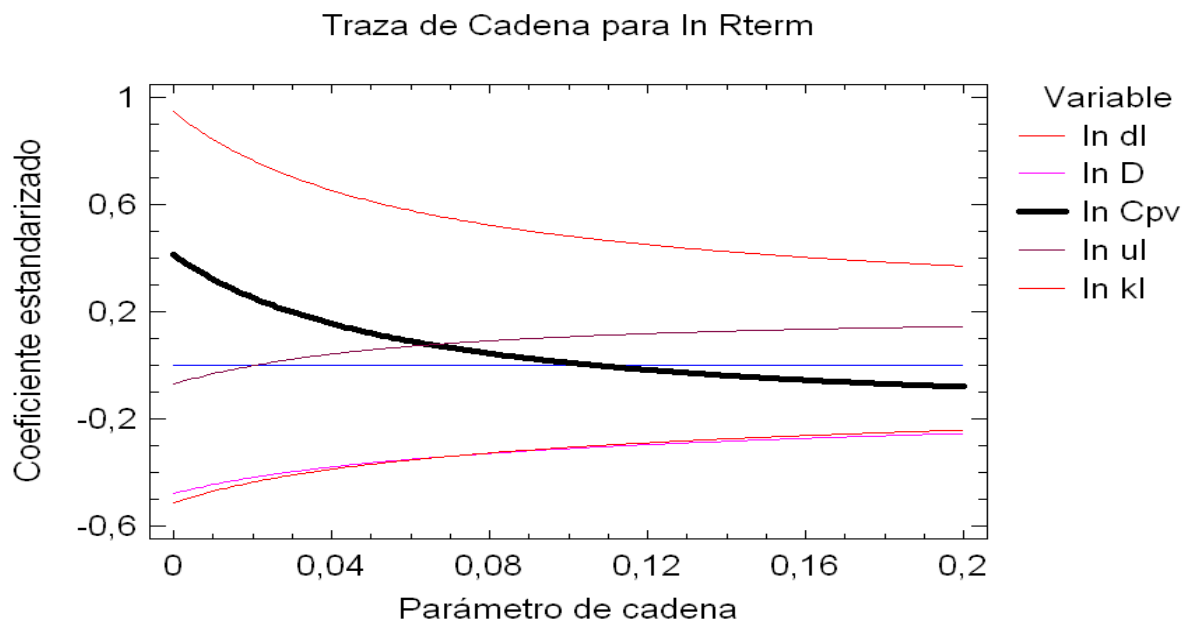
Esta nueva variable D presenta unidades de densidad de energía (kJ/m^3) por lo que puede interpretarse como un testigo de la cantidad de energía que transporta el vapor de cada sustancia por unidad de volumen. Esta idea de unir ρ_v y h_{fg} como un producto en una sola variable aparece en un artículo [10] de Palm y Khodabandeh.

La variable D se puede considerar algo más estable y con menor tendencia a anularse. La traza ridge quedaría de la siguiente manera:



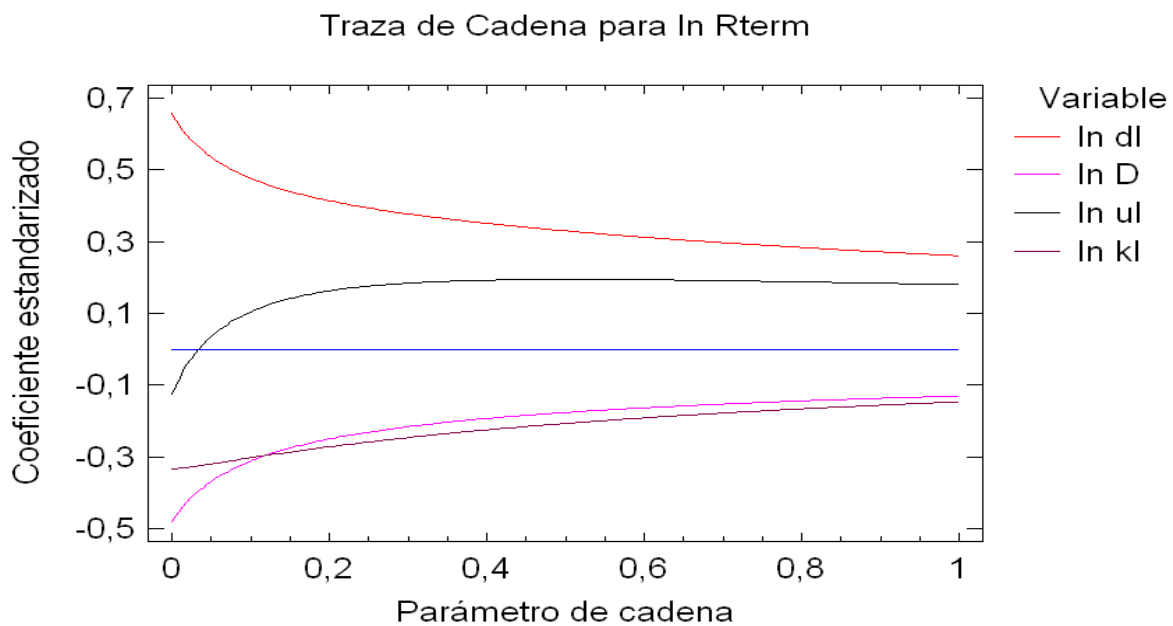
Gráfica 7.5: Curva ridge para termosifón de cobre.

A continuación se quita del modelo k_v . La conductividad térmica del vapor es la variable que más rápidamente parece tender a cero. Además sería difícil razonar su presencia, sabiendo que la transferencia de calor en la fase gaseosa tiene lugar esencialmente por convección.



Gráfica 7.6: Curva ridge para termosifón de cobre.

El calor específico del vapor, c_{pv} , ha pasado de tomar valores siempre negativos en las trazas anteriores y considerablemente estables, para tomar ahora un valor positivo en sus inicios y volver a los valores negativos conforme aumenta el valor del parámetro de cadena. Esto denota que es una variable inestable, por lo que se excluye de la modelización.



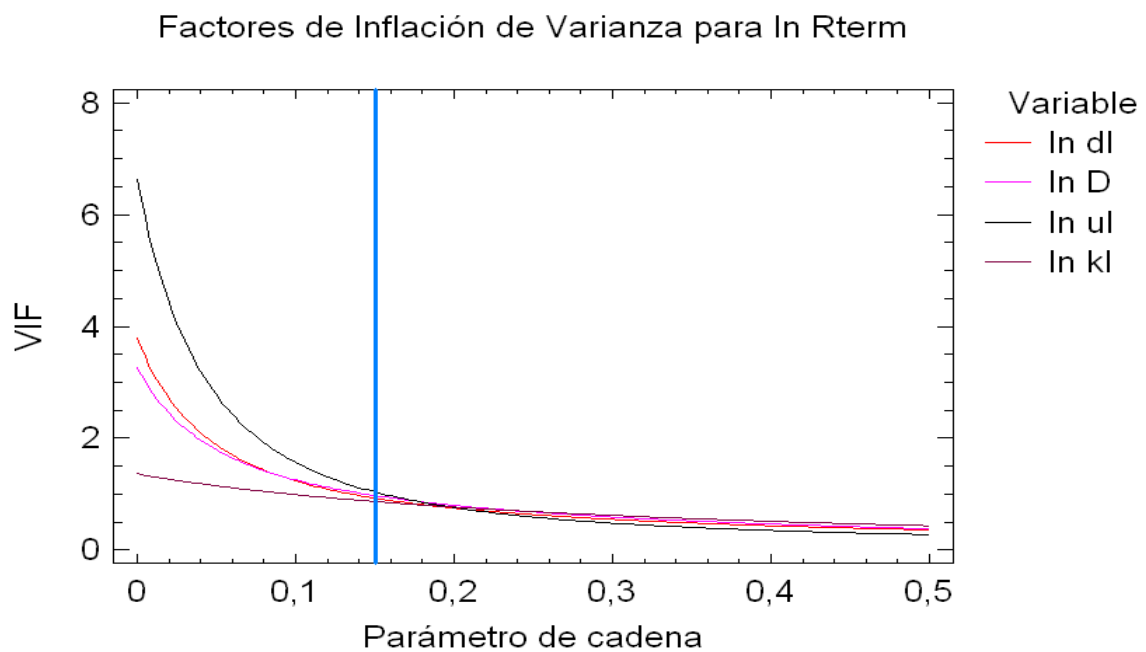
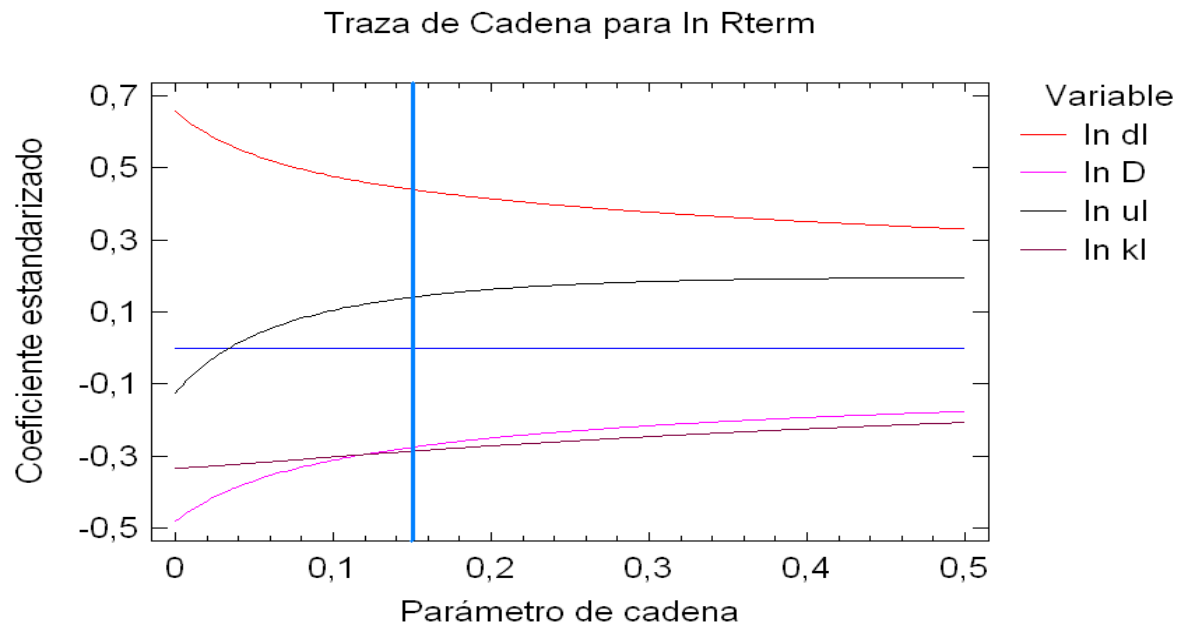
Gráfica 7.7: Curva ridge para termosifón de cobre.

El conjunto final de variables corresponde al mismo que se había escogido anteriormente para el termosifón de acero pequeño. Esta coherencia entre ambos termosifones permitirá más adelante inferir unos resultados globales con mayor facilidad.

$$\rho_l, (\rho_v \cdot h_{fg}), \mu_l, k_l$$

b) Selección del parámetro de cadena

Analizando las gráficas que se presentan a continuación podrá elegirse un parámetro de cadena (o parámetro ridge) que disipe la multicolinealidad en gran medida, pero que a su vez no reduzca demasiado el poder explicativo del modelo. Es decir, que al aumentar el valor del parámetro de cadena disminuyen los valores de R^2 y de $R^2_{ajustada}$.



Se ha tomado como parámetro de cadena 0,15, ya que es el valor más bajo en el que los coeficientes están medianamente estabilizados y el valor de VIF es razonablemente pequeño, en torno a 1. Esto puede apreciarse de forma más clara en la tabla siguiente.

Tabla 7.14: Factores de Inflación de Varianza.

Parámetro de Cadena	ln dl	ln D	ln ul	ln kl	R-Cuadrada
0,15	0,930096	0,97558	1,03924	0,868319	55,55

c) Validación del modelo

A continuación se muestra la salida de Statgraphics.

Tabla 7.15: Resultados de la regresión ridge.

Regresión en Cadena - ln Rterm		
Variable dependiente: ln Rterm		
Variables independientes:		
ln dl		
ln D		
ln ul		
ln kl		
Número de casos completos: 192		
Resultados del Modelo para el Parámetro de Cadena = 0,15		
		<i>Factor de Inflación de Varianza</i>
<i>Parámetro</i>	<i>Estimado</i>	
CONSTANTE	-2,23823	
ln dl	0,192563	0,930096
ln D	-0,0550739	0,97558
ln ul	0,0483464	1,03924
ln kl	-0,0662137	0,868319
R-Cuadrada = 55,5522 por ciento R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 54,6014 por ciento Error estándar del est. = 0,0762911 Error medio absoluto = 0,0626032 Estadístico Durbin-Watson = 1,9521 (P=0,3705) Autocorrelación residual de retardo 1 = 0,0228983		
Análisis de Residuos		
	<i>Estimación</i>	<i>Validación</i>
n	192	
CME	0,00582033	
MAE	0,0626032	
MAPE		
ME	-3,70074E-17	
MPE		

El estadístico R^2 indica que el modelo, así ajustado, explica el 55,5522% de la variabilidad de R_{term} . El estadístico $R^2_{ajustada}$ es 54,6014%. El error estándar estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 0,0762911. El error absoluto medio (MAE) de 0,0626032 es el valor promedio de los residuos.

El modelo de regresión resultante es:

$$\ln R_{term} = -2,23823 + 0,192563 \cdot \ln \rho_l - 0,0550739 \cdot \ln (\rho_v \cdot h_{fg}) + 0,0483464 \cdot \ln \mu_l - 0,0662137 \cdot \ln k_l$$

Quitando los logaritmos y redondeando los coeficientes, el modelo quedaría:

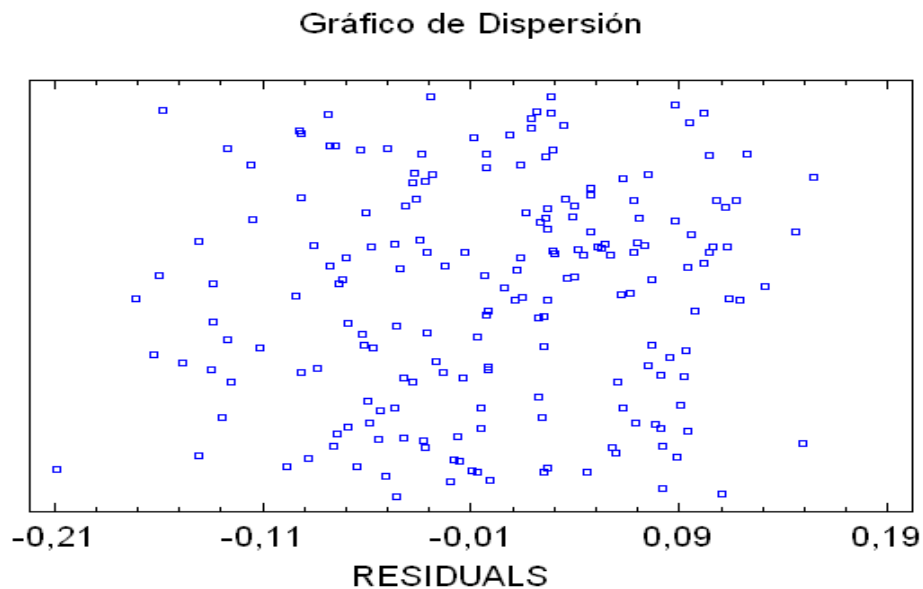
$$R_{\text{term}} = 0,1066 \cdot \left(\frac{\rho_l^{1,93} \cdot \mu_l^{0,48}}{(\rho_v \cdot h_{fg})^{0,55} \cdot k_l^{0,66}} \right)^{1/10} \quad (7.3)$$

d) Diagnósis del modelo

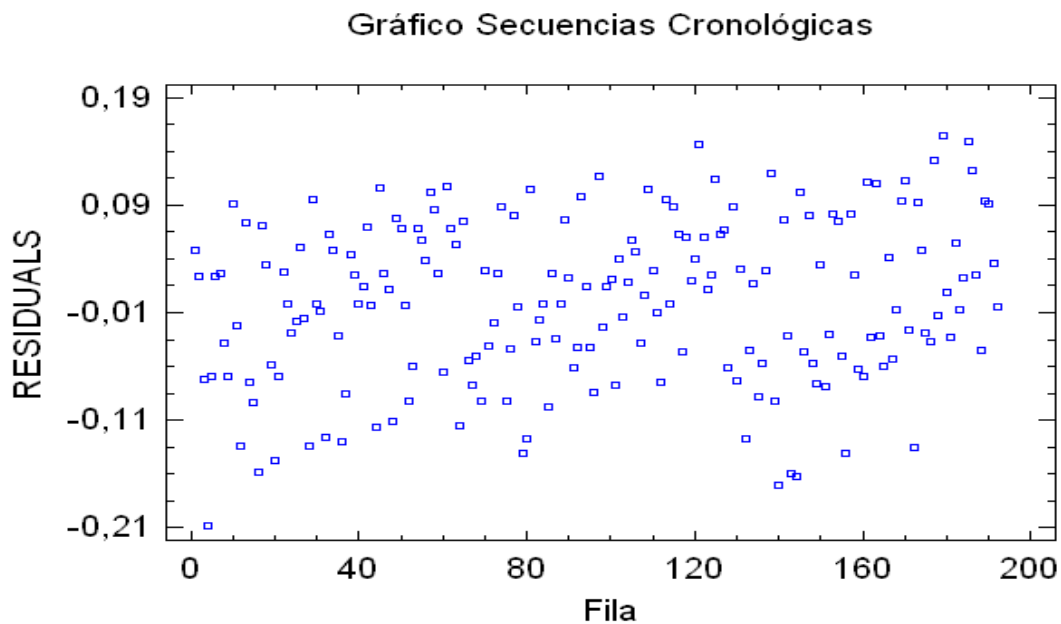
A continuación se presentan los estadísticos y gráficas que indicarán si el modelo es adecuado según los criterios estadísticos.

D.1. Residuales

a) Gráfico de dispersión.



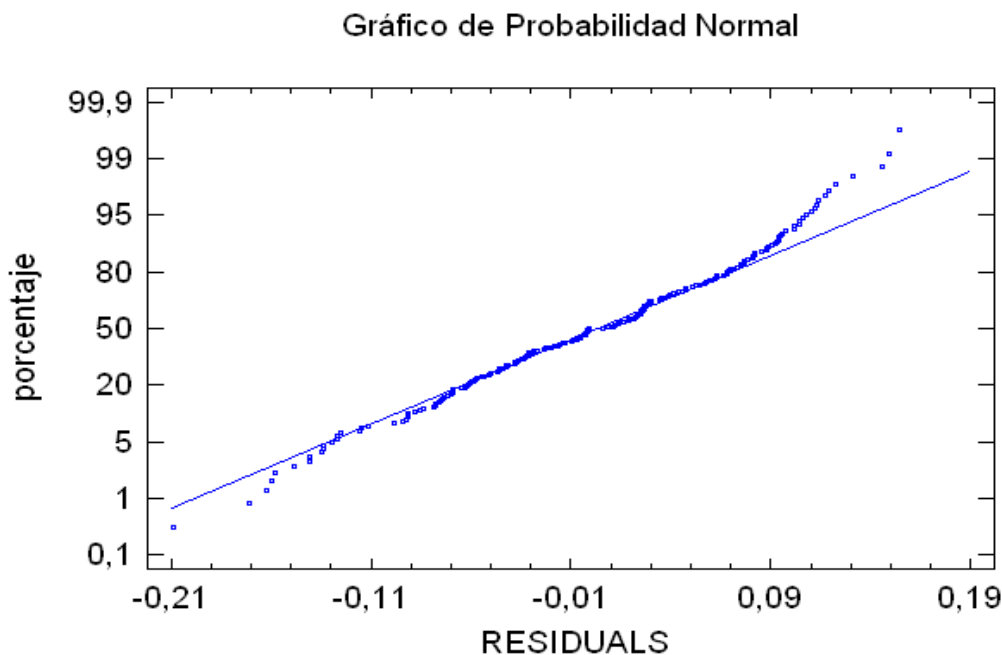
Gráfica 7.10: Dispersión para termosifón de cobre.



Gráfica 7.11: Secuencias cronológicas para termosifón de cobre.

No hay tendencias ni agrupaciones especiales; los residuos son aleatorios, no les influye el orden en que se han introducido los datos. Esto último también se puede saber observando el valor del estadístico Durbin-Watson = 2,0482, que al estar próximo a 2 confirma la interpretación hecha para el gráfico.

b) Percentiles de la distribución normal –QQ-norms.



Gráfica 7.12: Distribución normal para termosifón de cobre.

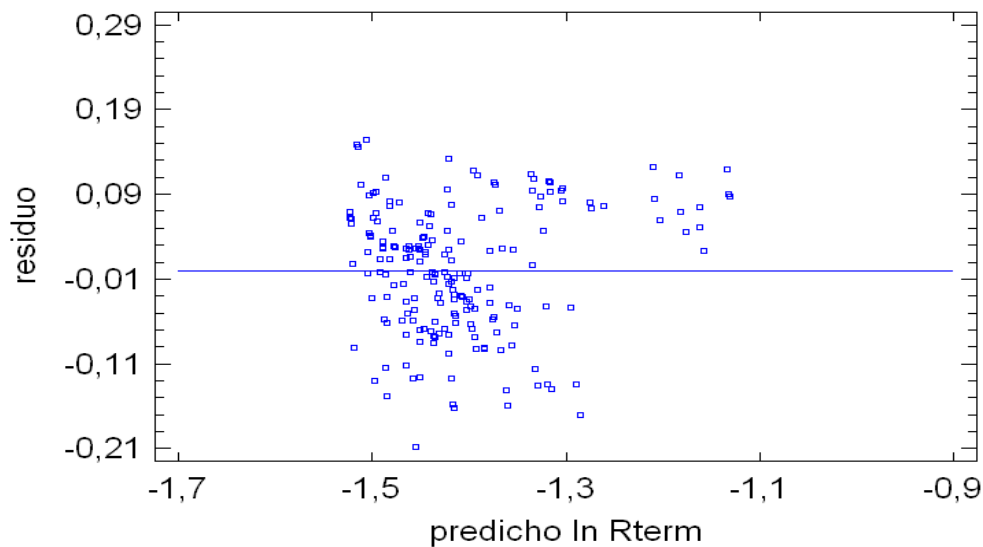
Los residuos se ajustan bastante bien a la distribución normal. Esto también puede comprobarse atendiendo a los valores que arrojan el sesgo estandarizado y la curtosis; ambos están dentro del rango $(-2,2)$, por lo que puede afirmarse que no hay desviaciones significativas de la normalidad.

Tabla 7.16: Validación del supuesto de distribución normal.

Sesgo Estandarizado	-1,47785
Curtosis Estandarizada	-1,58114

c) Gráficos de los residuales frente a los valores ajustados.

Gráfica de Residuos

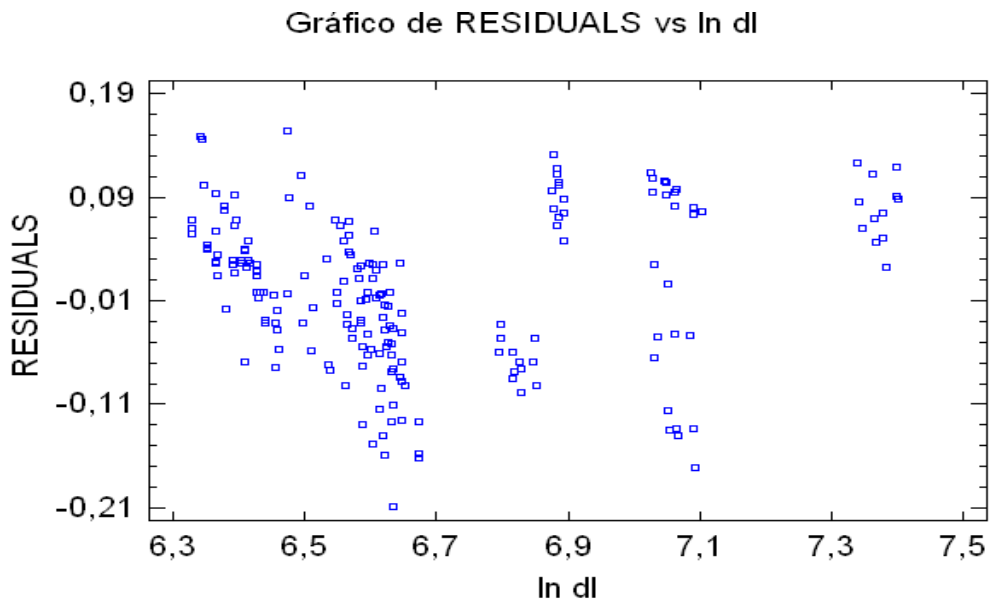


Gráfica 7.13: Residuales para termosifón de cobre.

Aparecen ciertas agrupaciones de datos por sustancia; por ejemplo, el conjunto de datos situado más a la derecha corresponde al perfluoroheptano. A parte de esto no se observa una tendencia concreta que revele heterocedasticidad (varianza no constante). No se observan tampoco puntos anómalos.

d) Gráficos de los residuales frente a las variables explicativas

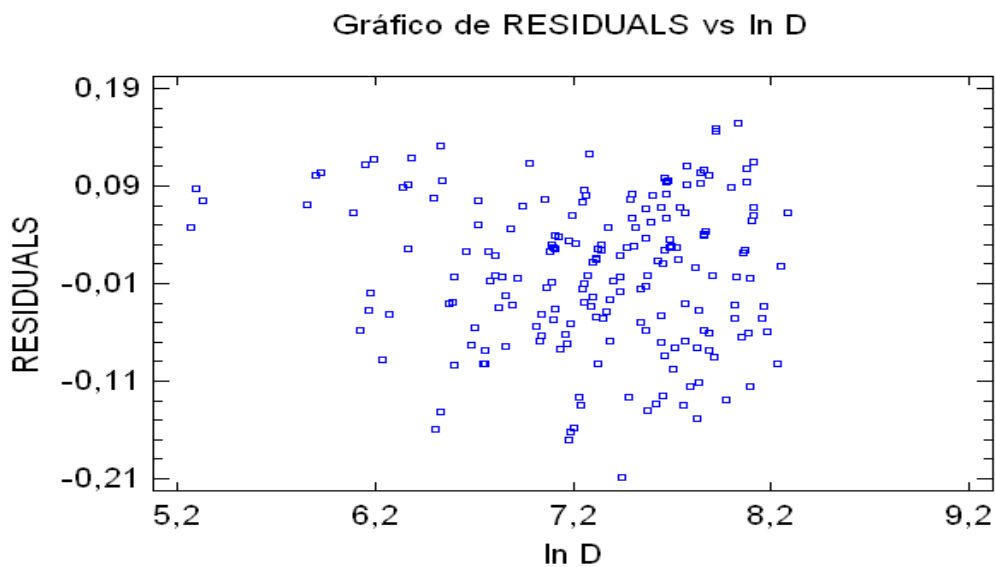
d.1.) Residuales frente a $\ln \rho_l$



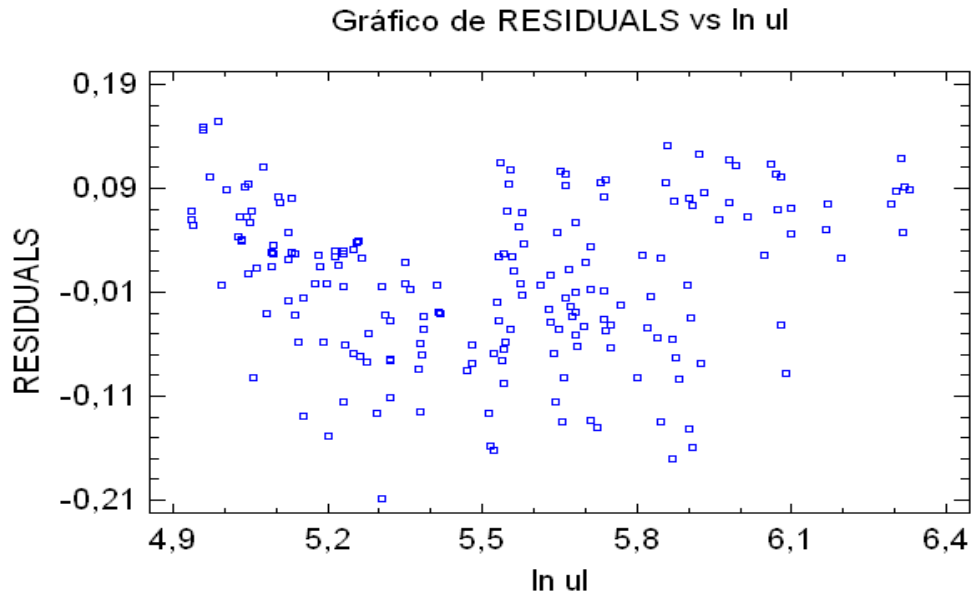
Gráfica 7.14: Residuales para termosifón de cobre.

Aparecen agrupaciones de residuos por sustancias; esto tiene cierta lógica, ya que no todas las sustancias se mueven en el mismo rango de valores para sus distintas propiedades, en este caso la densidad de líquido. Por ejemplo, los datos agrupados más a la derecha corresponden al perfluoroheptano, así como los que se agrupan en torno al valor de 6,9 pertenecen al agua. Este hecho podrá observarse también en alguna de las gráficas que siguen.

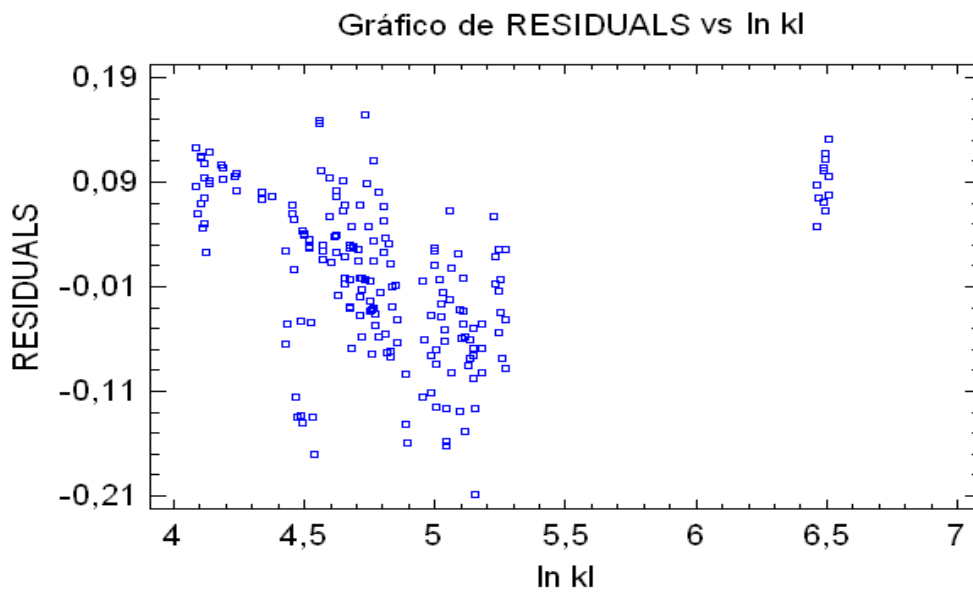
d.2.) Residuales frente a $\ln (\rho_v \cdot h_{fg})$



Gráfica 7.15: Residuales para termosifón de cobre.

d.3.) Residuales frente a $\ln \mu_1$ 

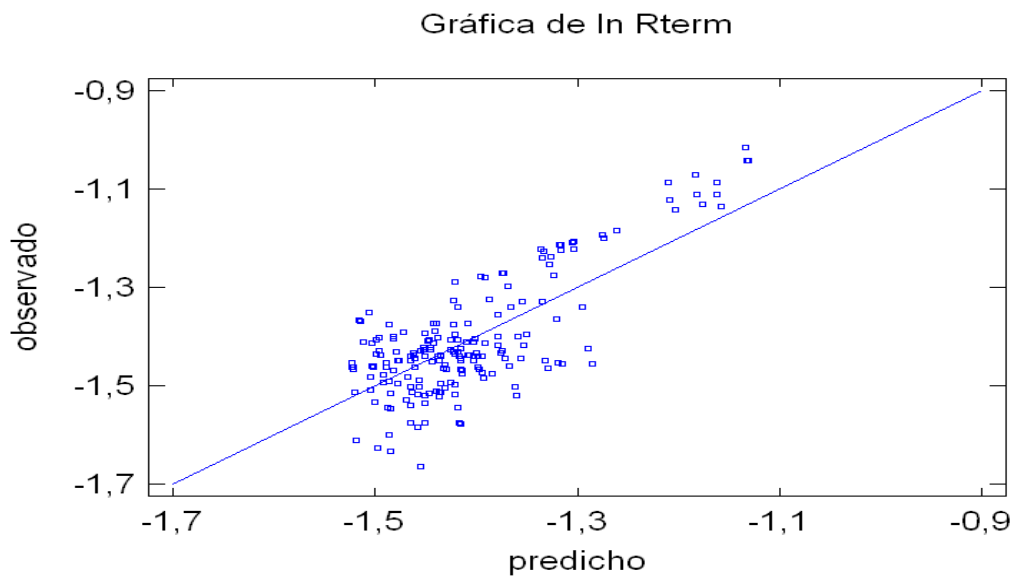
Gráfica 7.16: Residuales para termosifón de cobre.

d.4.) Residuales frente a $\ln k_1$ 

Gráfica 7.17: Residuales para termosifón de cobre.

A la vista de los gráficos presentados puede concluirse que no hay tendencias específicas de los residuos, solamente las consabidas agrupaciones por sustancia que ya han sido señaladas. Tampoco hay puntos claramente atípicos o influyentes.

e) Gráficos de valores observados frente a valores ajustados



Gráfica 7.18: Valores ajustados para termosifón de cobre.

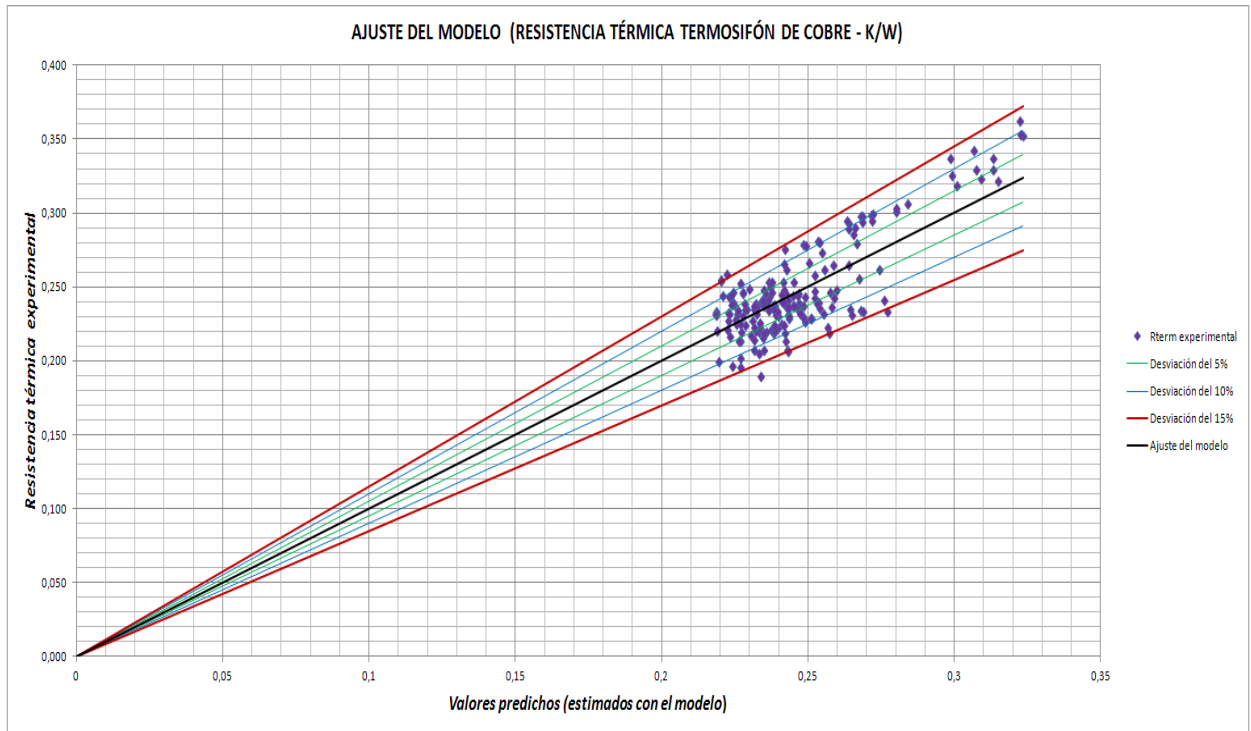
El ajuste parece adecuado, los valores observados se ciñen bastante bien a la diagonal. Tampoco se aprecian aquí puntos claramente distorsionadores.

En las dos hojas siguientes se muestra la gráfica 7.18, construida con Excel, donde aparece también la acotación del error cometido en la estimación. En estas dos gráficas (véase Gráf. 7.19 y Gráf. 7.20) puede verse como casi la totalidad de los puntos caen entre las líneas que delimitan el error al $\pm 10\%$, siendo anecdóticos los puntos que presentan un error absoluto superior al 15% (4 puntos de 192, poco más del 2 %).

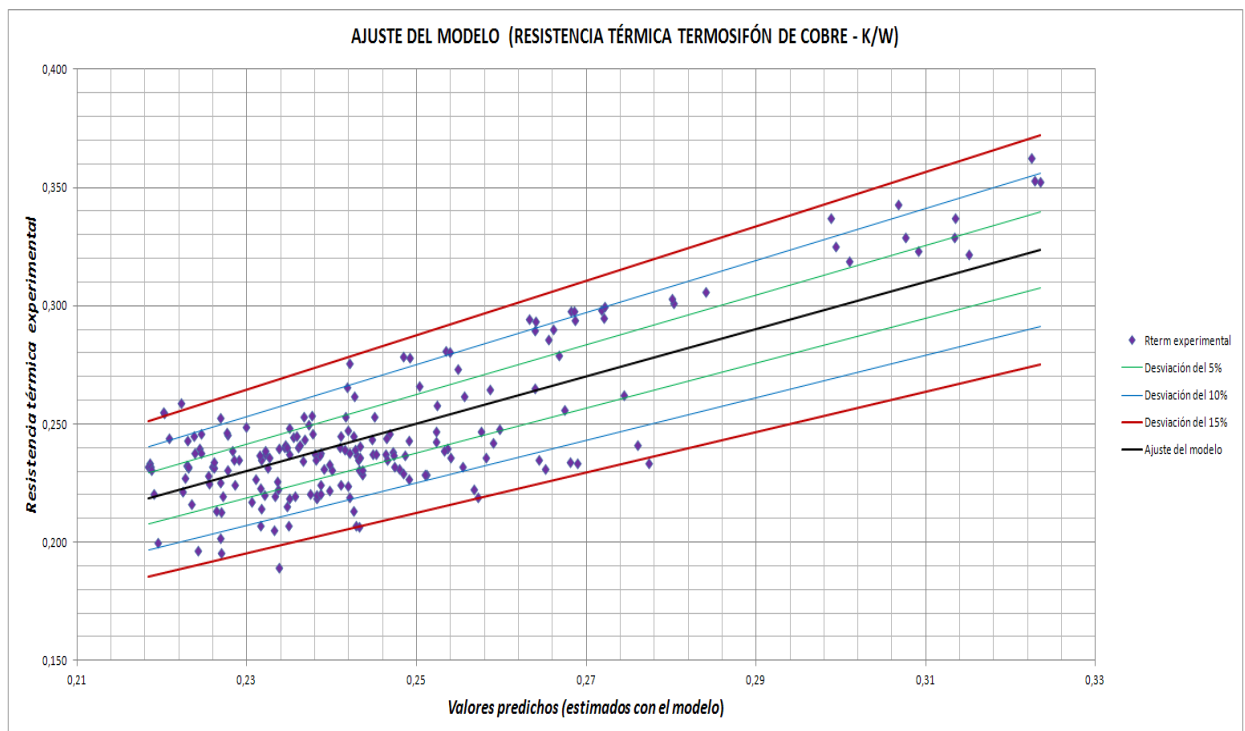
Este tipo de representación aparece con frecuencia (véase [11], [12] y [13]) en artículos de transferencia de calor.

Tras todo este proceso de validación y a la vista de las últimas gráficas puede concluirse que el modelo matemático de regresión es adecuado para explicar el comportamiento del presente termosifón de cobre.

De este estudio se deduce también, como dato de relevancia, que el tipo de sustancia empleada explica más del 50% de la variabilidad de R_{term} . El estadístico $R^2 = 55,55\%$ es el que lo indica.



Gráfica 7.19: Ajuste del modelo del termosifón de cobre.



Gráfica 7.20: Ajuste del modelo del termosifón de cobre.

7.4.2. Estudio de regresión para el termosifón prismático de aluminio con control de potencia (CCP)

7.4.2.1. Regresión múltiple

A continuación se muestra la regresión lineal múltiple, de tipo clásico, que se ha realizado para este termosifón. Se procede de forma similar al apartado 7.4.1. Además, como ocurría con los termosifones anteriores, debido a los problemas de multicolinealidad, hubo que descartar esta regresión y recurrir a la regresión ridge.

a) Datos estudiados

- Variable dependiente: R_{term} (resistencia térmica).
- Variables independientes: Propiedades termofísicas: ρ_l , ρ_v , h_{fg} , c_{pl} , c_{pv} , μ_l , μ_v , k_l , k_v , σ .

En total son 10 variables independientes + 1 variable dependiente. Las tablas se pasan a escala logarítmica.

Análisis de correlaciones

- a) Entre R_{term} y las variables explicativas.

Se exponen las correlaciones de mayor magnitud entre la variable respuesta y las explicativas. Este análisis puede orientar en la determinación de qué variables deberían entrar en el modelo de regresión, ya que a priori presentan una mayor relación con R_{term} .

Tabla 7.17: Correlaciones entre R_{term} y las variables explicativas.

Variable	Correlación
ρ_l	0,5190
ρ_v	-0,4514
c_{pv}	-0,4634
μ_l	0,7321
μ_v	0,4082
k_v	-0,2180
σ	-0,2960

- b) Se aprecian fuertes correlaciones entre las variables explicativas. Se muestran, por resumir, aquellas que superan el 0,8.

Hay 14 correlaciones entre variables independientes por encima del 80%; estas son:

1) $\rho_{l-c_{pv}}$ (-0,8556); 2) $\rho_{l-\mu_l}$ (0,8235); 3) $\rho_{l-\mu_v}$ (0,8262); 4) ρ_v-h_{fg} (-0,8426);

5) ρ_v-k_1 (-0,9037); 6) $\rho_v-\sigma$ (-0,9439); 7) $h_{fg}-c_{pl}$ (0,9035); 8) $h_{fg}-k_1$ (0,9629);

9) $h_{fg}-\sigma$ (0,9019); 10) $c_{pl}-c_{pv}$ (0,8797); 11) $c_{pl}-k_1$ (0,8120); 12) $c_{pl}-k_v$ (0,9323);

13) $c_{pv}-k_v$ (0,8660); 14) $k_1-\sigma$ (0,9565);

Puede intuirse un importante problema de multicolinealidad.

b) Elección del mejor conjunto de regresión

Se persigue reducir el número de variables explicativas, de forma que se eliminen aquellas con menor poder explicativo (las menos relevantes) y simplificar, de esta forma, el modelo de regresión.

B.1. Criterio de mayor R^2 ajustada

B.2. Criterio de menor C_p de Mallows

Estos dos estudios se han realizado conjuntamente ya que el análisis ha dado los mismos resultados indistintamente del criterio empleado.

A continuación se muestran las salidas de Statgraphics para este estudio.

Tabla 7.18: Elección del conjunto de regresión.

<u>Selección del Modelo de Regresión - ln Rterm</u>				
Variable dependiente: ln Rterm				
Variables independientes:				
A=ln dl				
B=ln dv				
C=ln hfg				
D=ln Cpl				
E=ln Cpv				
F=ln ul				
G=ln uv				
H=ln kl				
I=ln kv				
J=ln ts				
Modelos con Mayor R-Cuadrada Ajustada				
<i>CME</i>	<i>R-Cuadrada</i>	<i>R-Cuadrada Ajustada</i>	<i>Cp</i>	<i>Variables Incluidas</i>
0,00546611	74,8358	73,7023	4,38645	CDEFH
0,00547597	75,2446	73,6548	6,60927	BCDEFHI
0,00548065	75,2234	73,6323	6,70133	BCDEFGH
0,00550633	74,879	73,5088	6,19865	BCDEFH
0,00550798	74,8715	73,5008	6,23132	CDEFHI
0,00551325	74,8474	73,4755	6,33586	CDEFHJ
0,00551516	74,8387	73,4663	6,37377	CDEFGH
Modelos con Menor Cp				
<i>CME</i>	<i>R-Cuadrada</i>	<i>R-Cuadrada Ajustada</i>	<i>Cp</i>	<i>Variables Incluidas</i>
0,00546611	74,8358	73,7023	4,38645	CDEFH
0,00550633	74,879	73,5088	6,19865	BCDEFH
0,00550798	74,8715	73,5008	6,23132	CDEFHI
0,00551325	74,8474	73,4755	6,33586	CDEFHJ
0,00551516	74,8387	73,4663	6,37377	CDEFGH
0,0055158	74,8358	73,4632	6,38645	ACDEFH
0,00547597	75,2446	73,6548	6,60927	BCDEFHI

Las conclusiones de este estudio son:

- El mejor conjunto de regresión es aquel formado por las variables:

$$h_{fg}, c_{pl}, c_{pv}, \mu_l, k_l$$

- Las variables más relevantes, a tener en cuenta para la regresión lineal, son las mismas que constituyen el considerado como mejor conjunto de regresión pero añadiendo las variable ρ_v y ρ_l . Se introduce ρ_v ya que aparece incluida en el segundo conjunto de regresión señalado por ambos criterios y teóricamente es una variable termofísicamente relevante. La inclusión de ρ_l se hace porque no parece tener mucha lógica que la densidad del vapor esté en el modelo y no lo esté la del líquido, que en principio debería ser algo más influyente en la transmisión del calor.

$$\rho_l, \rho_v, h_{fg}, c_{pl}, c_{pv}, \mu_l, k_l$$

B.3. Regresión paso a paso

Para aplicar este criterio se parte ya de la selección de variables hecha anteriormente con los criterios de mayor R^2 ajustada y menor C_p ; esto es, se parte del siguiente conjunto:

$$\rho_l, \rho_v, h_{fg}, c_{pl}, c_{pv}, \mu_l, k_l$$

- Hacia adelante.

Se muestran a continuación las salidas que ofrece Statgraphics.

Tabla 7.19: Resultados de la regresión múltiple.

Regresión Múltiple - ln Rterm					
Variable dependiente: ln Rterm					
Variables independientes:					
ln dl					
ln dv					
ln hfg					
ln Cpl					
ln Cpv					
ln ul					
ln kl					
Parámetro	Estimación	Error Estándar	Estadístico T	Valor-P	
CONSTANTE	-0,00793214	0,396057	-0,0200278	0,9841	
ln dl	-0,494344	0,0858682	-5,75701	0,0000	
ln dv	0,0550901	0,0253136	2,1763	0,0317	
ln Cpl	0,34512	0,0759308	4,54518	0,0000	
ln Cpv	-0,350877	0,04571	-7,67614	0,0000	
ln ul	0,422211	0,0843908	5,00304	0,0000	
Análisis de Varianza					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	1,76281	5	0,352562	60,36	0,0000
Residuo	0,648304	111	0,00584057		
Total (Corr.)	2,41111	116			
R-cuadrada = 73,1119 por ciento					
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 71,9007 por ciento					
Error estándar del est. = 0,0764236					
Error absoluto medio = 0,058359					
Estadístico Durbin-Watson = 2,10628 (P=0,7162)					
Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0,0656526					

El modelo corresponde a:

$$\ln R_{\text{term}} = -0,00793214 - 0,494344 \cdot \ln \rho_l + 0,0550901 \cdot \ln \rho_v + 0,34512 \cdot \ln c_{pl} - 0,350877 \cdot \ln c_{pv} + 0,422211 \cdot \ln \mu_l$$

Eliminando los logaritmos y redondeando el coeficiente, el modelo quedaría como se muestra a continuación:

$$R_{\text{term}} = 0,9921 \cdot \left(\frac{\rho_v^{0,55} \cdot C_{pl}^{3,45} \cdot \mu_l^{4,22}}{\rho_l^{4,94} \cdot C_{pv}^{3,51}} \right)^{1/10} \quad (7.4)$$

El modelo obtenido es estadísticamente relevante, tal y como indican los valores que arroja la pantalla de Statgraphics. Sin embargo, cabe destacar que se producen algunas incongruencias con la teoría científica sustentada por la bibliografía consultada. De esta forma no parece lógico que se excluyan del modelo la entalpía de vaporización, h_{fg} , y la conductividad del líquido, k_l , y sí que aparezca el calor específico del vapor, c_{pv} , variable que no se recoge en ninguno de los modelos consultados en la bibliografía.

Esta distorsión en el modelo puede explicarse por las altas correlaciones que aparecen entre las variables independientes; esto es, la distorsión se debe a la presencia de multicolinealidad.

En la matriz de correlaciones calculada por Statgraphics pueden verse, resaltadas en rojo, las elevadas correlaciones entre algunas variables explicativas.

Tabla 7.20: Correlaciones entre variables explicativas

Matriz de Correlación para las estimaciones de los coeficientes					
	ln dl	ln dv	ln Cpl	ln Cpv	ln ul
ln dl	1,0000	-0,5409	-0,1745	0,1758	-0,7809
ln dv	-0,5409	1,0000	0,7138	0,0492	0,8992
ln Cpl	-0,1745	0,7138	1,0000	-0,4933	0,4409
ln Cpv	0,1758	0,0492	-0,4933	1,0000	0,1552
ln ul	-0,7809	0,8992	0,4409	0,1552	1,0000

- Hacia atrás.

Se muestran a continuación las salidas que ofrece Statgraphics.

Tabla 7.21: Resultados de la regresión múltiple.

Regresión Múltiple - ln Rterm					
Variable dependiente: ln Rterm					
Variables independientes:					
ln dl					
ln dv					
ln hfg					
ln Cpl					
ln Cpv					
ln ul					
ln kl					
Parámetro	Estimación	Error Estándar	Estadístico T	Valor-P	
CONSTANTE	-1,55309	0,11243	-13,8138	0,0000	
ln hfg	0,326845	0,0649487	5,03235	0,0000	
ln Cpl	0,488115	0,0640816	7,61709	0,0000	
ln Cpv	-0,4165	0,0550468	-7,56628	0,0000	
ln ul	0,173402	0,0347944	4,98361	0,0000	
ln kl	-0,482024	0,0734468	-6,56291	0,0000	
Análisis de Varianza					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	1,80438	5	0,360875	66,02	0,0000
Residuo	0,606738	111	0,00546611		
Total (Corr.)	2,41111	116			
R-cuadrada = 74,8358 por ciento					
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 73,7023 por ciento					
Error estándar del est. = 0,0739331					
Error absoluto medio = 0,0579354					
Estadístico Durbin-Watson = 1,98459 (P=0,4670)					
Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0,0166726					

El modelo resultante es:

$$\ln R_{\text{term}} = -1,55309 + 0,326845 \cdot \ln h_{\text{fg}} + 0,488115 \cdot \ln c_{\text{pl}} - 0,4165 \cdot \ln c_{\text{pv}} + 0,173402 \cdot \ln \mu_l - 0,482024 \cdot \ln k_l$$

Quitando los logaritmos y redondeando los coeficientes, el modelo quedaría:

$$R_{\text{term}} = 0,2116 \cdot \left(\frac{h_{\text{fg}}^{3,27} \cdot c_{\text{pl}}^{4,88} \cdot \mu_l^{1,73}}{c_{\text{pv}}^{4,17} \cdot k_l^{4,82}} \right)^{1/10} \quad (7.5)$$

El modelo obtenido es, obviamente, estadísticamente relevante, basta con fijarse en los valores de los estadísticos que muestra la pantalla de Statgraphics. Sin embargo, esta relación de variables es difícilmente explicable desde el punto de vista termofísico; de hecho, pueden reseñarse algunas características de este modelo que resultan poco lógicas:

- La entalpía de vaporización, h_{fg} , está situada en el numerador, lo que indicaría que a mayor capacidad de la sustancia para evacuar calor durante los cambios de fase, mayor resistencia térmica presenta el sistema, cosa que va contra toda lógica; esto es, la entalpía de vaporización debería estar en el denominador favoreciendo la transferencia de calor y no entorpeciéndola.
- No aparece ni la densidad de líquido ni la del vapor (ρ_l y ρ_v) siendo éstas, principalmente la primera, variables importantes si se atiende a los modelos recogidos por la bibliografía.
- Está presente el calor específico del vapor, c_{pv} , cuando no debería ser una variable relevante del sistema según la literatura científica consultada.

Esta distorsión en el modelo puede explicarse por las altas correlaciones que aparecen entre las variables independientes; esto es, la distorsión se debe a la presencia de multicolinealidad.

En la matriz de correlaciones calculada por Statgraphics pueden verse, resaltadas en rojo, las elevadas correlaciones entre algunas variables explicativas.

Tabla 7.22: Correlaciones entre variables explicativas

Matriz de Correlación para las estimaciones de los coeficientes					
	ln hfg	ln Cpl	ln Cpv	ln ul	ln kl
ln hfg	1,0000	-0,0828	-0,5985	-0,2156	-0,8558
ln Cpl	-0,0828	1,0000	-0,3692	0,2123	-0,2691
ln Cpv	-0,5985	-0,3692	1,0000	0,6395	0,4149
ln ul	-0,2156	0,2123	0,6395	1,0000	-0,2075
ln kl	-0,8558	-0,2691	0,4149	-0,2075	1,0000

La multicolinealidad desdibuja la verdadera influencia de las variables predictoras sobre la variable respuesta y, por tanto, puede dar lugar a conjuntos de regresión que, si bien parecen ser los más adecuados, llevarían a interpretaciones y conclusiones erróneas.

Habiendo presentado estos dos argumentos, el termofísico (falta de coherencia con la teoría aceptada por la comunidad científica) y el estadístico (presencia de multicolinealidad), se rechaza el modelo resultante obtenido con la regresión.

7.4.2.2. Regresión múltiple con las variables termofísicamente relevantes

A la vista de la que la regresión lineal basada únicamente en criterios estadísticos, no ofrece resultados válidos, se procede a realizar una regresión múltiple que, con base en criterios estadísticos, tenga presente en mayor medida los fundamentos de la transferencia de calor

Se vuelven a introducir en el modelo todas las variables independientes en estudio:

$$\rho_l, \rho_v, h_{fg}, c_{pl}, c_{pv}, \mu_l, \mu_v, k_l, k_v, \sigma$$

Debido a que la multicolinealidad invalida los contrastes habituales que permiten inferir qué variables son las más influyentes, los criterios de salida y entrada de las variables se van a fundamentar en:

- a) Correlaciones entre variables explicativas: se eliminarán aquellas variables que estén fuertemente correladas y que no discrepen con los dos siguientes criterios.
- b) Las variables consideradas como termofísicamente relevantes, según las teorías científicas aceptadas en la bibliografía consultada, son:

$$\rho_l, \rho_v, h_{fg}, c_{pl}, \mu_l, k_l$$

- c) Variaciones en R^2 , $R^2_{ajustada}$ y el Error Absoluto Medio (EAM): servirán para saber cómo de acertada es la entrada y salida de una variable.

A continuación se expone de forma somera el proceso de eliminación de variables partiendo del modelo de regresión que las incluye a todas.

1) Primera eliminación: k_v

Presenta fuertes correlaciones con 4 variables independientes que son del grupo de las relevantes. Además, no se trata de una variable de relevancia, ya que el vapor se mueve a velocidades elevadas dentro del termosifón por lo que la transferencia de calor tiene lugar simultáneamente a la transferencia de masa (convección); la conductividad del vapor, por tanto, no debería presentar un papel significativo.

Tabla 7.23: Correlaciones entre k_v y las demás variables explicativas

Correlaciones	ln k_v
ln dl	-0,5521
ln dv	-0,1064
ln hfg	-0,5509
ln Cpl	-0,8287
ln Cpv	0,2629
ln ul	0,2327
ln uv	-0,1251
ln kl	0,7479
ln k_v	1,0000
ln ts	0,0467

2) Segunda eliminación: μ_v

Fuertes correlaciones con 4 variables independientes, no siendo tampoco una variable muy a tener en cuenta para los fenómenos de cambio de fase en termosifones.

Tabla 7.24: Correlaciones entre μ_v y las demás variables explicativas

Correlaciones	ln uv
ln dl	0,8688
ln dv	-0,5268
ln hfg	-0,8211
ln Cpl	-0,3909
ln Cpv	-0,5637
ln ul	-0,4670
ln uv	-0,8364
ln kl	1,0000
ln ts	-0,4284

3) Tercera eliminación: c_{pv}

Muestra correlaciones de consideración con 3 variables independientes. Tampoco se trata de una de las variables que se han tomado como relevantes en la bibliografía científica consultada.

Tabla 7.25: Correlaciones entre c_{pv} y las demás variables explicativas.

Correlaciones	ln Cpv
ln dl	0,4363
ln dv	-0,5900
ln hfg	0,3699
ln Cpl	-0,7506
ln Cpv	1,0000
ln ul	-0,1931
ln kl	0,0503
ln ts	-0,6933

4) Cuarta eliminación: σ

Presenta fuertes correlaciones con 5 variables independientes importantes. No se trata tampoco de una variable importante para la construcción del modelo; sí que sería una propiedad relevante si se estuviese trabajando con tubos de calor donde la vuelta del líquido al evaporador tiene lugar por capilaridad; sin embargo, en los termosifones este retorno se debe únicamente a la fuerza de la gravedad.

Tabla 7.26: Correlaciones entre σ y las demás variables explicativas.

Correlaciones	ln ts
ln dl	-0,6706
ln dv	0,6860
ln hfg	-0,8619
ln Cpl	0,6182
ln ul	0,5057
ln kl	0,4447
ln ts	1,0000

5) Modificación del conjunto de variables final: introducción de la variable ($\rho_v \cdot h_{fg}$)

Con esta variable se reducen las correlaciones entre regresores (ρ_v y h_{fg} presentaban correlaciones de relevancia con ρ_l , tal y como se indica en la tabla siguiente) y mejora el valor de $R^2_{ajustada}$.

Tabla 7.27: Correlaciones entre ρ_v y h_{fg} y las demás variables explicativas.

Correlaciones	ln dv	ln hfg
ln dl	-0,6865	0,7906
ln dv	1,0000	-0,3300
ln hfg	-0,3300	1,0000
ln Cpl	0,0671	0,3549
ln ul	0,9145	-0,5117
ln kl	0,5100	-0,9386

Tras el proceso de eliminación - modificación, el conjunto final de variables resulta ser:

$$\rho_l, (\rho_v \cdot h_{fg}), c_{pl}, \mu_l, k_l$$

Validación del modelo

A continuación se muestra la salida de Statgraphics con los valores de los principales estadísticos que son testigo de la bondad del modelo.

Tabla 7.28: Resultado de la regresión.

Regresión Múltiple - ln Rterm					
Variable dependiente: ln Rterm					
Variables independientes:					
ln dl					
ln D					
ln Cpl					
ln ul					
ln kl					
Parámetro	Estimación	Error Estándar	Estadístico T	Valor-P	
CONSTANTE	-1,1087	0,520609	-2,12961	0,0354	
ln dl	-0,0966078	0,100906	-0,957407	0,3404	
ln D	-0,0187816	0,0327034	-0,574302	0,5669	
ln Cpl	0,219824	0,0965986	2,27565	0,0248	
ln ul	0,333466	0,0916687	3,63774	0,0004	
ln kl	-0,184909	0,0498444	-3,70973	0,0003	
Análisis de Varianza					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	1,50737	5	0,301473	37,03	0,0000
Residuo	0,90375	111	0,00814189		
Total (Corr.)	2,41111	116			
R-cuadrada = 62,5174 por ciento					
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 60,829 por ciento					
Error estándar del est. = 0,0902324					
Error absoluto medio = 0,0645339					
Estadístico Durbin-Watson = 1,99519 (P=0,4897)					
Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0,0238183					

a) Pruebas individuales de los coeficientes de regresión.

Aunque la multicolinealidad, que sigue presente también en este modelo, impide fiarse completamente de los contrastes estadísticos aquí se van a tener en cuenta como medida orientativa de la bondad del ajuste. Se observan cuatro valores bastante superiores al 0,05, que se toma como referencia para el estadístico p-valor. Éstos corresponden a las variables ρ_l , ρ_v , h_{fg} y k_l lo que estaría indicando que no presentan relevancia estadística; sin embargo no pueden descartarse, ya que son muy importantes para explicar el funcionamiento de la tecnología tipo termosifón.

b) ANOVA del modelo (análisis de varianza).

El p-valor del modelo es de 0,000, lo que señala que existe una relación estadísticamente significativa entre el conjunto de variables explicativas y la variable respuesta.

c) Estadísticos para la bondad del ajuste de regresión.

A la vista de estos estadísticos puede afirmarse que el modelo de regresión, aunque incluye variables estadísticamente poco relevantes, resulta válido si se atiende al análisis de varianza realizado y a los estadísticos que se exponen a continuación. Se tiene:

- $R^2 = 62,5174 \%$;
- $R^2_{ajustada} = 60,829 \%$;
- Error absoluto medio = 0,0645339 ;

Tras analizar los parámetros que marcan lo bueno o malo del ajuste se presenta el modelo de regresión:

$$\ln R_{\text{term}} = -1,1087 - 0,0966078 \cdot \ln \rho_l - 0,0187816 \cdot \ln (\rho_v \cdot h_{fg}) + 0,219824 \cdot \ln c_{pl} + 0,333466 \cdot \ln \mu_l - 0,184909 \cdot \ln k_l$$

Eliminando los logaritmos y redondeando los coeficientes, el modelo quedaría:

$$R_{\text{term}} = 0,33 \cdot \left(\frac{c_{pl}^{2,2} \cdot \mu_l^{3,33}}{\rho_l^{0,97} \cdot (\rho_v \cdot h_{fg})^{0,19} \cdot k_l^{1,85}} \right)^{1/10} \quad (7.6)$$

Se mantienen algunas correlaciones fuertes entre las variables independientes, tal y como se puede apreciar en la tabla siguiente (las que presentan un valor superior a 0,5 aparecen resaltadas en rojo).

Tabla 7.29: Matriz de Correlación para las estimaciones de los coeficientes.

	ln dl	ln D	ln Cpl	ln ul	ln kl
ln dl	1,0000	-0,4594	0,4515	-0,7020	-0,2413
ln D	-0,4594	1,0000	0,2984	0,8770	-0,2018
ln Cpl	0,4515	0,2984	1,0000	0,2364	-0,8968
ln ul	-0,7020	0,8770	0,2364	1,0000	-0,3124
ln kl	-0,2413	-0,2018	-0,8968	-0,3124	1,0000

Otra manera de detectar la multicolinealidad es mediante el uso del factor de inflación de varianza VIF. La multicolinealidad es severa cuando $VIF > 30$ e importante cuando $VIF > 10$. Statgraphics ofrece estos valores y, como puede verse en la tabla siguiente, la

multicolinealidad es ciertamente relevante. Debido a esto se realiza a continuación la regresión ridge.

Tabla 7.30: Factores de Inflación de Varianza.

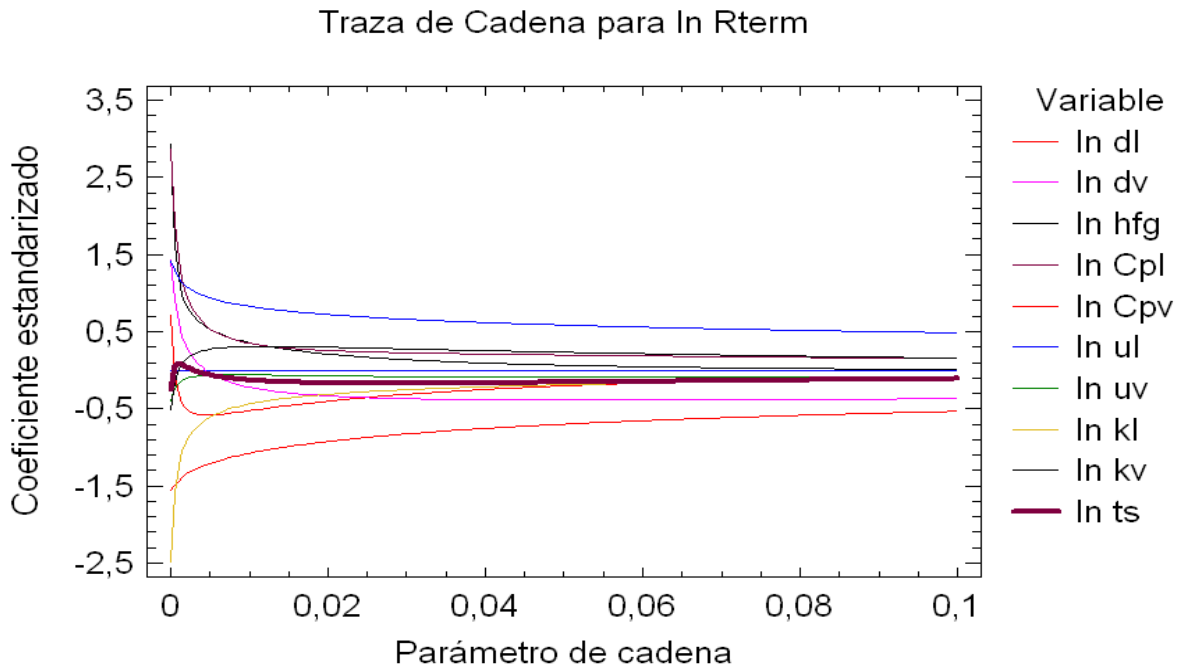
$\ln dl$	$\ln D$	$\ln Cpl$	$\ln ul$	$\ln kl$
16,7644	12,1367	21,177	31,607	12,5928

7.4.2.3. Regresión ridge

A continuación se va a detallar el proceso que se ha seguido para llevar a cabo la regresión ridge para este termosifón, el termosifón de aluminio prismático con control de potencia.

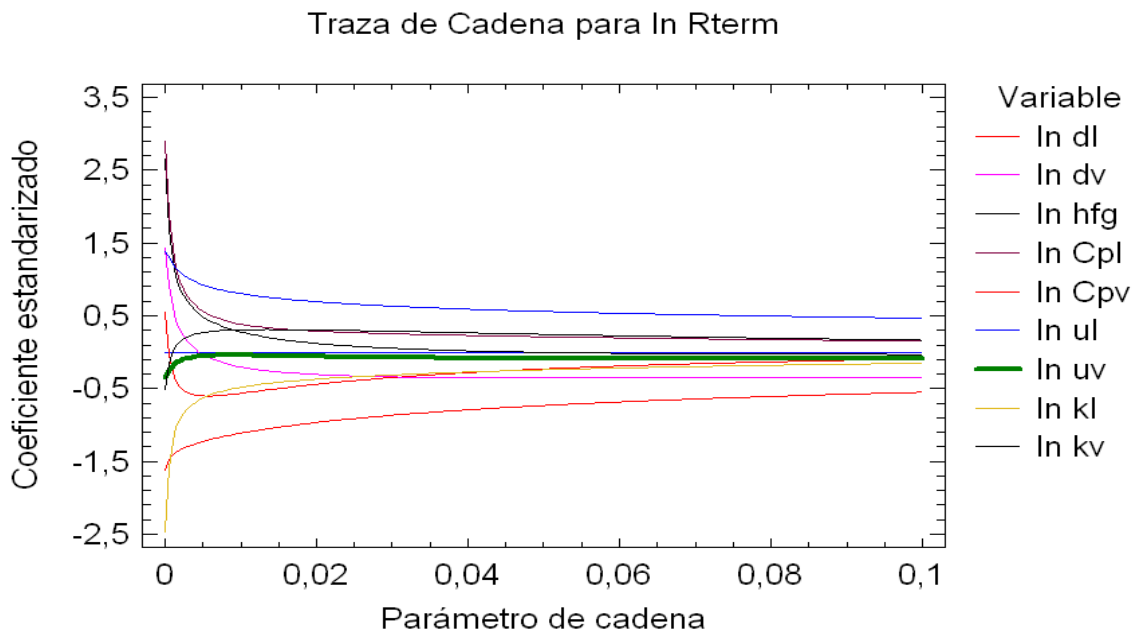
a) Selección de las variables mediante la curva ridge

Se parte de un modelo que incluye a todas las variables regresoras. Con la curva ridge presente se siguen las directrices de selección de variables expuestas anteriormente sin olvidar, claro está, los criterios termofísicos para evitar que salga un conjunto de variables poco coherente. De esta forma se tiene:



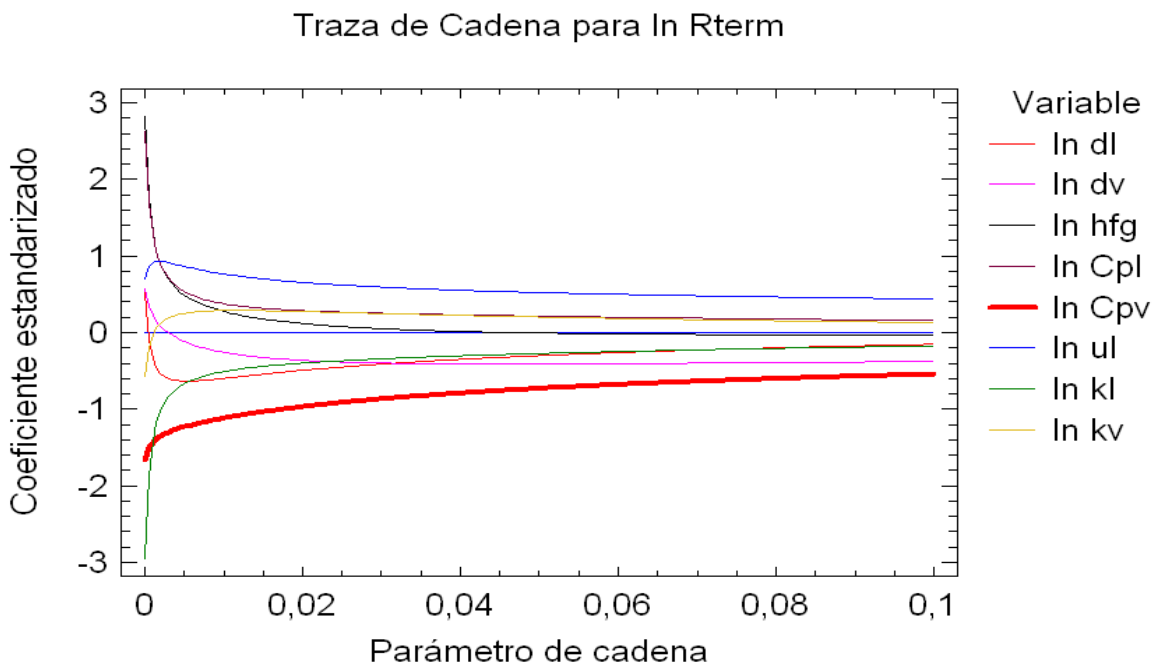
Gráfica 7.21: Curva ridge para termosifón prismático de aluminio (CCP).

Primeramente se elimina σ ($\ln ts$) que como se puede apreciar (línea granate más gruesa) es muy inestable (cambia de signo dos veces) y presenta un valor muy bajo.



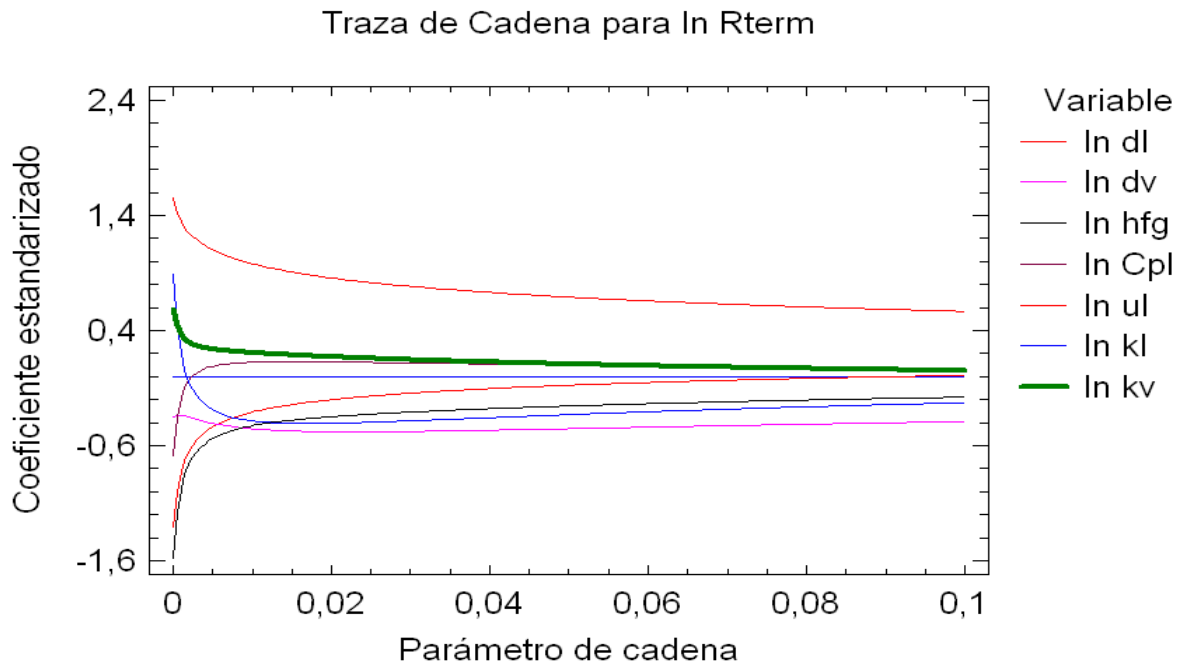
Gráfica 7.22: Curva ridge para termosifón prismático de aluminio (CCP).

Los coeficientes de μ_v ($\ln u_v$), aunque relativamente estables, son muy bajos (línea verde). Se elimina del modelo.



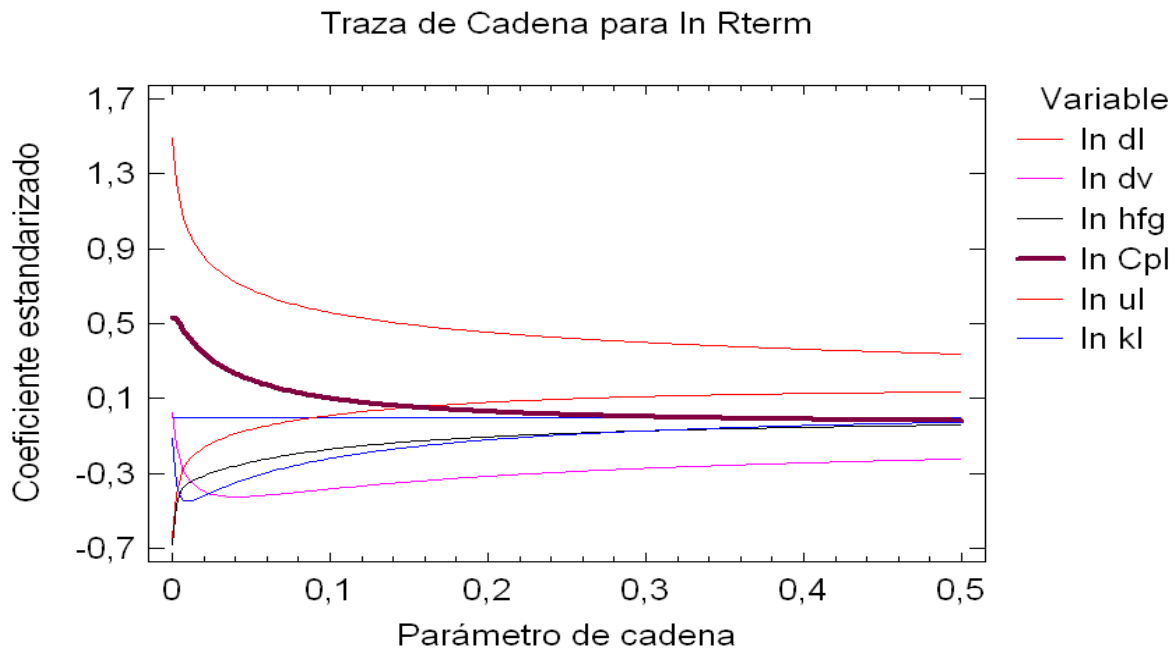
Gráfica 7.23: Curva ridge para termosifón prismático de aluminio (CCP).

La siguiente variable en ser eliminada es c_{pv} (línea roja más gruesa). Aunque es una de las variables más estables de la traza se sabe que presenta correlaciones fuertes entre otras variables pudiendo influir en sus coeficientes. Se quita del modelo. En la siguiente traza se verá que el resto de variables se vuelve más estable indicando el acierto en esta eliminación a priori poco lógica.



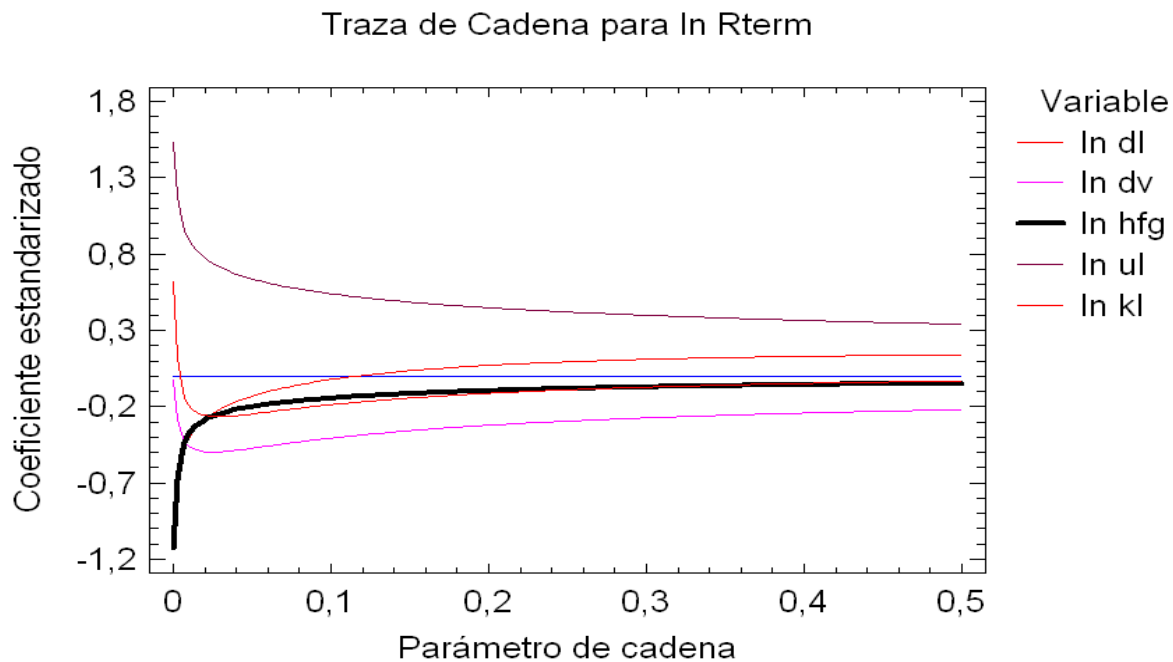
Gráfica 7.24: Curva ridge para termosifón prismático de aluminio (CCP).

La siguiente variable en salir del modelo es k_v ($\ln k_v$). Es la que más rápidamente tiende a anularse.



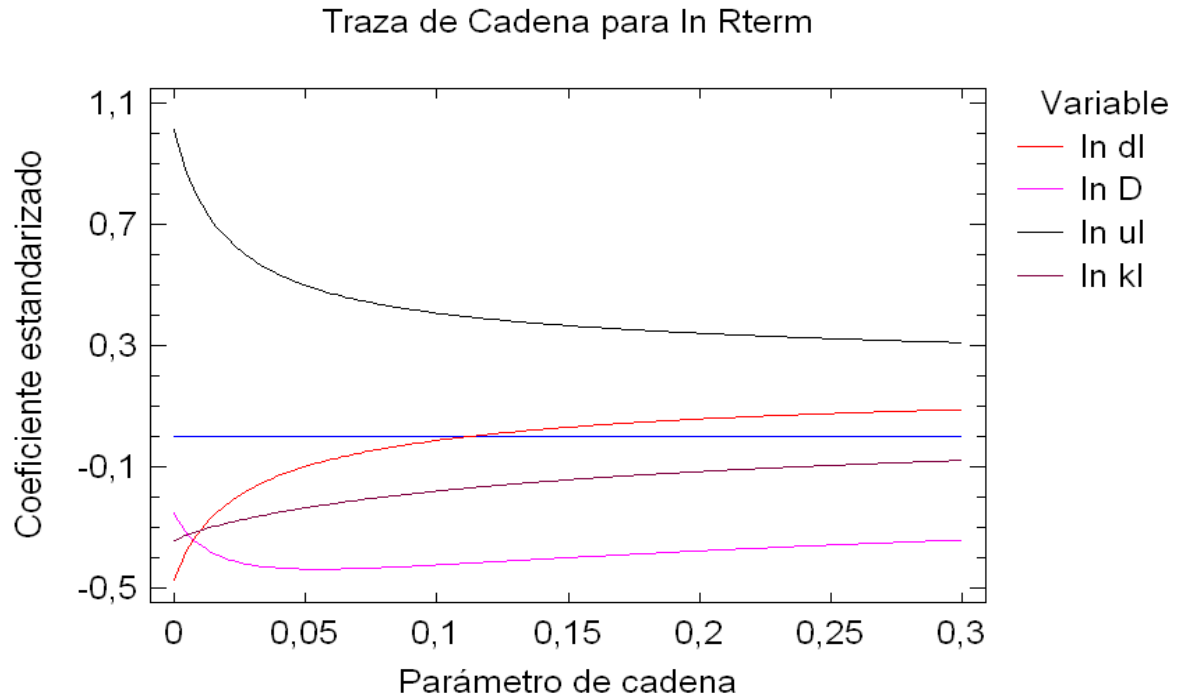
Gráfica 7.25: Curva ridge para termosifón prismático de aluminio (CCP).

A continuación se quita c_{pl} . Si se observa su traza (línea granate) es la que tiende más rápido a cero.



Gráfica 7.26: Curva ridge para termosifón prismático de aluminio (CCP).

La variable que debería salir ahora sería h_{fg} (línea negra), pero se sabe que es una variable explicativa fundamental desde el punto de vista térmico. Como se ha hecho anteriormente, se combinan las variables ρ_v y h_{fg} ($D = \rho_v \cdot h_{fg}$) buscando mayor estabilidad del modelo; el resultado es:



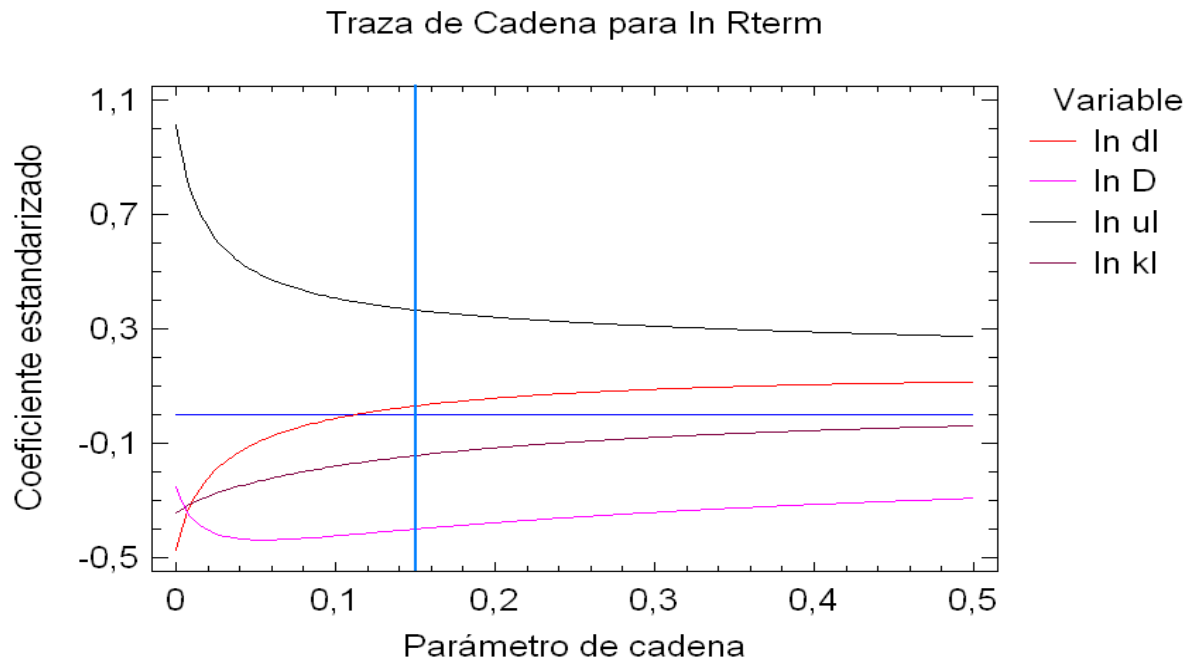
Gráfica 7.27: Curva ridge para termosifón prismático de aluminio (CCP).

Una vez realizado este cambio parece que trazas son bastante estables. Puede concluirse, por tanto, que el conjunto final de variables para el modelo de regresión será el siguiente:

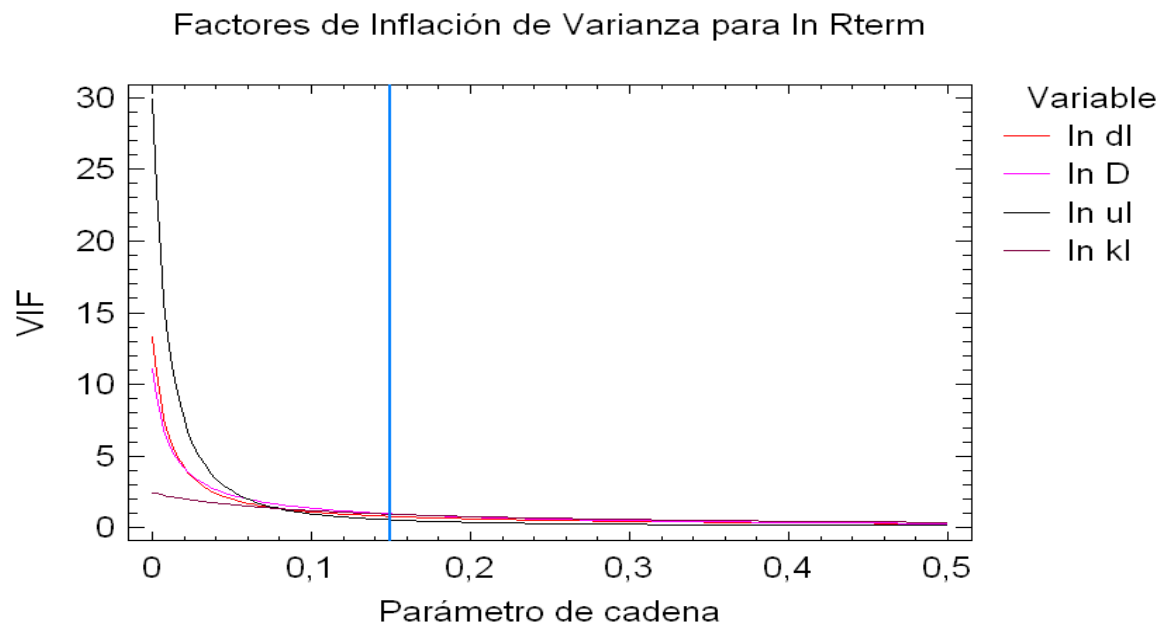
$$\rho_1, (\rho_v \cdot h_{fg}), \mu_1, k_1$$

b) Selección del parámetro de cadena

Analizando las gráficas que se presentan a continuación podrá elegirse un parámetro de cadena (o parámetro ridge) que disipe la multicolinealidad en gran medida, pero que a su vez no reduzca demasiado el poder explicativo del modelo. Es decir, que al aumentar el valor del parámetro de cadena disminuyen los valores de R^2 y de $R^2_{ajustada}$.



Gráfica 7.28: Parámetro de cadena para termosifón prismático de aluminio (CCP).



Gráfica 7.29: VIF para termosifón prismático de aluminio (CCP).

Se ha tomado como parámetro de cadena 0,15, ya que es un valor relativamente bajo en el que los coeficientes están medianamente estabilizados. Podría haberse tomado un valor menor, pero se ha buscado que la densidad del líquido (línea roja) se estabilizase del todo tomando el signo positivo al que tiende claramente. Al tomar un valor de parámetro de

cadena tan alto se obtienen valores para el VIF más bajos que la unidad, que aunque pueda resultar llamativo, no tienen ningún tipo de connotación negativa.

Tabla 7.31: Factores de Inflación de Varianza.

Parámetro de Cadena	ln dl	ln D	ln ul	ln kl	R-Cuadrada
0,15	0,797657	1,01171	0,574209	0,963135	37,24

c) Validación del modelo

A continuación se muestra la salida de Statgraphics.

Tabla 7.32: Resultados de la regresión ridge.

<u>Regresión en Cadena - ln Rterm</u>																							
Variable dependiente: ln Rterm																							
Variables independientes:																							
ln dl																							
ln D																							
ln ul																							
ln kl																							
Número de casos completos: 117																							
Resultados del Modelo para el Parámetro de Cadena = 0,15																							
		<i>Factor de Inflación de Varianza</i>																					
<i>Parámetro</i>	<i>Estimado</i>																						
CONSTANTE	-0,791009																						
ln dl	0,0129052	0,80453																					
ln D	-0,0646692	0,985248																					
ln ul	0,102638	0,561591																					
ln kl	-0,0346265	0,96334																					
Análisis de Residuos <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th><i>Estimación</i></th> <th><i>Validación</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>n</td> <td>117</td> <td></td> </tr> <tr> <td>CME</td> <td>0,00906377</td> <td></td> </tr> <tr> <td>MAE</td> <td>0,0695577</td> <td></td> </tr> <tr> <td>MAPE</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>ME</td> <td>-9,01463E-17</td> <td></td> </tr> <tr> <td>MPE</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>				<i>Estimación</i>	<i>Validación</i>	n	117		CME	0,00906377		MAE	0,0695577		MAPE			ME	-9,01463E-17		MPE		
	<i>Estimación</i>	<i>Validación</i>																					
n	117																						
CME	0,00906377																						
MAE	0,0695577																						
MAPE																							
ME	-9,01463E-17																						
MPE																							
R-Cuadrada = 53,1648 por ciento R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 51,4921 por ciento Error estándar del est. = 0,0952038 Error medio absoluto = 0,0695577 Estadístico Durbin-Watson = 2,12684 (P=0,7525) Autocorrelación residual de retardo 1 = -0,0796856																							

El estadístico R^2 indica que el modelo, así ajustado, explica el 53,1648% de la variabilidad de R_{term} . El estadístico $R^2_{ajustada}$ es 51,4921%. El error estándar de estimación muestra que la desviación estándar de los residuos es 0,0952038. El error absoluto medio (MAE) de 0,0695577 es el valor promedio de los residuos.

El modelo de regresión resultante es:

$$\ln R_{term} = -0,791009 + 0,0129052 \cdot \ln \rho_1 - 0,0646692 \cdot \ln (\rho_v \cdot h_{fg}) + 0,102638 \cdot \ln \mu_1 - 0,0346265 \cdot \ln k_1$$

Quitando los logaritmos y redondeando los coeficientes, el modelo quedaría:

$$R_{\text{term}} = 0,4534 \cdot \left(\frac{\rho_l^{0,13} \cdot \mu_l^{1,03}}{(\rho_v \cdot h_{fg})^{0,65} \cdot k_l^{0,35}} \right)^{1/10} \quad (7.7)$$

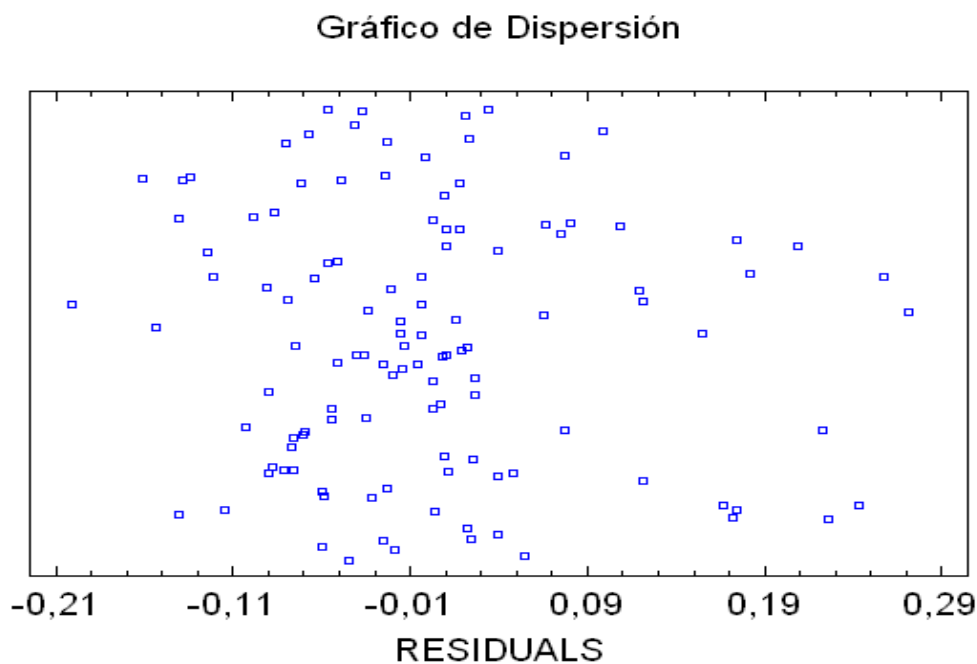
Hay que resaltar que éste no va a ser el resultado final de la regresión para este termosifón ya que, como se verá en el apartado siguiente, los residuos no siguen una distribución normal y habrá que eliminar alguna observación para que esto se cumpla. Al hacer estos cambios el modelo va a variar, no en las variables que lo van a integrar (las trazas ridge son muy similares y por tanto el proceso de selección de variables permanece igual), pero sí en el valor del parámetro de cadena y, por tanto, en el valor de los coeficientes (exponentes).

d) Diagnósis del modelo

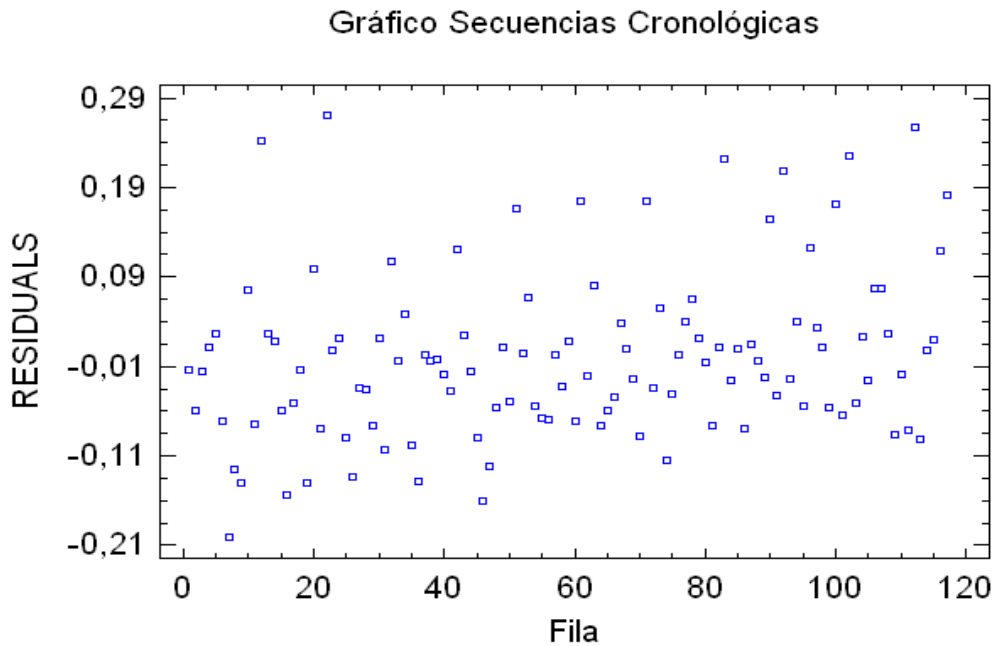
A continuación se presentan los estadísticos y gráficas que indicarán si el modelo es adecuado según los criterios estadísticos.

D.1. Residuales

a) Gráfico de dispersión.



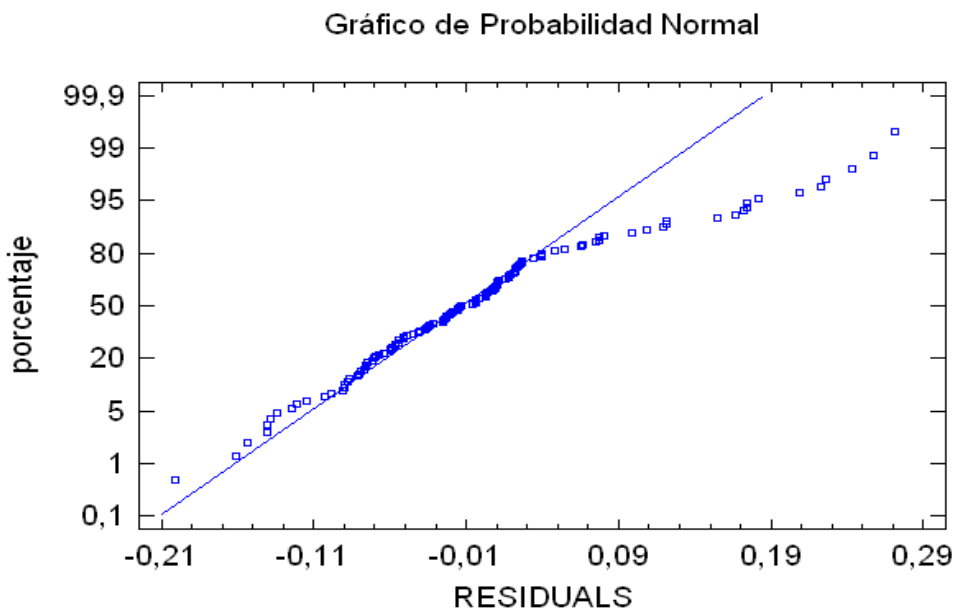
Gráfica 7.30: Dispersión para termosifón prismático de aluminio (CCP).



Gráfica 7.31: Secuencias cronológicas para termosifón prismático de aluminio (CCP).

No hay tendencias ni agrupaciones especiales; los residuos son aleatorios, no les influye el orden en que se han introducido los datos. Esto último también se puede saber observando el valor del estadístico Durbin-Watson = 2,12684, que al estar próximo a 2 confirma la interpretación hecha para el gráfico.

b) Percentiles de la distribución normal –QQ-norms.



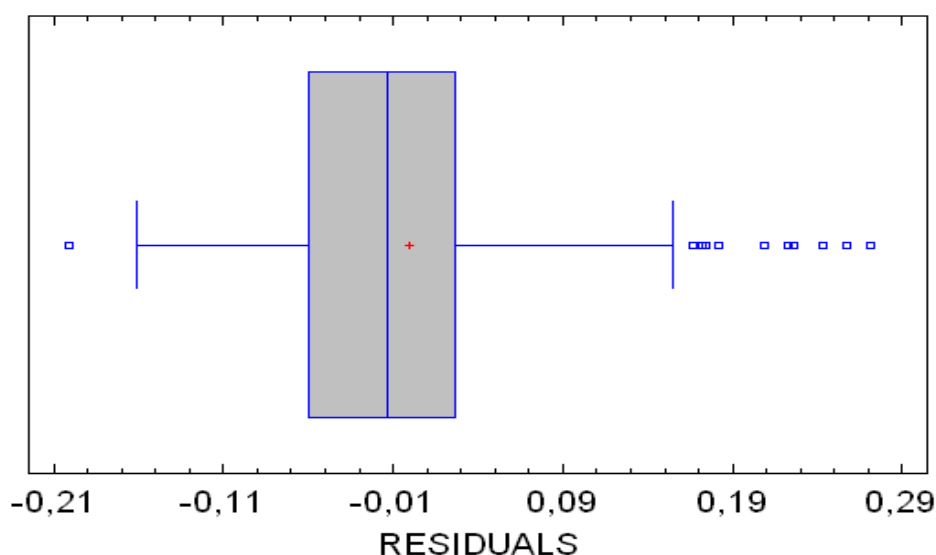
Gráfica 7.32: Distribución normal para termosifón prismático de aluminio (CCP).

Los residuos presentan desviaciones notables respecto de la distribución normal; los puntos situados más a la derecha del gráfico se separan claramente de la diagonal. Esto también puede comprobarse atendiendo a los valores que arrojan el sesgo estandarizado y la curtosis; el primero se aleja bastante del intervalo (-2, 2) indicado para la normalidad; se concluye por tanto que hay desviaciones significativas con respecto a la distribución normal.

Tabla 7.33: Validación del supuesto de distribución normal.

Sesgo Estandarizado	3,72867
Curtosis Estandarizada	1,66168

Gráfico de Caja y Bigotes



Gráfica 7.33: Gráfico de Caja y Bigotes para termosifón prismático de aluminio (CCP).

Para que la hipótesis de normalidad vuelva a ser válida se va a proceder a eliminar las observaciones cuyos residuos se desvían de esta suposición (constituyen residuos atípicos). Son los puntos marcados en el gráfico de caja y bigotes anterior, y corresponden a:

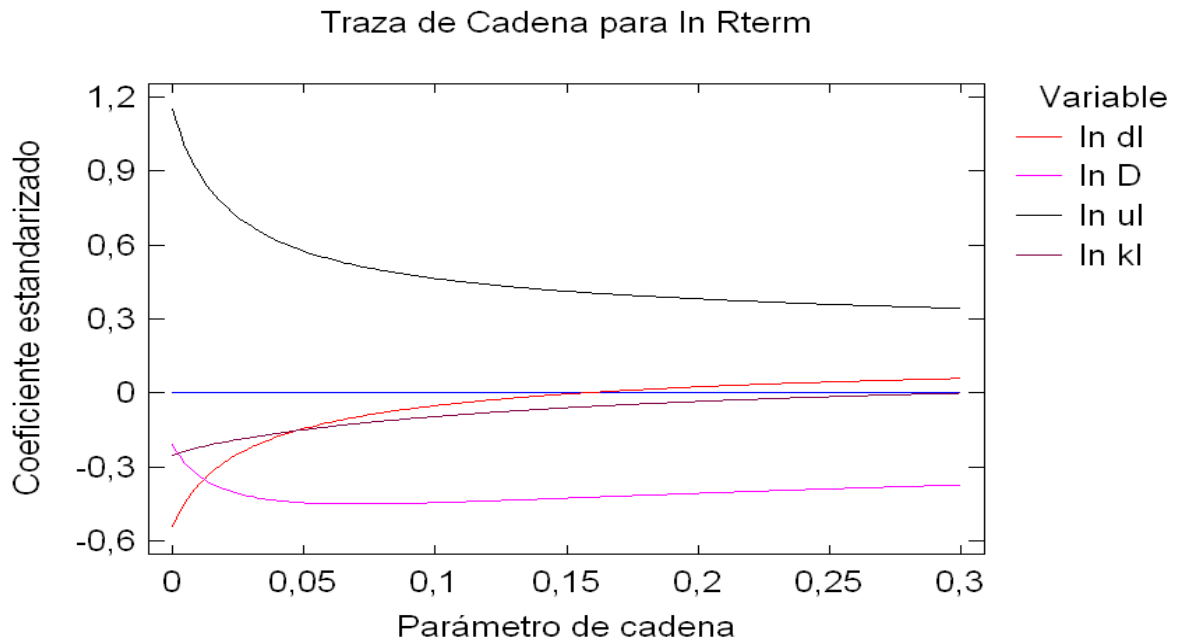
- Cuatro puntos del perfluoroheptano.
- Cuatro puntos del isopentano.

- Un punto de la mezcla azeotrópica dietil éter + metanoato de metilo.

Tras esta modificación, en la que el número de observaciones ha pasado de ser 117 a ser 108, hay que volver a definir el modelo.

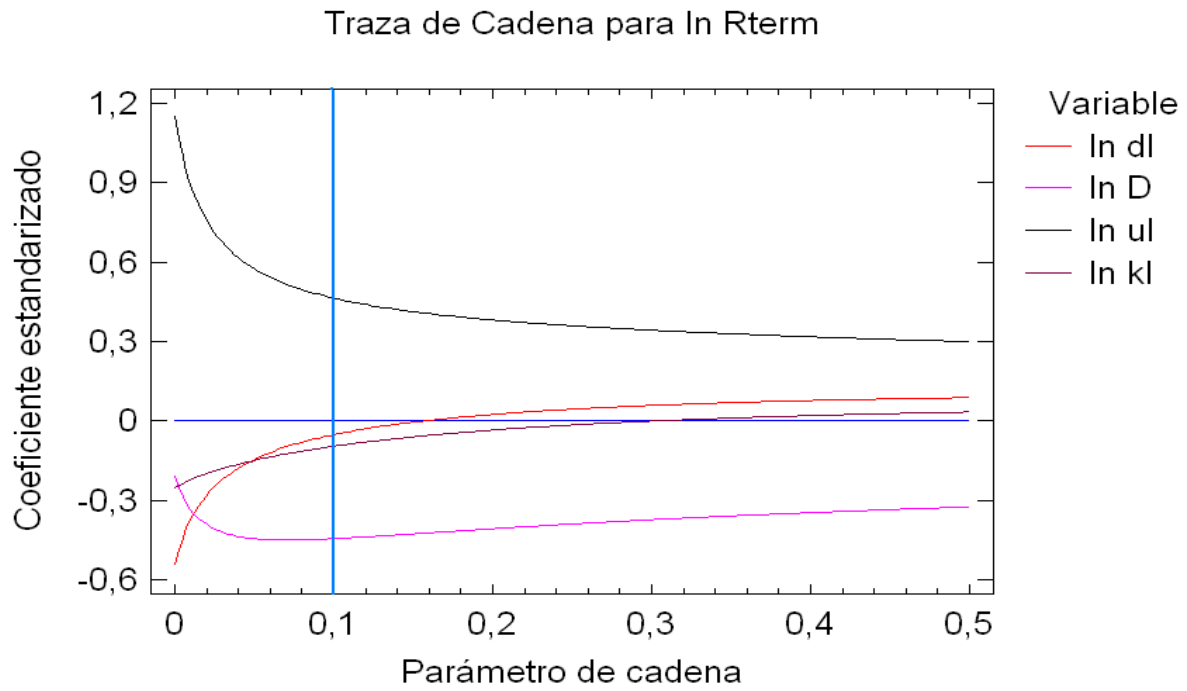
La traza ridge final no se ha modificado de forma relevante si se compara con la anterior, así que puede deducirse que el proceso de selección de variables sigue siendo válido y el conjunto final de variables corresponderá al mismo que se tenía previamente:

$$\rho_l, (\rho_v \cdot h_{fg}), \mu_l, k_l$$

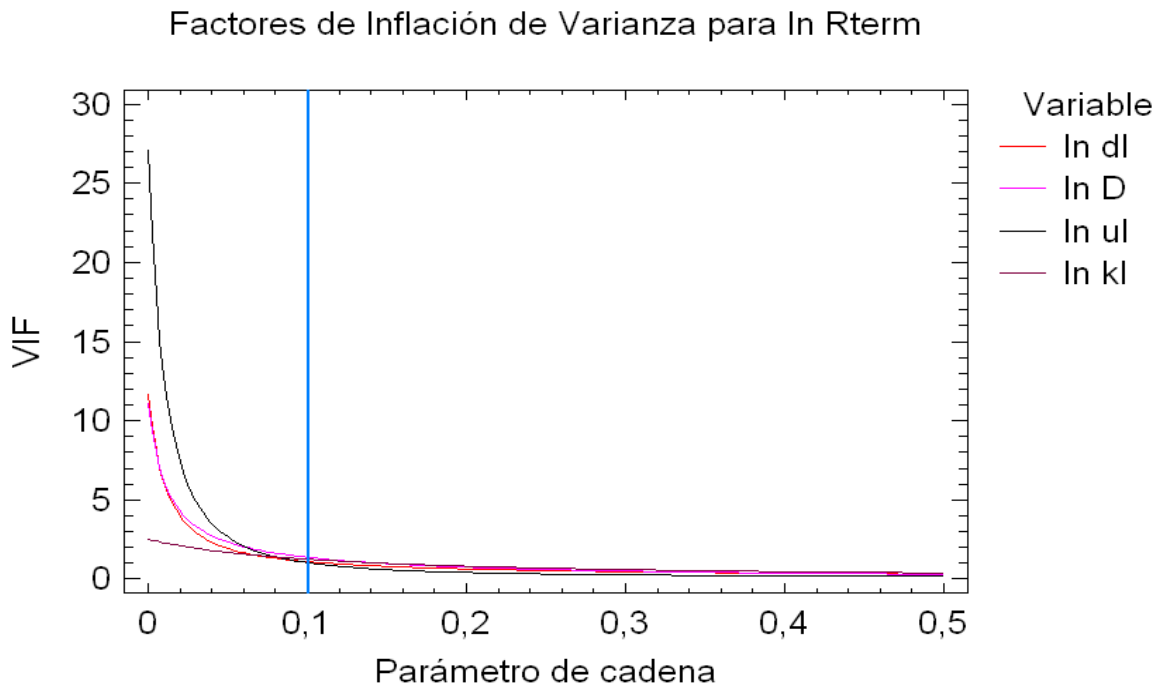


Gráfica 7.34: Curva ridge para termosifón prismático de aluminio (CCP).

Se elige un nuevo parámetro de cadena:



Gráfica 7.35: Parámetro de cadena para termosifón prismático de aluminio (CCP).



Gráfica 7.36: VIF para termosifón prismático de aluminio (CCP).

Se ha tomado como parámetro de cadena 0,1, ya que es un valor relativamente bajo en el que los coeficientes están medianamente estabilizados. Anteriormente se tomó un valor

para el parámetro ridge de 0,15 buscando que la densidad del líquido (línea roja) cambiase a signo positivo que es donde parecía estabilizarse. Ahora, aunque la curva es similar a la anterior, sí que es algo menos pronunciada, y habría que tomar un parámetro de cadena en torno a 0,2, donde precisamente la conductividad del líquido (línea granate) se anula. Por tanto, los criterios seguidos para tomar un valor de 0,1 han sido el de la estabilidad de los coeficientes (las trazas son casi horizontales y varían muy lentamente) y el de tener valores para la inflación de varianzas cercanos a 1.

Tabla 7.34: Factores de Inflación de Varianza.

Parámetro de Cadena	ln dl	ln D	ln ul	ln kl	R-Cuadrada
0,1	1,10079	1,37494	1,03056	1,25658	65,83

La pantalla de salida de Statgraphics para este nuevo modelo sería:

Tabla 7.35: Resultados de la regresión ridge.

Regresión en Cadena - ln Rterm		
Variable dependiente: ln Rterm		
Variables independientes:		
ln dl		
ln D		
ln ul		
ln kl		
Número de casos completos: 108		
Resultados del Modelo para el Parámetro de Cadena = 0,1		
		<i>Factor de Inflación de Varianza</i>
<i>Parámetro</i>	<i>Estimado</i>	
CONSTANTE	-0,749932	
ln dl	-0,0205047	1,10079
ln D	-0,0631019	1,37494
ln ul	0,117611	1,03056
ln kl	-0,0202182	1,25658
R-Cuadrada = 65,8285 por ciento R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 64,5015 por ciento Error estándar del est. = 0,07098 Error medio absoluto = 0,0538487 Estadístico Durbin-Watson = 1,88284 (P=0,2726) Autocorrelación residual de retardo 1 = 0,041149		
Análisis de Residuos		
	<i>Estimación</i>	<i>Validación</i>
n	108	
CME	0,00503817	
MAE	0,0538487	
MAPE		
ME	-2,19989E-16	
MPE		

El estadístico R^2 indica que el modelo, así ajustado, explica el 65,8285% de la variabilidad de R_{term} . El estadístico $R^2_{ajustada}$ es 64,5015%. El error estándar de estimación muestra que la desviación estándar de los residuos es 0,07098. El error absoluto medio (MAE) de 0,0538487 es el valor promedio de los residuos.

El modelo de regresión resultante es:

$$\ln R_{\text{term}} = -0,749932 - 0,0205047 \cdot \ln \rho_1 - 0,0631019 \cdot \ln (\rho_v \cdot h_{fg}) + 0,117611 \cdot \ln \mu_1 - 0,0202182 \cdot \ln k_1$$

Quitando los logaritmos y redondeando los coeficientes, el modelo, ahora ya sí el definitivo, quedaría como sigue:

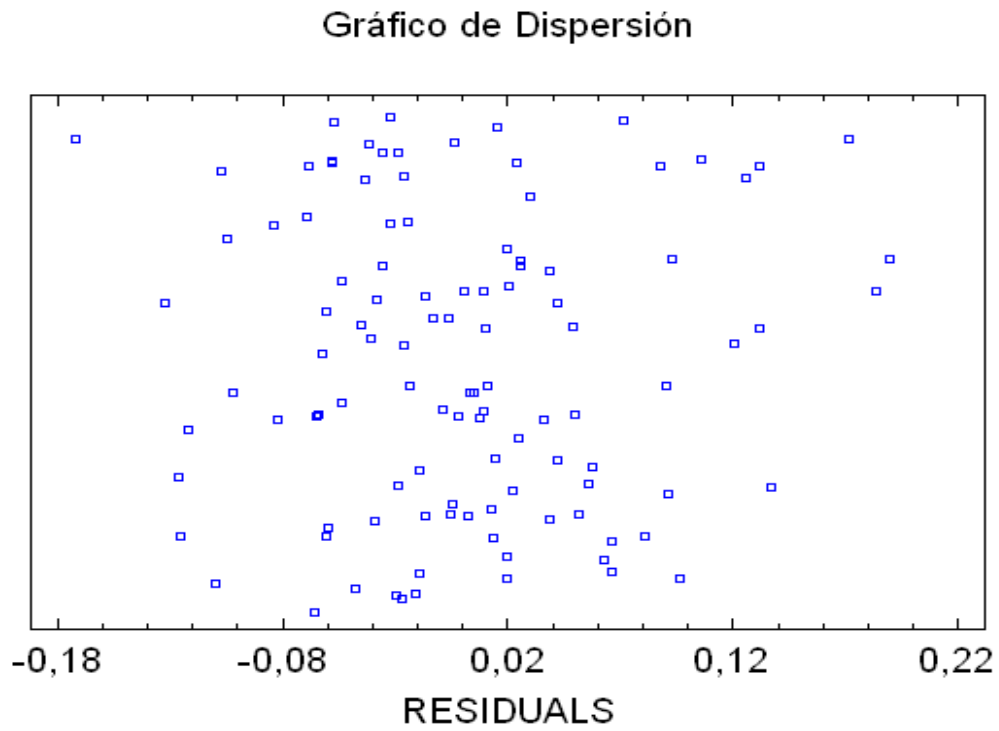
$$R_{\text{term}} = 0,4724 \cdot \left(\frac{\mu_1^{1,18}}{\rho_1^{0,21} \cdot (\rho_v \cdot h_{fg})^{0,63} \cdot k_1^{0,2}} \right)^{1/10} \quad (7.8)$$

Comparando este modelo con el que se tenía anteriormente hay que destacar un par de ideas:

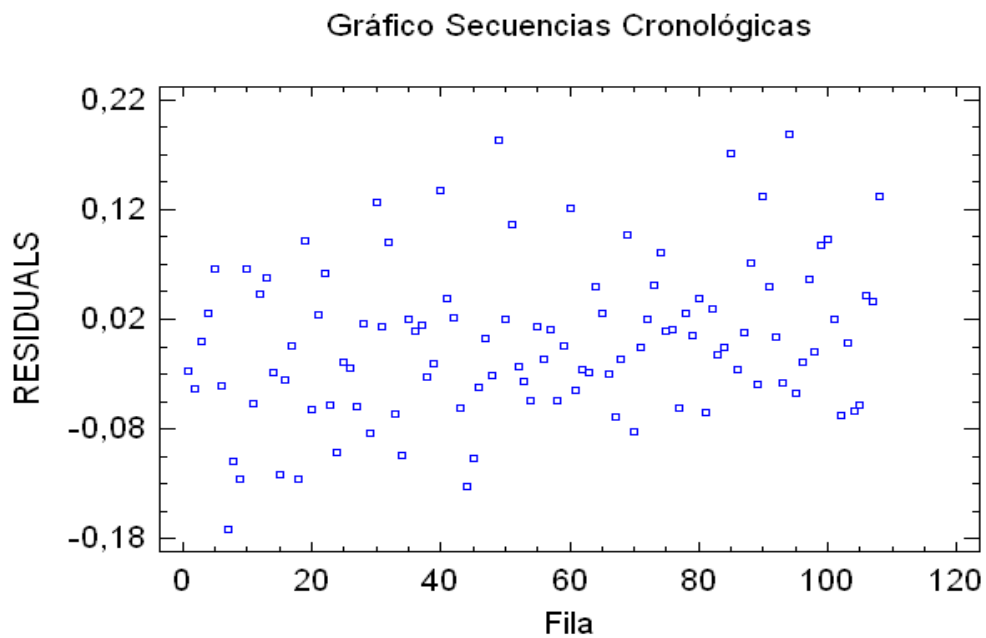
- a) La fórmula final es muy similar a la anterior.
- b) Los valores de los estadísticos que indican la bondad del ajuste han mejorado notablemente justificando, más si cabe, la eliminación de las observaciones indicadas. Los valores de R^2 y $R^2_{ajustada}$, antes se situaban en torno al 35% y ahora sin embargo han subido al entorno del 43%. Así mismo el error absoluto medio ha pasado de situarse cercano al 12% para bajar hasta el 11%.

Se realiza otra vez el análisis de los residuos para validar este nuevo modelo.

a) Gráfico de dispersión



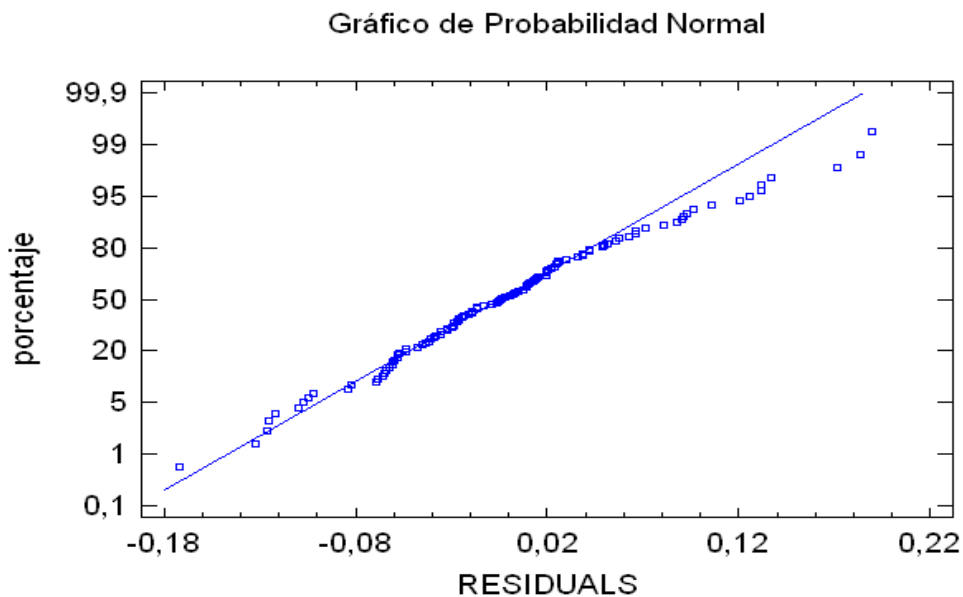
Gráfica 7.37: Dispersión para termosifón prismático de aluminio (CCP).



Gráfica 7.38: Secuencias cronológicas para termosifón prismático de aluminio (CCP).

No hay tendencias ni agrupaciones especiales; los residuos son aleatorios, no les influye el orden en que se han introducido los datos. Esto último también se puede saber observando el valor del estadístico Durbin-Watson = 1,88284 que al estar próximo a 2 confirma la interpretación hecha para el gráfico.

b) Percentiles de la distribución normal –QQ-norms



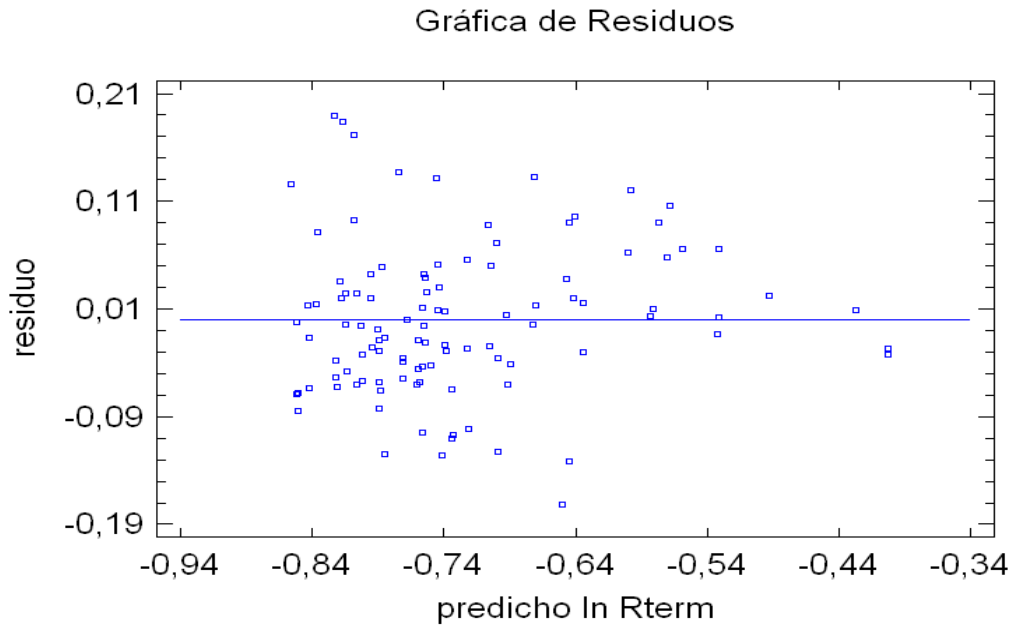
Gráfica 7.39: Distribución normal para termosifón prismático de aluminio (CCP).

Ahora sí, los residuos se ajustan bastante bien a la distribución normal. Esto también puede comprobarse atendiendo a los valores que arrojan el sesgo y la curtosis estandarizadas; ambos están dentro del rango (-2,2), por lo que puede afirmarse que no hay desviaciones significativas de la normalidad.

Tabla 7.36: Validación del supuesto de distribución normal.

Sesgo Estandarizado	1,62956
Curtosis Estandarizada	0,665716

c) Gráficos de los residuales frente a los valores ajustados.

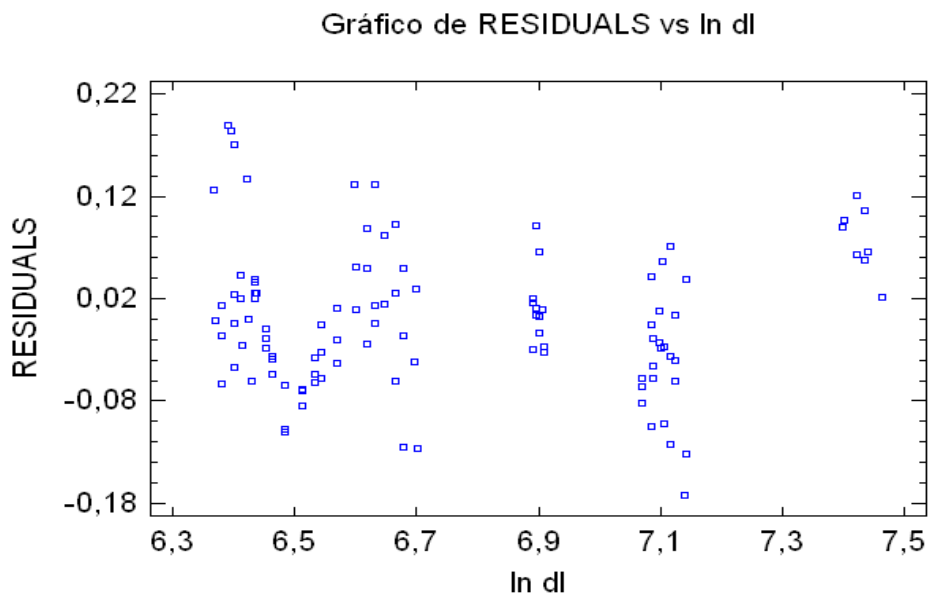


Gráfica 7.40: Residuales para termosifón prismático de aluminio (CCP).

No aparecen agrupaciones de residuos ni una tendencia concreta que revele heterocedasticidad (varianza no constante). No se observan tampoco puntos anómalos.

d) Gráficos de los residuales frente a las variables explicativas

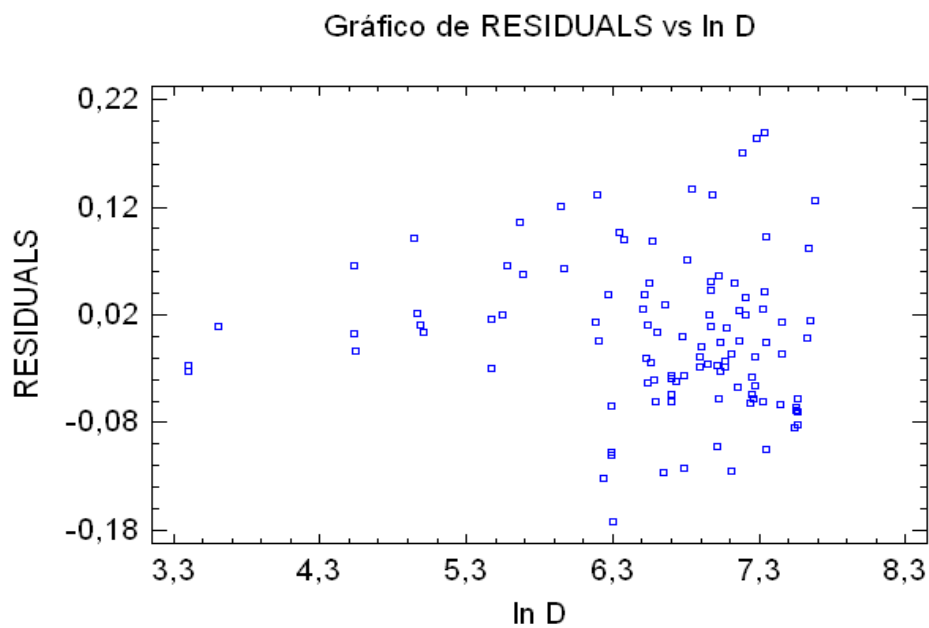
d.1.) Residuales frente a $\ln \rho_1$



Gráfica 7.41: Residuales para termosifón prismático de aluminio (CCP).

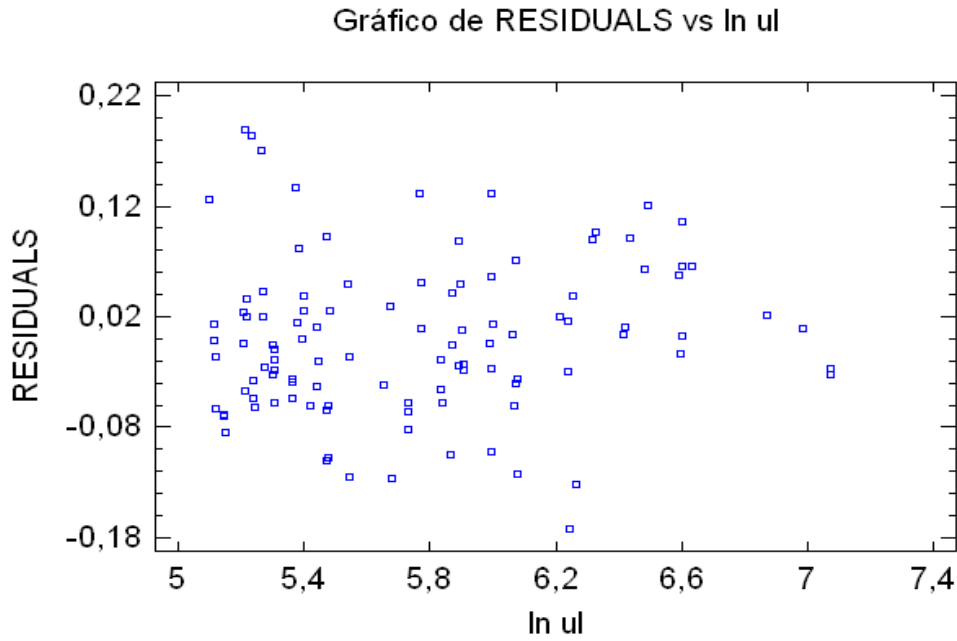
Aparecen agrupaciones de residuos por sustancias; esto tiene cierta lógica, ya que no todas las sustancias se mueven en el mismo rango de valores para sus distintas propiedades, en este caso la densidad de líquido. Por ejemplo, los datos agrupados más a la derecha corresponden al perfluoroheptano, así como los que se agrupan en torno al valor de 6,9 pertenecen al agua. Este hecho podrá observarse también en alguna de las gráficas que siguen.

d.2.) Residuales frente a $\ln(\rho_v \cdot h_{fg}) = \ln D$

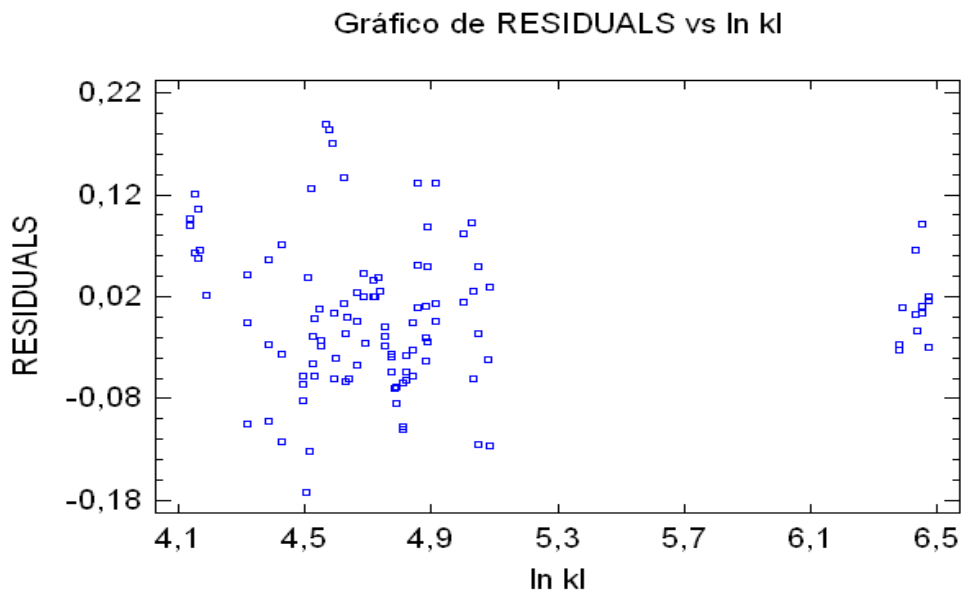


Gráfica 7.42: Residuales para termosifón prismático de aluminio (CCP).

Los puntos de la izquierda, que se encuentran bastante separados de la nube general, corresponden al agua.

d.3.) Residuales frente a $\ln \mu_1$ 

Gráfica 7.43: Residuales para termosifón prismático de aluminio (CCP).

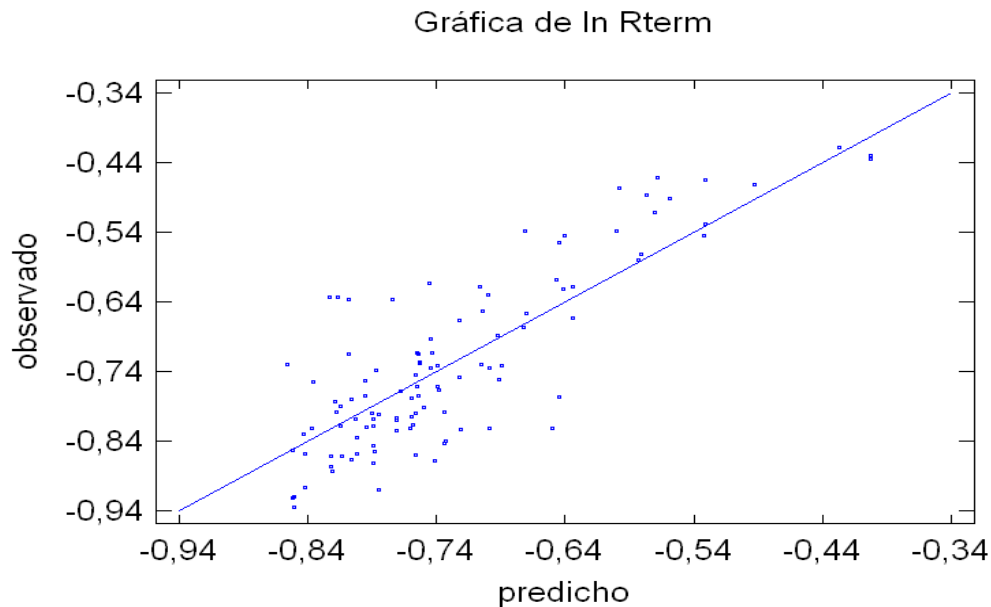
d.4.) Residuales frente a $\ln k_1$ 

Gráfica 7.44: Residuales para termosifón prismático de aluminio (CCP).

Los puntos correspondientes al agua quedan agrupados a la derecha, haciendo notar que es la sustancia con mayor conductividad térmica de las ensayadas en este termosifón.

A la vista de los gráficos presentados puede concluirse que no hay tendencias específicas de los residuos, solamente las consabidas agrupaciones por sustancias que ya han sido señaladas. Tampoco hay puntos claramente atípicos o influyentes.

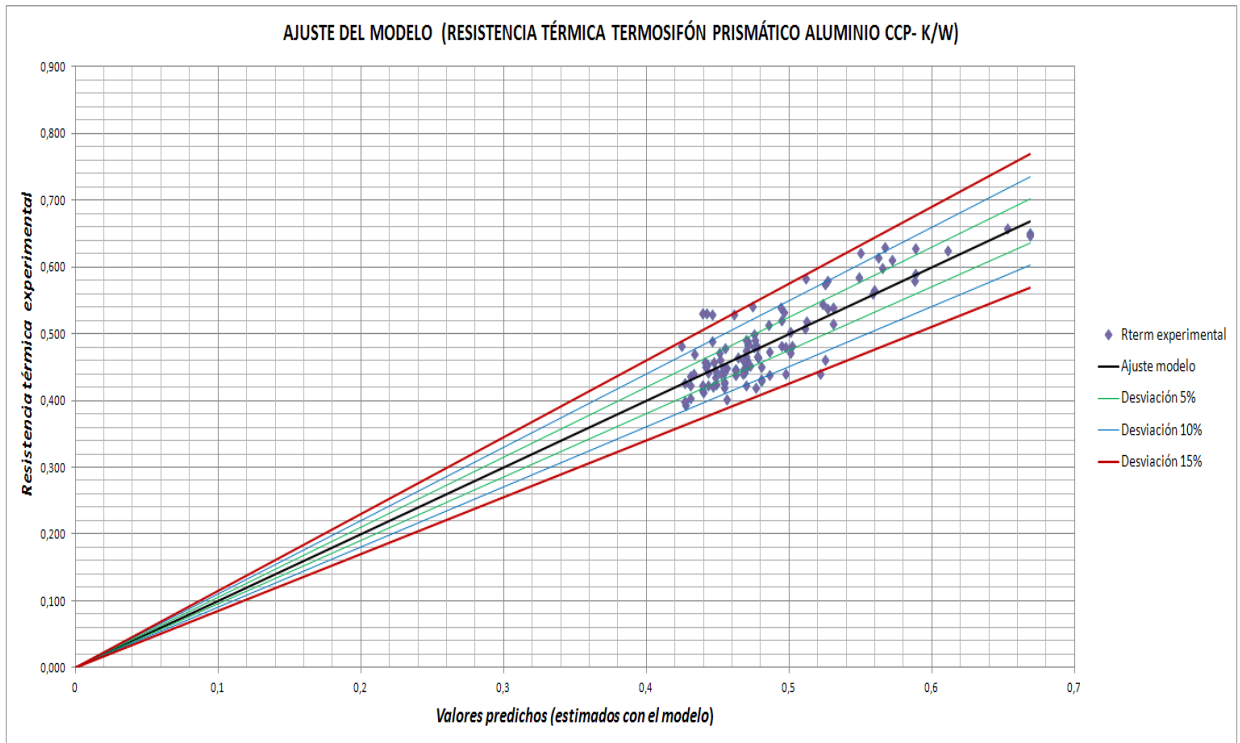
e) Gráficos de valores observados frente a valores ajustados.



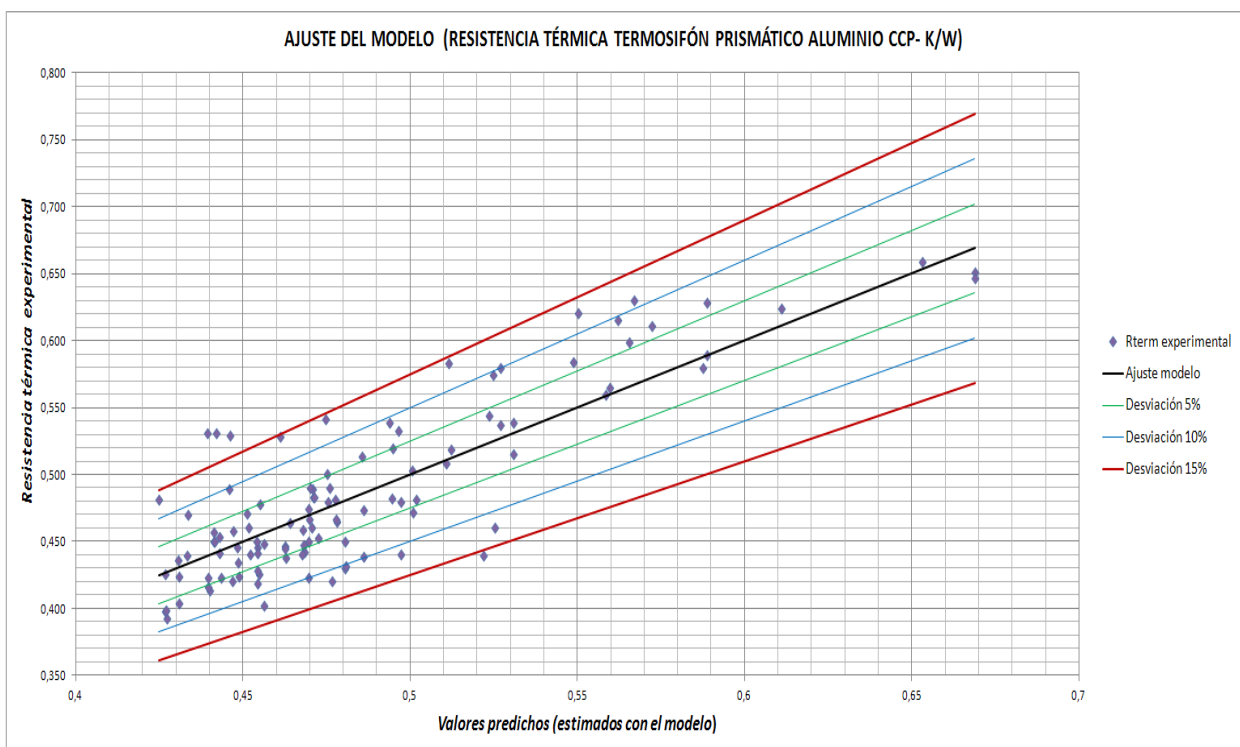
Gráfica 7.45: Valores ajustados para termosifón prismático de aluminio (CCP).

El ajuste parece adecuado, los valores se ciñen bastante bien a la diagonal. Tampoco se aprecian aquí puntos claramente distorsionadores.

En las dos hojas siguientes se muestran las gráficas 7.46 y 7.47, representadas con Excel, donde aparece también la acotación del error cometido en la estimación. En estas dos gráficas puede verse cómo la mayoría de los puntos caen entre las líneas que delimitan el error al $\pm 10\%$, siendo anecdóticos los puntos que presentan un error absoluto superior al 15% (4 de 108, menos del 4%).



Gráfica 7.46: Ajuste del modelo del termosifón prismático de aluminio sin control de potencia.



Gráfica 7.47: Ajuste del modelo del termosifón prismático de aluminio sin control de potencia.

Tras todo este proceso de validación y a la vista de las últimas gráficas puede concluirse que el modelo matemático de regresión es adecuado para explicar el comportamiento del presente termosifón prismático de aluminio con control de potencia.

De este estudio se deduce también, como dato de relevancia, que el tipo de sustancia empleada explica más del 65% de la variabilidad de R_{term} en este termosifón. El estadístico $R^2 = 65,8285\%$ es el que lo indica.

Conviene observar las importantes discrepancias, tanto en fórmulas de estimación como en los valores de los estadísticos que las acompañan, que presenta este termosifón, prismático CCP, respecto al termosifón prismático SCP, (véase el apartado 3 del anexo VII). Estas diferencias se muestran en la tabla siguiente.

Tabla 7.37: Diferencias de resultados entre el termosifón prismático SCP y el CCP.

Termosifón	Fórmula de estimación para R_{term}	Poder explicativo del tipo de sustancia	
		R^2	R^2_{ajustada}
Prismático SCP	$R_{\text{term}} = 0,5741 \cdot \left(\frac{\rho_l^{1,14} \cdot \mu_l^{0,38}}{(\rho_v \cdot h_{fg})^{0,97} \cdot k_l^{1,1}} \right)^{1/10}$	43,87 %	41,81 %
Prismático CCP	$R_{\text{term}} = 0,4724 \cdot \left(\frac{\mu_l^{1,18}}{\rho_l^{0,21} \cdot (\rho_v \cdot h_{fg})^{0,63} \cdot k_l^{0,2}} \right)^{1/10}$	65,83 %	64,50 %

Las diferencias son llamativas si se atiende a que el termosifón prismático SCP es el mismo que el CCP, con una única distinción, que este último presenta un dispositivo capaz de mantener más estable y controlado el calor a disipar, proveniente de la pastilla Peltier. La explicación radica precisamente en este último dispositivo de control de potencia: las observaciones para el termosifón CCP resultan mucho más estables, al evitar las fluctuaciones en la energía calorífica entregada por la pastilla Peltier que aparecían en el termosifón prismático SCP y que impedían una transferencia de calor en un verdadero régimen estacionario. Se puede concluir, por tanto, que este sistema de control permite obtener datos más homogéneos y fiables que mejoran y facilitan el estudio de regresión. Para llegar a esta conclusión basta con fijarse en los valores de los estadísticos R^2 y R^2_{ajustado} , mucho más elevados (del orden del 35%) en el termosifón prismático CCP.

7.4.3. Estudio de regresión para el conjunto de los termosifones

Se toma el conjunto de datos de todos los termosifones, los obtenidos en este capítulo y en el anexo VII, para su análisis de regresión a excepción del termosifón prismático de aluminio sin control de potencia (SCP). Se prescinde de este termosifón debido a los motivos expuestos en el párrafo anterior. Los datos del termosifón prismático con control de potencia concuerdan mejor con los de los otros tres termosifones en los que la fuente de calor la constituyen resistencias eléctricas. Así pues, este estudio global registra las observaciones de cuatro termosifones: t. acero pequeño, t. cobre, t. acero grande y el ya citado t. aluminio prismático CCP, los cuales trabajan con potencias térmicas constantes.

7.4.3.1. Regresión múltiple

A continuación se muestra la regresión lineal múltiple, de tipo clásico, que se ha realizado para el conjunto de datos de los cuatro termosifones señalados. Se procede de forma similar al apartado 7.4.1. Además, como ocurría con el estudio individual de los termosifones, debido a los problemas de multicolinealidad, hubo que descartar esta regresión y recurrir a la regresión ridge.

a) Datos estudiados

- Variable dependiente: R_{term} (resistencia térmica).
- Variables independientes: 1) Propiedades termofísicas: ρ_l , ρ_v , h_{fg} , c_{pl} , c_{pv} , μ_l , μ_v , k_l , k_v , σ y 2) Tipo termosifón: T. acero pequeño, T. cobre, T. acero grande, T. prismático CCP.

Se emplean las variables ficticias: C_1 , C_2 , C_3 , para incluir el tipo de termosifón en el estudio de regresión. Estas variables van a tomar los valores que se indican en la tabla siguiente.

Tabla 7.38: Valores que toman las variables ficticias.

TERMOSIFÓN	C_1	C_2	C_3	TERMOSIFÓN	Ln_{C_1}	Ln_{C_2}	Ln_{C_3}
Acero pequeño	e	1	1	Acero pequeño	1	0	0
Acero grande	1	e	1	Acero grande	0	1	0
Cobre	1	1	e	Cobre	0	0	1
Prismático CCP	1	1	1	Prismático CCP	0	0	0

En total son 13 variables independientes + 1 variable dependiente.

Las tablas se pasan a escala logarítmica para conseguir expresiones en forma de factores elevados a un exponente, en vez de en forma de sumandos polinómicos.

Análisis de correlaciones

a) Entre R_{term} y las variables explicativas

Se exponen las correlaciones de mayor magnitud entre la variable respuesta y las explicativas. Este análisis puede orientar en la determinación de qué variables deberían entrar en el modelo de regresión, ya que a priori presentan una mayor relación con R_{term} .

Tabla 7.39: Correlaciones entre R_{term} y las variables explicativas.

Variable	Correlación
ρ_l	0,1352
ρ_v	-0,2586
c_{pl}	-0,1192
c_{pv}	-0,1498
μ_l	0,3478
μ_v	-0,1393
k_v	-0,3243

b) Se aprecian fuertes correlaciones entre las variables explicativas. Se muestran, por resumir, aquellas que superan el 0,8.

Hay 10 correlaciones entre variables independientes por encima del 80%; estas son:

1) ρ_l - c_{pv} (-0,8531); 2) ρ_v - h_{fg} (-0,8388); 3) ρ_v - k_1 (-0,8761); 4) ρ_v - σ (-0,9149);

5) $h_{fg-c_{pl}}$ (0,8670); 6) h_{fg-k_1} (0,9466); 7) $h_{fg-\sigma}$ (0,8820); 8) $c_{pl-c_{pv}}$ (0,8750);

9) c_{pl-k_v} (0,8563); 10) $k_1-\sigma$ (0,9501);

Se observa un importante problema de multicolinealidad.

b) Elección del mejor conjunto de regresión

Se reduce el número de variables explicativas de forma que se eliminan aquellas con menor poder explicativo (las menos relevantes) y así se simplifica el modelo de regresión.

B.1. Criterio de mayor R^2 ajustada

B.2. Criterio de menor Cp de Mallows

Estos dos estudios se han realizado conjuntamente, ya que el análisis ha dado los mismos resultados indistintamente del criterio empleado.

A continuación se muestran las salidas de Statgraphics para este estudio.

Tabla 7.40: Elección del conjunto de regresión.

<u>Selección del Modelo de Regresión - ln Rterm</u>				
Variable dependiente: ln Rterm				
Variables independientes:				
A=ln dl				
B=ln dv				
C=ln hfg				
D=ln Cpl				
E=ln Cpv				
F=ln ul				
G=ln uv				
H=ln kl				
I=ln kv				
J=ln ts				
K=ln C1				
L=ln C2				
M=ln C3				
Modelos con Mayor R-Cuadrada Ajustada				
		<i>R-Cuadrada</i>		<i>Variables</i>
<i>CME</i>	<i>R-Cuadrada</i>	<i>Ajustada</i>	<i>Cp</i>	<i>Incluidas</i>
0,00608422	95,9006	95,8271	10,0401	DEFGHIJKLM
0,00611841	95,8776	95,8037	13,171	BDEFHIJKLM
0,00611854	95,8775	95,8036	13,1825	ADEFHIJKLM
0,00612556	95,8654	95,7988	12,8304	DEFHIJKLM
0,0061291	95,8704	95,7964	14,1491	CDEFHIJKLM
0,00615468	95,8531	95,7788	16,4919	CDEFGHIKLM
0,00615958	95,8424	95,7755	15,9506	BDEHIJKLM
Modelos con Menor Cp				
		<i>R-Cuadrada</i>		<i>Variables</i>
<i>CME</i>	<i>R-Cuadrada</i>	<i>Ajustada</i>	<i>Cp</i>	<i>Incluidas</i>
0,00608422	95,9006	95,8271	10,0401	DEFGHIJKLM
0,00612556	95,8654	95,7988	12,8304	DEFHIJKLM
0,00611841	95,8776	95,8037	13,171	BDEFHIJKLM
0,00611854	95,8775	95,8036	13,1825	ADEFHIJKLM
0,0061291	95,8704	95,7964	14,1491	CDEFHIJKLM
0,00615958	95,8424	95,7755	15,9506	BDEHIJKLM
0,00615468	95,8531	95,7788	16,4919	CDEFGHIKLM

Las conclusiones de este estudio son:

- El mejor conjunto de regresión es aquel formado por las variables:

$$c_{pl}, c_{pv}, \mu_l, \mu_v, k_l, k_v, \sigma$$

además de las que identifican a los cuatro termosifones: C₁, C₂, C₃.

- Las variables más relevantes, a tener en cuenta para la regresión lineal, son las mismas que constituyen el considerado como mejor conjunto de regresión, pero añadiendo las variables ρ_l , ρ_v , y h_{fg} . Se incluyen “artificialmente” porque se sabe que son variables relevantes según la bibliografía consultada y porque, además, aparecen recogidas en los conjuntos de regresión que siguen en importancia al señalado (letras A, B y C).

$$\rho_l, \rho_v, h_{fg}, c_{pl}, c_{pv}, \mu_l, \mu_v, k_l, k_v, \sigma, C_1, C_2, C_3$$

Se puede apreciar que el conjunto final con el que se va a proceder a realizar la regresión múltiple son todas las variables termofísicas junto con las variables del tipo de termosifón.

B.3. Regresión paso a paso

Para aplicar este criterio se parte del conjunto señalado en el apartado anterior:

$$\rho_l, \rho_v, h_{fg}, c_{pl}, c_{pv}, \mu_l, \mu_v, k_l, k_v, \sigma, C_1, C_2, C_3$$

- Hacia adelante.
- Hacia atrás.

Al igual que pasaba antes con los criterios de selección del mejor conjunto de variables, estos dos métodos de regresión arrojan el mismo resultado y será el que se tomará como final de la regresión.

Se muestra a continuación la salida que ofrece Statgraphics para este análisis:

Tabla 7.41: Resultados de la regresión múltiple.

Regresión Múltiple - ln Rterm

Variable dependiente: ln Rterm
 Variables independientes:
 ln dl
 ln dv
 ln hfg
 ln Cpl
 ln Cpv
 ln ul
 ln uv
 ln kl
 ln kv
 ln ts
 ln C1
 ln C2
 ln C3

		<i>Error</i>		<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimación</i>	<i>Estándar</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>	
CONSTANTE	-1,14768	0,23239	-4,93858	0,0000	
ln Cpl	0,270588	0,0765166	3,53634	0,0004	
ln Cpv	-0,219606	0,0344325	-6,37788	0,0000	
ln ul	0,137989	0,0285251	4,83746	0,0000	
ln uv	-0,114093	0,052084	-2,19056	0,0289	
ln kl	-0,266501	0,0582432	-4,57566	0,0000	
ln kv	0,212785	0,0656011	3,24361	0,0013	
ln ts	0,166603	0,0568633	2,92989	0,0035	
ln C1	-0,383511	0,0106131	-36,1355	0,0000	
ln C2	-0,663124	0,00989979	-66,9836	0,0000	
ln C3	-1,15024	0,0152603	-75,3748	0,0000	

Análisis de Varianza

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo	79,4219	10	7,94219	1305,38	0,0000
Residuo	3,39499	558	0,00608422		
Total (Corr.)	82,8169	568			

R-cuadrada = 95,9006 por ciento
 R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 95,8271 por ciento
 Error estándar del est. = 0,0780014
 Error absoluto medio = 0,06254
 Estadístico Durbin-Watson = 2,25976 (P=0,0010)
 Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0,135229

El modelo corresponde a:

$$\ln R_{\text{term}} = -1,14768 + 0,270588 \cdot \ln c_{pl} - 0,219606 \cdot \ln c_{pv} + 0,137989 \cdot \ln \mu_l - 0,114093 \cdot \ln \mu_v - 0,266501 \cdot \ln k_l + 0,212785 \cdot \ln k_v + 0,166603 \cdot \ln \sigma - 0,383511 \cdot \ln C_1 - 0,663124 \cdot \ln C_2 - 1,15024 \cdot \ln C_3$$

Eliminando los logaritmos y redondeando los coeficientes, el modelo quedaría como se muestra a continuación:

$$R_{\text{term}} = 0,3174 \cdot (C_1^{0,384} \cdot C_2^{0,663} \cdot C_3^{1,15})^{-1} \left(\frac{c_{pl}^{2,71} \cdot \mu_l^{1,38} \cdot k_v^{2,13} \cdot \sigma^{1,67}}{c_{pv}^{2,20} \cdot \mu_v^{1,14} \cdot k_l^{2,67}} \right)^{1/10} \quad (7.9)$$

El modelo obtenido es estadísticamente relevante, tal y como indican los valores que arroja la pantalla de Statgraphics. Sin embargo, cabe destacar que se producen algunas incongruencias con la bibliografía consultada. De esta forma no parece lógico que se excluyan del modelo las densidades (ρ_l y ρ_v) y la entalpía de vaporización, h_{fg} , y que sí aparezcan el calor específico del vapor, c_{pv} , y la tensión superficial, σ , variables que no se recogen en ninguno de los modelos consultados en la bibliografía.

Esta distorsión en el modelo puede explicarse por las altas correlaciones que aparecen entre las variables independientes; esto es, la distorsión se debe a la presencia de multicolinealidad.

En la matriz de correlaciones calculada por Statgraphics pueden verse, resaltadas en rojo, las elevadas correlaciones entre algunas variables explicativas.

Tabla 7.42: Correlaciones entre variables explicativas.

Matriz de Correlación para las estimaciones de los coeficientes							
	In Cpl	In Cpv	In ul	In uv	In kl	In kv	In ts
In Cpl	1,0000	-0,5325	-0,4634	0,7720	-0,8531	-0,7361	0,6568
In Cpv	-0,5325	1,0000	0,7973	-0,1383	0,6615	-0,0545	-0,7782
In ul	-0,4634	0,7973	1,0000	-0,3747	0,6572	0,1192	-0,8272
In uv	0,7720	-0,1383	-0,3747	1,0000	-0,6649	-0,7759	0,4734
In kl	-0,8531	0,6615	0,6572	-0,6649	1,0000	0,4281	-0,9266
In kv	-0,7361	-0,0545	0,1192	-0,7759	0,4281	1,0000	-0,1905
In ts	0,6568	-0,7782	-0,8272	0,4734	-0,9266	-0,1905	1,0000

La multicolinealidad desdibuja la verdadera influencia de las variables predictoras sobre la variable respuesta y, por tanto, puede dar lugar a conjuntos de regresión que, si bien parecen ser los más adecuados, llevarían a interpretaciones y conclusiones erróneas.

Habiendo presentado estos dos argumentos, el termofísico (falta de coherencia con la teoría aceptada por la comunidad científica) y el estadístico (presencia de multicolinealidad), se rechaza el modelo resultante obtenido con la regresión.

7.4.3.2. Regresión múltiple con las variables termofísicamente relevantes

A la vista de la que la regresión lineal basada únicamente en criterios estadísticos, no ofrece resultados válidos, se procede a realizar una regresión múltiple que, con base en criterios estadísticos, tenga presente en mayor medida los fundamentos de la transferencia de calor

Se vuelven a introducir en el modelo todas las variables independientes en estudio:

$$\rho_l, \rho_v, h_{fg}, c_{pl}, c_{pv}, \mu_l, \mu_v, k_l, k_v, \sigma, C_1, C_2, C_3$$

Debido a que la multicolinealidad invalida los contrastes habituales que permiten inferir qué variables son las más influyentes, los criterios de salida y entrada de las variables se van a fundamentar en:

- a) Correlaciones entre variables explicativas: se eliminarán aquellas variables que estén fuertemente correladas y que no discrepen con los dos siguientes criterios.
- b) Las variables consideradas como termofísicamente relevantes, según las teorías científicas aceptadas en la bibliografía consultada, son:

$$\rho_l, \rho_v, h_{fg}, c_{pl}, \mu_l, k_l$$

- c) Variaciones en R^2 , $R^2_{ajustada}$ y el Error Absoluto Medio (EAM): servirán para saber cómo de acertada es la entrada y salida de una variable.

A continuación se expone de forma somera el proceso de eliminación de variables partiendo del modelo de regresión que las incluye a todas

- 1) Primera eliminación: μ_v

Presenta fuertes correlaciones con 4 variables independientes. No es una variable muy a tener en cuenta para los fenómenos de cambio de fase en termosifones.

Tabla 7.43: Correlaciones entre μ_v y las demás variables explicativas

Correlaciones	ln uv
ln dl	-0,6726
ln dv	-0,6817
ln hfg	-0,6540
ln Cpl	-0,1464
ln Cpv	-0,2167
ln ul	-0,6250
ln uv	1,0000
ln kl	-0,2070
ln kv	-0,1460
ln ts	0,3985

2) Segunda eliminación: k_v

Presenta fuertes correlaciones con 2 variables independientes que son del grupo de las relevantes. Además, no se trata de una variable de relevancia, ya que el vapor se mueve a velocidades elevadas dentro del termosifón, por lo que la transferencia de calor tiene lugar simultáneamente a la transferencia de masa (convección); la conductividad del vapor, por tanto, no debería presentar un papel significativo.

Tabla 7.44: Correlaciones entre μ_v y las demás variables explicativas

Correlaciones	ln kv
ln dl	-0,5930
ln dv	-0,4987
ln hfg	-0,3375
ln Cpl	-0,7849
ln Cpv	-0,2295
ln ul	-0,2916
ln kl	0,3990
ln kv	1,0000
ln ts	-0,0429

3) Tercera eliminación: c_{pv}

Muestra correlaciones de consideración con 3 variables independientes. Tampoco se trata de una de las variables que se han tomado como relevantes en la bibliografía científica consultada.

Tabla 7.45: Correlaciones entre c_{pv} y las demás variables explicativas.

Correlaciones	ln Cpv
ln dl	0,2472
ln dv	-0,4097
ln hfg	-0,2329
ln Cpl	-0,7334
ln Cpv	1,0000
ln ul	0,2283
ln kl	0,6663
ln ts	-0,7799

4) Cuarta eliminación: σ

Presenta fuertes correlaciones con 2 variables independientes importantes. No se trata tampoco de una variable imprescindible para la construcción del modelo; sí que sería una propiedad relevante si se estuviese trabajando con tubos de calor donde la vuelta del líquido al evaporador tiene lugar por capilaridad; sin embargo, en los termosifones este retorno se debe únicamente a la fuerza de la gravedad.

Tabla 7.46: Correlaciones entre σ y las demás variables explicativas.

Correlaciones	ln ts
ln dl	0,1619
ln dv	0,2823
ln hfg	-0,2197
ln Cpl	0,5087
ln ul	-0,0441
ln kl	-0,6142
ln ts	1,0000

5) Modificación del conjunto final de variables: introducción de la variable $(\rho_v \cdot h_{fg})$

Con esta variable se reducen las correlaciones entre regresores (ρ_v presenta correlaciones de relevancia con ρ_1 y μ_1 , mientras que h_{fg} las tiene con k_1 como se indica en la tabla siguiente) y mejora, aunque muy ligeramente, el valor de $R^2_{ajustada}$.

Tabla 7.47: Correlaciones entre ρ_v y h_{fg} y las demás variables explicativas.

Correlaciones	ln dv	ln hfg
ln dl	-0,5808	0,4698
ln dv	1,0000	-0,0630
ln hfg	-0,0630	1,0000
ln Cpl	0,3264	-0,0546
ln ul	0,8755	-0,2243
ln kl	0,4045	-0,7630

Tras el proceso de eliminación - modificación, el conjunto final de variables resulta ser:

$$\rho_l, (\rho_v \cdot h_{fg}), c_{pl}, \mu_l, k_l$$

Validación del modelo

A continuación se muestra la salida de Statgraphics con los valores de los principales estadísticos que son testigo de la bondad del modelo.

Tabla 7.48: Resultado de la regresión.

Regresión Múltiple - ln Rterm					
Variable dependiente: ln Rterm					
Variables independientes:					
ln dl					
ln D					
ln Cpl					
ln ul					
ln kl					
ln C1					
ln C2					
ln C3					
<i>Parámetro</i>	<i>Estimación</i>	<i>Error Estándar</i>	<i>Estadístico T</i>	<i>Valor-P</i>	
CONSTANTE	-1,51548	0,195493	-7,75209	0,0000	
ln dl	0,0944462	0,0323401	2,9204	0,0036	
ln D	-0,0220566	0,011092	-1,98852	0,0472	
ln Cpl	0,242589	0,0369784	6,56028	0,0000	
ln ul	0,181418	0,0294233	6,16579	0,0000	
ln kl	-0,186056	0,0180485	-10,3086	0,0000	
ln C1	-0,36485	0,0109252	-33,3952	0,0000	
ln C2	-0,64929	0,010469	-62,0205	0,0000	
ln C3	-1,10672	0,0130783	-84,6227	0,0000	
Análisis de Varianza					
<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo	79,1536	8	9,8942	1512,50	0,0000
Residuo	3,66331	560	0,00654162		
Total (Corr.)	82,8169	568			
R-cuadrada = 95,5766 por ciento					
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 95,5134 por ciento					
Error estándar del est. = 0,0808803					
Error absoluto medio = 0,0639227					
Estadístico Durbin-Watson = 2,23311 (P= 0,0027)					
Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0,12073					

a) Pruebas individuales de los coeficientes de regresión.

Aunque la multicolinealidad, que sigue presente también en este modelo, impide fiarse completamente de los contrastes estadísticos aquí se van a tener en cuenta como medida orientativa de la bondad del ajuste. No se observa ningún valor superior al 0,05 que se toma como referencia para el estadístico p-valor. El máximo valor que aparece es de 0,0472 y corresponde a la variable $D = (\rho_v \cdot h_{fg})$.

b) ANOVA del modelo (análisis de varianza).

El p-valor del modelo es de 0,000, lo que señala que existe una relación estadísticamente significativa entre el conjunto de variables explicativas que constituyen el modelo de regresión y la variable respuesta.

c) Estadísticos para la bondad del ajuste de regresión.

A la vista de estos estadísticos puede afirmarse que el modelo de regresión resulta válido si se atiende al análisis de varianza realizado y a los estadísticos que se exponen a continuación. Se tiene:

- $R^2 = 95,5766 \%$;
- $R^2_{ajustada} = 95,5134 \%$;
- Error absoluto medio = 0,0639227 ;

Tras analizar los parámetros que marcan lo bueno o malo del ajuste se presenta el modelo de regresión:

$$\ln R_{\text{term}} = -1,51548 + 0,0944462 \cdot \ln \rho_l - 0,0220566 \cdot \ln (\rho_v \cdot h_{fg}) + 0,242589 \cdot \ln c_{pl} + 0,181418 \cdot \ln \mu_l - 0,186056 \cdot \ln k_l - 0,36485 \cdot \ln C_1 - 0,64929 \cdot \ln C_2 - 1,10672 \cdot \ln C_3$$

Eliminando los logaritmos y redondeando los coeficientes, el modelo quedaría:

$$R_{\text{term}} = 0,2197 \cdot (C_1^{0,365} \cdot C_2^{0,649} \cdot C_3^{1,107})^{-1} \cdot \left(\frac{\rho_l^{0,94} \cdot c_{pl}^{2,43}}{(\rho_v \cdot h_{fg})^{0,22} \cdot \mu_l^{1,81} \cdot k_l^{1,86}} \right)^{1/10} \quad (7.10)$$

El modelo obtenido presenta una incongruencia notable con la teoría termofísica. La viscosidad del líquido (μ_l) se encuentra en el denominador. Esta propiedad entorpece la

vuelta del líquido desde el condensador al evaporador, ya que éste regresa resbalando por la cara interna del termosifón. Al dificultar el movimiento del líquido, la viscosidad debería situarse en el numerador aumentando el valor de la resistencia térmica.

Esta distorsión en el modelo puede explicarse por las altas correlaciones que se mantienen entre las variables independientes que estarían señalando un problema de multicolinealidad.

La tabla que se muestra a continuación indica estas correlaciones resaltando en rojo aquellas que superan en valor absoluto 0,5.

Se mantienen algunas correlaciones fuertes entre las variables independientes, tal y como se puede apreciar en la tabla siguiente (las que presentan un valor superior a 0,5 aparecen resaltadas en rojo).

Tabla 7.49: Matriz de Correlación para las estimaciones de los coeficientes.

	ln dl	ln D	ln Cpl	ln ul	ln kl
ln dl	1,0000	-0,3323	0,5548	-0,5510	-0,3998
ln D	-0,3323	1,0000	0,2584	0,8142	-0,1345
ln Cpl	0,5548	0,2584	1,0000	0,2854	-0,9080
ln ul	-0,5510	0,8142	0,2854	1,0000	-0,3205
ln kl	-0,3998	-0,1345	-0,9080	-0,3205	1,0000

Otra manera de detectar la multicolinealidad es mediante el uso del factor de inflación de varianza VIF. La multicolinealidad es severa cuando $VIF > 30$ e importante cuando $VIF > 10$. Statgraphics ofrece estos valores y, como puede verse en la tabla siguiente, la multicolinealidad es ciertamente relevante. Debido a esto se realiza a continuación la regresión ridge.

Tabla 7.50: Factores de Inflación de Varianza.

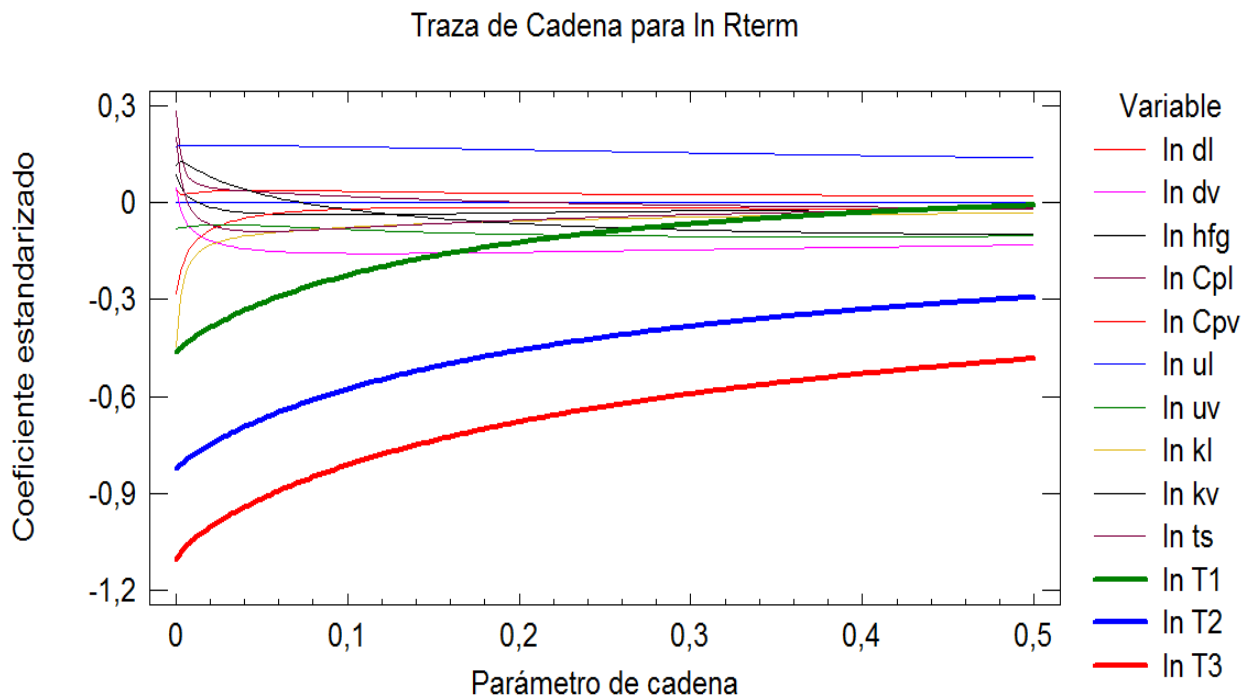
ln dl	ln D	ln Cpl	ln ul	ln kl
8,84022	6,43272	15,7707	13,488	9,75401

7.4.3.3. Regresión ridge

A continuación se va a detallar el proceso que se ha seguido para llevar a cabo la regresión ridge para el conjunto de todos los termosifones.

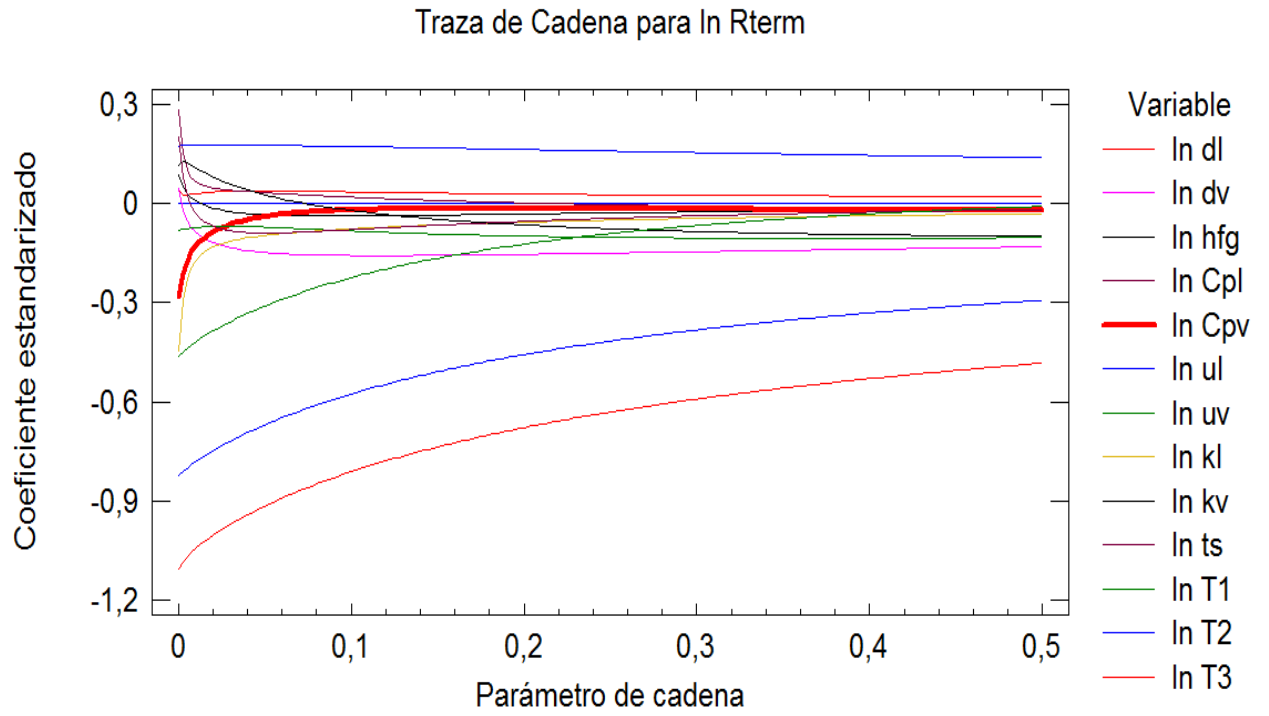
a) Selección de las variables mediante la curva ridge

Se parte de un modelo que incluye a todas las variables regresoras. Con la curva ridge presente se siguen las directrices de selección de variables expuestas anteriormente sin olvidar, claro está, los criterios termofísicos para evitar que salga un conjunto de variables poco coherente. De esta forma se tiene:



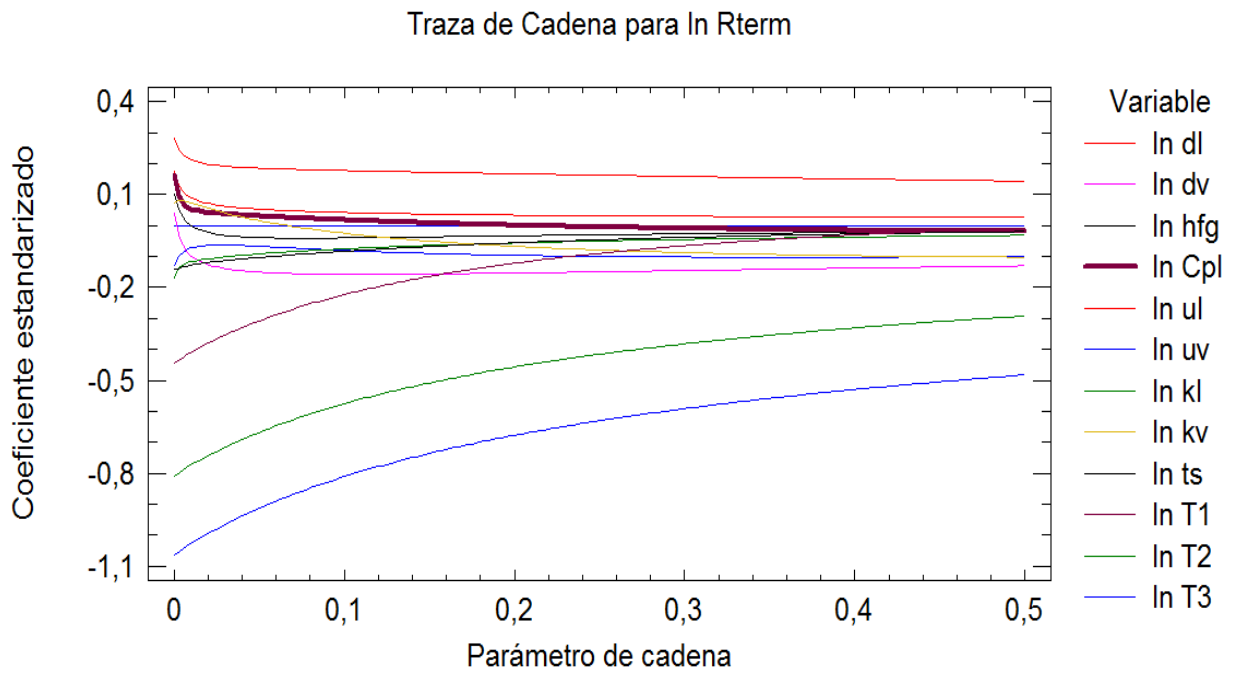
Gráfica 7.48: Curva ridge para el conjunto de los termosifones.

De esta primera gráfica son de reseñar las trazas de las variables que caracterizan a los cuatro termosifones (C_1 , C_2 y C_3 ; en la gráfica se representan por T_1 , T_2 y T_3). Corresponden a las tres líneas paralelas inferiores (roja, azul y verde). Parecen ser las variables que más tardan en estabilizarse, sin embargo su variación no es especialmente brusca y son fundamentales para explicar las diferencias de funcionamiento entre los distintos termosifones; por tanto, no se excluirán del modelo en ninguno de los pasos de selección de variables que siguen.



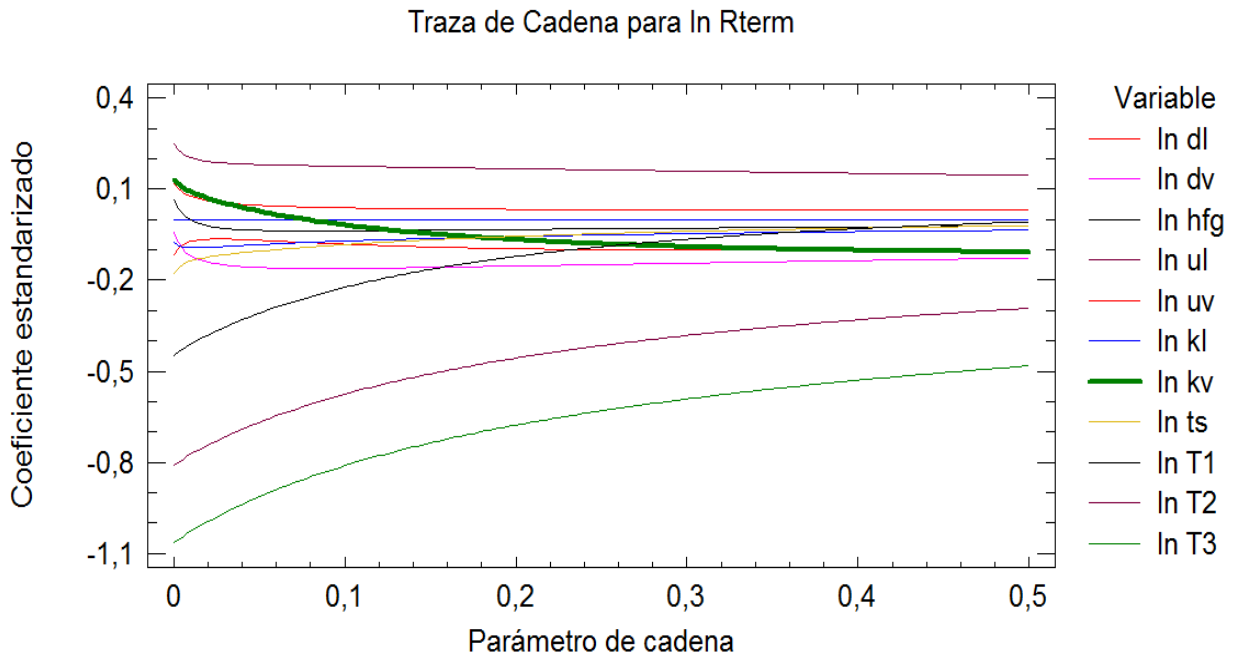
Gráfica 7.49: Curva ridge para el conjunto de los termosifones.

Primeramente se elimina c_{pv} ($\ln c_{pv}$) que, como se puede apreciar (línea roja más gruesa), tiende rápidamente a anularse.



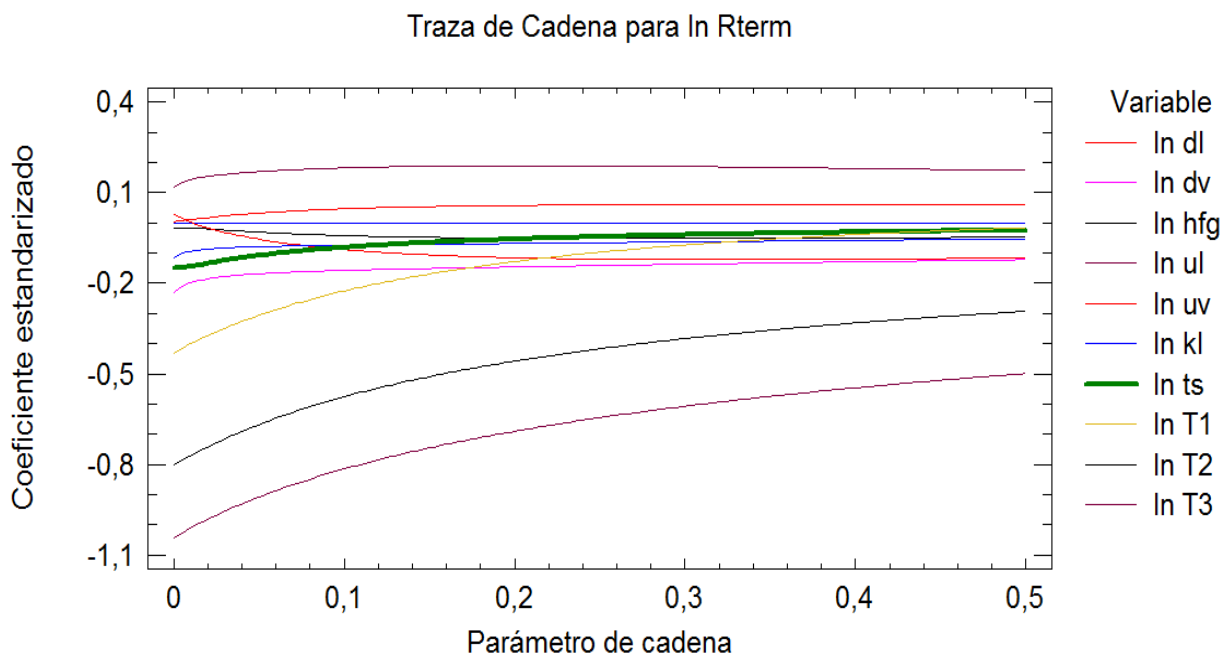
Gráfica 7.50: Curva ridge para el conjunto de los termosifones.

La siguiente variable en salir del modelo es c_{pl} ($\ln c_{pl}$, línea granate más gruesa). Es la que parece tender más rápidamente a cero.



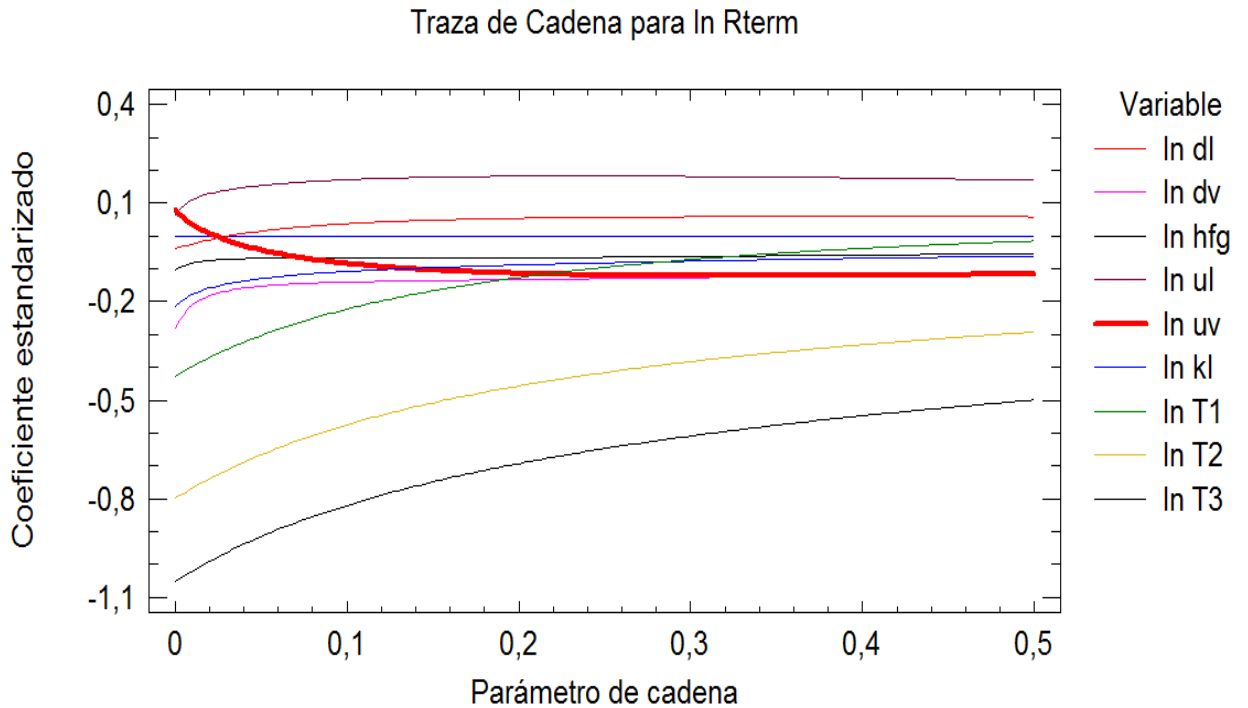
Gráfica 7.51: Curva ridge para el conjunto de los termosifones.

A continuación se quita k_v ($\ln k_v$). Si se observa su traza (línea verde) puede apreciarse la inestabilidad de su valor que sigue disminuyendo mientras que el del resto de variables ya está medianamente estabilizado.



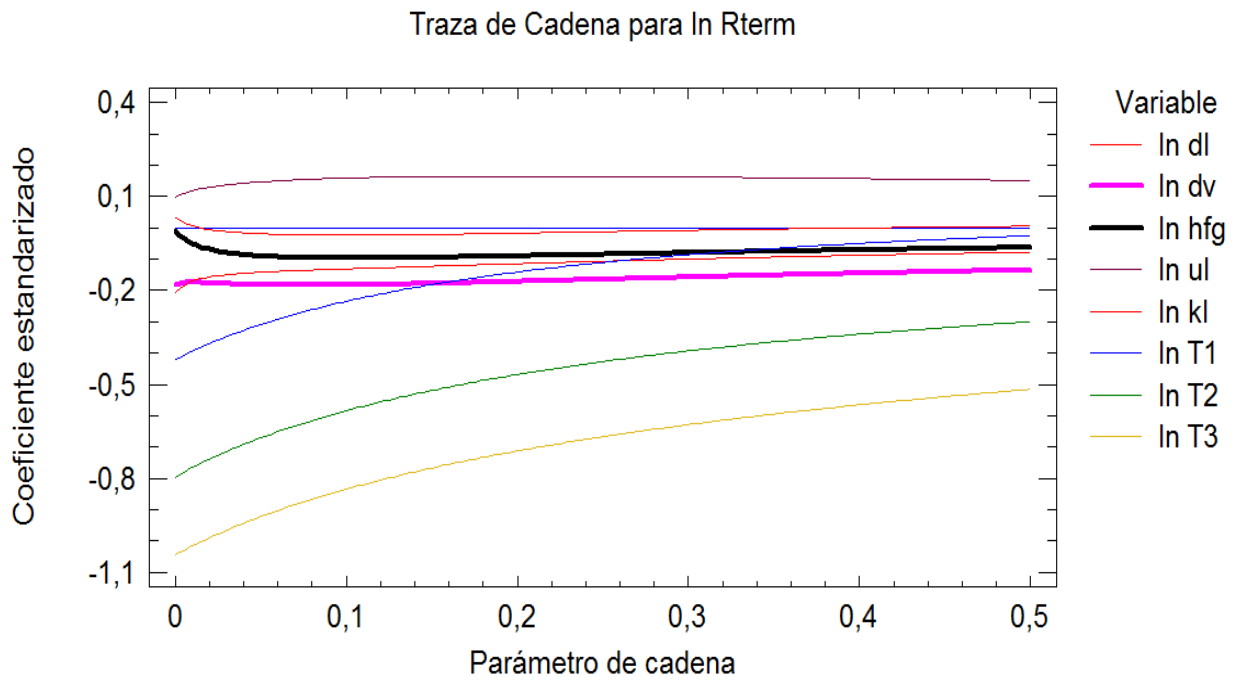
Gráfica 7.52: Curva ridge para el conjunto de los termosifones.

La siguiente variable en ser eliminada es σ (línea verde más gruesa). Su traza se anula rápidamente.



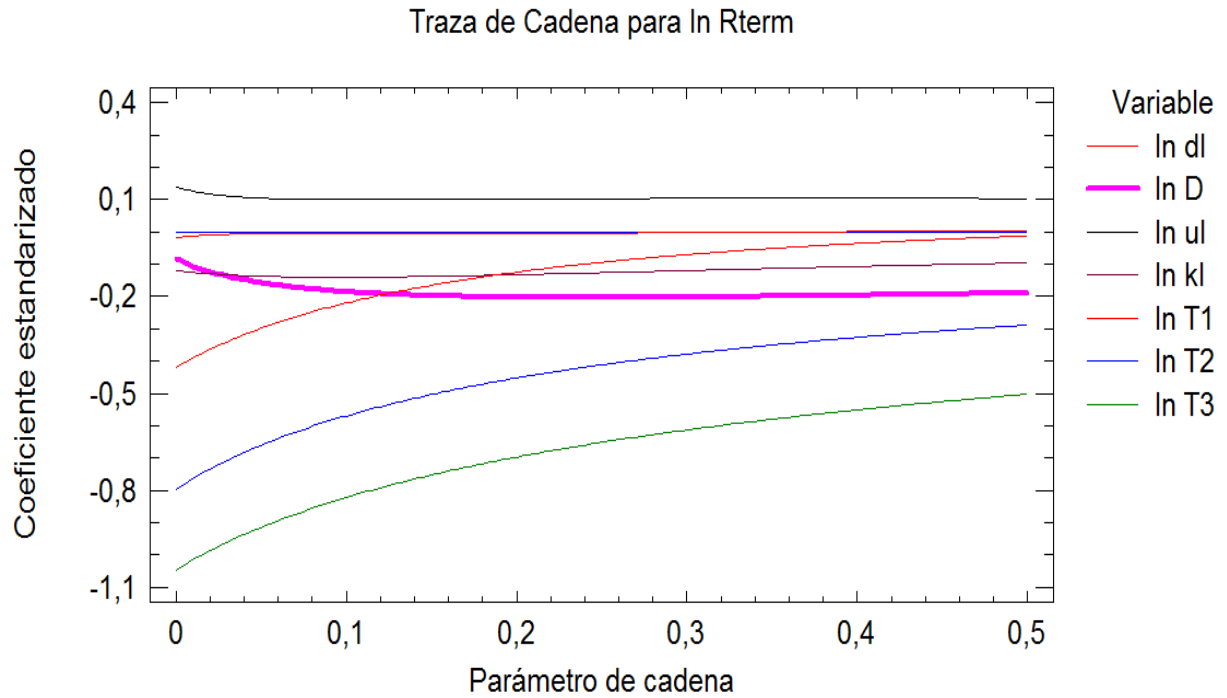
Gráfica 7.53: Curva ridge para el conjunto de los termosifones.

Se suprime del modelo la variable μ_v que, además de ser poco relevante desde el punto de vista termofísico, es la variable más inestable de las que quedan en el modelo, la que más tarda en alcanzar la estabilidad.



Gráfica 7.54: Curva ridge para el conjunto de los termosifones.

Todas las trazas parecen ser bastante estables. Sólo cabe indicar que las trazas de ρ_v y h_{fg} (líneas negra y rosa respectivamente) son prácticamente paralelas. Ante esto, y tal y como se ha hecho en casos anteriores, se combinan ambas variables ($D = \rho_v \cdot h_{fg}$). El resultado es el de unas trazas más estables si cabe:



Gráfica 7.55: Curva ridge para el conjunto de los termosifones.

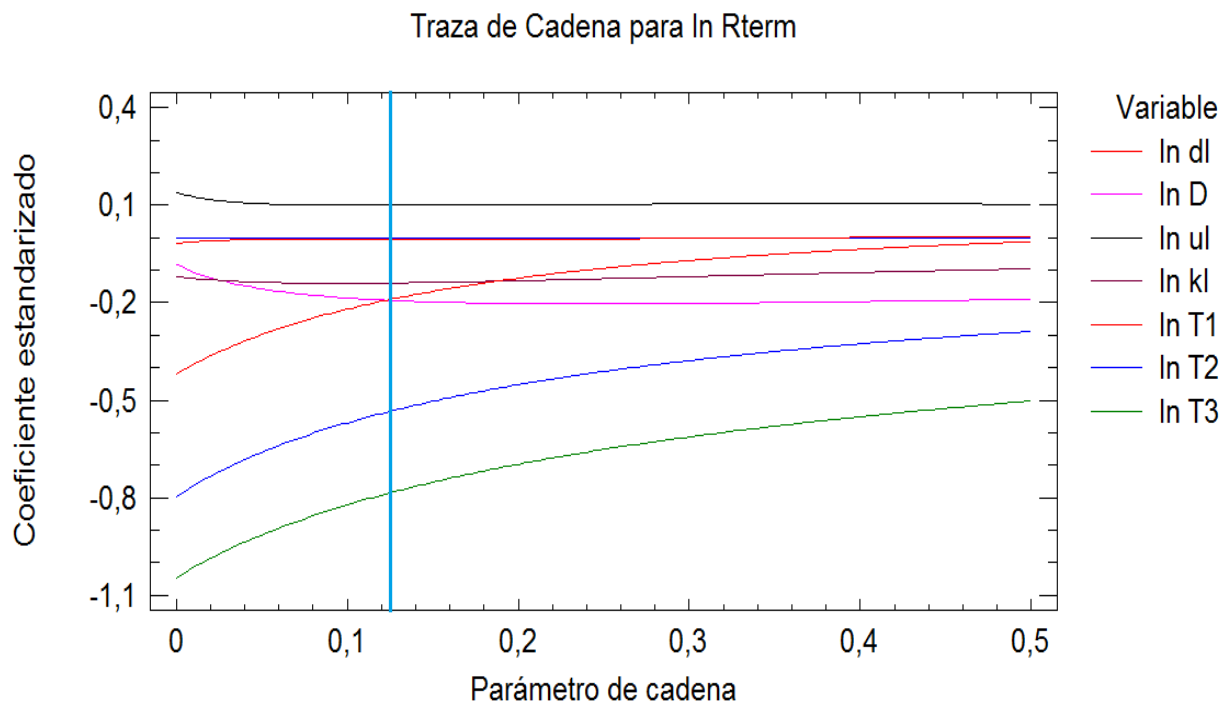
De esta última gráfica habría que destacar que la variable ρ_l (ln dl), no presenta a penas relevancia; su traza (línea roja "pegada" a la línea azul que marca el cero) presenta valores muy pequeños que indicarían que es una variable candidata a abandonar el modelo; sin embargo no se elimina ya que ha aparecido en las regresiones ridge anteriores y mantenerla facilita la comparación entre este modelo general y los modelos particulares de cada termosifón.

Puede concluirse, por tanto, que el conjunto final de variables para el modelo de regresión será el siguiente:

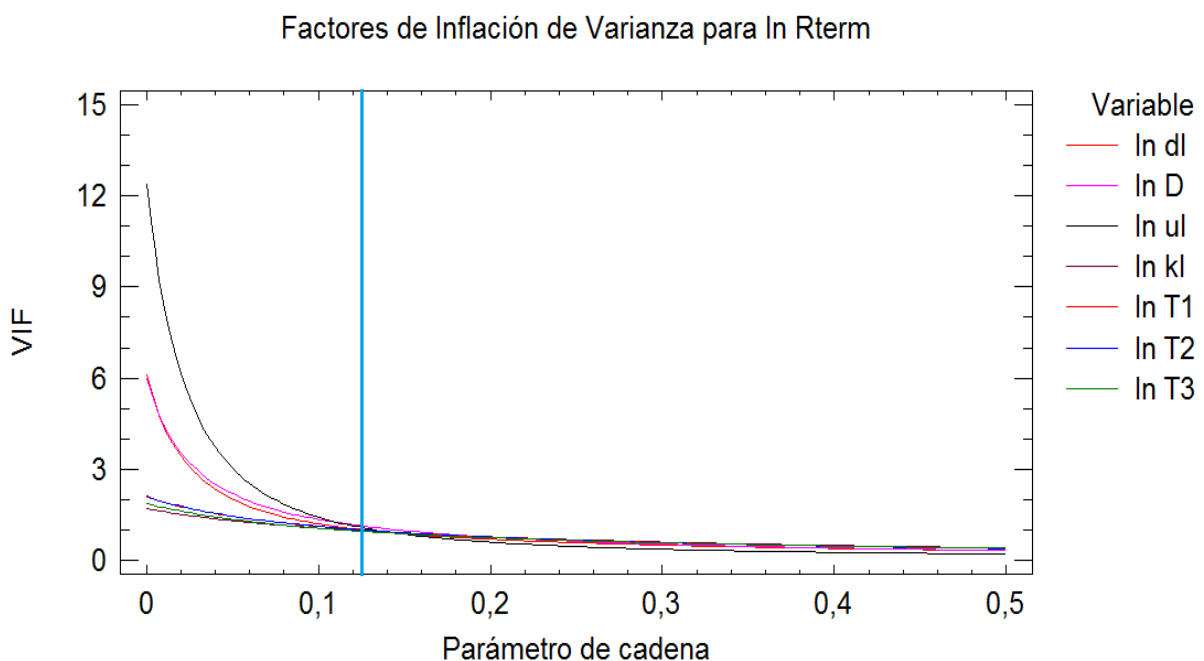
$$\rho_l, (\rho_v \cdot h_{fg}), \mu_l, k_l, C_1, C_2, C_3$$

b) Selección del parámetro de cadena

Analizando las gráficas que se presentan a continuación podrá elegirse un parámetro de cadena (o parámetro ridge) que disipe la multicolinealidad en gran medida, pero que a su vez no reduzca demasiado el poder explicativo del modelo. Es decir, que al aumentar el valor del parámetro de cadena disminuyen los valores de R^2 y de $R^2_{ajustada}$.



Gráfica 7.56: Parámetro de cadena para el conjunto de los termosifones.



Gráfica 7.57: VIF para el conjunto de los termosifones.

Se ha tomado como parámetro de cadena 0,125, ya que es el valor más bajo en el que los coeficientes están medianamente estabilizados y el valor de VIF es razonablemente pequeño (en torno a 1). Esto último puede apreciarse de forma más clara en la tabla siguiente.

Tabla 7.51: Factores de Inflación de Varianza.

Parámetro de Cadena	ln dl	ln D	ln ul	ln kl	ln C1	ln C2	ln C3	R-Cuadrada
0,125	1,0187	1,14085	1,08621	0,981051	1,0124	1,01304	0,966939	78,06

c) Validación del modelo

A continuación se muestra la salida de Statgraphics.

El estadístico R^2 indica que el modelo, así ajustado, explica el 78,0636 % de la variabilidad de R_{term} . El estadístico $R^2_{ajustada}$ es 77,7899 %. El error estándar de estimación muestra que la desviación estándar de los residuos es 0,117616. El error absoluto medio (MAE) de 0,0927565 es el valor promedio de los residuos.

Tabla 7.52: Resultados de la regresión ridge.

Regresión en Cadena - ln Rterm		
Variable dependiente: ln Rterm		
Variables independientes:		
ln dl		
ln D		
ln ul		
ln kl		
ln C1		
ln C2		
ln C3		
Número de casos completos: 569		
Resultados del Modelo para el Parámetro de Cadena = 0,125		
		<i>Factor de Inflación de Varianza</i>
<i>Parámetro</i>	<i>Estimado</i>	<i>Varianza</i>
CONSTANTE	-0,255114	
ln dl	-0,00775799	1,0187
ln D	-0,0950138	1,14085
ln ul	0,0905379	1,08621
ln kl	-0,0906713	0,981051
ln C1	-0,159243	1,0124
ln C2	-0,430994	1,01304
ln C3	-0,81384	0,966939
R-Cuadrada = 78,0636 por ciento R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 77,7899 por ciento Error estándar del est. = 0,117616 Error medio absoluto = 0,0927565 Estadístico Durbin-Watson = 1,10791 (P=0,0000) Autocorrelación residual de retardo 1 = 0,437649		
Análisis de Residuos		
	<i>Estimación</i>	<i>Validación</i>
n	569	
CME	0,0138334	
MAE	0,0927565	
MAPE		
ME	-3,42237E-16	
MPE		

El modelo de regresión resultante es:

$$\ln R_{term} = -0,255114 - 0,00775799 \cdot \ln \rho_1 - 0,0950138 \cdot \ln (\rho_v \cdot h_{fg}) + 0,0905379 \cdot \ln \mu_1 - 0,0906713 \cdot \ln k_1 - 0,159243 \cdot \ln C_1 - 0,430994 \cdot \ln C_2 - 0,81384 \cdot \ln C_3$$

Quitando los logaritmos y redondeando los coeficientes, el modelo quedaría:

$$R_{\text{term}} = 0,7748 \cdot (C_1^{0,159} \cdot C_2^{0,431} \cdot C_3^{0,814})^{-1} \cdot \left(\frac{\mu_l^{0,91}}{\rho_l^{0,08} \cdot (\rho_v \cdot h_{fg})^{0,95} \cdot k_l^{0,91}} \right)^{1/10} \quad (7.11)$$

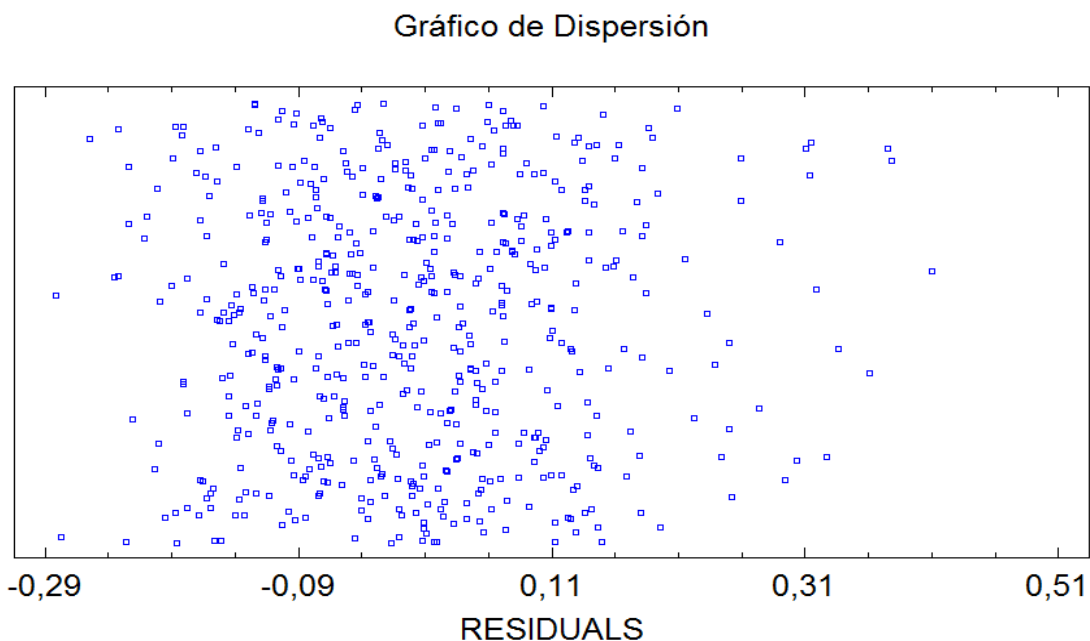
Hay que resaltar que éste no va a ser el resultado final de la regresión ya que, como se verá en el apartado siguiente, los residuos no siguen una distribución normal y habrá que eliminar alguna observación para que esto se cumpla. Al hacer estos cambios el modelo va a variar, no en las variables que lo van a integrar (las trazas ridge son muy similares y por tanto el proceso de selección de variables permanece igual), pero sí en el valor del parámetro de cadena y, por tanto, en el valor de los coeficientes (exponentes).

d) Diagnósis del modelo

A continuación se presentan los estadísticos y gráficas que indicarán si el modelo es adecuado según los criterios estadísticos.

D.1. Residuales

a) Gráfico de dispersión.

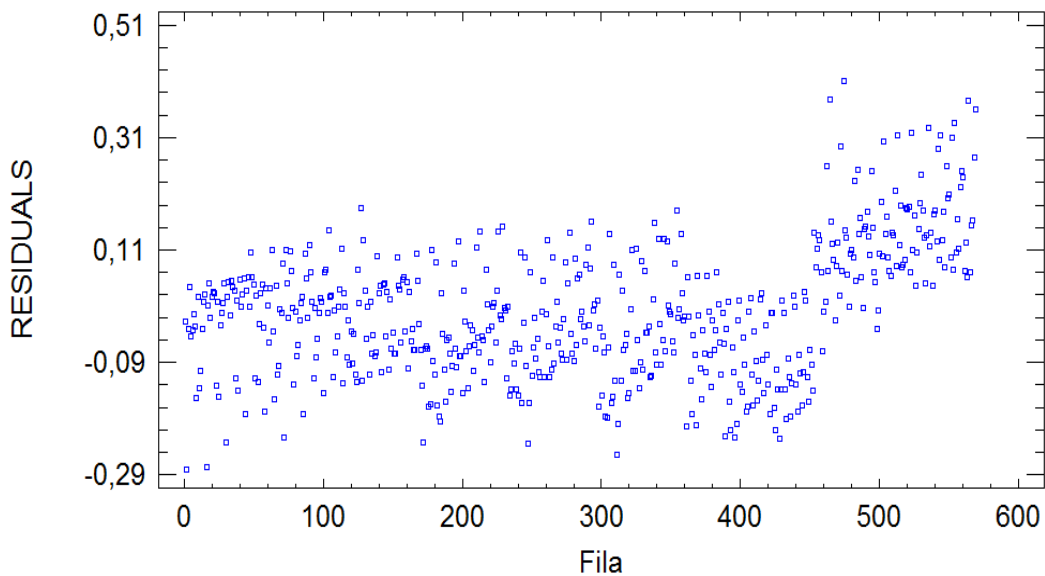


Gráfica 7.58: Dispersión para el conjunto de los termosifones.

Se observa algún conjunto de puntos a la derecha que se desmarcan de la nube de puntos principal. Como se observará más adelante, éstos corresponden a observaciones que impiden tener una distribución normal en los residuos y que, por tanto, serán eliminadas.

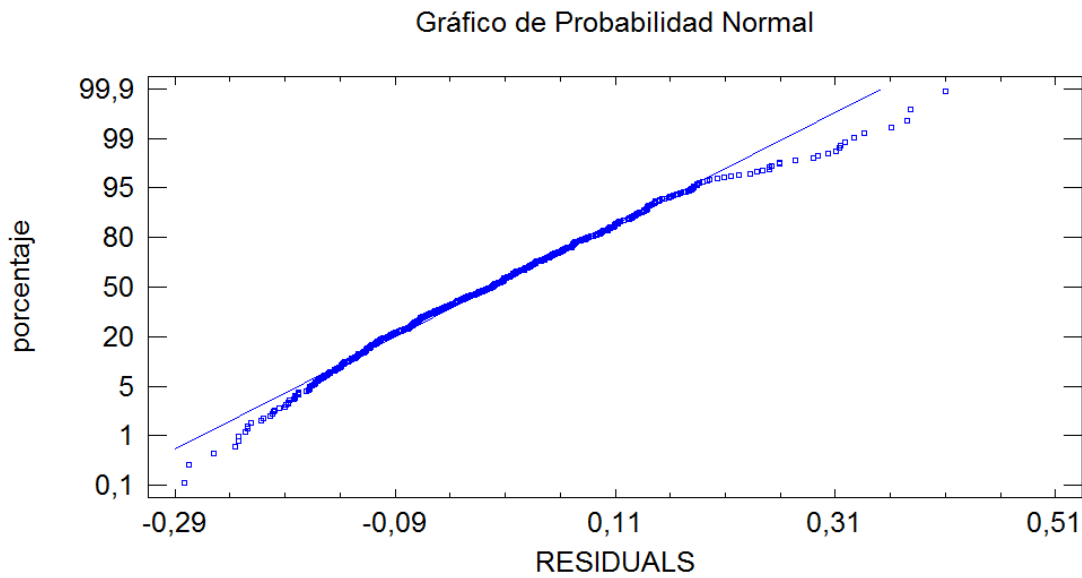
Sí que parece haber tendencias bastante claras en la distribución de residuos, esto es, les influye el orden en que se han introducido los datos. Como ejemplo claro de esto, está la nube de puntos situada más a la derecha correspondiente a los residuos del termosifón prismático de aluminio (CCP). La influencia del orden de introducción de los datos en la distribución de los residuos queda corroborada por el estadístico Durbin-Watson = 1,10791 que se encuentra alejado del valor 2 y presenta un p-valor de 0,0000, indicando que no hay aleatoriedad entre los residuos y el orden en que se han introducido las observaciones para el análisis. Esto mejoraría tan solo con introducir los datos siguiendo otro orden, cosa que no modificaría, en absoluto, el análisis realizado, únicamente el valor de este estimador.

Gráfico Secuencias Cronológicas



Gráfica 7.59: Secuencias cronológicas para el conjunto de los termosifones.

c) Percentiles de la distribución normal –QQ-norms.



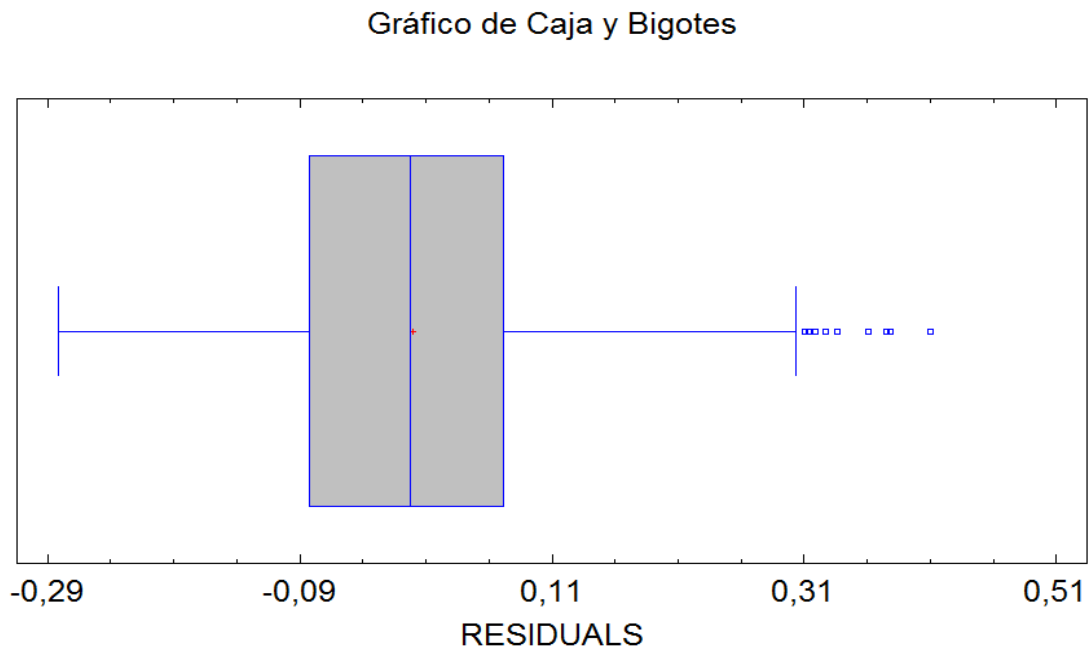
Gráfica 7.60: Distribución normal para el conjunto de los termosifones.

Los residuos presentan desviaciones notables respecto de la distribución normal; los puntos situados más a la derecha del gráfico se separan claramente de la diagonal. Esto también puede comprobarse atendiendo a los valores que arrojan el sesgo estandarizado y la curtosis; el primero se aleja bastante del intervalo $(-2, 2)$ indicado para la normalidad; se concluye por tanto que hay desviaciones significativas con respecto a la distribución normal.

Tabla 7.53: Validación del supuesto de distribución normal.

Sesgo Estandarizado	4,49129
Curtosis Estandarizada	1,64617

d) Gráfico de caja y bigotes.



Gráfica 7.61: Gráfico de caja y bigotes para el conjunto de los termosifones.

Para que la hipótesis de normalidad vuelva a ser válida se va a proceder a eliminar las observaciones cuyos residuos se desvían de esta suposición (constituyen residuos atípicos). Son los puntos marcados en el gráfico de caja y bigotes anterior, y corresponden a las siguientes 12 observaciones, todas ellas correspondientes al termosifón prismático de aluminio (CCP).

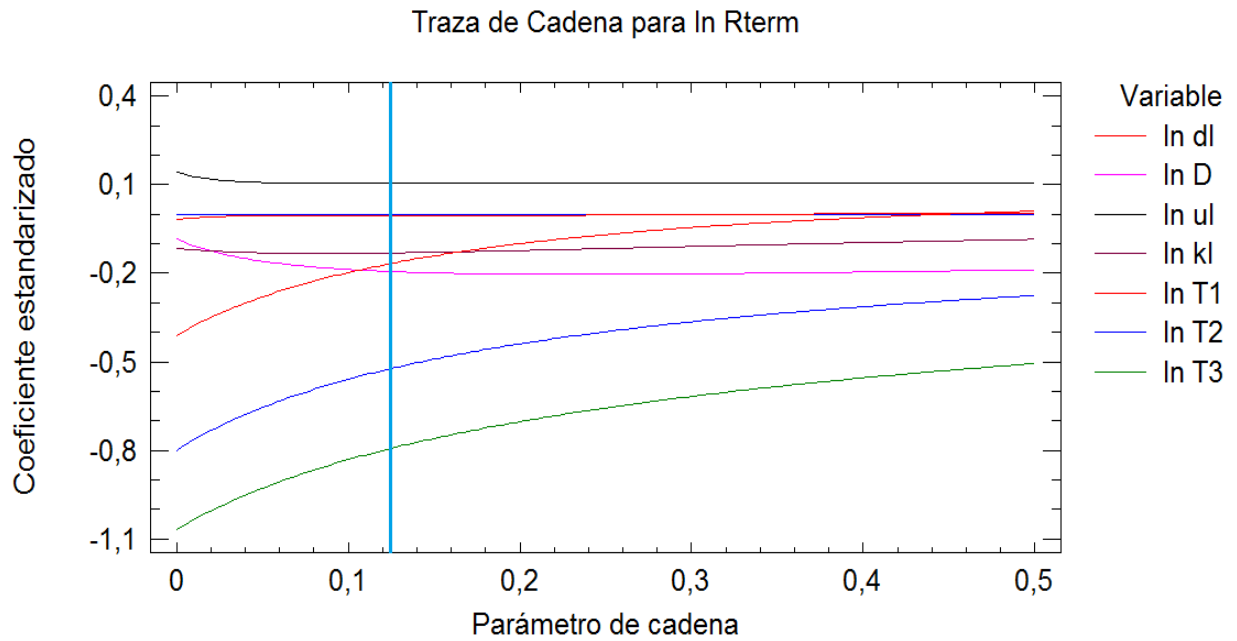
- Siete puntos del isopentano.
- Cuatro puntos del perfluoroheptano.
- Un punto de la mezcla azeotrópica dietil éter + metanoato de metilo.

Tras esta modificación, en la que el número de observaciones ha pasado de ser 569 a ser 557, hay que volver a definir el modelo.

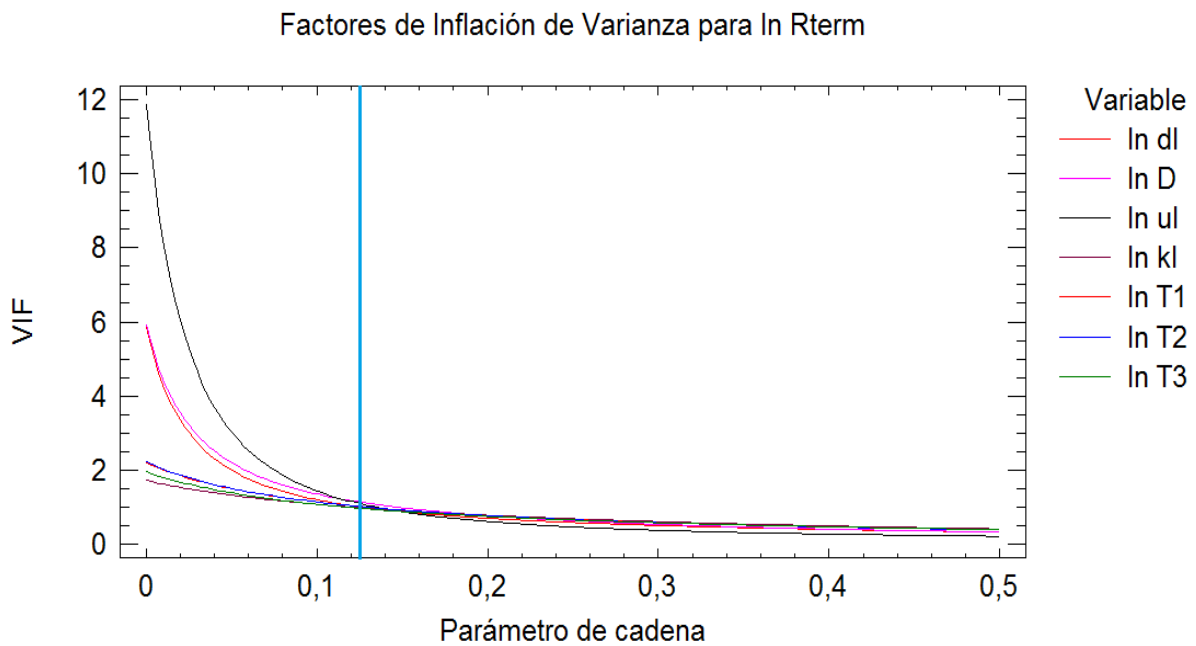
La traza ridge final no se ha modificado de forma relevante si se compara con la anterior, así que puede deducirse que el proceso de selección de variables sigue siendo válido y el conjunto final de variables corresponderá al mismo que se tenía previamente:

$$\rho_1, (\rho_v \cdot h_{fg}), \mu_1, k_1, C_1, C_2, C_3$$

El parámetro de cadena se sigue manteniendo también en 0,125.



Gráfica 7.62: Parámetro de cadena para el conjunto de los termosifones.



Gráfica 7.63: VIF para el conjunto de los termosifones.

Los criterios seguidos para tomar de nuevo un valor de 0,125 han sido los mismos que para el caso anterior: estabilidad de los coeficientes (las trazas son casi horizontales y/o varían muy lentamente) y valores para la inflación de varianza cercanos a 1.

Tabla 7.54: Factores de Inflación de Varianza.

Parámetro de Cadena	ln dl	ln D	ln ul	ln kl	ln C1	ln C2	ln C3	R-Cuadrada
0,125	1,0166	1,14401	1,10185	0,992428	1,02545	1,02603	0,975738	78,17

La pantalla de salida de Statgraphics para este nuevo modelo sería:

Tabla 7.55: Resultados de la regresión ridge.

<u>Regresión en Cadena - ln Rterm</u>																							
Variable dependiente: ln Rterm																							
Variables independientes:																							
ln dl																							
ln D																							
ln ul																							
ln kl																							
ln C1																							
ln C2																							
ln C3																							
Número de casos completos: 557																							
Resultados del Modelo para el Parámetro de Cadena = 0,125																							
		<i>Factor de Inflación de Varianza</i>																					
Parámetro	Estimado	Varianza																					
CONSTANTE	-0,355617																						
ln dl	-0,00648166	1,0166																					
ln D	-0,0925895	1,14401																					
ln ul	0,0917052	1,10185																					
ln kl	-0,0822112	0,992428																					
ln C1	-0,134441	1,02545																					
ln C2	-0,40666	1,02603																					
ln C3	-0,789392	0,975738																					
<p>R-Cuadrada = 78,1731 por ciento R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 77,8948 por ciento Error estándar del est. = 0,113896 Error medio absoluto = 0,0918972 Estadístico Durbin-Watson = 1,0474 (P=0,0000) Autocorrelación residual de retardo 1 = 0,469908</p> <p>Análisis de Residuos</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Estimación</th> <th>Validación</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>n</td> <td>557</td> <td></td> </tr> <tr> <td>CME</td> <td>0,0129723</td> <td></td> </tr> <tr> <td>MAE</td> <td>0,0918972</td> <td></td> </tr> <tr> <td>MAPE</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>ME</td> <td>-2,50946E-16</td> <td></td> </tr> <tr> <td>MPE</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>				Estimación	Validación	n	557		CME	0,0129723		MAE	0,0918972		MAPE			ME	-2,50946E-16		MPE		
	Estimación	Validación																					
n	557																						
CME	0,0129723																						
MAE	0,0918972																						
MAPE																							
ME	-2,50946E-16																						
MPE																							

El estadístico R^2 indica que el modelo, así ajustado, explica el 78,17% de la variabilidad de R_{term} . El estadístico $R^2_{ajustada}$ es 77,89%. El error estándar de estimación muestra que la desviación estándar de los residuos es 0,113896. El error absoluto medio (MAE) de 0,0918972 es el valor promedio de los residuos.

El modelo de regresión resultante es:

$$\ln R_{term} = -0,355617 - 0,00648166 \cdot \ln \rho_1 - 0,0925895 \cdot \ln (\rho_v \cdot h_{fg}) + 0,0917052 \cdot \ln \mu_1 - 0,08221123 \ln k_1 - 0,134441 \cdot \ln C_1 - 0,40666 \cdot \ln C_2 - 0,789392 \cdot \ln C_3$$

Eliminando los logaritmos y redondeando los coeficientes, el modelo, ahora ya sí el definitivo, quedaría como sigue:

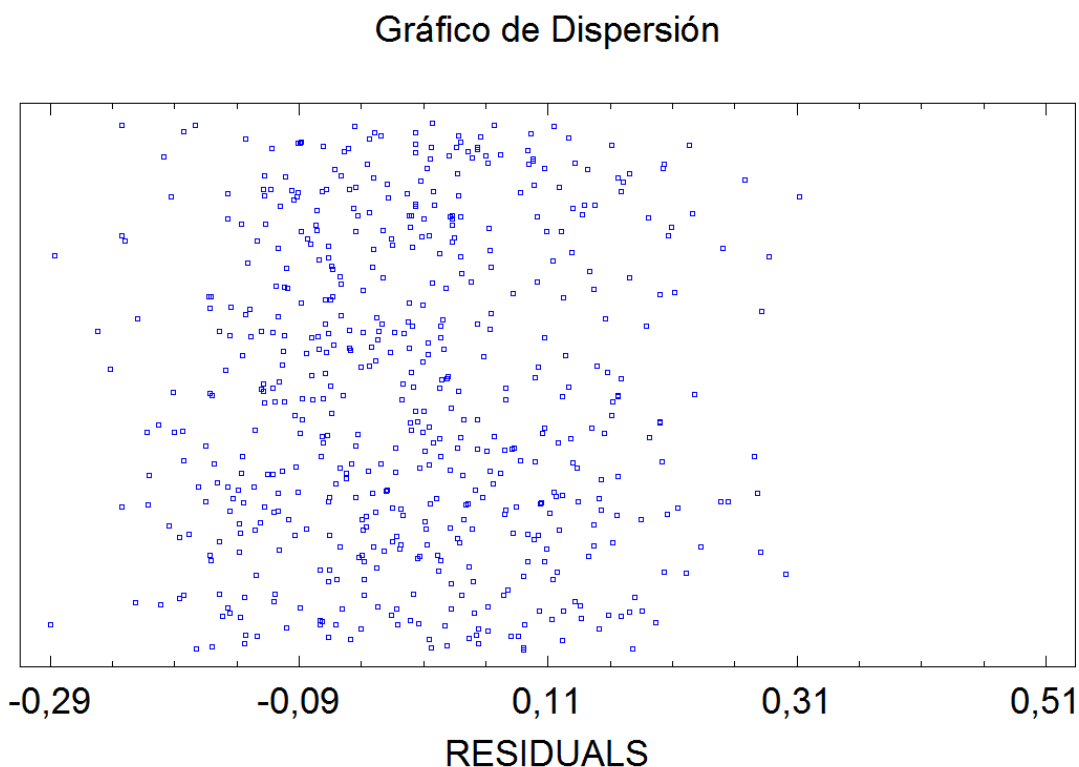
$$R_{\text{term}} = 0,7007 \cdot (C_1^{0,134} \cdot C_2^{0,407} \cdot C_3^{0,789})^{-1} \left(\frac{\mu_1^{0,92}}{\rho_1^{0,06} \cdot (\rho_v \cdot h_{\text{fg}})^{0,93} \cdot k_1^{0,82}} \right)^{1/10} \quad (7.12)$$

Comparando este modelo con el que se tenía antes hay que destacar un par de ideas:

- La fórmula final es muy similar a la anterior.
- Los valores de los estadísticos que indican la bondad del ajuste han mejorado levemente. Los valores de R^2 y R^2_{ajustada} han subido una décima. Así mismo el error absoluto medio se ha reducido en la misma proporción; ha pasado de valer 9,27 % a tomar un valor de 9,19 %.

Se realiza otra vez el análisis de los residuos para validar este nuevo modelo.

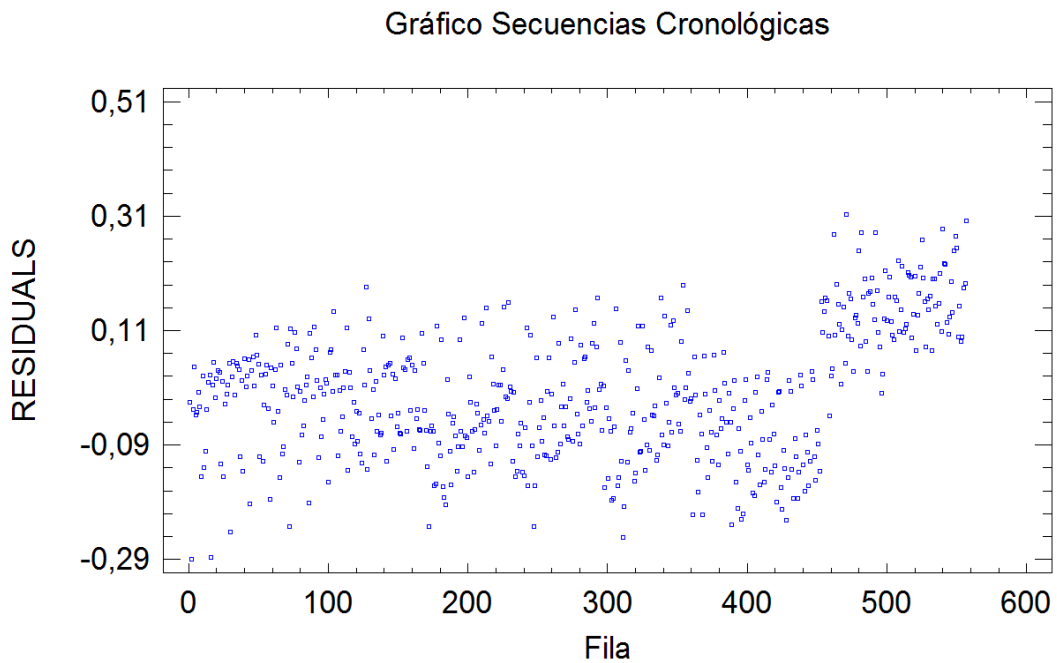
a) Gráfico de dispersión.



Gráfica 7.64: Dispersión para el conjunto de los termosifones.

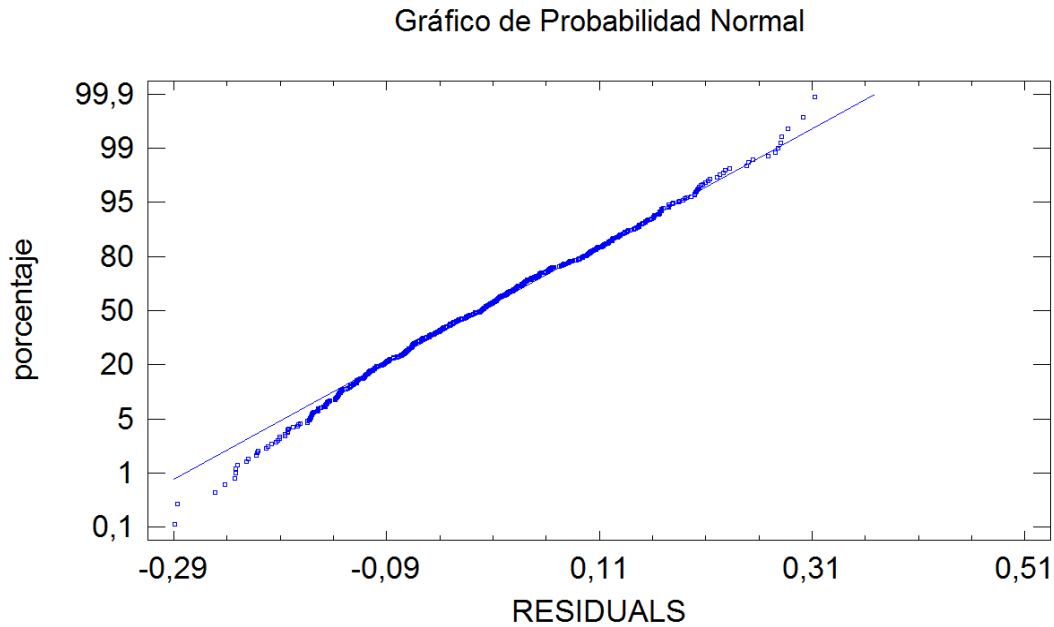
No hay agrupaciones especiales de puntos y su distribución es bastante homogénea en toda la gráfica.

Se mantienen las tendencias en la distribución de residuos que se tenían en la regresión anterior, esto es, les sigue influyendo el orden en que se han introducido los datos. Como ejemplo claro de esto, está la nube de puntos situada más a la derecha correspondiente a los residuos del termosifón prismático de aluminio (CCP). La influencia del orden de introducción de los datos en la distribución de los residuos queda corroborada por el estadístico Durbin-Watson = 1,0474 que se encuentra alejado del valor 2 y presenta un p-valor de 0,0000, indicando que no hay aleatoriedad entre los residuos y el orden en que se han introducido las observaciones para el análisis. Esto mejoraría tan solo con introducir los datos siguiendo otro orden, cosa que no modificaría, en absoluto, el análisis realizado, únicamente el valor de este estimador.



Gráfica 7.65: Secuencias cronológicas para el conjunto de los termosifones.

b) Percentiles de la distribución normal –QQ-norms.



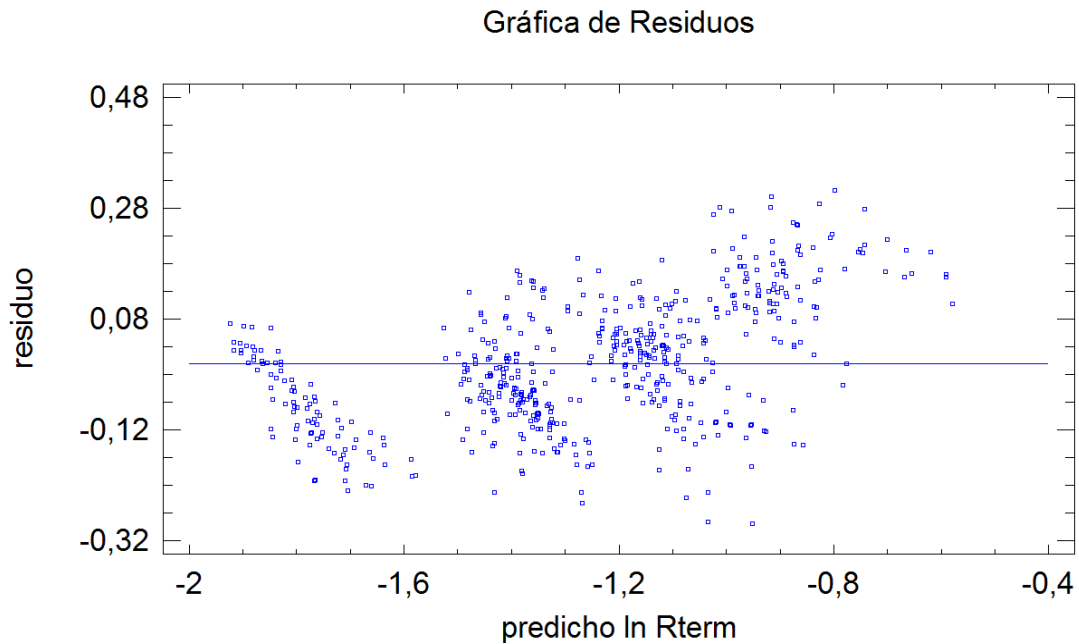
Gráfica 7.66: Distribución normal para el conjunto de los termosifones.

Ahora los residuos se ajustan bastante bien a la distribución normal. Las colas que aparecen a izquierda y derecha siguen llamando la atención, pero atendiendo a los valores del sesgo y la curtosis estandarizados no parecen tener gran influencia; ambos están dentro del rango (-2,2), por lo que puede afirmarse que no hay desviaciones significativas de la normalidad.

Tabla 7.56: Validación del supuesto de distribución normal.

Sesgo Estandarizado	1,95735
Curtosis Estandarizada	-1,81411

d) Gráficos de los residuales frente a los valores ajustados.



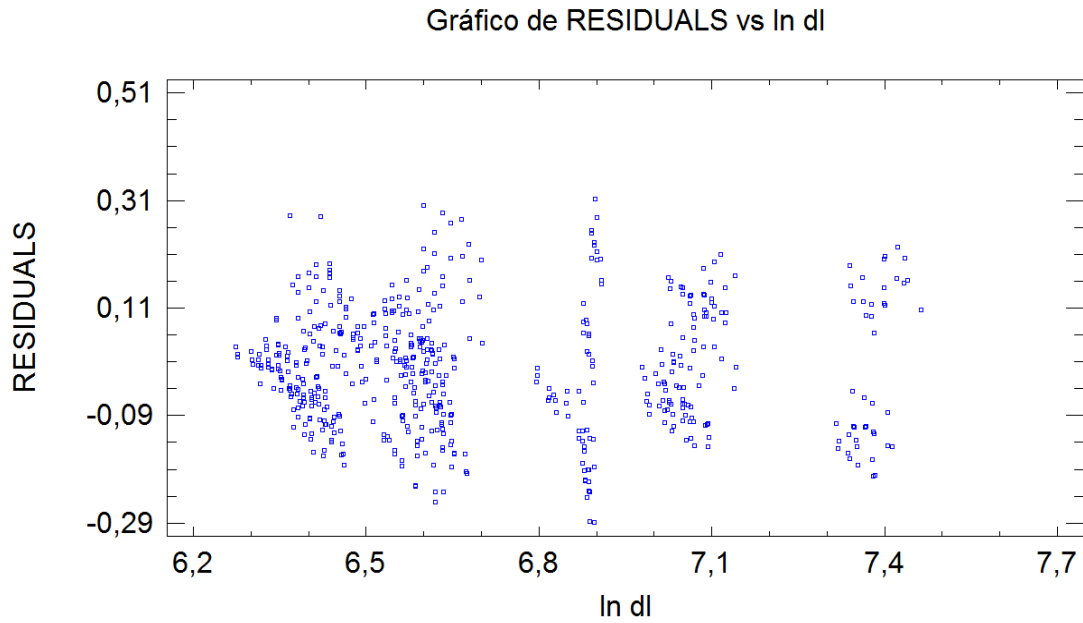
Gráfica 7.67: Residuales para el conjunto de los termosifones.

Aparecen agrupaciones de residuos según el tipo de termosifón; esto es lógico, ya que cada termosifón presenta un rango de valores para la resistencia térmica (R_{term}). Lo que sí cabe destacar es que los residuos son mayores para el termosifón de aluminio prismático con control de potencia (CCP). A parte de esto, no se observan puntos anómalos.

d) Gráficos de los residuales frente a las variables explicativas

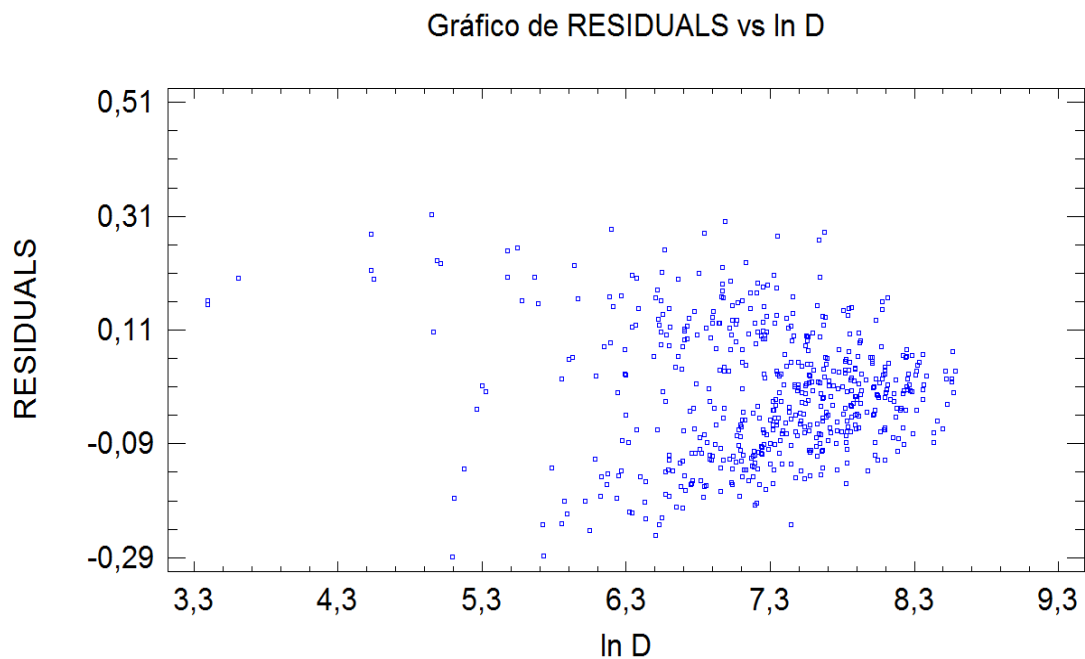
d.1.) Residuales frente a $\ln \rho_1$

Aparecen agrupaciones de residuos por sustancias; esto tiene cierta lógica, ya que no todas las sustancias se mueven en el mismo rango de valores para sus distintas propiedades, en este caso la propiedad en análisis es la densidad de líquido. Por ejemplo, los datos agrupados más a la derecha corresponden al perfluoroheptano, así como los que se agrupan en torno al valor de 6,9 pertenecen al agua. Este hecho podrá observarse también en alguna de las gráficas que siguen.



Gráfica 7.68: Residuales para el conjunto de los termosifones.

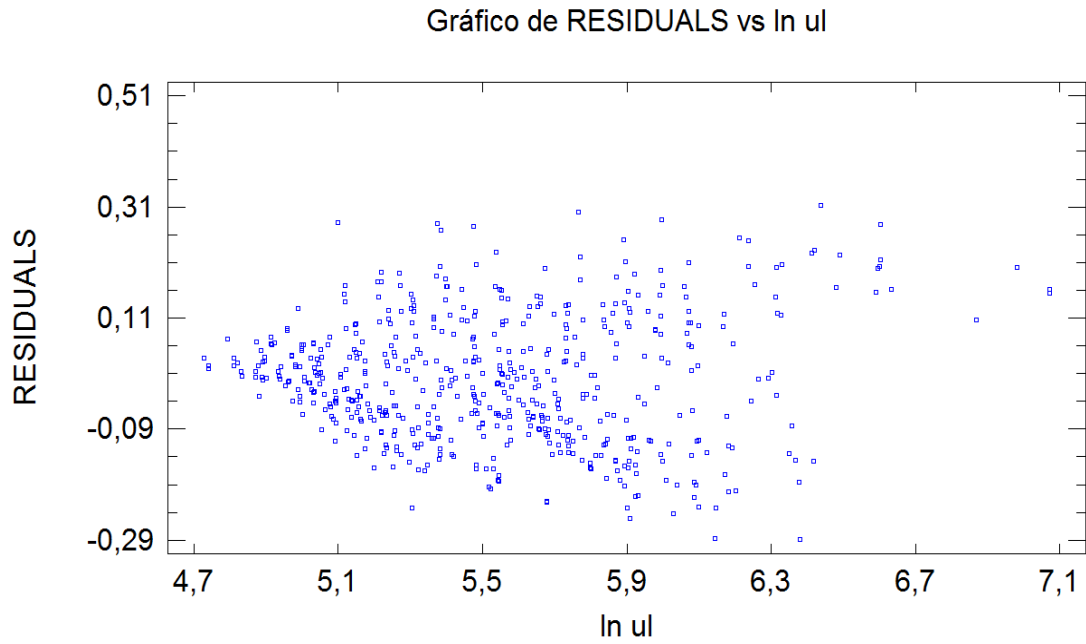
d.2.) Residuales frente a $\ln(\rho_v \cdot h_{fg}) = \ln D$



Gráfica 7.69: Residuales para el conjunto de los termosifones.

Los puntos de la izquierda, que se encuentran bastante separados de la nube general, corresponden al agua.

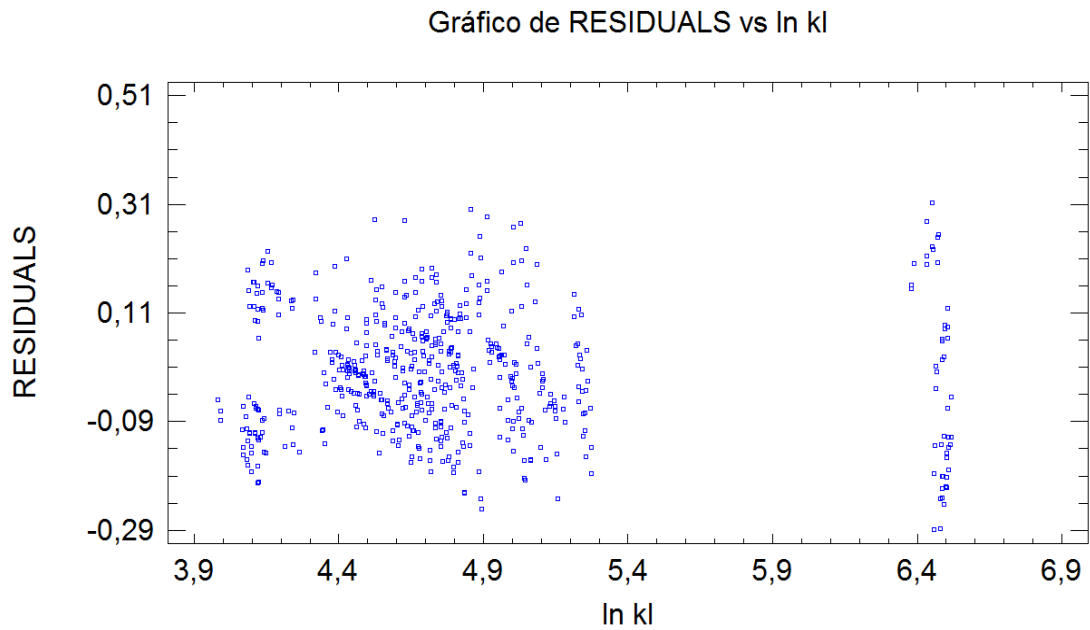
d.3.) Residuales frente a $\ln \mu_1$.



Gráfica 7.70: Residuales para el conjunto de los termosifones.

Los puntos de la derecha, que se encuentran bastante separados de la nube general, corresponden al agua.

d.4.) Residuales frente a $\ln k_1$

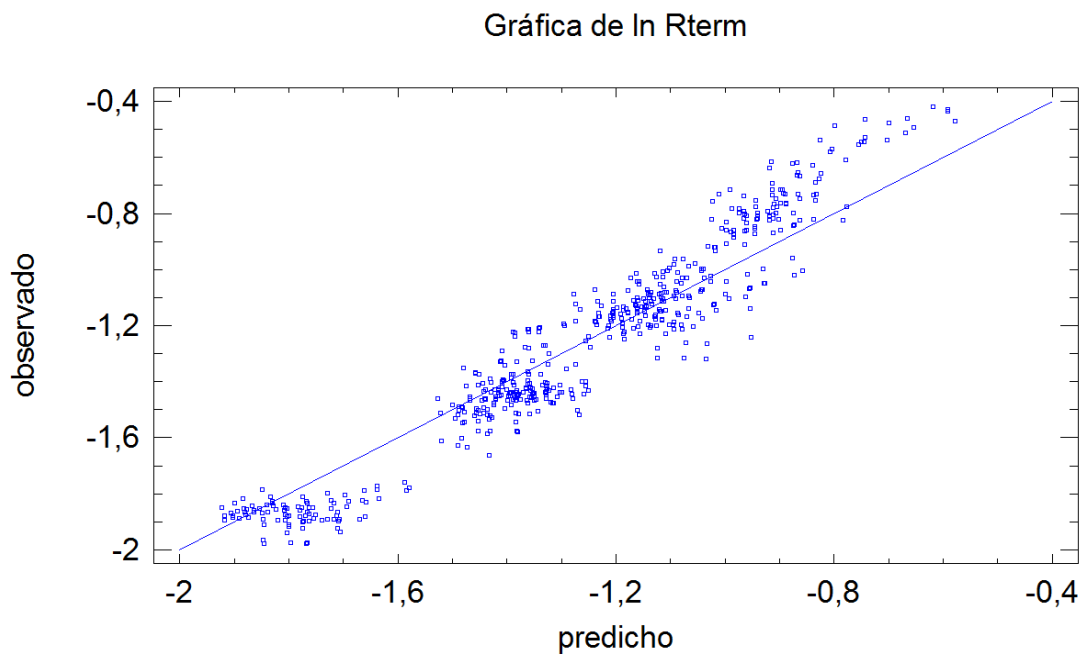


Gráfica 7.71: Residuales para el conjunto de los termosifones.

Los puntos correspondientes al agua quedan agrupados a la derecha haciendo notar que es la sustancia con mayor conductividad térmica de las ensayadas.

A la vista de los gráficos presentados puede concluirse que no hay tendencias específicas de los residuos, solamente las consabidas agrupaciones por sustancias que ya han sido señaladas. Tampoco hay puntos claramente atípicos o influyentes.

e) Gráficos de valores observados frente a valores ajustados.

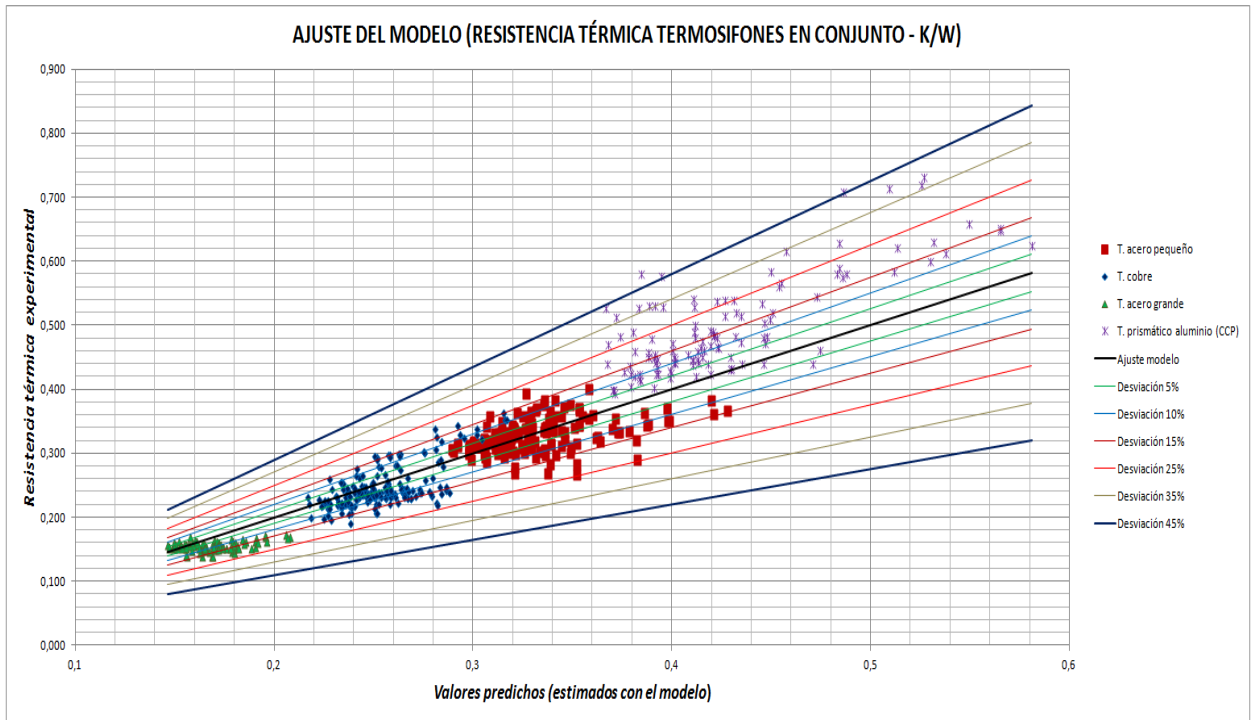


Gráfica 7.72: Valores ajustados para el conjunto de los termosifones.

El ajuste parece adecuado, los valores se ciñen bastante bien a la diagonal. Tampoco se aprecian aquí puntos claramente distorsionadores, sólo cuatro nubes de puntos diferenciadas correspondientes a los cuatro termosifones.

Más adelante se ha representado con Excel la gráfica 7.73 y aparece también la acotación del error cometido en la estimación. En esta gráfica se han incluido las 569 observaciones iniciales (están incluidos los puntos eliminados para el ajuste) y puede apreciarse que la mayoría de las observaciones caen entre las líneas de $\pm 25\%$. Los únicos puntos que escapan a esta acotación (22 de 569, menos del 4%) corresponden al termosifón prismático de aluminio CCP, tal y como ya se había predicho en el análisis de residuos.

Los errores en este ajuste son lógicamente mayores que en los ajustes particulares de cada termosifón ya que se están englobando datos más dispares; aun así, el error medio que se comete no supera el 10%, incluyendo incluso los puntos que habían sido eliminados en la estimación del modelo por presentar residuos atípicos. Así pues, puede concluirse que el ajuste realizado es razonablemente bueno.



Gráfica 7.73: Modelo del conjunto de todos los termosifones.

Una observación relevante de este estudio es que la fórmula de estimación obtenida explica más del 78% de la variabilidad de R_{term} . El estadístico $R^2 = 78,17\%$ es el que lo indica.

Para conocer la influencia del tipo de sustancia en la variabilidad de la resistencia térmica habría que realizar de nuevo la regresión (véase [14] y [15]) prescindiendo de las variables C (C_1 , C_2 y C_3) que son las que marcan el tipo de termosifón.

Este estudio se realizó, pero por resumir van a presentarse únicamente sus resultados finales. Se efectuó una regresión ridge de donde se dedujo que el conjunto de variables explicativas a tener en cuenta era el siguiente (el mismo que se ha venido obteniendo en los estudios precedentes):

$$\rho_1, (\rho_v \cdot h_{fg}), \mu_1, k_1$$

Y el parámetro de cadena escogido es el mismo que se tenía para el caso anterior: 0,125.

La pantalla de salida de Statgraphics para este modelo que prescinde de las variables termosifón sería:

Tabla 7.57: Resultados de la regresión ridge general sin variables termosifón.

Regresión en Cadena - ln Rterm		
Variable dependiente: ln Rterm		
Variables independientes:		
ln dl		
ln D		
ln ul		
ln kl		
Número de casos completos: 557		
Resultados del Modelo para el Parámetro de Cadena = 0,125		
		<i>Factor de Inflación de Varianza</i>
<i>Parámetro</i>	<i>Estimado</i>	
CONSTANTE	0,930241	
ln dl	-0,169148	1,01761
ln D	-0,187452	1,13366
ln ul	0,175707	1,11919
ln kl	-0,141001	0,994664

Análisis de Residuos		
	<i>Estimación</i>	<i>Validación</i>
n	557	
CME	0,103681	
MAE	0,267566	
MAPE		
ME	1,0299E-15	
MPE		

El estadístico R^2 indica que el modelo, así ajustado, explica el 21,4171% de la variabilidad de R_{term} . El estadístico $R^2_{ajustada}$ es 20,8477%. El error estándar de estimación muestra que la desviación estándar de los residuos es 0,321995. El error absoluto medio (MAE) de 0,267566 es el valor promedio de los residuos.

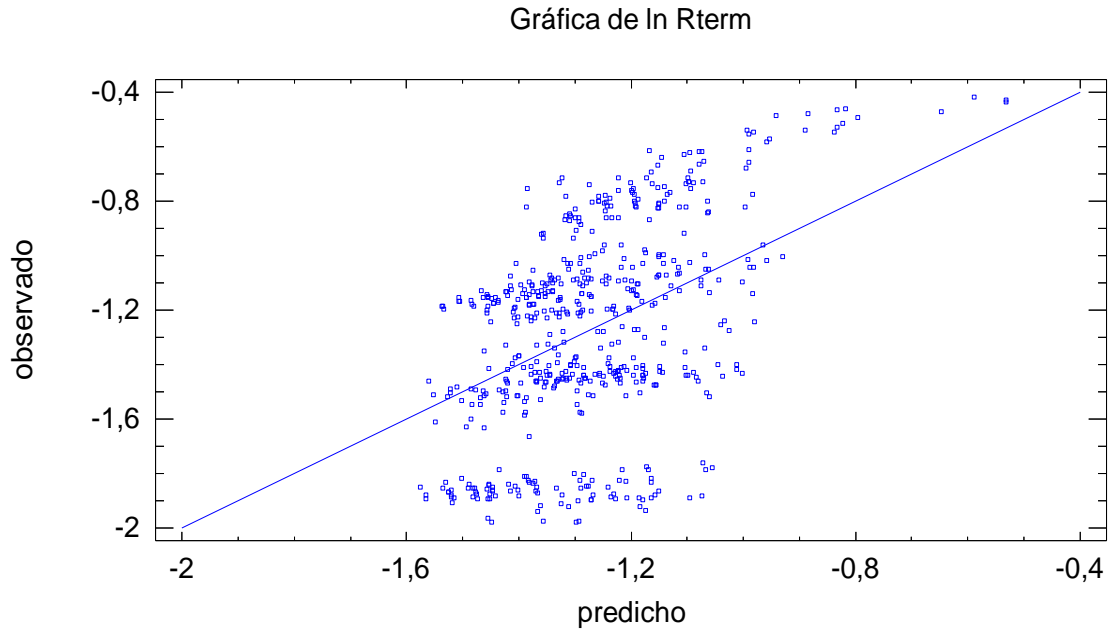
El modelo de regresión resultante es:

$$\ln R_{term} = 0,930241 - 0,169148 \cdot \ln \rho_l - 0,187452 \cdot \ln (\rho_v \cdot h_{fg}) + 0,175707 \cdot \ln \mu_l - 0,141001 \cdot \ln k_l$$

Quitando los logaritmos y redondeando los coeficientes, el modelo quedaría como sigue:

$$R_{term} = 2,5351 \cdot \left(\frac{\mu_l^{1,76}}{\rho_l^{1,69} \cdot (\rho_v \cdot h_{fg})^{1,87} \cdot k_l^{1,41}} \right)^{1/10} \quad (7.13)$$

A continuación se muestra la gráfica de valores ajustados frente a predichos.



Gráfica 7.74: Valores ajustados

De este análisis pueden extraerse algunas observaciones importantes.

- a) Al prescindir de las variables que indicaban el tipo de termosifón (variables C), la expresión obtenida reduce su poder explicativo ($R^2 = 21,4171 \%$) por debajo del 21,5 %. Esto implica que, para el estudio global de los termosifones, el tipo de sustancia justificaría sólo el 21,5 % de la variabilidad de la resistencia térmica, en contraste con los valores que se obtienen en los estudios individuales, donde el poder explicativo de la sustancia se sitúa, en general, en torno al 50 %. Este hecho es testigo de la importancia que tiene el tipo de termosifón en la predicción de la resistencia térmica en un estudio global.
- b) Sería muy interesante analizar en profundidad la influencia sobre la resistencia térmica de los aspectos constructivos del termosifón: geometría (cilíndrico - prismático, relación superficie base - longitud, etc.), tamaño (volumen interior) y material (cobre, acero, aluminio).
- c) La pérdida de poder explicativo del modelo queda patente en la gráfica 7.74. Los puntos no quedan bien alineados siguiendo la recta que representa al modelo y da a entender que los errores en la estimación serán considerables.

Estos errores están recogidos en la pantalla obtenida con Statgraphics (tabla 7.57) siendo de destacar que el error absoluto medio se sitúa en el 26,75 % mientras que en el modelo que incluía las variables C se reducía hasta el 9,19 %.

7.4.4. Resultados del estudio de regresión

A continuación se presenta una tabla que recoge los resultados finales de cada uno de los 7 estudios de regresión realizados, incluidos los de este capítulo y el anexo VII.

Tabla 7.58: Recopilación de los resultados del análisis de regresión.

Termosifón	Fórmula de estimación para R_{term}	Poder explicativo del tipo de sustancia	
		R^2	R^2_{aj}
Acero pequeño	$R_{\text{term}} = 0,4853 \cdot \left(\frac{\mu_1^{0,98}}{\rho_1^{0,76} \cdot (\rho_v \cdot h_{fg})^{0,16} \cdot k_1^{0,64}} \right)^{1/10}$	24,58%	22,73%
Cobre	$R_{\text{term}} = 0,1066 \cdot \left(\frac{\rho_1^{1,93} \cdot \mu_1^{0,48}}{(\rho_v \cdot h_{fg})^{0,55} \cdot k_1^{0,66}} \right)^{1/10}$	55,55%	54,60%
Acero grande	$R_{\text{term}} = 0,1766 \cdot \left(\frac{\rho_1^{0,11} \cdot \mu_1^{0,04}}{\rho_v^{0,02} \cdot h_{fg}^{0,18} \cdot k_1^{0,25}} \right)^{1/10}$	55,13%	52,52%
Prismático SCP	$R_{\text{term}} = 0,5741 \cdot \left(\frac{\rho_1^{1,14} \cdot \mu_1^{0,38}}{(\rho_v \cdot h_{fg})^{0,97} \cdot k_1^{1,1}} \right)^{1/10}$	43,87%	41,81%
Prismático CCP	$R_{\text{term}} = 0,4724 \cdot \left(\frac{\mu_1^{1,18}}{\rho_1^{0,21} \cdot (\rho_v \cdot h_{fg})^{0,63} \cdot k_1^{0,2}} \right)^{1/10}$	65,83%	64,50%
General	$R_{\text{term}} = 0,7007 \cdot (C_1^{0,134} \cdot C_2^{0,407} \cdot C_3^{0,789})^{-1} \cdot \left(\frac{\mu_1^{0,92}}{\rho_1^{0,06} \cdot (\rho_v \cdot h_{fg})^{0,93} \cdot k_1^{0,82}} \right)^{1/10}$	78,17%	77,89%
General (sin var. C)	$R_{\text{term}} = 2,5351 \cdot \left(\frac{\mu_1^{1,76}}{\rho_1^{1,69} \cdot (\rho_v \cdot h_{fg})^{1,87} \cdot k_1^{1,41}} \right)^{1/10}$	21,42%	20,85%

Con los resultados a la vista pueden extraerse varias observaciones importantes que se exponen a continuación:

- a) El estudio de regresión realizado no pudo llevarse a buen término de la forma habitual debido a la presencia de fuertes correlaciones entre las variables explicativas. Estas interrelaciones resultan lógicas, ya que muchas de las propiedades termofísicas van asociadas unas a otras, por ejemplo, un fluido que tenga una elevada densidad es de esperar que tenga también una elevada viscosidad; además, en última instancia, todas las variables dependen de la temperatura, siendo ésta el nexo subyacente entre todas ellas. La regresión múltiple "tradicional", con este problema de multicolinealidad, dio lugar a formulaciones poco coherentes y difícilmente explicables desde el punto de vista termofísico: la ubicación de las propiedades termofísicas en el modelo (numerador - denominador) así como los coeficientes que las acompañaban no respondían a la teoría científica aceptada. Este hecho obligó a buscar métodos que trataran de limitar los efectos de la multicolinealidad; se probaron dos.

El primero fue el de los componentes principales que persigue agrupar las variables en distintos conjuntos compactos de variables según su relación con la variable dependiente, R_{term} . Al no obtenerse resultados claros no ha sido recogido en la memoria.

El segundo procedimiento empleado, que sí que permitió realizar el estudio de forma adecuada, fue la regresión ridge (o en cadena); consiste, como se ha descrito con anterioridad, en introducir un nuevo parámetro, el parámetro de cadena, que si bien introduce un sesgo en la estimación, permite desvincular en gran medida las variables independientes. Con la regresión ridge la formulación resultó más coherente, de hecho es la que se ha tomado como válida en la tesis y es la que aparece reflejada en la tabla anterior (tabla 7.58).

- b) El tipo de sustancia, a través de sus propiedades termofísicas, es fundamental para justificar el valor de la resistencia térmica y por ende de la transferencia de calor en la tecnología termosifón. En los estudios individuales su poder explicativo se sitúa en torno al 50 %, salvo para el termosifón de acero pequeño que es mucho más bajo, no alcanza el 25 %. Éste resulta ser un hallazgo de relevancia, ya que pone el acento en que la elección de la sustancia a emplear condiciona de forma notable el rendimiento del termosifón.

En el estudio global, si se prescinde de las variables asociadas al tipo de termosifón (variables C), la sustancia es responsable de algo más del 20% de la variabilidad en la resistencia térmica. Este valor, que por contraste con los estudios individuales puede parecer bajo, es razonable ya que al hacer un estudio con el conjunto de datos proveniente de los distintos termosifones, se está introduciendo una gran variabilidad que no queda reflejada en este estudio de regresión. Esta variabilidad está relacionada con lo heterogéneo de las características constructivas de los termosifones involucrados en el estudio: tamaño, geometría, disposición de aletas, material, etc. Tal y como se indicaba anteriormente, el estudio estadístico de la influencia de estos factores en la transferencia de calor podría ser una interesante futura línea de investigación.

- c) En cuanto a las expresiones obtenidas, si bien difieren en los valores de las constantes y de los exponentes, presentan una disposición numerador-denominador de las variables muy similar. Si se analizan las variables termofísicas una a una:
- **Densidad de líquido, ρ_l , (kg/m^3):** es la única variable que ocupa el numerador o el denominador dependiendo del análisis a que se atienda; así que en algunos termosifones (acero pequeño y prismático CCP) contribuye a disminuir la resistencia térmica situándose en el denominador, y en otros (acero grande, cobre y prismático SCP) contribuye a aumentarla colocándose en el numerador. En el estudio general que recoge el conjunto de los datos de todos los termosifones queda situada en el denominador, mejorando por tanto la transferencia de calor.

- **Densidad de vapor**, ρ_v , (kg/m^3), y **entalpía de vaporización**, h_{fg} , (kJ/kg): se asocian en forma de producto dando lugar a una nueva variable ($\rho_v \cdot h_{fg}$) que presenta unidades de densidad de energía (kJ/m^3). Esta variable estaría indicando la cantidad de energía que transporta el vapor desde el evaporador hasta el condensador por unidad de volumen. Se sitúa en el denominador de todas y cada una de las expresiones de regresión obtenidas: a mayor capacidad de transporte de energía del vapor, menor resistencia térmica en el termosifón. La idea de su empleo se encontró en Palm y Khodabandeh [10] y ha resultado ser una solución aceptable, principalmente para el análisis estadístico, ya que reduce los graves problemas de multicolinealidad que se han presentado y que han dificultado notablemente el estudio de regresión.
- **Viscosidad del líquido**, μ_l , ($\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$): queda situada en el numerador contribuyendo al aumento del valor de la resistencia térmica. Esto es lógico ya que la viscosidad del líquido dificulta la vuelta del líquido al evaporador desde el condensador y, en consecuencia, entorpece la transferencia de calor.
- **Conductividad del vapor**, k_v , (mW/m): se sitúa en el denominador en todas las expresiones obtenidas, esto es, actúa mejorando la transferencia de calor al disminuir el valor de la resistencia térmica. La razón de esto radica en que una conductividad térmica elevada permite una mayor transferencia de calor en el seno del líquido contribuyendo positivamente, por tanto, a la transferencia de calor global del termosifón.

Se puede afirmar que todas las fórmulas obtenidas presentan una importante correlación con la temperatura del fluido.

Con esta recopilación de resultados finaliza el análisis de regresión y, por tanto, el análisis de la influencia de las propiedades termofísicas de cada sustancia sobre la resistencia térmica. El siguiente apartado persigue conocer la influencia de las condiciones experimentales sobre esta misma variable dependiente, R_{term} .

7.5. Análisis de experimentos y superficies de respuesta

7.5.1. Introducción al análisis de superficie de respuesta

La Metodología de Superficies de Respuesta (RSM) es un conjunto de técnicas matemáticas utilizadas en el tratamiento de problemas en los que una respuesta de interés está influida por varios factores de carácter cuantitativo. El propósito inicial de estas técnicas es diseñar un experimento que proporcione valores razonables de la variable respuesta y, a continuación, determinar el modelo matemático que mejor se ajusta a los datos obtenidos. El objetivo final es establecer los valores de los factores que optimizan el valor de la variable respuesta.

El análisis de superficie de respuesta que va a exponerse irá acompañado de un análisis de experimentos [16] que relacionará la resistencia térmica con las variables categorizadas previamente a la experimentación (tipo de termosifón, carga y temperatura ambiente) prescindiendo de las propiedades termofísicas en las que se centra el estudio anterior de regresión. De esta forma se tratará de mostrar en qué condiciones externas a la sustancia se maximiza la transferencia de calor, o lo que es lo mismo, se minimiza R_{term} .

A continuación se muestran los resultados obtenidos mediante la metodología de superficie de respuesta. Se seguirá el mismo esquema que se ha seguido con la regresión múltiple, se expondrán primero los resultados de los estudios individuales para cada uno de los 5 termosifones y se finalizará con un estudio general de los datos provenientes del conjunto de todos ellos.

7.5.2. Estudio de superficie de respuesta para termosifón de cobre

a) Datos estudiados

- Variable dependiente: R_{term} (resistencia térmica).
- Variables independientes:

a) Nivel de carga (*Carga*): presenta tres niveles.

Bajo (50 %)

Medio (70 %)

Alto (90 %).

Hay que tomar una escala numérica para que el método de superficie de respuesta pueda realizarse. La escala escogida se muestra a continuación.

Tabla 7.59: Escala de categorización de la variable *Carga*.

Bajo	Medio	Alto
0,5	0,75	1

b) Temperatura ambiente (T_{amb}): presenta cuatro niveles.

10 °C 25 °C 32 °C 43 °C

En total son: 2 variables independientes + 1 variable dependiente.

Se tienen 16 bloques, uno por cada sustancia ensayada en este termosifón, y a cada bloque le corresponden 12 observaciones (4 temperaturas para cada uno de los tres niveles de carga)

Tabla 7.60: Bloques planteados para el estudio de superficie de respuesta.

Bloque	Sustancia
1	Agua
2	Ciclopentano
3	Dietil éter
4	Etanal
5	Metanoato de metilo
6	Isopentano
7	Metanol
8	N-Hexano
9	N-Pentano
10	Perfluoroheptano
11	Propanal
12	R-141b
13	R-365mfc
14	Acetona + Pentano
15	Ciclopentano + Metanol
16	Dietil éter + Metanoato de metilo

Las tablas no se convierten a escala logarítmica. Se va a trabajar con una expresión polinómica para construir la superficie de respuesta, por tanto se emplearán los datos originales sin modificar.

b) Análisis de correlaciones

No se han detectado correlaciones relevantes entre las variables explicativas, por lo que la interpretación de los estadísticos del modelo podrá hacerse sin dificultad.

Tabla 7.61: Matriz de correlación para los efectos estimados.

		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
(1)	promedio	1,0000	0,0000	-0,0771	-0,6830	0,0000	-0,5466	0,0000
(2)	A:Carga	0,0000	1,0000	0,0000	0,0000	-0,0833	0,0000	0,0000
(3)	B:Tamb	-0,0771	0,0000	1,0000	0,0000	0,0000	0,0674	0,0000
(4)	AA	-0,6830	0,0000	0,0000	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000
(5)	AB	0,0000	-0,0833	0,0000	0,0000	1,0000	0,0000	0,0000
(6)	BB	-0,5466	0,0000	0,0674	0,0000	0,0000	1,0000	0,0000
(7)	bloque	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	1,0000

c) Validación del modelo

A continuación se muestra la salida de Statgraphics.

Tabla 7.62: Validación del modelo de superficie de respuesta.

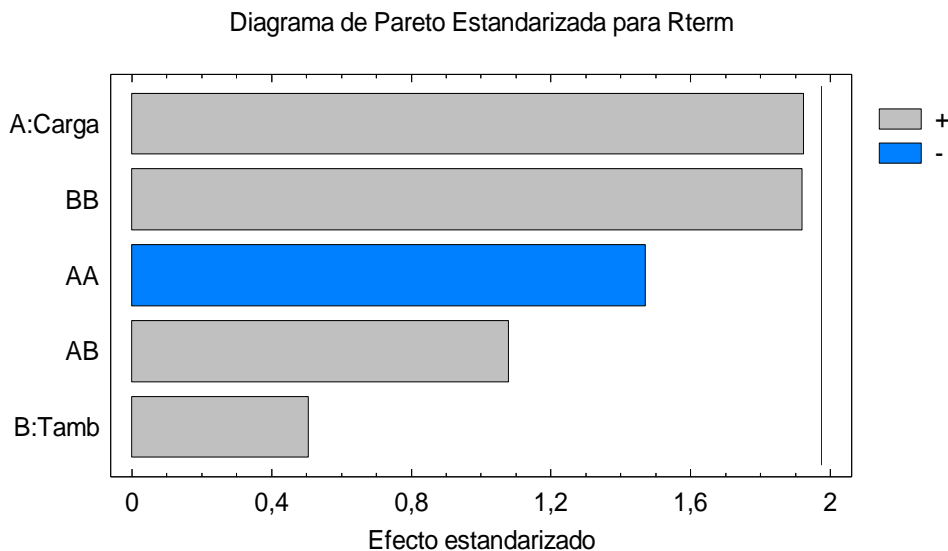
Análisis de Varianza para Rterm					
<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A:Carga	0,000321294	1	0,000321294	3,70	0,0560
B:Tamb	0,0000221488	1	0,0000221488	0,26	0,6140
AA	0,0001876	1	0,0001876	2,16	0,1433
AB	0,000100976	1	0,000100976	1,16	0,2822
BB	0,000319333	1	0,000319333	3,68	0,0567
bloques	0,181295	15	0,0120864	139,32	0,0000
Error total	0,0148348	171	0,0000867535		
Total (corr.)	0,197105	191			

R-cuadrada = 92,4736 por ciento
R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 92,2713 por ciento
Error estándar del est. = 0,00931415
Error absoluto medio = 0,00694487
Estadístico Durbin-Watson = 2,241 (P=0,9525)
Autocorrelación residual de Lag 1 = -0,123443

El estadístico R^2 indica que el modelo, así ajustado, explica el 92,4736% de la variabilidad de R_{term} . El estadístico $R^2_{ajustada}$ es 92,2713%. El error estándar de estimación muestra que la desviación estándar de los residuos es 0,00931415. El error absoluto medio (MAE) de 0,00694487 es el valor promedio de los residuos.

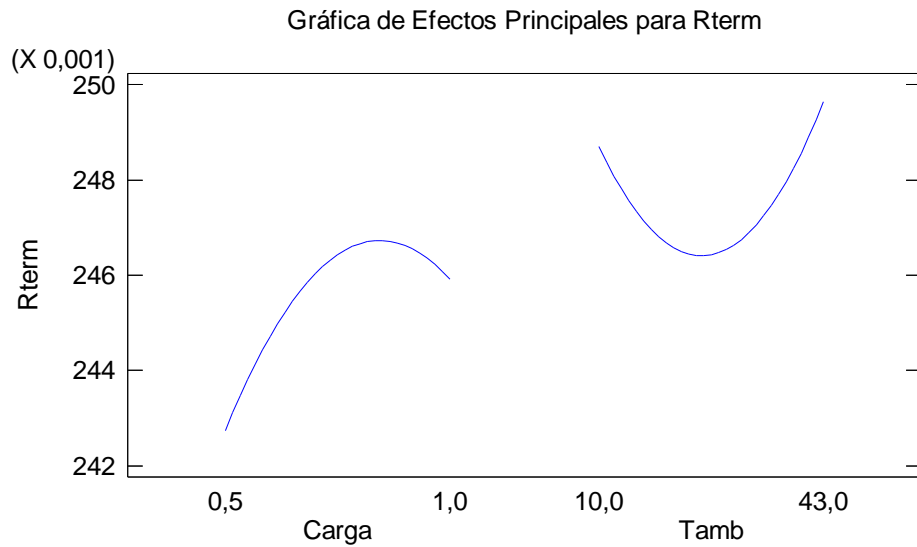
Si se atiende a los p-valor y la razón-F se aprecia que las variables no son estadísticamente significativas a la hora de explicar la variabilidad de R_{term} y, sin embargo, se tienen valores muy elevados para las R^2 . Esto es debido a la influencia de los bloques, lo que indica que el tipo de sustancia y, por tanto, sus propiedades termofísicas, analizadas en la regresión lineal, son fundamentales para entender la transferencia de calor en un termosifón. Sin embargo, hay que hacer notar que si se prescinde de los bloques, el modelo no cambia, los efectos siguen siendo los mismos, sólo que no hay razón para la variabilidad de la respuesta y el valor de R^2 se desploma hasta el 0,5%. El estudio se hace por tanto considerando la organización por bloques.

El gráfico de Pareto que se muestra a continuación señala que ninguno de los factores analizados es relevante para explicar la variación de la resistencia térmica, puesto que ninguno alcanza el valor de 2 para el efecto estandarizado. Si bien, los factores que aparecen con mayor importancia son la *Carga* (A) y el cuadrado de la *Temperatura ambiente* (BB), la única conclusión clara que puede extraerse es la poca relevancia que tienen *Carga* y T_{amb} en la variabilidad de R_{term} . De todas formas, se continúa con la modelización para hallar de forma orientativa en qué condiciones de carga y temperatura el termosifón trabaja de manera óptima, a pesar de lo limitado de los resultados que se van a conseguir.



Gráfica 7.75: Gráfico de Pareto.

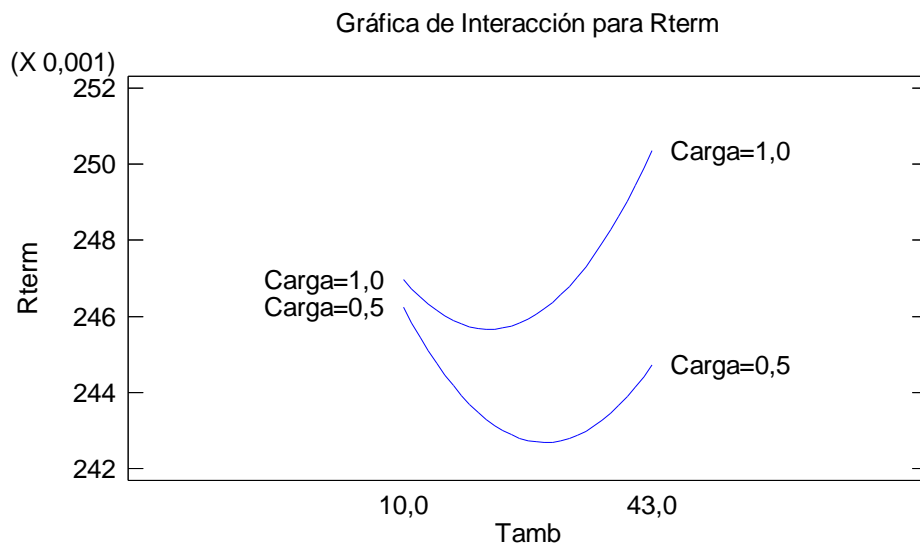
En la siguiente gráfica se muestra cómo varía R_{term} al variar los efectos principales de forma individual ($Carga$ y T_{amb}). Esto es, refleja cómo varía R_{term} con la variación de la $Carga$ si T_{amb} se mantiene constante y viceversa.



Gráfica 7.76: Gráfica de efectos principales.

No puede apreciarse una tendencia clara para ninguno de los dos factores.

La gráfica de interacción que puede verse a continuación, analiza cómo varía R_{term} al variar conjuntamente ambos efectos.



Gráfica 7.77: Gráfica de interacción.

De esta gráfica tampoco pueden extraerse tendencias claras; si bien las curvas parecen indicar que la resistencia térmica mínima tendrá lugar para el nivel de carga más bajo (0,5) y para una temperatura ambiente intermedia (entre los 25 y los 32°C).

d) Resultados

Tras haber realizado la validación del modelo y haber explicado sus características y las de las variables que lo constituyen, se presentan los resultados y su interpretación.

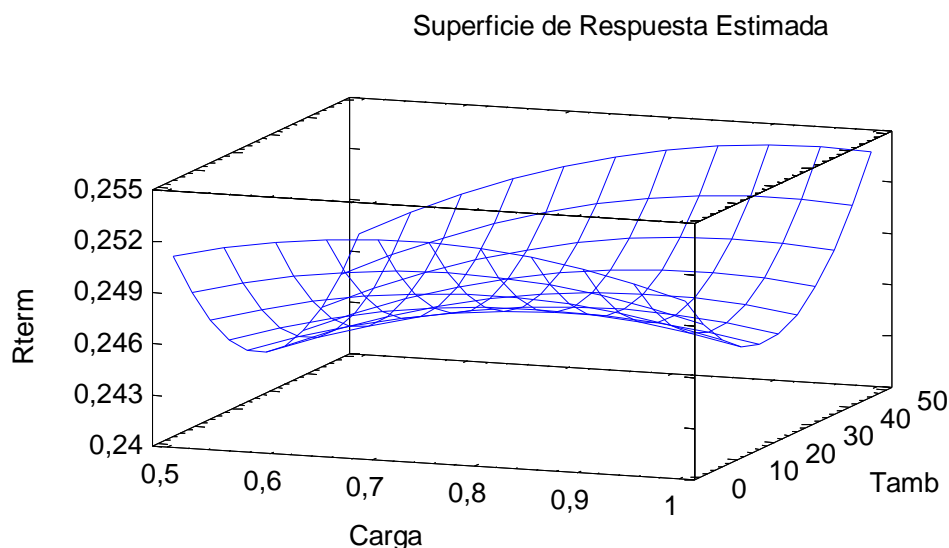
d.1. Ecuación de regresión

La ecuación resultante es:

$$R_{\text{term}} = 0,235003 + 0,0488182 \cdot \text{Carga} - 0,000727802 \cdot T_{\text{amb}} - 0,03355 \cdot \text{Carga}^2 + 0,000296837 \cdot \text{Carga} \cdot T_{\text{amb}} + 0,0000100682 \cdot T_{\text{amb}}^2 \quad (7.14)$$

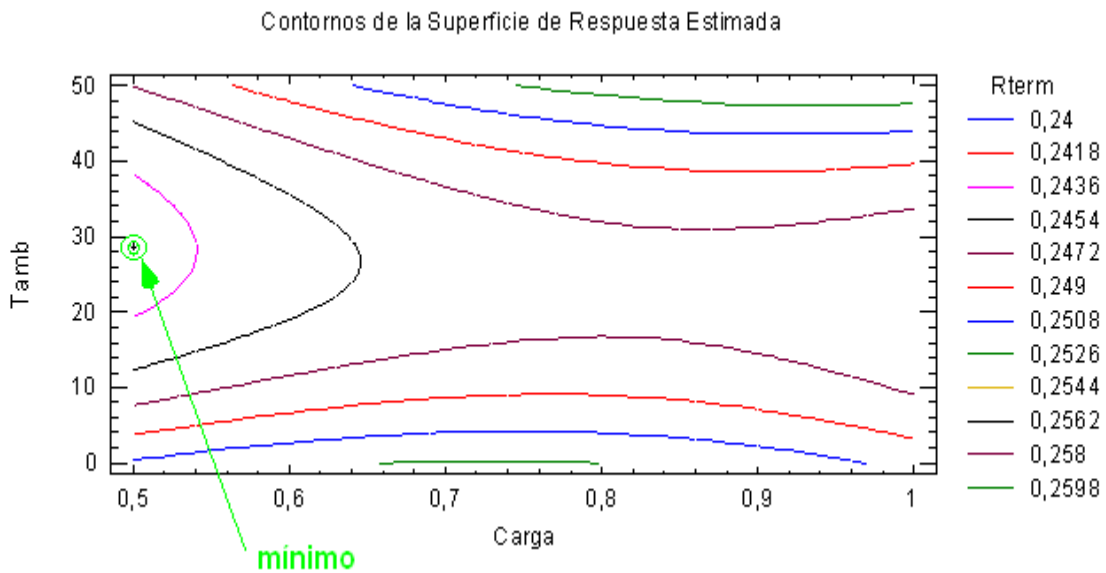
d.2. Superficie de respuesta

Muestra, en tres dimensiones, cómo es la variación estimada de R_{term} con la variación de las variables Carga y T_{amb} . Se trata de la representación gráfica de la ecuación de regresión. Esta superficie de respuesta es útil para visualizar el óptimo, en este caso el mínimo de R_{term} , y el comportamiento del modelo.



Gráfica 7.78: Gráfica de superficie de respuesta.

Otra gráfica que ayuda a comprender el comportamiento del modelo son los contornos de la superficie de respuesta. De hecho permite localizar, de forma más clara, los valores de las variables de entrada para los que se alcanza el valor óptimo.



Gráfica 7.79: Gráfica de contornos de la superficie de respuesta.

Se aprecia que el mínimo valor de R_{term} tiene lugar para una *Carga* de 0,5 (carga baja) y una T_{amb} situada algo por debajo de los 30°C. A continuación se dan los resultados exactos de la optimización.

d.3. Resultado de la optimización

Las gráficas de la superficie de respuesta dan una orientación acerca de dónde se encuentra el óptimo. Sin embargo, Statgraphics saca también el resultado exacto de dicha optimización; de esta forma se tiene:

Tabla 7.63: Resultado de la optimización.

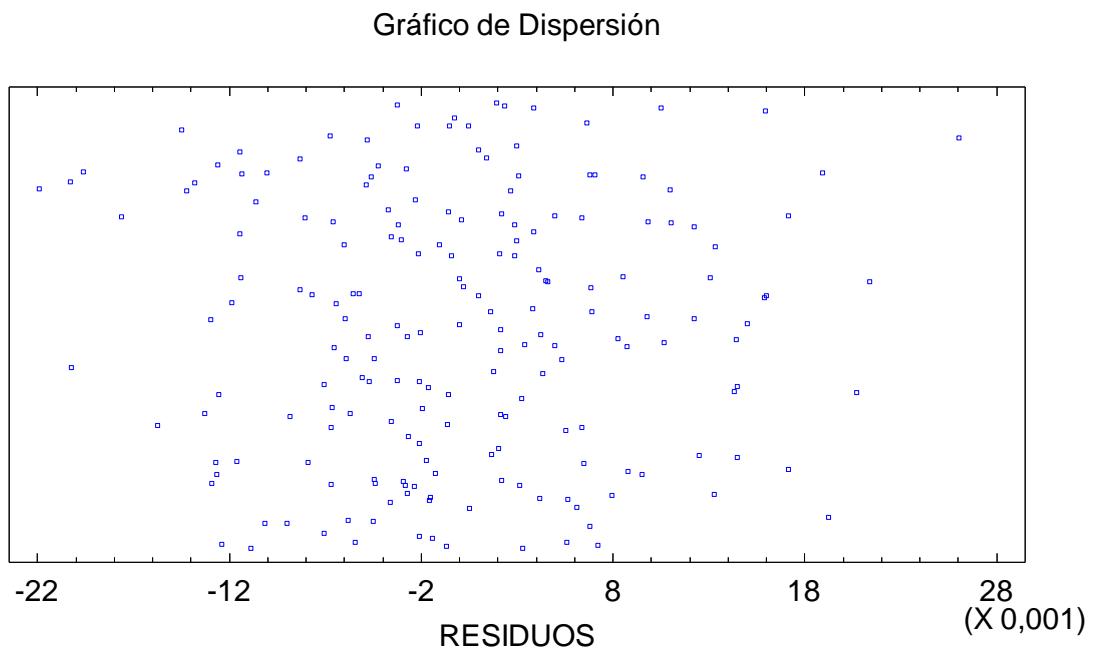
Optimizar Respuesta			
Meta: minimizar R_{term}			
Valor óptimo = 0,24269			
Factor	Bajo	Alto	Óptimo
Carga	0,5	1,0	0,5
T_{amb}	10,0	43,0	28,7699

Como se puede apreciar, el valor óptimo para R_{term} es 0,243, y se alcanza para un valor de $Carga = 0,5$ (carga baja) y una $T_{\text{amb}} = 28,8$ °C.

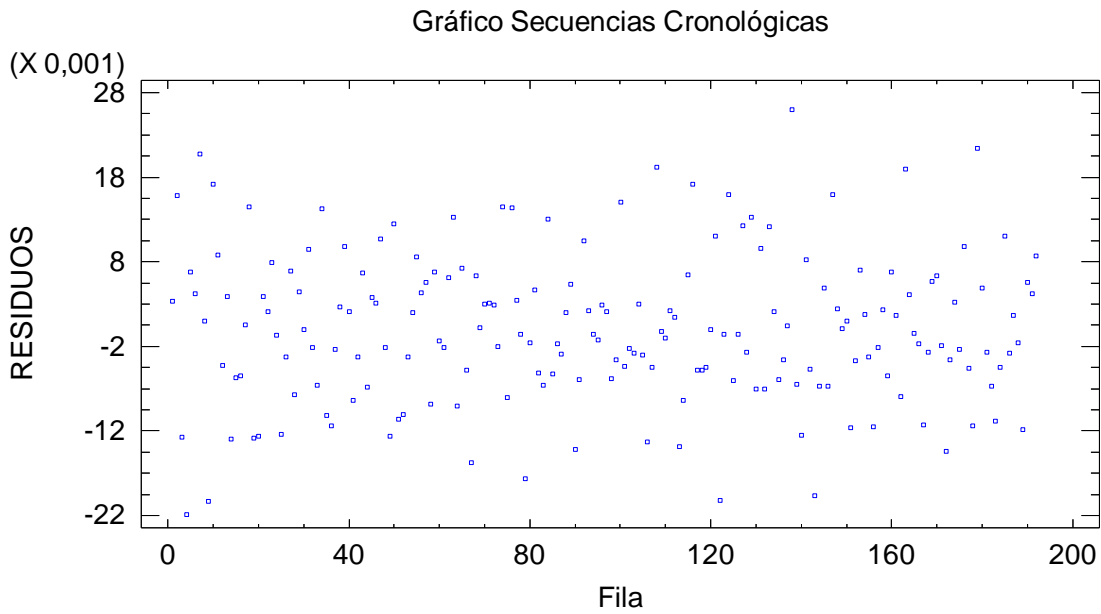
e) Diagnóstico del modelo

Se realiza un estudio de los residuos para terminar de confirmar que el modelo es adecuado.

a) Gráficos de dispersión.



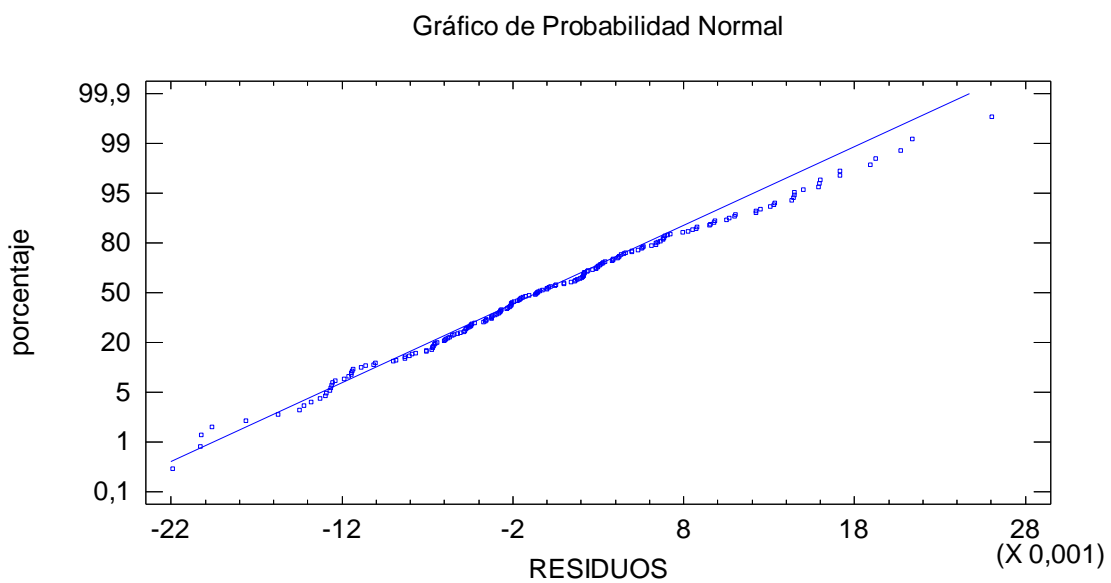
Gráfica 7.80: Gráfico de dispersión.



Gráfica 7.81: Gráfico de secuencias cronológicas.

No hay tendencias ni agrupaciones especiales; los residuos son aleatorios, no les influye el orden en que se han introducido los datos. Esto último también se puede saber observando el valor del estadístico Durbin-Watson = 2,241, que al estar próximo a 2, véase la tabla 7.62, confirma la interpretación hecha para el gráfico.

b) Percentiles de la distribución normal –QQ-norms.



Gráfica 7.82: Gráfico de probabilidad normal.

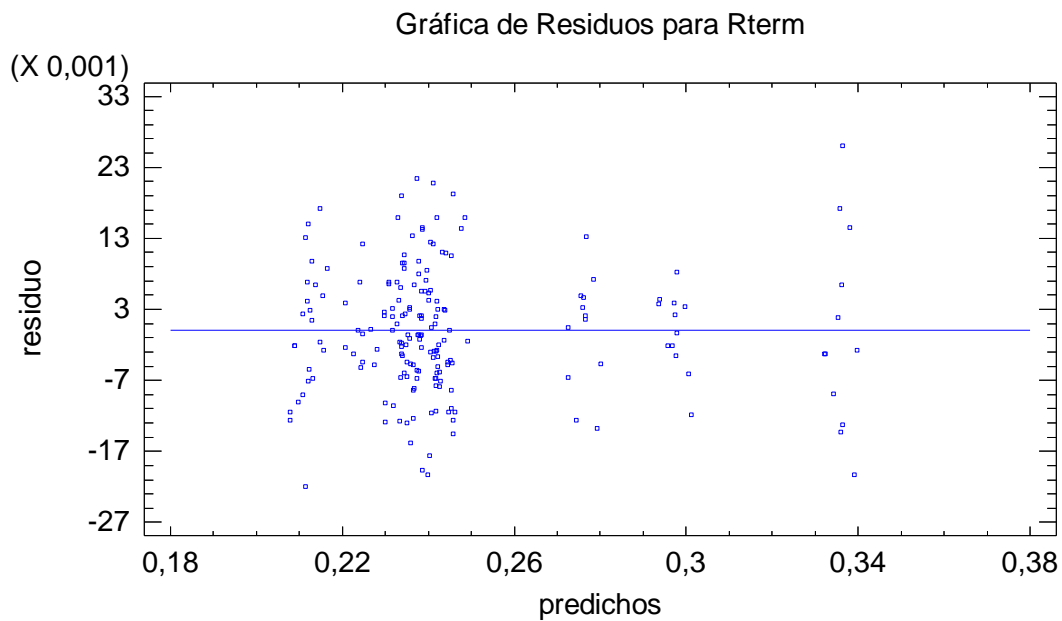
Los residuos parecen ajustarse bastante bien a la distribución normal. Esto lo corroboran los valores que arrojan el sesgo estandarizado y la curtosis; ambos están en el rango (-2,2).

Tabla 7.64: Validación del modelo de distribución normal.

Sesgo Estandarizado	1,05695
Curtosis Estandarizada	0,106454

c) Gráficos de los residuales frente a los valores ajustados.

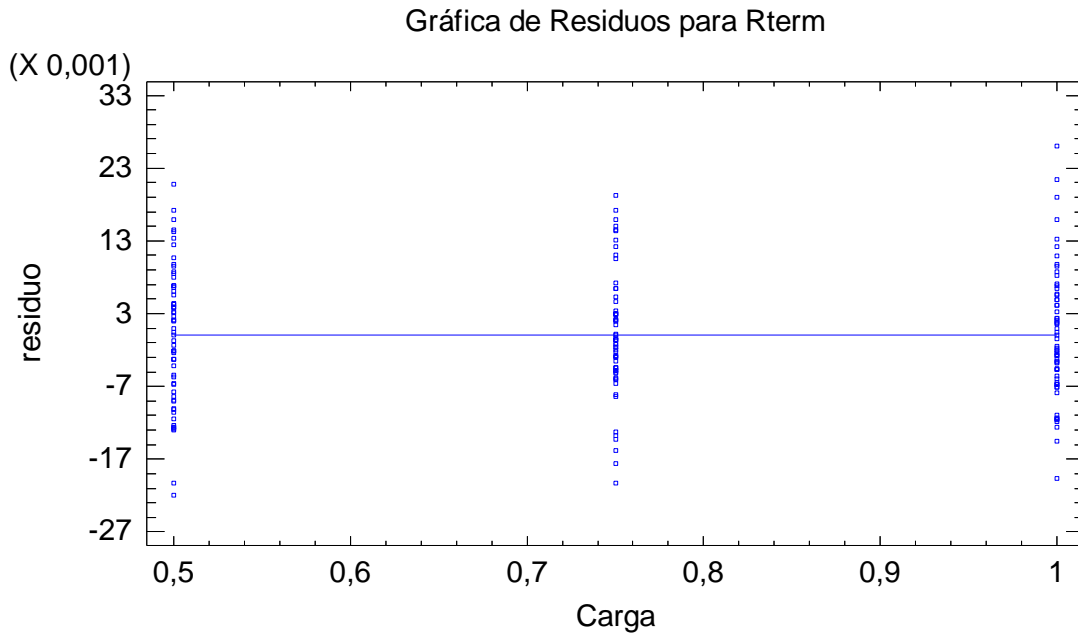
Aparecen ciertas agrupaciones de datos por sustancia; por ejemplo, el conjunto de datos situado más a la derecha corresponde al perfluoroheptano. A parte de esto no se observa una tendencia concreta que revele heterocedasticidad (varianza no constante). No se observan tampoco puntos anómalos.



Gráfica 7.83: Gráfica de residuos frente a valores predichos

d) Gráficos de los residuales frente a factores principales.

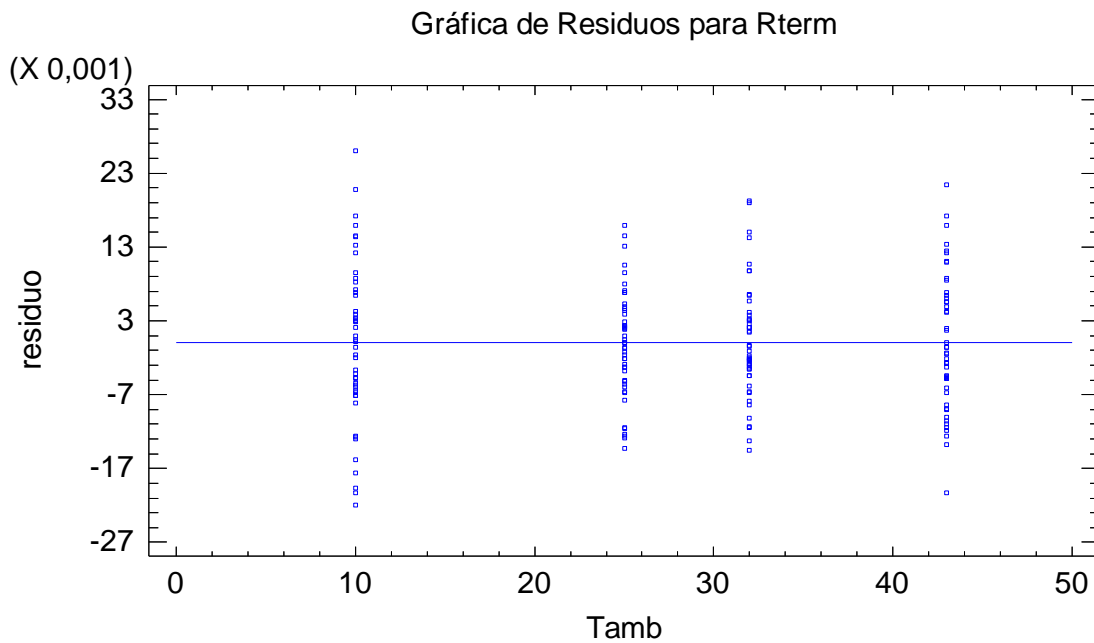
d.1.) Residuales frente a *Carga*.



Gráfica 7.84: Gráfica de residuos frente al nivel de carga.

d.2.) Residuales frente a T_{amb} .

No se observan puntos con residuos especialmente elevados ni una tendencia clara que desmienta la aleatoriedad de su distribución.



Gráfica 7.85: Gráfica de residuos frente a la temperatura ambiente.

La conclusión final de este estudio sería que para el termosifón cilíndrico de cobre, ni el nivel de carga ni la temperatura ambiente influyen de forma clara sobre la resistencia térmica. Como se ha visto anteriormente, si se prescinde de la organización por bloques que recoge a cada una de las sustancias ensayadas, el poder explicativo de las variables *Carga* y T_{amb} desciende hasta el 0,5 %, considerando los bloques R^2 se situaba por encima del 90 %. Esto da una idea de la gran relevancia que presenta el tipo de sustancia en la transferencia de calor para este termosifón.

7.5.3. Estudio de superficie de respuesta para termosifón prismático de aluminio con control de potencia (CCP)

a) Datos estudiados

- Variable dependiente: R_{term} (resistencia térmica).
- Variables independientes:

a) Nivel de carga (*Carga*): presenta tres niveles.

Bajo (13 %) Medio (19 %) Alto (28 %).

Hay que tomar una escala numérica para que el método de superficie de respuesta pueda realizarse. La escala escogida es la que se muestra a continuación.

Tabla 7.65: Escala de categorización de la variable *Carga*.

Bajo	Medio	Alto
0,5	0,75	1

b) Temperatura ambiente (T_{amb}): presenta cuatro niveles.

10 °C 25 °C 32 °C 43 °C

En total son: 2 variables independientes + 1 variable dependiente.

Se tienen también 9 bloques, uno por cada sustancia ensayada en este termosifón, y a cada bloque le corresponden 12 observaciones (4 temperaturas para cada uno de los tres niveles de carga).

Tabla 7.66: Bloques planteados para el estudio de superficie de respuesta.

Bloque	Sustancia
1	Agua
2	Dietil éter
3	Isopentano
4	N-Pentano
5	Perfluoroheptano
6	R-141b
7	R-365mfc
8	Acetona + N-Pentano
9	Dietil éter + Metanoato de metilo

Las tablas no se convierten a escala logarítmica. Se va a trabajar con una expresión polinómica para construir la superficie de respuesta, por tanto se emplearán los datos originales sin modificar.

b) Análisis de correlaciones

No se han detectado correlaciones relevantes entre las variables explicativas, por lo que la interpretación de los estadísticos del modelo podrá hacerse sin dificultad.

Tabla 7.67: Matriz de correlación para los efectos estimados.

		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
(1)	promedio	1,0000	0,0000	-0,0765	-0,6875	0,0000	-0,5337	-0,0006
(2)	A:Carga+bloque	0,0000	1,0000	0,0000	0,0000	-0,1220	0,0000	0,0000
(3)	B:Tamb+bloque	-0,0765	0,0000	1,0000	0,0000	0,0000	0,0198	0,0166
(4)	AA+bloque	-0,6875	0,0000	0,0000	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000
(5)	AB+bloque	0,0000	-0,1220	0,0000	0,0000	1,0000	0,0000	0,0000
(6)	BB+bloque	-0,5337	0,0000	0,0198	0,0000	0,0000	1,0000	-0,0109
(7)	bloque	-0,0006	0,0000	0,0166	0,0000	0,0000	-0,0109	1,0000

c) Validación del modelo

A continuación se muestra la salida de Statgraphics.

Tabla 7.68: Validación del modelo de superficie de respuesta.

Análisis de Varianza para Rterm					
<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A:Carga	0,0165037	1	0,0165037	14,73	0,0002
B:Tamb+bloque	0,0197756	1	0,0197756	17,65	0,0001
AA	0,00115112	1	0,00115112	1,03	0,3132
AB	0,000343676	1	0,000343676	0,31	0,5809
BB+bloque	0,00229604	1	0,00229604	2,05	0,1553
bloques	0,522146	9	0,0580162	51,78	0,0000
Error total	0,114283	102	0,00112042		
Total (corr.)	0,673873	116			

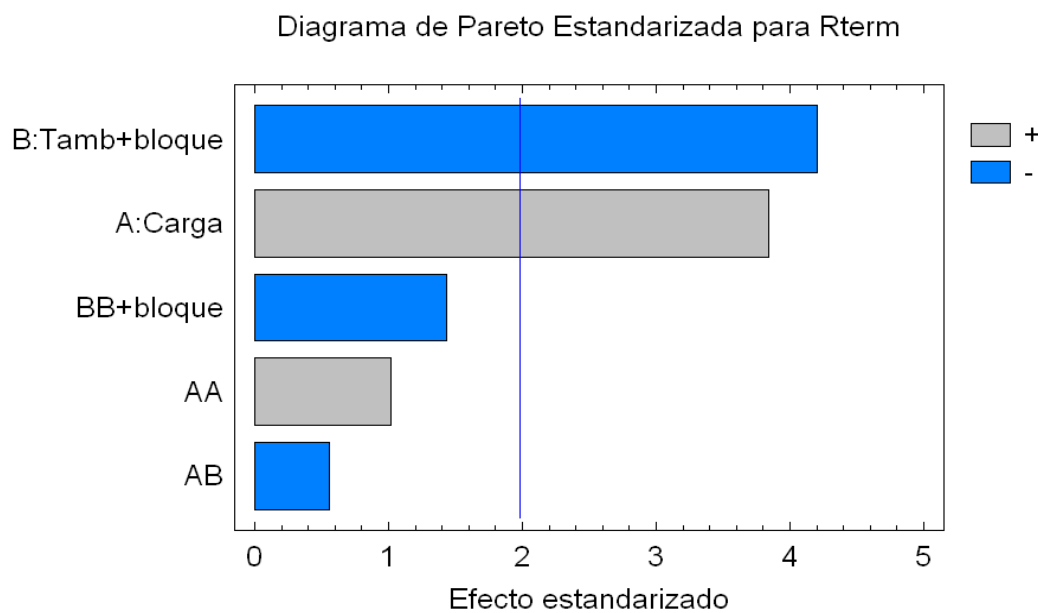
R-cuadrada = 83,0408 por ciento
R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 82,2769 por ciento
Error estándar del est. = 0,0334727
Error absoluto medio = 0,023866
Estadístico Durbin-Watson = 2,0236 (P=0,5505)
Autocorrelación residual de Lag 1 = -0,0538535

El estadístico R^2 indica que el modelo, explica el 83,0408 % de la variabilidad de R_{term} . El estadístico R^2_{ajustada} es 82,2796 %. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 0,034727. El error absoluto medio (MAE) de 0,023866 es el valor promedio de los residuos.

Si se atiende a los p-valor y la razón-F se aprecia que las únicas variables estadísticamente significativas a la hora de explicar la variabilidad de R_{term} son la temperatura ambiente (T_{amb}) y la carga ($Carga$), no teniendo gran relevancia sus productos cruzados.

Si se hace el análisis prescindiendo de la organización por bloques el valor de R^2 desciende hasta un 5,6 %. Esto es debido a la influencia de los bloques, lo que indica que el tipo de sustancia y, por tanto, sus propiedades termofísicas, analizadas en la regresión lineal, son fundamentales para entender la transferencia de calor en un termosifón. Sin embargo, hay que hacer notar que si se prescinde de los bloques, el modelo no cambia, los efectos siguen siendo los mismos. El estudio se hace por tanto considerando la organización por bloques.

El gráfico de Pareto que se muestra a continuación corrobora el análisis realizado anteriormente. Los efectos más importantes sobre la resistencia térmica, R_{term} , corresponden a la T_{amb} y a la *Carga*, pudiendo despreciarse los productos cruzados entre ambas variables (AA, AB y BB). De todas formas se dejan en el modelo, ya que no se busca una fórmula que permita estimar con la mayor exactitud posible el valor de R_{term} . Lo que se pretende con esta modelización es conocer orientativamente para qué condiciones de carga y temperatura el termosifón trabaja de manera óptima.

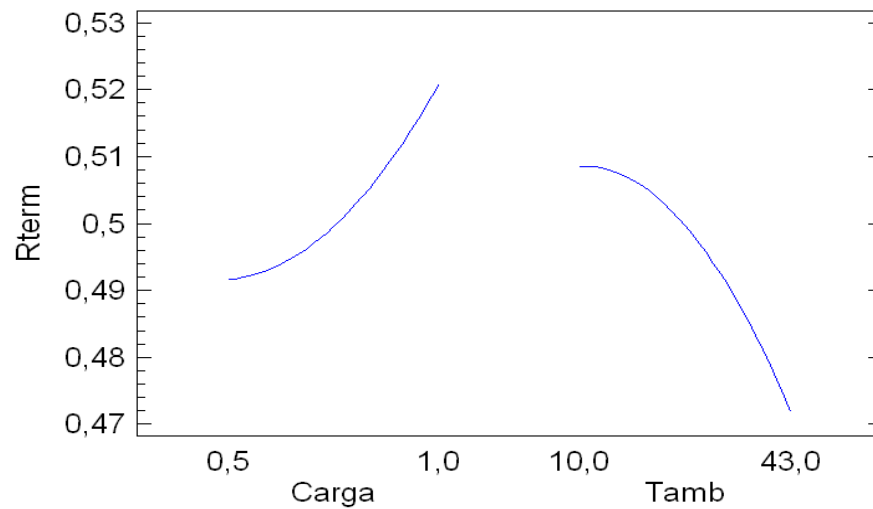


Gráfica 7.86: Gráfico de Pareto.

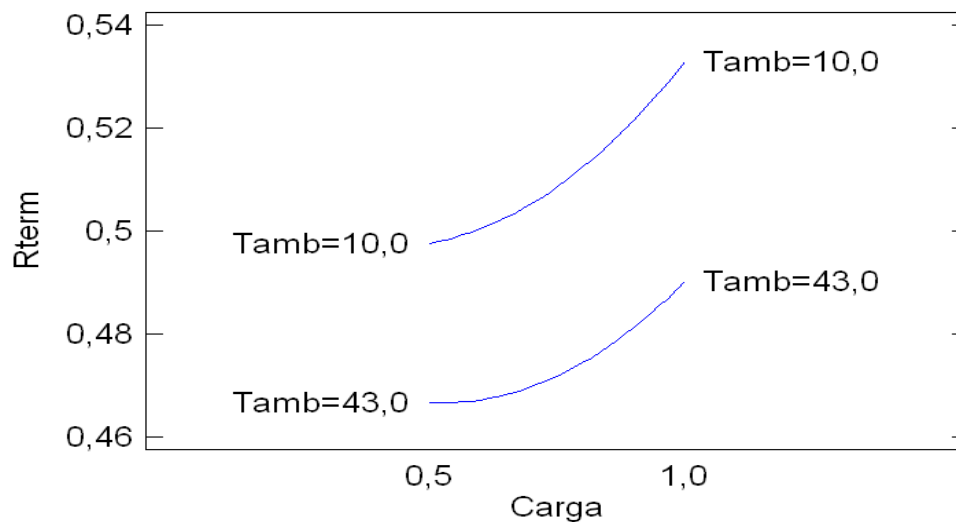
En la siguiente gráfica se muestra cómo varía R_{term} al variar los efectos principales de forma individual (*Carga* y T_{amb}). Esto es, refleja cómo varía R_{term} con la variación de la *Carga* si T_{amb} se mantiene constante y viceversa.

Pueden apreciarse claramente las tendencias. Éstas estarían indicando lo siguiente:

- R_{term} es directamente proporcional al nivel de carga: al aumentar el volumen de fluido en el interior del termosifón aumenta el valor de la resistencia térmica y empeora, en consecuencia, la transferencia de calor.
- R_{term} es inversamente proporcional a la temperatura ambiente: al aumentar ésta la resistencia térmica disminuye mejorando la transmisión de calor.

Gráfica de Efectos Principales para R_{term} **Gráfica 7.87:** Gráfica de efectos principales.

La gráfica de interacción que puede verse a continuación, analiza cómo varía R_{term} al variar conjuntamente ambos efectos.

Gráfica de Interacción para R_{term} **Gráfica 7.88:** Gráfica de interacción.

Como cabía esperar, la resistencia térmica disminuye con el aumento de temperatura, la curva de 10 °C se sitúa más arriba que la de 43 °C, y aumenta con el nivel de carga; las curvas “isotermas” son ascendentes.

d) Resultados

Tras haber realizado la validación del modelo y haber explicado sus características y las de las variables que lo constituyen, se presentan los resultados y su interpretación.

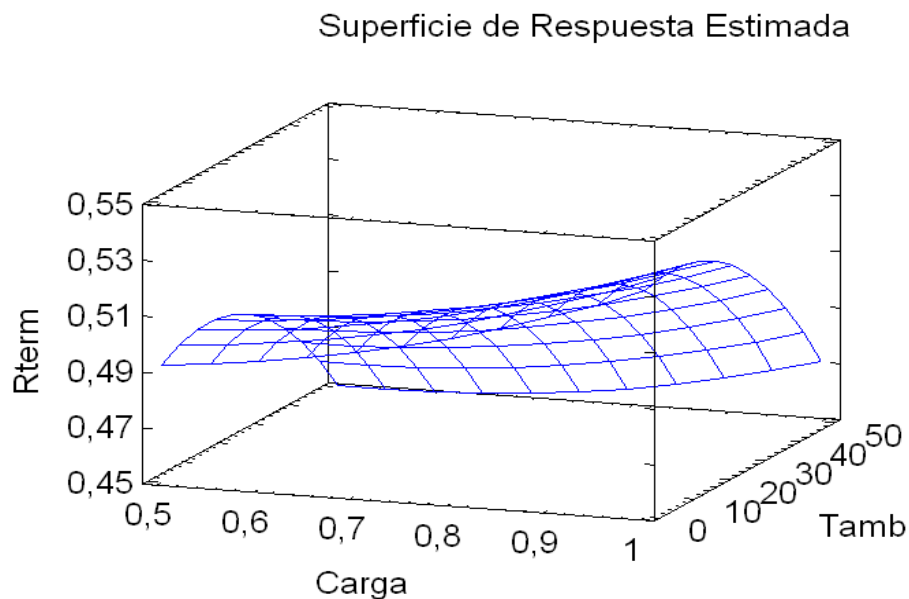
d.1. Ecuación de regresión

La ecuación resultante es:

$$R_{\text{term}} = 0,506546 - 0,0821891 \cdot \text{Carga} + 0,00125804 \cdot T_{\text{amb}} + 0,106462 \cdot \text{Carga}^2 - 0,000712499 \cdot \text{Carga} \cdot T_{\text{amb}} - 0,0000346575 \cdot T_{\text{amb}}^2 \quad (7.15)$$

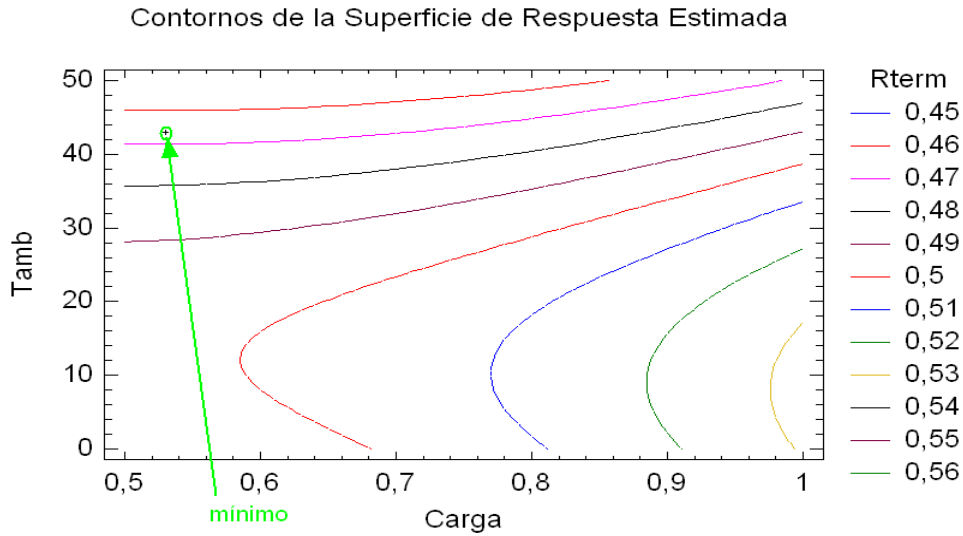
d.2. Superficie de respuesta

Muestra, en tres dimensiones, cómo es la variación estimada de R_{term} con la variación de las variables Carga y T_{amb} . Se trata de la representación gráfica de la ecuación de regresión. Esta superficie de respuesta es útil para visualizar el óptimo, en este caso el mínimo de R_{term} , y el comportamiento del modelo.



Gráfica 7.89: Superficie de respuesta.

Otra gráfica que ayuda a comprender el comportamiento del modelo son los contornos de la superficie de respuesta. De hecho permite localizar, de forma más clara, los valores de las variables de entrada para los que se alcanza el valor óptimo.



Gráfica 7.90: Contornos de la superficie de respuesta.

Se aprecia que el mínimo valor de R_{term} tiene lugar para una *Carga* algo superior a 0,5 (próxima a la carga baja) y una T_{amb} situada en 43 °C, máxima temperatura ambiente contemplada en la experimentación. A continuación se dan los resultados exactos de la optimización.

d.3. Resultado de la optimización

Las gráficas de la superficie de respuesta dan una orientación acerca de dónde se encuentra el óptimo. Sin embargo, Statgraphics saca también el resultado exacto de dicha optimización; de esta forma se tiene:

Tabla 7.69: Resultado de la optimización

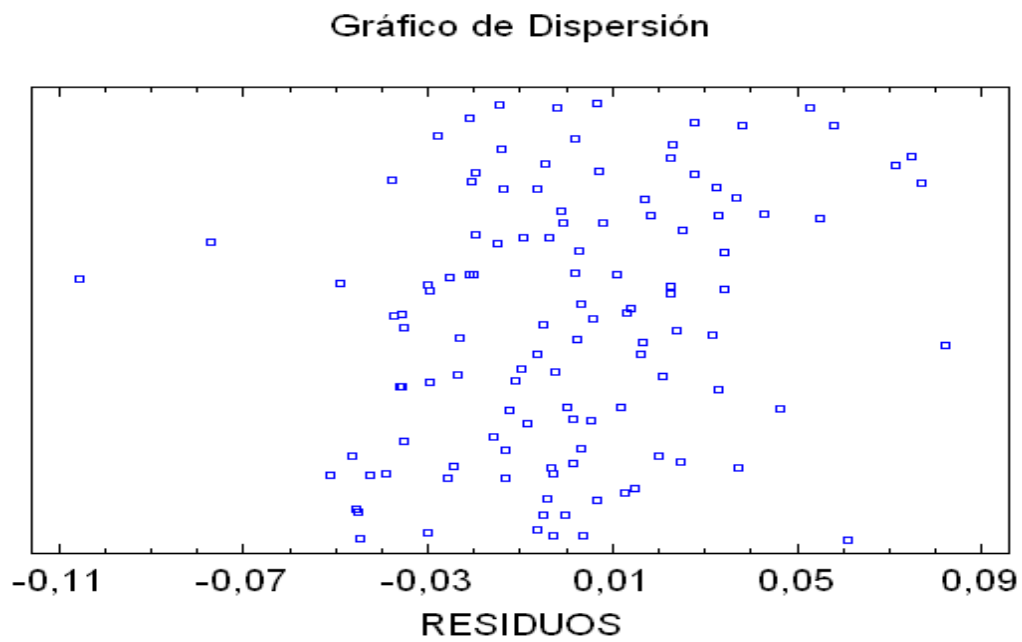
Optimizar Respuesta			
Meta: minimizar Rterm			
Valor óptimo = 0,466667			
<i>Factor</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	<i>Óptimo</i>
Carga	0,5	1,0	0,529855
Tamb	10,0	43,0	43,0

Como se puede apreciar, el valor óptimo para R_{term} es 0,467, y se alcanza para un valor de $Carga = 0,53$ (cercana a la carga más baja) y una $T_{amb} = 43$ °C.

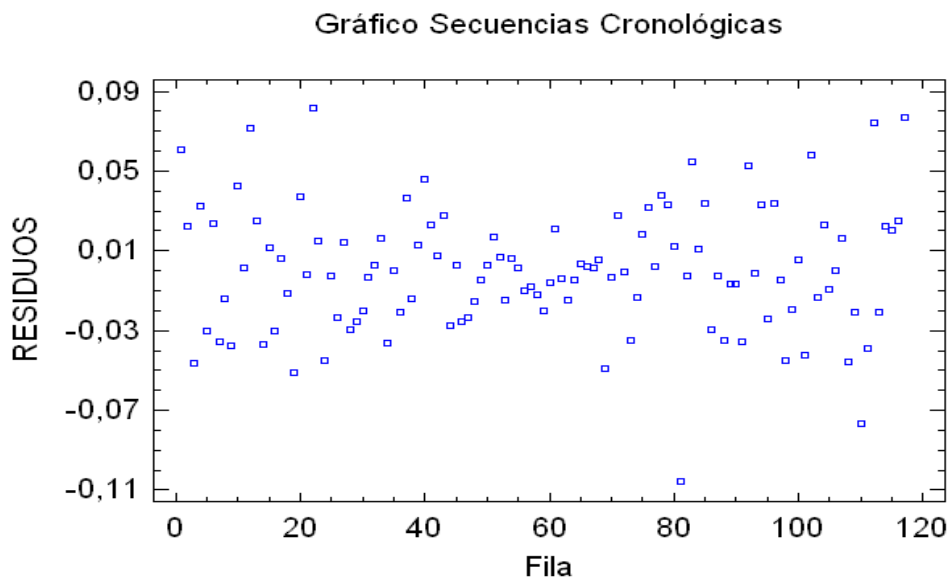
e) Diagnóstico del modelo

Se realiza un estudio de los residuos para terminar de confirmar que el modelo es adecuado.

a) Gráficos de dispersión.



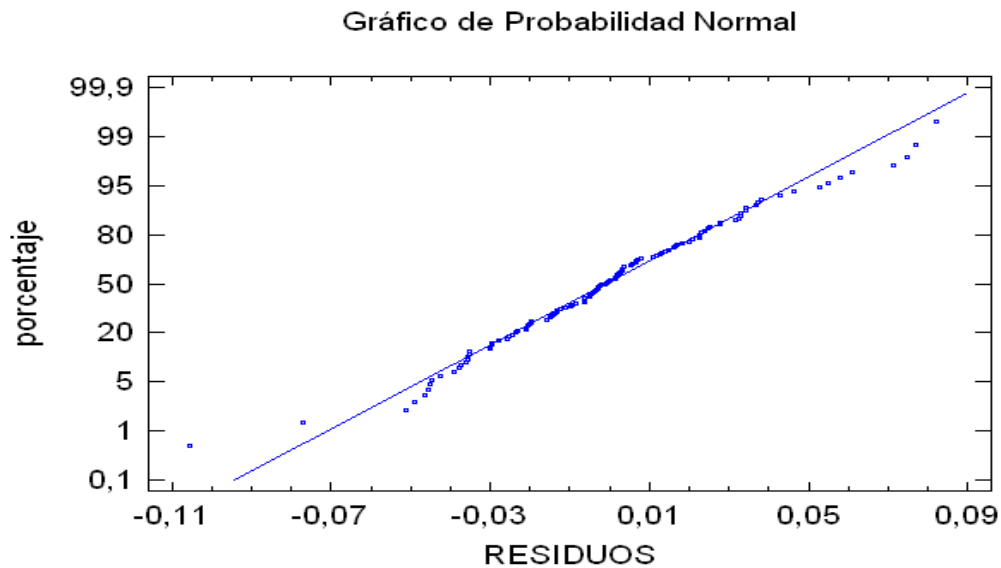
Gráfica 7.91: Gráfico de dispersión.



Gráfica 7.92: Gráfico de secuencias cronológicas.

No hay tendencias ni agrupaciones especiales; los residuos son aleatorios, no les influye el orden en que se han introducido los datos. Esto último también se puede saber observando el valor del estadístico Durbin-Watson = 2,0236 (tabla 7.68) que al estar próximo a 2 confirma la interpretación hecha para el gráfico.

b) Percentiles de la distribución normal –QQ-norms



Gráfica 7.93: Gráfico de probabilidad normal.

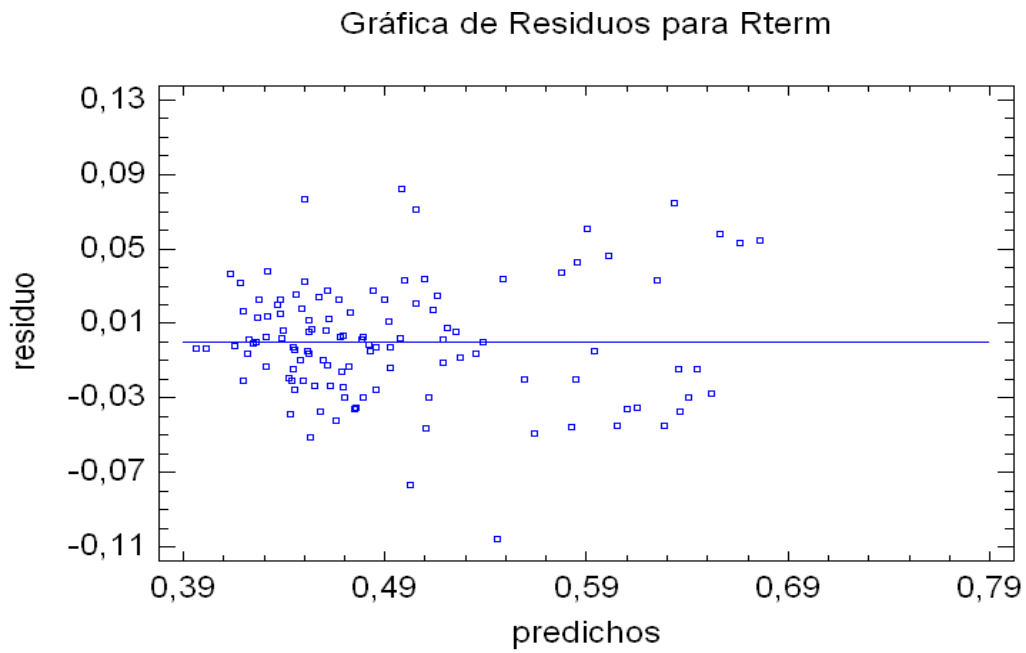
Los residuos parecen ajustarse bastante bien a la distribución normal. Esto lo corroboran los valores que arrojan el sesgo estandarizado y la curtosis; ambos están dentro del rango (-2,2).

Tabla 7.70: Validación del modelo de distribución normal.

Sesgo Estandarizado	0,318094
Curtosis Estandarizada	1,79611

c) Gráficos de los residuales frente a los valores ajustados.

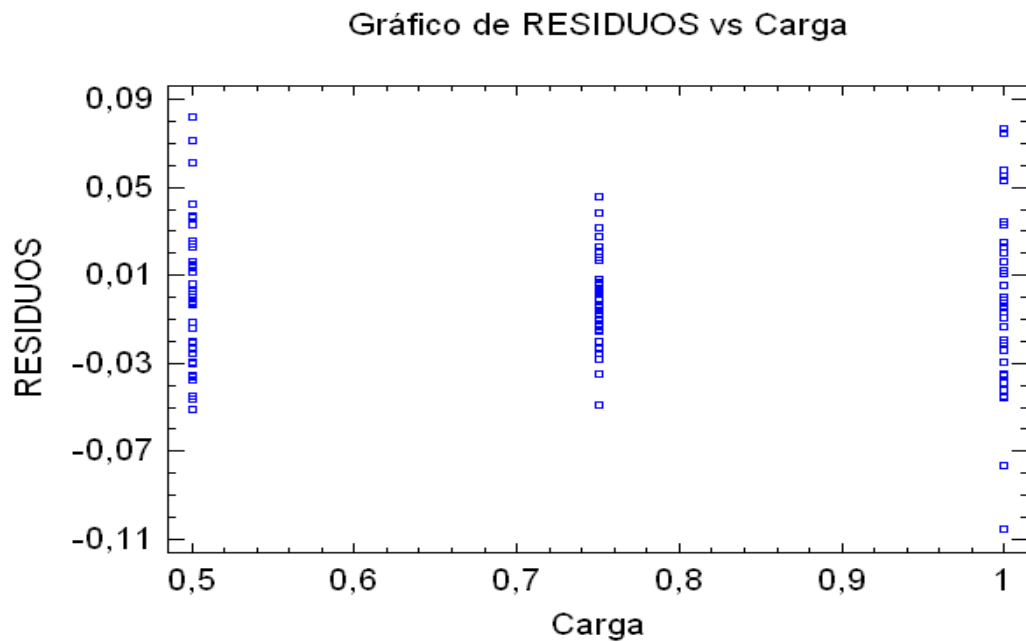
No se aprecian agrupaciones de datos ni una tendencia concreta que revele heterocedasticidad (varianza no constante). No se observan tampoco puntos anómalos.



Gráfica 7.94: Gráfica de residuos frente a valores predichos.

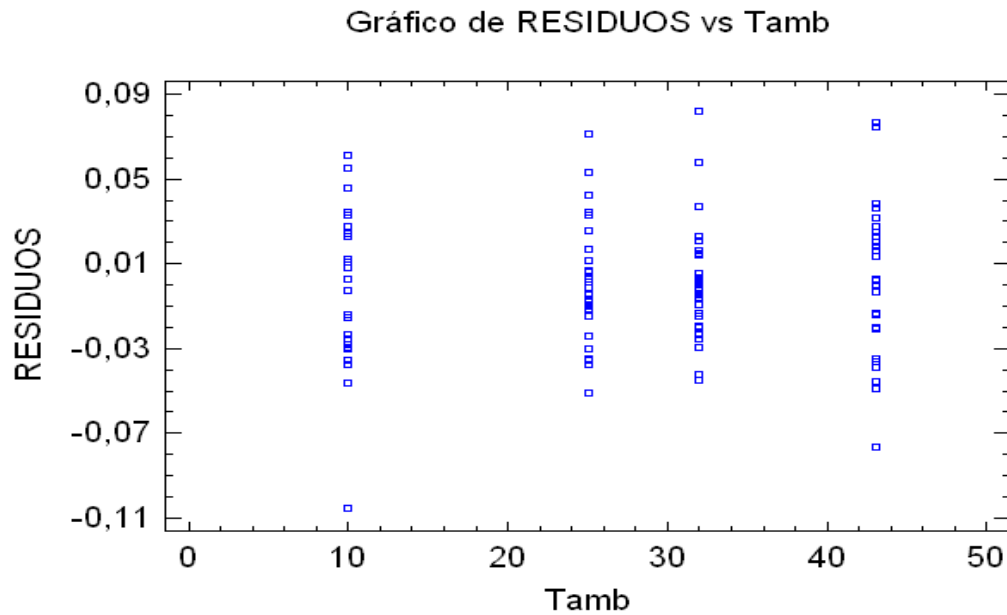
d) Gráficos de los residuales frente a factores principales

d.1.) Residuales frente a *Carga*



Gráfica 7.95: Gráfico de residuos frente al nivel de carga.

d.2.) Residuales frente a T_{amb}



Gráfica 7.96: Gráfico de residuos frente a la temperatura ambiente.

No se observan puntos con residuos especialmente elevados ni una tendencia clara que desmienta la aleatoriedad de su distribución.

La conclusión final de este estudio sería que para el termosifón prismático con control de potencia (CCP) sí que son influyentes las variables *Carga* y T_{amb} . Aun así hay que tener presente la gran importancia que presenta la organización por bloques, y en consecuencia el tipo de sustancia, en el poder explicativo sobre la resistencia térmica: prescindiendo de los bloques R^2 disminuye desde un valor del 83,0% (con bloques) hasta el 5,6%.

7.5.4. Estudio de superficie de respuesta para el conjunto de los termosifones

Se toma el conjunto de datos de todos los termosifones para su análisis de superficie de respuesta, a excepción del termosifón prismático de aluminio sin control de potencia (SCP), al igual que se hizo para la regresión múltiple y por las mismas razones. Así pues, este estudio global registra las observaciones de cuatro termosifones: t. acero pequeño, t. cobre, t. acero grande y el ya citado t. aluminio prismático CCP.

Tabla 7.73: Bloques planteados para el estudio de superficie de respuesta.

Bloque	Sustancia
1	Acetona
2	Agua
3	Ciclopentano
4	Dietil éter
5	Etanal
6	Metanoato de metilo
7	Isopentano
8	Metanol
9	N-Hexano
10	N-Pentano
11	Perfluoroheptano
12	Propanal
13	R-141b
14	R-365mfc
15	Acetona + Pentano
16	Ciclopentano + Metanol
17	Dietil éter + Metanoato de metilo

Las tablas no se convierten a escala logarítmica. Se va a trabajar con una expresión polinómica para construir la superficie de respuesta, por tanto se emplearán los datos originales sin modificar.

b) Análisis de correlaciones

No se han detectado correlaciones relevantes entre las variables explicativas, por lo que la interpretación de los estadísticos del modelo podrá hacerse sin dificultad.

Tabla 7.74: Matriz de correlación para los efectos estimados.

		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
(1)	promedio	1,0000	-0,0693	-0,0031	-0,0670	-0,3808	-0,0017	-0,0230
(2)	A:Termosifón+bloque	-0,0693	1,0000	0,0038	-0,0520	0,7540	0,0021	-0,0746
(3)	B:Carga+bloque	-0,0031	0,0038	1,0000	0,0007	0,0107	0,5505	0,0012
(4)	C:Tamb+bloque	-0,0670	-0,0520	0,0007	1,0000	-0,0102	-0,0001	0,5566
(5)	AA+bloque	-0,3808	0,7540	0,0107	-0,0102	1,0000	0,0060	-0,0115
(6)	AB	-0,0017	0,0021	0,5505	-0,0001	0,0060	1,0000	0,0004
(7)	AC+bloque	-0,0230	-0,0746	0,0012	0,5566	-0,0115	0,0004	1,0000
(8)	BB+bloque	-0,5639	-0,0019	-0,0080	0,0003	-0,0053	-0,0044	-0,0003
(9)	BC+bloque	0,0013	0,0014	-0,0852	-0,0140	0,0020	-0,0136	-0,0076
(10)	CC+bloque	-0,4591	0,0128	-0,0043	0,0370	0,0127	-0,0025	-0,0149
(11)	bloque	-0,0963	-0,0878	0,0028	0,0067	-0,0285	0,0015	0,0059

c) Validación del modelo

A continuación se muestra la salida de Statgraphics.

Tabla 7.75: Validación del modelo de superficie de respuesta.

Análisis de Varianza para Rterm					
<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A:Termosifón+bloque	5,06943	1	5,06943	1458,47	0,0000
B:Carga+bloque	0,00600804	1	0,00600804	1,73	0,1892
C:Tamb+bloque	0,0149271	1	0,0149271	4,29	0,0387
AA+bloque	4,41706	1	4,41706	1270,79	0,0000
AB	0,00326676	1	0,00326676	0,94	0,3327
AC+bloque	0,00127641	1	0,00127641	0,37	0,5448
BB+bloque	0,0000853584	1	0,0000853584	0,02	0,8755
BC+bloque	0,000297524	1	0,000297524	0,09	0,7700
CC+bloque	0,00137563	1	0,00137563	0,40	0,5295
bloques	0,316214	16	0,0197634	5,69	0,0000
Error total	1,88739	543	0,00347585		
Total (corr.)	8,09064	568			

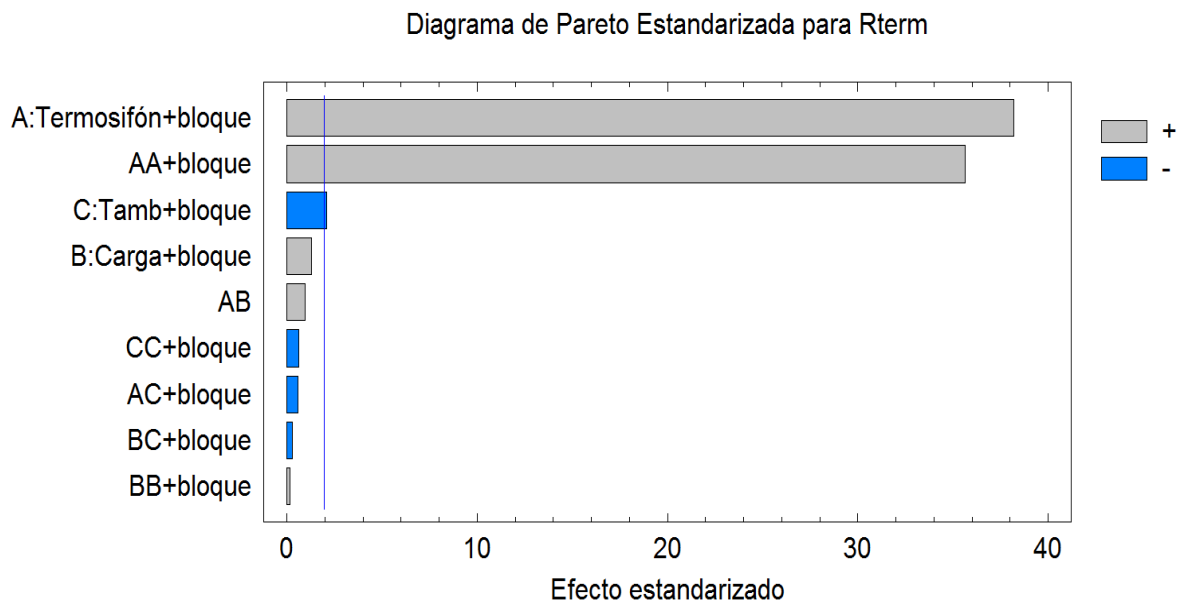
R-cuadrada = 76,672 por ciento
 R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 76,2964 por ciento
 Error estándar del est. = 0,0589563
 Error absoluto medio = 0,0450684
 Estadístico Durbin-Watson = 1,03976 (P=0,0000)
 Autocorrelación residual de Lag 1 = 0,4789

El estadístico R^2 indica que el modelo, explica el 76,672 % de la variabilidad de R_{term} . El estadístico R^2_{ajustada} es 76,2964 %. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 0,0589563. El error absoluto medio (MAE) de 0,0450684 es el valor promedio de los residuos.

Si se atiende a los p-valor y la razón-F se aprecia que las únicas variables estadísticamente significativas a la hora de explicar la variabilidad de R_{term} son el tipo de termosifón junto con su producto cruzado y la temperatura ambiente T_{amb} , no teniendo gran relevancia ni el factor carga ni el resto de productos cruzados.

Si se hace el análisis prescindiendo de la organización por bloques el valor de R^2 desciende algo hasta un 72,7636 %. La caída en el valor de R^2 no es tan acusada como en el análisis individual de cada termosifón. Esto se explica debido a la gran relevancia que tiene el tipo de termosifón en los valores de R_{term} , cada uno de ellos se mueve en un rango de valores bastante diferenciado. Así pues puede concluirse que el tipo de sustancia (y las propiedades termofísicas que involucra) pasa a un segundo plano en este estudio global y lo que realmente está influyendo en los valores de resistencia térmica son las características de los termosifones (forma, tamaño y material).

El gráfico de Pareto que se muestra a continuación corrobora el análisis realizado anteriormente. Los efectos más importantes sobre la resistencia térmica, R_{term} , corresponden al tipo de *Termosifón* (y su producto cruzado AA) y a la T_{amb} , pudiendo desprejarse la *Carga* y el resto de productos. De todas formas se dejan en el modelo, ya que no se busca una fórmula que permita estimar con la mayor exactitud posible el valor de R_{term} . Lo que se pretende con esta modelización es conocer orientativamente para qué condiciones de carga y temperatura los termosifones trabajan de manera óptima.

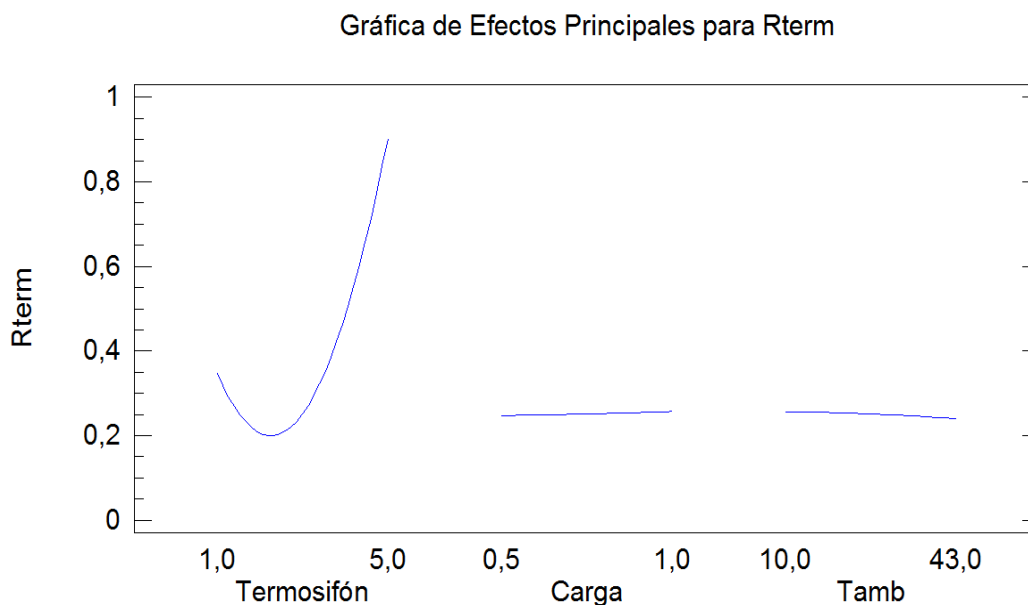


Gráfica 7.97: Gráfico de Pareto.

En la siguiente gráfica se muestra cómo varía R_{term} al variar los efectos principales de forma individual (*Carga* y T_{amb}). Esto es, refleja cómo varía R_{term} con la variación de la *Carga* si T_{amb} se mantiene constante y viceversa.

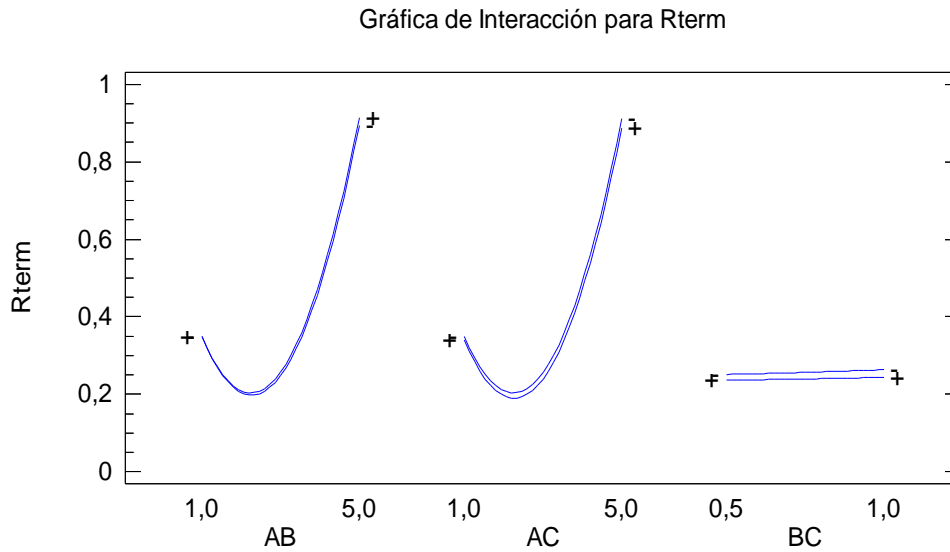
Pueden apreciarse claramente las tendencias. Éstas estarían indicando lo siguiente:

- La mayor variación en los valores de R_{term} tiene lugar con la variable *Termosifón*. No puede analizarse la tendencia (la forma de su curva) ya que, a pesar de presentar una forma continua, realmente se trata de una variable discreta que identifica a cada termosifón con un valor entero de 1 a 4. Lo que sí que puede deducirse es que el mínimo que presenta la curva corresponde al termosifón de acero grande mientras que los valores máximos corresponden al termosifón prismático de aluminio CCP.
- R_{term} es directamente proporcional al nivel de carga: al aumentar el volumen de fluido en el interior del termosifón aumenta el valor de la resistencia térmica y empeora, en consecuencia, la transferencia de calor. Esta variación es muy leve en comparación con la que se tiene con la variable *Termosifón*.
- R_{term} es inversamente proporcional a la temperatura ambiente: al aumentar ésta la resistencia térmica disminuye mejorando la transmisión de calor. Al igual que pasaba anteriormente con la *Carga*, esta variación es muy leve en comparación con la que se tiene con la variable *Termosifón*.



Gráfica 7.98: Gráfica de efectos principales.

La gráfica de interacción que puede verse a continuación, analiza cómo varía R_{term} al variar conjuntamente dos efectos mientras el tercero se mantiene constante.



Gráfica 7.99: Gráfica de interacción.

d) Resultados

Tras haber realizado la validación del modelo y haber explicado sus características y las de las variables que lo constituyen, se presentan los resultados y su interpretación.

d.1. Ecuación de regresión

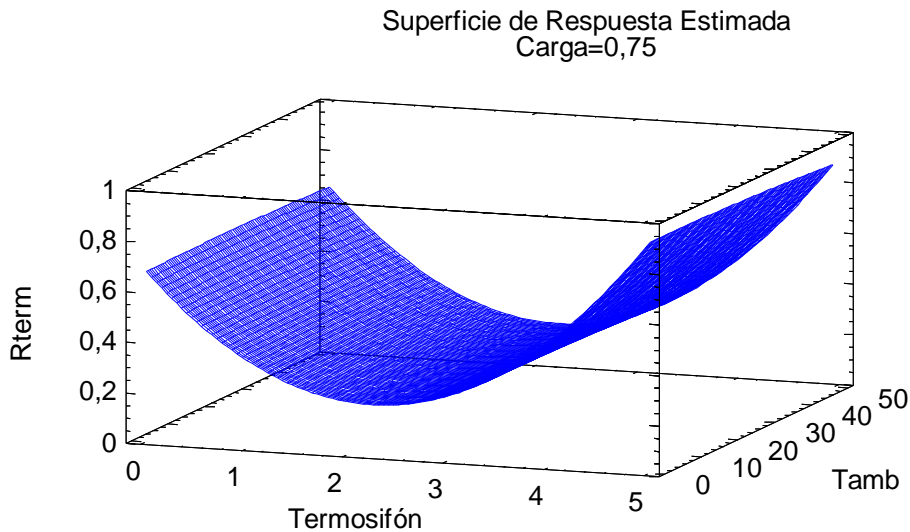
La ecuación resultante es:

$$\begin{aligned}
 R_{\text{term}} = & 0,684651 - 0,427996 \cdot \text{Termosifón} - 0,0247762 \cdot \text{Carga} + 0,000694032 \cdot T_{\text{amb}} \\
 & + 0,0131259 \cdot \text{Carga}^2 - 0,000296875 \cdot \text{Carga} \cdot T_{\text{amb}} - 0,0000121276 \cdot T_{\text{amb}}^2 - \\
 & 0,000115059 \cdot \text{Termosifón} \cdot T_{\text{amb}} + 0,0107172 \cdot \text{Termosifón} \cdot \text{Carga} + \\
 & 0,0936524 \cdot \text{Termosifón}^2
 \end{aligned} \quad (7.16)$$

d.2. Superficie de respuesta

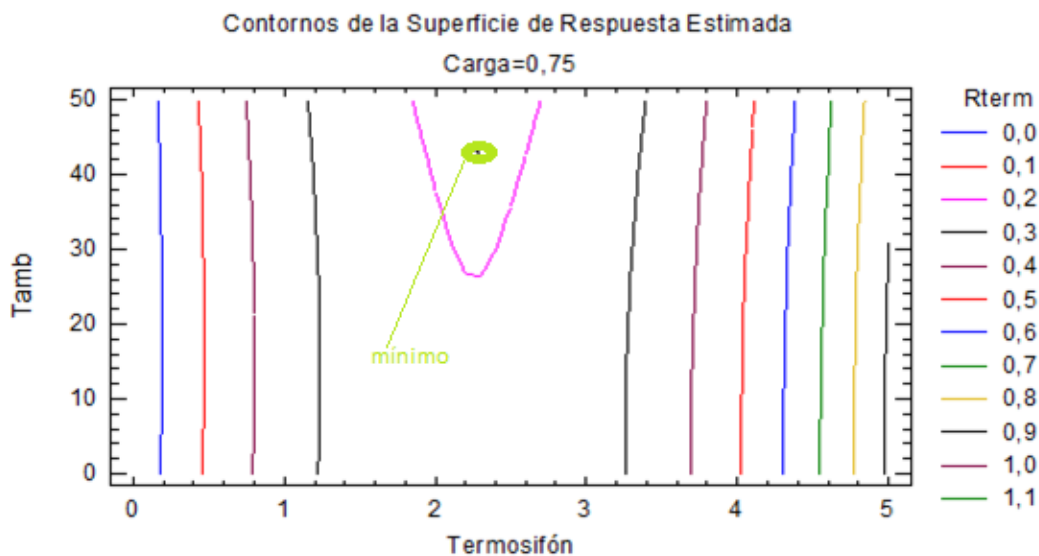
No puede representarse una superficie de respuesta con tres factores independientes, ya que esto queda limitado por las tres dimensiones que puede presentar. En su defecto, lo que se va a hacer es representar la superficie de respuesta para las variables *Termosifón* y T_{amb}

con un valor de *Carga* constante. Se escoge de esta forma, ya que del estudio previo se ha deducido que el nivel de carga no es un factor importante en la variabilidad de la resistencia térmica.



Gráfica 7.100: Superficie de respuesta con *Carga* = 0,75.

Otra gráfica que ayuda a comprender el comportamiento del modelo son los contornos de la superficie de respuesta. De hecho permite localizar, de forma más clara, los valores de las variables de entrada para los que se alcanza el valor óptimo. Se toman de nuevo las variables *Terminosifón* y *Tamb* manteniendo constante el valor de *Carga* en 0,75.



Gráfica 7.101: Gráfica de contornos de la superficie de respuesta.

Se aprecia que el mínimo valor de R_{term} tiene lugar para una T_{amb} situada en los 43°C, máxima temperatura ambiente contemplada en la experimentación, y para el termosifón 2 (termosifón cilíndrico de cobre). A continuación se ofrecen los resultados exactos de la optimización.

d.3. Resultado de la optimización

Las gráficas de la superficie de respuesta dan una orientación acerca de dónde se encuentra el óptimo. Sin embargo, Statgraphics saca también el resultado exacto de dicha optimización; de esta forma se obtiene:

Tabla 7.76: Resultado de la optimización.

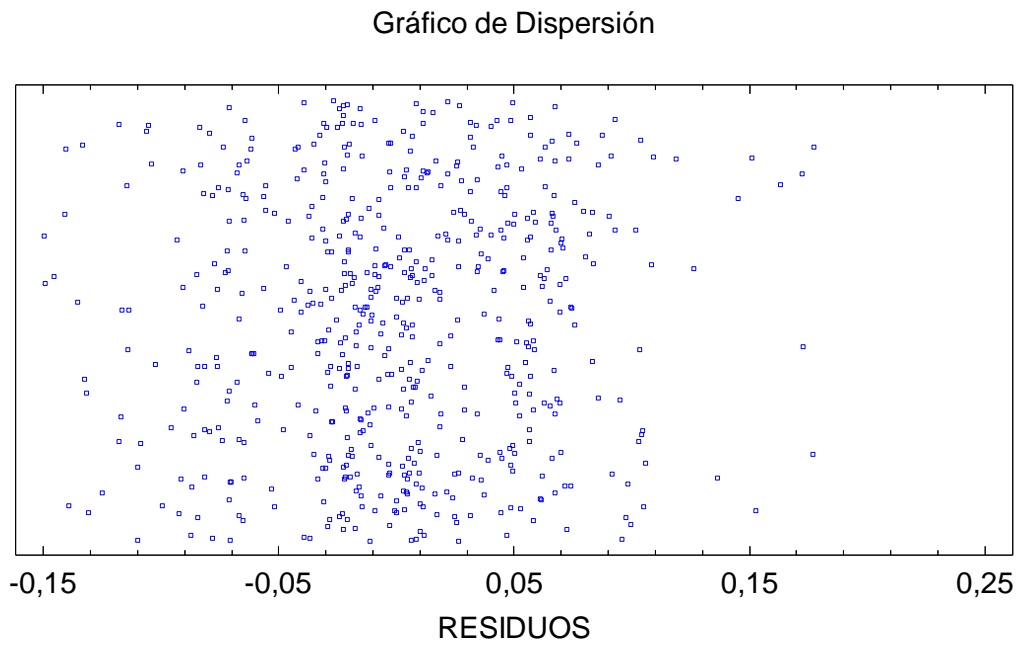
Optimizar Respuesta			
Meta: minimizar Rterm			
Valor óptimo = 0,188533			
<i>Factor</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	<i>Óptimo</i>
Termosifón	1,0	4,0	2,28177
Carga	0,5	1,0	0,512545
Tamb	10,0	43,0	43,0

Como se puede apreciar, el valor óptimo para R_{term} es 0,189, y se alcanza para el termosifón 2, el valor 2,28 no tiene lógica ya que no es una variable continua, correspondiente al termosifón de cobre, para un valor de $Carga = 0,51$ (cerca a la carga más baja) y para una $T_{\text{amb}} = 43$ °C.

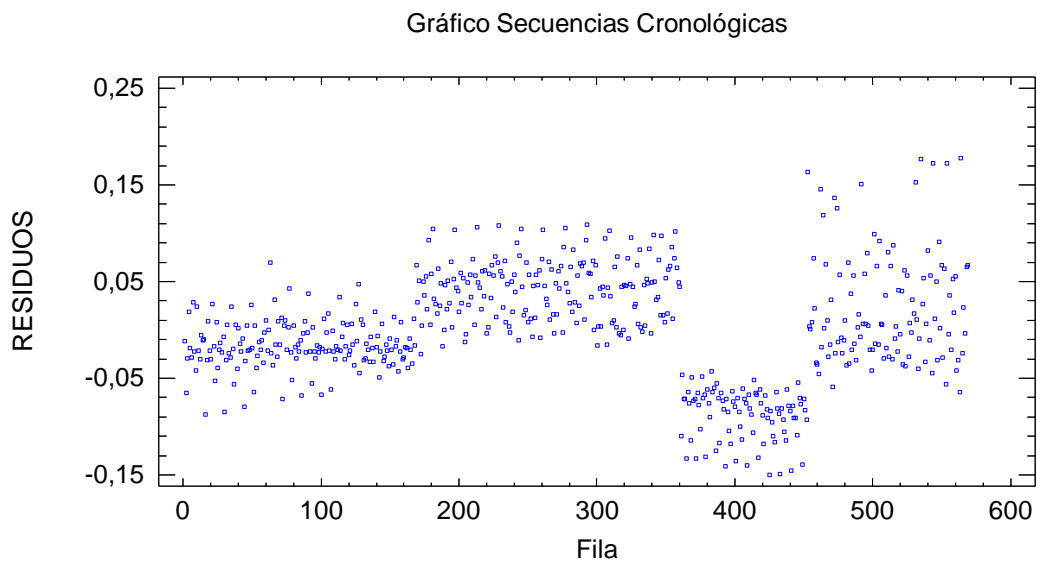
e) Diagnósis del modelo

Se realiza un estudio de los residuos para terminar de confirmar que el modelo es adecuado.

a) Gráficos de dispersión.



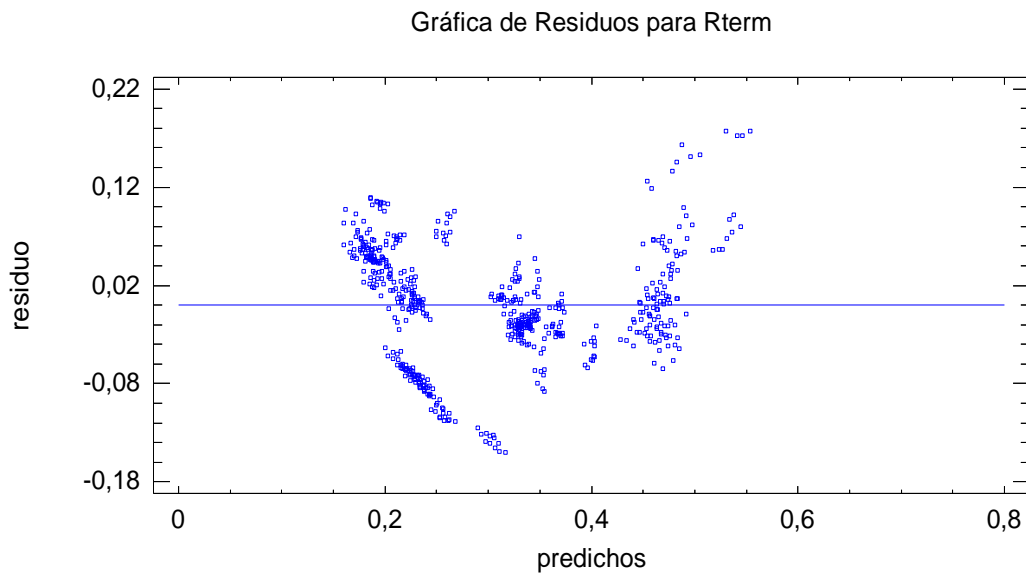
Gráfica 7.102: Gráfica de dispersión.



Gráfica 7.103: Gráfico de secuencias cronológicas.

En esta última gráfica de secuencias cronológicas se aprecian agrupaciones de puntos que corresponden a los cuatro termosifones en estudio; estas agrupaciones están indicando que los datos no se han introducido de forma aleatoria, y que hay diferencia entre los residuos de unos termosifones y otros. La no aleatoriedad de los residuales puede descubrirse también observando el valor del estadístico Durbin-Watson = 1,03976 (tabla 7.75) que al estar alejado del valor 2 confirma la interpretación hecha para el gráfico. Este fenómeno se corregiría introduciendo los datos en otro orden, pero el análisis no cambiaría en nada, únicamente mejoraría el valor de este estadístico y la apariencia del gráfico de secuencias cronológicas.

b) Gráficos de los residuales frente a los valores ajustados.

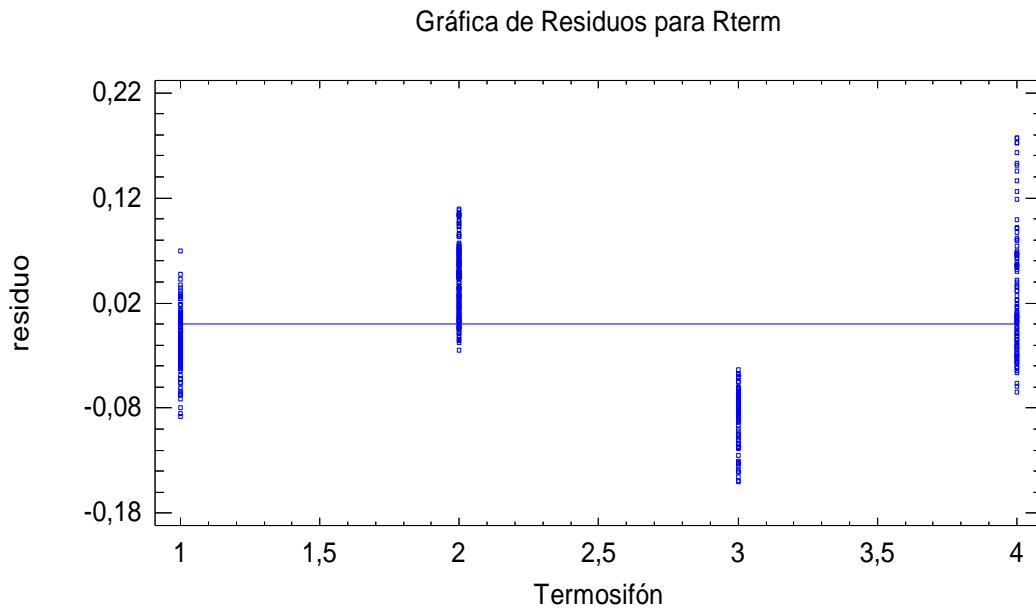


Gráfica 7.104: Gráfica de residuos frente a valores predichos.

Aparecen las agrupaciones por termosifón que ya se han analizado anteriormente.

c) Gráficos de los residuales frente a factores principales

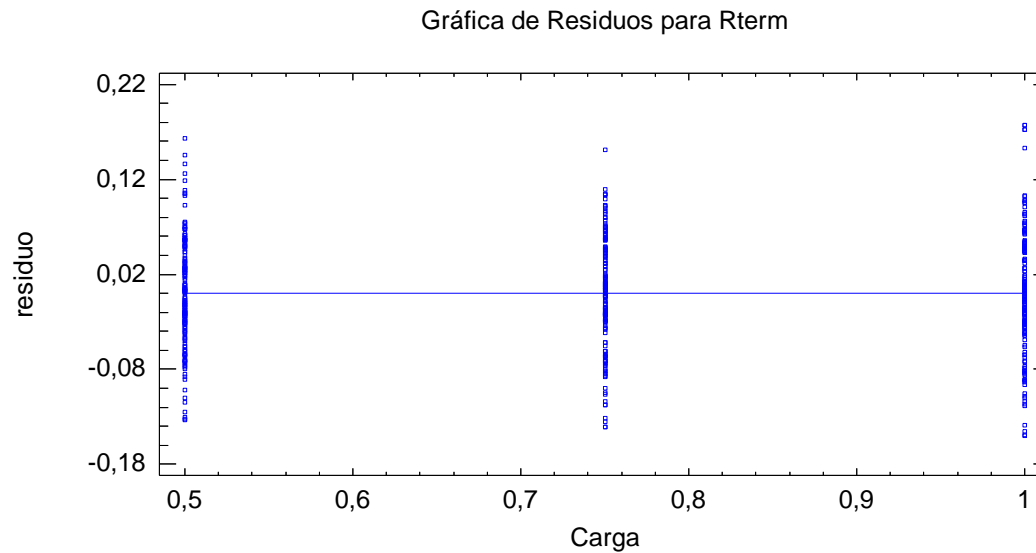
c.1.) Residuales frente a *Termosifón*



Gráfica 7.105: Gráfica de residuos frente al tipo de termosifón.

Se aprecian diferencias notables entre los residuos de los distintos termosifones, tal y como se podía predecir del gráfico de secuencias cronológicas (gráfica 7.103).

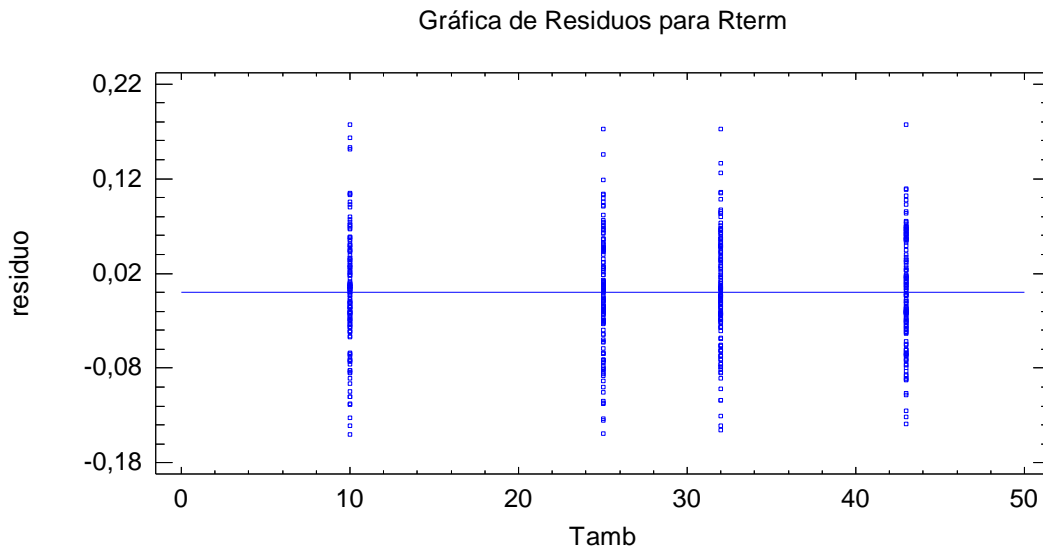
c.2.) Residuales frente a *Carga*



Gráfica 7.106: Gráfica de residuos frente al nivel de carga.

En esta gráfica no se aprecian agrupaciones de ningún tipo en los residuos, su distribución es muy homogénea para cada uno de los niveles de carga.

c.3.) Residuales frente a T_{amb}



Gráfica 7.107: Gráfica de residuos frente a la temperatura ambiente.

En esta gráfica tampoco se aprecian agrupaciones de ningún tipo en los residuos, su distribución es muy homogénea para cada una de las temperaturas ensayadas.

La conclusión final de este estudio sería que para el conjunto de termosifones la única variable influyente sobre la resistencia térmica, además del propio tipo de termosifón, es la temperatura ambiente. Otro aspecto a destacar es que al prescindir de los bloques que caracterizan a cada una de las 14 sustancias ensayadas, los valores de R^2 no se ven reducidos significativamente, pasa de 76,7 % a 72,8 %, como sí ocurre en los estudios individuales; esto se explica debido a la gran relevancia que tiene el tipo de termosifón en los valores de R_{term} , cada uno de ellos se mueve en un rango de valores bastante diferenciado. Así pues, puede concluirse que el tipo de sustancia pasa a un segundo plano en este estudio global y lo que realmente influye en los valores de resistencia térmica son las características constructivas de los termosifones (forma, tamaño y material).

7.5.5. Resultados del estudio de superficie de respuesta

En la tabla 7.77 se dan los resultados de los 6 análisis de superficie de respuesta realizados. Los números entre paréntesis que acompañan a cuatro termosifones corresponden con los valores que les han sido asignados para el análisis de superficie de respuesta en conjunto.

Tabla 7.77: Resultados de los análisis de superficie de respuesta.

T. acero pequeño (1)	T. cobre (2)	T. acero grande (3)																																								
Valor mínimo $R_{term} = 0,315$ <table border="1"> <thead> <tr> <th><i>Factor</i></th> <th><i>Bajo</i></th> <th><i>Alto</i></th> <th><i>Óptimo</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Carga</td> <td>0,5</td> <td>1,0</td> <td>1,0</td> </tr> <tr> <td>Tamb</td> <td>10,0</td> <td>43,0</td> <td>43,0</td> </tr> </tbody> </table>	<i>Factor</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	<i>Óptimo</i>	Carga	0,5	1,0	1,0	Tamb	10,0	43,0	43,0	Valor mínimo $R_{term} = 0,243$ <table border="1"> <thead> <tr> <th><i>Factor</i></th> <th><i>Bajo</i></th> <th><i>Alto</i></th> <th><i>Óptimo</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Carga</td> <td>0,5</td> <td>1,0</td> <td>0,5</td> </tr> <tr> <td>Tamb</td> <td>10,0</td> <td>43,0</td> <td>28,8</td> </tr> </tbody> </table>	<i>Factor</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	<i>Óptimo</i>	Carga	0,5	1,0	0,5	Tamb	10,0	43,0	28,8	Valor mínimo $R_{term} = 0,151$ <table border="1"> <thead> <tr> <th><i>Factor</i></th> <th><i>Bajo</i></th> <th><i>Alto</i></th> <th><i>Óptimo</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Carga</td> <td>0,5</td> <td>1,0</td> <td>0,94</td> </tr> <tr> <td>Tamb</td> <td>10,0</td> <td>43,0</td> <td>43,0</td> </tr> </tbody> </table>	<i>Factor</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	<i>Óptimo</i>	Carga	0,5	1,0	0,94	Tamb	10,0	43,0	43,0				
<i>Factor</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	<i>Óptimo</i>																																							
Carga	0,5	1,0	1,0																																							
Tamb	10,0	43,0	43,0																																							
<i>Factor</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	<i>Óptimo</i>																																							
Carga	0,5	1,0	0,5																																							
Tamb	10,0	43,0	28,8																																							
<i>Factor</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	<i>Óptimo</i>																																							
Carga	0,5	1,0	0,94																																							
Tamb	10,0	43,0	43,0																																							
T. prismático SCP	T. prismático CCP (4)	Termosifones en conjunto																																								
Valor mínimo $R_{term} = 0,445$ <table border="1"> <thead> <tr> <th><i>Factor</i></th> <th><i>Bajo</i></th> <th><i>Alto</i></th> <th><i>Óptimo</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Carga</td> <td>0,5</td> <td>1,0</td> <td>0,5</td> </tr> <tr> <td>Tamb</td> <td>10,0</td> <td>43,0</td> <td>38,6</td> </tr> </tbody> </table>	<i>Factor</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	<i>Óptimo</i>	Carga	0,5	1,0	0,5	Tamb	10,0	43,0	38,6	Valor mínimo $R_{term} = 0,467$ <table border="1"> <thead> <tr> <th><i>Factor</i></th> <th><i>Bajo</i></th> <th><i>Alto</i></th> <th><i>Óptimo</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Carga</td> <td>0,5</td> <td>1,0</td> <td>0,53</td> </tr> <tr> <td>Tamb</td> <td>10,0</td> <td>43,0</td> <td>43,0</td> </tr> </tbody> </table>	<i>Factor</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	<i>Óptimo</i>	Carga	0,5	1,0	0,53	Tamb	10,0	43,0	43,0	Valor óptimo = 0,189 <table border="1"> <thead> <tr> <th><i>Factor</i></th> <th><i>Bajo</i></th> <th><i>Alto</i></th> <th><i>Óptimo</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Termosifón</td> <td>1,0</td> <td>4,0</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>Carga</td> <td>0,5</td> <td>1,0</td> <td>0,51</td> </tr> <tr> <td>Tamb</td> <td>10,0</td> <td>43,0</td> <td>43,0</td> </tr> </tbody> </table>	<i>Factor</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	<i>Óptimo</i>	Termosifón	1,0	4,0	2	Carga	0,5	1,0	0,51	Tamb	10,0	43,0	43,0
<i>Factor</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	<i>Óptimo</i>																																							
Carga	0,5	1,0	0,5																																							
Tamb	10,0	43,0	38,6																																							
<i>Factor</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	<i>Óptimo</i>																																							
Carga	0,5	1,0	0,53																																							
Tamb	10,0	43,0	43,0																																							
<i>Factor</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	<i>Óptimo</i>																																							
Termosifón	1,0	4,0	2																																							
Carga	0,5	1,0	0,51																																							
Tamb	10,0	43,0	43,0																																							

A la vista de la tabla anterior y de los resultados obtenidos a lo largo del estudio, tanto en este capítulo como en el anexo VII, pueden extraerse varias observaciones importantes:

- El tipo de sustancia es fundamental para explicar el funcionamiento de la tecnología tipo termosifón. Esto queda demostrado al observar que si se prescinde en el estudio de la organización por bloques (que son los que identifican a todas y cada una de las sustancias ensayadas), los valores de R^2 se desploman a valores muy pequeños.
- La temperatura ambiente generalmente influye de forma directa sobre la transferencia de calor; a mayor temperatura menor resistencia térmica tienen los termosifones.

- c) Del nivel de carga no ha podido extraerse una regla general, en ciertas ocasiones ha influido de forma directa sobre la resistencia térmica, en otras lo ha hecho de forma inversa y en alguna ni siquiera era un factor de relevancia.
- d) Cada termosifón se mueve en un rango de valores de resistencia térmica. Por orden de menor a mayor resistencia quedarían clasificados de la siguiente manera:
- 1) Termosifón de cobre (el que menos resistencia térmica presenta).
 - 2) Termosifón de acero grande.
 - 3) Termosifón de acero pequeño.
 - 4) Termosifón prismático (CCP y SCP).

Con este análisis se finaliza este apartado, dedicado al estudio de superficies de respuesta. En el mismo se han estudiado las condiciones de ensayo (tipo de termosifón, temperatura ambiente y nivel de carga) para las que se puede minimizar la resistencia térmica.

7.6. Optimización

Este apartado busca optimizar, o minimizar, el valor de la resistencia térmica empleando la formulación obtenida con la regresión ridge; por tanto, el estudio de optimización va a ser realizado a partir de los valores las propiedades termofísicas de las sustancias.

7.6.1. Introducción a la optimización

La optimización o programación matemática intenta dar respuesta a un tipo general de problemas [17] y [18] donde se desea elegir el mejor entre un conjunto de elementos. En su forma más simple, el problema equivale a resolver una ecuación de este tipo:

$$\max(\min) f(x)$$

$$x \in \Omega \subseteq \mathbb{R}^n$$

Donde $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ es un vector y representa a las variables de decisión, $f(x)$ es la llamada función objetivo y representa, o mide, la calidad de las decisiones (usualmente números enteros o reales) y Ω es el conjunto de puntos o decisiones factibles o restricciones del problema.

Algunas veces es posible expresar el conjunto de restricciones Ω como solución de un sistema de igualdades o desigualdades.

$$\begin{aligned}g(x_1, x_2, \dots, x_n) &\leq 0 \\h(x_1, x_2, \dots, x_n) &= 0\end{aligned}$$

Un problema de optimización trata entonces [19] de tomar una decisión óptima para maximizar (ganancias, velocidad, eficiencia, etc.) o minimizar un criterio determinado (costos, tiempo, riesgo, error, etc.). Las restricciones significan que no es válida cualquier decisión.

La variable que se pretende optimizar y más concretamente minimizar, es la resistencia térmica (R_{term}) a partir de la formulación obtenida con la regresión ridge. De esta forma, la llamada función objetivo es la expresión que relaciona las propiedades termofísicas de las sustancias con la resistencia térmica para cada uno de los termosifones ensayados. Inicialmente se pensó en emplear un programa informático, concretamente Lingo, para conseguir esta optimización [20] y con ello localizar los rangos de valores de las propiedades termofísicas que minimizan el valor de R_{term} . Sin embargo este planteamiento no condujo a ninguna solución factible: era tal el número de variables y los valores de las mismas involucradas en la optimización que el estudio resultó inabordable aún con los potentes medios informáticos de los que se dispusieron. Finalmente, ante la imposibilidad de este análisis detallado se optó por estudiar, a partir de las fórmulas obtenidas en la regresión, la variación de la resistencia térmica, R_{term} , respecto de la temperatura reducida, T_r . El interés de este estudio radica en que T_r es, en última instancia y a la vista de las fórmulas de estimación de propiedades, la que determina el valor de cada propiedad termofísica y se relaciona con la resistencia térmica.

7.6.2. Optimización de las fórmulas obtenidas en la regresión ridge

La optimización, que se va a estudiar en este apartado, parte de la formulación obtenida con la regresión ridge. El conjunto de las fórmulas obtenidas para la regresión ridge está resumido en la tabla 7.58.

Al optimizar estas expresiones, que ahora pasan a denominarse funciones objetivo, se pretende encontrar la combinación de valores de propiedades termofísicas que minimizan el valor de la resistencia térmica.

Los primeros estudios que se realizaron dieron lugar a resultados triviales: las variables situadas en el numerador tomaban el mínimo valor que se les permitía en la acotación y las variables situadas en el denominador tomaban el máximo valor que les otorgaban las restricciones.

Ante este resultado tan obvio se buscó otro camino: expresar las propiedades termofísicas mediante sus fórmulas de estimación. De esta forma R_{term} dejó de estar relacionada directamente con las propiedades de las sustancias para estarlo únicamente con la temperatura reducida, T_r , nexa de todas y cada una de las fórmulas de estimación de propiedades. Es decir, la fórmula hallada por regresión tiene una única variable física, la temperatura crítica.

Para conseguir esto hubo que volver a calcular muchas de las fórmulas de estimación para conseguir expresiones homogéneas que aunasen a todas las sustancias ensayadas. Así pues, las nuevas fórmulas de estimación corresponden con las siguientes:

Densidad del líquido:

$$\rho_l = \rho_c \cdot \exp[A_1 \cdot (1-T_r)^{1/3} + A_2 \cdot (1-T_r)^{2/3} + A_3 \cdot (1-T_r) + A_4 \cdot (1-T_r)^{4/3}], \quad [\text{kg/m}^3]; \quad (7.17)$$

Densidad del vapor:

$$\rho_v = \rho_c \cdot \exp[B_1 \cdot q^{1/3} + B_2 \cdot q^{2/3} + B_3 \cdot q + B_4 \cdot q^{4/3}], \quad [\text{kg/m}^3]; \quad q = \frac{1}{T_r} - 1, \quad (7.18)$$

Entalpía de vaporización:

$$h_{\text{fg}} = D_1 \cdot (1-T_r)^{1/3} + D_2 \cdot (1-T_r)^{2/3} + D_3 \cdot (1-T_r) + D_4 \cdot (1-T_r)^{4/3}, \quad [\text{kJ/kg}]; \quad (7.19)$$

Viscosidad del líquido:

$$\mu_1 = 10^6 \exp[E_1 + E_2 \cdot q^{1/3} + E_3 \cdot q^{4/3} + E_4 \cdot q^{7/3}], \quad [\mu\text{Pa}\cdot\text{s}]; \quad q = \frac{1}{T_r} - 1, \quad (7.20)$$

Conductividad térmica del líquido:

$$k_1 = F_1 \cdot [1 + F_2 \cdot (1 - T_r)^{1/3} + F_3 \cdot (1 - T_r)^{2/3} + F_4 \cdot (1 - T_r)], \quad (\text{mW}/\text{m}\cdot\text{K}); \quad (7.21)$$

Cada sustancia presenta sus propias constantes, que se recogen en el capítulo 3, pero se consigue que todas ellas expresen sus propiedades termofísicas con una formulación homogénea. Eso permite, a posteriori, introducirlas en las expresiones obtenidas por regresión para R_{term} .

Así pues, para la optimización, la función objetivo R_{term} queda expresada en función de las siguientes variables: la temperatura reducida, T_r , y las 20 variables que recogen los valores de las constantes que caracterizan a cada sustancia en las fórmulas de estimación de propiedades (A_{1-4} , B_{1-4} , D_{1-4} , E_{1-4} y F_{1-4}).

Por tanto, el problema de optimización presenta para su minimización una función objetivo que recoge un total de 21 variables que han de ser acotadas. Estas acotaciones se llevaron a cabo de la siguiente manera:

- Para T_r se escogió un mínimo de 0,4 y un máximo de 1, que si crece de centésima en centésima son 60 valores.
- Para las demás variables (A_{1-4} , B_{1-4} , D_{1-4} , E_{1-4} y F_{1-4}), se infirieron sus valores mínimo y máximo de las tablas recogidas en el capítulo 3, que en muchos casos tienen un intervalo de valores superior a 100 unidades, para cada una de las 20 constantes que aparecen en las fórmulas de estimación.

El problema así planteado no se puede resolver, dada su magnitud, por aplicación de un programa informático debido al muy elevado número de cálculos a realizar. De hecho se puso al programa Lingo a iterar; pero pasaron los días y no se obtenía ningún resultado, así que se consideró que el problema debía estar en el número de cifras decimales con las que estaba operando. Se limitaron las cifras decimales a dos y se volvió a iniciar el programa, pero aun así los días pasaban y el ordenador seguía realizando iteraciones. Se hizo un cálculo aproximado y se halló que el número de iteraciones a realizar era enorme y que el estudio de optimización así planteado era muy costoso en tiempo de computación.

Por lo tanto se puede afirmar que el problema de optimización así planteado no tiene una solución factible.

7.6.3. Variación de la resistencia térmica con la temperatura reducida

Dado que la optimización, tal y como se plantea en el apartado anterior, no permite obtener los resultados deseados hay que optar por otra vía para encontrar el punto óptimo de funcionamiento de los termosifones. El camino aquí propuesto es hacer un estudio detallado de cómo varía R_{term} con la temperatura reducida, T_r . Para realizar este análisis hay que partir de las fórmulas de estimación de R_{term} en función de T_r obtenidas anteriormente.

El estudio final realizado es un análisis gráfico-numérico de variación de R_{term} con respecto a T_r que, aunque menos detallado que el que se pretendía con la programación en Lingo, es efectivo a la hora de extraer conclusiones útiles para comprender el funcionamiento de los termosifones y marcar unas pautas sobre la eficiencia de dichos dispositivos.

Este estudio no da con exactitud el punto óptimo en cuanto a transferencia de calor pero sí que acota una zona de trabajo en la que obtener un funcionamiento adecuado y de compromiso al incluir, como un factor de relevancia, la presión interior a la que va a estar sometido el termosifón. Dicha presión interna condicionará, como aspecto importante el diseño estructural y, en última instancia, las exigencias constructivas.

En los siguientes subapartados se muestran los análisis, gráficos y numéricos, de la variación, realmente disminución, de R_{term} con el aumento progresivo de los valores de T_r para cada uno de los termosifones. Las gráficas parten de un valor para $T_r = 0,4$ y finalizan en $T_r = 0,95$.

Se realizaron las gráficas para todas las sustancias ensayadas y se pudo observar cómo todas exhibían un comportamiento muy similar. Debido a esto y, con la intención de ganar en claridad, la representación que va a exponerse a continuación se limita a seis sustancias:

- Acetona
- N-pentano
- Isopentano
- Dietil éter
- R-141b
- Mezcla azeotrópica Acetona + N-pentano

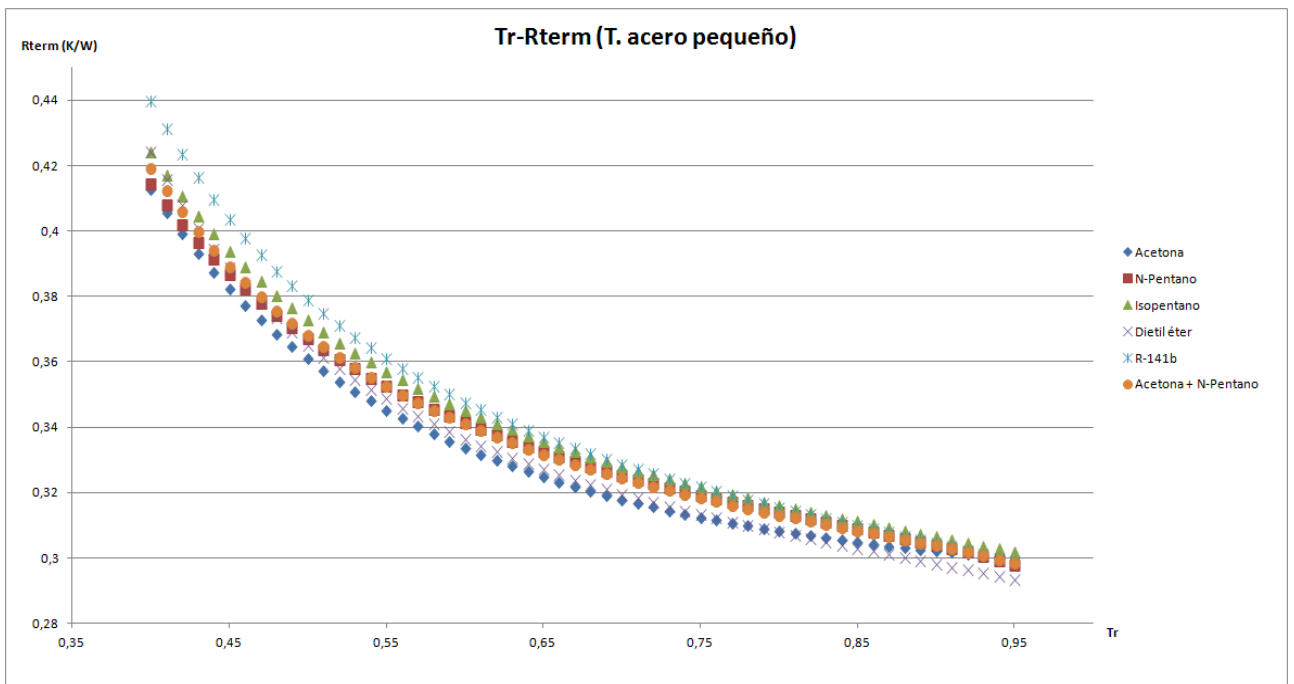
Primeramente se expondrán todas las gráficas y tablas para cada uno de los termosifones y en los siguientes apartados se darán varias interpretaciones globales que se pueden extraer de ellas.

7.6.3.1. Termosifón cilíndrico de acero pequeño

Se recuerda la fórmula (A VII.3) de estimación obtenida para este termosifón en la regresión ridge.

$$R_{\text{term}} = 0,4853 \cdot \left(\frac{\mu_1^{0,98}}{\rho_1^{0,76} \cdot (\rho_v \cdot h_{fg})^{0,16} \cdot k_1^{0,64}} \right)^{1/10}$$

Para representar esta expresión frente a T_r se han sustituido las variables correspondientes a las propiedades termofísicas por las expresiones de estimación recogidas en el apartado anterior y que han sido expuestas con mayor detalle en el capítulo 3.



Gráfica 7.108: Variación de R_{term} con T_r para el modelo de termosifón de acero pequeño.

A la vista de la gráfica puede apreciarse claramente la tendencia general: R_{term} disminuye al aumentar [21] el valor de T_r . Las tablas que se muestran a continuación dejan patente este hecho y cuantifican esta variación de la resistencia térmica en distintos tramos de valores de temperatura reducida.

Tabla 7.78: Disminución del valor R_{term} con el aumento de T_r en el termosifón de acero pequeño.

Acetona

T_r	R_{term} (K/W)	Intervalo T_r	Variación	%
0,4	0,413	Total (0,4-0,95)	0,113	100,00
0,7	0,318	0,4 - 0,7	0,095	84,26
0,75	0,312	0,7 - 0,95	0,018	15,74
0,8	0,308	0,7 - 0,75	0,005	1,70
0,85	0,305	0,75 - 0,8	0,004	1,36
0,9	0,302	0,8 - 0,85	0,003	1,10
0,95	0,300	0,85 - 0,9	0,003	0,88
		0,9 - 0,95	0,002	0,67

Isopentano

T_r	R_{term} (K/W)	Intervalo T_r	Variación	%
0,4	0,424	Total (0,4-0,95)	0,122	100,00
0,7	0,328	0,4 - 0,7	0,096	78,62
0,75	0,322	0,7 - 0,95	0,026	21,38
0,8	0,316	0,7 - 0,75	0,006	1,95
0,85	0,311	0,75 - 0,8	0,006	1,72
0,9	0,306	0,8 - 0,85	0,005	1,57
0,95	0,302	0,85 - 0,9	0,005	1,51
		0,9 - 0,95	0,005	1,48

R-141b

T_r	R_{term} (K/W)	Intervalo T_r	Variación	%
0,4	0,440	Total (0,4-0,95)	0,141	100,00
0,7	0,329	0,4 - 0,7	0,111	78,73
0,75	0,322	0,7 - 0,95	0,030	21,27
0,8	0,315	0,7 - 0,75	0,007	2,15
0,85	0,310	0,75 - 0,8	0,006	1,90
0,9	0,304	0,8 - 0,85	0,006	1,77
0,95	0,299	0,85 - 0,9	0,005	1,75
		0,9 - 0,95	0,006	1,93

N-pentano

T_r	R_{term} (K/W)	Intervalo T_r	Variación	%
0,4	0,414	Total (0,4-0,95)	0,116	100,00
0,7	0,325	0,4 - 0,7	0,089	76,50
0,75	0,319	0,7 - 0,95	0,027	23,50
0,8	0,314	0,7 - 0,75	0,006	1,86
0,85	0,309	0,75 - 0,8	0,005	1,66
0,9	0,304	0,8 - 0,85	0,005	1,57
0,95	0,298	0,85 - 0,9	0,005	1,63
		0,9 - 0,95	0,006	1,98

Dietil éter

T_r	R_{term} (K/W)	Intervalo T_r	Variación	%
0,4	0,424	Total (0,4-0,95)	0,131	100,00
0,7	0,319	0,4 - 0,7	0,105	80,00
0,75	0,313	0,7 - 0,95	0,026	20,00
0,8	0,308	0,7 - 0,75	0,006	1,96
0,85	0,303	0,75 - 0,8	0,005	1,73
0,9	0,298	0,8 - 0,85	0,005	1,60
0,95	0,293	0,85 - 0,9	0,005	1,57
		0,9 - 0,95	0,005	1,60

Acetona + N-pentano

T_r	R_{term} (K/W)	Intervalo T_r	Variación	%
0,4	0,419	Total (0,4-0,95)	0,121	100,00
0,7	0,324	0,4 - 0,7	0,095	78,44
0,75	0,318	0,7 - 0,95	0,026	21,56
0,8	0,313	0,7 - 0,75	0,006	1,87
0,85	0,308	0,75 - 0,8	0,005	1,63
0,9	0,304	0,8 - 0,85	0,005	1,51
0,95	0,298	0,85 - 0,9	0,005	1,52
		0,9 - 0,95	0,005	1,78

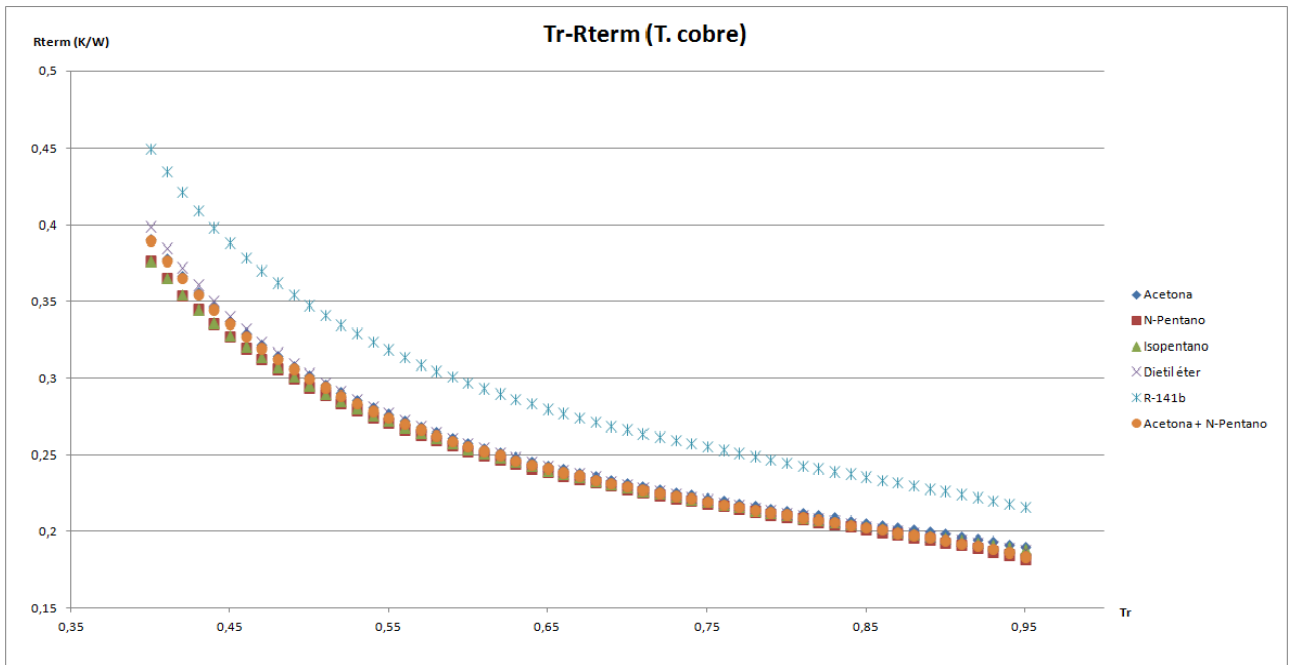
Para realizar las comparaciones se ha tomado como el 100% de variación de R_{term} a la que tiene lugar entre los valores de $T_r = 0,4$ y $T_r = 0,95$. Una vez fijado esto, puede observarse cómo en general para las seis sustancias el 80 % de la reducción de R_{term} tiene lugar para el intervalo (0,4 ; 0,7) de T_r ; esto se aprecia también en la gráfica anterior (gráfica 7.108) donde la pendiente de las seis curvas es mucho más pronunciada para los valores bajos de T_r y se va atenuando conforme aumenta la temperatura reducida.

7.6.3.2. Termosifón cilíndrico de cobre

Se recuerda la fórmula (7.3) de estimación obtenida para este termosifón en la regresión ridge.

$$R_{\text{term}} = 0,1066 \cdot \left(\frac{\rho_1^{1,93} \cdot \mu_1^{0,48}}{(\rho_v \cdot h_{fg})^{0,55} \cdot k_1^{0,66}} \right)^{1/10}$$

Para representar esta expresión frente a T_r se han sustituido las variables correspondientes a las propiedades termofísicas por las expresiones de estimación recogidas en el apartado anterior y que han sido expuestas con mayor detalle en el capítulo 3.



Gráfica 7.109: Variación de R_{term} con T_r para el modelo de termosifón de cobre.

Con la gráfica a la vista puede apreciarse claramente la tendencia general: R_{term} disminuye al aumentar el valor de T_r . Las tablas que se muestran a continuación dejan patente este hecho y cuantifican esta variación de la resistencia térmica en distintos tramos de valores de temperatura reducida.

Tabla 7.79: Disminución del valor R_{term} con el aumento de T_r en el termosifón de cobre.

Acetona

T_r	R_{term} (K/W)	Intervalo T_r	Variación	%
0,4	0,390	Total (0,4-0,95)	0,201	100,00
0,7	0,231	0,4 - 0,7	0,159	79,24
0,75	0,221	0,7 - 0,95	0,042	20,76
0,8	0,213	0,7 - 0,75	0,010	4,18
0,85	0,205	0,75 - 0,8	0,008	3,77
0,9	0,198	0,8 - 0,85	0,008	3,58
0,95	0,189	0,85 - 0,9	0,008	3,66
		0,9 - 0,95	0,009	4,29

Isopentano

T_r	R_{term} (K/W)	Intervalo T_r	Variación	%
0,4	0,376	Total (0,4-0,95)	0,188	100,00
0,7	0,229	0,4 - 0,7	0,148	78,67
0,75	0,219	0,7 - 0,95	0,040	21,33
0,8	0,211	0,7 - 0,75	0,010	4,21
0,85	0,203	0,75 - 0,8	0,008	3,85
0,9	0,196	0,8 - 0,85	0,008	3,66
0,95	0,189	0,85 - 0,9	0,007	3,61
		0,9 - 0,95	0,007	3,54

R-141b

T_r	R_{term} (K/W)	Intervalo T_r	Variación	%
0,4	0,449	Total (0,4-0,95)	0,233	100,00
0,7	0,266	0,4 - 0,7	0,183	78,33
0,75	0,255	0,7 - 0,95	0,051	21,67
0,8	0,245	0,7 - 0,75	0,011	4,31
0,85	0,235	0,75 - 0,8	0,010	3,96
0,9	0,226	0,8 - 0,85	0,009	3,82
0,95	0,216	0,85 - 0,9	0,009	3,95
		0,9 - 0,95	0,010	4,58

N-pentano

T_r	R_{term} (K/W)	Intervalo T_r	Variación	%
0,4	0,376	Total (0,4-0,95)	0,194	100,00
0,7	0,228	0,4 - 0,7	0,149	76,71
0,75	0,218	0,7 - 0,95	0,045	23,29
0,8	0,209	0,7 - 0,75	0,010	4,20
0,85	0,201	0,75 - 0,8	0,009	3,91
0,9	0,193	0,8 - 0,85	0,008	3,87
0,95	0,182	0,85 - 0,9	0,009	4,23
		0,9 - 0,95	0,011	5,46

Dietil éter

T_r	R_{term} (K/W)	Intervalo T_r	Variación	%
0,4	0,399	Total (0,4-0,95)	0,211	100,00
0,7	0,231	0,4 - 0,7	0,168	79,62
0,75	0,221	0,7 - 0,95	0,043	20,38
0,8	0,212	0,7 - 0,75	0,010	4,38
0,85	0,203	0,75 - 0,8	0,009	4,03
0,9	0,195	0,8 - 0,85	0,008	3,88
0,95	0,188	0,85 - 0,9	0,008	3,91
		0,9 - 0,95	0,008	4,03

Acetona + N-pentano

T_r	R_{term} (K/W)	Intervalo T_r	Variación	%
0,4	0,389	Total (0,4-0,95)	0,206	100,00
0,7	0,229	0,4 - 0,7	0,160	77,87
0,75	0,219	0,7 - 0,95	0,045	22,13
0,8	0,211	0,7 - 0,75	0,010	4,30
0,85	0,202	0,75 - 0,8	0,009	3,97
0,9	0,194	0,8 - 0,85	0,008	3,89
0,95	0,184	0,85 - 0,9	0,008	4,18
		0,9 - 0,95	0,010	5,29

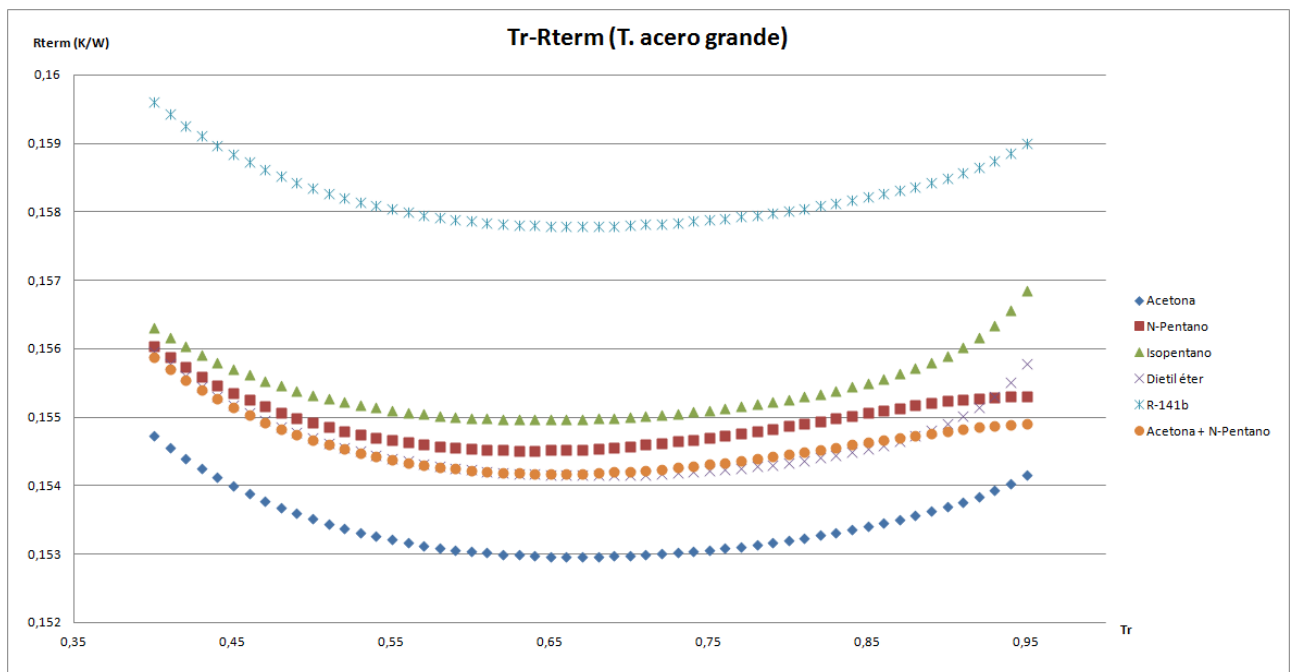
Para realizar las comparaciones se ha tomado como el 100% de variación de R_{term} a la que tiene lugar entre los valores de $T_r = 0,4$ y $T_r = 0,95$. Una vez fijado esto, puede observarse cómo en general para las seis sustancias el 80 % de la reducción de R_{term} tiene lugar para el intervalo (0,4 ; 0,7) de T_r ; esto se aprecia también en la gráfica anterior (gráfica 7.109) donde la pendiente de las seis curvas es mucho más pronunciada para los valores bajos de T_r y se va atenuando conforme aumenta la temperatura reducida.

7.6.3.3. Termosifón cilíndrico grande de acero

Se recuerda la fórmula (A VII.7) de estimación obtenida para este termosifón en la regresión ridge.

$$R_{\text{term}} = 0,1766 \cdot \left(\frac{\rho_1^{0,11} \cdot \mu_1^{0,04}}{\rho_v^{0,02} \cdot h_{fg}^{0,18} \cdot k_1^{0,25}} \right)^{1/10}$$

Para representar esta expresión frente a T_r se han sustituido las variables correspondientes a las propiedades termofísicas por las expresiones de estimación recogidas en el apartado anterior y que han sido expuestas con mayor detalle en el capítulo 3.



Gráfica 7.110: Variación de R_{term} con T_r para el modelo de termosifón grande de acero.

Con la gráfica a la vista puede apreciarse que la tendencia que termosifón difiere claramente de la que mostraban los dos termosifones anteriores (y de la que van a mostrar los siguientes). Parece haber un mínimo para las seis sustancias situado en torno a los valores de T_r 0,65 - 0,7. De todas formas hay que destacar que las variaciones en R_{term} son despreciables en comparación con las que se tienen para el resto de termosifones. Esto va a quedar patente en las tablas que se muestran a continuación donde se cuantifica la

variación de la resistencia térmica para distintos tramos de valores de temperatura reducida.

Tabla 7.80: Disminución del valor R_{term} con el aumento de T_r en el termosifón grande de acero.

Acetona

T_r	R_{term} (K/W)	Intervalo T_r	Variación	%
0,4	0,155	Total (0,4-0,95)	0,001	100,00
0,7	0,153	0,4 - 0,7	0,002	304,77
0,75	0,153	0,7 - 0,95	-0,001	-204,77
0,8	0,153	0,7 - 0,75	0,000	-0,05
0,85	0,153	0,75 - 0,8	0,000	-0,09
0,9	0,154	0,8 - 0,85	0,000	-0,13
0,95	0,154	0,85 - 0,9	0,000	-0,19
		0,9 - 0,95	0,000	-0,30

Isopentano

T_r	R_{term} (K/W)	Intervalo T_r	Variación	%
0,4	0,156	Total (0,4-0,95)	-0,001	100,00
0,7	0,155	0,4 - 0,7	0,001	-245,27
0,75	0,155	0,7 - 0,95	-0,002	345,27
0,8	0,155	0,7 - 0,75	0,000	-0,06
0,85	0,155	0,75 - 0,8	0,000	-0,10
0,9	0,156	0,8 - 0,85	0,000	-0,16
0,95	0,157	0,85 - 0,9	0,000	-0,26
		0,9 - 0,95	-0,001	-0,61

R-141b

T_r	R_{term} (K/W)	Intervalo T_r	Variación	%
0,4	0,160	Total (0,4-0,95)	0,001	100,00
0,7	0,158	0,4 - 0,7	0,002	294,45
0,75	0,158	0,7 - 0,95	-0,001	-194,45
0,8	0,158	0,7 - 0,75	0,000	-0,05
0,85	0,158	0,75 - 0,8	0,000	-0,09
0,9	0,158	0,8 - 0,85	0,000	-0,12
0,95	0,159	0,85 - 0,9	0,000	-0,18
		0,9 - 0,95	0,000	-0,31

N-pentano

T_r	R_{term} (K/W)	Intervalo T_r	Variación	%
0,4	0,156	Total (0,4-0,95)	0,001	100,00
0,7	0,155	0,4 - 0,7	0,001	199,45
0,75	0,155	0,7 - 0,95	-0,001	-99,45
0,8	0,155	0,7 - 0,75	0,000	-0,08
0,85	0,155	0,75 - 0,8	0,000	-0,11
0,9	0,155	0,8 - 0,85	0,000	-0,12
0,95	0,155	0,85 - 0,9	0,000	-0,11
		0,9 - 0,95	0,000	-0,05

Dietil éter

T_r	R_{term} (K/W)	Intervalo T_r	Variación	%
0,4	0,156	Total (0,4-0,95)	0,000	100,00
0,7	0,154	0,4 - 0,7	0,002	984,50
0,75	0,154	0,7 - 0,95	-0,002	-884,50
0,8	0,154	0,7 - 0,75	0,000	-0,04
0,85	0,155	0,75 - 0,8	0,000	-0,08
0,9	0,155	0,8 - 0,85	0,000	-0,13
0,95	0,156	0,85 - 0,9	0,000	-0,23
		0,9 - 0,95	-0,001	-0,57

Acetona + N-pentano

T_r	R_{term} (K/W)	Intervalo T_r	Variación	%
0,4	0,156	Total (0,4-0,95)	0,001	100,00
0,7	0,154	0,4 - 0,7	0,002	171,23
0,75	0,154	0,7 - 0,95	-0,001	-71,23
0,8	0,154	0,7 - 0,75	0,000	-0,06
0,85	0,155	0,75 - 0,8	0,000	-0,10
0,9	0,155	0,8 - 0,85	0,000	-0,11
0,95	0,155	0,85 - 0,9	0,000	-0,11
		0,9 - 0,95	0,000	-0,07

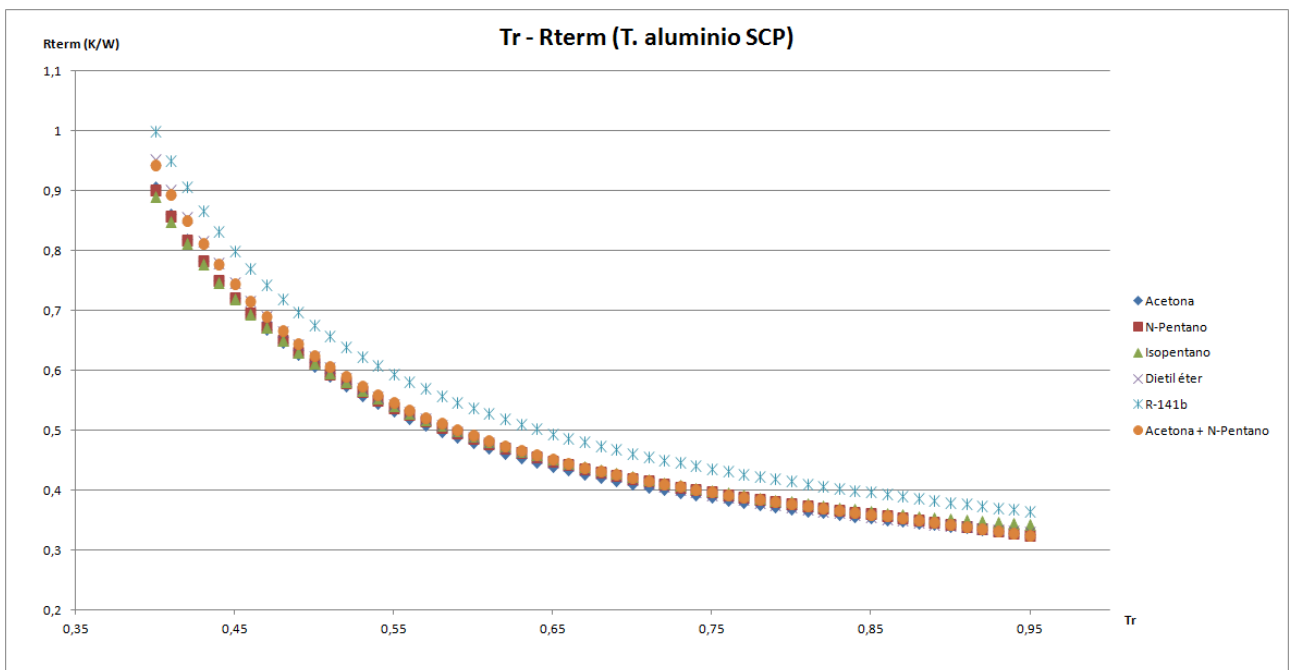
Queda patente que las variaciones son despreciables por lo que podría concluirse que para este termosifón, el cilíndrico de acero grande, la resistencia térmica es casi constante y no está muy influenciada por los cambios de temperatura que pueda sufrir la sustancia que trabaja en su interior.

7.6.3.4. Termosifón prismático de aluminio sin control de potencia (SCP)

Se recuerda la fórmula (A VII.12) de estimación obtenida para este termosifón en la regresión ridge.

$$R_{\text{term}} = 0,5741 \cdot \left(\frac{\rho_l^{1,14} \cdot \mu_l^{0,38}}{(\rho_v \cdot h_{fg})^{0,97} \cdot k_l^{1,1}} \right)^{1/10}$$

Para representar esta expresión frente a T_r se han sustituido las variables correspondientes a las propiedades termofísicas por las expresiones de estimación recogidas en el apartado anterior y que han sido expuestas con mayor detalle en el capítulo 3.



Gráfica 7.111: Variación de R_{term} con T_r para el modelo de termosifón de aluminio (SCP).

Con la gráfica a la vista puede apreciarse claramente la tendencia general: R_{term} disminuye al aumentar el valor de T_r . Las tablas que se muestran a continuación dejan patente este hecho y cuantifican esta variación de la resistencia térmica en distintos tramos de valores de temperatura reducida.

Tabla 7.81: Disminución del valor R_{term} con el aumento de T_r en el termosifón de aluminio SCP.

Acetona

T_r	R_{term} (K/W)	Intervalo T_r	Variación	%
0,4	0,905	Total (0,4-0,95)	0,580	100,00
0,7	0,410	0,4 - 0,7	0,495	85,42
0,75	0,387	0,7 - 0,95	0,085	14,58
0,8	0,368	0,7 - 0,75	0,023	5,61
0,85	0,352	0,75 - 0,8	0,019	4,80
0,9	0,339	0,8 - 0,85	0,016	4,24
0,95	0,325	0,85 - 0,9	0,014	3,94
		0,9 - 0,95	0,013	3,98

Isopentano

T_r	R_{term} (K/W)	Intervalo T_r	Variación	%
0,4	0,889	Total (0,4-0,95)	0,546	100,00
0,7	0,421	0,4 - 0,7	0,468	85,59
0,75	0,398	0,7 - 0,95	0,079	14,41
0,8	0,379	0,7 - 0,75	0,023	5,51
0,85	0,364	0,75 - 0,8	0,019	4,75
0,9	0,351	0,8 - 0,85	0,016	4,14
0,95	0,343	0,85 - 0,9	0,013	3,55
		0,9 - 0,95	0,008	2,27

R-141b

T_r	R_{term} (K/W)	Intervalo T_r	Variación	%
0,4	0,998	Total (0,4-0,95)	0,634	100,00
0,7	0,461	0,4 - 0,7	0,537	84,65
0,75	0,435	0,7 - 0,95	0,097	15,35
0,8	0,414	0,7 - 0,75	0,026	5,61
0,85	0,396	0,75 - 0,8	0,021	4,89
0,9	0,379	0,8 - 0,85	0,018	4,40
0,95	0,364	0,85 - 0,9	0,016	4,15
		0,9 - 0,95	0,016	4,10

N-pentano

T_r	R_{term} (K/W)	Intervalo T_r	Variación	%
0,4	0,900	Total (0,4-0,95)	0,576	100,00
0,7	0,419	0,4 - 0,7	0,481	83,40
0,75	0,396	0,7 - 0,95	0,096	16,60
0,8	0,377	0,7 - 0,75	0,023	5,52
0,85	0,359	0,75 - 0,8	0,019	4,87
0,9	0,343	0,8 - 0,85	0,017	4,54
0,95	0,323	0,85 - 0,9	0,017	4,66
		0,9 - 0,95	0,019	5,67

Dietil éter

T_r	R_{term} (K/W)	Intervalo T_r	Variación	%
0,4	0,952	Total (0,4-0,95)	0,622	100,00
0,7	0,416	0,4 - 0,7	0,536	86,13
0,75	0,392	0,7 - 0,95	0,086	13,87
0,8	0,372	0,7 - 0,75	0,024	5,84
0,85	0,355	0,75 - 0,8	0,020	5,09
0,9	0,340	0,8 - 0,85	0,017	4,55
0,95	0,330	0,85 - 0,9	0,015	4,10
		0,9 - 0,95	0,011	3,13

Acetona + N-pentano

T_r	R_{term} (K/W)	Intervalo T_r	Variación	%
0,4	0,942	Total (0,4-0,95)	0,618	100,00
0,7	0,420	0,4 - 0,7	0,522	84,39
0,75	0,396	0,7 - 0,95	0,097	15,61
0,8	0,376	0,7 - 0,75	0,024	5,70
0,85	0,359	0,75 - 0,8	0,020	4,99
0,9	0,342	0,8 - 0,85	0,017	4,60
0,95	0,324	0,85 - 0,9	0,017	4,64
		0,9 - 0,95	0,019	5,51

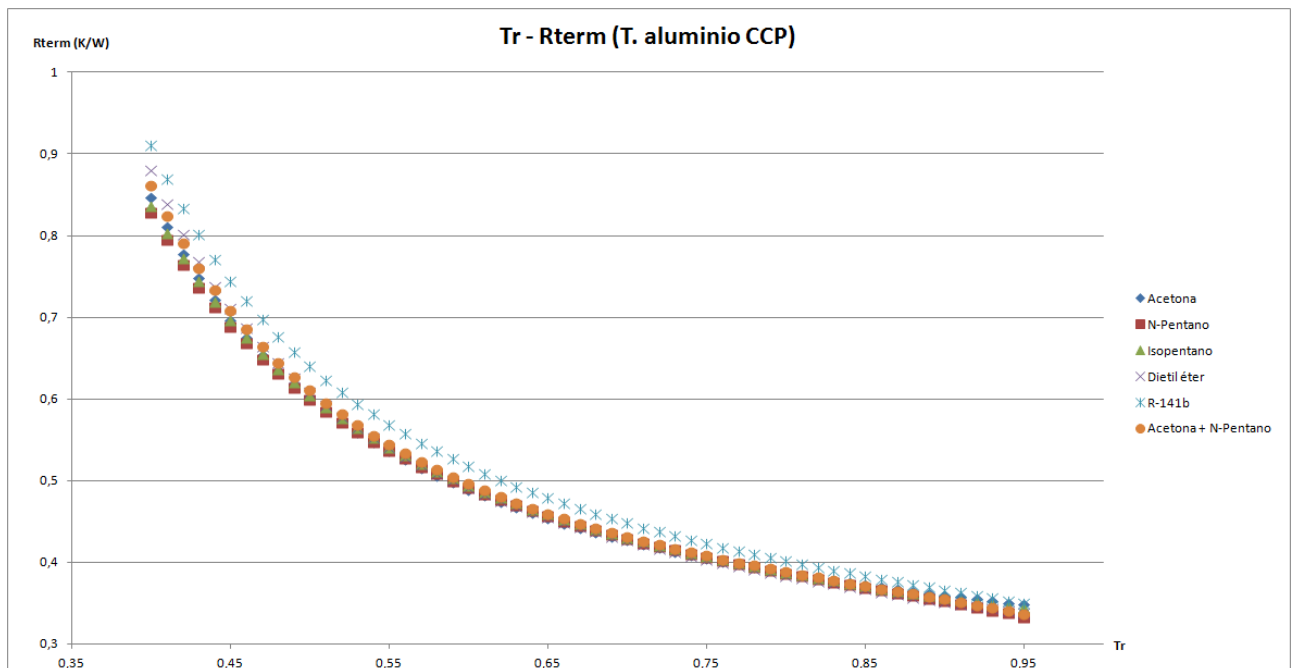
Para realizar las comparaciones se ha tomado como el 100% de variación de R_{term} a la que tiene lugar entre los valores de $T_r = 0,4$ y $T_r = 0,95$. Una vez fijado esto, puede observarse cómo en general para las seis sustancias casi el 85 % de la reducción de R_{term} tiene lugar para el intervalo (0,4 ; 0,7) de T_r ; esto se aprecia también en la gráfica anterior (gráfica 7.111) donde la pendiente de las seis curvas es mucho más pronunciada para los valores bajos de T_r y se va atenuando conforme aumenta la temperatura reducida.

7.6.3.5. Termosifón prismático de aluminio con control de potencia (CCP)

Se recuerda la fórmula (7.8) de estimación obtenida para este termosifón en la regresión ridge.

$$R_{\text{term}} = 0,4724 \cdot \left(\frac{\mu_1^{1,18}}{\rho_1^{0,21} \cdot (\rho_v \cdot h_{fg})^{0,63} \cdot k_1^{0,2}} \right)^{1/10}$$

Para representar esta expresión frente a T_r se han sustituido las variables correspondientes a las propiedades termofísicas por las expresiones de estimación recogidas en el apartado anterior y que han sido expuestas con mayor detalle en el capítulo 3.



Gráfica 7.112: Variación de R_{term} con T_r para el modelo de termosifón de aluminio (CCP).

Con la gráfica a la vista puede apreciarse claramente la tendencia general: R_{term} disminuye al aumentar el valor de T_r . Las tablas que se muestran a continuación dejan patente este hecho y cuantifican esta variación de la resistencia térmica en distintos tramos de valores de temperatura reducida.

Tabla 7.82: Disminución del valor R_{term} con el aumento de T_r en el termosifón de aluminio CCP.

Acetona

T_r	R_{term} (K/W)	Intervalo T_r	Variación	%
0,4	0,846	Total (0,4-0,95)	0,498	100,00
0,7	0,427	0,4 - 0,7	0,420	84,22
0,75	0,405	0,7 - 0,95	0,079	15,78
0,8	0,387	0,7 - 0,75	0,022	5,07
0,85	0,373	0,75 - 0,8	0,018	4,36
0,9	0,360	0,8 - 0,85	0,015	3,83
0,95	0,348	0,85 - 0,9	0,013	3,45
		0,9 - 0,95	0,012	3,25

Isopentano

T_r	R_{term} (K/W)	Intervalo T_r	Variación	%
0,4	0,837	Total (0,4-0,95)	0,492	100,00
0,7	0,430	0,4 - 0,7	0,406	82,59
0,75	0,407	0,7 - 0,95	0,086	17,41
0,8	0,388	0,7 - 0,75	0,023	5,39
0,85	0,371	0,75 - 0,8	0,020	4,79
0,9	0,356	0,8 - 0,85	0,017	4,34
0,95	0,345	0,85 - 0,9	0,015	3,95
		0,9 - 0,95	0,011	3,23

R-141b

T_r	R_{term} (K/W)	Intervalo T_r	Variación	%
0,4	0,911	Total (0,4-0,95)	0,561	100,00
0,7	0,448	0,4 - 0,7	0,463	82,47
0,75	0,423	0,7 - 0,95	0,098	17,53
0,8	0,402	0,7 - 0,75	0,025	5,58
0,85	0,383	0,75 - 0,8	0,021	4,99
0,9	0,366	0,8 - 0,85	0,019	4,61
0,95	0,350	0,85 - 0,9	0,017	4,44
		0,9 - 0,95	0,017	4,55

N-pentano

T_r	R_{term} (K/W)	Intervalo T_r	Variación	%
0,4	0,828	Total (0,4-0,95)	0,495	100,00
0,7	0,429	0,4 - 0,7	0,399	80,69
0,75	0,406	0,7 - 0,95	0,096	19,31
0,8	0,387	0,7 - 0,75	0,023	5,31
0,85	0,369	0,75 - 0,8	0,019	4,80
0,9	0,352	0,8 - 0,85	0,018	4,53
0,95	0,333	0,85 - 0,9	0,017	4,60
		0,9 - 0,95	0,019	5,36

Dietil éter

T_r	R_{term} (K/W)	Intervalo T_r	Variación	%
0,4	0,880	Total (0,4-0,95)	0,542	100,00
0,7	0,427	0,4 - 0,7	0,453	83,64
0,75	0,403	0,7 - 0,95	0,089	16,36
0,8	0,384	0,7 - 0,75	0,023	5,44
0,85	0,367	0,75 - 0,8	0,020	4,86
0,9	0,351	0,8 - 0,85	0,017	4,48
0,95	0,338	0,85 - 0,9	0,015	4,21
		0,9 - 0,95	0,013	3,76

Acetona + N-pentano

T_r	R_{term} (K/W)	Intervalo T_r	Variación	%
0,4	0,861	Total (0,4-0,95)	0,525	100,00
0,7	0,431	0,4 - 0,7	0,430	82,00
0,75	0,408	0,7 - 0,95	0,094	18,00
0,8	0,388	0,7 - 0,75	0,023	5,37
0,85	0,371	0,75 - 0,8	0,020	4,79
0,9	0,355	0,8 - 0,85	0,017	4,46
0,95	0,337	0,85 - 0,9	0,016	4,45
		0,9 - 0,95	0,018	5,06

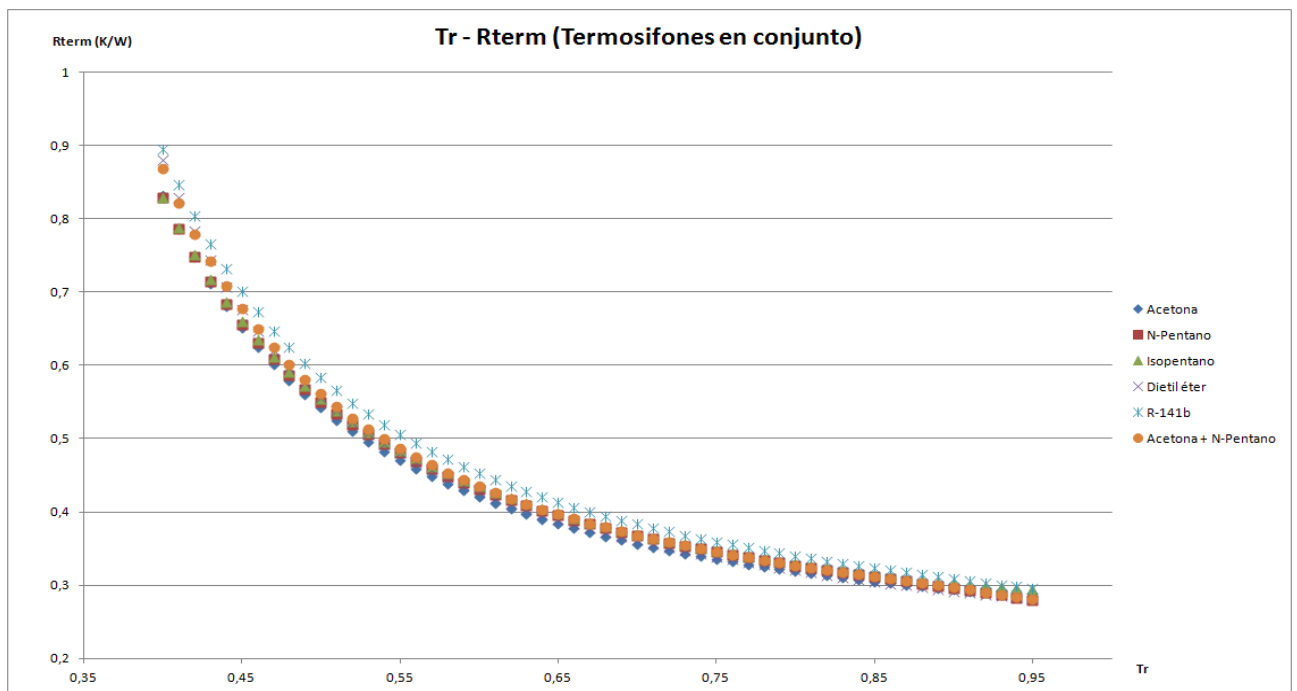
Para hacer las comparaciones se ha tomado como el 100% de variación de R_{term} a la que tiene lugar entre los valores de $T_r = 0,4$ y $T_r = 0,95$. Una vez fijado esto, puede observarse cómo en general para las seis sustancias algo más del 80 % de la reducción de R_{term} tiene lugar para el intervalo (0,4 ; 0,7) de T_r ; esto se aprecia también en la gráfica anterior (gráfica 7.112) donde la pendiente de las seis curvas es mucho más pronunciada para los valores bajos de T_r y se va atenuando conforme aumenta la temperatura reducida.

7.6.3.6. Todos los termosifones en conjunto

Se recuerda la fórmula (7.12) de estimación obtenida para el conjunto de los termosifones.

$$R_{\text{term}} = 0,7007 \cdot (C_1^{0,134} \cdot C_2^{0,407} \cdot C_3^{0,789})^{-1} \cdot \left(\frac{\mu_1^{0,92}}{\rho_1^{0,06} \cdot (\rho_v \cdot h_{fg})^{0,93} \cdot k_1^{0,82}} \right)^{1/10}$$

Para representar esta expresión frente a T_r se han sustituido las variables correspondientes a las propiedades termofísicas por las expresiones de estimación recogidas en el capítulo 3, y se ha prescindido de las variables tipo termosifón (variables C_i).



Gráfica 7.113: Variación de R_{term} con T_r para el modelo de los termosifones en conjunto.

Con la gráfica a la vista puede apreciarse claramente la tendencia general: R_{term} disminuye al aumentar el valor de T_r . Las tablas que se muestran a continuación dejan patente este hecho y cuantifican esta variación de la resistencia térmica en distintos tramos de valores de temperatura reducida.

Tabla 7.83: Disminución del valor R_{term} con el aumento de T_r en el conjunto de los termosifones

Acetona

T_r	R_{term} (K/W)	Intervalo T_r	Variación	%
0,4	0,831	Total (0,4-0,95)	0,548	100,00
0,7	0,357	0,4 - 0,7	0,475	86,67
0,75	0,336	0,7 - 0,95	0,073	13,33
0,8	0,319	0,7 - 0,75	0,021	5,90
0,85	0,305	0,75 - 0,8	0,017	4,98
0,9	0,294	0,8 - 0,85	0,014	4,28
0,95	0,284	0,85 - 0,9	0,012	3,77
		0,9 - 0,95	0,010	3,42

Isopentano

T_r	R_{term} (K/W)	Intervalo T_r	Variación	%
0,4	0,829	Total (0,4-0,95)	0,534	100,00
0,7	0,370	0,4 - 0,7	0,459	86,00
0,75	0,348	0,7 - 0,95	0,075	14,00
0,8	0,329	0,7 - 0,75	0,022	6,02
0,85	0,315	0,75 - 0,8	0,018	5,20
0,9	0,302	0,8 - 0,85	0,015	4,52
0,95	0,295	0,85 - 0,9	0,012	3,85
		0,9 - 0,95	0,007	2,46

R-141b

T_r	R_{term} (K/W)	Intervalo T_r	Variación	%
0,4	0,895	Total (0,4-0,95)	0,599	100,00
0,7	0,383	0,4 - 0,7	0,512	85,39
0,75	0,359	0,7 - 0,95	0,088	14,61
0,8	0,340	0,7 - 0,75	0,024	6,20
0,85	0,323	0,75 - 0,8	0,019	5,41
0,9	0,309	0,8 - 0,85	0,016	4,85
0,95	0,296	0,85 - 0,9	0,015	4,50
		0,9 - 0,95	0,013	4,31

N-pentano

T_r	R_{term} (K/W)	Intervalo T_r	Variación	%
0,4	0,829	Total (0,4-0,95)	0,550	100,00
0,7	0,367	0,4 - 0,7	0,462	83,99
0,75	0,345	0,7 - 0,95	0,088	16,01
0,8	0,327	0,7 - 0,75	0,022	5,98
0,85	0,311	0,75 - 0,8	0,018	5,26
0,9	0,296	0,8 - 0,85	0,016	4,86
0,95	0,279	0,85 - 0,9	0,015	4,87
		0,9 - 0,95	0,017	5,68

Dietil éter

T_r	R_{term} (K/W)	Intervalo T_r	Variación	%
0,4	0,880	Total (0,4-0,95)	0,598	100,00
0,7	0,362	0,4 - 0,7	0,519	86,74
0,75	0,339	0,7 - 0,95	0,079	13,26
0,8	0,321	0,7 - 0,75	0,023	6,24
0,85	0,305	0,75 - 0,8	0,018	5,44
0,9	0,292	0,8 - 0,85	0,016	4,84
0,95	0,282	0,85 - 0,9	0,013	4,32
		0,9 - 0,95	0,010	3,27

Acetona + N-pentano

T_r	R_{term} (K/W)	Intervalo T_r	Variación	%
0,4	0,869	Total (0,4-0,95)	0,589	100,00
0,7	0,368	0,4 - 0,7	0,501	85,10
0,75	0,346	0,7 - 0,95	0,088	14,90
0,8	0,327	0,7 - 0,75	0,023	6,12
0,85	0,311	0,75 - 0,8	0,018	5,33
0,9	0,297	0,8 - 0,85	0,016	4,85
0,95	0,281	0,85 - 0,9	0,015	4,77
		0,9 - 0,95	0,016	5,42

Para hacer las comparaciones se ha tomado como el 100% de variación de R_{term} a la que tiene lugar entre los valores de $T_r = 0,4$ y $T_r = 0,95$. Una vez fijado esto, puede observarse cómo en general para las seis sustancias algo más del 80 % de la reducción de R_{term} tiene lugar para el intervalo (0,4 ; 0,7) de T_r ; esto se aprecia también en la gráfica anterior (gráfica 7.113) donde la pendiente de las seis curvas es mucho más pronunciada para los valores bajos de T_r y se va atenuando conforme aumenta la temperatura reducida.

A la vista de las gráficas y tablas anteriores obtenidas a lo largo del estudio de variación de la resistencia térmica, R_{term} , con la temperatura reducida, T_r , pueden extraerse varias observaciones importantes:

- a) De forma general puede afirmarse que no hay un mínimo que permita indicar para qué punto, o puntos, el funcionamiento de los termosifones es óptimo. R_{term} disminuye al aumentar el valor de T_r , sin embargo sí que puede apreciarse que esta disminución, muy pronunciada inicialmente, se atenúa conforme la temperatura se acerca al punto crítico de cada sustancia, $T_r = 1$, constituyéndose “cuasimesetas” para valores de T_r superiores a 0,8.
- b) La afirmación anterior viene corroborada por el siguiente análisis y patente en las tablas anteriores (de la tabla 7.78 a la 7.83): si se toma como el 100% de la variación en R_{term} la que tiene lugar entre $T_r = 0,4$ y $T_r = 0,95$, el 80% de mejora en R_{term} tiene lugar entre $T_r = 0,4$ y $T_r = 0,7$, dejando únicamente un margen del 20%, como mucho, para el intervalo $T_r = 0,7$ y $T_r = 0,95$.
- c) En el intervalo de T_r (0,7 - 0,95) conforme se van tomando mayores valores de T_r menor es la variación en R_{term} ; esto es, la mejora porcentual de R_{term} es mayor en el intervalo (0,7 - 0,75) que en el (0,75 - 0,8) y así sucesivamente hasta considerar el último intervalo en estudio (0,9 - 0,95). Hay que hacer notar que en algunos casos, para este último intervalo, la variación de R_{term} se mantiene o aumenta levemente.
- d) En general, a partir de un valor de $T_r = 0,8$ la mejora en R_{term} no es muy importante y se mantiene siempre por debajo del 15% con respecto a $T_r = 0,95$. Esto se traduce en que la resistencia térmica para $T_r = 0,8$ tiene un valor similar al que se obtiene para $T_r = 0,95$. Ahora bien, para este valor de 0,8 no se alcanzan las altas presiones que acompañan a las temperaturas reducidas próximas al punto crítico.
- e) Se puede afirmar de forma general para este estudio que es aconsejable operar a temperaturas reducidas en torno a 0,8 - 0,85 y no más altas tratando de evitar, de esta forma, las altas presiones de los puntos cercanos al crítico ya que la mejora en R_{term} no es sustancial.
- f) La excepción a este comportamiento la presenta el termosifón grande de acero; la gráfica que representa la variación de T_r con R_{term} (gráfica 7.110) muestra grandes discrepancias con respecto al resto de termosifones; de hecho sí que presenta mínimos situados entre los valores de $0,65 \leq T_r \leq 0,7$. De todas formas

hay que destacar que las variaciones en R_{term} son muy pequeñas en comparación con el resto de termosifones y si se las curvas se hubiesen representado en una escala similar a la de las demás gráficas, estas pasarían a verse casi como líneas rectas, indicando que el valor de R_{term} es prácticamente constante para este termosifón.

7.6.4. Comparación con el modelo de ESDU

Se ha considerado muy interesante contrastar los resultados obtenidos en el apartado anterior, para cada tipo de termosifón y sustancia, con los que se obtendrían empleando el modelo, propuesto por [22] ESDU (Engineering Sciences Data Unit), véase capítulo 4, en el análisis $R_{\text{term}} - T_r$.

Se recuerda que ESDU propone un factor de calidad, *figure of merit*, que relaciona las propiedades termofísicas de los fluidos de trabajo con el rendimiento de los termosifones y viene dado por la expresión:

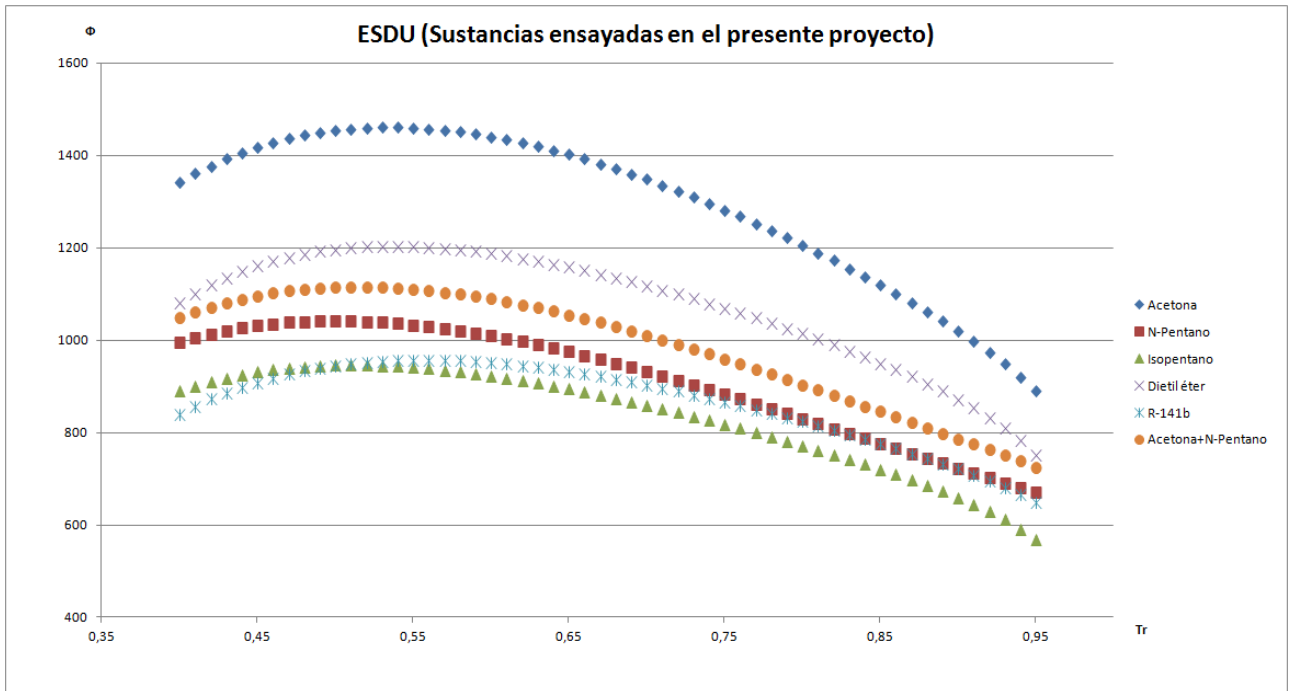
$$\phi = \left(\frac{\rho_1^2 \cdot h_{\text{fg}} \cdot k_1^3}{\mu_1} \right)^{1/4} \quad (7.22)$$

Esta expresión, extraída de la teoría de la condensación de Nusselt, ha servido de referencia para la realización de esta tesis.

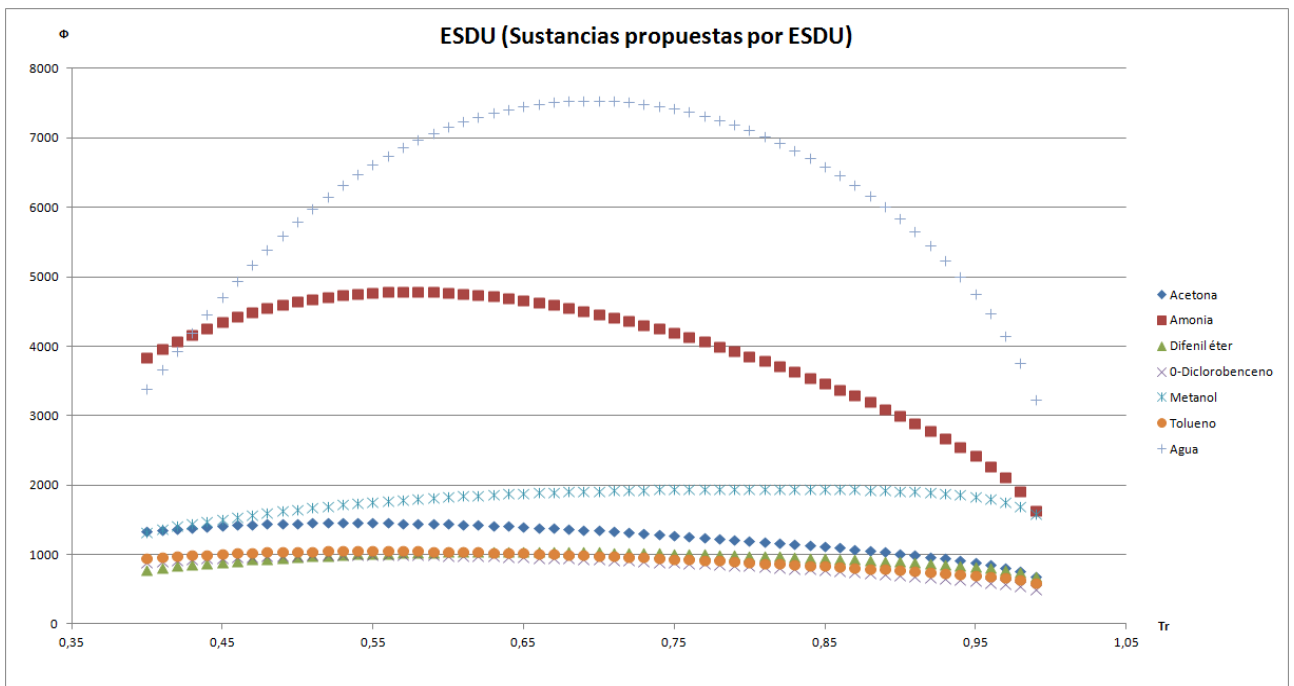
El factor de calidad ϕ es un testigo de lo buena que resulta una sustancia para transferir calor operando en el interior de un termosifón bifásico: cuanto mayor es el valor de este factor, mayor es la transferencia de calor, mejor es el fluido de trabajo.

A continuación se dan las gráficas que representan la variación del factor de calidad propuesto por ESDU frente a distintos valores de temperatura reducida. Hay que señalar que lo que se busca ahora no es el mínimo de R_{term} , sino el máximo valor para ϕ .

En la primera gráfica se representan las sustancias que han servido para valorar el estudio del apartado y que han sido empleadas en los ensayos de la tesis. La segunda corresponde a las sustancias representadas en el estudio [22] de ESDU para este modelo; alguna sustancia coincide en ambas gráficas.



Gráfica 7.114: Variación del factor de calidad ϕ con T_r para el modelo de ESDU: sustancias estudiadas en la tesis.



Gráfica 7.115: Variación del factor de calidad ϕ con T_r para el modelo de ESDU: sustancias estudiadas por ESDU.

Es destacable la existencia de máximos para los valores de ϕ , lo que no ocurría en las gráficas del apartado anterior. Estos máximos se han tabulado junto con los datos de T_c (temperatura crítica), T_b (temperatura de ebullición normal) y T_{br} (temperatura reducida de ebullición normal).

Tabla 7.84: Máximos del factor de calidad ϕ para las doce sustancias representadas

Sustancia	$\phi_{m\acute{a}x}$	T_r en máximo	T_c (K)	T_b (K)	T_{br}
Acetona	1459,50	0,53	508,1	329,2	0,65
N-Pentano	1040,85	0,50	469,8	309,2	0,66
Isopentano	944,89	0,51	460,4	301,1	0,65
Dietil éter	1202,06	0,53	466,7	307,7	0,66
R-141b	956,15	0,56	473,0	305,1	0,65
Acetona+Pentano	1114,36	0,51	476,4	305,7	0,64
Amonia	4789,80	0,57	405,4	239,8	0,59
Difenil éter	1042,76	0,65	770,0	530,2	0,69
0-Diclorobenceno	995,00	0,55	690,0	451,2	0,65
Metanol	1948,36	0,81	512,6	337,7	0,66
Tolueno	1054,77	0,55	591,8	383,8	0,65
Agua	7542,03	0,69	647,3	373,2	0,58

Las cuatro sustancias que dan mejores resultados en la modelización de ESDU serían, en orden de mejor a peor: agua, amoniac, metanol y acetona.

Ahora bien lo más destacable en la formulación propuesta por ESDU y que llama mucho la atención es la ubicación de los máximos del factor de calidad. Prácticamente todos estos máximos, a excepción de los del agua y el metanol, se sitúan por debajo del punto de ebullición normal. Lo que se estaría indicando con ello es que la máxima transferencia de calor en un termosifón con cambio de fase ha de tener lugar a presiones inferiores a la atmosférica. Esto es, a priori, difícilmente explicable ya que se sabe que la transferencia de calor mejora con el aumento de presión; es más, a presiones bajas el flujo de vapor que circula por el interior del termosifón es menor y, por tanto, el transporte de energía se efectúa con mayor dificultad.

Es interesante destacar que, también para el parámetro propuesto por ESDU, el agua [23] no es un buen fluido para trabajar a temperaturas próximas al ambiente.

A la vista de esta observación parece que el modelo que se propone es más próximo a la realidad que el de ESDU.

7.6.5. Variación de la resistencia térmica con la presión de vapor al aumentar la temperatura reducida

Se sabe que en un termosifón la transferencia de calor mejora con el aumento de la presión [24] y esta aumenta al aumentar la temperatura. En las siguientes tablas se ha hallado el porcentaje de mejora de R_{term} con respecto al aumento porcentual de presión al tomar valores cada vez mayores para T_r . Se ha prescindido del termosifón de acero grande, por los motivos anteriormente indicados, y del prismático sin control de potencia, al mostrar resultados muy similares al de aluminio prismático con control de potencia.

Tabla 7.85: Comparación entre la variación en R_{term} y en p_v al aumentar T_r .

Termosifón	Sustancia	T_r	T (K)	R_{term} (K/W)	p_v (bar)	ΔR_{term} (% disminución)	Δp_v (% aumento)
Acero pequeño	Metanol	0,8	410,4	0,299	10,17	9,7	413,8
		0,95	487,35	0,270	52,25		
	Acetona	0,8	406,48	0,308	8,12	2,6	294,6
		0,95	482,7	0,300	32,04		
	Dietil éter	0,8	373,36	0,308	6,11	4,9	288,4
		0,95	443,37	0,293	23,73		
	R-141b	0,8	378,4	0,315	7,94	5,1	272,2
		0,95	449,35	0,299	29,55		
	N-Pentano	0,8	375,84	0,314	6,3	5,1	271,9
		0,95	446,31	0,298	23,43		
	Isopentano	0,8	368,36	0,316	6,49	4,4	263,6
		0,95	437,43	0,302	23,6		
	Acetona + N-Pentano	0,8	381,12	0,313	8,34	4,8	275,9
		0,95	452,58	0,298	31,35		
	Agua	0,8	517,8	0,259	3,63	1,9	311,2
		0,95	614,89	0,254	14,92		

Tabla 7.86: Comparación entre la variación en R_{term} y en p_v al aumentar T_r .

Termosifón	Sustancia	T_r	T (K)	R_{term} (K/W)	p_v (bar)	ΔR_{term} (% disminución)	Δp_v (% aumento)
Cobre	Metanol	0,8	410,4	0,203	10,17	15,8	413,8
		0,95	487,35	0,171	52,25		
	Acetona	0,8	406,48	0,213	8,12	11,3	294,6
		0,95	482,7	0,189	32,04		
	Dietil éter	0,8	373,36	0,212	6,11	11,3	288,4
		0,95	443,37	0,188	23,73		
	R-141b	0,8	378,4	0,245	7,94	11,8	272,2
		0,95	449,35	0,216	29,55		
	N-Pentano	0,8	375,84	0,209	6,3	12,9	271,9
		0,95	446,31	0,182	23,43		
	Isopentano	0,8	368,36	0,211	6,49	10,4	263,6
		0,95	437,43	0,189	23,6		
	Acetona + N-Pentano	0,8	381,12	0,211	8,34	12,8	275,9
		0,95	452,58	0,184	31,35		
	Agua	0,8	517,8	0,180	3,63	11,1	311,2
		0,95	614,89	0,160	14,92		

Tabla 7.87: Comparación entre la variación en R_{term} y en p_v al aumentar T_r .

Termosifón	Sustancia	T_r	T (K)	R_{term} (K/W)	p_v (bar)	ΔR_{term} (% disminución)	Δp_v (% aumento)
Aluminio prismático CCP	Metanol	0,8	410,4	0,373	10,17	18,2	413,8
		0,95	487,35	0,305	52,25		
	Acetona	0,8	406,48	0,387	8,12	10,1	294,6
		0,95	482,7	0,348	32,04		
	Dietil éter	0,8	373,36	0,384	6,11	12,0	288,4
		0,95	443,37	0,338	23,73		
	R-141b	0,8	378,4	0,402	7,94	12,9	272,2
		0,95	449,35	0,35	29,55		
	N-Pentano	0,8	375,84	0,387	6,3	14,0	271,9
		0,95	446,31	0,333	23,43		
	Isopentano	0,8	368,36	0,388	6,49	11,1	263,6
		0,95	437,43	0,345	23,6		
	Acetona + N-Pentano	0,8	381,12	0,388	8,34	13,1	275,9
		0,95	452,58	0,337	31,35		
	Agua	0,8	517,8	0,327	3,63	10,4	311,2
		0,95	614,89	0,293	14,92		

Tabla 7.88: Comparación entre la variación en R_{term} y en p_v al aumentar T_r .

Termosifón	Sustancia	T_r	T (K)	R_{term} (K/W)	p_v (bar)	ΔR_{term} (% disminución)	Δp_v (% aumento)
Todos en conjunto	Metanol	0,8	410,4	0,295	10,17	19,0	413,8
		0,95	487,35	0,239	52,25		
	Acetona	0,8	406,48	0,319	8,12	11,0	294,6
		0,95	482,7	0,284	32,04		
	Dietil éter	0,8	373,36	0,321	6,11	12,2	288,4
		0,95	443,37	0,282	23,73		
	R-141b	0,8	378,4	0,34	7,94	12,9	272,2
		0,95	449,35	0,296	29,55		
	N-Pentano	0,8	375,84	0,327	6,3	14,7	271,9
		0,95	446,31	0,279	23,43		
	Isopentano	0,8	368,36	0,329	6,49	10,3	263,6
		0,95	437,43	0,295	23,6		
	Acetona + N-Pentano	0,8	381,12	0,327	8,34	14,1	275,9
		0,95	452,58	0,281	31,35		
	Agua	0,8	517,8	0,233	3,63	10,7	311,2
		0,95	614,89	0,208	14,92		

Los resultados hallados para los distintos termosifones muestran cómo para valores de la temperatura reducida entre, $T_r = 0,8$ y $T_r = 0,95$, la mejora que se obtiene en la resistencia térmica, R_{term} , es menor al 15%. Esta mejora de la resistencia no compensa el aumento de la presión que sufre en el interior el termosifón que se ve multiplicada prácticamente por cuatro.

REFERENCIAS

- [1] Acuña Fernández, E. *Análisis de regresión*. San Juan; Universidad de Puerto Rico, 2011.
- [2] Ugarte, D, Fernández Militino, A. *Estadística aplicada con S-Plus*. Pamplona; Universidad Pública de Navarra, 2ª edición, 2002. 579 p. ISBN 84-95075-78-4.
- [3] Hocking, R. R. *The analysis and selection of variables in linear regression*. Biometrics, 1976, Vol. 32, (1), pp. 1-49.
- [4] *Statgraphics Centurion XVI. User Manual*. Ed. Statpoint Technologies, Inc. 2009.
- [5] Pérez López, C. *Estadística práctica con Statgraphics*. Madrid: Prentice Hall, 2001. 692 p. ISBN 84-205-3166-9.
- [6] Imura, H., Kusuda, H., Ogata, J., Miyazaki, T., Sakamoto, N. *Heat Transfer in two-phase closed-type thermosiphon*. Heat Transfer-Japan Research, 1979, (8), pp. 41-53.
- [7] Faghri, A. *Heat Pipe Science and Technology*. Washington; Taylor Francis, 1995. 874 p. ISBN 1-56032-383-3.
- [8] Nusselt, W. *Die Oberflächenkondensation des Wasserdampfes*. Z. Ver.-Deutch. Ing. 1916. Vol. 60, pp. 541-569.
- [9] Polhemus, N.W. *How to deal with multicollinearity when fitting a regression model using Statgraphics Centurion*. Ed. Statpoint Technologies, Inc. 2005.
- [10] Palm, B., Khodabandeh, R. *Choosing working fluid for two-phase thermosyphon systems for cooling of electronics*. Journal of Electronic Packaging, Transactions of ASME, 2003, Vol. 125 (2), pp. 276-281.
- [11] Cavallini, A., Censi, G., Del Col, D., Doretto, L., Longo, G. A., Rossetto, L. *Experimental investigation on condensation heat transfer and pressure drop on new HFC refrigerants (R134a, R125, R32, R410A, R236ea) in a horizontal smooth tube*. International Journal of Refrigeration, 2001, Vol 24, pp. 73-87.
- [12] Hashimoto, H., Kaminaga, F. *Heat transfer characteristics in a condenser of closed two-phase thermosyphon: effect of entrainment on heat transfer deterioration*. Heat Transfer Asian Research, 2002, Vol. 31, (3), pp. 212-225.
- [13] Cieslinski, J., Fiuk, A. *Heat transfer characteristics of a two-phase thermosyphon heat exchanger*. Applied Thermal Engineering, 2013, Vol. 51, pp 112-118.
- [14] Kiatsiriroat, T., Nuntaphan, A., Tiansuwan, J. *Thermal performance enhancement of thermosyphon heat pipe with binary working fluids*. Experimental Heat Transfer, 2000, Vol. 13 (2), pp. 137-152.
- [15] Sami, S. M., Comeau, J.D. *Influence of thermophysical properties on two-phase flow convective boiling on refrigerants mixtures* Applied Thermal Engineering, 2002, Vol. 22, pp. 1535-1548.
- [16] Montgomery, D.C. *Diseño y análisis de experimentos*. México: Ed. Limusa Wiley. 2002. Segunda edición. 686 p. ISBN 968-18-6156-6.
- [17] Ríos Insua, S. *Investigación operativa: optimización*. Madrid: Ed. Universitaria Ramón Areces, 1990. 572 p. ISBN 84-87191-71-1.
- [18] Webster, A. *Estadística aplicada a los negocios y la economía*. Madrid: Ed. McGraw Hill, 2000. 1144 p. ISBN 84-8086-269-6.

- [19] Bazaraa, M.S., Sheraly, C., Shetty, C.M. *Non linear programming: Theory and Algorithms*. New York. Ed. Wiley. 1993. 638 p. ISBN 0-471-55793-5.
- [20] Pescador Albiach, D. *Programación en Lingo*. Madrid: Anaya Multimedia, 1999. 352 p. ISBN 84-415-0863-1.
- [21] Gosse, J. *The thermophysical properties of fluid on liquid vapour equilibrium an aid to the choice of working fluids for heat pipes*. Proceedings of the Sixth International Heat Pipe Conference, CNRS, Grenoble, France, 1987, Vol. I, pp. 81-85.
- [22] Engineering Sciences Data Unit, ESDU. *Heat pipes – performance of two-phase closed thermosyphons. Item No. 81038*. 1981.
- [23] Li, H., Akbarzadeh, A., Jhoson, P. *The thermal characteristics of a closed two-phase thermosyphon at low temperature difference*. Heat Recovery Systems & CHP, 1991, Vol. 11, N°. 6, pp. 533-541.
- [24] Aguas, J.J., Zuñiga, F.J., Sala, J.M. *Estudio de la influencia de la presión de los fluidos en la eficiencia de los termosifones*. Actas del VIII Congreso Nacional de Ingeniería Termodinámica, 19-21 de junio 2013, Burgos.

Capítulo 8

Conclusiones y líneas futuras

8.1. Conclusiones

El trabajo fundamental que se ha llevado a cabo en la tesis ha consistido en un amplio estudio experimental sobre el funcionamiento de los termosifones, para determinar la influencia de las propiedades termofísicas de los fluidos de trabajo sobre la eficiencia energética de los mismos.

Inicialmente, se han analizado una gran cantidad de sustancias, por medio de bases de datos, para seleccionar aquellas que mejor se ajustaban para trabajar dentro del rango de las bajas temperaturas, próximas al ambiente. Se han seleccionado también varias mezclas azeotrópicas. Además, se han determinado cuales eran las ecuaciones de estado más adecuadas para las propiedades termofísicas y que obtuviesen los valores con mayor grado de precisión. Se han hallado los coeficientes de ajuste de las citadas ecuaciones para las sustancias de trabajo elegidas.

Se han diseñado y construido cuatro prototipos de termosifones con propiedades distintas, de forma que fuese posible evaluar esta tecnología, de manera amplia. Se han variado las dimensiones, la forma, cilíndrica y prismática, los materiales de fabricación de la envolvente; cobre, aluminio y acero inoxidable, además de trabajar con un amplio rango de potencias, de 50 a 500 W. Con los prototipos fabricados se han diseñado los experimentos en los que se han ido modificando; las sustancias (18), las temperaturas del ambiente exterior (4) y los coeficientes de llenado (3). De esta manera se ha conseguido un elevado número de datos que posteriormente se han sometido a diversos tipos de análisis estadístico.

Antes de comenzar los experimentos se ha desarrollado una metodología específica, que ha permitido medir con precisión la eficiencia energética de los termosifones. Ésta ha quedado plasmada en un minucioso protocolo de ensayos.

En los análisis de resultados, llevados a cabo por el método de la regresión múltiple, ha habido dificultades para encontrar una formulación que, al relacionar la resistencia térmica, R_{term} , con las propiedades termofísicas de las sustancias, resultase a la vez estadísticamente consistente y coherente con los fundamentos de funcionamiento de los termosifones. Se han hallado métodos estadísticos que han permitido superar las dificultades comentadas, debidas a la presencia de fuertes interrelaciones entre las variables explicativas.

Conviene observar que la presencia de dichas correlaciones es completamente lógica, ya que muchas de las propiedades termofísicas están vinculadas unas con otras y en última instancia, todas las variables dependen de la temperatura siendo ésta el nexo subyacente entre todas ellas.

El procedimiento estadístico que se ha empleado y que ha permitido realizar el estudio de forma adecuada, ha sido la regresión ridge (o en cadena). Éste consiste, como se ha descrito, en incorporar un nuevo parámetro, el parámetro de cadena, que si bien introduce un sesgo en la estimación, permite desvincular en gran medida las variables explicativas (propiedades termofísicas). Con la regresión ridge la formulación obtenida ha resultado coherente y, de hecho, ha sido la que se ha tomado como válida en la presente tesis. Los resultados conseguidos con este método se han reflejado en el capítulo 7 en el que se han dado las fórmulas logradas las cuales permiten estimar la resistencia térmica, en función de las propiedades termofísicas, para cada uno de los termosifones ensayados y para el estudio conjunto, o general, de todos ellos.

Las expresiones obtenidas, si bien difieren en los valores de las constantes y de los exponentes, presentan una disposición de las variables (numerador/denominador) muy similar. En general, estas expresiones son aplicables a una buena cantidad de termosifones

Los resultados han permitido delimitar cuales son las variables termofísicas influyentes: densidad del líquido y del vapor, entalpía de vaporización, conductividad y viscosidad del líquido, además del producto de la densidad del vapor por la entalpía de vaporización, en la eficiencia térmica, así como el peso relativo que tiene cada una.

Se ha corroborado la influencia que la presión del vapor tiene sobre la eficiencia. Al aumentar el valor de ésta mejora el funcionamiento térmico del termosifón.

Se ha conseguido determinar, gracias a las propiedades termofísicas, que el fluido de trabajo es fundamental para justificar el valor de la resistencia térmica, la eficiencia y, por ende, de la transferencia del flujo de calor máximo en la tecnología termosifón. A la luz de los resultados conseguidos, en el estudio de regresión, se puede aseverar que el fluido, a través de sus propiedades termofísicas, explica cerca del 50% de la variabilidad de la resistencia térmica. O lo que es lo mismo, el 50% de la eficiencia de un termosifón está determinado por el tipo de sustancia empleada.

De esta forma, si se quiere mejorar el rendimiento de los termosifones, el estudio de las sustancias de trabajo es un paso imprescindible. Es decir, la elección de la sustancia a emplear condiciona de forma notable el rendimiento del termosifón y está por encima de otras características como: tamaño, geometría, disposición de aletas, material, etc.

Se han llevado a cabo varios análisis de optimización para conseguir determinar los valores que minimizan la resistencia térmica, a partir de la formulación obtenida con la regresión ridge. Dado que los planteamientos iniciales no han conducido a soluciones factibles, se ha optado por estudiar, a partir de las fórmulas obtenidas en la regresión, la variación de la resistencia térmica con respecto a la temperatura reducida, dado que ésta es, en última instancia y a la vista de las fórmulas de estimación de propiedades, la que determina el valor de cada propiedad termofísica y, en consecuencia, el de la resistencia térmica.

En los análisis que se han efectuado se ha encontrado que la temperatura reducida, T_r , a la que debe trabajar la sustancia para que se alcance un rendimiento óptimo, ha de situarse en un rango comprendido entre 0,8 y 0,85. Este criterio general facilita, en gran medida, la elección del punto de trabajo más adecuado para seleccionar la sustancia a utilizar.

La elección de fluido se hace de forma que la temperatura, dentro del rango de trabajo del termosifón, cumpla:

$$T_{\text{inferior de trabajo del termosifón}} < C \cdot T_{\text{crítica fluido}} < T_{\text{superior de trabajo del termosifón}}$$

estando C comprendida entre: $0,8 < C < 0,85$.

Se aconseja trabajar con temperaturas reducidas no superiores a 0,85. De esta forma se evita alcanzar las elevadas presiones de los puntos cercanos al crítico, puesto que la mejora de eficiencia no ha resultado sustancial.

Se ha encontrado una pauta de selección muy general, que aúna tanto la condensación como la de ebullición, frente a otras expresiones, muy usadas, como las de ESDU o de Imura que se centran en la zona del condensador o del evaporador, respectivamente.

Se espera que este criterio general, con el que decidir qué sustancias son las que a priori van a mostrar un mejor comportamiento para la tecnología de los termosifones, sirva para facilitar y reducir, en gran medida, el trabajo de búsqueda y ensayo de sustancias, tanto para aplicaciones prácticas como para futuras investigaciones.

8.2. Líneas futuras de investigación

El estudio realizado durante la investigación de la tesis ha permitido abrir distintos caminos sobre los que trabajar en futuros desarrollos. En las conclusiones obtenidas se ha evidenciado que la elección del fluido de trabajo, contenido en el interior del termosifón, es fundamental para determinar la eficiencia y el comportamiento térmico de éste.

Se considera que hay que continuar investigando, experimentalmente, sobre los límites de la temperatura reducida del fluido en los que es óptimo trabajar con los termosifones, acotando al máximo el rango óptimo de trabajo. Las condiciones de trabajo de esta nueva fase de experimentación serían las mismas que las que se han tenido en la actual, es decir, para aplicaciones a temperatura ambiente, lo que conlleva buscar entre las sustancias candidatas a ensayar aquellas que cuya temperatura crítica se encuentre situada en torno a los 400 K.

Se puede ampliar el estudio de las fórmulas de regresión obtenidas así como la verificación de las limitaciones que presentan, así como comprobar las limitaciones de la regla de la temperatura crítica como criterio fundamental de selección

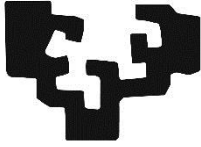
Se podría continuar la investigación sobre el criterio general de selección de sustancias encontrado para el rango de baja temperatura, ampliando el rango de temperaturas de trabajo y verificando si, entonces, es también aplicable.

Además habrá que ahondar en la búsqueda de fluidos de trabajo que no conlleven problemas medioambientales, especialmente con refrigerantes naturales. Entre estos refrigerantes naturales se encuentran, hidrocarburos, alcoholes y éteres así como agua, amoníaco y dióxido de carbono

Se considera de gran interés, que una vez escogidas sustancias consideradas óptimas, por el criterio general, realizar un análisis de experimentos que determinase la influencia de los aspectos constructivos de los termosifones sobre la resistencia térmica como el tamaño, la relación entre diámetro y longitud, el condensador y las aletas, etc., lo que permitirá mejorar el diseño de los equipos.

Una línea de trabajo que podría ser interesante desarrollar es conseguir que las bases de datos de propiedades termofísicas de las sustancias permitieran acceder a las mismas, por medio de valores acotados y, también, que se pudiese dar listas ordenadas de las sustancias, según los valores obtenidos.

El trabajo de investigación que ha llevado a cabo abre amplias expectativas para el desarrollo de aplicaciones que mejoren la disipación de calor, por medio de termosifones, para equipos electrónicos, módulos Peltier y energías renovables.



TESIS DOCTORAL

**Diseño de termosifones. Influencia de las
propiedades termofísicas del fluido de trabajo.**

ANEXOS

Presentada por:

D. Juan José Aguas Alcalde

Directores:

Dr. D. José María Sala Lizarraga

Dr. D. Luis Alfonso del Portillo Valdés

Bilbao, noviembre de 2015

Índice de anexos

Anexo I. Sustancias preseleccionadas

A I.1. Sustancias preseleccionadas para los ensayos	A. 3
Referencias	A. 20

Anexo II. Selección intermedia de sustancias

A II.1. Selección intermedia de sustancias	A. 23
--	-------

Anexo III. Fichas de seguridad de las sustancias

A III.1. Fichas internacionales de seguridad química	A. 31
A III.2. Ficha de seguridad química de la Acetona	A. 32
A III.3. Ficha de seguridad química del Ciclopentano	A. 34
A III.4. Ficha de seguridad química del Dietil éter	A. 36
A III.5. Ficha de seguridad química del Etanal	A. 38
A III.6. Ficha de seguridad química del Isopentano	A. 40
A III.7. Ficha de seguridad química del Metanoato de metilo	A. 42
A III.8. Ficha de seguridad química del Metanol	A. 44
A III.9. Ficha de seguridad química del N-Hexano	A. 46
A III.10. Ficha de seguridad química del N-Pentano	A. 48
A III.11. Ficha de seguridad química del Propanal	A. 51
A III.12. Ficha de seguridad química del R-141b	A. 54
Referencias	A. 56

Anexo IV. Tablas de las medidas de los ensayos

A IV.1. Tablas de las medidas realizadas en los ensayos	A. 59
A IV.2. Tablas del termosifón cilíndrico de cobre	A. 60
A IV.3. Tablas del termosifón cilíndrico de acero pequeño	A. 77
A IV.4. Tablas del termosifón cilíndrico de acero grande	A. 91
A IV.5. Tablas del termosifón prismático	A. 99
A IV.5.1. Tablas del termosifón prismático sin control de potencia (SCP)	A. 100
A IV.5.2. Tablas del termosifón prismático con control de potencia (CCP)	A. 110

Anexo V. Propiedades termofísicas

A V.1. Determinación de las propiedades termofísicas	A. 123
--	--------

Anexo VI. Equipo para alimentación a potencia constante de módulos Peltier

A VI.1. Equipo de control de potencia	A. 153
A VI.2. Lazo de control de corriente	A. 154
A VI.3. Lazo de control de tensión	A. 155
A VI.4. Lazo del regulador	A. 156
A VI.5. Medida y filtrado de la corriente de entrada	A. 157
A VI.6. Circuito de protección y seguridad	A. 158
A VI.7. Diseño y resultados finales	A. 158

A VI.7.1. Escalones de referencia	A. 159
A VI.7.2. Escalones en la carga	A. 159
A VI.7.3. Frecuencia de trabajo	A. 159
A VI.7.4. Rendimientos	A. 159
A VI.8. Planos del equipo	A. 160
Referencias	A. 168

Anexo VII. Análisis complementario de resultados

A VII.1. Estudio de regresión para el termosifón de acero pequeño	A. 171
A VII.1.1. Regresión múltiple	A. 171
A VII.1.2. Regresión múltiple con las variables termofísicas más relevantes	A. 176
A VII.1.3. Regresión ridge	A. 182
A VII.1.4. Regresión múltiple	A. 198
A VII.1.5. Regresión múltiple con las variables termofísicamente relevantes	A. 204
A VII.1.6. Regresión ridge	A. 211
A VII.2. Estudio de regresión para el termosifón prismático de aluminio sin control de potencia (SCP)	A. 224
A VII.2.1. Regresión múltiple	A. 224
A VII.2.2. Regresión múltiple con las variables termofísicamente relevantes	A. 231
A VII.2.3. Regresión ridge	A. 237
A VII.3. Análisis de experimentos y superficies de respuesta	A. 258
A VII.3.1. Introducción al análisis de superficie de respuesta	A. 258
A VII.3.2. Estudio de superficie de respuesta para termosifón de acero pequeño	A. 258
A VII.3.3. Estudio de superficie de respuesta para termosifón de acero grande	A. 268
A VII.3.4. Estudio de superficie de respuesta para termosifón prismático de aluminio sin control de potencia (SCP)	A. 279
Referencias	A. 290

Anexo I
Sustancias preseleccionadas

A I.1. Sustancias preseleccionadas para los ensayos

Para elegir las sustancias a ensayar en la tesis se han ido haciendo selecciones sucesivas, reduciendo en cada una el número de sustancias elegidas, hasta llegar a determinar los fluidos de trabajo con los que experimentar. En la selección se han analizado y estudiado, de forma sistemática, más de 10 000 sustancias, referenciadas en las bases de datos del NIST (véase [1] y [2]) o bien, en bases de datos de los textos de consulta clásicos (véase [3] y [4]).

A partir de los análisis y búsquedas realizados en estas bases de datos se han escogido las sustancias que se han ensayado, aunando diversos criterios técnicos y características de las sustancias.

La selección se ha realizado en tres etapas sucesivas: Preselección, selección intermedia y selección definitiva. Para cada una de ellas se ha partido de la anterior y se han tenido en cuenta los criterios de selección ya utilizados.

Para hacer la preselección se han utilizado, fundamentalmente, dos criterios:

- Al ser un trabajo con termosifones en el rango de baja temperatura, el punto de ebullición normal de la sustancia ha de estar entre - 40 °C y 100 °C.
- En el caso de sustancias orgánicas se ha escogido, al menos, una representativa de cada grupo funcional.

La lista de las sustancias preseleccionadas aparece a continuación. Se han elegido más de 500 sustancias y se han ordenado por tipo de grupo y subgrupo funcional orgánico. Se ha proporcionado su composición química y, además, siempre que se ha encontrado, su densidad a 20 °C, su punto de ebullición normal y su punto de fusión, en grados Celsius.

Se han destacado, en color rojo, aquellas que presentan problemas por ser tóxicas, corrosivas o perjudiciales para el medio ambiente, para lo que se han consultado varias bases de datos de seguridad de sustancias.

Se han marcado en verde las que se han considerado más interesantes y en azul aquellas que, habiendo pasado la preselección, no se han encontrado datos del fabricante (o distribuidor) que las pudiese suministrar.

Se puede observar que hay un gran número de hidrocarburos y, también, de compuestos fluorocarbonados (HFC y FC). Entre las sustancias inorgánicas destacan el agua, el amoníaco y el dióxido de carbono de gran uso como refrigerantes. No se ha elegido ningún compuesto orgánico con nitrógeno pues suelen ser bastante tóxicos.

Tabla A I.1: Sustancias preseleccionadas para los ensayos.

N°	COMPUESTO	GRUPO	SUBGRUPO	FÓRMULA	Mw	Peb		Pf	DENSIDAD	
525	Agua	-	-	H ₂ O	18,02	100	760	0	1,0000	20/4
100	Amoníaco (R-717)	-	-	NH ₃	17,03	-33	760	-77,7	0,6655	-20/4
131	Carbón subóxido (1,3-dioxaleno)	-	-	OC=C=CO	68,03	6,8	760	-107	1,1140	0/4
171	Cloruro de dimetiloxonio	-	-	[(CH ₃) ₂ OH] ⁺ Cl ⁻	82,53	-2	760	-97	-	-
399	Cloruro de tiocarbonilo (tiofosgeno)	-	-	CSCl ₂	114,98	73	760	-	1,5080	15
265	Cloruro de trifluorometanosulfonil	-	-	F ₃ CSO ₂ Cl	168,52	31,6	760	-	-	-
107	Dióxido de azufre	-	-	SO ₂	64,06	-10	760	-75,5		
128	Dióxido de carbono (R-744)	-	-	CO ₂	44,01	-78.6 subl	760	-56,6	1,0310	-20
415	Dióxido de nitrógeno	-	-	NO ₂	46,01	21,1	760	-11,2	1,4500	20
129	Disulfuro de carbono	-	-	CS ₂	76,13	46,2	760	-111,5	1,2632	20/4
266	Fluoruro de trifluorometanosulfonil	-	-	F ₃ CSO ₂ F	152,06	-21,7	760	-	-	-
172	Keteno	-	-	O=C=CH ₂	42,03	-41	760	-135	-	-
286	Oxazol	-	-	C ₃ H ₃ NO	69,06	69,6	760	-	-	-
448	Tetróxido de nitrógeno	-	-	N ₂ O ₄	92,01	21,2	760	-11,2	1,4469	20/4
420	Trióxido de azufre	-	-	SO ₃	80,06	44,7	760	16,9	1,9200	20
433	Trióxido de nitrógeno	-	-	N ₂ O ₃	76,01	-30	760	-101,1	1,4000	2
212	Dimetoximetano	acetal	-	CH ₂ (OCH ₃) ₂	76,10	45,5	760	-104,8	0,8593	20/4
240	Ácido cianhídrico	ácido	ciano	HCN	27,03	25,7	760	-13,2	0,6876	20/4
337	Ácido tetracloroftálico	ácido	cloro	C ₆ Cl ₄ (CO ₂ H) ₂ -1.2	303,91	2	760	-	-	-
130	Ácido tritiocarbónico	ácido	mercaptano	(HS) ₂ CS	110,21	57d	760	-30	1,4700	17/4
59	Butano (R-600)	alcano	-	C ₄ H ₁₀	58,12	-0,5	760	-138,4	0,5788	20/4
228	Hexano	alcano	-	C ₆ H ₁₄	86,18	69	760	-95	0,6603	20/4
288	Pentano	alcano	-	C ₅ H ₁₂	72,15	36,1		-130	0,6262	20/4
340	Propano	alcano	-	CH ₃ CH ₂ CH ₃	44,10	-42,1	760	-187,7	0,5853	-45/4
343	1-bromopropano	alcano	bromo	BrCH ₂ CH ₂ CH ₃	122,99	71	760	-110	1,3537	20/4
344	2-bromopropano	alcano	bromo	CH ₃ BrCHCH ₃	122,99	59,4	760	-89	1,3140	20/4
184	Bromoetano	alcano	bromo	C ₂ H ₅ Br	108,97	38,4	760	-118,6	1,4604	20/4
242	Bromometano (R-40B1)	alcano	bromo	BrCH ₃	94,94	3,55	760	-93,6	1,6755	20/4
429	1,2-dibromotetrafluoroetano (R-114B2)	alcano	bromo - fluor	BrF ₂ CCF ₂ Br	259,82	46,4	760	-110	2,1780	20
105	2-bromo-2-metilpropano	alcano	bromo-ramificado	(CH ₃) ₃ CBr	137,02	73,25	760	-16,2	1,2209	20/4
138	Ciclobutano	alcano	ciclado	C ₄ H ₈	56,11	12	760	-50	0,7200	5/4
147	Ciclopentano	alcano	ciclado	C ₅ H ₁₀	70,13	49,2	760	-93,9	0,7457	20/4
151	Ciclopropano	alcano	ciclado	C ₃ H ₆	42,08	-32,7	760	-127,6	0,7200	-79/4
397	Diciclopropano (spiropentano)	alcano	ciclado	C ₅ H ₈	68,12	39,1	746	-	0,7266	20/4
161	1,1,2-trimetilciclopropano	alcano	ciclado - ramificado	(CH ₃) ₃ C ₃ H ₅	84,16	52,6	760	-138,3	0,6974	20/4

seleccionado

tóxico, perjudicial para el medio ambiente,
corrosivo u oxidante

no encontrado

Tabla A I.1: Sustancias preseleccionadas para los ensayos. (Continuación).

N°	COMPUESTO	GRUPO	SUBGRUPO	FÓRMULA	Mw	Peb		Pf	DENSIDAD	
466	1,1-dimetilciclobutano	alcano	ciclado - ramificado	(CH ₃) ₂ C ₄ H ₆	84,16	56	760	-	0,7130	20/4
153	1,1-dimetilciclopropano	alcano	ciclado - ramificado	1,1-(CH ₃) ₂ C ₃ H ₄	70,13	20,6	760	-109	0,6604	20/4
476	1,2,3-trimetilciclopropano	alcano	ciclado - ramificado	(CH ₃) ₃ C ₃ H ₃	84,16	59,7	760	-	0,8932	20/4
468	1-etil-1-metilciclopropano	alcano	ciclado - ramificado	(CH ₃ CH ₂)(CH ₃)C ₃ H ₄	84,16	56,7	760	-130,2	0,7018	20/4
486	cis- 1,2 -dimetilciclobutano	alcano	ciclado - ramificado	(CH ₃) ₂ C ₄ H ₆	84,16	68	760	-	0,7360	20/4
154	cis- 1,2-dimetilciclopropano	alcano	ciclado - ramificado	1,2-(CH ₃) ₂ C ₃ H ₄	70,13	37	760	-141	0,6939	20
479	cis- 1,3-dimetilciclobutano	alcano	ciclado - ramificado	(CH ₃) ₂ C ₄ H ₆	84,16	60,5	760	-	0,7106	20/4
484	cis- 1-metil-2-etilciclopropano	alcano	ciclado - ramificado	(C ₂ H ₅)C ₃ H ₄ (CH ₃)	84,16	67	760	-	0,7146	20/4
139	Etilciclobutano	alcano	ciclado - ramificado	(C ₂ H ₅)C ₄ H ₇	84,16	70,7	760	-142,9	0,7284	20/4
157	Etilciclopropano	alcano	ciclado - ramificado	(C ₂ H ₅)C ₃ H ₅	70,13	35,9	760	-149,4	0,6838	20/4
472	Isopropilciclopropano	alcano	ciclado - ramificado	(C ₃ H ₇)C ₃ H ₅	84,16	58,3	760	-112,9	0,6986	20/4
140	Metilciclobutano	alcano	ciclado - ramificado	(CH ₃)C ₄ H ₇	70,13	36,3	760	-	0,6884	20/4
492	Metilciclopentano	alcano	ciclado - ramificado	(CH ₃)C ₅ H ₉	84,16	71,8	760	-142	0,7486	20/4
159	Metilciclopropano	alcano	ciclado - ramificado	(CH ₃)C ₃ H ₅	56,11	0,5	760	-117,2	0,6712	-20/4
489	Propilciclopropano	alcano	ciclado - ramificado	(C ₃ H ₇)C ₃ H ₅	84,16	69,1	760	-	0,7112	20/4
155	trans-(dl)-1,2-dimetilciclopropano	alcano	ciclado - ramificado	1,2-(CH ₃) ₂ C ₃ H ₄	70,13	29	760	-149,6	0,6698	20
156	trans-(l)-1,2-dimetilciclopropano	alcano	ciclado - ramificado	1,2-(CH ₃) ₂ C ₃ H ₄	70,13	28-29	760	-	1,3699	16
478	trans- 1,2-dimetilciclobutano	alcano	ciclado - ramificado	(CH ₃) ₂ C ₄ H ₆	84,16	60	760	-	0,7130	20/4
470	trans- 1,3 dimetilciclobutano	alcano	ciclado - ramificado	(CH ₃) ₂ C ₄ H ₆	84,16	57,5	760	-	0,7016	20/4
473	trans- 1-etil-2-metilciclopropano	alcano	ciclado - ramificado	(C ₂ H ₅)C ₃ H ₄ (CH ₃)	84,16	58,6	760	-	0,6935	20/4
66	(d) 2-clorobutano	alcano	cloro	CH ₃ CH ₂ CHClCH ₃	92,57	68,2	760	-131,3	0,8732	20/4
67	(l) 2-clorobutano	alcano	cloro	CH ₃ CH ₂ CHClCH ₃	92,57	68	760	-140,5	0,8950	0/4
176	1,1,1-tricloroetano	alcano	cloro	Cl ₃ CCH ₃	133,40	74,1	760	-30,4	1,3390	20/4
425	1,1-dicloroetano	alcano	cloro	CHCl ₂ CH ₃	98,96	57,2	760	-97	1,1755	20/4
345	1-cloropropano	alcano	cloro	ClCH ₂ CH ₂ CH ₃	78,54	46,6	760	-122,8	0,8909	20/4
348	2,2-dicloropropano	alcano	cloro	CH ₃ CCl ₂ CH ₃	112,99	69,3	760	-33,8	1,1136	20/4
347	2-cloropropano	alcano	cloro	CH ₃ CH ₂ ClCH ₃	78,54	35,7	760	-117,2	0,8617	20/4
185	Cloroetano (R-160)	alcano	cloro	C ₂ H ₅ Cl	64,51	12,3	760	-136,4	0,8978	20/4
247	Clorometano	alcano	cloro	ClCH ₃	50,49	-24,2	760	-97,1	0,9159	20/4
253	Diclorometano (R-30)	alcano	cloro	Cl ₂ CH ₂	84,93	40	760	-95,1	1,3266	20/4
430	tert- butilcloro	alcano	cloro	(CH ₃) ₃ CCl	92,57	51	760	-25	0,8422	20/4
262	Tetraclorometano	alcano	cloro	CCl ₄	153,82	76,5	760	-23	1,5940	20/4
263	Triclorometano (cloroformo)	alcano	cloro	CHCl ₃	119,38	61,7	760	-63,5	1,4832	20/4
65		alcano	cloro	CH ₃ CH ₂ CH ₂ CH ₂ Cl	92,57	78,4	760	-123,1	0,8862	20/4
243	Bromoclorometano	alcano	cloro - bromo	BrClCH ₂	129,39	68,6	760	-86,5	1,9344	20/4

seleccionado

tóxico, perjudicial para el medio ambiente,
corrosivo u oxidante

no encontrado

Tabla A I.1: Sustancias preseleccionadas para los ensayos. (Continuación).

Nº	COMPUESTO	GRUPO	SUBGRUPO	FÓRMULA	Mw	Peb		Pf	DENSIDAD	
106	1-cloro-2-metilpropano	alcano	cloro- ramificado	(CH ₃) ₂ CHCH ₂ Cl	92,57	68-70	760	-130,3	0,8810	20/4
462	2-cloro-2-metilpropano	alcano	cloro- ramificado	CH ₂ (CH ₃)CClCH ₃	92,57	50,6	760	-25,4	0,8422	20/4
354	1,1,1,2,2,3-hexafluoropropano (R-236cb)	alcano	fluor	CF ₃ CF ₂ CFH ₂	152,04	1,2	760	-	-	-
417	1,1,1,2,2-pentafluoropropano (R-245cb)	alcano	fluor	CF ₃ CF ₂ CH ₃	134,05	-18,2	760	-	1,1959	20
101	1,1,1,2-tetrafluoroetano (R-134a)	alcano	fluor	CF ₃ -CFH ₂	102,03	-26	760	-103,3	1,2072	25/4
438	1,1,1,2-tetrafluoropropano	alcano	fluor	CF ₃ CFHCH ₃	116,06	-1	760	-	-	-
439	1,1,1,3,3,3-hexafluoropropano (R-236fa)	alcano	fluor	CF ₃ CH ₂ CF ₃	152,04	-0,7	760	-93,6	-	-
503	1,1,1,3,3-pentafluorobutano (R-365mfc)	alcano	fluor	CF ₃ CH ₂ CF ₂ CH ₃	148,09	40,2	760	-	1,2700	20/4
469	1,1,1,3,3-pentafluoropropano (R-245fa)	alcano	fluor	CF ₃ CH ₂ CHF ₂	134,05	15,4	760	-	-	-
451	1,1,1,3-tetrafluoropropano	alcano	fluor	CF ₃ CH ₂ CFH ₂	116,06	29,3	760	-	1,2584	25/4
445	1,1,1-trifluorobutano	alcano	fluor	CF ₃ CH ₂ CH ₂ CH ₃	112,09	16,7	760	-114,8	1,0144	20/4
179	1,1,1-trifluoroetano (R-143a)	alcano	fluor	F ₃ CCH ₃	84,04	-47,3	760	-111,3	-	-
500	1,1,1-trifluorohexano	alcano	fluor	CF ₃ CH ₂ CH ₂ CH ₂ CH ₂ CH ₃	140,15	75	760	-	0,9800	20/4
460	1,1,1-trifluoropentano	alcano	fluor	CF ₃ CH ₂ CH ₂ CH ₂ CH ₃	126,12	47	760	-	0,9900	20/4
436	1,1,1-trifluoropropano	alcano	fluor	CF ₃ CH ₂ CH ₃	98,07	-13	760	-148,8	-	-
443	1,1,2,2,3,3-hexafluoropropano	alcano	fluor	CHF ₂ CF ₂ CHF ₂	152,04	10	760	-	-	-
447	1,1,2,2,3-pentafluoropropano (R-245ca)	alcano	fluor	CF ₂ HCF ₂ CFH ₂	134,05	26	760	-	-	-
435	1,1,2,2-tetrafluoroetano (R-134)	alcano	fluor	F ₂ HCCHF ₂	102,03	-24	760	-89	-	-
440	1,1,2-trifluoroetano (R-143)	alcano	fluor	CF ₂ HCFH ₂	84,04	5	760	-84	1,1240	25/4
456	1,1-difluorobutano	alcano	fluor	CHF ₂ CH ₂ CH ₂ CH ₃	94,10	41	760	-	0,9100	20/4
102	1,1-difluoroetano (R-152a)	alcano	fluor	CF ₂ H-CH ₃	66,05	-24,7	760	-117	0,8960	25
488	1,1-difluoropentano	alcano	fluor	CF ₂ HCH ₂ CH ₂ CH ₂ CH ₃	108,13	69	760	-	0,9100	20/4
442	1,1-difluoropropano (R-272fb)	alcano	fluor	CF ₂ HCH ₂ CH ₃	80,08	8	760	-	0,9200	20/4
461	1,2-difluorobutano	alcano	fluor	CH ₂ FCFHCH ₂ CH ₃	94,10	50	760	-	0,9400	20/4
412	1,2-difluoroetano (R-152)	alcano	fluor	CFH ₂ -CFH ₂	66,05	10,5	760	-	-	-
502	1,2-difluoropentano	alcano	fluor	CFH ₂ CFHCH ₂ CH ₂ CH ₃	108,13	75	760	-	0,9200	20/4
444	1,2-difluoropropano (R-272ea)	alcano	fluor	CFH ₂ CFHCH ₃	80,08	15	760	-	0,9600	20/4
477	1,3-difluorobutano	alcano	fluor	CFHCH ₂ CFHCH ₃	94,10	60	760	-	0,9600	20/4
518	1,3-difluoropentano	alcano	fluor	CFH ₂ CH ₂ CHFCH ₂ CH ₃	108,13	80	760	-	0,9300	20/4
349	1,3-difluoropropano	alcano	fluor	FCH ₂ CH ₂ CH ₂ F	80,08	41,6	760	-	1,0057	25/4
511	1,4-difluorobutano	alcano	fluor	CFHCH ₂ CH ₂ CFH ₂	94,10	77,8	760	-	0,9827	20/4
74	1-fluorobutano	alcano	fluor	CH ₃ (CH ₂) ₃ F	76,11	32,5	760	-134	6,7789	20/4
295	1-fluoropentano	alcano	fluor	C ₅ H ₁₁ F	90,14	62,8	760	-120	0,7907	20/4
351	1-fluoropropano	alcano	fluor	FCH ₂ CH ₂ CH ₃	62,09	2,5	760	-159	0,7956	20/4
452	2,2-difluorobutano	alcano	fluor	CH ₂ CF ₂ CH ₂ CH ₃	94,10	30,9	760	-117,5	0,9016	20/4

seleccionado

tóxico, perjudicial para el medio ambiente,
corrosivo u oxidante

no encontrado

Tabla A I.1: Sustancias preseleccionadas para los ensayos. (Continuación).

Nº	COMPUESTO	GRUPO	SUBGRUPO	FÓRMULA	Mw	Peb		Pf	DENSIDAD	
475	2,2-difluoropentano	alcano	fluor	CH ₃ CF ₂ CH ₂ CH ₂ CH ₃	108,13	59,7	760	-98,1	0,8932	20/4
350	2,2-difluoropropano (R-272ca)	alcano	fluor	CH ₃ CF ₂ CH ₃	80,08	-0,4	760	-104,8	0,9205	20/4
459	2,3-difluorobutano	alcano	fluor	CH ₃ CFHCFHCH ₃	94,10	47	760	-	0,9600	20/4
437	2-fluoropropano	alcano	fluor	CH ₃ CFHCH ₃	62,09	-9,4	760	-133,4	0,7328	20
414	Fluoroetano (R-161)	alcano	fluor	C ₂ H ₅ F	48,06	-37,5	760	-143,2	0,7182	20/4
432	Pentafluoroetano (R-125)	alcano	fluor	CF ₂ H-CF ₃	120,02	-48	760	-103	1,1912	-20
68	Perfluorobutano	alcano	fluor	C ₄ F ₁₀	238,03	3,9	760	-128	1,6484	-
524	Perfluoroheptano (FC-84)	alcano	fluor	C ₇ F ₁₆	388,05	80	760	-95	1,7260	20/4
229	Perfluorohexano (FC-72)	alcano	fluor	C ₆ F ₁₄	338,04	57,1	760	-87,1	1,6995	20/4
298	Perfluoropentano (FC-87)	alcano	fluor	C ₅ F ₁₂	288,04	29,2	760	-	1,6600	20/4
356	Perfluoropropano	alcano	fluor	CF ₃ CF ₂ CF ₃	188,02	-36	760	-183	-	-
251	Dibromodifluorometano	alcano	fluor - bromo	Br ₂ F ₂ C	209,82	24,5	760	-	-	-
252	Dibromofluorometano	alcano	fluor - bromo	Br ₂ FCH	191,83	64	760	-	2,4210	20/4
141	Octafluorociclobutano (c318)	alcano	fluor - ciclado	C ₄ F ₈	200,03	-4	764	-38,7	-	-
450	1,1,1 trifluorodicloretano (R-123)	alcano	fluor - cloro	CF ₃ CCl ₂ H	152,93	27,9	760	-107,1	1,4753	20/4
421	1,1,1,2-tetrafluoro-cloroetano (R-124)	alcano	fluor - cloro	F ₃ CCHClF	136,48	-11,9	760	-199,1	1,4370	0
177	1,1,1-tricloro-2,2,2-trifluoroetano (R-113a)	alcano	fluor - cloro	Cl ₃ CCF ₃	187,38	45,8	760	14,2	1,5790	20/4
441	1,1,1-trifluoro-2-cloropropano	alcano	fluor - cloro	CF ₃ CClHCH ₃	132,51	6,1	760	-	-	-
299	1,1,1-trifluorocloroetano (R-133a)	alcano	fluor - cloro	CF ₃ CClH ₂	118,48	7,5	760	-105	1,3890	0
419	1,1,2,2-tetrafluoro-cloroetano (R-124a)	alcano	fluor - cloro	ClF ₂ CCHF ₂	136,48	-11,7	760	-	1,2990	10
355	1,1,2,3,3-pentafluoro-1,2,3-tricloropropano	alcano	fluor - cloro	ClF ₂ C-CFCl-CClF ₂	237,38	73,7	760	-72	1,6631	20/4
178	1,1,2-tricloro-1,2,2-trifluoroetano (R-113)	alcano	fluor - cloro	Cl ₂ FCCF ₂ Cl	187,38	47,5	760	-36,4	1,5635	25/4
453	1,1-dicloro-1-fluoroetano (R-141b)	alcano	fluor - cloro	CH ₃ CCl ₂ F	116,95	31,7	760	-103,5	1,2412	20/4
274	1,1-diclorotetrafluoroetano (R-114a)	alcano	fluor - cloro	Cl ₂ FCCF ₃	170,92	4	760	-56,5	1,4851	20/4
458	1,1-difluoro-1,2-dicloroetano (R-132b)	alcano	fluor - cloro	CClF ₂ CClH ₂	134,94	46,6	760	-101,8	1,3602	20/4
413	1,2 diclorohexafluoropropano (R-216ca)	alcano	fluor - cloro	ClF ₂ C-CFCl-CF ₃	220,93	35	760	-	1,5901	20/4
423	1,2-diclorotetrafluoroetano (R-114)	alcano	fluor - cloro	ClF ₂ CCClF ₂	170,92	3,6	760	-93	1,4700	20
431	1-cloro, 1-fluoroetano	alcano	fluor - cloro	CClFCH ₃	82,50	16,2	760	-	-	-
103	1-cloro-1,1-difluoroetano (R-142b)	alcano	fluor - cloro	CF ₂ Cl-CH ₃	100,49	-10	760	-130,8	1,1070	25
463	1-cloro-2-fluoroetano (R-151)	alcano	fluor - cloro	Cl H ₂ CCFH ₂	82,50	53	760	-76	1,1840	25/4
346	2,2-difluoro-1-cloropropano	alcano	fluor - cloro	ClCH ₂ CF ₂ CH ₃	114,52	55	760	-56,2	1,2001	20/4
273	Clorofluorometano (R-31)	alcano	fluor - cloro	ClFCH ₃	68,48	-9	760	-	1,1964	20/4
418	Cloropentafluoroetano (R-115)	alcano	fluor - cloro	ClF ₂ CCF ₃	154,47	-38,1	760	-99	1,3067	20
255	Diclorofluorometano (R-21)	alcano	fluor - cloro	Cl ₂ CHF	102,92	9	760	-135	1,4050	9
248	Difluoroclorometano (R-22)	alcano	fluor - cloro	ClCHF ₂	86,47	-40,8	760	-146	-	-

seleccionado

tóxico, perjudicial para el medio ambiente,
corrosivo u oxidante

no encontrado

Tabla A I.1: Sustancias preseleccionadas para los ensayos. (Continuación).

N°	COMPUESTO	GRUPO	SUBGRUPO	FÓRMULA	Mw	Peb		Pf	DENSIDAD	
254	Difluorodichlorometano (R-12)	alcano	fluor - cloro	Cl_2CF_2	120,91	-29,7	760	-158	1,1834	57
372	Fluorotriclorometano (R-11)	alcano	fluor - cloro	CFCl_3	137,38	23,6	760	-110,5	1,4873	20/4
245	Bromoclorodifluorometano (R-12B1)	alcano	fluor - cloro - bromo	BrClF_2C	165,36	-2,7	760	-	1,5500	16
244	Bromoclorofluorometano	alcano	fluor - cloro - bromo	BrClFCH	147,37	36	760	-115	1,9771	0/4
490	3-fluoro-2,2-dimetilbutano	alcano	fluor - ramificado	$\text{CH}_3\text{C}(\text{CH}_3)_2\text{CFHCH}_3$	104,17	70	760	-	0,7900	20/4
454	1,1-difluoro-2-metilpropano	alcano	fluor - ramificado	$\text{CF}_2(\text{CH}_3)\text{CHCH}_3$	94,10	33	760	-	0,9600	20/4
455	1,2-difluoro-2-metilpropano	alcano	fluor - ramificado	$\text{CHF}(\text{CH}_3)\text{CFCH}_3$	94,10	35	760	-	0,9600	20/4
481	1,3-difluoro-2-metilpropano	alcano	fluor - ramificado	$\text{CHF}(\text{CH}_3)\text{CHCFH}_2$	94,10	63	760	-	0,9600	20/4
465	1-fluoro-2-metilbutano	alcano	fluor - ramificado	$\text{CHFCH}(\text{CH}_3)\text{CH}_2\text{CH}_3$	90,14	55,9	760	-	0,7906	20/4
457	2-fluoro-2-metilbutano	alcano	fluor - ramificado	$\text{CH}_2(\text{CH}_3)\text{CFCH}_3$	90,14	44,8	760	-121	0,7780	20/4
493	2-fluoro-4-metilpentano	alcano	fluor - ramificado	$\text{CH}_3\text{CHFCH}_2\text{CH}(\text{CH}_3)\text{CH}_2$	104,17	72	760	-	0,7900	20/4
504	4-fluor-2,2-dimetilbutano	alcano	fluor - ramificado	$\text{CH}_3\text{C}(\text{CH}_3)_2\text{CH}_2\text{CFH}_2$	104,17	75,7	760	-	0,7818	20/4
256	Difluoroyodometano	alcano	fluor - yodo	CHIF_2	177,92	21,6	760	-122	3,2380	-19
257	Fluoroyodometano	alcano	fluor - yodo	CH_2IF	159,93	53,4	760	-	2,3660	20/4
259	Trifluoroyodometano	alcano	fluor - yodo	CIF_3	195,91	-22,5	760	-	2,3608	-32/4
69	2,2-dimetilbutano	alcano	ramificado	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{C}(\text{CH}_3)_2$	86,18	49,7	760	-99,9	0,6485	20/4
284	2,2-dimetilpropano	alcano	ramificado	$\text{CH}_3\text{C}(\text{CH}_3)_2\text{CH}_3$	72,15	9,5	760	-16,5	0,6135	20
70	2,3-dimetilbutano	alcano	ramificado	$(\text{CH}_3)_2\text{CH}-\text{CH}(\text{CH}_3)_2$	86,18	58	760	-128,5	0,6616	20/4
75	2-metilbutano (Isopentano)	alcano	ramificado	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}(\text{CH}_3)_2$	72,15	27,8	760	-159,9	0,6201	20/4
296	2-metilpentano	alcano	ramificado	$2-\text{CH}_3-\text{C}_5\text{H}_{11}$	86,18	60,3	760	-153,7	0,6532	20/4
76	2-metilpropano (isobutano, R-600a)	alcano	ramificado	$\text{CH}_3\text{CH}(\text{CH}_3)\text{CH}_3$	58,12	-11,7	760	-159,4	0,5490	30
297	3-metilpentano	alcano	ramificado	$3-\text{CH}_3-\text{C}_5\text{H}_{11}$	86,18	63,3	760	-	0,6645	20/4
173	Yodoetano	alcano	yodo	IC_2H_5	155,97	72,3	760	-108	1,9358	20/4
258	Yodometano	alcano	yodo	ICH_3	141,94	42,4	760	-66,4	2,2790	20/4
514	Etanol	alcohol	-	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$	46,07	78,3	760	-114,5	0,7893	20/4
268	Metanol	alcohol	-	CH_3OH	32,04	65	760	-93,9	0,7914	20/4
181	2,2,2-trifluoroetanol	alcohol	fluor	CH_2OHCF_3	100,04	74	760	-43,5	1,4680	20
269	o-deuterometanol	alcohol	deuterado	CH_3OD	33,05	65,5	760	-10	0,8127	20/4
58	Butanal	aldehido	-	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CHO}$	72,11	75,7	760	-99	0,8170	20/4
1	Etanal (acetaldehido)	aldehido	-	CH_3CHO	44,05	20,8	760	-121	0,7834	18/4
223	Etanodial	aldehido	-	$\text{OHC}-\text{CHO}$	58,04	50,4	760	15	1,1400	20
211	Metanal (formol)	aldehido	-	HCHO	30,03	-21	760	-92	0,8150	20/4
339	Propanal	aldehido	-	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CHO}$	58,08	48,8	760	-81	0,8058	20/4
275	2-oxopropanal	aldehido	cetona	CH_3COCHO	72,06	72	760	-	1,0455	24
3	Etoxiacetaldehido	aldehido	etóxido	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OCH}_2\text{CHO}$	88,11	71-73	760	-	0,9420	20/4

seleccionado

tóxico, perjudicial para el medio ambiente,
corrosivo u oxidante

no encontrado

Tabla A I.1: Sustancias preseleccionadas para los ensayos. (Continuación).

Nº	COMPUESTO	GRUPO	SUBGRUPO	FÓRMULA	Mw	Peb		Pf	DENSIDAD	
213	Fluoroformaldehído	aldehído	fluor	FCHO	48,02	-24	760	-	-	-
4	2,2-dimetilpropanal	aldehído	ramificado	(CH ₃) ₃ CCHO	86,13	77-78	760	6	0,7923	17
127	2-metilpropanal	aldehído	ramificado	(CH ₃) ₂ CHCHO	72,11	64,2 - 64,6	760	-	0,7938	20/4
2	Dimetiletanal	aldehído	ramificado	CH ₃ CH(OCH ₃) ₂	90,12	64,5	760	-113,2	0,8015	20/4
78	1-buteno	alqueno	-	CH ₂ =CHCH ₂ CH ₃	56,11	-6,3	760	-158,3	0,5951	20/4
230	1-hexeno	alqueno	-	CH ₂ =CHCH ₂ CH ₂ CH ₂ CH ₃	84,16	63,3	760	-139,8	0,6731	20/4
300	1-penteno	alqueno	-	CH ₂ =CH-CH ₂ CH ₂ CH ₃	70,13	30	760	-165,2	0,6405	20/4
90	cis-2-buteno	alqueno	-	CH ₃ CH=CHCH ₃	56,11	3,7	760	-138,9	0,6213	20/4
232	cis-2-hexeno	alqueno	-	CH ₃ C=CH ₂ CH ₂ CH ₂ CH ₃	84,16	68,8	760	-141,3	0,6869	20/4
307	cis-2-penteno	alqueno	-	CH ₃ CH=CHCH ₂ CH ₃	70,13	36,9	760	-151,4	0,6556	20/4
234	cis-3-hexeno	alqueno	-	CH ₃ CH ₂ CH=CHCH ₂ CH ₃	84,16	66,4	760	-137,8	0,6796	20/4
362	Propeno	alqueno	-	CH ₂ =CHCH ₃	42,08	-47,4	760	-185,4	0,5193	20/4
91	trans-2-buteno	alqueno	-	CH ₃ CH=CHCH ₃	56,11	0,9	760	-105,5	0,6042	20/4
233	trans-2-hexeno	alqueno	-	CH ₃ C=CH ₂ CH ₂ CH ₂ CH ₃	84,16	68	750	-133	0,6784	20/4
308	trans-2-penteno	alqueno	-	CH ₃ CH=CHCH ₂ CH ₃	70,13	36,3	760	-136	0,6482	20/4
235	trans-3-hexeno	alqueno	-	CH ₃ CH ₂ CH=CHCH ₂ CH ₃	84,16	67,1	760	-113,4	0,6772	20/4
361	Propenal (acroleína)	alqueno	aldehído	CH ₂ =CHCHO	56,06	52-53	760	-87	0,8410	20/4
317	1-in-3-penteno	alqueno	alquino	CH ₃ CH=CHC≡CH	66,10	66-67	760	-	0,7890	20
99	2-metil-3-in-1-buteno	alqueno	alquino	CH ₂ =C(CH ₃)C≡CH	66,10	34	760	-	0,6801	11/4
97	3-in-1-buteno (vinilacetileno)	alqueno	alquino	CH ₂ =CH-C≡CH	52,08	5,1	760	-	0,7095	0/0
315	3-in-1-penteno	alqueno	alquino	CH ₂ =CH-C≡CCH ₃	66,10	59,2	760	-	0,7401	20/4
316	4-in-1-penteno	alqueno	alquino	CH ₂ =CH-CH ₂ C≡CH	66,10	42-43	760	-	0,7770	22/22
237	5-in-1-hexeno	alqueno	alquino	CH ₂ =CHCH ₂ CH ₂ C≡CH	80,13	70	760	-	0,7650	20/4
98	4-cloro-3-in-1-buteno	alqueno	alquino - cloro	CH ₂ =CH-C≡CCl	86,52	55-57	760	-	1,0022	20/4
367	2-bromopropileno	alqueno	bromo	CH ₂ CHBr=CH ₂	120,98	48,4	748	-124,8	1,3620	20/4
21	3-bromopropeno (alilbromuro)	alqueno	bromo	BrCH ₂ CH=CH ₂	120,98	70	752	-119	1,3980	20/4
407	Bromuro de vinilo	alqueno	bromo	CH ₂ =CHBr	106,95	15,8	760	-139,5	1,4933	-
366	cis-1-bromopropileno	alqueno	bromo	CH ₃ CH=CHBr	120,98	57,8	760	-113	1,4291	20/4
17	2-Propenitrilo	alqueno	ciano	CH ₂ =CHCN	53,06	77-79	760	-	0,8060	20/4
148	Ciclopenteno	alqueno	ciclado	C ₅ H ₈	68,12	44,2	760	-135	0,7720	20/4
149	1-metilciclopenteno	alqueno	ciclado - ramificado	1-CH ₃ C ₅ H ₇	82,14	75,5	760	-127,2	0,7851	15/4
160	1-metil-etinil-ciclopropano	alqueno	ciclado - ramificado	[CH ₂ =C(CH ₃)C ₃ H ₅	82,14	69,5	751	-	0,7500	20/4
150	3-metilciclopenteno	alqueno	ciclado - ramificado	CH ₃ C ₅ H ₇	82,14	69-71	760	-	0,9705	20/4
483	4-metil-1-ciclopenteno	alqueno	ciclado - ramificado	(CH ₃) ₄ C ₅ H ₇	82,14	65	760	-160,8	0,7684	20/4
523	3-cloro-3-metil-1-buteno	alqueno	cloro	CH ₂ =CHCHCl(CH ₃)CH ₃	104,58	80	760	-	0,8839	20/4

seleccionado

tóxico, perjudicial para el medio ambiente,
corrosivo u oxidante

no encontrado

Tabla A I.1: Sustancias preseleccionadas para los ensayos. (Continuación).

N°	COMPUESTO	GRUPO	SUBGRUPO	FÓRMULA	Mw	Peb		Pf	DENSIDAD	
497	4-cloro-1-buteno	alqueno	cloro	$\text{CH}_2=\text{CHCH}_2\text{CClH}_2$	90,55	74	760	-	0,9110	20/4
201	1,1-dicloroetileno	alqueno	cloro	$\text{Cl}_2\text{C}=\text{CH}_2$	96,94	37	760	-122,1	1,2180	20
81	2-cloro-1-buteno	alqueno	cloro	$\text{CH}_2=\text{CClCH}_2\text{CH}_3$	90,55	58,5	760	-	0,9107	15/4
371	2-cloropropileno	alqueno	cloro	$\text{CH}_3\text{CCl}=\text{CH}_2$	76,53	22,6	760	-137,4	0,9014	20/4
82	3-cloro-1-buteno	alqueno	cloro	$\text{CH}_2=\text{CHCClHCH}_3$	90,55	64-65	760	-	0,8978	20/4
22	3-cloropropeno (alilcloruro)	alqueno	cloro	$\text{ClCH}_2\text{CH}=\text{CH}_2$	76,53	45	760	-134,5	0,9376	20/4
203	cis-1,2-dicloroetileno	alqueno	cloro	$\text{ClCH}=\text{CHCl}$	96,94	60,3	760	-80,5	1,2837	20/4
79	cis-1-cloro-1-buteno	alqueno	cloro	$\text{CHCl}=\text{CHCH}_2\text{CH}_3$	90,55	63,5	760	-	0,9153	15/4
369	cis-1-cloropropileno	alqueno	cloro	$\text{CH}_3\text{CH}=\text{CHCl}$	76,53	32,8	760	-134,8	0,9347	20/4
92	cis-2-cloro-2-buteno	alqueno	cloro	$\text{CH}_3\text{CH}=\text{CClCH}_3$	90,55	70,6	760	-117,3	0,9239	20/4
408	Cloroetileno	alqueno	cloro	$\text{ClCH}=\text{CH}_2$	62,50	-13,4	760	-153,5	0,9106	20/4
204	trans-1,2-dicloroetileno	alqueno	cloro	$\text{ClCH}=\text{CHCl}$	96,94	47,5	760	-50	1,2565	20/4
80	trans-1-cloro-1-buteno	alqueno	cloro	$\text{CHCl}=\text{CHCH}_2\text{CH}_3$	90,55	68	760	-	0,9205	15/4
370	trans-1-cloropropileno	alqueno	cloro	$\text{CH}_3\text{CH}=\text{CHCl}$	76,53	37,4	760	-99	0,9350	20/7
93	trans-2-cloro-2-buteno	alqueno	cloro	$\text{CH}_3\text{CH}=\text{CClCH}_3$	90,55	62,8	760	-105,8	0,9138	20/4
119	1-cloro-2-metilpropeno	alqueno	cloro- ramificado	$(\text{CH}_3)_2\text{C}=\text{CHCl}$	90,55	68	754	-	0,9186	20/4
109	3-cloro-2-metilpropeno	alqueno	cloro- ramificado	$\text{ClCH}_2\text{C}(\text{CH}_3)=\text{CH}_2$	90,55	71-72	760	-	0,9165	20/4
85	3,4-epoxi-1-buteno	alqueno	epóxido	$\text{CH}_2=\text{CHCH}(\text{O})\text{CH}_2$	70,09	70	760	-	0,9006	0
446	2-fluoro-1-buteno	alqueno	fluor	$\text{CH}_2=\text{CF}-\text{CH}_2\text{CH}_3$	74,10	24,5	760	-	0,8180	20/4
434	2-fluoro-1-propeno	alqueno	fluor	$\text{CH}_2=\text{CF}-\text{CH}_3$	60,07	-24	760	-	-	-
426	3,3,3-trifluoropropeno	alqueno	fluor	$\text{CH}_2=\text{CHCF}_3$	96,05	-18	760	-	-	-
376	3-fluoro-1-propeno	alqueno	fluor	$\text{FCH}_2\text{CH}=\text{CH}_2$	60,07	-3	760	-	-	-
480	5-fluoro-1-penteno	alqueno	fluor	$\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CFH}_2$	88,12	62	760	-	0,8100	20/4
449	cis-2 fluoro-2-buteno	alqueno	fluor	$\text{CH}_2=\text{CF}-\text{CH}_2\text{CH}_3$	74,10	27	760	-	0,8100	20/4
89	Perfluoro-1-buteno	alqueno	fluor	$\text{F}_3\text{CCF}_2\text{CF}=\text{CF}_2$	200,03	4,8	760	-	1,6150	20/4
231	Perfluoro-1-hexeno	alqueno	fluor	$\text{CF}_2=\text{CFCF}_2\text{CF}_2\text{CF}_2\text{CF}_3$	300,05	57	760	-	-	-
411	Perfluoro-1-penteno	alqueno	fluor	$\text{CF}_2=\text{CFCF}_2\text{CF}_2\text{CF}_3$	250,04	29	760	-	-	-
96	Perfluoro-2-buteno	alqueno	fluor	$\text{CF}_3\text{CF}=\text{CFCF}_3$	200,03	0-3	760	-129	1,5297	0
236	Perfluoro-3-hexeno (FC-3284)	alqueno	fluor	$\text{CF}_3\text{CF}_2\text{CF}=\text{CFCF}_2\text{CF}_3$	300,05	49	760	-	-	-
377	Perfluoropropeno	alqueno	fluor	$\text{CF}_3\text{CF}=\text{CF}_3$	150,02	-29,4	760	-156,2	1,5830	-40/4
368	3,3-difluoro-3-bromopropeno	alqueno	fluor - bromo	$\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CCl}_2\text{Br}$	156,96	42	760	-	1,5430	25/4
142	Perfluorociclobuteno	alqueno	fluor - ciclado	C_4F_6	162,03	3	760	-60	1,6020	-20/4
145	Perfluorociclohexeno	alqueno	fluor - ciclado	C_6F_{10}	262,05	52-53	750	-	-	-
202	1,1-dicloro-2-fluoroetileno	alqueno	fluor - cloro	$\text{Cl}_2\text{C}=\text{CHF}$	114,93	37,5	760	-	1,3730	16/4
205	1,2-dicloro-1,2-difluoroetileno	alqueno	fluor - cloro	$\text{ClFC}=\text{CClF}$	132,92	21,1	760	-130,5	1,4950	0/4

seleccionado

tóxico, perjudicial para el medio ambiente,
corrosivo u oxidante

no encontrado

Tabla A I.1: Sustancias preseleccionadas para los ensayos. (Continuación).

Nº	COMPUESTO	GRUPO	SUBGRUPO	FÓRMULA	Mw	Peb		Pf	DENSIDAD	
373	1,2-dicloro-1,3,3,3-tetrafluoropropileno	alqueno	fluor - cloro	$\text{CF}_3\text{CCl}=\text{CClF}$	182,93	47,3	760	-137	1,5468	-
374	1,2-dicloro-3,3,3-trifluoropropileno	alqueno	fluor - cloro	$\text{CF}_3\text{CCl}=\text{CHCl}$	164,94	53,7	760	-109,2	1,4653	20/4
200	1-cloro-1,2,2-trifluoroetileno (R-1113)	alqueno	fluor - cloro	$\text{FCCl}=\text{CF}_2$	116,47	-26,2	760	-157,5	1,5400	-60/4
416	1-cloro-2,2difluoroeteno	alqueno	fluor - cloro	$\text{CHCl}=\text{CF}_2$	98,48	-18,5	760	-	1,2315	20
206	Fluorotricloroetileno	alqueno	fluor - cloro	$\text{FCIC}=\text{CCl}_2$	149,38	71	760	-108,9	1,5460	20/4
306	Perfluoro-2-metil-1-penteno	alqueno	fluor - ramificado	$\text{CF}_2=\text{C}(\text{CF}_3)-\text{CF}_2\text{CF}_2\text{CF}_3$	300,05	60	760	-	-	-
18	Acrililcloruro	alqueno	halogenuro de ácido	$\text{CH}_2=\text{CHCOCl}$	90,51	75-76	760	-	1,1136	20/4
512	2,3,3-trimetil-1-buteno	alqueno	ramificado	$\text{CH}_2=\text{C}(\text{CH}_3)\text{C}(\text{CH}_3)_2\text{CH}_3$	98,19	77,9	760	-109,8	0,7046	20/4
83	2,3-dimetil-1-buteno	alqueno	ramificado	$\text{CH}_2=\text{C}(\text{CH}_3)\text{CH}(\text{CH}_3)\text{CH}_3$	84,16	55,6	760	-157,3	0,6803	20/4
94	2,3-dimetil-2-buteno	alqueno	ramificado	$(\text{CH}_3)_2\text{C}=\text{C}(\text{CH}_3)_2$	84,16	73,2	760	-74,3	0,7080	20/4
86	2-etil-1-buteno	alqueno	ramificado	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{C}(\text{C}_2\text{H}_5)=\text{CH}_2$	84,16	64,7	760	-131,5	0,6894	20/4
87	2-metil-1-buteno	alqueno	ramificado	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{C}(\text{CH}_3)=\text{CH}_2$	70,13	31,2	760	-137,5	0,6504	20/4
303	2-metil-1-penteno	alqueno	ramificado	$\text{CH}_2=\text{C}(\text{CH}_3)-\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3$	84,16	60,7	760	-135,7	0,6799	20/4
95	2-metil-2-buteno	alqueno	ramificado	$\text{CH}_3\text{CH}=\text{C}(\text{CH}_3)_2$	70,13	38,6	760	-133,8	0,6623	20/4
310	2-metil-2-penteno	alqueno	ramificado	$\text{CH}_3\text{C}(\text{CH}_3)=\text{CHCH}_2\text{CH}_3$	84,16	67,3	760	-135	0,6863	20/4
108	2-metilpropeno	alqueno	ramificado	$(\text{CH}_3)_2\text{C}=\text{CH}_2$	56,11	-6,9	760	-140,3	0,5942	20/4
84	3,3-dimetil-1-buteno	alqueno	ramificado	$\text{CH}_2=\text{CHC}(\text{CH}_3)_2\text{CH}_3$	84,16	41,2	760	-115,2	0,6529	20/4
301	3,3-dimetil-1-penteno	alqueno	ramificado	$\text{CH}_2=\text{CH}-\text{C}(\text{CH}_3)_2-\text{CH}_2\text{CH}_3$	98,19	77,5	760	-134,3	0,6974	20/4
88	3-metil-1-buteno	alqueno	ramificado	$(\text{CH}_3)_2\text{CHCH}=\text{CH}_2$	70,13	20	760	-168,5	0,6272	20/4
304	3-metil-1-penteno	alqueno	ramificado	$\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}(\text{CH}_3)\text{CH}_2\text{CH}_3$	84,16	51,1	760	-153	0,6675	20/4
302	4,4-dimetil-1-penteno	alqueno	ramificado	$\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}_2-\text{C}(\text{CH}_3)_2\text{CH}_3$	98,19	72,5	760	-136,6	0,6827	20/4
305	4-metil-1-penteno	alqueno	ramificado	$\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}_2\text{CH}(\text{CH}_3)\text{CH}_3$	84,16	53,9	760	-153,6	0,6642	20/4
311	cis-3-metil-2-penteno	alqueno	ramificado	$\text{CH}_3\text{CH}=\text{C}(\text{CH}_3)\text{CH}_2\text{CH}_3$	84,16	67,6	760	-138,4	0,6986	20/4
313	cis-4-metil-2-penteno	alqueno	ramificado	$\text{CH}_3\text{CH}=\text{CHCH}(\text{CH}_3)\text{CH}_3$	84,16	56,3	760	-134,4	0,6690	20/4
312	trans-3-metil-2-penteno	alqueno	ramificado	$\text{CH}_3\text{CH}=\text{C}(\text{CH}_3)\text{CH}_2\text{CH}_3$	84,16	70,4	760	-134,8	0,6942	20/4
309	trans-4,4-dimetil-2-penteno	alqueno	ramificado	$\text{CH}_3\text{CH}=\text{CH}-\text{C}(\text{CH}_3)_2\text{CH}_3$	98,19	76,7	760	-115,2	0,6889	20/4
314	trans-4-metil-2-penteno	alqueno	ramificado	$\text{CH}_3\text{CH}=\text{CHCH}(\text{CH}_3)\text{CH}_3$	84,16	58,5	760	-140,8	0,6686	20/4
283	Metilvinil sulfuro	alqueno	sulfuro	$\text{CH}_3\text{SCH}=\text{CH}_2$	74,14	69-70	760	-	0,9026	20/4
410	Yoduro de vinilo	alqueno	yodo	$\text{CH}_2=\text{CHI}$	153,95	56	760	-	2,0370	20
16	2-metilacroleina (metacroleina)	alqueno	aldehído - ramificado	$\text{CH}_2=\text{C}(\text{CH}_3)\text{CHO}$	70,09	68,4	760	-	0,8370	20/4
375	1,2-epoxipropileno	alqueno	epóxido	$\text{CH}_2\text{C}(\text{O})=\text{CH}$	56,06	63	760	-	-	-
120	1-butino	alquino	-	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{C}\equiv\text{CH}$	54,09	8,1	760	-125,7	0,6784	0/0
238	1-hexino	alquino	-	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{C}\equiv\text{CH}$	82,14	71,3	760	-131,9	0,7155	20/4
318	1-pentino	alquino	-	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{C}\equiv\text{CH}$	68,12	40,2	760	-90	0,6901	20/4
125	2-butino	alquino	-	$\text{CH}_3\text{C}\equiv\text{CCH}_3$	54,09	27	760	-32,2	0,6910	20/4

seleccionado

tóxico, perjudicial para el medio ambiente,
corrosivo u oxidante

no encontrado

Tabla A I.1: Sustancias preseleccionadas para los ensayos. (Continuación).

N°	COMPUESTO	GRUPO	SUBGRUPO	FÓRMULA	Mw	Peb		Pf	DENSIDAD	
321	2-pentino	alquino	-	CH ₃ CH ₂ C≡C-CH ₃	68,12	56	760	-101	0,7107	20/4
57	Butadieno (biacetileno)	alquino	-	CH=C-C≡CH	50,06	10,3	760	-36,4	0,7364	0/4
382	Propino	alquino	-	CH ₃ C≡CH	40,06	-23,2	760	-101,5	0,7062	-50
14	Bromoacetileno	alquino	bromo	BrC≡CH	104,93	4,7	760	-	-	-
360	Propionitrilo	alquino	ciano	HC≡C-CCN	51,05	42,5	760	5	0,8167	17/4
121	3-cloro-1-butino	alquino	cloro	ClCH ₂ CH ₂ C≡CH	88,54	68,5	760	-	0,9466	25
383	3-cloropropino	alquino	cloro	ClCH ₂ C≡CH	74,51	65	760	-	1,0297	20/4
15	Cloroacetileno	alquino	cloro	ClC≡CH	60,48	-30	760	-126	-	-
122	3-cloro-3-metil-1-butino	alquino	cloro- ramificado	(CH ₃) ₂ CClHC≡CH	102,56	77-79	760	-	0,9061	20/4
385	3,3,3-trifluoropropino	alquino	fluor	CF ₃ C≡CH	94,04	-48,3	760	-	-	-
126	Perfluoro-2-butino	alquino	fluor	CF ₃ C≡CCF ₃	162,03	-24,6	760	-117,4	-	-
384	3-metoxipropino	alquino	metóxido	CH ₃ OCHC≡CH	70,09	63	760	-	0,8300	12
123	3,3-dimetil-1-butino	alquino	ramificado	CH(CH ₃) ₂ CH ₂ C≡CH	82,14	39-40	760	-81,2	0,6695	20/4
124	3-metil-1-butino	alquino	ramificado	CH ₂ (CH ₃)CH ₂ C≡CH	68,12	29,5	760	-89,7	0,6660	20/4
319	4,4-dimetil-1-pentino	alquino	ramificado	CH ₃ C(CH ₃) ₂ CH ₂ C≡CH	96,17	76,1	760	-75,7	0,7142	20/4
320	4-metil-1-pentino	alquino	ramificado	CH ₃ CH(CH ₃)CH ₂ C≡CH	82,14	61-62	760	-105,1	0,7092	15/4
322	4-metil-2-pentino	alquino	ramificado	CH ₃ CH(CH ₃)C≡C-CH ₃	82,14	72,5	760	-110,4	0,7160	19/4
359	Propinal	alquino	aldehido	HC≡C-CHO	54,05	60,1	760	-	-	-
60	1-aminobutano (<i>n</i> -butilamina)	amina	-	CH ₃ CH ₂ CH ₂ CH ₂ NH ₂	73,14	77,8	760	-49,1	0,7414	20/4
341	1-aminopropano	amina	-	NH ₂ CH ₂ CH ₂ CH ₃	59,11	47,8	760	-83	0,7173	20/4
342	2-aminopropano	amina	-	CH ₃ CHNH ₂ CH ₃	59,11	32,4	760	-95,2	0,6891	20
164	Dietilamina	amina	-	(C ₂ H ₅) ₂ NH	73,14	56,3	760	-48	0,7056	20/4
165	Dietilmetilamina	amina	-	(C ₂ H ₅) ₂ N(CH ₃)	87,16	66	760	-	0,7030	25/4
166	Dimetilamina	amina	-	NH(CH ₃) ₂	45,08	7,4	760	-93	0,6804	20/4
170	Dimetiletilamina	amina	-	(C ₂ H ₅)N(CH ₃) ₂	73,14	36-37	760	-36	0,6750	-
182	Etilamina (R-631)	amina	-	(C ₂ H ₅)NH ₂	45,08	16,6	760	-81	0,6829	20/4
189	Etilmetilamina	amina	-	C ₂ H ₅ NHCH ₃	59,11	36,7	760	-	-	-
194	Etilpropilamina	amina	-	C ₂ H ₅ NHC ₃ H ₇	87,16	61-62	760	-	0,7204	17
471	Hidroxilamina	amina	-	H ₂ N-OH	33,03	58	760	33,1	-	-
515	Metil-2-butilamina	amina	-	(C ₄ H ₉)NH(CH ₃)	87,16	78,5	760	-	0,7200	20/4
270	Metilamina	amina	-	CH ₃ NH ₂	31,06	-6,3	760	-93,5	0,6628	20
482	Metilpropilamina	amina	-	(C ₃ H ₇)NH(CH ₃)	73,14	63	760	-	0,7173	20/4
364	N,N-dimetil-n-propilamina	amina	-	CH ₃ CH ₂ CH ₂ N(CH ₃) ₂	87,16	65,5	752	-	0,7152	20/4
405	Trimetilamina	amina	-	N(CH ₃) ₃	59,11	2,9	760	-117,2	0,6356	20/4
20	Alilamina	amina	alqueno	CH ₂ =CHCH ₂ NH ₂	57,10	53,3	760	-88,2	0,7580	20/4

seleccionado

tóxico, perjudicial para el medio ambiente,
corrosivo u oxidante

no encontrado

Tabla A I.1: Sustancias preseleccionadas para los ensayos. (Continuación).

Nº	COMPUESTO	GRUPO	SUBGRUPO	FÓRMULA	Mw	Peb		Pf	DENSIDAD	
365	3-aminopropileno	amina	alqueno	$H_2NCH_2CH=CH_2$	57,10	58	760	-	0,7621	20/4
199	Etilenammina (vinil amina)	amina	alqueno	$CH_2=CHNH_2$	43,07	55-56	750	-	0,8321	24
152	Aminociclopropano	amina	ciclado	$NH_2C_3H_5$	57,10	50-51	760	-	0,8240	20/4
143	Difluoroaminodecafluorociclohexano	amina	fluor	$C_6F_{11}NF_2$	333,05	75-76	760	-	1,7870	25/4
167	Hexafluorodimetilamina	amina	fluor	$(CF_3)_2NH$	153,03	-6,7	760	-130	-	-
168	Perfluorodimetilamina	amina	fluor	$(CF_3)_2NF$	171,02	-37	760	-	-	-
183	Perfluoroetilamina	amina	fluor	$CF_3CF_2NF_2$	171,02	-35	760	-	-	-
398	Perfluorotrietilamina	amina	fluor	$(C_2F_5)_3N$	371,05	70,3	760	-	1,7360	20/4
513	tert-butiletilamina	amina	ramificado	$(tert\ C_4H_9)NH(C_2H_5)$	101,19	78	760	-	0,7300	20/4
61	(d) butano-2-amino	amina	ramificado	$CH_3CH_2CH(NH_2)CH_3$	73,14	63	760	-104,5	0,7240	20/4
62	(dl) butano-2-amino	amina	ramificado	$CH_3CH_2CH(NH_2)CH_3$	73,14	63,5	764	<-72	0,7246	20/4
63	(l) butano-2-amino	amina	ramificado	$CH_3CH_2CH(NH_2)CH_3$	73,14	63	760	-	0,7205	20/4
507	2,2-dimetil-1-propamina	amina	ramificado	$(C_3H_7)N(CH_3)_2$	87,16	77	760	-	0,7320	20/4
64	2-amino-2-metilbutano	amina	ramificado	$CH_3CH_2C(CH_3)_2NH_2$	87,16	77	760	-105	0,7310	25/4
195	Etilisopropil amina	amina	ramificado	$i-C_3H_7NHC_2H_5$	87,16	70-71	760	-	-	-
485	Isobutilamina	amina	ramificado	$(i\ C_4H_9)NH_2$	73,14	67,7	760	-86,6	0,7327	20/4
510	Metilisobutilamina	amina	ramificado	$(i\ C_4H_9)NH(CH_3)$	87,16	77	760	-	0,7200	20/4
104	tert-butilamina	amina	ramificado	$(CH_3)_3CNH_2$	73,14	44,4	760	-67,5	0,6958	20/4
496	tert-butilmetilamina	amina	ramificado	$(tert\ C_4H_9)NH_2$	87,16	73	760	-	0,7350	20/4
39	4-metil-1,2-benzantraceno	aromático	-	$4-CH_3C_{18}H_{11}$	242,32	1	760	126,5	-	-
406	Flavonol	aromático	-	$C_{15}H_{10}O_3$	238,25	25	760	-	-	-
29	Dimetilarsina	arsina	-	$(CH_3)_2AsH$	106,00	36	760	-	1,2130	29/29
30	Etilarsina	arsina	-	$C_2H_5AsH_2$	106,00	36	760	-	1,2170	22/22
31	Metilarsina	arsina	-	CH_3AsH_2	91,97	2	760	-143	-	-
32	Trimetilarsina	arsina	-	$(CH_3)_3As$	120,03	52	760	-87,3	1,1440	15
28	Difluorometilarsina	arsina	fluor	CH_3AsF_2	127,95	76,5	760	-29,7	1,9240	18
33	tris trifluorometilarsina	arsina	fluor	$(CF_3)_3As$	281,94	33,3	760	-	-	-
27	Dicloro(trifluorometil)arsina	arsina	fluor - cloro	CF_3AsCl_2	214,83	71	760	-	1,4310	20
36	2,3-dimetil-4-etoxiazobenceno	azocompuestos	-	$2-CH_3-4-C_2H_5OC_6H_3N=N(C_6H_4CH_3-3)$	254,33	73	760	-	-	-
37	Diazometano (dimetildiimida)	azocompuestos	-	$CH_3N=NCH_3$	58,08	1,5	760	-78	0,7440	0/15
38	Hexafluoroazometano	azocompuestos	-	$F_3CN=NCF_3$	166,03	-31,6	760	-133	-	-
35	trans-azobenceno	azocompuestos	-	$C_6H_5N=NC_6H_5$	182,22	29,3	760	68,3	1,2030	20/4
162	1,1,1-trifluorodiazometano	azocompuestos	fluor	CF_3CHN_2	110,04	13	752	-	-	-
45	Trimetilborina	boro	-	$B(CH_3)_3$	55,91	20	760	-161,5	-	-
42	Dimetil(dimetilamino)borina	boro	amina	$(CH_3)_2BN(CH_3)_2$	84,96	65	760	-92	-	-

seleccionado

tóxico, perjudicial para el medio ambiente,
corrosivo u oxidante

no encontrado

Tabla A I.1: Sustancias preseleccionadas para los ensayos. (Continuación).

N°	COMPUESTO	GRUPO	SUBGRUPO	FÓRMULA	Mw	Peb		Pf	DENSIDAD	
41	Ácido trimetilesterborico	boro	ester	B(OCH ₃) ₃	103,92	68	760	-29,3	0,9150	20
163	Metiltiodiborano	boro	mercaptano	CH ₃ SB ₂ H ₅	73,75	53	760	-101,5	-	-
44	Metiltio-dimetilborina	boro	mercaptano	CH ₃ SB(CH ₃) ₂	87,97	71	760	-84	-	-
43	Dimetilmetoxiborina	boro	metóxido	(CH ₃) ₂ BOCH ₃	71,91	21	760	-	-	-
8	Acetona	cetona	-	CH ₃ COCH ₃	58,08	56,2	760	-95,35	0,7899	20/4
517	Butanona	cetona	-	CH ₃ COCH ₂ CH ₃	72,11	79,6	760	-86,6	0,8052	20/4
9	Fluoroacetona	cetona	fluor	CH ₃ COCH ₂ F	76,06	75	760	-	-	-
10	Hexafluoroacetona	cetona	fluor	CF ₃ COCF ₃	166,02	-28	760	-129	-	-
424	Cloropentafluoroacetona	cetona	fluor - cloro	C ₂ ClF ₅ O	182,47	7,7	760	-	-	-
134	Ácido ciánico	ciano	-	HOCN	43,03	23,5	760	-81	1,1400	20/4
135	Cianógeno (oxalodinitrilo)	ciano	-	NCCN	52,04	-21,2	760	-27,9	0,9537	-21
136	Bromuro de cianógeno	ciano	bromo	BrCN	105,92	61,4	760	52	2,0150	20/4
137	Cloruro de cianógeno	ciano	cloro	ClCN	61,47	12,7	760	-6	1,1860	20/4
40	Pentaclorobenzoilcloruro	cloro	aromático	C ₆ Cl ₅ COCl	312,79	5	760	87	-	-
250	Deuterotriclorometano	cloro	deuterado	Cl ₃ CD	120,38	61-62	760	-64,1	1,5004	20/4
133	Metilcloroformiato	cloro	ester	ClCOOCH ₃	94,50	70-71	760	-	1,2231	20/4
272	Metilclorometileter	cloro	eter	ClCH ₂ OCH ₃	80,51	59,1	760	-103,5	1,0605	20/4
132	α-cloroetilmetileter	cloro	eter	CH ₃ OCHClCH ₃	94,54	72-73	751	-	0,9902	20/4
46	1,2-butadieno (metilaleno)	dieno	-	CH ₂ =C-CHCH ₃	54,09	10,8	760	-136,2	0,6760	0,4
224	1,2-hexadieno	dieno	-	CH ₂ =C-CH-CH ₂ CH ₂ CH ₃	82,14	76	760	-	0,7149	20
289	1,2-pentadieno	dieno	-	CH ₂ =C-CH-CH ₂ CH ₃	68,12	44,9	760	-137,3	0,6926	20/4
48	1,3-butadieno	dieno	-	CH ₂ =CH-CH=CH ₂	54,09	-4,4	760	-108,9	0,6211	20/4
290	1,3-pentadieno	dieno	-	CH ₂ =CH-CH=CHCH ₃	68,12	42	760	-87,5	0,6760	20/4
226	1,4-hexadieno	dieno	-	CH ₂ =CH-CH ₂ CH=CHCH ₃	82,14	65	760	-	0,7050	20/4
292	1,4-pentadieno	dieno	-	CH ₂ =CH-CH ₂ -CH=CH ₂	68,12	26	760	-148,3	0,6608	20/4
227	1,5-hexadieno	dieno	-	CH ₂ =CH-CH ₂ CH ₂ CH=CH ₂	82,14	59,5	760	-141	0,7000	20/4
487	2,3-hexadieno	dieno	-	CH ₃ CH=C-CHCH ₂ CH ₃	82,14	68	760	-	0,6800	20/4
293	2,3-pentadieno	dieno	-	CH ₃ -CH=C-CHCH ₃	68,12	48,2	760	-125,6	0,6850	20/4
521	2-cis, 4-trans- hexadieno	dieno	-	CH ₃ CH=CH-CH=CHCH ₃	82,14	80	760	-96	0,7200	20/4
519	cis,cis- 2,4-hexadieno	dieno	-	CH ₃ CH=CH-CH=CHCH ₃	82,14	80	760	-69,4	0,7200	20/4
422	cis- 1,3-pentadieno	dieno	-	CH ₂ =CH-CH=CHCH ₃	68,12	44,1	760	-140,8	0,6910	20/4
338	Propadieno (aleno)	dieno	-	CH ₂ =C=CH ₂	40,06	-34,5	760	-13,6	0,7870	-
520	trans,trans- 2,4-hexadieno	dieno	-	CH ₃ CH=CH-CH=CHCH ₃	82,14	80	760	-44,9	0,7200	20/4
225	trans- 1,3-hexadieno	dieno	-	CH ₂ =CH-CH=CHCH ₂ CH ₃	82,14	73	760	-	0,7149	20
146	Ciclopentadieno	dieno	ciclado	C ₅ H ₆	66,10	40	760	-97,2	0,8021	20/4

seleccionado

tóxico, perjudicial para el medio ambiente,
corrosivo u oxidante

no encontrado

Tabla A I.1: Sustancias preseleccionadas para los ensayos. (Continuación).

Nº	COMPUESTO	GRUPO	SUBGRUPO	FÓRMULA	Mw	Peb		Pf	DENSIDAD	
49	1-cloro-1,3-butadieno	dieno	cloro	CH ₂ =CH-CH=CHCl	88,54	68	760	-	0,9606	20/4
50	2-cloro-1,3-butadieno (cloropreno)	dieno	cloro	CH ₂ =C(Cl)CH=CH ₂	88,54	59,4	760	-	0,9583	20/4
52	2-fluoro-1,3-butadieno (fluoropreno)	dieno	flour	CH ₂ =CF-CH=CH ₂	72,08	12	760	-	0,8430	4/4
53	Hexafluoro-1,3-butadieno	dieno	flour	CF ₂ =CF-CF=CF ₂	162,03	6	760	-132	1,5530	20/4
19	Tetrafluoropropanodieno	dieno	flour	F ₂ C=C=CF ₂	112,03	-38	760	-	-	-
56	Pentafluoro-2-trifluorometil-1,3-butadieno	dieno	flour - ramificado	CF ₂ =C(CF ₃)-CF=CF ₂	212,04	39	760	-	1,5270	0/4
54	2-metoxi-1,3-butadieno	dieno	metóxido	CH ₂ =CO(CH ₃)-CH=CH ₂	84,12	75	760	-	0,8272	20/4
51	2,3-dimetil-1,3-butadieno (bisoprenil)	dieno	ramificado	CH ₂ =(CH ₃)C-C(CH ₃)=CH ₂	82,14	68-71	760	-76	1,4394	20/4
501	2-etil-1,3-butadieno	dieno	ramificado	CH ₂ =CHC(C ₂ H ₅)=CH ₂	82,14	75	760	-	0,7170	20/4
55	2-metil-1,3-butadieno (isopreno)	dieno	ramificado	CH ₂ =C(CH ₃)-CH=CH ₂	68,12	34	760	-146	0,6810	20/4
467	2-metil-1,4 pentadieno	dieno	ramificado	CH ₂ =C(CH ₃)CH ₂ -CH=CH ₂	82,14	56	760	-	0,6940	20/4
47	3-metil-1,2-butadieno	dieno	ramificado	CH ₂ =C=C(CH ₃) ₂	68,12	40	760	-120	0,6804	20/4
491	3-metil-1,2-pentadieno	dieno	ramificado	CH ₂ =C=C(CH ₃)CH ₂ CH ₃	82,14	70	760	-	0,7150	20/4
464	3-metil-1,4 pentadieno	dieno	ramificado	CH ₂ =CH-CH(CH ₃)CH=CH ₂	82,14	55	760	-	0,6950	20/4
291	4-metil-1,3-pentadieno	dieno	ramificado	CH ₂ =CH-CH=C(CH ₃)-CH ₃	82,14	76,5	760	-	0,7181	20/4
494	4-metil-2,3-pentadieno	dieno	ramificado	CH ₃ -CH=C=C(CH ₃)CH ₃	82,14	72	760	-	0,7110	20/4
495	cis- 1,3-hexadieno	dieno	ramificado	CH ₂ =C-CHCH ₂ CH ₂ CH ₃	82,14	73	760	-	0,7050	20/4
505	cis- 2-metil-1,3-pentadieno	dieno	ramificado	CH ₂ =C(CH ₃)CH=CHCH ₃	82,14	76	760	-	0,7190	20/4
508	cis- 3-metil-1,3-pentadieno	dieno	ramificado	CH ₂ =CHC(CH ₃)=CHCH ₃	82,14	77	760	-	0,7350	20/4
506	trans- 2-metil-1,3-pentadieno	dieno	ramificado	CH ₂ =C(CH ₃)CH=CHCH ₃	82,14	76	760	-	0,7190	20/4
509	trans- 3-metil-1,3-pentadieno	dieno	ramificado	CH ₂ =CHC(CH ₃)=CHCH ₃	82,14	77	760	-	0,7350	20/4
294	1,3-pentadieno	diino	-	HC≡C-C≡C-CH ₃	64,09	55-56	760	-	0,7375	20/4
71	1,2-epoxibutano	epóxido	-	CH ₃ CH ₂ CH(O)CH ₂	72,11	63,3	760	-	0,8370	17/4
72	cis-2,3-epoxibutano	epóxido	-	CH ₃ CH(O)CHCH ₃	72,11	59,7	742	-80	0,8226	15/4
208	Óxido de etileno	epóxido	-	C ₂ H ₄ O	44,06	13,2	746	-111	0,8824	10/10
378	Óxido de propileno (1,2-epoxipropano)	epóxido	-	CH ₃ CH(O)CH ₂	58,08	34,3	760	-	0,8590	0/4
287	Óxido de trimetileno	epóxido	-	CH ₂ CH ₂ CH ₂ (O)	58,08	47,8	760	-	0,8930	25/4
73	trans-2,3-epoxibutano	epóxido	-	CH ₃ CH(O)CHCH ₃	72,11	56,7	760	-85	0,8010	25/4
77	1,2-epoxiisobutano	epóxido	ramificado	CH ₂ (O)C(CH ₃)CH ₃	72,11	52	760	-	0,8650	0
5	Etanoato de etilo	ester	-	CH ₃ COOC ₂ H ₅	88,11	77,06	760	-83,6	0,9003	20/4
6	Etanoato de metilo	ester	-	CH ₃ COOCH ₃	74,08	57	760	-98,1	0,9330	20/4
214	Metanoato de etilo	ester	-	HCOOC ₂ H ₅	74,08	54,5	760	-80,5	0,9168	20
215	Metanoato de metilo (R-611)	ester	-	HCOOCH ₃	60,05	31,5	760	-99	0,9742	20/4
7	Etanoato de etinilo	ester	alqueno	CH ₃ COOCH=CH ₂	86,09	72,3	760	-93,2	0,9317	20/4
428	Metanoato de etileno	ester	alqueno	HCOOCH=CH ₂	72,06	46,6	760	-57	0,9180	40

seleccionado

tóxico, perjudicial para el medio ambiente,
corrosivo u oxidante

no encontrado

Tabla A I.1: Sustancias preseleccionadas para los ensayos. (Continuación).

N°	COMPUESTO	GRUPO	SUBGRUPO	FÓRMULA	Mw	Peb		Pf	DENSIDAD	
402	Etiltrifluoroacetato	ester	fluor	F ₃ CCOOC ₂ H ₅	142,08	60-62	760	-	1,1900	20/4
216	Metanoato de isopropilo	ester	ramificado	HCOOCH(CH ₃) ₂	88,11	68,2	760	-	0,8728	20/4
113	Butilmetileter	eter	-	C ₄ H ₉ OCH ₃	88,15	71	760	-115,5	0,7443	20/4
186	Dietileter (R-610)	eter	-	C ₂ H ₅ OC ₂ H ₅	74,12	34,5	760	-	0,7138	20/4
271	Dimetileter	eter	-	CH ₃ OCH ₃	46,07	-25	760	-138,5	-	-
190	Etilmetileter	eter	-	C ₂ H ₅ OCH ₃	60,10	10,8	760	-	0,7252	0/0
196	Etilpropileter	eter	-	C ₂ H ₅ OC ₃ H ₇	88,15	63,6	760	<-79	0,7386	20/4
522	Isopropilpropileter	eter	-	C ₃ H ₇ OC ₃ H ₇	102,18	80	760	-	0,7370	20/4
278	Metilpropileter	eter	-	CH ₃ OC ₃ H ₇	74,12	38-39	760	-	0,7380	20/4
23	Alileter	eter	alqueno	CH ₂ =CHCH ₂ OC ₂ H ₅	86,13	66	760	-	0,7651	20/4
25	Alilmetileter	eter	alqueno	CH ₂ =CHCH ₂ OCH ₃	72,11	46	760	-	0,7700	11/11
26	Alilvinileter	eter	alqueno	CH ₂ =CHCH ₂ -O-CH=CH ₂	84,12	65	740	-104,5	0,8050	20/4
409	Divinileter	eter	alqueno	(CH ₂ =CH) ₂ O	70,09	28	760	-101	0,7730	20/4
198	Etilvinileter	eter	alqueno	C ₂ H ₅ OCH=CH ₂	72,11	35-36	760	-115,8	0,7589	20/4
282	Metilvinileter	eter	alqueno	CH ₃ OCH=CH ₂	58,08	12	760	-122	0,7725	0/4
381	Isopropilvinileter	eter	alqueno - ramificado	i-C ₃ H ₇ OCH=CH ₂	86,13	55-56	760	-	0,7534	20/4
209	Etilnitroacetato	eter	alqueno	CH ₃ OC=CH	56,06	50	760	-	0,8001	20/4
210	Etilnitroacetato	eter	alqueno	C ₃ H ₇ OC=CH	84,12	75	760	-	0,8080	20/4
379	Diisopropileter	eter	ramificado	(CH ₃) ₂ CHOCH(CH ₃) ₂	102,18	68	760	-85,9	0,7241	20/4
197	Etilisopropileter	eter	ramificado	i-C ₃ H ₇ OC ₂ H ₅	88,15	54	760	-	0,7200	25/4
114	iso-butilmetileter	eter	ramificado	i-C ₄ H ₉ OCH ₃	88,15	58	760	-	0,7311	20/4
279	Metilisopropileter	eter	ramificado	(CH ₃) ₂ CHOCH ₃	74,12	32,5	777	-	0,7237	15/4
115	sec-butilmetileter	eter	ramificado	sec-C ₄ H ₉ OCH ₃	88,15	60	760	-	0,7415	20/4
111	tert-butilmetileter	eter	ramificado	(CH ₃) ₃ COC ₂ H ₅	102,18	73,1	760	-94	0,7519	25
116	tert-butilmetileter	eter	ramificado	(CH ₃) ₃ COCH ₃	88,15	55,2	760	-109	0,7405	20/4
427	Metilal	etóxido	-	CH ₃ -O-CH ₃ -O-CH ₃	76,10	42	760	-105	0,8559	20
323	2,4-dimetil-6-hidroximetilfenol	fenol	-	2,4-(CH ₃) ₂ -6-(HOCH ₂)C ₆ H ₂ OH	152,19	57-58	760	-	-	-
400	Ácido trifluoroacético	fluor	ácido	F ₃ CCO ₂ H	114,02	72,4	760	-15,2	1,5351	0
401	Ácido trifluoroacético anhídrido	fluor	ácido	F ₃ CCO ₂ H	210,03	39-40	760	-65	1,4900	25/4
144	Metilperfluorociclohexano	fluor	ciclado - ramificado	CF ₃ C ₆ F ₁₁	350,05	76,1	760	-44,7	1,7878	25/4
261	Pentafluorotio-trifluorometano	fluor	mercaptano	F ₃ C(SF ₃)	196,06	-20	760	-	-	-
264	Trifluoroclorometilmercaptano	fluor	mercaptano	F ₃ CSCI	136,52	-0,7	760	-	-	-
352	1-nitroheptafluoropropano	fluor	nitro	CF ₃ CF ₂ CF ₂ NO ₂	215,03	25	760	-	-	-
174	Nitropentafluoroetano	fluor	nitro	CF ₃ CF ₂ NO ₂	165,02	0	760	-	-	-
260	Nitrotrifluorometano	fluor	nitro	NOCF ₄	115,01	-31,1	760	-	-	-

seleccionado

tóxico, perjudicial para el medio ambiente,
corrosivo u oxidante

no encontrado

Tabla A I.1: Sustancias preseleccionadas para los ensayos. (Continuación).

Nº	COMPUESTO	GRUPO	SUBGRUPO	FÓRMULA	Mw	Peb		Pf	DENSIDAD	
353	1-nitrosoheptafluoropropano	fluor	nitroso	CF ₃ CF ₂ CF ₂ NO	199,03	-12	760	-150	-	-
175	Nitrosopentafluoroetano	fluor	nitroso	CF ₃ CF ₂ NO	149,02	-42	760	-	-	-
249	Bromodifluoronitrometano	fluor - bromo	nitro	BrNO ₂ F ₂ C	131,47	25	760	-	-	-
246	Bromodifluoronitrosometano	fluor - bromo	nitroso	BrNOF ₂ C	159,92	-12	760	-	-	-
330	Dimetilfosfina	fosfina	-	(CH ₃) ₂ PH	62,05	25	760	<1	-	-
331	Etilfosfina	fosfina	-	C ₂ H ₅ PH ₂	62,05	25	760	<1	-	-
332	Metilfosfina	fosfina	-	CH ₃ PH ₃	48,02	-14	760	-	-	-
334	Trimetilfosfina	fosfina	-	(CH ₃) ₃ P	76,08	37,8	760	-85	-	-
327	Bistrifluorometilcianofosfina	fosfina	ciano - fluor	(F ₃ C) ₂ PCN	195,00	48	760	-	-	-
325	Bistrifluorometilfosfina	fosfina	fluor	(F ₃ C) ₂ PH	169,99	1	-137	-	-	-
333	Trifluorometilfosfina	fosfina	fluor	F ₃ CPH ₂	102,00	-26,5	760	-	-	-
335	tris-trifluorometilfosfina	fosfina	fluor	(F ₃ C) ₃ P	237,99	17,3	760	-112	-	-
326	Bistrifluorometilclorofosfina	fosfina	fluor - cloro	(F ₃ C) ₂ PCl	204,44	21	760	-	-	-
329	Diclorotrifluorometilfosfina	fosfina	fluor - cloro	F ₃ CPCl ₂	170,89	37	760	-	-	-
336	Óxido de tris-trifluorometilfosfina	fosfina	fluor - óxido	(F ₃ C) ₃ PO	253,99	23,6	760	-	-	-
328	Bistrifluorometiliodofosfina	fosfina	fluor - yodo	(F ₃ C) ₂ PI	295,89	73	760	-	-	-
217	Furano	furano	-	C ₄ H ₄ O	68,08	31,4	760	-85,6	0,9514	20/4
222	Tetrahidrofurano	furano	-	C ₄ H ₈ O	72,11	67	760	-	0,8892	20/4
218	2-clorofurano	furano	cloro	2-Cl(C ₄ H ₃ O)	102,52	77,5	744	-	1,1923	20/4
219	3-clorofurano	furano	cloro	3-Cl(C ₄ H ₃ O)	102,52	79	742	-	1,2094	20/4
220	2-metilfurano	furano	ramificado	2-CH ₃ (C ₄ H ₃ O)	82,10	63	737	-	0,9132	20/4
221	3-metilfurano	furano	ramificado	3-CH ₃ (C ₄ H ₃ O)	82,10	65,5	749	-	0,9230	18/4
11	Bromuro de acetilo	halogenuro de ácido	bromo	CH ₃ COBr	122,95	76	760	-98	1,6625	16/4
12	Cloruro de acetilo	halogenuro de ácido	cloro	CH ₃ COCl	78,50	20,9	760	-112	1,1051	20/4
324	Cloruro de carbonilo	halogenuro de ácido	cloro	COCl ₂	98,92	7,6	760	-118	1,3810	20/4
285	Cloruro de oxalil	halogenuro de ácido	cloro	ClCOCOC	126,93	63-64	760	-16	1,4785	20/4
187	Hipoclorito de etilo	halogenuro de ácido	cloro	C ₂ H ₅ OCl	80,51	36	732	-	1,0130	-6/4
13	Fluoruro de acetilo	halogenuro de ácido	fluor	CH ₃ COF	62,04	20,8	760	-	1,0020	15/4
363	Fluoruro de propionilo	halogenuro de ácido	fluor	CH ₃ CH ₂ COF	76,07	44	760	-	0,9720	15/4
239	1,1-dimetilhidrazina	hidrazina	-	(CH ₃) ₂ NNH ₂	60,10	63	752	-	0,7914	22
207	Etilenimina (aziridina)	imina	-	C ₂ H ₅ N	43,07	50	756	-	0,8310	20/4
34	Trimetil-N-imina (azetidina)	imina	-	C ₃ H ₇ N	57,10	63	748	-	0,8436	20
516	Etilisocianato	isocianato	-	CNC ₂ H ₅	55,08	78,5	760	-	0,7418	20/4
188	Isocianato de etilo	isocianato	-	C ₂ H ₅ NCO	71,08	60	760	-	0,9031	20/4
276	metilisocianato	isocianato	-	CH ₃ NCO	57,05	39,1	760	-45	0,9230	27/4

seleccionado

tóxico, perjudicial para el medio ambiente,
corrosivo u oxidante

no encontrado

Tabla A I.1: Sustancias preseleccionadas para los ensayos. (Continuación).

N°	COMPUESTO	GRUPO	SUBGRUPO	FÓRMULA	Mw	Peb		Pf	DENSIDAD	
357	1-propanotiol	mercaptano	-	CH ₃ CH ₂ CH ₂ SH	76,16	67,8	760	-113,3	0,8411	20
358	2-propanotiol	mercaptano	-	CH ₃ CHSHCH ₃	76,16	52,5	760	-130,5	0,8143	20/4
180	Etanotiol	mercaptano	-	C ₂ H ₅ SH	62,13	35	760	-144,4	0,8391	20/4
267	Metanotiol	mercaptano	-	CH ₃ SH	48,10	6,2	760	-123	0,8665	20/4
498	Metil tiirano	mercaptano	-	CH ₂ (S)CHCH ₃	74,14	74,5	760	-91	0,9440	20/4
499	Metilpentil sulfato	mercaptano	-	CO(SO ₃)C ₅ H ₁₁	182,24	75	760	-	1,1900	20/4
24	2-propenil-mercaptano	mercaptano	alqueno	CH ₂ =CHCH ₂ SH	74,14	67-68	760	-	0,9250	23/4
112	2-metil-2-propanotiol	mercaptano	ramificado	(CH ₃) ₂ CSH	90,18	64,2	760	1,11	0,8002	10/4
110	3-metoxi-2-metilpropeno	metóxido	-	CH ₃ OCH ₂ C(CH ₃)=CH ₂	86,13	68	773	-	0,7698	20/4
158	Metoxiciclopropano	metóxido	ciclado	(CH ₂ O) ₃ H ₅	72,11	44,7	760	-119	0,8100	20/4
277	Nitrato de metilo	nitrate	-	CH ₃ ONO	61,04	-12	760	-16	0,9910	15
474	Metilisonitrilo	nitrilo	-	CH ₃ NC	41,05	59	760	-45	0,7464	20/4
241	Oxopropanodinitrilo	nitrilo	-	OC(CN) ₂	80,05	65,5	760	-36	1,1240	20/4
117	iso-butilnitrito	nitrito	-	C ₄ H ₉ ONO	103,12	67	760	-	0,8699	20/4
380	Isopropilnitrito	nitrito	-	(CH ₃) ₂ CHONO	89,09	45	760	-	0,8684	15/4
192	Nitrito de etilo	nitrito	-	C ₂ H ₅ ONO	75,07	17	725	-	0,9000	15/15
118	tert-butilnitrito	nitrito	-	(CH ₃) ₃ CONO	103,12	63	760	-	0,8670	20/4
193	Dietil-peróxido	peróxido	-	C ₂ H ₅ OOC ₂ H ₅	90,12	65	760	-70	0,8240	19
403	Peróxido de trifluorometilo	peróxido	fluor	F ₃ COOCF ₃	170,01	-32	760	-	-	-
280	Dimetilseleniuro	selenio	-	(CH ₃) ₂ Se	109,03	54,5	753	-	1,4077	15/4
388	Dietilsilano	silicio	-	(C ₂ H ₅) ₂ SiH ₂	88,22	56	760	-134,4	0,6832	20/4
391	Dimetilpropilsilano	silicio	-	(CH ₃) ₂ SiC ₃ H ₇	102,25	73-74	760	-	-	-
390	Dimetilsilano	silicio	-	(CH ₃) ₂ SiH ₂	60,17	-20,1	760	-150,2	0,6800	-80
396	Tetrametilsilano	silicio	-	(CH ₃) ₄ Si	88,22	26,5	760	-102,2	0,6480	19/4
392	Difenilsilano	silicio	aromático	(C ₆ H ₅) ₂ SiH ₂	184,31	75	760	-	-	-
386	Clorotrimetilsilano	silicio	cloro	(CH ₃) ₃ SiCl	108,64	57,7	760	-57,7	0,8580	20/4
387	Diclorodimetilsilano	silicio	cloro	(CH ₃) ₂ SiCl ₂	129,06	70,5	760	-76	1,0700	25/25
395	Metiltriclorosilano	silicio	cloro	CH ₃ SiCl ₃	149,48	66,4	760	-77,8	1,2730	25/23
389	Dietildifluorosilano	silicio	fluor	(C ₂ H ₅) ₂ SiF ₂	124,21	60,9	755	-78,7	0,9348	20/4
394	Etiltrifluorosilano	silicio	fluor	(C ₂ H ₅)SiF ₃	114,14	-4,4	760	-105	1,2270	-76
393	Etoxitrifluorosilano	silicio	fluor - etóxido	C ₂ H ₅ OSiF ₃	130,14	-7	760	-122	-	-
281	Dimetilsulfuro	sulfuro	-	(CH ₃) ₂ S	62,13	37,3	760	-98,3	0,8483	20/4
191	Metiletilsulfuro	sulfuro	-	C ₂ H ₅ SCH ₃	76,16	66,6	760	-105,9	0,8422	20/4
169	Hexafluorodimetildisulfuro	sulfuro	fluor	CF ₃ SSCF ₃	202,13	34,6	760	>1	-	-
404	Sulfuro de trifluorometilo	sulfuro	fluor	F ₃ CSCF ₃	170,07	-22,2	760	-	-	-

seleccionado

tóxico, perjudicial para el medio ambiente,
corrosivo u oxidante

no encontrado

REFERENCIAS

- [1] National Institute of Standards and Technology (Nist). *Thermodynamics Tables, Database 85*. Maryland, USA, 2002.
- [2] National Institute of Standards and Technology (Nist). *Chemical Book, Database 69*. Maryland, USA, 2005.
- [3] Lide, R. D. *Handbook of Chemistry and Physics (84th edition)*. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2004. 1680 p. ISBN 0-8493-0484-9.
- [4] Reid, R. C., Prausnitz, J. M., Poling, B. E. *The properties of gases and liquids (fourth edition)*. New York. McGraw-Hill Book Company, 1987. 741 p. ISBN 0-07-051799-1.

Anexo II
Selección intermedia de sustancias

A II.1. Selección intermedia de sustancias

A fin de reducir el elevado número de las sustancias preseleccionadas que aparecen en el Anexo I se ha realizado una selección intermedia eliminando de la lista previa todos los compuestos tóxicos, corrosivos y los perjudiciales para el medio ambiente y, también, la mayor parte de los alcanos ramificados. Además, se ha acotado el rango de temperaturas y se ha buscado que tuviesen una alta entalpía de vaporización y bajos efectos medioambientales.

Para esta segunda selección, que aparece a continuación, se han realizado dos tablas de clasificación:

- En la primera tabla están todos los fluidos que, siguiendo la clasificación de [11] ASHRAE, son considerados como refrigerantes.
- En la segunda, todos los demás compuestos.

Se dan algunas de sus propiedades termofísicas fundamentales, así como los índices ODP y GWP.

Se han destacado en verde los fluidos que se han considerado más prometedores para ser ensayados.

El Etanotiol (C_2H_5SH) aparece como seleccionado e, incluso, se llegó a tener en el laboratorio. Finalmente se desechó a causa de su olor, difícilmente soportable.

Tabla A II.1: Selección intermedia de sustancias refrigerantes. (Continuación).

Nº	Nombre	Fórmula	M	teb	tf	tc	pc	ρc	cp		Δvap	Viscosidad		k		σ	ODP _{Mon} treal	GWP	vida	TLV	CÓD
									L	V		L	V	L	V						
R-227	Heptafluoro propano	C ₃ HF ₇	170,03	-18,0	-131,0	101,8	2,91	-	137,30	-	-	-	-	-	-	-	0	2900	36,5	1000	-
R-C270	Ciclo propano	C ₃ H ₆	42,08	-32,7	-127,6	124,8	5,54	6150	81,34	55,60	20,05	-	-	-	-	-	0	-	-	-	F+
R-290	Propano	CH ₃ CH ₂ CH ₃	44,10	-42,1	-188,0	96,9	4,25	5000	120,97	90,14	19,04	97,2	8,74	92,94	19,11	6,98	0	-20	≈0	2500	F+
R-C318	Octafluoro ciclobutano	C ₄ F ₈	200,03	-6,4	-40,0	115,5	2,78	-	222,40	163,00	23,72	-	10,92	-	11,09	-	0	8700	3200	1000	-
R-365mfc	1,1,1,3,3 pentafluorobutano	C ₄ H ₅ F ₅	148,90	40,2	-29,0	204,5	3,49	-	151,20	-	-	452,0	10,50	89,20	10,60	15,10	0	585	1150	-	-
R-600	Butano	C ₄ H ₁₀	58,12	-0,5	-138,4	152,0	3,78	3920	140,90	98,49	22,44	-	7,50	-	16,40	-	0	-20	-	800	F+
R-600a	Isobutano	(CH ₃) ₃ CH	58,12	-11,6	-160,0	134,7	3,64	4205	142,68	105,66	21,30	151,1	7,74	95,57	16,49	10,11	0	8	≈0	800	F+
R-601	Pentano	C ₅ H ₁₂	72,15	36,1	-130,0	196,8	3,36	3220	167,19	120,07	25,79	224,0	6,70	113,00	14,40	15,49	0	11	≈0	600	F+, Xn,N
R-610	Etil eter	C ₂ H ₅ OC ₂ H ₅	74,12	34,5	-119,0	194,0	3,64	3500	172,50	119,46	26,52	224,0	7,60	130,00	15,10	16,65	0	-	≈0	400	F+, Xn
R-611	Metanoato de metilo	HCOOCH ₃	60,06	32,0	-100,0	214,2	6,00	5818	119,70	64,38	27,92	325,0	-	-	-	24,36	0	-	-	100	F+, Xn
R-717	Amoniac	NH ₃	17,03	-33,3	-77,7	132,4	11,30	-	82,00	35,10	23,33	11,4	72,00	-	24,40	19,80	0	<1	≈0	25	T, N
R-718	Agua	H ₂ O	18,02	100,0	0,0	374,1	22,06	17874	75,30	33,60	40,65	890,0	10,00	607,00	18,70	71,99	0	<1	-	-	-
R-744	Dióxido de carbono	CO ₂	44,01	-78,6	-56,6	31,2	7,38	10543	-	37,10	25,13	-	15,00	-	16,80	-	0	1	>50	5000	-
Fluorinert FC-72	Perfluoro hexano	C ₆ F ₁₄	338,04	59,0	-90,5	175,8	1,87	1650	240,20	-	28,90	656,0	-	57,00	-	11,10	0	9000	3200	-	Xi
Fluorinert FC-84	Perfluoro heptano	C ₇ F ₁₆	388,05	82,5	-60,2	201,7	16,20	1760	407,40	-	33,18	91,0	8,80	60,00	-	12,00	0	7200	4100	-	Xi
Unidades			g/mol	°C	°C	°C	MPa	mol/m³	J/molK	KJ/mol	μPa.s	mW/mK	mN/m	años							

Alta seguridad
Media seguridad
Baja seguridad

A Teb
A 0°C

A 15°C
A 20°C

A 30°C
A -33°C

Seleccionado

Tabla A II.2: Selección intermedia de sustancias.

COMPUESTO	Fórmula	M	t _{eb} (°C)	t _f (°C)	ρ	c p		ΔvapH		T _c	p _c	v _c	VIS COS.		σ	k		TLV	CÓD.
						líq	vap	T _{eb}	25°C				L	V		L	V		
Hexano	C ₆ H ₁₄	86,18	69,0	-95,0	0,6603	195,52	142,60	28,85	-	508	3,02	368	300	6,5	17,89	120	14,00	50	F, Xn, N
Isopentano	CH ₃ CH ₂ CH(CH ₃) ₂	72,15	27,8	-159,9	0,6201	164,9	118,9	24,69	-	461	3,38	306	-	-	-	-	-	-	F
Ciclobutano	C ₄ H ₈	56,11	12,0	-50,0	0,7200	106,32	70,60	24,12	-	460	4,98	210	-	-	-	-	-	-	F+
Ciclopentano	C ₅ H ₁₀	70,13	49,2	-93,9	0,7457	126,87	82,80	27,30	29,21	512	4,51	260	440	-	21,88	126	-	600	F
2-metilpropeno (isobuteno)	C ₄ H ₈	56,11	-6,3	-140,6	-	121,30	88,09	22,46	-	418	4,00	239	-	7,3	-	-	14,18	-	F+
trans-2-buteno	CH ₃ CH=CHCH ₃	56,11	1,2	-105,5	0,6042	124,40	87,67	22,72	21,40	429	3,99	238	-	7,3	-	-	14,06	-	F
cis-2-buteno	CH ₃ CH=CHCH ₃	56,11	3,7	-138,9	0,6213	126,15	80,15	23,34	22,16	436	4,20	234	-	7,3	-	-	13,98	-	F
3-metil-1-buteno	C ₅ H ₁₀	70,13	20,0	-168,4	0,6272	156,10	115,00	-	-	453	3,53	305	-	-	-	-	-	-	F
1-buteno	CH ₂ =CHCH ₂ CH ₃	56,11	-6,3	-158,3	0,5951	128,96	85,56	22,07	20,22	420	4,02	240	-	7,1	-	-	13,68	-	F+
1-penteno	CH ₂ =CH-CH ₂ -CH ₂ -CH ₃	70,13	30,0	-138,0	0,6405	154,87	108,20	25,20	-	465	3,56	298	195	-	15,47	116	-	-	F+, Xn
2-metil-2-buteno	CH ₃ CH ₃ C=CH ₂ CH ₃	70,13	38,6	-	0,6623	145,30	-	-	21,52	481	3,42	-	203	7,1	17,15	117	12,00	-	-
Ciclopentadieno	C ₅ H ₆	66,10	40,0	-97,2	0,8021	115,30	75,40	-	-	481	-	-	-	-	-	-	-	75	T, F+
Propadieno (aleno)	CH ₂ =C=CH ₂	40,06	-34,5	-13,6	0,7870	-	59,03	-	-	394	5,25	-	-	-	-	-	-	-	F+
1-butino	CH ₃ CH ₂ C≡CH	54,09	8,1	-125,7	0,6784	81,00	-	24,52	23,35	464	4,60	-	-	7,3	-	-	14,81	-	F+
Propino	CH ₃ C≡CH	40,06	-23,2	-101,5	0,7062	-	60,73	-	-	402	5,63	164	-	8,1	-	-	14,00	1000	F+
Etanal (acetaldehído)	CH ₃ CHO	44,05	20,8	-121,0	0,7834	89,00	55,30	25,76	25,47	466	-	154	-	-	20,5	-	-	100	F+, Xn
Propanal	CH ₃ CH ₂ CHO	58,08	48,8	-81,0	0,8058	159,10	80,73	28,31	29,62	504	5,27	204	321	-	22,6	-	-	20	F, Xi
Butanal	CH ₃ CH ₂ CH ₂ CHO	72,11	75,7	-99,0	0,8170	164,70	-	-	-	537	4,32	-	-	-	-	-	-	-	F+
Unidades		g/mol	°C	°C	lg/m ³	J/molK	KJ/mol	KJ/mol	K	Mpa	cm ³ /mol	μPa s	mN/m	mW/mK					

Seleccionado

Tabla A II.2: Selección intermedia de sustancias. (Continuación).

COMPUESTO	Fórmula	M	t _{eb} (°C)	t _f (°C)	ρ	c _p		Δvaph		T _c p _c	v _c	VISCOS.		σ	k	TLV	CÓD.	
						liq	vap	T _{eb}	25°C			L	V					L
Acetona	CH ₃ COCH ₃	58,80	56,2	-95,4	0,7899	126,30	75,00	29,10	30,99	508	4,70	209	360	23,46	161	11,50	1000	F, Xi
Etilmetiléter	C ₂ H ₅ OCH ₃	60,10	10,8	-	0,7252	-	93,30	-	-	438	4,40	221	-	-	-	-	-	-
Metilpropil éter	CH ₃ OC ₃ H ₇	74,12	38-9	-	0,7380	165,40	-	26,75	-	476	3,80	-	-	-	-	-	-	-
Etilpropil éter	C ₂ H ₅ OC ₃ H ₇	88,15	63,6	<-79	0,7386	197,20	-	28,94	-	500	3,37	-	-	-	-	-	-	-
Bromuro de etilo (bromoetano)	C ₂ H ₅ Br	108,97	38,4	-118,6	1,4604	100,80	64,50	27,04	28,03	504	6,23	215	374	23,62	-	-	5	F, Xn
Yoduro de etilo (yodoetano)	C ₂ H ₅ I	155,97	72,3	-108,0	1,9358	115,10	66,90	29,44	31,93	-	-	-	556	28,46	-	-	-	Xn
1-bromo propano	BrCH ₂ CH ₂ CH ₃	122,99	71,0	-110,0	1,3537	134,60	-	29,84	32,01	537	4,80	-	-	-	-	-	-	Xn
Metanol	CH ₃ OH	32,04	65,0	-93,9	0,7914	81,10	43,90	35,21	37,43	513	8,09	118	590	22,07	200	15,00	200	F, T
Etanol	CH ₃ CH ₂ OH	46,07	78,5	-117,3	0,7893	112,30	65,40	38,56	42,32	514	6,13	167	1074	21,97	169	14,40	1000	F
Etilacetato	CH ₃ CO ₂ C ₂ H ₅	88,11	77,1	-83,6	0,9003	170,70	-	31,94	35,60	523	3,88	286	423	23,39	144	-	400	F, Xi
Furano	C ₄ H ₄ O	68,08	31,4	-85,6	0,9514	115,30	65,40	27,1	27,50	490	5,50	218	361	-	126	-	-	F+, T
Tetrahidrofurano	C ₄ H ₈ O	72,11	67	-108,0	0,8892	124,10	76,60	29,81	33,00	540	5,19	225	480	-	141	-	200	F, Xi
Formaldehído dimetilacetal	CH ₂ (OCH ₂) ₂	76,10	42,3	-105	0,8600	161,4	-	-	28,89	481	3,95	-	300	21,1	-	-	1000	F, Xi
Tetracloro silano	Cl ₄ Si	169,90	57,0	-68,6	-	145,3	90,30	28,7	29,70	304	3,7	-	↑↑	18,29	99	-	-	Xi
Etanotiol	C ₂ H ₅ SH	62,13	35,0	-144,4	0,8391	117,99	-	26,79	27,30	499	5,49	207	287	23,08	-	-	0,5	F, Xn
1-propanotiol	CH ₃ CH ₂ CH ₂ SH	76,16	67,8	-113,3	0,8411	144,56	-	29,54	-	537	-	286	385	24,2	-	-	-	F, Xn
2-propanotiol	CH ₃ CHSHCH ₃	76,16	52,5	-130,5	0,8143	145,35	-	27,91	-	517	-	-	357	21,33	-	-	-	F, Xi
Unidades		g/mol	°C	°C	lg/m ³	J/molK	KJ/mol	K	Mpa	cm ³ /mol	mN/m	μPa s	mW/mK					

Seleccionado

Anexo III

Fichas de seguridad de las sustancias



A III.1. Fichas internacionales de seguridad química

Se han proporcionado, en este anexo, las fichas internacionales de seguridad química de las sustancias seleccionadas para realizar los ensayos de la tesis, que se han obtenido de la base de datos [1] de Instituto Nacional de Seguridad e Higiene, dependiente del Ministerio de Empleo y Seguridad Social.

Se han aportado las fichas de las siguientes sustancias:

- Acetona	(CH ₃ - CO - CH ₃)
- Ciclopentano	(C ₅ H ₁₀)
- Dietil éter o éter dietílico	(CH ₃ - CH ₂ - O - CH ₂ - CH ₃)
- Etanal	(CH ₃ - CHO)
- Isopentano o Metil butano	(CH ₃ - CH (CH ₃) - CH ₂ - CH ₃)
- Metanoato de metilo o formiato de metilo	(H - COO - CH ₃)
- Metanol	(CH ₃ - OH)
- N-Hexano	(CH ₃ - CH ₂ - CH ₂ - CH ₂ - CH ₂ - CH ₃)
- N-Pentano	(CH ₃ - CH ₂ - CH ₂ - CH ₂ - CH ₃)
- Propanal	(CH ₃ - CH ₂ - CHO)
- R 141b (1,1 dicloro-1 fluoro etano)	(CFCl ₂ - CH ₃)



A III.2. Ficha de seguridad química de la Acetona

ACETONA		ICSC: 0087 Abril 2009	
CAS: 67-64-1 RTECS: AL3150000 NU: 1090 CE Índice Anexo I: 606-001-00-8 CE / EINECS: 200-662-2		2-Propanona Dimetil cetona Metil cetona $C_3H_6O / CH_3-CO-CH_3$ Masa molecular: 58.1	
			
TIPO DE PELIGRO / EXPOSICIÓN	PELIGROS AGUDOS / SÍNTOMAS	PREVENCIÓN	PRIMEROS AUXILIOS / LUCHA CONTRA INCENDIOS
INCENDIO	Altamente inflamable.	Evitar las llamas, NO producir chispas y NO fumar.	Polvo, espuma resistente al alcohol, agua en grandes cantidades o dióxido de carbono.
EXPLOSIÓN	Las mezclas vapor/aire son explosivas. El calentamiento intenso puede producir aumento de la presión con riesgo de estallido.	Sistema cerrado, ventilación, equipo eléctrico y de alumbrado a prueba de explosión. NO utilizar aire comprimido para llenar, vaciar o manipular. Utilícense herramientas manuales no generadoras de chispas.	En caso de incendio: mantener fríos los bidones y demás instalaciones rociando con agua.
EXPOSICIÓN			
Inhalación	Dolor de garganta. Tos. Confusión mental. Dolor de cabeza. Vértigo. Somnolencia. Pérdida del conocimiento.	Ventilación, extracción localizada o protección respiratoria.	Aire limpio y reposo. Proporcionar asistencia médica.
Piel	Piel seca.	Guantes de protección.	Quitar las ropas contaminadas. Aclarar y lavar la piel con agua y jabón.
Ojos	Enrojecimiento. Dolor. Visión borrosa.	Gafas de protección de seguridad.	Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad). Proporcionar asistencia médica.
Ingestión	Náuseas. Vómitos. (Ver Inhalación).	No comer, ni beber, ni fumar durante el trabajo. Lavarse las manos antes de comer.	Enjuagar la boca. Proporcionar asistencia médica.
DERRAMES Y FUGAS		ENVASADO Y ETIQUETADO	
Eliminar toda fuente de ignición. Ventilar. Protección personal: filtro para gases y vapores orgánicos de bajo punto de ebullición adaptado a la concentración de la sustancia en el aire. NO verterlo en el alcantarillado. Recoger el líquido procedente de la fuga en recipientes precintables. Absorber el líquido residual en arena o absorbente inerte y trasladarlo a un lugar seguro. Eliminarlo a continuación con agua abundante.		Clasificación UE Símbolo: F, Xi R: 11-36-66-67 S: (2)-9-16-26-46 Clasificación NU Clasificación de Peligros NU: 3 Grupo de Envasado NU: II Clasificación GHS Peligro Líquido y vapores muy inflamables. Provoca irritación ocular.	
RESPUESTA DE EMERGENCIA		ALMACENAMIENTO	
Código NFPA: H1; F3; R0		A prueba de incendio. Separado de: Ver Peligros Químicos. Almacenar en un área sin acceso a desagües o alcantarillas.	
Preparada en el Contexto de Cooperación entre el IPCS y la Comisión Europea © CE, IPCS, 2009			
			

VÉASE INFORMACIÓN IMPORTANTE AL DORSO

ACETONA		ICSC: 0087
DATOS IMPORTANTES		
<p>ESTADO FÍSICO; ASPECTO Líquido incoloro de olor característico.</p> <p>PELIGROS FÍSICOS El vapor es más denso que el aire y puede extenderse a ras del suelo. Posible ignición en punto distante.</p> <p>PELIGROS QUÍMICOS La sustancia puede formar peróxidos explosivos en contacto con oxidantes fuertes tales como ácido acético, ácido nítrico y peróxido de hidrógeno. Reacciona con cloroformo y bromoformo en medio básico, originando peligro de incendio y explosión. Ataca a los plásticos.</p> <p>LÍMITES DE EXPOSICIÓN TLV: 500 ppm como TWA, 750 ppm como STEL. A4 (no clasificable como cancerígeno humano). BEI establecido (ACGIH 2009). LEP UE: 500 ppm, 1210 mg/m³ como TWA (EU 2000).</p>	<p>VÍAS DE EXPOSICIÓN La sustancia se puede absorber por inhalación.</p> <p>RIESGO DE INHALACIÓN Por evaporación de esta sustancia a 20°C se puede alcanzar bastante rápidamente una concentración nociva en el aire, sin embargo, más rápidamente por pulverización o cuando se dispersa.</p> <p>EFFECTOS DE EXPOSICIÓN DE CORTA DURACIÓN La sustancia irrita los ojos y el tracto respiratorio. La exposición a altas concentraciones puede producir disminución del estado de alerta.</p> <p>EFFECTOS DE EXPOSICIÓN PROLONGADA O REPETIDA El líquido desengrasa la piel. El contacto repetido puede producir piel seca y agrietada.</p>	
PROPIEDADES FÍSICAS		
<p>Punto de ebullición: 56°C Punto de fusión: -95°C Densidad relativa (agua = 1): 0.8 Solubilidad en agua: miscible. Presión de vapor, kPa a 20°C: 24 Densidad relativa de vapor (aire = 1): 2.0</p>	<p>Densidad relativa de la mezcla vapor/aire a 20°C (aire = 1): 1.2 Punto de inflamación: -18°C c.c. Temperatura de autoignición: 465°C Límites de explosividad, % en volumen en el aire: 2.2-13 Coeficiente de reparto octanol/agua como log Pow: -0.24 Viscosidad, mm²/s a 40 °C: 0.34</p>	
DATOS AMBIENTALES		
NOTAS		
El consumo de bebidas alcohólicas aumenta el efecto nocivo.		
INFORMACIÓN ADICIONAL		
<p>Límites de Exposición Profesional (INSHT 2011):</p> <p>VLA-ED: 500 ppm; 1210 mg/m³</p> <p>VLB: 50 mg/l en orina. Nota I.</p>		
NOTA LEGAL	Esta ficha contiene la opinión colectiva del Comité Internacional de Expertos del IPCS y es independiente de requisitos legales. Su posible uso no es responsabilidad de la CE, el IPCS, sus representantes o el INSHT, autor de la versión española.	
© IPCS, CE 2009		

A III.3. Ficha de seguridad química del Ciclopentano

CICLOPENTANO		ICSC: 0353 Septiembre 2011	
CAS: RTECS: NU: CE Índice Anexo I: CE / EINECS:	287-92-3 GY2390000 1146 601-030-00-2 206-016-6	Pentametileno C_5H_{10} Masa molecular: 70.1	
TIPO DE PELIGRO / EXPOSICIÓN	PELIGROS AGUDOS / SÍNTOMAS	PREVENCIÓN	PRIMEROS AUXILIOS / LUCHA CONTRA INCENDIOS
INCENDIO	Altamente inflamable. El calentamiento intenso puede producir aumento de la presión con riesgo de estallido.	Evitar las llamas. NO producir chispas. NO fumar.	Polvo, AFFF, espuma o dióxido de carbono. El agua puede ser ineficaz.
EXPLOSIÓN	Las mezclas vapor/aire son explosivas. El calentamiento intenso puede producir aumento de la presión con riesgo de estallido.	Sistema cerrado, ventilación, equipo eléctrico y de alumbrado a prueba de explosión. Evitar generar de cargas electrostáticas (p. ej., mediante conexión a tierra). NO utilizar aire comprimido para llenar, vaciar o manipular. Úsense herramientas manuales no generadoras de chispas.	En caso de incendio: mantener fríos los bidones y demás instalaciones rociando con agua.
EXPOSICIÓN		¡EVITAR LA FORMACIÓN DE NIEBLAS DEL PRODUCTO!	
Inhalación	Tos. Náuseas. Dolor de cabeza. Vértigo. Falta de coordinación. Somnolencia. Pérdida del conocimiento.	Ventilación, extracción localizada o protección respiratoria.	Aire limpio y reposo. Proporcionar asistencia médica.
Piel	Enrojecimiento.	Guantes de protección.	Quitar las ropas contaminadas. Aclarar y lavar la piel con agua y jabón. Proporcionar asistencia médica.
Ojos	Enrojecimiento.	Gafas ajustadas de seguridad o protección ocular combinada con protección respiratoria.	Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad), después proporcionar asistencia médica.
Ingestión	Dolor de garganta. Dolor abdominal. Diarrea. Náuseas. Vómitos. (Además ver Inhalación).	No comer, ni beber, ni fumar durante el trabajo. Lavarse las manos antes de comer.	Enjuagar la boca. NO provocar el vómito. Proporcionar asistencia médica.
DERRAMES Y FUGAS		ENVASADO Y ETIQUETADO	
¡Evacuar la zona de peligro! Consultar a un experto. Protección personal: filtro para gases y vapores orgánicos de bajo punto de ebullición adaptado a la concentración de la sustancia en el aire. Eliminar toda fuente de ignición. NO permitir que este producto químico se incorpore al ambiente. NO verterlo en el alcantarillado. Ventilar. Recoger, en la medida de lo posible, el líquido que se derrama y el ya derramado en recipientes herméticos. Absorber el líquido residual en arena o absorbente inerte y trasladarlo a un lugar seguro. NO absorber en serrín u otros absorbentes combustibles.		Clasificación UE Símbolo: F R: 11-52/53, S: (2)-9-16-29-33-61 Clasificación NU Clasificación de Peligros NU: 3 Grupo de Envasado NU: II Clasificación GHS Peligro Líquido y vapores muy inflamables. Provoca irritación ocular. Puede provocar irritación respiratoria. Puede provocar somnolencia o vértigo. Puede ser nocivo en caso de ingestión y de penetración en las vías respiratorias. Tóxico para los organismos acuáticos.	
RESPUESTA DE EMERGENCIA		ALMACENAMIENTO	
Ficha de Emergencia de Transporte (Transport Emergency Card): TEC (R)-30S1146 o 30GF1-I+II Código NFPA: H1; F3; R0		A prueba de incendio. Bien cerrado. Separado de oxidantes fuertes y alimentos y piensos. Almacenar en un área sin acceso a desagües o alcantarillas. Medidas para contener el efluente de extinción de incendios.	
Preparada en el Contexto de Cooperación entre el IPCS y la Comisión Europea © CE, IPCS, 2011			
			





VÉASE INFORMACIÓN IMPORTANTE AL DORSO

CICLOPENTANO		ICSC: 0353
DATOS IMPORTANTES		
<p>ESTADO FÍSICO; ASPECTO Líquido incoloro con ligero olor.</p> <p>PELIGROS FÍSICOS El vapor es más denso que el aire y puede extenderse a ras del suelo; posible ignición en punto distante. Como resultado del flujo, agitación, etc., se pueden generar cargas electrostáticas.</p> <p>PELIGROS QUÍMICOS Reacciona con oxidantes fuertes.</p> <p>LÍMITES DE EXPOSICIÓN TLV: 600 ppm como TWA; (ACGIH 2010).</p>	<p>VÍAS DE EXPOSICIÓN La sustancia se puede absorber por inhalación del vapor.</p> <p>RIESGO DE INHALACIÓN Por evaporación de esta sustancia a 20°C se puede alcanzar bastante rápidamente una concentración nociva en el aire.</p> <p>EFFECTOS DE EXPOSICIÓN DE CORTA DURACIÓN La sustancia y el vapor, en altas concentraciones, irritan los ojos y el tracto respiratorio. La sustancia irrita el tracto gastrointestinal. En caso de ingestión la sustancia penetra fácilmente en las vías respiratorias y puede provocar neumonía por aspiración. La sustancia puede afectar al sistema nervioso central dando lugar a disminución del estado de alerta.</p> <p>EFFECTOS DE EXPOSICIÓN PROLONGADA O REPETIDA El contacto prolongado o repetido con la piel puede producir dermatitis, sequedad y agrietamiento.</p>	
PROPIEDADES FÍSICAS		
<p>Punto de ebullición: 49°C Punto de fusión: -94°C Densidad relativa (agua = 1): 0.8 Solubilidad en agua: ninguna Presión de vapor, kPa a 20°C: 45 Densidad relativa de vapor (aire = 1): 2.4</p>	<p>Densidad relativa de la mezcla vapor/aire a 20°C (aire = 1): 1.6 Punto de inflamación: -37°C c.c. Temperatura de autoignición: 320°C Límites de explosividad, % en volumen en el aire: 1.1-8.7 Coeficiente de reparto octanol/agua como log Pow: 3.0 Viscosidad, mm²/s a 20 °C: 0.55</p>	
DATOS AMBIENTALES		
La sustancia es tóxica para los organismos acuáticos. Se aconseja firmemente impedir que el producto químico se incorpore al ambiente.		
NOTAS		
Proporcionar asistencia médica si se desarrolla fiebre y/o dificultad respiratoria.		
INFORMACIÓN ADICIONAL		
<p>Límites de exposición profesional (INSHT 2012): VLA-ED: 600 ppm; 1745 mg/m³</p>		
NOTA LEGAL	Esta ficha contiene la opinión colectiva del Comité Internacional de Expertos del IPCS y es independiente de requisitos legales. Su posible uso no es responsabilidad de la CE, el IPCS, sus representantes o el INSHT, autor de la versión española.	
© IPCS, CE 2011		

A III.4. Ficha de seguridad química del Dietil éter

DIETILETER

ICSC: 0355

 <p style="text-align: center;"> DIETILETER Eter dietílico Eter etílico $C_4H_{10}O$ Masa molecular: 74.1 </p> <p> N° CAS 60-29-7 N° RTECS KI5775000 N° ICSC 0355 N° NU 1155 N° CE 603-022-00-4 </p> 			
TIPOS DE PELIGRO/ EXPOSICION	PELIGROS/ SINTOMAS AGUDOS	PREVENCION	PRIMEROS AUXILIOS/ LUCHA CONTRA INCENDIOS
INCENDIO	Extremadamente inflamable.	Evitar las llamas, NO producir chispas y NO fumar. NO poner en contacto con superficies calientes.	AFFF, espuma resistente al alcohol, polvo, dióxido de carbono.
EXPLOSION	Las mezclas vapor/aire son explosivas.	Sistema cerrado, ventilación, equipo eléctrico y de alumbrado a prueba de explosiones. Evitar la generación de cargas electrostáticas (por ejemplo, mediante conexión a tierra). NO utilizar aire comprimido para llenar, vaciar o manipular. Utilícense herramientas manuales no generadoras de chispas.	En caso de incendio: mantener fríos los bidones y demás instalaciones rociando con agua.
EXPOSICION			
INHALACION	Dolor de cabeza, somnolencia, vómitos, narcosis, pérdida del conocimiento.	Ventilación, extracción localizada o protección respiratoria.	Aire limpio, reposo, respiración artificial si estuviera indicada y proporcionar asistencia médica.
PIEL	Piel seca.	Gautes protectores.	Quitar las ropas contaminadas, aclarar la piel con agua abundante o ducharse.
OJOS	Enrojecimiento, dolor.	Gafas ajustadas de seguridad.	Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad) y proporcionar asistencia médica.
INGESTION	Vértigo, somnolencia, vómitos.	No comer, ni beber ni fumar durante el trabajo.	NO provocar el vómito y proporcionar asistencia médica.
DERRAMAS Y FUGAS	ALMACENAMIENTO	ENVASADO Y ETIQUETADO	
Evacuar la zona de peligro. Consultar a un experto. Recoger el líquido procedente de la fuga en recipientes herméticos, absorber el líquido residual en arena o absorbente inerte y trasladarlo a un lugar seguro. (Protección personal adicional: respirador de filtro mixto contra vapores orgánicos y polvo nocivo A/P2).	A prueba de incendio. Separado de oxidantes fuertes. Mantener en lugar fresco, seco, y en la oscuridad. Almacenar solamente si está estabilizado.	Hermético. símbolo F+ símbolo Xn R: 12-19-22-66-67 S: (2-)9-16-29-33 Clasificación de Peligros NU: 3 Grupo de Envasado NU: I	
 			
VEASE AL DORSO INFORMACION IMPORTANTE			

ICSC: 0355



Preparada en el Contexto de Cooperación entre el IPCS y la Comisión de las Comunidades Europeas © CCE, IPCS, 1994

DIETILETER

ICSC: 0355

D A T O S I M P O R T A N T E S	ESTADO FISICO; ASPECTO Líquido incoloro, higroscópico muy volátil, de olor característico.	VIAS DE EXPOSICION La sustancia se puede absorber por inhalación del vapor y por ingestión.
	PELIGROS FISICOS El vapor es más denso que el aire y puede extenderse a ras del suelo; posible ignición en punto distante. Como resultado del flujo, agitación, etc., se pueden generar cargas electrostáticas.	RIESGO DE INHALACION Por evaporación de esta sustancia a 20°C se puede alcanzar bastante rápidamente una concentración nociva en el aire.
	PELIGROS QUIMICOS La sustancia puede formar peróxidos explosivos bajo la influencia de la luz y el aire. Reacciona violentamente con oxidantes, originando peligro de fuego y explosión.	EFFECTOS DE EXPOSICION DE CORTA DURACION La sustancia irrita los ojos y el tracto respiratorio. La ingestión del líquido puede originar aspiración dentro de los pulmones con riesgo de neumonitis química. La sustancia puede causar efectos en el sistema nervioso central, dando lugar a narcosis.
	LIMITES DE EXPOSICION TLV: 400 ppm; 1210 mg/m ³ (STEL) (ACGIH 1992-1993). MAK: 400 ppm; 1200 mg/m ³ (1992).	EFFECTOS DE EXPOSICION PROLONGADA O REPETIDA El líquido desengrasa la piel. La sustancia puede afectar el sistema nervioso central. Precaución las exposiciones pueden llegar a ser aditivas!
PROPIEDADES FISICAS	Punto de ebullición: 35°C Punto de fusión: -116°C Densidad relativa (agua = 1): 0.7 Solubilidad en agua, g/100 ml a 20°C: 6.9 Presión de vapor, kPa a 20°C: 58.6 Densidad relativa de vapor (aire = 1): 2.6	Densidad relativa de la mezcla vapor/aire a 20°C (aire = 1): 1.9 Punto de inflamación: -45°C Temperatura de autoignición: 180°C Límites de explosividad, % en volumen en el aire: 1.7-49 Coeficiente de reparto octanol/agua como log Pow: 0.89
DATOS AMBIENTALES		
NOTAS		
Antes de la destilación comprobar si existen peróxidos; en caso positivo eliminarlos. Ficha de emergencia de transporte (Transport Emergency Card): TEC (R)-72 Código NFPA: H 2; F 4; R 1;		
INFORMACION ADICIONAL		
FISQ: 3-097 DIETILETER		
ICSC: 0355		DIETILETER
© CCE, IPCS, 1994		
NOTA LEGAL IMPORTANTE:	Ni la CCE ni la IPCS ni sus representantes son responsables del posible uso de esta información. Esta ficha contiene la opinión colectiva del Comité Internacional de Expertos del IPCS y es independiente de requisitos legales. La versión española incluye el etiquetado asignado por la clasificación europea, actualizado a la vigésima adaptación de la Directiva 67/548/CEE traspuesta a la legislación española por el Real Decreto 363/95 (BOE 5.6.95).	

A III.5. Ficha de seguridad química del Etanal

ACETALDEHIDO		ICSC: 0009 Noviembre 2003	
CAS:	75-07-0	Aldehído acético	
RTECS:	AB1925000	Etanal	
NU:	1089	Etil aldehído	
CE Índice Anexo I:	605-003-00-6	C ₂ H ₄ O / CH ₃ CHO	
CE / EINECS:	200-836-8	Masa molecular: 44,1	
TIPO DE PELIGRO / EXPOSICIÓN	PELIGROS AGUDOS / SÍNTOMAS	PREVENCIÓN	PRIMEROS AUXILIOS / LUCHA CONTRA INCENDIOS
INCENDIO	Extremadamente inflamable.	Evitar las llamas, NO producir chispas y NO fumar. NO poner en contacto con superficies calientes.	Polvo, espuma resistente al alcohol, agua en grandes cantidades, dióxido de carbono.
EXPLOSIÓN	Las mezclas vapor/aire son explosivas.	Sistema cerrado, ventilación, equipo eléctrico y de alumbrado a prueba de explosión. NO utilizar aire comprimido para llenar, vaciar o manipular. Utilícense herramientas manuales no generadoras de chispas.	En caso de incendio: mantener fríos los bidones y demás instalaciones rociando con agua.
EXPOSICIÓN		EVITAR TODO CONTACTO	
Inhalación	Tos.	Ventilación. Extracción localizada o protección respiratoria.	Aire limpio, reposo. Proporcionar asistencia médica.
Piel	Enrojecimiento. Dolor.	Gautes de protección.	Quitar las ropas contaminadas. Aclarar y lavar la piel con agua y jabón. Proporcionar asistencia médica.
Ojos	Enrojecimiento. Dolor.	Gafas ajustadas de seguridad o protección ocular combinada con protección respiratoria.	Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad), después proporcionar asistencia médica.
Ingestión	Diarrea. Vértigo. Náuseas. Vómitos.	No comer, ni beber, ni fumar durante el trabajo.	Enjuagar la boca. Dar a beber uno o dos vasos de agua. Proporcionar asistencia médica.
DERRAMES Y FUGAS		ENVASADO Y ETIQUETADO	
¡Evacuar la zona de peligro! Eliminar toda fuente de ignición. Protección personal: filtro para gases y vapores orgánicos adaptado a la concentración de la sustancia en el aire. Recoger, en la medida de lo posible, el líquido que se derrama y el ya derramado en recipientes herméticos. Absorber el líquido residual en arena o absorbente inerte y trasladarlo a un lugar seguro. NO absorber en serrín u otros absorbentes combustibles. Eliminar el vapor con agua pulverizada. NO permitir que este producto químico se incorpore al ambiente.		Envase irrompible; colocar el envase frágil dentro de un recipiente irrompible cerrado. Clasificación UE Símbolo: F+, Xn R: 12-36/37-40 S: (2-)16-33-36/37 Clasificación NU Clasificación de Peligros NU: 3 Grupo de Envasado NU: I	
RESPUESTA DE EMERGENCIA		ALMACENAMIENTO	
Ficha de Emergencia de Transporte (Transport Emergency Card): TEC (R)-30S1089 Código NFPA: H2; F4; R2;		A prueba de incendio. Separado de materiales incompatibles. Ver Peligros Químicos. Enfriado. Mantener en la oscuridad. Almacenar solamente si está estabilizado. Almacenar en un área sin acceso a desagües o alcantarillas.	
Preparada en el Contexto de Cooperación entre el IPCS y la Comisión Europea © CE, IPCS, 2005 			




VÉASE INFORMACIÓN IMPORTANTE AL DORSO

ACETALDEHIDO		ICSC: 0009
DATOS IMPORTANTES		
<p>ESTADO FÍSICO; ASPECTO Gas o líquido incoloro, de olor acre.</p> <p>PELIGROS FÍSICOS El vapor es más denso que el aire y puede extenderse a ras del suelo; posible ignición en punto distante.</p> <p>PELIGROS QUÍMICOS La sustancia puede formar peróxidos explosivos en contacto con el aire. La sustancia puede polimerizar, bajo la influencia de ácidos e hidróxidos alcalinos bajo la presencia de trazas metálicas (hierro), con peligro de incendio o explosión. La sustancia es un agente reductor fuerte y reacciona violentamente con oxidantes, ácidos fuertes, halógenos y aminas, originando peligro de incendio y explosión.</p> <p>LÍMITES DE EXPOSICIÓN TLV: 25 ppm (Valor techo); A3 (cancerígeno animal); (ACGIH 2003). MAK: 50 ppm, 91 mg/m³; Categoría de limitación de pico: I(1); Cancerígeno: categoría 5; Riesgo para el embarazo: grupo C; Mutágeno: categoría 5 (DFG 2009).</p>	<p>VÍAS DE EXPOSICIÓN La sustancia se puede absorber por inhalación y por ingestión.</p> <p>RIESGO DE INHALACIÓN Por evaporación de esta sustancia a 20°C se puede alcanzar muy rápidamente una concentración nociva en el aire.</p> <p>EFFECTOS DE EXPOSICIÓN DE CORTA DURACIÓN La sustancia irrita levemente los ojos, la piel y el tracto respiratorio. La sustancia puede afectar al sistema nervioso central.</p> <p>EFFECTOS DE EXPOSICIÓN PROLONGADA O REPETIDA El contacto prolongado o repetido con la piel puede producir dermatitis. La sustancia puede afectar al tracto respiratorio, dando lugar a alteraciones del tejido. Esta sustancia es posiblemente carcinógena para los seres humanos.</p>	
PROPIEDADES FÍSICAS		
<p>Punto de ebullición: 20.2°C Punto de fusión: -123°C Densidad relativa (agua = 1): 0,78 Solubilidad en agua: miscible Presión de vapor, kPa a 20°C: 101 Densidad relativa de vapor (aire = 1): 1,5</p>	<p>Punto de inflamación: -38°C c.c. Temperatura de autoignición: 185°C Límites de explosividad, % en volumen en el aire: 4-60 Coeficiente de reparto octanol/agua como log Pow: 0.63</p>	
DATOS AMBIENTALES		
La sustancia es nociva para los organismos acuáticos.		
NOTAS		
Está indicado un examen médico periódico dependiendo del grado de exposición. El valor límite de exposición laboral aplicable no debe ser superado en ningún momento por la exposición en el trabajo. La adición de estabilizadores o inhibidores puede influir sobre las propiedades toxicológicas de esta sustancia; consultar a un experto. Enjuagar la ropa contaminada con agua abundante (peligro de incendio). Esta ficha ha sido parcialmente actualizada en abril de 2010: ver Límites de exposición, Ingestión- Primeros Auxilios.		
INFORMACIÓN ADICIONAL		
<p>Límites de exposición profesional (INSHT 2011): VLA-EC: 25 ppm; 46 mg/m³</p>		
NOTA LEGAL	Esta ficha contiene la opinión colectiva del Comité Internacional de Expertos del IPCS y es independiente de requisitos legales. Su posible uso no es responsabilidad de la CE, el IPCS, sus representantes o el INSHT, autor de la versión española.	
© IPCS, CE 2005		

A III.6. Ficha de seguridad química del Isopentano

2-METILBUTANO

ICSC: 1153

 <p style="text-align: center;"> 2-METILBUTANO Isopentano $C_5H_{12}/(CH_3)_2-CH-CH_2-CH_3$ Masa molecular: 72.2 </p> <p> N° CAS 78-78-4 N° RTECS EK4430000 N° ICSC 1153 N° NU 1265 N° CE 601-006-00-1 </p> 			
TIPOS DE PELIGRO/ EXPOSICION	PELIGROS/ SINTOMAS AGUDOS	PREVENCION	PRIMEROS AUXILIOS/ LUCHA CONTRA INCENDIOS
INCENDIO	Extremadamente inflamable.	Evitar las llamas, NO producir chispas y NO fumar. NO poner en contacto con oxidantes.	Polvo, AFFF, espuma, dióxido de carbono.
EXPLOSION	Las mezclas vapor/aire son explosivas.	Sistema cerrado, ventilación, equipo eléctrico y de alumbrado a prueba de explosión. Evitar la generación de cargas electrostáticas (por ejemplo, mediante conexión a tierra). NO utilizar aire comprimido para llenar, vaciar o manipular.	En caso de incendio: mantener fríos los bidones y demás instalaciones rociando con agua.
EXPOSICION			
▫ INHALACION	Tos, vértigo, somnolencia, dolor de cabeza y garganta, jadeo, arritmia cardiaca.	Ventilación, extracción localizada o protección respiratoria.	Aire limpio, reposo, posición de semiincorporado y proporcionar asistencia médica.
▫ PIEL	Piel seca, enrojecimiento.	Guantes protectores.	Quitar las ropas contaminadas y aclarar la piel con agua abundante o ducharse.
▫ OJOS	Enrojecimiento, dolor.	Gafas de protección de seguridad o protección ocular combinada con la protección respiratoria.	Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad) y proporcionar asistencia médica.
▫ INGESTION	Dolor abdominal, náuseas, vómitos (para mayor información, véase Inhalación).	No comer, ni beber, ni fumar durante el trabajo.	Enjuagar la boca. NO provocar el vómito y proporcionar asistencia médica.
DERRAMAS Y FUGAS	ALMACENAMIENTO	ENVASADO Y ETIQUETADO	
Evacuar la zona de peligro. Consultar a un experto. Recoger, en la medida de lo posible, el líquido que se derrama y el ya derramado en recipientes precintables, absorber el líquido residual en arena o absorbente inerte y trasladarlo a un lugar seguro. NO verterlo al alcantarillado. (Protección personal adicional: respirador de filtro mixto contra vapores orgánicos y polvo nocivo A/P2).	A prueba de incendio. Separado de oxidantes fuertes. Mantener bien cerrado.	símbolo F símbolo Xn símbolo N R: 12-51/53-65-66-67 S: (2-)9-16-29-33-61-62 Clasificación de Peligros NU: 3 Grupo de Envasado NU: I	
			
VEASE AL DORSO INFORMACION IMPORTANTE			

ICSC: 1153

Preparada en el Contexto de Cooperación entre el IPCS y la Comisión de las Comunidades Europeas © CCE, IPCS, 1994

2-METILBUTANO



ICSC: 1153

D A T O S I M P O R T A N T E S	<p>ESTADO FISICO; ASPECTO Líquido incoloro , de olor característico.</p> <p>PELIGROS FISICOS El vapor es más denso que el aire y puede extenderse a ras del suelo; posible ignición en punto distante. Como resultado del flujo, agitación, etc., se pueden generar cargas electrostáticas.</p> <p>PELIGROS QUIMICOS Puede explotar por calentamiento intenso.</p> <p>LIMITES DE EXPOSICION TLV no establecido.</p>	<p>VIAS DE EXPOSICION La sustancia se puede absorber por inhalación y por ingestión.</p> <p>RIESGO DE INHALACION No puede indicarse la velocidad a la que se alcanza una concentración nociva en el aire por evaporación de esta sustancia a 20°C.</p> <p>EFECTOS DE EXPOSICION DE CORTA DURACION La sustancia irrita los ojos, la piel y el tracto respiratorio. La ingestión del líquido puede dar lugar a la aspiración del mismo por los pulmones y la consiguiente neumonitis química. La sustancia puede causar efectos en el sistema nervioso central y el corazón, dando lugar a alteraciones funcionales.</p> <p>EFECTOS DE EXPOSICION PROLONGADA O REPETIDA El líquido desengrasa la piel.</p>
	<p>PROPIEDADES FISICAS</p> <p>Punto de ebullición: 28°C Punto de fusión: -160°C Densidad relativa (agua = 1): 0.6 Solubilidad en agua: Ninguna Presión de vapor, kPa a 20°C: 79 Densidad relativa de vapor (aire = 1): 2.5</p>	<p>Densidad relativa de la mezcla vapor/aire a 20°C (aire = 1): 2.2 Punto de inflamación: <-51°C (c.c.) Temperatura de autoignición: 420°C Límites de explosividad, % en volumen en el aire: 1.4-7.6 Coeficiente de reparto octanol/agua como log Pow: 2.3</p>
DATOS AMBIENTALES		
NOTAS		
<p>El consumo de bebidas alcohólicas aumenta el efecto nocivo. Altas concentraciones en el aire producen una deficiencia de oxígeno con riesgo de pérdida de conocimiento o muerte. Comprobar el contenido de oxígeno antes de entrar en la zona. No puede indicarse la relación entre el olor y el límite de exposición laboral.</p> <p style="text-align: right;">Ficha de emergencia de transporte (Transport Emergency Card): TEC (R)-30G30 Código NFPA: H 1; F 4; R 0;</p>		
INFORMACION ADICIONAL		
FISQ: 3-143 2-METILBUTANO		
ICSC: 1153		2-METILBUTANO
© CCE, IPCS, 1994		

NOTA LEGAL IMPORTANTE:

Ni la CCE ni la IPCS ni sus representantes son responsables del posible uso de esta información. Esta ficha contiene la opinión colectiva del Comité Internacional de Expertos del IPCS y es independiente de requisitos legales. La versión española incluye el etiquetado asignado por la clasificación europea, actualizado a la vigésima adaptación de la Directiva 67/548/CEE traspuesta a la legislación española por el Real Decreto 363/95 (BOE 5.6.95).








A III.7. Ficha de seguridad química del Metanoato de metilo

FORMIATO DE METILO		ICSC: 0664 Mayo 2010	
CAS: RTECS: NU: CE Índice Anexo I: CE / EINECS:	107-31-3 LQ8925000 1243 607-014-00-1 203-481-7	Éster metílico del ácido fórmico Metanoato de metilo $C_2H_4O_2 / HCOOCH_3$ Masa molecular: 60.1	
TIPO DE PELIGRO / EXPOSICIÓN	PELIGROS AGUDOS / SÍNTOMAS	PREVENCIÓN	PRIMEROS AUXILIOS / LUCHA CONTRA INCENDIOS
INCENDIO	Extremadamente inflamable.	Evitar las llamas, NO producir chispas y NO fumar.	PoVo, espuma resistente al alcohol, pulverización con agua o dióxido de carbono.
EXPLOSIÓN	Las mezclas vapor/aire son explosivas. El calentamiento intenso puede producir aumento de la presión con riesgo de estallido. Riesgo de incendio y explosión en contacto con oxidantes fuertes.	Sistema cerrado, ventilación, equipo eléctrico y de alumbrado a prueba de explosión. NO utilizar aire comprimido para llenar, vaciar o manipular. Evitar la generación de cargas electrostáticas (p. ej., mediante conexión a tierra).	En caso de incendio: mantener fríos los bidones y demás instalaciones rociando con agua.
EXPOSICIÓN			
Inhalación	Tos. Jadeo. Dolor de cabeza. Somnolencia.	Ventilación, extracción localizada o protección respiratoria.	Aire limpio y reposo. Proporcionar asistencia médica.
Piel	Enrojecimiento.	Guantes de protección. Traje de protección.	Quitar las ropas contaminadas. Aclarar la piel con agua abundante o ducharse.
Ojos	Enrojecimiento. Dolor.	Gafas ajustadas de seguridad.	Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad), después proporcionar asistencia médica.
Ingestión	Dolor de garganta. (Ver Inhalación).	No comer, ni beber, ni fumar durante el trabajo.	Enjuagar la boca. NO provocar el vómito. Proporcionar asistencia médica.
DERRAMES Y FUGAS		ENVASADO Y ETIQUETADO	
¡Evacuar la zona de peligro! Consultar a un experto. Ventilar. Protección personal adicional: traje de protección completo incluyendo equipo autónomo de respiración. Eliminar toda fuente de ignición. Recoger el líquido procedente de la fuga en recipientes precintables. Absorber el líquido residual en arena o absorbente inerte y trasladarlo a un lugar seguro.		Clasificación UE Símbolo: F+, Xn R: 12-20/22-36/37 S: (2)-9-16-24-26-33 Clasificación NU Clasificación de Peligros NU: 3 Grupo de Envasado NU: I Clasificación GHS Peligro Líquido y vapores extremadamente inflamables. Nocivo en caso de ingestión. Provoca irritación ocular. Puede provocar somnolencia o vértigo.	
RESPUESTA DE EMERGENCIA		ALMACENAMIENTO	
Código NFPA: H2; F4; R0		A prueba de incendio. Separado de oxidantes fuertes. Mantener en lugar fresco.	
Preparada en el Contexto de Cooperación entre el IPCS y la Comisión Europea © CE, IPCS, 2010			
			

VÉASE INFORMACIÓN IMPORTANTE AL DORSO

FORMIATO DE METILO		ICSC: 0664
DATOS IMPORTANTES		
<p>ESTADO FÍSICO; ASPECTO Líquido incoloro de olor característico.</p> <p>PELIGROS FÍSICOS El vapor es más denso que el aire y puede extenderse a ras del suelo. Posible ignición en punto distante.</p> <p>PELIGROS QUÍMICOS Reacciona violentamente con oxidantes fuertes, originando peligro de incendio y explosión.</p> <p>LÍMITES DE EXPOSICIÓN TLV: 100 ppm, como TWA; 150 ppm, como STEL; (ACGIH 2010). MAK: 50 ppm, 120 mg/m³; Categoría de limitación de pico: II(4); H (absorción dérmica); Riesgo para el embarazo: grupo C (DFG 2009).</p>	<p>VÍAS DE EXPOSICIÓN La sustancia se puede absorber por inhalación del vapor, a través de la piel y por ingestión.</p> <p>RIESGO DE INHALACIÓN Por evaporación de esta sustancia a 20°C se puede alcanzar bastante rápidamente una concentración nociva en el aire.</p> <p>EFFECTOS DE EXPOSICIÓN DE CORTA DURACIÓN La sustancia irrita los ojos y el tracto respiratorio. La sustancia puede afectar al sistema nervioso central. La exposición muy por encima del OEL podría causar disminución del estado de alerta.</p> <p>EFFECTOS DE EXPOSICIÓN PROLONGADA O REPETIDA El líquido desengrasa la piel.</p>	
PROPIEDADES FÍSICAS		
<p>Punto de ebullición: 32°C Punto de fusión: -100°C Densidad relativa (agua = 1): 0.97 Solubilidad en agua, g/100 ml a 20°C: 30 (elevada) Presión de vapor, kPa a 20°C: 64 Densidad relativa de vapor (aire = 1): 2.1</p>	<p>Densidad relativa de la mezcla vapor/aire a 20°C (aire = 1): 1.7 Punto de inflamación: -19°C Temperatura de autoignición: 449°C Límites de explosividad, % en volumen en el aire: 5-23 Coeficiente de reparto octanol/agua como log Pow: -0.21</p>	
DATOS AMBIENTALES		
NOTAS		
La alerta por el olor cuando se supera el límite de exposición es insuficiente. NO llevar a casa la ropa de trabajo.		
INFORMACIÓN ADICIONAL		
<p>Límites de exposición profesional (INSHT 2011):</p> <p>VLA-ED: 100 ppm; 270 mg/m³</p> <p>VLA-EC: 150 ppm, 406 mg/m³</p> <p>Notas: vía dérmica.</p>		
NOTA LEGAL	Esta ficha contiene la opinión colectiva del Comité Internacional de Expertos del IPCS y es independiente de requisitos legales. Su posible uso no es responsabilidad de la CE, el IPCS, sus representantes o el INSHT, autor de la versión española.	
© IPCS, CE 2010		

A III.8. Ficha de seguridad química del Metanol

METANOL		ICSC: 0057	
		Abril 2000	
Alcohol metílico		Carbinol	
CAS:	67-56-1	CH₄O / CH₃OH	
RTECS:	PC1400000	Masa molecular: 32.0	
NU:	1230		
CE Índice Anexo I:	603-001-00-X		
CE / EINECS:	200-659-6		
TIPO DE PELIGRO / EXPOSICIÓN	PELIGROS AGUDOS / SÍNTOMAS	PREVENCIÓN	PRIMEROS AUXILIOS / LUCHA CONTRA INCENDIOS
INCENDIO	Altamente inflamable. Ver Notas.	Evitar las llamas, NO producir chispas y NO fumar. NO poner en contacto con oxidantes.	Polvo, espuma resistente al alcohol, agua en grandes cantidades, dióxido de carbono.
EXPLOSIÓN	Las mezclas vapor/aire son explosivas.	Sistema cerrado, ventilación, equipo eléctrico y de alumbrado a prueba de explosión. NO utilizar aire comprimido para llenar, vaciar o manipular. Utilícese herramientas manuales no generadoras de chispas.	En caso de incendio: mantener fríos los bidones y demás instalaciones rociando con agua.
EXPOSICIÓN		¡EVITAR LA EXPOSICIÓN DE ADOLESCENTES Y NIÑOS!	
Inhalación	Tos. Vértigo. Dolor de cabeza. Náuseas. Debilidad. Alteraciones de la vista.	Ventilación. Extracción localizada o protección respiratoria.	Aire limpio, reposo. Proporcionar asistencia médica.
Piel	¡PUEDE ABSORBERSE! Piel seca. Enrojecimiento.	Guantes de protección. Traje de protección.	Quitar las ropas contaminadas. Aclarar con agua abundante o ducharse. Proporcionar asistencia médica.
Ojos	Enrojecimiento. Dolor.	Gafas ajustadas de seguridad, o protección ocular combinada con la protección respiratoria.	Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad), después proporcionar asistencia médica.
Ingestión	Dolor abdominal. Jadeo. Vómitos. Convulsiones. Pérdida del conocimiento (para mayor información, véase Inhalación).	No comer, ni beber, ni fumar durante el trabajo. Lavarse las manos antes de comer.	Provocar el vómito (¡ÚNICAMENTE EN PERSONAS CONSCIENTES!). Proporcionar asistencia médica.
DERRAMES Y FUGAS		ENVASADO Y ETIQUETADO	
Evacuar la zona de peligro. Ventilar. Recoger el líquido procedente de la fuga en recipientes precintables. Eliminar el residuo con agua abundante. Eliminar vapor con agua pulverizada. Traje de protección química, incluyendo equipo autónomo de respiración.		No transportar con alimentos y piensos. Clasificación UE Símbolo: F, T R: 11-23/24/25-39/23/24/25; S: (1/2-)7-16-36/37-45 Clasificación NU Clasificación de Peligros NU: 3 Riesgos Subsidiarios de las NU: 6.1; Grupo de Envasado NU: II	
RESPUESTA DE EMERGENCIA		ALMACENAMIENTO	
Ficha de emergencia de transporte (Transport Emergency Card): TEC (R)-30S1230. Código NFPA: H 1; F 3; R 0;		A prueba de incendio. Separado de oxidantes fuertes, alimentos y piensos. Mantener en lugar fresco.	
IPCS International Programme on Chemical Safety			
			
Preparada en el Contexto de Cooperación entre el IPCS y la Comisión Europea © IPCS, CE 2000			

VÉASE INFORMACIÓN IMPORTANTE AL DORSO

METANOL**ICSC: 0057****DATOS IMPORTANTES****ESTADO FÍSICO; ASPECTO:**

Líquido incoloro, de olor característico.

PELIGROS FÍSICOS:

El vapor se mezcla bien con el aire, formándose fácilmente mezclas explosivas.

PELIGROS QUÍMICOS:

Reacciona violentamente con oxidantes, originando peligro de incendio y explosión.

LÍMITES DE EXPOSICIÓN:

TLV: 200 ppm como TWA, 250 ppm como STEL; (piel); BEI establecido (ACGIH 2004).
 MAK: Riesgo para el embarazo: grupo (DFG 2004).
 LEP UE: 200 ppm; 260 mg/m³ como TWA (piel) como TWA (UE 2006).

VÍAS DE EXPOSICIÓN:

La sustancia se puede absorber por inhalación, a través de la piel y por ingestión.

RIESGO DE INHALACIÓN:

Por evaporación de esta sustancia a 20 °C se puede alcanzar bastante rápidamente una concentración nociva en el aire.

EFFECTOS DE EXPOSICIÓN DE CORTA DURACIÓN:

La sustancia irrita los ojos la piel y el tracto respiratorio. La sustancia puede afectar al sistema nervioso central, dando lugar a pérdida del conocimiento. La exposición puede producir ceguera y muerte. Los efectos pueden aparecer de forma no inmediata.

EFFECTOS DE EXPOSICIÓN PROLONGADA O REPETIDA:

El contacto prolongado o repetido con la piel puede producir dermatitis. La sustancia puede afectar sistema nervioso central, dando lugar a dolores de cabeza persistentes y alteraciones de la visión.

PROPIEDADES FÍSICAS

Punto de ebullición: 65 °C
 Punto de fusión: -98 °C
 Densidad relativa (agua = 1): 0.79
 Solubilidad en agua: miscible
 Presión de vapor, kPa a 20 °C: 12.3
 Densidad relativa de vapor (aire = 1): 1.1

Densidad relativa de la mezcla vapor/aire a 20 °C (aire = 1): 1.01
 Punto de inflamación: 12 °C c.c.
 Temperatura de autoignición: 464 °C
 Límites de explosividad, % en volumen en el aire: 5.5-44
 Coeficiente de reparto octanol/agua como log Pow: -0.82/-0.66

DATOS AMBIENTALES**NOTAS**

Arde con llama azulada. Está indicado examen médico periódico dependiendo del grado de exposición. Esta ficha ha sido parcialmente actualizada en octubre de 2006: ver Límites de exposición.

INFORMACIÓN ADICIONAL

Límites de exposición profesional (INSHT 2011):

VLA-ED: 200 ppm; 266 mg/m³

Notas: vía dérmica.

VLB: 15 mg/L en orina. Notas F, I.

Nota legal




Esta ficha contiene la opinión colectiva del Comité Internacional de Expertos del IPCS y es independiente de requisitos legales. Su posible uso no es responsabilidad de la CE, el IPCS, sus representantes o el INSHT, autor de la versión española.

© IPCS, CE 2000

A III.9. Ficha de seguridad química del N-Hexano

HEXANO

ICSC: 0279

 <p style="text-align: center;"> MINISTERIO DE TRABAJO Y ASUNTOS SOCIALES ESPAÑA INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD E HIGIENE EN EL TRABAJO </p>			
<p> HEXANO n-Hexano C_6H_{14} Masa molecular: 86.2 </p>			
<p> N° CAS 110-54-3 N° RTECS MN9275000 N° ICSC 0279 N° NU 1208 N° CE 601-037-00-0 </p>			
TIPOS DE PELIGRO/ EXPOSICION	PELIGROS/ SINTOMAS AGUDOS	PREVENCION	PRIMEROS AUXILIOS/ LUCHA CONTRA INCENDIOS
INCENDIO	Altamente inflamable.	Evitar las llamas, NO producir chispas y NO fumar.	Polvo, AFFF, espuma, dióxido de carbono.
EXPLOSION	Las mezclas vapor/aire son explosivas.	Sistema cerrado, ventilación, equipo eléctrico y de alumbrado a prueba de explosiones. NO utilizar aire comprimido para llenar, vaciar o manipular. Utilícense herramientas manuales no generadoras de chispas.	En caso de incendio: mantener fríos los bidones y demás instalaciones rociando con agua. Los bomberos deberían emplear indumentaria de protección completa, incluyendo equipo autónomo de respiración.
EXPOSICION			
▫ INHALACION	Vértigo, somnolencia, dolor de cabeza, dificultad respiratoria, náuseas, debilidad, pérdida del conocimiento.	Ventilación, extracción localizada o protección respiratoria.	Aire limpio, reposo y proporcionar asistencia médica.
▫ PIEL	Piel seca, enrojecimiento.	Guantes protectores.	Quitar las ropas contaminadas, aclarar y lavar la piel con agua y jabón y proporcionar asistencia médica.
▫ OJOS	Enrojecimiento, dolor.	Gafas ajustadas de seguridad, pantalla facial o protección ocular combinada con la protección respiratoria.	Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad) y proporcionar asistencia médica.
▫ INGESTION	Dolor abdominal, (para mayor información véase Inhalación).	No comer, ni beber, ni fumar durante el trabajo.	Enjuagar la boca, NO provocar el vómito, reposo y proporcionar asistencia médica.
DERRAMAS Y FUGAS	ALMACENAMIENTO	ENVASADO Y ETIQUETADO	
Consultar a un experto. Recoger, en la medida de lo posible, el líquido que se derrama y el ya derramado en recipientes herméticos, absorber el líquido residual en arena o absorbente inerte y trasladarlo a un lugar seguro. NO verterlo al alcantarillado, (Protección personal adicional: equipo autónomo de respiración).	A prueba de incendio. Separado de oxidantes fuertes. Mantener en lugar fresco y bien cerrado.	símbolo F símbolo Xn símbolo N R: 11-38-48/20-51/53-62-65-67 S: (2-)9-16-29-33-36/37-61-62 Clasificación de Peligros NU: 3 Grupo de Envasado NU: II CE:	
			


VEASE AL DORSO INFORMACION IMPORTANTE

ICSC: 0279

Preparada en el Contexto de Cooperación entre el IPCS y la Comisión de las Comunidades Europeas © CCE, IPCS, 1994

HEXANO




ICSC: 0279




D A T O S I M P O R T A N T E S	ESTADO FISICO; ASPECTO Líquido incoloro volátil, de olor característico.	VIAS DE EXPOSICION La sustancia se puede absorber por inhalación del vapor, a través de la piel y por ingestión.
	PELIGROS FISICOS El vapor es más denso que el aire y puede extenderse a ras del suelo; posible ignición en punto distante.	RIESGO DE INHALACION Por evaporación de esta sustancia a 20°C se puede alcanzar bastante rápidamente una concentración nociva en el aire.
	PELIGROS QUIMICOS Reacciona con oxidantes fuertes, originando peligro de incendio y explosión.	EFFECTOS DE EXPOSICION DE CORTA DURACION La sustancia irrita los ojos. La ingestión del líquido puede originar aspiración dentro de los pulmones con riesgo de neumonitis química. La sustancia puede causar efectos en el sistema nervioso central.
	LIMITES DE EXPOSICION TLV (como TWA): 50 ppm; 176 mg/m ³ (ACGIH 1993-1994). MAK: 50 ppm	EFFECTOS DE EXPOSICION PROLONGADA O REPETIDA El contacto prolongado o repetido con la piel puede producir dermatitis. El líquido desengrasa la piel. La sustancia puede afectar al sistema nervioso periférico, dando lugar a polineuropatías. Puede originar lesión genética en los seres humanos. La experimentación animal muestra que esta sustancia posiblemente cause efectos tóxicos en la reproducción humana.
PROPIEDADES FISICAS	Punto de ebullición: 69°C Punto de fusión: -95°C Densidad relativa (agua = 1): 0.66 Solubilidad en agua: Ninguna Presión de vapor, kPa a 20°C: 16 Densidad relativa de vapor (aire = 1): 3.0	Densidad relativa de la mezcla vapor/aire a 20°C (aire = 1): 1.3 Punto de inflamación: -22°C (c.c.) Temperatura de autoignición: 240°C Límites de explosividad, % en volumen en el aire: 1.1-7.5 Coeficiente de reparto octanol/agua como log Pow: 3.9
DATOS AMBIENTALES	Esta sustancia puede ser peligrosa para el ambiente; debería prestarse atención especial a los organismos acuáticos.	
NOTAS		
El consumo de bebidas alcohólicas aumenta el efecto nocivo. Está indicado examen médico periódico dependiendo del grado de exposición. La preparación técnica del hexano contiene 20-95% n-hexano.		
Ficha de emergencia de transporte (Transport Emergency Card): TEC (R)-41G01 Código NFPA: H 1; F 3; R 0;		
INFORMACION ADICIONAL		
FISQ: 3-131 HEXANO		
ICSC: 0279	© CCE, IPCS, 1994	HEXANO
NOTA LEGAL IMPORTANTE:	Ni la CCE ni la IPCS ni sus representantes son responsables del posible uso de esta información. Esta ficha contiene la opinión colectiva del Comité Internacional de Expertos del IPCS y es independiente de requisitos legales. La versión española incluye el etiquetado asignado por la clasificación europea, actualizado a la vigésima adaptación de la Directiva 67/548/CEE traspuesta a la legislación española por el Real Decreto 363/95 (BOE 5.6.95).	

A III.10. Ficha de seguridad química del N-Pentano

n-PENTANO

ICSC: 0534

					
<p>n-PENTANO Hidruro de Amilo $C_5H_{12}/CH_3(CH_2)_3CH_3$ Masa molecular: 72.2</p>					
<p>N° CAS 109-66-0 N° RTECS RZ9450000 N° ICSC 0534 N° NU 1265 N° CE 601-006-00-1</p>					
TIPOS DE PELIGRO/ EXPOSICION	PELIGROS/ SINTOMAS AGUDOS	PREVENCION	PRIMEROS AUXILIOS/ LUCHA CONTRA INCENDIOS		
INCENDIO	Altamente inflamable.	Evitar las llamas, NO producir chispas y NO fumar. NO poner en contacto con oxidantes fuertes.	AFFF, espuma resistente al alcohol, polvo, dióxido de carbono.		
EXPLOSION	Las mezclas vapor/aire son explosivas.	Sistema cerrado, ventilación, equipo eléctrico y de alumbrado a prueba de explosión Evitar la generación de cargas electrostáticas (por ejemplo, mediante conexión a tierra). NO utilizar aire comprimido para llenar, vaciar o manipular. Utilícense herramientas manuales no generadoras de chispas.	En caso de incendio: mantener fríos los bidones y demás instalaciones rociando con agua.		
EXPOSICION					
▫ INHALACION	Vértigo, somnolencia, dolor de cabeza, náuseas, vómitos, pérdida del conocimiento.	Ventilación, extracción localizada o protección respiratoria.	Aire limpio, reposo, posición de semiincorporado y proporcionar asistencia médica. Respiración artificial si estuviera indicada.		
▫ PIEL	Piel seca.	Guantes protectores.	Quitar las ropas contaminadas, aclarar y lavar la piel con agua y jabón.		
▫ OJOS		Gafas ajustadas de seguridad o protección ocular combinada con la protección respiratoria.	Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad) y proporcionar asistencia médica.		
▫ INGESTION	(Para mayor información, véase Inhalación).	No comer, ni beber, ni fumar durante el trabajo.	Enjuagar la boca, NO provocar el vómito, dar a beber agua abundante, guardar reposo y proporcionar asistencia médica.		
DERRAMAS Y FUGAS		ALMACENAMIENTO	ENVASADO Y ETIQUETADO		

<p>Evacuar la zona de peligro. Consultar a un experto. Ventilar. Recoger, en la medida de lo posible, el líquido que se derrama y el ya derramado en recipientes precintables, absorber el líquido residual en arena o absorbente inerte y trasladarlo a un lugar seguro. NO verterlo al alcantarillado. (Protección personal adicional: equipo autónomo de respiración).</p>	<p>A prueba de incendio. Separado de oxidantes fuertes. Mantener en lugar fresco y bien cerrado.</p>	<p>Envase irrompible; colocar el envase frágil dentro de un recipiente irrompible cerrado. símbolo F+ símbolo Xn símbolo N R: 12-51/53-65-66-67 S: (2-)9-16-29-33-61-62 Nota: C Clasificación de Peligros NU: 3.1 Grupo de Envasado NU: I CE:</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;">    </div>
VEASE AL DORSO INFORMACION IMPORTANTE		
ICSC: 0534	Preparada en el Contexto de Cooperación entre el IPCS y la Comisión de las Comunidades Europeas © CCE, IPCS, 1994	

n-PENTANO

ICSC: 0534

<p>D A T O S I M P O R T A N T E S</p>	<p>ESTADO FISICO; ASPECTO Líquido incoloro, de olor característico.</p> <p>PELIGROS FISICOS El vapor es más denso que el aire y puede extenderse a ras del suelo; posible ignición en punto distante.</p> <p>PELIGROS QUIMICOS Reacciona con oxidantes fuertes (e.j., peróxidos, nitratos y percloratos), originando peligro de incendio y explosión. Ataca a algunas formas de plásticos, caucho y recubrimientos.</p> <p>LIMITES DE EXPOSICION TLV (como TWA): 600 ppm; 1770 mg/m³ (ACGIH 1995-1996). TLV (como STEL): 750 ppm; 2210 mg/m³ (ACGIH 1995-1996). MAK: 1000 ppm; 2950 mg/m³ (1996).</p>	<p>VIAS DE EXPOSICION La sustancia se puede absorber por inhalación del vapor y por ingestión.</p> <p>RIESGO DE INHALACION Por evaporación de esta sustancia a 20°C se puede alcanzar bastante rápidamente una concentración nociva en el aire.</p> <p>EFFECTOS DE EXPOSICION DE CORTA DURACION La ingestión del líquido puede dar lugar a la aspiración del mismo por los pulmones y la consiguiente neumonitis química. La sustancia puede causar efectos en el sistema nervioso central.</p> <p>EFFECTOS DE EXPOSICION PROLONGADA O REPETIDA El contacto prolongado o repetido con la piel puede producir dermatitis.</p>
PROPIEDADES FISICAS	<p>Punto de ebullición: 36°C Punto de fusión: -129°C Densidad relativa (agua = 1): 0.63 Solubilidad en agua: Ninguna Presión de vapor, kPa a 20°C: 56.8 Densidad relativa de vapor (aire = 1): 2.5</p>	<p>Densidad relativa de la mezcla vapor/aire a 20°C (aire = 1): 1.8 Punto de inflamación: -49°C (c.c.) Temperatura de autoignición: 309°C Límites de explosividad, % en volumen en el aire: 1.5-7.8 Coeficiente de reparto octanol/agua como log Pow: 3.39</p>
DATOS AMBIENTALES		
NOTAS		
<p>El n-Pentano es un constituyente del éter de petróleo. Nombre comercial: Skellysolve A. Ficha de emergencia de transporte (Transport Emergency Card): TEC (R)-592 Código NFPA: H 1; F 4; R 0;</p>		

INFORMACION ADICIONAL	
FISQ: 4-167 n-PENTANO	
ICSC: 0534	n-PENTANO
<small>© CCE, IPCS, 1994</small>	
NOTA LEGAL IMPORTANTE:	Ni la CCE ni la IPCS ni sus representantes son responsables del posible uso de esta información. Esta ficha contiene la opinión colectiva del Comité Internacional de Expertos del IPCS y es independiente de requisitos legales. La versión española incluye el etiquetado asignado por la clasificación europea, actualizado a la vigésima adaptación de la Directiva 67/548/CEE traspuesta a la legislación española por el Real Decreto 363/95 (BOE 5.6.95).

© INSHT

A III.11. Ficha de seguridad química del Propanal

PROPIONALDEIDO

ICSC: 0550

<p>Propanal Aldehído propiónico C_3H_6O / CH_3CH_2CHO Masa molecular: 58.1</p>					
<p>Nº ICSC 0550 Nº CAS 123-38-6 Nº RTECS UE0350000 Nº NU 1275 Nº CE 605-018-00-8</p>					
					

TIPOS DE PELIGRO/ EXPOSICION	PELIGROS/ SINTOMAS AGUDOS	PREVENCION	PRIMEROS AUXILIOS/ LUCHA CONTRA INCENDIOS
INCENDIO	Altamente inflamable.	Evitar las llamas, NO producir chispas y NO fumar.	Polvo, espuma resistente al alcohol, pulverización con agua, dióxido de carbono.
EXPLOSION	Las mezclas vapor/aire son explosivas.	Sistema cerrado, ventilación, equipo eléctrico y de alumbrado a prueba de explosión. NO utilizar aire comprimido para llenar, vaciar o manipular.	En caso de incendio: mantener fríos los bidones y demás instalaciones rociando con agua.
EXPOSICION			
INHALACION	Tos. Dolor de garganta.	Ventilación, extracción localizada o protección respiratoria.	Aire limpio, reposo. Proporcionar asistencia médica.
PIEL	Enrojecimiento. Dolor.	Guantes protectores.	Quitar las ropas contaminadas. Aclarar la piel con agua abundante o ducharse.
OJOS	Enrojecimiento. Dolor.	Gafas ajustadas de seguridad, o protección ocular combinada con la protección respiratoria.	Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad), después proporcionar asistencia médica.
INGESTION	Sensación de quemazón.	No comer, ni beber, ni fumar durante el trabajo.	Enjuagar la boca. Dar a beber agua abundante. Proporcionar asistencia médica.

DERRAMES Y FUGAS	ALMACENAMIENTO	ENVASADO Y ETIQUETADO

<p>Eliminar toda fuente de ignición. Recoger, en la medida de lo posible, el líquido que se derrama y el ya derramado en recipientes herméticos. Absorber el líquido residual en arena o absorbente inerte y trasladarlo a un lugar seguro. NO verterlo al alcantarillado. (Protección personal complementaria: Filtro respiratorio para vapores orgánicos y gases.)</p>	<p>A prueba de incendio. Separado de ácidos, bases y oxidantes. Mantener en lugar fresco. Mantener en la oscuridad. Almacenar solamente si está estabilizado.</p>	<p>NU (transporte): Ver pictogramas en cabecera. Clasificación de Peligros NU: 3 Grupo de Envasado NU: II CE: símbolo F símbolo Xi R: 11-36/37/38 S: 2-9-16-29</p>
<p>VEASE AL DORSO INFORMACION IMPORTANTE</p>		
<p>ICSC: 0550 Preparada en el Contexto de Cooperación entre el IPCS y la Comisión Europea © CE, IPCS, 2003</p>		









PROPIONALDEIDO

ICSC: 0550

<p>D A T O S I M P O R T A N T E S</p>	<p>ESTADO FISICO: ASPECTO: Líquido incoloro, de olor acre.</p> <p>PELIGROS FISICOS: El vapor es más denso que el aire y puede extenderse a ras del suelo; posible ignición en punto distante.</p> <p>PELIGROS QUIMICOS: La sustancia probablemente pueda formar peróxidos explosivos. La sustancia puede polimerizar bajo la influencia de ácidos, bases, aminas y oxidantes con peligro de incendio o explosión. La sustancia se descompone al arder, produciendo gases tóxicos y humos irritantes.</p> <p>LIMITES DE EXPOSICION: TLV: 20 ppm como TWA; (ACGIH 2003). MAK no establecido.</p>	<p>VIAS DE EXPOSICION: La sustancia se puede absorber por inhalación del vapor y por ingestión.</p> <p>RIESGO DE INHALACION: Por evaporación de esta sustancia a 20°C se puede alcanzar muy rápidamente una concentración nociva en el aire.</p> <p>EFFECTOS DE EXPOSICION DE CORTA DURACION: El vapor de la sustancia irrita los ojos y el tracto respiratorio. La sustancia irrita fuertemente los ojos y la piel.</p>
<p>PROPIEDADES FISICAS</p>	<p>Punto de ebullición: 49°C Punto de fusión: -81°C Densidad relativa (agua = 1): 0.8 Solubilidad en agua, g/100 ml: 20 Presión de vapor, kPa a 20°C: 31.3 Densidad relativa de vapor (aire = 1): 2.0</p>	<p>Densidad relativa de la mezcla vapor/aire a 20°C (aire = 1): 1.3 Punto de inflamación: -30 °C c.c. Temperatura de autoignición: 207°C Límites de explosividad, % en volumen en el aire: 2.6-17.0 Coeficiente de reparto octanol/agua como log Pow: 0.59</p>
<p>DATOS AMBIENTALES</p>		
<p>NOTAS</p>		
<p>Antes de la destilación comprobar si existen peróxidos; en caso positivo eliminarlos. Estabilizadores o inhibidores añadidos pueden influir sobre las propiedades toxicológicas de esta sustancia; consultar a un experto.</p> <p style="text-align: right;">Ficha de emergencia de transporte (Transport Emergency Card): TEC (R)-30S1275 Código NFPA: H 2; F 3; R 2;</p>		

INFORMACION ADICIONAL	
Los valores LEP pueden consultarse en línea en la siguiente dirección: http://www.mtas.es/insht/practice/vlas.htm	Última revisión IPCS: 2003 Traducción al español y actualización de valores límite y etiquetado: 2003 FISQ: 1-171
ICSC: 0550	PROPIONALDEIDO
© CE, IPCS, 2003	
NOTA LEGAL IMPORTANTE:	Esta ficha contiene la opinión colectiva del Comité Internacional de Expertos del IPCS y es independiente de requisitos legales. Su posible uso no es responsabilidad de la CE, el IPCS, sus representantes o el INSHT, autor de la versión española.

A III.12. Ficha de seguridad química del R-141b

1,1-DICLORO-1-FLUOROETANO		ICSC: 1712 Abril 2008	
CAS:	1717-00-6	Diclorofluoroetano	
RTECS:	K10997000	HCFC-141b	
CE Índice Anexo I:	602-084-00-X	C ₂ H ₃ Cl ₂ F/CH ₃ CCl ₂ F	
CE / EINECS:	404-080-1	Masa molecular: 117	
TIPO DE PELIGRO / EXPOSICIÓN	PELIGROS AGUDOS / SÍNTOMAS	PREVENCIÓN	PRIMEROS AUXILIOS / LUCHA CONTRA INCENDIOS
INCENDIO	En caso de incendio se desprenden humos (o gases) tóxicos e irritantes.	NO poner en contacto con superficies calientes.	Pulverización con agua, espuma, polvo o dióxido de carbono.
EXPLOSIÓN			En caso de incendio: mantener fríos los bidones y demás instalaciones rociando con agua.
EXPOSICIÓN			
Inhalación	Somnolencia. Confusión mental. Pérdida del conocimiento.	Sistema cerrado y ventilación.	Aire limpio y reposo. Proporcionar asistencia médica.
Piel	Enrojecimiento. Dolor.	Guantes de protección.	Aclarar y lavar la piel con agua y jabón.
Ojos	Enrojecimiento. Dolor.	Gafas ajustadas de seguridad.	Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad).
Ingestión			NO provocar el vómito.
DERRAMES Y FUGAS		ENVASADO Y ETIQUETADO	
Protección personal: equipo autónomo de respiración. Ventilar. Recoger el líquido procedente de la fuga en recipientes precintables. Absorber el líquido residual en arena o absorbente inerte y trasladarlo a un lugar seguro. Recoger cuidadosamente el residuo y trasladarlo a continuación a un lugar seguro. NO permitir que este producto químico se incorpore al ambiente.		Clasificación UE Símbolo: N R: 52/53-59 S: 59-61 Clasificación GHS Atención Provoca irritación ocular. Puede provocar somnolencia o vértigo. Nocivo para los organismos acuáticos.	
RESPUESTA DE EMERGENCIA		ALMACENAMIENTO	
		Separado de ácidos fuertes. Mantener en lugar fresco. Mantener en lugar bien ventilado. Almacenar en un área sin acceso a desagües o alcantarillas.	
Preparada en el Contexto de Cooperación entre el IPCS y la Comisión Europea © CE, IPCS, 2008			
 IPCS International Programme on Chemical Safety	 WHO	 ILO	 UNEP
	 MINISTERIO DE TRABAJO E INMIGRACIÓN	 INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD E HIGIENE EN EL TRABAJO	

VÉASE INFORMACIÓN IMPORTANTE AL DORSO

1,1-DICLORO-1-FLUOROETANO		ICSC: 1712
DATOS IMPORTANTES		
<p>ESTADO FÍSICO; ASPECTO Líquido incoloro de olor característico.</p> <p>PELIGROS FÍSICOS El vapor es más denso que el aire y puede acumularse en las zonas más bajas produciendo una deficiencia de oxígeno.</p> <p>PELIGROS QUÍMICOS La sustancia se descompone en contacto con llamas o superficies calientes produciendo cloruro de hidrógeno, fluoruro de hidrógeno y fosgeno. Reacciona con ácidos fuertes.</p> <p>LÍMITES DE EXPOSICIÓN TLV no establecido. MAK no establecido.</p>	<p>VÍAS DE EXPOSICIÓN La sustancia se puede absorber por inhalación.</p> <p>RIESGO DE INHALACIÓN Al producirse pérdidas en zonas confinadas, este líquido se evapora muy rápidamente originando una saturación total del aire con grave riesgo de asfixia.</p> <p>EFFECTOS DE EXPOSICIÓN DE CORTA DURACIÓN La sustancia irrita levemente los ojos. La sustancia puede afectar al sistema nervioso central y al sistema cardiovascular, dando lugar a disminución del estado de alerta y alteraciones cardíacas. Asfixia.</p>	
PROPIEDADES FÍSICAS		
<p>Punto de ebullición: 32°C Punto de fusión: -103.5°C Densidad: 1.24 g/cm³</p> <p>Solubilidad en agua: 0,4 g/100ml a 20°C. Presión de vapor, kPa a 25°C: 76.3 Densidad relativa de vapor (aire = 1): 4.0</p>	<p>Densidad relativa de la mezcla vapor/aire a 20°C (aire = 1): 3.3 (calculada) Temperatura de autoignición: 530-550°C Límites de explosividad, % en volumen en el aire: 5.6-17.7 Coeficiente de reparto octanol/agua como log Pow: 2.3 Viscosidad, mm²/s a 25 °C: 0.33</p>	
DATOS AMBIENTALES		
La sustancia es nociva para los organismos acuáticos. Esta sustancia puede ser peligrosa para el medio ambiente; debe prestarse atención especial a la capa de ozono.		
NOTAS		
Altas concentraciones en el aire producen una deficiencia de oxígeno con riesgo de pérdida de conocimiento o muerte. Comprobar el contenido de oxígeno antes de entrar en la zona.		
INFORMACIÓN ADICIONAL		
NOTA LEGAL	Esta ficha contiene la opinión colectiva del Comité Internacional de Expertos del IPCS y es independiente de requisitos legales. Su posible uso no es responsabilidad de la CE, el IPCS, sus representantes o el INSHT, autor de la versión española.	
© IPCS, CE 2008		

REFERENCIAS

- [1] Instituto Nacional de Seguridad e Higiene. *Fichas internacionales de seguridad química*. <http://www.insht.es/portal/site/Insht/>
Última consulta, noviembre 2015.

Anexo IV

Medidas de los ensayos

A IV.1. Tablas de las medidas realizadas en los ensayos

Para cada ciclo experimental se han elaborado las tablas con los valores medios de todas las variables físicas medidas y que resulten significativas. Estas tablas constituyen el resumen de todos los ensayos hechos en la tesis y son, por tanto, la base de todo el trabajo realizado.

Para cada ensayo se han elegido los intervalos más estables, de unas dos horas de duración, dentro de los tramos que cada temperatura ambiente determina en el ciclo. Es decir, aquellos intervalos donde las sondas han obtenido medidas en un estado próximo al estacionario, para así aproximarse a la media de las medidas. La media se ha hallado a partir de unos 60 valores, puesto que se ha tomado un dato, para cada variable, cada dos minutos del ciclo experimental de ensayo definido en el apartado 5.1. Los datos numéricos de las variables se han obtenido según el procedimiento definido en el apartado 5.4.4.

Para comprobar la validez de las medias halladas se ha calculado la desviación típica de estos valores, se han desechado aquellos que no entraban dentro de los intervalos de confianza y se han repetido aquellos ensayos que no han alcanzado valores con la mínima estabilidad esperada.

De esta forma se han determinado los valores medios de cada variable física y se ha calculado el valor promedio de dichos datos con precisión.

Las variables obtenidas por medida directa de las sondas en los termosifones cilíndricos, que aparecen en las tablas son:

- Temperatura ambiente: t_a
- Presión de vapor: p_v
- Temperatura de fluido: t_v
- Temperatura pared del evaporador: t_{pe}
- Temperatura en el evaporador: t_e
- Temperatura en el condensador: t_c

Las variables que se han calculado a partir de las anteriores son:

- Salto térmico: $t_{pe} - t_a$
- Potencia: P
- Resistencia térmica: R_{term}
- Isotermicidad: $t_e - t_c$

A IV.2. Tablas del termosifón cilíndrico de cobre

Se dan a continuación las tablas con todos los resultados para los fluidos y mezclas ensayados en el termosifón de cobre. Las tablas se han realizado para todos y cada uno de los ensayos y en ellas se encuentran los valores medios obtenidos para todas las variables físicas medidas. Constituyen el resumen, de manera completa, del trabajo experimental realizado durante el desarrollo de la tesis. Se han ordenado según el fluido de trabajo, o mezcla, el nivel de carga o coeficiente de llenado y la temperatura ambiente.

Tabla A IV.1: Resultados de los ensayos del termosifón de cobre con agua, a distintas temperaturas y cargas.

Nivel de carga bajo (50 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
10,8	0,120	49,45	52,6	41,8	149,74	0,279	50,4	48,5	1,9
25,2	0,229	63,00	66,0	40,8	149,45	0,273	63,5	62,5	1,0
32,4	0,296	68,8	72,1	39,7	149,28	0,266	69,7	67,9	1,8
44,0	0,461	79,35	83,1	39,1	149,36	0,262	79,5	79,2	0,3

Nivel de carga medio (70 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
11,3	0,128	50,80	54,0	42,7	149,49	0,286	51,6	50,0	1,6
25,6	0,248	64,80	67,7	42,1	149,99	0,281	65,2	64,4	0,8
32,6	0,330	71,35	74,4	41,8	149,97	0,279	72,0	70,7	1,3
43,7	0,486	80,65	83,5	39,8	149,9	0,266	81,0	80,3	0,7

Nivel de carga alto (90 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
10,60	0,125	50,200	54,10	43,50	150,06	0,290	51,30	49,10	2,20
25,69	0,241	64,195	67,33	41,64	149,75	0,280	64,57	63,82	0,75
32,67	0,315	70,270	73,34	40,67	149,93	0,278	70,59	69,95	0,64
43,68	0,479	80,275	83,23	39,55	149,49	0,275	80,55	80,00	0,55

Tabla A IV.2: Resultados de los ensayos del termosifón de cobre con Ciclopentano, a distintas temperaturas y cargas.

Nivel de carga bajo (50 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
11,2	0,801	42,28	49,9	38,7	150,02	0,258	45,2	37,8	7,4
25,6	1,280	56,54	63,6	38,0	150,21	0,253	59,0	54,7	4,3
32,5	1,594	63,74	70,5	38,0	150,24	0,253	66,0	62,9	3,1
43,3	2,184	74,71	81,3	38,0	150,07	0,253	76,8	74,6	2,2

Nivel de carga medio (70 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
11,1	0,741	40,05	47,0	35,9	149,63	0,240	41,6	39,8	1,8
25,6	1,178	53,91	61,2	35,6	150,17	0,237	55,7	53,7	2,0
32,4	1,463	60,88	67,9	35,5	149,94	0,237	62,6	60,7	1,9
43,2	2,013	71,79	78,6	35,4	149,62	0,237	73,5	71,6	1,9

Nivel de carga alto (90 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
11,2	0,723	39,35	46,6	35,4	150,32	0,236	41,0	39,2	1,8
25,6	1,165	53,56	60,9	35,3	150,32	0,235	55,3	53,3	2,0
32,5	1,446	60,50	67,7	35,2	150,17	0,235	62,3	60,3	2,0
43,3	1,997	71,51	78,6	35,3	150,26	0,235	73,3	71,3	2,0

Tabla A IV.3: Resultados de los ensayos del termosifón de cobre con Dietil éter, a distintas temperaturas y cargas.

Nivel de carga bajo (50 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
12,0	1,214	39,63	45,2	33,2	150,46	0,221	41,2	39,3	1,9
26,9	1,911	53,63	59,5	32,6	150,23	0,217	55,8	53,6	2,2
34,1	2,4	61,18	67,1	33,0	150,20	0,220	63,3	61,1	2,2
44,8	3,258	72,07	78,0	33,2	150,28	0,221	74,1	71,9	2,2

Nivel de carga medio (70 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
10,9	1,159	38,27	44,0	33,1	150,51	0,220	39,3	37,7	1,6
25,5	1,849	52,56	59,6	34,1	150,18	0,227	54,1	52,3	1,8
32,7	2,311	59,93	67,3	34,6	150,22	0,230	61,5	59,8	1,7
43,4	3,148	70,81	80,0	36,6	150,31	0,243	72,3	70,7	1,6

Nivel de carga alto (90 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
10,9	1,273	41,03	47,5	36,6	150,32	0,244	42,1	40,2	1,9
25,6	1,993	55,00	63,0	37,4	150,10	0,249	56,6	54,6	2,0
32,5	2,438	61,76	70,5	38,0	150,16	0,253	63,4	61,4	2,0
43,2	3,301	72,55	82,1	38,9	150,15	0,259	74,3	72,2	2,1

Tabla A IV.4: Resultados de los ensayos del termosifón de cobre con Etanal, a distintas temperaturas y cargas.

Nivel de carga bajo (50 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
11	1,596	35,77	39,4	28,4	149,84	0,189	36,6	34,5	2,1
25,3	2,647	51,55	54,7	29,4	150,31	0,195	51,7	49,6	2,1
32,4	3,249	58,42	61,7	29,3	149,46	0,197	58,9	56,8	2,1
43,2	4,577	70,66	73,1	29,9	149,64	0,200	70,7	67,9	2,8

Nivel de carga medio (70 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
11,1	1,809	39,55	44,1	33,0	149,83	0,220	40,4	38,0	2,4
25,5	2,936	54,99	59,3	33,8	150,57	0,225	55,0	52,7	2,3
32,4	3,634	62,31	66,7	34,3	150,92	0,227	62,4	59,7	2,7
43,3	4,924	73,41	78,1	34,8	149,96	0,232	73,8	70,5	3,3

Nivel de carga alto (90 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
11,0	1,667	37,08	41,9	30,9	151,00	0,205	37,9	35,6	2,3
25,5	2,768	53,02	57,6	32,1	150,59	0,213	53,1	50,6	2,5
32,5	3,435	60,34	65,1	32,6	150,55	0,216	60,5	57,8	2,7
43,5	4,699	71,64	76,7	33,2	150,66	0,220	71,9	68,7	3,2

Tabla A IV.5: Resultados de los ensayos del termosifón de cobre con Metanoato de metilo, a distintas temperaturas y cargas.

Nivel de carga bajo (50 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
10,8	1,471	41,92	45,5	34,7	150,48	0,231	42,0	40,9	1,1
25,3	2,288	55,30	59,1	33,8	150,36	0,225	55,6	54,3	1,3
32,1	2,739	61,14	64,9	32,8	150,24	0,218	61,5	60,4	1,1
42,8	3,755	71,99	75,8	33,0	150,26	0,219	72,4	71,2	1,2

Nivel de carga medio (70 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
10,8	1,373	39,95	44,6	33,8	148,82	0,227	40,3	39,1	1,2
25,3	2,132	53,07	58,1	32,8	149,74	0,219	53,8	52,5	1,3
32,3	2,654	60,10	65,5	33,2	148,76	0,220	60,8	59,5	1,3
42,8	3,664	71,12	75,9	33,1	148,69	0,223	71,7	70,5	1,2

Nivel de carga alto (90 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
10,6	1,416	40,83	45,6	35,0	147,57	0,237	41,1	39,8	1,3
25,4	2,162	53,51	58,9	33,5	149,90	0,224	54,3	52,8	1,5
32,3	2,662	60,20	65,4	33,1	147,45	0,224	61,0	59,5	1,5
42,9	3,672	71,20	76,1	33,2	147,36	0,226	71,8	70,4	1,4

Tabla A IV.6: Resultados de los ensayos del termosifón de cobre con Isopentano, a distintas temperaturas y cargas.

Nivel de carga bajo (50 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
11,1	1,589	41,56	46,8	35,7	150,44	0,237	42,7	41,2	1,5
25,5	2,384	55,19	60,4	34,9	150,36	0,232	56,6	54,7	1,9
32,5	2,916	62,47	67,5	35	150,45	0,232	63,8	62,0	1,8
43,1	3,862	73,23	72,8	29,7	150,45	0,234	74,5	72,9	1,6

Nivel de carga medio (70 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
11,1	1,584	41,45	47,0	35,9	150,49	0,239	41,9	40,6	1,3
25,3	2,357	54,79	60,2	34,9	150,49	0,232	55,3	54,0	1,3
32,3	2,874	61,93	67,2	34,9	150,54	0,232	62,5	61,1	1,4
43,2	3,838	72,98	78,1	34,9	150,44	0,232	73,6	72,2	1,4

Nivel de carga alto (90 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
11,1	1,541	40,58	46,5	35,4	149,91	0,236	41,3	39,9	1,4
25,6	2,354	54,78	60,7	35,1	150,33	0,234	55,6	54,1	1,5
32,6	2,868	61,85	67,5	34,9	150,43	0,232	62,6	61,2	1,4
43,4	3,807	72,66	78,1	34,7	150,35	0,231	73,4	72,1	1,3

Tabla A IV.7: Resultados de los ensayos del termosifón de cobre con Metanol, a distintas temperaturas y cargas.

Nivel de carga bajo (50 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
10,9	0,413	43,32	50,3	39,4	150,24	0,262	46,6	41,1	5,5
25,5	0,693	55,18	62,4	36,9	150,16	0,246	58,7	54,9	3,8
32,6	0,931	62,40	69,7	37,1	150,06	0,248	65,9	62,1	3,8
43,4	1,416	73,29	80,7	37,3	150,06	0,248	76,9	73,2	3,7

Nivel de carga medio (70 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
10,8	0,369	40,87	47,8	37,0	150,24	0,247	44,0	40,6	3,4
25,5	0,677	54,62	61,4	35,9	150,26	0,238	57,3	54,0	3,3
32,4	0,885	61,13	68,3	35,9	150,36	0,239	64,0	60,7	3,3
43,2	1,325	71,51	79,3	36,1	150,27	0,240	74,7	71,3	3,4

Nivel de carga alto (90 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
10,8	0,357	40,15	46,3	35,5	150,60	0,236	42,4	39,4	3,0
25,6	0,631	52,96	60,1	34,5	150,57	0,229	55,9	52,9	3,0
32,4	0,839	59,81	67,1	34,7	150,60	0,230	62,9	59,8	3,1
43,3	1,284	70,78	78,6	35,3	150,58	0,234	74,0	70,7	3,3

Tabla A IV.8: Resultados de los ensayos del termosifón de cobre con N-Hexano, a distintas temperaturas y cargas.

Nivel de carga bajo (50 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
11,1	0,400	41,85	47,4	36,3	149,42	0,243	42,5	40,9	1,6
25,3	0,644	54,97	65,1	39,8	150,66	0,237	56,2	54,6	1,6
32,3	0,828	62,44	68,5	36,2	150,63	0,240	63,6	61,9	1,7
43,2	1,185	73,81	79,9	36,7	150,39	0,244	75,2	73,3	1,9

Nivel de carga medio (70 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
10,9	0,402	41,98	47,8	36,9	149,47	0,247	42,7	41,0	1,7
25,0	0,648	55,15	61,4	36,4	149,39	0,244	56,1	54,4	1,7
32,1	0,827	62,40	68,8	36,7	149,76	0,245	63,5	61,8	1,7
43,0	1,161	73,13	79,5	36,5	149,11	0,245	74,4	72,6	1,8

Nivel de carga alto (90 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
10,9	0,379	40,44	46,6	35,7	149,44	0,2386	41,4	39,8	1,6
25,3	0,631	54,39	60,8	35,5	149,61	0,2373	55,4	53,8	1,6
32,2	0,800	61,39	68,2	36,0	150,26	0,2393	62,6	61,0	1,6
42,9	1,130	72,25	78,9	36,0	149,42	0,2411	73,5	71,8	1,7

Tabla A IV.9: Resultados de los ensayos del termosifón de cobre con N-pentano, a distintas temperaturas y cargas.

Nivel de carga bajo (50 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
11,0	1,088	38,17	44,0	33,0	150,56	0,220	39,6	37,7	1,9
25,7	1,759	53,27	59,4	33,7	150,32	0,224	54,8	52,6	2,2
32,7	2,177	60,52	67,0	34,3	150,39	0,228	61,8	59,7	2,1
43,6	2,969	71,74	80,3	36,7	150,47	0,244	73,6	71,1	2,5

Nivel de carga medio (70 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
11,0	1,184	40,711	47,2	36,2	150,83	0,240	42,0	39,9	2,1
25,6	1,862	55,167	62,5	36,9	150,16	0,245	56,4	54,2	2,2
32,8	2,296	62,383	68,4	35,6	149,97	0,238	63,4	61,4	2,0
43,4	3,091	73,259	81,7	38,3	150,56	0,254	73,9	72,1	1,8

Nivel de carga alto (90 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
10,9	1,176	40,51	47,1	36,2	150,19	0,241	41,6	39,7	1,9
25,7	1,873	55,37	62,7	37,0	150,09	0,247	56,2	54,4	1,8
32,8	2,309	62,58	69,7	36,9	149,92	0,246	63,3	61,6	1,7
43,5	3,099	73,36	81,7	38,2	149,91	0,255	73,8	72,2	1,6

Tabla A IV.10: Resultados de los ensayos del termosifón de cobre con Perfluoroheptano, a distintas temperaturas y cargas.

Nivel de carga bajo (50 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
10,9	0,419	57,34	63,9	53,0	150,38	0,353	58,3	44,3	14,0
25,7	0,628	68,30	75,2	49,5	150,59	0,329	70,1	66,2	3,9
32,7	0,806	75,52	82,2	49,5	150,54	0,329	77,3	73,4	3,9
43,8	1,153	86,57	92,7	48,9	150,41	0,325	88,1	84,6	3,5

Nivel de carga medio (70 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
10,8	0,407	56,59	63,8	53,0	150,36	0,353	58,1	44,2	13,9
25,6	0,584	66,27	73,8	48,2	149,89	0,322	68,4	65,0	3,4
32,6	0,754	73,56	81,0	48,4	149,86	0,323	75,6	72,3	3,3
43,6	1,074	84,31	91,5	47,9	150,14	0,319	86,4	83,3	3,1

Nivel de carga alto (90 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
10,9	0,426	57,77	65,3	54,4	150,20	0,362	59,3	42,8	16,5
25,7	0,626	68,21	76,2	50,5	149,90	0,337	70,5	66,9	3,6
32,7	0,836	76,61	84,1	51,4	149,98	0,343	78,4	72,3	6,1
43,7	1,181	87,34	94,3	50,6	150,07	0,337	89,0	83,5	5,5

Tabla A IV.11: Resultados de los ensayos del termosifón de cobre con Propanal, a distintas temperaturas y cargas.

Nivel de carga bajo (50 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
11,2	0,856	43,20	47,7	36,5	150,21	0,243	44,1	40,1	4,0
25,3	1,337	56,24	60,9	35,6	149,66	0,238	57,2	55,3	1,9
32,4	1,669	63,23	68,0	35,6	149,92	0,238	64,4	62,3	2,1
43,3	2,309	74,11	79,3	36,0	150,24	0,240	75,6	73,2	2,4

Nivel de carga medio (70 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
11,2	0,754	39,71	45,4	34,2	149,58	0,229	41,7	39,3	2,4
25,5	1,214	53,31	59,7	34,2	150,00	0,229	55,6	53,0	2,6
32,4	1,531	60,47	67,0	34,6	150,80	0,231	62,8	60,1	2,7
43,1	2,131	71,34	78,5	35,4	149,16	0,237	74,1	70,8	3,3

Nivel de carga alto (90 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
11,2	0,760	40,61	45,4	34,2	149,44	0,229	41,6	39,0	2,6
25,5	1,244	54,05	60,0	34,5	149,65	0,231	55,8	53,3	2,5
32,4	1,559	61,05	67,3	34,9	149,89	0,233	63,1	60,3	2,8
43,3	2,167	71,92	79,2	35,9	149,45	0,240	74,5	71,1	3,4

Tabla A IV.12: Resultados de los ensayos del termosifón de cobre con R-141b, a distintas temperaturas y cargas.

Nivel de carga bajo (50 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
11,6	1,378	40,64	47,7	36,1	150,20	0,241	42,6	40,3	2,3
26,1	2,147	54,56	61,2	35,1	150,20	0,234	57,0	54,4	2,6
33,1	2,651	61,70	68,4	35,3	150,49	0,235	64,0	61,5	2,5
43,2	3,597	72,67	80,3	37,1	150,30	0,242	74,9	72,5	2,4

Nivel de carga medio (70 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
11,6	1,507	43,34	51,0	39,4	150,03	0,262	45,3	42,8	2,5
26,4	2,227	55,78	64,9	38,5	150,32	0,256	58,0	55,4	2,6
33,3	2,724	62,64	73,1	39,8	150,40	0,265	64,7	62,2	2,5
44,2	3,668	73,40	83,9	39,7	150,36	0,265	75,5	73,1	2,4

Nivel de carga alto (90 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
11,3	1,283	38,52	46,4	35,1	150,26	0,233	40,9	38,3	2,6
26,2	2,052	53,08	61,1	34,9	149,93	0,233	55,9	53,0	2,9
33,2	2,534	60,14	67,9	34,7	150,01	0,231	62,9	60,1	2,8
44,0	3,433	70,94	81,2	37,2	150,11	0,248	73,3	71,0	2,3

Tabla A IV.13: Resultados de los ensayos del termosifón de cobre con R-365mfc, a distintas temperaturas y cargas.

Nivel de carga bajo (50 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
10,6	1,399	50,16	55,8	45,2	150,08	0,301	51,2	49,9	1,3
25,6	2,298	65,05	70,3	44,7	149,97	0,298	66,1	64,6	1,5
32,5	2,805	71,93	77,1	44,6	149,92	0,298	72,8	71,9	0,9
43,6	3,624	80,28	87,6	44	149,89	0,294	86,3	82,4	3,9

Nivel de carga medio (70 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
10,7	1,418	50,54	55,8	45,1	148,94	0,303	50,7	49,2	1,5
25,6	2,242	64,27	70,4	44,8	149,88	0,300	65,8	64,1	1,7
32,5	2,737	71,07	77,1	44,6	149,87	0,298	72,6	71,0	1,6
43,6	3,782	81,80	87,8	44,2	150,02	0,295	83,6	82,8	0,8

Nivel de carga alto (90 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
10,7	1,129	44,20	49,5	38,8	126,66	0,306	44,6	43,3	1,3
25,6	2,263	64,56	70,6	45,0	152,63	0,295	65,8	64,3	1,5
32,5	2,764	71,03	77,3	44,8	152,30	0,294	72,7	71,3	1,4
43,6	3,64	80,44	87,7	44,1	152,22	0,289	83,4	82,1	1,3

Tabla A IV.14: Resultados de los ensayos del termosifón de cobre con la mezcla azeotrópica Acetona + N-Pentano, a distintas temperaturas y cargas.

Nivel de carga bajo (50 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
11,0	1,301	39,05	44,3	33,3	150,18	0,222	39,5	38,1	1,4
25,9	2,071	53,52	60,7	34,8	149,96	0,232	55,2	53,0	2,2
33,0	2,571	61,00	68,2	35,2	150,04	0,235	62,3	60,4	1,9
43,7	3,467	71,78	79,6	35,9	150,16	0,240	72,5	71	1,5

Nivel de carga medio (70 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
11,3	1,397	41,10	46,9	35,6	150,36	0,237	41,8	40,6	1,2
26,0	2,172	55,13	61,3	35,3	150,09	0,235	56,4	54,7	1,7
32,9	2,658	62,18	68,1	35,2	150,12	0,235	63,1	61,7	1,4
43,6	3,586	73,02	73,9	30,3	150,15	0,238	74,0	72,6	1,4

Nivel de carga alto (90 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
11,2	1,354	40,19	46,0	34,8	150,72	0,231	40,7	39,5	1,2
25,9	2,197	55,52	61,5	35,6	150,40	0,237	56,2	54,5	1,7
32,9	2,695	62,67	68,9	36,0	150,55	0,239	63,2	61,7	1,5
43,7	3,610	73,26	80,6	36,9	150,65	0,245	74,2	72,5	1,7

Tabla A IV.15: Resultados de los ensayos del termosifón de cobre con la mezcla azeotrópica Ciclopentano + Metanol, a distintas temperaturas y cargas.

Nivel de carga bajo (50 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
11,3	1,116	42,02	46,2	34,9	150,59	0,232	43,1	41,5	1,6
26,1	1,815	56,83	62,8	36,7	150,27	0,244	58,0	56,3	1,7
33,1	2,29	63,74	69,9	36,8	150,41	0,245	65,0	63,3	1,7
43,9	3,189	73,99	81,5	37,6	150,44	0,250	75,6	73,8	1,8

Nivel de carga medio (70 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
11,3	1,051	40,04	44,8	33,5	150,54	0,223	40,7	39,1	1,6
26,0	1,72	55,23	61,5	35,5	150,31	0,237	56,1	53,7	2,4
32,8	2,186	62,35	69,0	36,2	150,43	0,241	63,0	60,7	2,3
43,6	3,115	73,24	81,7	38,1	150,48	0,253	74,8	71,6	3,2

Nivel de carga alto (90 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
11,4	1,031	39,39	44,2	32,8	150,23	0,219	40,1	38,5	1,6
26,2	1,719	55,22	60,9	34,7	150,00	0,232	56,0	53,8	2,2
32,9	2,181	62,28	68,3	35,4	150,14	0,236	62,9	60,6	2,3
43,6	3,091	72,99	80,6	37,0	150,28	0,246	74,7	71,4	3,3

Tabla A IV.16: Resultados de los ensayos del termosifón de cobre con la mezcla azeotrópica Dietil éter+ Metanoato de metilo, a distintas temperaturas y cargas.

Nivel de carga bajo (50 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
11,6	1,410	37,85	42,6	31,0	150,22	0,207	39,0	37,5	1,5
26,5	2,337	53,35	57,7	31,2	150,24	0,207	54,1	52,4	1,7
33,3	2,888	60,33	64,4	31,1	150,24	0,207	60,9	59,3	1,6
44,1	3,841	71,05	74,5	30,4	150,31	0,202	71,4	70,0	1,4

Nivel de carga medio (70 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
11,6	1,443	38,52	43,6	32,0	150,10	0,213	39,3	37,7	1,6
26,6	2,360	53,67	58,9	32,3	150,11	0,215	54,8	53,0	1,8
33,4	2,880	60,24	65,6	32,2	150,24	0,214	61,4	59,8	1,6
44,2	3,904	70,80	76,2	32,0	150,23	0,213	71,8	70,7	1,1

Nivel de carga alto (90 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
11,5	1,385	37,33	42,5	31	150,23	0,2064	37,9	36,8	1,1
26,4	2,325	53,19	59,2	32,8	150,17	0,2187	53,6	52	1,6
33,4	2,889	60,34	66,8	33,4	150,11	0,2227	60,6	59,2	1,4
44,3	3,931	71,05	78,1	33,8	150,27	0,2252	71,1	70,1	1,0

A IV.3. Tablas del termosifón cilíndrico de acero pequeño

Se dan a continuación las tablas con todos los resultados para los fluidos y mezclas ensayados en el termosifón de acero pequeño. Las tablas se han realizado para todos y cada uno de los ensayos y en ellas se encuentran los valores medios obtenidos para todas las variables físicas medidas. Se han ordenado según el fluido de trabajo, o mezcla, el nivel de carga o coeficiente de llenado y la temperatura ambiente.

Tabla A IV.17: Resultados de los ensayos del termosifón de acero pequeño con Acetona, a distintas temperaturas y cargas.

Nivel de carga bajo (50 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
11,40	0,887	52,22	61,71	50,31	150,15	0,335	52,33	51,35	0,98
25,78	1,375	65,29	76,23	50,45	149,91	0,337	66,41	65,2	1,21
32,69	1,719	72,42	83,15	50,46	149,85	0,337	73,05	71,89	1,16
43,36	2,327	82,66	92,73	49,37	149,5	0,330	83,26	82,29	0,97

Nivel de carga medio (70 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
11,40	0,822	48,58	61,62	50,22	149,86	0,335	49,46	47,7	1,75
25,89	1,286	63,22	79,32	53,43	149,22	0,358	63,43	61,68	1,75
32,73	1,592	69,22	82,41	49,68	149,44	0,332	69,8	68,63	1,17
43,39	2,145	79,84	90,97	47,58	149,08	0,319	80,04	79,08	0,96

Nivel de carga alto (90 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
11,39	0,863	51,44	68,66	57,27	150,10	0,382	52,53	50,87	1,67
25,87	1,370	65,18	84,56	58,69	149,33	0,393	66,05	64,35	1,70
32,39	1,657	71,23	82,59	50,20	149,51	0,336	71,95	70,72	1,24
43,18	2,244	81,40	91,71	48,53	149,54	0,325	82,23	81,18	1,06

Tabla A IV.18: Resultados de los ensayos del termosifón de acero pequeño con Agua, a distintas temperaturas y cargas.

Nivel de carga bajo (50 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
10,36	0,09994	45,81	53,72	43,36	149,84	0,289	47,79	45,47	2,33
24,84	0,1981	59,89	65,17	40,33	150,87	0,267	60,87	58,91	1,96
31,80	0,28182	67,70	72,12	40,32	150,58	0,268	67,8	66,3	1,51
42,68	0,442	77,67	82,99	40,31	150,17	0,268	78,26	77,08	1,18

Nivel de carga medio (70 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
10,19	0,101	46,01	58,32	48,13	150,35	0,320	48,37	45,51	2,86
24,85	0,197	59,75	67,28	42,43	150,23	0,282	60,66	58,34	2,32
31,56	0,273	66,96	73,54	41,98	149,76	0,283	67,55	65,58	1,97
42,43	0,432	77,74	84,00	41,57	149,38	0,278	77,91	76,15	1,76

Nivel de carga alto (90 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
10,34	0,109	47,51	60,46	50,12	154,14	0,334	50,43	46,19	4,24
24,50	0,212	61,34	70,87	46,37	150,04	0,309	63,54	60,57	2,97
31,51	0,293	68,57	76,79	45,28	149,67	0,302	70,42	67,71	2,71
42,55	0,474	80,02	87,48	44,93	149,48	0,301	81,18	78,60	2,58

Tabla A IV.19: Resultados de los ensayos del termosifón de acero pequeño con Ciclopentano, a distintas temperaturas y cargas.

Nivel de carga bajo (50 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
10,41	1,019	49,42	61,1	50,69	147,8	0,343	50,95	48,47	2,48
25,05	1,637	64,63	75,62	50,57	148,36	0,341	65,7	64,56	1,14
32,13	1,983	71,71	81,89	49,76	146,98	0,339	72,15	71,27	0,89
42,80	2,678	82,26	92,39	49,59	149,12	0,333	82,96	82,24	0,72

Nivel de carga medio (70 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
10,23	1,015	49,30	65,64	55,41	150,33	0,369	50,94	45,22	5,71
24,93	1,697	65,86	81,23	56,30	150,07	0,375	66,98	65,27	1,71
31,84	2,063	72,66	86,61	54,77	149,96	0,365	73,58	72,58	1,00
42,61	2,738	83,10	93,95	51,34	149,78	0,343	83,88	83,17	0,71

Nivel de carga alto (90 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
10,36	1,014	49,27	65,28	54,92	150,22	0,366	50,38	48,17	2,21
24,92	1,672	65,35	82,10	57,18	149,86	0,382	66,24	65,24	1,00
32,00	2,026	72,02	83,84	51,84	149,82	0,346	72,81	72,07	0,74
42,69	2,692	82,45	93,40	50,71	149,56	0,339	83,15	85,52	0,63

Tabla A IV.20: Resultados de los ensayos del termosifón de acero pequeño con Dietil éter, a distintas temperaturas y cargas.

Nivel de carga bajo (50 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
10,47	1,806	51,80	60,43	49,96	150,5	0,332	52,18	51,24	0,94
24,90	2,669	64,90	73,23	48,33	150,12	0,322	65,17	63,84	1,33
31,72	3,201	71,42	79,38	47,66	150,17	0,317	71,59	70,83	0,76
42,69	4,223	81,93	89,30	46,61	149,92	0,311	82,09	81,38	0,71

Nivel de carga medio (70 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
10,41	1,702	49,92	58,92	48,51	150,18	0,323	50,08	49,51	0,56
24,82	2,666	64,86	73,12	48,30	150,00	0,322	64,93	64,14	0,79
31,70	3,204	71,46	79,53	47,83	149,91	0,319	71,58	71,05	0,53
42,44	4,222	81,92	89,60	47,16	149,64	0,315	82,13	81,50	0,63

Nivel de carga alto (90 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
10,41	1,708	50,03	58,74	48,33	150,15	0,322	50,10	49,57	0,54
25,01	2,642	64,55	72,69	47,68	149,93	0,318	64,57	63,98	0,59
32,00	3,195	71,35	79,39	47,39	149,74	0,316	71,46	70,94	0,52
42,68	4,198	81,69	89,24	46,56	149,53	0,311	81,84	81,26	0,58

Tabla A IV.21: Resultados de los ensayos del termosifón de acero pequeño con Isopentano, a distintas temperaturas y cargas.

Nivel de carga bajo (50 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
10,46	2,016	48,44	57,27	46,81	150,47	0,311	48,66	48,21	0,45
24,80	3,053	63,14	70,96	46,16	150,07	0,308	63,30	62,97	0,34
31,73	3,647	69,94	77,34	45,61	149,89	0,304	70,08	69,80	0,28
42,66	4,753	80,65	87,64	44,98	149,49	0,301	80,77	80,52	0,25

Nivel de carga medio (70 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
10,44	1,976	47,86	56,73	46,29	150,44	0,308	48,08	47,63	0,45
24,92	3,066	63,40	71,06	46,14	150,00	0,308	63,54	63,26	0,28
31,79	3,664	70,09	77,16	45,37	149,93	0,303	70,18	70,00	0,19
42,73	4,760	80,75	87,24	44,51	149,32	0,298	80,84	80,65	0,20

Nivel de carga alto (90 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
10,31	1,928	46,83	55,61	45,30	150,51	0,301	47,05	46,61	0,44
24,94	2,971	62,04	69,64	44,70	150,14	0,298	62,19	61,88	0,31
31,69	3,540	68,66	75,78	44,09	149,98	0,294	68,78	68,54	0,25
42,61	4,613	79,38	85,79	43,18	149,60	0,289	79,50	79,25	0,25

Tabla A IV.22: Resultados de los ensayos del termosifón de acero pequeño con Metanol, a distintas temperaturas y cargas.

Nivel de carga bajo (50 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
11,28	0,619	52,51	62,41	51,13	150,47	0,34	54,11	51,96	2,15
25,72	1,098	66,59	76,51	50,79	149,95	0,339	67,99	66,4	1,59
32,61	1,412	73,21	83,39	50,78	149,79	0,339	74,62	73,17	1,45
43,44	2,039	84,21	94,41	50,97	146,93	0,341	84,84	83,57	1,27

Nivel de carga medio (70 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
11,19	0,583	51,11	66,52	55,33	150,13	0,369	53,3	50,56	2,74
25,7	1,037	65,12	81,10	55,40	149,74	0,370	67,15	64,83	2,32
32,61	1,344	71,89	86,91	54,30	149,46	0,363	73,89	71,87	2,03
43,17	1,942	82,94	96,47	53,30	149,39	0,357	83,73	82,14	1,59

Nivel de carga alto (90 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
11,35	0,490	48,33	64,46	53,11	150,53	0,353	49,08	47,58	1,50
25,78	0,887	62,26	76,73	50,95	150,09	0,339	63,09	61,43	1,65
32,66	1,161	69,00	83,41	50,75	150,14	0,338	69,66	68,34	1,32
43,30	1,698	79,21	92,68	49,38	149,84	0,330	79,80	78,62	1,18

Tabla A IV.23: Resultados de los ensayos del termosifón de acero pequeño con N-Hexano, a distintas temperaturas y cargas.

Nivel de carga bajo (50 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
10,54	0,619	53,83	64,85	54,31	151,50	0,359	55,16	33,83	21,34
24,68	0,972	67,41	78,16	53,48	149,73	0,357	68,45	54,04	14,41
31,56	1,192	74,00	84,40	52,84	149,62	0,353	74,81	63,67	11,13
42,52	1,628	84,65	94,61	52,09	149,40	0,349	85,43	78,40	7,03

Nivel de carga medio (70 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
10,75	0,655	55,47	70,82	60,07	150,26	0,400	56,54	37,50	19,04
24,99	0,945	66,53	80,82	55,83	150,01	0,372	67,25	53,08	14,17
31,83	1,162	73,16	86,38	54,55	149,91	0,364	73,77	62,69	11,08
42,80	1,585	83,71	93,42	50,62	149,70	0,338	84,30	77,25	7,05

Nivel de carga alto (90 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
10,49	0,450	46,27	61,20	50,71	150,31	0,337	46,61	45,92	0,69
24,91	0,761	60,58	72,13	47,22	150,02	0,315	60,96	60,20	0,76
31,84	0,955	67,47	78,40	46,56	149,87	0,311	67,72	67,21	0,52
42,75	1,335	78,32	87,89	45,14	159,68	0,302	78,59	78,05	0,55

Tabla A IV.24: Resultados de los ensayos del termosifón de acero pequeño con N-Pentano, a distintas temperaturas y cargas.

Nivel de carga bajo (50 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
10,40	1,563	49,40	58,31	47,91	150,16	0,319	49,81	49,13	0,68
25,00	2,485	65,20	73,51	48,51	149,85	0,324	65,33	64,83	0,50
31,80	2,975	71,82	79,68	47,88	149,68	0,320	71,97	71,65	0,32
42,79	3,907	82,40	89,96	47,17	149,51	0,315	82,63	82,33	0,30

Nivel de carga medio (70 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
10,37	1,529	48,69	57,96	47,59	150,13	0,317	49,05	48,62	0,42
24,90	2,397	63,91	72,46	47,56	149,87	0,317	64,07	63,76	0,30
31,67	2,871	70,49	78,77	47,10	149,71	0,315	70,63	70,37	0,26
42,60	3,785	81,13	89,01	46,41	149,5	0,310	81,41	81,11	0,30

Nivel de carga alto (90 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
10,23	1,535	48,82	57,82	47,59	150,12	0,317	49,07	48,77	0,31
24,73	2,401	63,97	72,58	47,85	149,75	0,320	64,15	63,85	0,31
31,51	2,882	70,63	78,84	47,33	149,68	0,316	70,80	70,52	0,27
42,47	3,795	81,23	89,08	46,61	149,46	0,312	81,46	81,17	0,29

Tabla A IV.25: Resultados de los ensayos del termosifón de acero pequeño con Perfluoroheptano, a distintas temperaturas y cargas.

Nivel de carga bajo (50 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
10,44	0,359	53,87	64,9	54,46	151,00	0,361	53,41	49,66	3,75
24,95	0,606	66,57	77,59	52,64	150,57	0,350	67,28	65,85	1,43
31,89	0,785	73,43	83,78	51,89	150,57	0,345	74,10	72,76	1,35
42,84	1,107	83,75	92,61	49,77	149,76	0,332	84,47	83,02	1,45

Nivel de carga medio (70 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
10,42	0,355	50,43	65,62	55,2	150,77	0,366	52,88	47,98	4,90
24,83	0,629	67,24	77,47	52,64	150,36	0,350	67,78	66,69	1,09
31,77	0,803	73,94	83,56	51,79	150,40	0,344	74,57	73,30	1,27
42,83	1,125	84,14	92,47	49,64	149,68	0,332	84,89	83,38	1,51

Nivel de carga alto (90 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
10,54	0,376	54,56	68,30	57,76	150,84	0,383	54,19	46,61	7,58
24,72	0,648	67,54	80,29	55,57	150,65	0,369	68,62	66,45	2,17
31,81	0,825	74,82	86,34	54,53	150,45	0,362	75,40	74,23	1,17
42,79	1,157	85,25	95,69	52,90	149,83	0,353	85,77	84,72	1,06

Tabla A IV.26: Resultados de los ensayos del termosifón de acero pequeño con R-141b, a distintas temperaturas y cargas.

Nivel de carga bajo (50 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
11,51	1,941	52,71	63,86	52,35	149,73	0,350	53,22	52,20	1,03
25,79	2,805	65,30	75,7	49,91	149,44	0,334	65,67	64,92	0,75
32,43	3,355	71,81	81,61	49,18	149,47	0,329	72,13	71,48	0,65
43,13	4,389	82,32	91,4	48,27	149,27	0,323	82,63	82,01	0,62

Nivel de carga medio (70 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
11,29	1,906	52,10	64,94	53,65	150,20	0,357	52,56	51,63	0,93
25,76	2,742	64,49	75,12	49,36	149,81	0,329	64,84	64,14	0,70
32,69	3,308	71,34	81,28	48,59	149,67	0,325	71,62	71,06	0,57
43,42	4,324	81,75	90,59	47,17	149,51	0,315	82,02	81,47	0,55

Nivel de carga alto (90 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
11,26	1,647	47,40	61,10	49,84	149,70	0,333	47,88	46,91	0,97
25,71	2,552	62,07	73,20	47,49	149,21	0,318	62,44	61,69	0,76
32,69	3,111	69,17	79,39	46,70	149,08	0,313	69,45	68,88	0,57
43,34	4,108	79,90	88,96	45,62	149,02	0,306	80,20	79,59	0,61

Tabla A IV.27: Resultados de los ensayos del termosifón de acero pequeño con R-365mfc, a distintas temperaturas y cargas.

Nivel de carga bajo (50 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
10,35	1,360	48,23	58,02	47,67	149,87	0,318	48,56	47,89	0,66
25,02	2,109	61,22	70,14	45,12	150,20	0,300	61,60	60,84	0,76
31,89	2,583	68,13	76,54	44,65	150,15	0,297	68,41	67,84	0,57
42,96	3,509	78,99	86,97	44,01	150,14	0,293	79,23	78,75	0,49

Nivel de carga medio (70 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
10,23	1,377	49,71	58,83	48,6	150,03	0,324	48,76		
25,04	2,254	63,91	73,03	47,99	150,16	0,320	64,08	63,73	0,35
31,83	2,754	70,55	78,69	46,86	149,96	0,313	70,61	70,48	0,12
42,68	3,710	81,11	88,65	45,97	149,64	0,307	81,34		

Nivel de carga alto (90 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
10,32	1,407	49,10	59,16	48,84	150,41	0,325	49,31	48,89	0,42
24,74	2,266	63,88	72,77	48,03	150,17	0,320	64,07	63,68	0,39
31,75	2,774	70,68	78,91	47,16	149,91	0,315	70,89	70,47	0,42
42,70	3,715	81,16	88,78	46,08	149,60	0,308	81,34	80,87	0,46

Tabla A IV.28: Resultados de los ensayos del termosifón de acero pequeño con la mezcla azeotrópica Acetona + N-Pentano, a distintas temperaturas y cargas.

Nivel de carga bajo (50 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
10,11	1,694	46,95	55,60	45,49	150,59	0,302	47,61	46,74	0,86
24,59	2,777	63,74	71,53	46,94	150,33	0,312	X	63,19	X
31,44	3,244	69,36	76,76	45,32	149,70	0,333	X	68,9	X
42,49	4,315	79,81	87,17	44,68	149,41	0,299	X	79,71	X

Nivel de carga medio (70 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
10,25	1,671	46,52	56,14	45,89	150,4	0,305	46,85	46,24	0,61
24,74	2,668	62,31	70,07	45,33	149,87	0,302	62,36	61,77	0,59
31,50	3,211	68,69	76,46	44,96	149,67	0,300	68,96	68,41	0,55
42,41	4,265	79,38	86,17	43,76	149,18	0,293	79,77	79,19	0,58

Nivel de carga alto (90 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
10,36	1,645	46,03	54,91	44,55	149,96	0,297	46,24	45,67	0,58
24,52	2,581	61,14	69,25	44,73	149,79	0,299	61,16	60,57	0,59
31,53	3,115	67,52	75,23	43,7	148,96	0,293	67,82	67,21	0,61
42,64	4,156	78,43	85,31	42,67	148,73	0,287	78,67	78,09	0,58

Tabla A IV.29: Resultados de los ensayos del termosifón de acero pequeño con la mezcla azeotrópica Ciclopentano + Metanol, a distintas temperaturas y cargas.

Nivel de carga bajo (50 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
11,24	1,505	51,26	62,66	51,42	149,77	0,343	51,60	50,75	0,85
25,51	2,453	65,82	75,55	50,04	149,51	0,335	65,83	65,08	0,76
32,39	3,022	72,27	82,00	49,61	149,40	0,332	72,46	71,67	0,79
43,24	4,127	82,66	92,37	49,13	149,12	0,329	83,06	82,12	0,94

Nivel de carga medio (70 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
11,22	1,449	50,12	64,97	53,75	150,59	0,357	50,57	49,60	0,97
25,71	2,384	64,95	75,46	49,75	150,00	0,332	65,04	64,27	0,77
32,45	2,942	71,43	81,75	49,30	150,00	0,329	71,62	70,80	0,81
43,08	4,023	81,76	91,30	48,22	149,83	0,322	82,11	81,21	0,90

Nivel de carga alto (90 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
11,10	1,691	54,73	67,28	56,18	149,55	0,376	54,81	36,84	17,96
25,67	2,762	69,45	80,07	54,40	148,77	0,366	69,57	55,63	13,94
32,36	3,373	75,81	85,65	53,29	148,79	0,358	75,97	65,29	10,68
43,28	4,570	86,34	95,23	51,95	148,85	0,349	86,36	80,05	6,31

Tabla A IV.30: Resultados de los ensayos del termosifón de acero pequeño con la mezcla azeotrópica Dietil éter+ Metanoato de metilo, a distintas temperaturas y cargas.

Nivel de carga bajo (50 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
11,37	2,176	51,07	59,95	48,58	150,63	0,322	51,21	50,26	0,95
25,73	3,183	63,64	72,12	46,39	150,09	0,309	63,75	63,11	0,64
32,61	3,900	70,77	72,83	40,22	150,18	0,308	70,77	70,25	0,52
43,28	5,174	81,22	89,02	45,74	150,00	0,305	81,44	80,87	0,57

Nivel de carga medio (70 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
11,31	2,064	49,40	58,88	47,57	149,93	0,317	49,54	48,76	0,78
25,83	3,185	63,67	72,01	46,18	149,38	0,309	63,66	63,06	0,60
32,62	3,845	70,26	78,31	45,69	149,48	0,306	70,31	69,77	0,55
43,45	5,120	80,82	88,47	45,02	149,29	0,302	81,09	80,54	0,54

Nivel de carga alto (90 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
11,34	2,087	49,75	59,98	48,64	150,84	0,322	49,85	49,20	0,65
25,81	3,269	64,26	73,03	47,22	150,15	0,314	64,53	63,98	0,56
32,59	3,947	71,20	79,47	46,88	150,30	0,312	71,22	70,73	0,49
43,37	5,239	81,70	89,28	45,91	150,16	0,306	81,92	81,42	0,50

A IV.4. Tablas del termosifón cilíndrico de acero grande

Se dan a continuación las tablas con todos los resultados para los fluidos y mezclas ensayados en el termosifón de acero grande. Las tablas se han realizado para todos y cada uno de los ensayos y en ellas se encuentran los valores medios obtenidos para todas las variables físicas medidas. Se han ordenado según el fluido de trabajo, o mezcla, el nivel de carga o coeficiente de llenado y la temperatura ambiente.

Tabla A IV.31: Resultados de los ensayos del termosifón de acero grande con Agua, a distintas temperaturas y cargas.

Nivel de carga bajo (40 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
10,4	0,22	63,80	66,7	56,3	384,31	0,146	64,9	62,7	2,2
25,5	0,361	75,30	78,4	52,9	383,03	0,138	76,0	74,6	1,4
32,4	0,481	82,15	88,6	56,2	382,93	0,147	82,7	81,6	1,1
43,5	0,735	93,05	101,2	57,7	383,13	0,151	93,5	92,6	0,9

Nivel de carga medio (60 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
10,4	0,203	62,90	65,9	55,5	383,89	0,144	64,6	61,2	3,4
25,5	0,352	74,85	78,5	53,0	388,68	0,139	75,9	73,8	2,1
32,4	0,465	81,55	85,4	53,0	382,01	0,139	82,3	80,8	1,5
43,4	0,710	92,35	96,4	53,0	382,41	0,138	92,9	91,8	1,1

Nivel de carga alto (75 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
10,4	0,207	63,45	67,9	57,5	383,64	0,150	65,5	61,4	4,1
25,5	0,365	76,75	81,4	55,9	382,64	0,146	78,8	74,7	4,1
32,3	0,477	82,85	87,3	55,0	382,45	0,144	84,4	81,3	3,1
43,4	0,713	93,00	96,9	53,5	382,14	0,140	94,1	91,9	2,2

Tabla A IV.32: Resultados de los ensayos del termosifón de acero grande con Dietil éter, a distintas temperaturas y cargas.

Nivel de carga bajo (40 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
10,4	2,826	67,15	77,9	67,5	401,61	0,168	67,6	66,7	0,9
25,5	4,067	80,90	90,7	65,2	400,77	0,162	81,2	80,6	0,6
32,4	4,774	87,25	96,6	64,2	400,85	0,160	87,6	86,9	0,7
43,4	6,097	97,6	106,3	62,9	400,42	0,157	97,9	97,3	0,6

Nivel de carga medio (60 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
10,4	2,535	63,55	73,4	63	406,23	0,155	64,0	63,1	0,9
25,5	3,655	76,85	86,5	61	401,82	0,152	77,3	76,4	0,9
32,4	4,367	83,80	93,4	61	402,95	0,151	84,2	83,4	0,8
43,4	5,751	95,25	104,4	61	405,14	0,151	95,7	94,8	0,9

Nivel de carga alto (75 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
10,5	2,574	64,10	74,4	63,9	401,72	0,159	64,6	63,6	1
25,5	3,818	78,50	88,4	62,9	401,43	0,157	79,0	78,0	1
32,4	4,500	84,90	94,6	62,2	399,82	0,155	85,4	84,4	1
43,4	5,740	95,05	104,3	60,9	398,49	0,153	95,6	94,5	1,1

Tabla A IV.33: Resultados de los ensayos del termosifón de acero grande con Isopentano, a distintas temperaturas y cargas.

Nivel de carga bajo (40 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
10,5	3,067	64,85	74,8	64,3	402,13	0,160	65,0	64,7	0,3
25,5	4,327	78,45	87,6	62,1	400,77	0,155	78,5	78,4	0,1
32,4	5,084	85,15	93,9	61,5	400,91	0,154	85,2	85,1	0,1
43,4	6,465	96,05	104,2	60,8	400,74	0,152	96,1	96,0	0,1

Nivel de carga medio (60 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
10,5	3,197	66,40	76,2	65,7	402,10	0,163	66,6	66,2	0,4
25,5	4,491	79,90	89,0	63,5	401,44	0,158	80,0	79,8	0,2
32,4	5,253	86,50	95,3	62,9	401,11	0,157	86,6	86,4	0,2
43,4	6,661	97,25	105,4	62,0	401,27	0,154	97,3	97,2	0,1

Nivel de carga alto (75 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
10,5	3,070	64,95	75,2	64,7	402,24	0,161	65,2	64,7	0,5
25,5	4,338	78,55	87,9	62,4	401,38	0,156	78,7	78,4	0,3
32,3	5,103	85,40	94,4	62,1	401,41	0,155	85,5	85,3	0,2
43,4	6,465	96,05	104,6	61,2	400,70	0,153	96,1	96,0	0,1

Tabla A IV.34: Resultados de los ensayos del termosifón de acero grande con N-Hexano, a distintas temperaturas y cargas.

Nivel de carga bajo (40 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
10,4	0,861	64,85	74,9	64,5	403,69	0,160	65,5	64,2	1,3
25,4	1,297	78,20	88,4	63,0	401,09	0,157	78,6	77,8	0,8
32,4	1,590	85,20	95,7	63,3	402,02	0,158	85,6	84,8	0,8
43,4	2,120	95,95	106,3	62,9	401,66	0,157	96,2	95,7	0,5

Nivel de carga medio (60 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
10,5	0,80	62,70	72,7	62,2	401,50	0,155	63,5	61,9	1,6
25,5	1,23	76,40	86,8	61,3	400,44	0,153	77,0	75,8	1,2
32,4	1,493	83,15	93,6	61,2	400,23	0,153	83,6	82,7	0,9
43,4	2,01	94,05	104,5	61,1	399,77	0,153	94,4	93,7	0,7

Nivel de carga alto (75 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
10,6	0,826	63,55	70,1	59,5	388,66	0,153	64,5	62,6	1,9
25,4	1,268	77,30	84,0	58,6	386,53	0,152	78,0	76,6	1,4
32,5	1,534	83,85	90,6	58,1	387,27	0,150	84,5	83,2	1,3
43,6	2,032	94,25	100,8	57,2	386,30	0,148	94,8	93,7	1,1

Tabla A IV.35: Resultados de los ensayos del termosifón de acero grande con Perfluoroheptano, a distintas temperaturas y cargas.

Nivel de carga bajo (40 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
10,4	0,611	67,95	79,7	69,3	402,55	0,172	69,1	66,8	2,3
25,5	0,951	81,15	92,7	67,2	400,26	0,168	82,1	80,2	1,9
32,4	1,183	88,15	99,7	67,3	401,69	0,167	89,1	87,2	1,9
43,5	1,600	98,55	109,5	66,0	400,94	0,165	99,4	97,7	1,7

Nivel de carga medio (60 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
10,3	0,562	65,80	73,5	63,2	374,41	0,169	67,3	64,3	3,0
25,4	0,956	81,55	93,2	67,8	399,08	0,170	82,6	80,5	2,1
32,4	1,197	88,70	97,1	64,7	401,19	0,161	89,7	87,7	2,0
43,4	1,491	96,15	103,5	60,1	373,10	0,161	97,2	95,1	2,1

Nivel de carga alto (75 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
10,6	0,583	67,25	75,3	64,7	386,42	0,167	69,0	65,5	3,5
25,4	0,916	80,5	88,3	62,9	387,08	0,162	81,9	79,1	2,8
32,4	1,124	86,95	94,5	62,1	386,46	0,161	88,2	85,7	2,5
43,6	1,531	97,30	104,4	60,8	385,10	0,158	98,5	96,1	2,4

Tabla A IV.36: Resultados de los ensayos del termosifón de acero grande con R-141b, a distintas temperaturas y cargas.

Nivel de carga bajo (40 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
10,5	2,867	66,10	77,1	66,6	407,93	0,163	66,4	65,8	0,6
25,5	4,072	79,55	89,7	64,2	404,75	0,159	79,8	79,3	0,5
32,4	4,912	87,10	97,1	64,7	408,26	0,159	87,3	86,9	0,4
43,4	6,291	97,85	107,3	63,9	408,15	0,157	98,0	97,7	0,3

Nivel de carga medio (60 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
10,5	2,648	63,40	74,5	64,0	398,09	0,161	63,8	63,0	0,8
25,6	3,933	78,20	89,0	63,4	402,24	0,157	78,5	77,9	0,6
32,4	4,641	84,85	95,2	62,8	400,99	0,157	85,1	84,6	0,5
43,4	5,956	95,55	105,2	61,8	400,21	0,154	95,7	95,4	0,3

Nivel de carga alto (75 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
10,6	2,626	63,20	70,4	59,8	386,53	0,155	63,8	62,6	1,2
25,5	3,813	77,15	84,1	58,6	385,13	0,152	77,6	76,7	0,9
32,5	4,490	83,65	90,4	57,9	384,53	0,151	84,0	83,3	0,7
43,6	5,723	93,95	100,3	56,7	382,70	0,148	94,3	93,6	0,7

Tabla A IV.37: Resultados de los ensayos del termosifón de acero grande con R-365mfc, a distintas temperaturas y cargas.

Nivel de carga bajo (40 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
10,4	2,353	66,35	77,0	66,6	402,50	0,165	66,6	66,1	0,5
25,4	3,425	79,70	89,4	64,0	400,33	0,160	79,9	79,5	0,4
32,4	4,085	86,25	95,7	63,3	400,79	0,158	86,4	86,1	0,3
43,4	5,308	96,80	105,9	62,5	400,72	0,156	96,9	96,7	0,2

Nivel de carga medio (60 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
10,5	2,212	64,45	75,3	64,8	401,82	0,161	64,8	64,1	0,7
25,5	3,299	78,40	88,4	62,9	400,21	0,157	78,7	78,1	0,6
32,4	3,941	85,05	94,7	62,3	399,89	0,156	85,3	84,8	0,5
43,4	5,146	95,75	104,6	61,2	399,85	0,153	95,9	95,6	0,3

Nivel de carga alto (75 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
10,6	2,192	64,3	71,0	60,4	385,69	0,157	64,8	63,8	1
25,5	3,271	78,25	84,6	59,1	384,34	0,154	78,6	77,9	0,7
32,5	3,905	84,8	91,0	58,5	384,52	0,152	85,2	84,4	0,8
43,6	5,129	95,7	101,4	57,8	384,32	0,150	96,0	95,4	0,6

Tabla A IV.38: Resultados de los ensayos del termosifón de acero grande con la mezcla azeotrópica Ciclopentano + Metanol, a distintas temperaturas y cargas.

Nivel de carga bajo (40 %)

No se obtuvieron buenos datos.

Nivel de carga medio (60 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
10,4	2,230	62,60	68,6	58,2	385,37	0,151	63,0	62,2	0,8
25,5	3,479	76,80	83,6	58,1	384,60	0,151	77,2	76,4	0,8
32,4	4,241	83,55	90,2	57,8	384,41	0,151	83,9	83,2	0,7
43,5	5,705	94,40	100,9	57,4	384,25	0,150	94,6	94,2	0,4

Nivel de carga alto (75 %)

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pe} (°C)	$t_{pe}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_e (°C)	t_c (°C)	Isotermicidad (°C)
10,4	2,233	62,65	69,0	58,6	384,64	0,152	63,1	62,2	0,9
25,6	3,484	76,85	83,6	58,0	384,03	0,151	77,2	76,5	0,7
32,4	4,244	83,60	90,3	57,9	383,93	0,151	83,9	83,3	0,6
43,4	5,694	94,30	100,9	57,5	383,19	0,150	94,5	94,1	0,4

A IV.5. Tablas del termosifón prismático

Para elaborar las tablas de los termosifones prismáticos se ha procedido de manera similar a la de los termosifones cilíndricos, aunque en las tablas construidas para los termosifones prismáticos (SCP y CCP) no aparecen las tres últimas variables recogidas en las tablas de los termosifones cilíndricos (t_e , t_c e isotermicidad). Esto es debido a que las sondas no están colocadas de manera que pueda conocerse la temperatura del fluido durante los cambios de fase de evaporación y condensación y, por tanto, tampoco puede calcularse la isotermicidad durante la transferencia de calor. En su lugar, se han colocado sondas que ofrecen el dato de la temperatura de las paredes del termosifón en sus zonas inferior y superior (t_i y t_s respectivamente). Otra diferencia en las tablas del termosifón prismático respecto a los cilíndricos es que, para calcular el salto térmico, no se toma la temperatura de la pared del evaporador (no aparece t_{pe}), sino la de la cara caliente de la pastilla Peltier (t_{pc}).

Las variables obtenidas por medida directa y que aparecen en las tablas son:

- Temperatura ambiente: t_a
- Presión de vapor: p_v
- Temperatura de fluido: t_v
- Temperatura de la cara caliente del Peltier: t_{pc}
- Temperatura inferior: t_i
- Temperatura superior: t_s

Las variables que se han calculado a partir de las anteriores son:

- Salto térmico: $t_{pc} - t_a$
- Potencia: P
- Resistencia térmica: R_{term}

A IV.5.1. Tablas del termosifón prismático sin control de potencia (SCP)

Se dan a continuación las tablas con todos los resultados para los fluidos y mezclas ensayados en el termosifón prismático de aluminio, sin control de potencia. Las tablas se han realizado para todos y cada uno de los ensayos y en ellas se encuentran los valores medios obtenidos para todas las variables físicas medidas. Se han ordenado según el fluido de trabajo, o mezcla, el nivel de carga o coeficiente de llenado y la temperatura ambiente.

Tabla A IV.39: Resultados de los ensayos del termosifón de aluminio (SCP) con Agua, a distintas temperaturas y cargas.

Nivel de carga bajo

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pc} (°C)	$t_{pc}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_i (°C)	t_s (°C)
10,97	0,08	41,51	45,90	34,94	49,18	0,71	23,80	15,19
25,76	0,05	32,52	49,58	23,82	48,64	0,49	35,68	32,00
32,68	0,08	41,27	55,28	22,60	47,92	0,47	43,08	38,98
43,52	0,14	53,14	65,24	21,72	46,14	0,47	53,33	49,70

Nivel de carga medio

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pc} (°C)	$t_{pc}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_i (°C)	t_s (°C)
11,39	0,03	24,08	41,20	29,81	49,57	0,60	23,28	15,84
26,51	0,05	33,23	48,76	22,26	47,58	0,47	36,65	31,63
33,45	0,08	42,21	55,50	22,06	46,61	0,47	43,70	38,28
44,18	0,15	53,98	65,57	21,39	44,73	0,48	54,29	48,76

Nivel de carga alto

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pc} (°C)	$t_{pc}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_i (°C)	t_s (°C)
11,33	0,03	22,33	40,59	29,27	49,95	0,59	22,18	16,10
26,42	0,05	35,85	50,03	23,61	47,57	0,50	36,66	32,09
33,42	0,08	41,51	55,70	22,29	46,68	0,48	43,27	38,86
44,13	0,15	53,56	65,55	21,42	44,92	0,48	53,78	49,34

Tabla A IV.40: Resultados de los ensayos del termosifón de aluminio (SCP) con Dietil éter, a distintas temperaturas y cargas.

Nivel de carga bajo

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pc} (°C)	$t_{pc}-t_a$ (°C)	P (W)	$R_{term}(°C/W)$	t_i (°C)	t_s (°C)
11,40	0,71	24,77	36,20	24,80	53,92	0,46	24,60	16,70
26,40	1,09	36,56	47,40	21,00	50,40	0,42	37,10	30,90
33,10	1,32	42,06	52,40	19,30	49,39	0,39	42,70	38,50
43,90	1,85	52,54	62,30	18,40	46,96	0,39	52,90	49,30

Nivel de carga medio

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pc} (°C)	$t_{pc}-t_a$ (°C)	P (W)	$R_{term}(°C/W)$	t_i (°C)	t_s (°C)
10,90	0,59	19,81	38,00	27,10	50,81	0,53	21,20	15,60
25,50	1,08	36,32	49,50	24,00	51,46	0,47	37,40	31,90
32,60	1,27	40,93	53,50	20,90	50,20	0,42	42,30	38,00
43,50	1,78	51,39	63,40	19,90	47,73	0,42	52,40	48,70

Nivel de carga alto

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pc} (°C)	$t_{pc}-t_a$ (°C)	P (W)	$R_{term}(°C/W)$	t_i (°C)	t_s (°C)
11,30	0,70	24,51	37,60	26,30	52,97	0,50	24,70	16,40
26,40	1,17	38,50	51,50	25,10	49,50	0,51	38,40	29,70
33,00	1,36	42,93	56,00	23,00	48,12	0,48	43,40	37,20
43,80	1,81	51,87	65,30	21,50	44,72	0,48	52,50	48,80

Tabla A IV.41: Resultados de los ensayos del termosifón de aluminio (SCP) con Isopentano, a distintas temperaturas y cargas.

Nivel de carga bajo

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pc} (°C)	$t_{pc}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_i (°C)	t_s (°C)
10,68	0,94	25,57	37,00	26,32	53,55	0,49	22,69	18,29
26,02	1,42	37,93	52,22	26,20	49,54	0,53	38,51	34,38
32,67	1,74	44,57	58,37	25,70	48,42	0,53	44,98	40,92
43,56	2,36	54,87	68,42	24,86	46,48	0,54	55,26	51,34

Nivel de carga medio

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pc} (°C)	$t_{pc}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_i (°C)	t_s (°C)
11,30	1,03	28,24	42,39	31,10	51,95	0,60	26,69	17,26
25,81	1,59	41,47	58,64	32,83	48,68	0,67	41,24	31,89
32,72	1,87	46,89	64,61	31,89	47,52	0,67	47,80	39,01
43,54	2,50	56,82	70,23	26,69	46,22	0,58	57,11	50,03

Nivel de carga alto

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pc} (°C)	$t_{pc}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_i (°C)	t_s (°C)
11,51	0,80	21,21	39,56	28,05	51,83	0,54	21,02	17,28
26,26	1,28	34,77	51,70	25,45	49,11	0,52	35,63	32,06
33,03	1,59	41,54	58,04	25,02	47,92	0,52	42,41	38,92
43,90	2,18	52,10	68,38	24,48	45,86	0,53	52,96	49,63

Tabla A IV.42: Resultados de los ensayos del termosifón de aluminio (SCP) con N-Pentano, a distintas temperaturas y cargas.

Nivel de carga bajo

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pc} (°C)	$t_{pc}-t_a$ (°C)	P (W)	$R_{term}(°C/W)$	t_i (°C)	t_s (°C)
10,90	0,66	23,95	34,90	24,00	54,25	0,42	22,50	15,50
26,30	1,03	36,61	46,50	20,20	50,89	0,40	36,10	30,50
33,00	1,24	42,07	51,30	18,30	49,84	0,37	41,60	37,90
43,80	1,71	52,28	60,50	16,70	47,76	0,35	51,50	48,90

Nivel de carga medio

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pc} (°C)	$t_{pc}-t_a$ (°C)	P (W)	$R_{term}(°C/W)$	t_i (°C)	t_s (°C)
10,80	0,61	21,89	38,20	27,40	52,44	0,52	23,10	17,07
25,70	1,04	36,92	50,90	25,20	51,23	0,49	38,00	32,50
32,60	1,30	43,58	56,50	23,90	49,86	0,48	44,50	39,60
43,40	1,79	53,88	65,60	22,20	47,63	0,47	54,60	50,20

Nivel de carga alto

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pc} (°C)	$t_{pc}-t_a$ (°C)	P (W)	$R_{term}(°C/W)$	t_i (°C)	t_s (°C)
11,10	0,68	24,79	36,40	25,30	56,86	0,47	23,60	15,90
26,40	1,12	39,09	51,50	25,10	53,86	0,50	39,23	29,80
33,10	1,31	43,88	54,60	21,50	48,90	0,44	44,30	37,10
43,90	1,73	52,64	61,70	17,80	47,28	0,38	52,40	48,90

Tabla A IV.43: Resultados de los ensayos del termosifón de aluminio (SCP) con Perfluoroheptano, a distintas temperaturas y cargas.

Nivel de carga bajo

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{Pc} (°C)	$t_{Pc}-t_a$ (°C)	P (W)	$R_{term}(°C/W)$	t_i (°C)	t_s (°C)
11,04	0,21	40,08	41,21	30,17	49,16	0,61	23,79	15,27
25,52	0,21	40,08	55,14	29,62	46,52	0,64	38,25	30,10
32,51	0,27	46,30	60,85	28,34	45,44	0,62	44,99	37,08
43,33	0,39	55,75	69,90	26,57	43,59	0,61	55,42	47,66

Nivel de carga medio

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{Pc} (°C)	$t_{Pc}-t_a$ (°C)	P (W)	$R_{term}(°C/W)$	t_i (°C)	t_s (°C)
11,01	0,11	26,58	48,29	37,28	50,86	0,73	24,90	15,31
25,61	0,21	40,19	60,87	35,27	48,44	0,73	39,59	30,30
32,52	0,27	46,56	66,99	34,48	47,44	0,73	46,28	37,20
43,44	0,42	57,16	76,18	32,74	45,65	0,72	56,74	47,96

Nivel de carga alto

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{Pc} (°C)	$t_{Pc}-t_a$ (°C)	P (W)	$R_{term}(°C/W)$	t_i (°C)	t_s (°C)
11,01	0,11	26,94	46,68	35,67	48,71	0,73	23,87	14,99
25,87	0,21	39,97	59,62	33,75	46,00	0,73	38,77	30,21
32,67	0,27	46,30	65,47	32,80	45,13	0,73	45,33	37,04
43,54	0,40	56,33	74,74	31,20	43,33	0,72	55,72	47,83

Tabla A IV.44: Resultados de los ensayos del termosifón de aluminio (SCP) con R-141b, a distintas temperaturas y cargas.

Nivel de carga bajo

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pc} (°C)	$t_{pc}-t_a$ (°C)	P (W)	$R_{term}(°C/W)$	t_i (°C)	t_s (°C)
11,00	0,83	26,22	38,80	27,80	49,55	0,56	26,90	20,50
26,20	1,41	41,28	52,50	26,30	50,23	0,52	41,70	36,30
34,30	1,80	48,91	59,20	24,90	50,31	0,50	49,40	44,50
49,60	2,40	58,33	68,70	19,10	50,14	0,50	59,20	54,40

Nivel de carga medio

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pc} (°C)	$t_{pc}-t_a$ (°C)	P (W)	$R_{term}(°C/W)$	t_i (°C)	t_s (°C)
11,20	0,77	24,29	38,10	26,90	52,52	0,51	23,20	17,00
26,40	1,17	35,81	48,50	22,10	49,58	0,45	35,90	32,60
33,20	1,44	41,98	53,70	20,50	48,20	0,43	41,90	39,60
43,70	1,99	52,13	62,70	19,00	46,09	0,41	51,90	50,10

Nivel de carga alto

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pc} (°C)	$t_{pc}-t_a$ (°C)	P (W)	$R_{term}(°C/W)$	t_i (°C)	t_s (°C)
11,30	0,75	23,74	39,50	28,20	51,32	0,55	22,60	11,30
26,30	1,27	38,10	51,90	25,60	49,30	0,52	38,00	26,30
33,10	1,46	42,46	54,70	21,60	48,45	0,45	42,70	33,10
43,80	1,98	51,83	63,30	19,50	46,57	0,42	52,10	43,80

Tabla A IV.45: Resultados de los ensayos del termosifón de aluminio (SCP) con R-365mfc, a distintas temperaturas y cargas.

Nivel de carga bajo

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pc} (°C)	$t_{pc}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_i (°C)	t_s (°C)
11,17	0,48	23,00	34,92	23,75	53,10	0,45	21,29	18,21
25,90	0,83	35,99	48,05	22,15	49,90	0,44	35,23	32,40
32,77	1,06	42,45	54,45	21,68	48,59	0,45	42,09	39,30
43,68	1,53	52,74	64,06	20,39	46,62	0,44	52,69	49,99

Nivel de carga medio

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pc} (°C)	$t_{pc}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_i (°C)	t_s (°C)
10,85	0,45	21,49	33,82	22,97	51,71	0,44	19,92	17,28
25,56	0,80	35,28	48,11	22,54	48,41	0,46	34,97	31,99
32,45	1,03	41,84	54,48	22,03	47,20	0,47	41,82	38,98
43,37	1,50	52,15	64,43	21,06	45,35	0,46	52,37	49,69

Nivel de carga alto

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pc} (°C)	$t_{pc}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_i (°C)	t_s (°C)
10,94	0,47	22,62	37,15	26,21	51,29	0,51	21,13	15,35
25,64	0,85	36,63	50,66	25,02	48,26	0,52	35,51	30,11
32,49	1,08	42,98	55,92	23,42	47,51	0,49	42,18	37,23
43,33	1,55	53,03	65,05	21,72	45,87	0,47	52,55	48,28

Tabla A IV.46: Resultados de los ensayos del termosifón de aluminio (SCP) con la mezcla azeotrópica Acetona + N-Pentano, a distintas temperaturas y cargas.

Nivel de carga bajo

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pc} (°C)	$t_{pc}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_i (°C)	t_s (°C)
10,90	0,73	24,67	33,10	22,20	54,45	0,41	21,90	15,80
26,40	1,15	35,67	45,10	18,70	51,07	0,37	35,60	31,00
33,20	1,42	41,49	50,60	17,40	49,60	0,35	41,50	38,10
43,90	1,96	51,66	60,20	16,30	47,26	0,35	51,60	48,90

Nivel de carga medio

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pc} (°C)	$t_{pc}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_i (°C)	t_s (°C)
11,30	0,72	24,64	34,30	23,00	54,64	0,42	22,90	16,60
26,70	1,24	37,64	48,20	21,50	50,71	0,42	38,00	31,00
33,50	1,44	42,03	52,30	18,80	49,70	0,38	43,00	39,00
44,20	1,98	51,93	61,50	17,30	47,38	0,37	52,80	49,80

Nivel de carga alto

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pc} (°C)	$t_{pc}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_i (°C)	t_s (°C)
10,90	0,70	23,79	39,00	28,10	51,17	0,55	22,50	16,30
25,90	1,19	36,61	50,00	24,10	51,09	0,47	37,30	31,30
32,90	1,48	42,86	55,90	23,00	49,65	0,46	43,80	38,30
43,60	2,05	53,11	65,20	21,60	47,69	0,45	53,80	48,80

Tabla A IV.47: Resultados de los ensayos del termosifón de aluminio (SCP) con la mezcla azeotrópica Ciclopentano + Metanol, a distintas temperaturas y cargas.

Nivel de carga bajo

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{Pc} (°C)	$t_{Pc}-t_a$ (°C)	P (W)	$R_{term}(°C/W)$	t_i (°C)	t_s (°C)
26,60	0,91	34,84	47,00	20,40	50,33	0,41	36,80	29,90
33,30	1,16	43,29	53,60	20,30	48,67	0,42	43,20	36,80
44,00	1,59	52,90	62,00	18,00	46,74	0,39	52,20	48,70

Nivel de carga medio

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{Pc} (°C)	$t_{Pc}-t_a$ (°C)	P (W)	$R_{term}(°C/W)$	t_i (°C)	t_s (°C)
26,50	0,97	37,32	48,40	21,90	50,36	0,43	38,20	29,50
33,30	1,21	44,67	54,40	21,10	48,74	0,43	44,20	36,50
44,10	1,62	53,46	62,50	18,40	47,07	0,39	52,80	48,20

Nivel de carga alto

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{Pc} (°C)	$t_{Pc}-t_a$ (°C)	P (W)	$R_{term}(°C/W)$	t_i (°C)	t_s (°C)
26,30	0,91	34,80	46,60	20,30	50,69	0,40	36,90	31,00
33,20	1,16	43,37	53,70	20,50	48,74	0,42	43,60	38,00
43,90	1,61	53,29	62,60	18,70	46,66	0,40	52,80	49,40

Tabla A IV.48: Resultados de los ensayos del termosifón de aluminio (SCP) con la mezcla azeotrópica Dietil éter + Metanoato de metilo, a distintas temperaturas y cargas.

Nivel de carga bajo

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pc} (°C)	$t_{pc}-t_a$ (°C)	P (W)	$R_{term}(°C/W)$	t_i (°C)	t_s (°C)
11,20	0,81	22,36	33,10	21,90	54,79	0,40	22,00	17,20
26,70	1,34	36,35	46,00	19,30	51,17	0,38	36,30	32,50
33,50	1,67	42,89	51,90	18,40	49,52	0,37	42,50	39,60
44,10	2,32	53,13	61,50	17,40	46,78	0,37	52,20	50,30

Nivel de carga medio

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pc} (°C)	$t_{pc}-t_a$ (°C)	P (W)	$R_{term}(°C/W)$	t_i (°C)	t_s (°C)
11,30	0,80	22,03	33,50	22,20	54,84	0,41	21,70	16,50
26,60	1,36	36,35	47,20	20,60	50,69	0,41	36,70	31,20
33,60	1,65	42,43	52,20	18,60	49,09	0,38	42,80	38,90
44,30	2,31	52,98	61,70	17,40	46,72	0,37	52,40	49,40

Nivel de carga alto

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pc} (°C)	$t_{pc}-t_a$ (°C)	P (W)	$R_{term}(°C/W)$	t_i (°C)	t_s (°C)
11,20	0,80	22,00	34,20	23,00	54,06	0,43	22,70	16,50
26,70	1,35	36,54	50,30	23,60	50,10	0,47	38,30	31,20
33,60	1,64	42,32	53,50	19,90	48,79	0,41	43,50	39,00
44,30	2,30	52,90	62,90	18,60	45,99	0,40	53,40	49,50

A IV.5.2. Tablas del termosifón prismático con control de potencia (CCP)

Se dan a continuación las tablas con todos los resultados para los fluidos y mezclas ensayados en el termosifón prismático de aluminio, con control de potencia. Las tablas se han realizado para todos y cada uno de los ensayos y en ellas se encuentran los valores medios obtenidos para todas las variables físicas medidas. Se han ordenado según el fluido de trabajo, o mezcla, el nivel de carga o coeficiente de llenado y la temperatura ambiente.

Tabla A IV.49: Resultados de los ensayos del termosifón de aluminio (CCP) con Agua, a distintas temperaturas y cargas.

Nivel de carga bajo

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pc} (°C)	$t_{pc}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_i (°C)	t_s (°C)
11,08	0,02	14,01	43,30	32,22	49,52	0,65	25,26	18,45
25,67	0,05	34,25	57,01	31,34	49,90	0,63	38,44	35,36
32,52	0,09	42,67	63,15	30,62	49,89	0,62	45,48	42,00
43,58	0,15	54,12	70,42	26,84	49,78	0,54	55,61	54,13

Nivel de carga medio

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pc} (°C)	$t_{pc}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_i (°C)	t_s (°C)
11,07	0,02	14,01	43,16	32,09	49,65	0,65	25,95	18,31
25,67	0,05	34,25	55,10	29,43	49,94	0,59	39,35	35,05
32,60	0,09	43,55	60,75	28,15	49,85	0,56	46,44	41,25
43,61	0,15	54,12	69,26	25,65	49,88	0,51	55,81	54,19

Nivel de carga alto

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pc} (°C)	$t_{pc}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_i (°C)	t_s (°C)
11,09	0,02	17,49	44,25	33,17	50,31	0,66	27,00	17,75
25,63	0,06	34,58	54,70	29,07	50,23	0,58	39,89	34,62
32,62	0,09	43,98	60,81	28,19	50,39	0,56	46,93	41,11
43,53	0,16	55,71	70,58	27,05	50,44	0,54	57,23	52,34

Tabla A IV.50: Resultados de los ensayos del termosifón de aluminio (CCP) con Dietil éter, a distintas temperaturas y cargas.

Nivel de carga bajo

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pc} (°C)	$t_{pc}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_i (°C)	t_s (°C)
11,53	0,59	20,06	33,91	22,39	49,78	0,45	21,51	20,03
26,40	1,03	34,81	47,57	21,17	49,98	0,42	36,00	34,27
33,28	1,31	41,85	53,97	20,69	50,08	0,41	42,88	41,10
43,98	1,86	52,75	63,68	19,70	50,19	0,39	53,60	51,91

Nivel de carga medio

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pc} (°C)	$t_{pc}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_i (°C)	t_s (°C)
11,58	0,58	19,50	34,57	22,99	49,92	0,46	21,36	19,61
26,55	1,04	35,11	48,33	21,78	50,15	0,43	36,74	34,63
33,44	1,32	42,19	54,38	20,94	50,29	0,42	43,68	41,58
44,25	1,89	53,30	64,28	20,03	50,34	0,40	54,50	52,64

Nivel de carga alto

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pc} (°C)	$t_{pc}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_i (°C)	t_s (°C)
11,41	0,59	20,06	35,01	23,60	49,74	0,47	21,60	19,67
26,35	1,04	35,14	48,70	22,35	50,15	0,45	36,69	34,42
33,29	1,32	42,19	54,53	21,24	50,24	0,42	43,47	41,56
43,92	1,87	52,96	63,93	20,01	50,19	0,40	53,99	52,32

Tabla A IV.51: Resultados de los ensayos del termosifón de aluminio (CCP) con Isopentano, a distintas temperaturas y cargas.

Nivel de carga bajo

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{Pc} (°C)	$t_{Pc}-t_a$ (°C)	P (W)	$R_{term}(°C/W)$	t_i (°C)	t_s (°C)
10,97	0,83	22,16	34,01	23,04	49,50	0,46	21,01	19,10
25,73	1,35	36,34	54,57	28,84	49,97	0,58	38,16	34,39
32,60	1,75	44,72	61,63	29,03	50,04	0,58	45,24	41,43
43,53	2,32	54,24	67,68	24,14	50,07	0,48	54,61	52,44

Nivel de carga medio

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{Pc} (°C)	$t_{Pc}-t_a$ (°C)	P (W)	$R_{term}(°C/W)$	t_i (°C)	t_s (°C)
11,28	0,89	24,30	37,20	25,93	49,19	0,53	23,66	17,69
26,00	1,47	39,10	52,68	26,68	50,18	0,53	39,05	33,16
32,82	1,80	45,66	59,21	26,40	50,17	0,53	46,04	40,42
43,66	2,46	56,27	69,41	25,75	50,22	0,51	56,49	51,61

Nivel de carga alto

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{Pc} (°C)	$t_{Pc}-t_a$ (°C)	P (W)	$R_{term}(°C/W)$	t_i (°C)	t_s (°C)
11,33	0,76	19,77	33,23	21,90	49,78	0,44	19,06	17,76
26,26	1,32	35,73	52,53	26,27	49,83	0,53	35,42	32,63
33,22	1,58	41,31	59,87	26,65	50,14	0,53	42,69	39,97
43,78	2,19	52,28	65,18	21,39	50,33	0,43	52,43	50,83

Tabla A IV.52: Resultados de los ensayos del termosifón de aluminio (CCP) con N-Pentano, a distintas temperaturas y cargas.

Nivel de carga bajo

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pc} (°C)	$t_{pc}-t_a$ (°C)	P (W)	$R_{term}(°C/W)$	t_i (°C)	t_s (°C)
11,45	0,60	21,50	35,19	23,74	49,15	0,48	23,90	20,29
26,49	1,01	36,09	49,92	23,43	49,79	0,47	38,77	35,03
33,31	1,27	42,95	55,83	22,52	49,67	0,45	45,20	41,94
43,93	1,79	53,83	65,63	21,69	49,75	0,44	55,76	52,93

Nivel de carga medio

t_a (°C)	P_v (bar)	t_v (°C)	t_{pc} (°C)	$t_{pc}-t_a$ (°C)	Potencia (W)	$R_{term}(°C/W)$	t_i (°C)	t_s (°C)
11,46	0,60	21,72	35,48	24,01	49,09	0,49	24,09	20,12
26,44	1,01	35,86	49,36	22,92	49,77	0,46	38,31	34,64
33,32	1,27	42,81	55,29	21,97	49,81	0,44	44,92	41,64
44,02	1,78	53,72	65,08	21,07	49,74	0,42	55,54	52,63

Nivel de carga alto

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pc} (°C)	$t_{pc}-t_a$ (°C)	P (W)	$R_{term}(°C/W)$	t_i (°C)	t_s (°C)
11,40	0,60	21,37	35,69	24,29	50,27	0,48	24,16	20,98
26,37	0,99	35,42	48,29	21,92	49,78	0,44	37,66	34,86
33,25	1,25	42,44	54,53	21,28	50,34	0,42	44,49	41,83
44,13	1,77	53,53	64,59	20,46	50,63	0,40	55,28	52,86

Tabla A IV.53: Resultados de los ensayos del termosifón de aluminio (CCP) con Perfluoroheptano, a distintas temperaturas y cargas.

Nivel de carga bajo

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pc} (°C)	$t_{pc}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_i (°C)	t_s (°C)
11,05	0,17	36,04	40,59	29,54	48,16	0,61	23,34	15,08
25,66	0,19	38,83	54,62	28,96	48,41	0,60	38,61	
32,49	0,27	46,03	60,95	28,46	48,57	0,58	45,50	37,27
43,34	0,42	57,53	71,24	27,90	48,52	0,57	56,33	48,12

Nivel de carga medio

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pc} (°C)	$t_{pc}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_i (°C)	t_s (°C)
11,22	0,09	21,89	41,22	30,00	48,03	0,62	23,01	14,86
25,94	0,19	38,25	56,25	30,31	48,13	0,63	38,55	30,38
32,66	0,26	45,39	62,74	30,09	48,36	0,62	45,41	37,20
43,60	0,41	56,53	71,73	28,13	48,41	0,58	56,16	48,17

Nivel de carga alto

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pc} (°C)	$t_{pc}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_i (°C)	t_s (°C)
11,00	0,21	40,08	45,97	34,97	47,81	0,73	23,40	14,82
25,92	0,21	40,62	60,49	34,57	48,08	0,72	39,00	30,45
32,71	0,28	47,00	67,12	34,41	48,21	0,71	46,07	37,42
43,50	0,42	57,28	77,53	34,04	48,11	0,71	56,80	48,19

Tabla A IV.54: Resultados de los ensayos del termosifón de aluminio (CCP) con R-141b, a distintas temperaturas y cargas.

Nivel de carga bajo

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pc} (°C)	$t_{pc}-t_a$ (°C)	P (W)	$R_{term}(°C/W)$	t_i (°C)	t_s (°C)
11,47	0,64	19,39	35,34	23,87	49,58	0,48	22,68	19,46
26,37	1,12	34,50	49,56	23,20	49,95	0,46	37,77	34,51
33,25	1,42	41,45	55,40	22,15	50,12	0,44	44,47	41,60
43,90	1,99	52,16	65,22	21,32	50,09	0,43	55,04	52,45

Nivel de carga medio

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pc} (°C)	$t_{pc}-t_a$ (°C)	P (W)	$R_{term}(°C/W)$	t_i (°C)	t_s (°C)
11,48	0,65	19,98	34,81	23,32	49,49	0,47	22,23	19,70
26,33	1,13	34,81	49,57	23,25	49,81	0,47	37,26	34,88
33,29	1,43	41,75	55,56	22,27	49,80	0,45	44,08	41,87
43,95	2,01	52,37	64,85	20,90	49,95	0,42	54,80	52,71

Nivel de carga alto

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pc} (°C)	$t_{pc}-t_a$ (°C)	P (W)	$R_{term}(°C/W)$	t_i (°C)	t_s (°C)
11,66	0,65	20,06	36,64	24,99	49,70	0,50	22,80	19,53
26,31	1,14	34,96	50,40	24,09	50,09	0,48	37,72	34,13
33,41	1,43	41,81	56,34	22,93	49,96	0,46	44,48	41,59
43,99	2,01	52,42	65,47	21,48	50,12	0,43	54,90	52,62

Tabla A IV.55: Resultados de los ensayos del termosifón de aluminio (CCP) con R-365mfc, a distintas temperaturas y cargas.

Nivel de carga bajo

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{Pc} (°C)	$t_{Pc}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_i (°C)	t_s (°C)
11,20	0,48	22,81	32,95	21,75	49,62	0,44	20,34	17,32
25,87	0,83	36,05	47,88	22,00	50,09	0,44	35,29	32,51
32,76	1,07	42,76	54,76	21,99	50,20	0,44	42,32	39,54
43,69	1,56	53,36	64,93	21,23	50,25	0,42	53,27	50,43

Nivel de carga medio

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{Pc} (°C)	$t_{Pc}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_i (°C)	t_s (°C)
10,82	0,45	21,24	33,68	22,86	49,63	0,46	20,02	16,82
25,66	0,83	36,08	49,57	23,91	50,02	0,48	35,60	31,90
32,62	1,07	42,81	56,32	23,71	50,05	0,47	42,67	39,32
43,39	1,56	53,27	66,78	23,40	50,17	0,47	53,59	50,40

Nivel de carga alto

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{Pc} (°C)	$t_{Pc}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_i (°C)	t_s (°C)
10,82	0,46	21,99	37,96	27,15	49,78	0,54	20,73	14,97
25,65	0,84	36,48	52,20	26,55	49,73	0,53	35,86	30,44
32,55	1,08	42,98	58,20	25,64	49,88	0,51	42,75	37,60
43,11	1,55	53,18	67,61	24,50	50,03	0,49	53,25	48,59

Tabla A IV.56: Resultados de los ensayos del termosifón de aluminio (CCP) con la mezcla azeotrópica Acetona + N-Pentano, a distintas temperaturas y cargas.

Nivel de carga bajo

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pc} (°C)	$t_{pc}-t_a$ (°C)	P (W)	$R_{term}(°C/W)$	t_i (°C)	t_s (°C)
11,13	0,64	22,05	32,62	21,50	49,69	0,43	20,90	19,05
25,95	1,09	34,16	48,15	22,20	49,83	0,45	35,63	32,90
32,48	1,37	40,45	54,76	22,28	49,91	0,45	42,64	39,84
43,08	1,93	51,10	65,59	22,50	50,13	0,45	53,28	50,57

Nivel de carga medio

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pc} (°C)	$t_{pc}-t_a$ (°C)	P (W)	$R_{term}(°C/W)$	t_i (°C)	t_s (°C)
11,12	0,63	21,86	32,73	21,61	49,88	0,43	20,78	18,81
26,03	1,08	34,11	47,94	21,91	50,11	0,44	35,45	33,01
32,59	1,37	40,45	54,80	22,21	50,21	0,44	42,66	39,99
43,00	1,92	50,94	65,67	22,67	50,39	0,45	53,19	50,50

Nivel de carga alto

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pc} (°C)	$t_{pc}-t_a$ (°C)	P (W)	$R_{term}(°C/W)$	t_i (°C)	t_s (°C)
11,13	0,64	22,02	33,50	22,37	49,74	0,45	21,35	19,04
25,98	1,09	34,21	48,20	22,21	49,89	0,44	35,87	33,02
32,90	1,38	40,72	55,31	22,41	49,91	0,45	43,19	40,29
43,11	1,93	51,15	65,99	22,88	50,12	0,46	53,67	50,72

Tabla A IV.57: Resultados de los ensayos del termosifón de aluminio (CCP) con la mezcla azeotrópica Ciclopentano + Metanol, a distintas temperaturas y cargas.

Nivel de carga bajo

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{Pc} (°C)	$t_{Pc}-t_a$ (°C)	P (W)	$R_{term}(°C/W)$	t_i (°C)	t_s (°C)
25,81	0,83	31,52	50,46	24,66	48,61	0,51	35,04	32,78
32,72	1,08	40,82	56,17	23,45	48,47	0,48	41,71	39,51
43,14	1,59	52,94	66,39	23,25	48,62	0,48	52,32	50,15

Nivel de carga medio

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{Pc} (°C)	$t_{Pc}-t_a$ (°C)	P (W)	$R_{term}(°C/W)$	t_i (°C)	t_s (°C)
25,87	0,82	30,85	50,90	25,02	48,31	0,52	35,19	32,48
32,58	1,07	40,57	57,70	25,11	48,25	0,52	42,05	39,27
43,37	1,60	53,05	67,44	24,08	48,24	0,50	52,71	50,18

Nivel de carga alto

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{Pc} (°C)	$t_{Pc}-t_a$ (°C)	P (W)	$R_{term}(°C/W)$	t_i (°C)	t_s (°C)
25,65	0,83	31,21	53,71	28,07	48,11	0,58	35,46	32,74
32,46	1,09	41,13	58,36	25,90	48,15	0,54	42,12	39,74
43,29	1,62	53,48	69,44	26,15	48,23	0,54	53,12	50,65

Tabla A IV.58: Resultados de los ensayos del termosifón de aluminio (CCP) con la mezcla azeotrópica Dietil éter + Metanoato de metilo, a distintas temperaturas y cargas.

Nivel de carga bajo

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pc} (°C)	$t_{pc}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_i (°C)	t_s (°C)
11,54	0,76	20,65	32,55	21,00	49,79	0,42	21,15	18,70
25,93	1,26	34,62	46,14	20,21	50,14	0,40	35,32	33,67
32,64	1,62	41,90	53,91	21,27	50,43	0,42	42,53	40,73
43,21	2,32	53,15	65,33	22,12	50,40	0,44	52,84	51,43

Nivel de carga medio

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pc} (°C)	$t_{pc}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_i (°C)	t_s (°C)
11,69	0,83	23,29	34,40	22,71	49,96	0,45	21,81	18,60
26,09	1,26	34,60	48,43	22,35	49,99	0,45	35,93	33,67
32,72	1,61	41,73	55,70	22,98	50,30	0,46	43,13	40,56
43,29	2,31	52,95	67,10	23,81	50,54	0,47	53,74	51,40

Nivel de carga alto

t_a (°C)	p_v (bar)	t_v (°C)	t_{pc} (°C)	$t_{pc}-t_a$ (°C)	P (W)	R_{term} (°C/W)	t_i (°C)	t_s (°C)
11,28	0,77	21,20	35,55	24,27	49,60	0,49	21,66	19,17
25,81	1,30	35,43	49,53	23,72	49,81	0,48	35,71	34,29
32,53	1,66	42,63	56,74	24,21	49,62	0,49	42,36	41,41
43,13	2,38	53,98	69,32	26,19	49,89	0,53	53,66	52,41

Anexo V
Propiedades termofísicas

A V.1. Determinación de las propiedades termofísicas

Las tablas elaboradas con los resultados experimentales obtenidos en los ensayos se han dado en el anexo IV. Con estos datos, y a partir de la fórmula de Wagner, se han hallado las temperaturas de fluido que han tenido las sustancias durante los ciclos de ensayo, estas temperaturas se han sustituido en las fórmulas de las ecuaciones de estado de las propiedades termofísicas escogidas, (véase capítulo 3) y se han obtenido los valores estimados de cada propiedad termofísica para cada termosifón, carga, fluido y temperatura, en cada uno de los ensayos realizados.

Con este procedimiento, se han construido las tablas que se presentan a continuación y que han servido de base para el estudio estadístico, eje central de la tesis, y cuyo análisis ha conformado el capítulo 7 y el anexo VII.

Las tablas se han organizado según el siguiente esquema:

- Tipo de termosifón
 - o Coeficiente de llenado o nivel de carga
 - Temperatura ambiente
 - Fluido de trabajo

Este método ha sido el empleado para todos los ensayos de los distintos termosifones. Las tablas que se presentan a continuación, se han organizado según el orden siguiente:

- a) Termosifón de cobre.
- b) Termosifón de acero pequeño.
- c) Termosifón de acero grande.
- d) Termosifón prismático de aluminio sin control de potencia (SCP).
- e) Termosifón prismático de aluminio con control de potencia (CCP).

Tabla A V.1: Valor de las propiedades termofísicas de todos los fluidos ensayados para el termosifón de cobre, con carga baja

SUSTANCIA	Temp. fluido		TERMOSIFÓN	CARGA	T. Amb. (°C)	P _v bar	ρ kg/m ³	P _v kg/m ³	h _{fg} kJ/kg	c _p kJ/kg·K	c _{pv} kJ/kg·K	μ _{Pa·s}	μ _v μPa·s	k ₁ mW/m	k _v mW/m	σ mN/m	R _{term} KW
	°C	K															
Agua	49,45	322,60	Cobre	Baja	10	0,120	986,04	0,081	2385,06	4,185	1,911	553,27	10,651	641,38	20,329	68,049	0,279
Ciclopentano	42,28	315,43				0,801	724,83	1,880	1,275	345,85	7,980	122,19	13,033	19,492	0,258		
Diétil éter	39,63	312,78				1,214	690,37	3,687	3,531	2,442	1,658	192,64	16,364	14,717	0,221		
Etilal	35,77	308,92				1,596	760,97	3,075	1,286	201,39	8,944	173,52	12,237	19,028	0,189		
Metanoato metilo	41,92	315,07				1,471	941,93	3,490	4,623	2,083	1,178	281,44	11,027	13,598	0,231		
Isopentano	41,56	314,71				1,589	596,94	4,674	3,316	2,377	1,728	183,66	7,545	96,31	15,988	12,687	0,237
Metanol	43,32	316,47				0,413	768,99	0,509	1,147	2,638	1,422	422,73	10,355	194,12	16,822	20,793	0,262
N-Hexano	41,85	315,00				0,400	638,85	1,347	3,540	2,343	1,731	252,36	6,727	111,51	14,423	16,131	0,243
N-Pentano	38,17	311,32				1,088	607,43	3,171	3,550	2,383	1,746	190,81	7,136	107,83	15,405	13,992	0,220
Perfluorheptano	57,34	330,49				0,419	1634,55	6,118	1,033	0,330	554,35	62,60	10,146	9,592	0,353		
Propanal	43,20	316,35				0,856	770,92	1,926	4,950	2,342	1,438	320,37	8,287	157,13	12,900	20,355	0,243
R-141b	40,64	313,79				1,378	1198,88	6,375	2,188	1,179	0,821	345,93	9,286	92,92	10,293	16,226	0,241
R-366mic	50,16	323,31				1,399	1201,03	8,153	1,720	1,480	0,997	367,37	11,505	76,69	14,757	12,278	0,301
Acetona + Pentano	39,05	312,20				1,301	637,24	2,447	3,882	2,353	1,666	204,62	7,385	116,63	14,828	15,362	0,222
Ciclopent+ Metanol	42,02	315,17				1,116	747,65	1,460	5,023	1,983	1,294	358,39	8,301	132,39	13,532	21,303	0,232
D.éter+Met.metilo	37,85	311,00				1,410	791,20	3,231	4,174	2,233	1,386	248,86	9,530	154,84	14,591	16,125	0,207
Agua	63,00	336,15				0,229	979,21	0,148	2,352	4,191	1,933	444,84	11,078	655,26	21,460	65,730	0,273
Ciclopentano	56,54	329,69				1,280	712,68	3,405	3,864	1,948	1,341	302,33	8,305	117,35	14,195	17,579	0,253
Diétil éter	53,63	326,78	1,911	673,07	5,660	3,417	2,556	1,700	171,20	8,269	119,85	17,659	13,090	0,217			
Etilal	51,55	324,70	2,647	737,41	4,785	5,237	2,304	1,322	181,30	9,391	166,63	13,463	16,895	0,195			
Metanoato metilo	55,30	328,45	2,288	921,16	5,282	4,483	2,120	1,208	249,95	11,496	171,43	14,708	19,300	0,225			
Isopentano	55,19	328,34	2,384	581,91	6,884	3,207	2,454	1,792	162,52	7,858	91,81	17,269	11,265	0,232			
Metanol	55,18	328,33	0,693	757,49	0,833	1,125	0,844	1,448	364,15	10,761	190,90	17,771	19,789	0,246			
N-Hexano	54,97	328,12	0,644	626,27	2,108	3,451	2,401	1,794	224,45	6,988	107,19	15,605	14,806	0,237			
N-Pentano	53,27	326,42	1,759	591,41	4,988	3,420	2,461	1,809	167,83	7,470	102,41	16,880	12,389	0,224			
Perfluorheptano	68,30	341,45	0,628	1599,73	8,994	92,57	1,054	0,338	477,09	11,215	61,49	10,820	8,642	0,329			
Propanal	56,24	329,39	1,337	755,75	2,913	4,829	2,404	1,471	287,96	8,624	153,14	13,950	18,668	0,238			
R-141b	54,56	327,71	2,147	1170,18	9,605	2,180	1,203	0,842	301,61	9,772	88,92	11,101	14,541	0,234			
R-366mic	65,05	338,20	2,298	1166,20	13,093	1,650	1,513	1,032	308,05	12,113	69,10	16,314	10,695	0,298			
Acetona + Pentano	53,52	326,67	2,071	621,44	3,851	3,743	2,424	1,722	181,09	7,724	111,35	16,151	13,763	0,232			
Ciclopent+ Metanol	56,83	329,98	1,815	730,92	2,452	4,893	2,459	1,558	309,29	8,662	127,51	14,735	19,350	0,244			
D.éter + Met.metilo	53,35	326,50	2,337	770,20	5,250	3,990	2,312	1,427	217,04	10,003	148,71	15,936	14,322	0,207			

Tabla A V.1: Valor de las propiedades termofísicas de todos los fluidos ensayados para el termosifón de cobre, con carga baja. (Continuación).

SUSTANCIA	Temp. fluido		TERMOSIFÓN	CARGA	T.Amb. (°C)	P _v bar	ρ _v kg/m ³	h _{fg} kJ/kg	c _p kJ/kg·K	c _p kJ/kg·K	H ₁ μPa·s	μPa·s	k ₁ mW/m	k _v mW/m	σ mN/m	R _{term} KW
	°C	K														
Agua	68.80	341.95				0.296	976.07	2337.93	4.194	1.944	408.88	11.262	660.29	21.976	64.709	0.266
Ciclohexano	63.74	336.89				1.594	706.40	380.94	1.983	1.375	283.15	8.465	114.96	14.823	16.634	0.253
Diétil éter	61.18	334.33				2.400	663.44	7021	334.60	2.625	160.84	8.458	117.22	18.384	12.228	0.220
Etilal	58.42	331.57				3.249	726.83	509.19	2.342	1.338	172.68	9.587	163.68	14.014	15.974	0.197
Metano metilo	61.14	334.29				2.739	911.86	436.73	2.138	1.221	237.65	11.700	168.98	15.209	18.385	0.218
Isopentano	62.47	335.62				2.916	573.62	8.351	314.63	2.498	1.825	152.50	8.025	17.981	10.518	0.232
Metanol	62.40	335.55				0.931	750.35	1.104	1.111.93	2.776	333.56	11.009	188.99	18.384	19.157	0.248
N-Hexano	62.44	335.59				0.828	618.98	2.673	339.48	2.436	210.52	7.137	104.78	16.299	14.061	0.240
N-Pentano	60.52	333.67		Baja	32	2.177	583.48	6.108	335.14	2.502	1.839	158.05	7.629	99.88	17.614	0.228
Perfluorheptano	75.52	348.67				0.806	1576.75	11.427	90.75	1.068	433.78	11.448	60.74	11.275	8.028	0.329
Propanal	63.23	336.38				1.669	747.48	3.580	476.15	2.442	1.489	273.90	8.804	151.01	14.530	0.238
R-141b	61.70	334.85				2.651	1155.14	11.686	208.02	1.216	0.852	281.88	10.022	86.92	13.689	0.235
R-365mic	71.93	345.08				2.805	1149.40	16.060	162.19	1.529	1.048	284.35	12.399	65.64	16.920	0.298
Acetona + Pentano	61.00	334.15				2.571	613.02	4.788	367.69	2.463	1.751	170.38	7.899	108.69	16.863	0.235
Ciclohex+ Metanol	63.74	336.89				2.290	722.93	3.066	482.90	2.096	1.388	289.45	8.828	123.27	15.338	0.245
D.éter + Met. metilo	60.33	333.48				2.888	760.46	6.429	391.75	2.352	1.445	204.51	10.216	146.00	16.563	0.207
Agua	79.35	352.50				0.461	970.04	0.286	2311.40	4.201	1.968	355.03	11.600	668.12	22.964	0.262
Ciclohexano	74.71	347.86				2.184	696.27	5.624	372.21	2.038	1.427	256.62	8.705	111.37	15.833	0.253
Diétil éter	72.07	345.22				3.258	649.13	9.420	324.28	2.730	1.756	147.31	8.730	113.49	19.459	0.221
Etilal	70.66	343.81				4.577	707.57	7.763	482.38	2.415	1.367	156.77	9.938	158.49	15.022	0.200
Metano metilo	71.99	345.14				3.755	894.17	8.452	421.26	2.173	1.246	216.79	12.080	164.48	16.163	0.219
Isopentano	73.23	346.38				3.862	560.95	10.950	305.05	2.565	1.875	138.98	8.275	86.12	19.069	0.234
Metanol	73.29	346.44				1.416	739.35	1.650	1089.46	2.874	1.489	293.25	11.386	186.19	19.357	0.248
N-Hexano	73.81	346.96				1.185	607.64	3.754	330.49	2.492	1.881	191.49	7.365	101.19	17.387	0.244
N-Pentano	71.74	344.89				2.969	570.83	8.225	324.07	2.568	1.442.23	7.878	9.607	18.781	10.476	0.244
Perfluorheptano	86.57	359.72				1.153	1541.87	16.163	87.83	1.089	376.76	11.796	59.59	11.990	7.113	0.325
Propanal	74.11	347.26				2.309	734.34	4.844	465.22	2.507	1.518	253.37	9.083	147.72	15.457	0.240
R-141b	72.67	345.82				3.997	1131.44	15.552	201.94	1.237	0.868	254.68	10.405	83.91	12.179	0.242
R-365mic	80.28	353.43				3.624	1128.30	20.370	157.88	1.549	1.067	258.19	12.752	61.49	17.623	0.294
Acetona + Pentano	71.78	344.93				3.467	600.53	6.441	356.83	2.523	1.793	156.36	8.155	104.94	17.922	0.240
Ciclohex+ Metanol	73.99	347.14				3.189	710.83	4.191	472.91	2.153	1.433	262.83	9.070	16.277	17.132	0.250
D.éter + Met. metilo	71.05	344.20				3.841	745.09	8.636	378.82	2.417	1.473	187.01	10.543	141.90	17.556	0.202

Tabla A V.2: Valor de las propiedades termofísicas de todos los fluidos ensayados para el termosifón de cobre, con carga media. (Continuación).

SUSTANCIA	Temp. fluido		T.Amb. (°C)	CARGA	TERMOSIFÓN	CARGA	T.Amb. (°C)	P _v bar	ρ _l kg/m ³	ρ _v kg/m ³	h _{fg} kJ/kg	c _{p,l} kJ/kg·K	c _{p,v} kJ/kg·K	μ _l μPa·s	μ _v μPa·s	k _l mW/m·K	k _v mW/m·K	σ mN/m	R _{term} KW
	°C	K																	
Agua	71.35	344.50						0.330	974.65	0.209	2331.57	4.196	1.949	394.62	11.344	662.34	22.209	64.254	0.279
Ciclohexano	60.88	334.03						1.463	708.92	3.858	383.14	1.969	1.362	290.57	8.402	115.91	14.570	17.007	0.237
Diétil éter	59.93	333.08						2.311	665.04	6.781	335.75	2.613	1.719	162.49	8.427	117.65	18.263	12.369	0.230
Etilal	62.31	335.46						3.634	720.77	6.314	500.81	2.364	1.347	167.72	9.698	162.02	14.331	15.454	0.227
Metanoato metilo	60.10	333.25						2.654	913.53	6.076	438.19	2.134	1.219	239.79	11.664	169.42	15.119	18.547	0.220
Isopentano	61.93	335.08						2.874	574.24	8.235	315.09	2.494	1.823	153.21	8.013	89.64	17.927	10.573	0.232
Metanol	61.13	334.28						0.885	751.61	1.052	1114.42	2.765	1.461	338.68	10.965	189.32	18.274	19.269	0.239
N-Hexano	62.40	335.55						0.827	619.02	2.670	339.51	2.436	1.828	210.58	7.136	104.79	16.296	14.065	0.245
N-Pentano	62.38	335.53				Media	32	2.296	581.41	6.427	333.34	2.512	1.847	155.65	7.670	99.24	17.805	11.438	0.238
Perfluorheptano	73.56	346.71						0.754	1583.00	10.717	91.25	1.064	0.342	445.05	11.385	60.95	11.150	8.194	0.323
Propanal	60.47	333.62						1.531	750.76	3.303	478.84	2.426	1.482	279.22	8.733	151.85	14.299	18.125	0.231
R-141b	62.64	335.79						2.724	1153.12	11.986	207.51	1.218	0.853	279.39	10.055	86.66	11.579	13.577	0.265
R-366míc	71.07	344.22						2.737	1151.54	15.660	162.62	1.527	1.046	287.22	12.363	66.07	16.846	10.072	0.298
Acetona + Pentano	62.18	335.23						2.658	611.67	4.951	366.52	2.469	1.756	168.77	7.927	108.27	16.977	12.819	0.255
Ciclohexa + Metanol	62.35	335.50						2.186	724.55	2.934	484.22	2.088	1.382	293.32	8.794	125.72	15.215	18.632	0.241
D.éter + Met.metilo	60.24	333.39						2.880	760.60	6.412	391.86	2.351	1.445	204.67	10.213	146.03	16.555	13.533	0.214
Agua	80.65	353.80						0.486	969.27	0.300	2308.08	4.202	1.972	349.25	11.642	668.97	23.090	62.569	0.266
Ciclohexano	71.79	344.94						2.013	699.05	5.208	374.57	2.024	1.413	265.39	8.641	112.32	15.559	15.593	0.237
Diétil éter	70.81	343.96						3.148	650.81	9.114	325.50	2.718	1.752	148.80	8.699	113.92	19.332	11.144	0.243
Etilal	73.41	346.56						4.924	703.18	8.299	476.18	2.432	1.374	155.06	10.018	157.34	15.253	13.976	0.232
Metanoato metilo	71.12	344.27						3.664	895.61	8.256	422.53	2.170	1.244	218.38	12.049	164.84	16.085	16.845	0.223
Isopentano	72.98	346.13						3.838	561.24	10.884	305.28	2.564	1.874	139.28	8.269	86.20	19.043	9.455	0.232
Metanol	71.51	344.66						1.325	741.17	1.548	1093.26	2.857	1.485	299.41	11.324	186.64	19.194	18.338	0.240
N-Hexano	73.13	346.28						1.161	608.32	3.682	331.03	2.489	1.878	192.55	7.352	101.40	17.321	13.007	0.245
N-Pentano	73.26	346.41				Media	43	3.091	569.08	8.552	322.53	2.577	1.892	142.47	7.911	95.57	18.942	10.321	0.254
Perfluorheptano	84.31	357.46						1.074	1548.95	15.084	88.44	1.084	0.350	387.61	11.726	59.83	11.842	7.297	0.319
Propanal	71.34	344.49						2.131	737.71	4.494	468.04	2.490	1.510	259.74	9.012	148.55	15.218	16.739	0.237
R-141b	73.40	346.55						3.668	1129.84	15.841	201.53	1.239	0.869	252.98	10.431	83.72	12.224	12.312	0.265
R-366míc	81.80	354.95						3.782	1124.38	21.243	157.08	1.553	1.071	253.73	12.816	60.75	17.750	8.986	0.295
Acetona + Pentano	73.02	346.17						3.586	599.08	6.655	355.55	2.531	1.798	158.85	8.184	104.52	18.046	11.653	0.238
Ciclohexa + Metanol	73.24	346.39						3.115	711.73	4.099	473.66	2.149	1.429	264.69	9.053	122.26	16.206	17.229	0.253
D.éter + Met.metilo	70.80	343.95						3.904	745.45	8.579	379.12	2.416	1.472	187.39	10.536	141.99	17.532	12.332	0.213

Tabla A V.3: Valor de las propiedades termofísicas de todos los fluidos ensayados para el termosifón de cobre, con carga alta. (Continuación).

SUSTANCIA	Temp. fluido		T. Amb. (°C)	CARGA	TERMOSIFÓN	Cobre	Ala	32	43	P _s bar	ρ _l kg/m ³	ρ _v kg/m ³	h _{fg} kJ/kg-K	c _p kJ/kg-K	c _{pv} kJ/kg-K	μ _l μPa-s	μ _v μPa-s	K _l mW/m	K _v mW/m	σ mN/m	R _{term} KW
	°C	K																			
Agua	70.27	343.42								0.315	975.26	0.200	2334.27	4.195	1.947	400.55	11.309	661.48	22.110	64.447	0.278
Ciclopentano	60.50	333.65								1.446	709.26	3.816	383.44	1.967	1.360	291.39	8.393	116.603	14.537	17.058	0.235
Diétil éter	61.76	334.91								2.438	662.69	7.135	334.06	2.631	1.725	160.09	8.473	117.02	18.440	12.162	0.253
Etanol	60.34	333.49								3.435	723.84	6.008	505.06	2.353	1.343	170.24	9.642	162.86	14.170	15.717	0.216
Metanoato metilo	60.20	333.35								2.662	913.37	6.094	438.05	2.135	1.219	239.58	11.667	169.38	15.127	18.532	0.224
Isopentano	61.85	335.00								2.868	574.33	8.218	315.15	2.494	1.823	153.32	8.011	89.67	17.920	10.581	0.232
Metanol	59.81	332.96								0.839	752.92	1.000	1117.00	2.754	1.458	344.12	10.920	189.67	18.161	19.385	0.230
N-Hexano	61.39	334.54								0.800	620.01	2.888	340.29	2.431	1.824	212.39	7.116	105.12	16.201	14.165	0.239
N-Pentano	62.58	335.73								2.309	581.19	6.461	333.15	2.514	1.848	155.39	7.675	99.17	17.826	11.417	0.246
Perfluorheptano	76.61	349.76								0.836	1573.30	11.836	90.47	1.070	0.344	427.69	11.483	60.63	11.344	7.937	0.343
Propanal	61.05	334.20								1.559	750.08	3.360	478.28	2.430	1.483	278.09	8.747	151.68	14.347	18.051	0.233
R-141b	60.14	333.29								2.534	1158.44	11.205	208.85	1.213	0.850	286.04	9.967	87.35	11.430	13.875	0.231
R-365mfc	71.03	344.18								2.764	1151.63	15.644	162.64	1.527	1.046	123.61	12.361	66.09	16.843	10.076	0.294
Acetona + Pentano	62.67	335.82								2.695	611.11	5.020	366.04	2.472	1.758	168.10	7.939	108.10	17.025	12.766	0.239
Ciclopent+ Metanol	62.28	335.43								2.181	724.63	2.927	484.28	2.088	1.382	293.51	8.793	125.74	15.209	18.641	0.226
D.éter + Met.metilo	60.34	333.49								2.889	760.45	6.431	391.73	2.352	1.445	204.49	10.216	145.99	16.564	13.521	0.223
Agua	80.28	353.43								0.479	969.49	0.296	2309.04	4.202	1.971	350.90	11.630	668.73	23.053	62.638	0.275
Ciclopentano	71.51	344.66								1.997	699.32	5.169	374.80	2.022	1.412	264.06	8.635	112.41	15.532	15.629	0.235
Diétil éter	72.55	345.70								3.301	648.48	9.540	323.81	2.735	1.758	146.75	8.743	113.33	19.507	10.950	0.259
Etanol	71.64	344.79								4.699	706.00	7.951	480.17	2.421	1.369	155.45	9.967	158.07	15.105	14.210	0.220
Metanoato metilo	71.20	344.35								3.672	895.48	8.274	422.42	2.170	1.244	218.24	12.052	164.81	16.092	16.833	0.226
Isopentano	72.66	345.81								3.807	561.63	10.799	305.57	2.562	1.872	139.66	8.261	86.30	19.010	9.487	0.231
Metanol	70.78	343.93								1.284	742.02	1.502	1095.01	2.850	1.483	302.34	11.295	186.85	19.118	18.414	0.234
N-Hexano	72.25	345.40								1.130	609.22	3.588	331.75	2.485	1.874	193.96	7.334	101.68	17.235	13.093	0.241
N-Pentano	73.36	346.51								3.099	568.96	8.573	322.43	2.578	1.893	142.35	7.914	95.53	18.952	10.311	0.255
Perfluorheptano	87.34	360.49								1.181	1539.45	16.546	87.62	1.090	0.352	373.14	11.820	59.51	12.041	7.050	0.337
Propanal	71.92	345.07								2.167	737.01	4.565	467.46	2.493	1.512	258.82	9.027	148.38	15.268	16.666	0.240
R-141b	70.94	344.09								3.433	1135.25	14.880	202.93	1.234	0.865	258.76	10.344	84.38	12.075	12.601	0.248
R-365mfc	80.44	353.59								3.640	1127.90	20.458	157.80	1.550	1.067	257.73	12.758	61.42	17.636	9.122	0.289
Acetona + Pentano	73.26	346.41								3.610	598.79	6.698	355.30	2.532	1.799	154.36	8.190	104.44	18.070	11.627	0.245
Ciclopent+ Metanol	72.99	346.14								3.091	712.02	4.069	473.91	2.147	1.428	265.30	9.047	122.33	16.183	17.260	0.246
D.éter + Met.metilo	71.05	344.20								3.931	745.09	8.650	378.82	2.417	1.473	187.01	10.543	141.90	17.556	12.303	0.225

Tabla A V.4: Valor de las propiedades termofísicas de todos los fluidos ensayados para el termosifón de acero pequeño, con carga baja.

SUSTANCIA	Temp. fluido		T _{Amb.} (°C)	CARGA	TERMOSIFÓN	CARGA	T _{Amb.} (°C)	p _v bar	ρ _v kg/m ³	ρ _l kg/m ³	h _{fg} kJ/kg	c _{pl} kJ/kg·K	c _{pv} kJ/kg·K	μ _v μPa·s	μ _l μPa·s	k _v m/W·m	k _l m/W·m	k _v m/W·m	σ mN/m	R _{term} KW
	°C	K																		
Acetona	52,22	325,37	10	Baja	Acero pequeño	Baja	10	0,887	754,88	1,911	506,92	2,262	1,367	237,99	237,99	147,94	13,046	19,620	0,335	
Agua	45,81	318,96						0,100	987,77	0,068	2393,72	4,184	1,907	589,99	10,538	637,11	20,042	68,655	0,289	
Ciclopentano	49,42	322,57						1,019	718,76	2,752	391,72	1,914	1,308	323,03	8,144	119,75	13,601	18,528	0,343	
Diétil éter	51,80	324,95						1,806	673,36	5,365	343,11	2,540	1,695	173,84	8,224	120,49	17,487	13,301	0,332	
Isopentano	48,44	321,59						2,016	589,43	5,707	326,24	2,415	1,760	172,57	7,703	94,02	16,626	11,965	0,311	
Metanol	52,51	325,66						0,619	760,10	0,748	1130,79	2,695	1,442	376,36	10,669	191,61	17,551	20,019	0,340	
N-Hexano	53,83	326,98						0,619	627,38	2,031	345,97	2,396	1,788	226,71	6,965	107,56	15,500	14,921	0,359	
N-Pentano	49,40	322,55						1,563	595,58	4,460	345,56	2,441	1,793	173,35	7,385	103,78	16,495	12,796	0,319	
Perfluorheptano	53,87	327,02						0,359	1645,52	5,381	96,01	1,027	0,327	582,29	10,740	62,95	9,937	9,899	0,361	
R-141b	52,71	325,86						1,941	1174,05	9,114	212,77	1,199	0,839	307,04	9,707	89,44	10,993	14,763	0,350	
R-365mfc	48,23	321,38						1,360	1205,41	7,640	173,47	1,476	0,992	375,98	11,427	77,67	14,519	12,487	0,318	
Acetona + Pentano	46,95	320,10						1,694	628,69	3,152	381,09	2,391	1,697	191,27	7,570	113,72	15,541	14,485	0,302	
Ciclopent + Metanol	51,26	324,41						1,505	737,27	2,031	494,35	2,029	1,334	326,57	8,528	129,33	14,269	20,079	0,343	
Diétil + Metanol	51,07	324,22						2,176	773,35	4,904	402,52	2,300	1,421	221,36	9,934	149,60	15,764	14,586	0,322	
Acetona	65,29	338,44	25	Baja	Acero pequeño	Baja	25	1,375	739,77	2,856	495,13	2,315	1,404	215,10	215,10	142,93	13,978	17,997	0,337	
Agua	59,89	333,04						0,198	980,84	0,130	2359,86	4,189	1,927	466,40	10,979	652,35	21,191	66,271	0,267	
Ciclopentano	64,63	337,78						1,637	705,61	4,287	380,24	1,988	1,379	280,87	8,485	114,66	14,903	16,517	0,341	
Diétil éter	64,90	338,05						2,669	658,61	7,779	331,13	2,660	1,734	156,05	8,551	115,93	18,747	11,807	0,322	
Isopentano	63,14	336,29						3,053	572,84	8,498	314,05	2,502	1,828	151,61	8,041	89,26	18,047	10,449	0,308	
Metanol	66,59	339,74						1,098	746,16	1,293	1103,50	2,812	1,474	317,28	11,154	187,90	18,751	18,784	0,339	
N-Hexano	67,41	340,56						0,972	614,06	3,111	335,61	2,460	1,852	201,89	7,237	103,20	16,770	13,569	0,357	
N-Pentano	65,20	338,35						2,485	578,26	6,932	330,59	2,529	1,859	152,10	7,733	98,28	18,096	11,147	0,324	
Perfluorheptano	66,57	339,72						0,606	1605,23	8,479	92,99	1,051	0,337	488,30	11,159	61,66	10,712	8,790	0,350	
R-141b	65,30	338,45						2,805	1147,44	12,862	206,06	1,223	0,857	272,55	10,148	85,92	11,737	13,263	0,334	
R-365mfc	61,22	334,37						2,109	1175,34	11,641	167,45	1,504	1,023	322,19	11,955	71,05	15,953	11,096	0,300	
Acetona + Pentano	63,74	336,89						2,777	609,88	5,173	364,97	2,478	1,762	166,66	7,964	107,72	17,129	12,650	0,312	
Ciclopent + Metanol	65,82	338,97						2,453	720,50	3,273	480,92	2,107	1,397	283,80	8,877	124,61	15,524	18,182	0,335	
Diétil + Metanol	63,64	336,79						3,183	755,77	7,056	387,81	2,372	1,453	198,89	10,317	144,72	16,922	13,144	0,309	

Tabla A V.4: Valor de las propiedades termofísicas de todos los fluidos ensayados para el termosifón de acero pequeño, con carga baja. (Continuación).

SUSTANCIA	Temp. fluido		T _{Amb.} (°C)	CARGA	TERMOSIFÓN	CARGA	T _{Amb.} (°C)	P _v bar	ρ _v kg/m ³	ρ _l kg/m ³	h _{fg} kJ/kg	c _{pl} kJ/kg·K	c _{pv} kJ/kg·K	μ _l μPa·s	μ _v μPa·s	k _l mW/m	k _v mW/m	σ mN/m	R _{term} KW					
	°C	K																						
Acetona	72,42	345,57	32	Baja	Acero pequeño	Baja	32	1,719	731,36	3,504	487,34	2,347	1,424	204,16	9,279	140,24	14,517	17,120	0,337					
Agua	67,70	340,85						0,282	976,68	0,180	2340,66	4,193	1,942	415,31	11,227	659,38	21,877	64,904	0,268					
Ciclohexano	71,71	344,86						1,983	699,13	5,196	374,63	2,023	1,413	263,58	8,640	112,34	15,551	15,603	0,339					
Diétil éter	71,42	344,57						3,201	650,00	9,261	324,91	2,724	1,754	148,08	8,714	113,71	19,393	11,076	0,317					
Isopentano	69,94	343,09						3,647	564,88	10,097	308,05	2,544	1,860	142,96	8,198	87,14	18,732	9,761	0,304					
Metanol	73,21	346,36						1,412	739,43	1,645	898,63	1,489	2,952	11,383	19,349	18,183	0,339							
N-Hexano	74,00	347,15						1,192	607,45	3,775	330,33	2,493	1,882	191,19	7,369	101,13	17,406	12,922	0,353					
N-Pentano	71,82	344,97						2,975	570,74	8,242	325,99	2,569	1,886	144,13	7,879	96,05	18,789	10,468	0,320					
Perfluorheptano	73,43	346,38						0,785	1583,40	10,673	91,28	0,342	445,78	11,381	8,205	60,96	11,142	8,205	0,345					
R-141b	71,81	344,96						3,355	1133,32	15,218	202,43	1,236	0,866	25,668	10,375	84,15	12,128	12,498	0,329					
R-365mfc	68,13	341,28						2,583	1158,74	14,361	164,09	1,320	1,039	297,18	12,240	67,55	16,591	10,375	0,297					
Acetona + Pentano	69,36	342,51						3,244	603,37	6,036	359,31	2,509	1,784	159,38	8,097	105,77	17,681	12,044	0,333					
Ciclohex+Metanol	72,27	345,42						3,022	712,88	3,983	474,63	2,143	1,425	267,09	9,030	122,56	16,116	17,353	0,332					
D.éter+ Metanol	70,77	343,92						3,900	745,50	8,571	379,16	2,415	1,472	187,45	10,535	142,00	17,558	12,336	0,308					
Acetona	82,66	355,81						43	Baja	Acero pequeño	Baja	43	2,327	719,03	4,627	475,79	2,397	1,453	190,02	9,592	136,44	15,327	15,871	0,330
Agua	77,67	350,82											0,442	971,03	0,268	238,66	4,200	1,964	362,75	11,546	666,98	22,802	63,114	0,268
Ciclohexano	82,26	355,41	2,678	688,70	6,825	365,95	2,077						1,462	239,91	8,869	108,95	16,565	14,268	0,333					
Diétil éter	81,93	355,08	4,223	635,67	12,116	314,37	2,828						1,786	136,25	8,977	110,21	20,462	9,917	0,311					
Isopentano	80,65	353,80	4,753	551,88	13,079	297,98	2,615						1,909	130,44	8,449	83,89	19,843	8,693	0,301					
Metanol	84,21	357,36	2,039	727,97	2,405	865,05	2,984						1,514	258,59	11,767	183,49	20,389	17,157	0,341					
N-Hexano	84,65	357,80	1,628	596,52	5,077	321,51	2,549						1,931	175,41	7,584	97,84	18,457	11,888	0,349					
N-Pentano	82,40	355,55	3,907	558,33	10,742	315,05	2,636						1,930	132,35	8,117	92,58	19,924	9,399	0,315					
Perfluorheptano	83,75	356,90	1,107	1550,72	14,825	88,59	1,083						0,349	390,37	11,709	59,88	11,805	7,344	0,332					
R-141b	82,32	355,47	4,389	1109,92	19,723	196,30	1,258						0,881	233,38	10,743	81,34	12,766	11,279	0,323					
R-365mfc	78,99	352,14	3,509	1131,62	19,647	158,56	1,546						1,064	262,07	12,696	62,13	17,514	9,267	0,293					
Acetona + Pentano	79,81	352,96	4,315	590,95	7,938	348,43	2,572						1,824	146,87	8,348	102,23	18,734	10,930	0,299					
Ciclohex+Metanol	82,66	355,81	4,127	700,35	5,374	464,04	2,204						1,471	242,44	9,275	119,33	17,113	16,029	0,329					
D.éter + Metanol	81,22	354,37	5,174	730,00	11,247	365,99	2,482						1,499	172,08	10,853	138,08	18,559	11,163	0,305					

Tabla A V.5: Valor de las propiedades termofísicas de todos los fluidos ensayados para el termosifón de acero pequeño, con carga media.

SUSTANCIA	Temp. fluido		T.Amb. (°C)	CARGA	TERMOSIFÓN	ρ _s kg/m ³	ρ _l kg/m ³	ρ _v bar	μ _l kg/m ³	μ _{ig} kg/kg·K	c _{pl} kJ/kg·K	c _{pv} kJ/kg·K	μ _l pPa·s	μ _v pPa·s	k _l mW/m	k _v mW/m	σ mN/m	R _{term} KW
	°C	K																
Acetona	48.58	321.73	10	Media	Acero pequeño	1.697	799.03	0.822	512.66	2.249	1.357	245.12	8.576	149.35	12.799	20.075	0.335	
Agua	46.01	319.16				0.069	2393.25	4.184	1.907	587.87	10.544	637.35	20.058	68.622	0.320			
Ciclopentano	49.30	322.45				2.742	391.81	1.913	1.307	323.39	8.142	119.79	13.591	18.544	0.369			
Diétil éter	49.92	323.07				5.073	344.78	2.524	1.689	176.61	8.177	121.16	17.310	13.518	0.323			
Isopentano	47.86	321.01				5.614	326.70	2.412	1.757	173.47	7.690	94.21	16.571	12.026	0.308			
Metanol	51.11	324.26				0.707	833.35	2.685	1.439	382.98	10.621	191.99	17.437	20.138	0.369			
N-Hexano	55.47	328.62				2.143	344.76	2.404	1.796	223.49	6.998	107.03	15.651	14.756	0.400			
N-Pentano	48.69	321.84				4.368	346.20	2.437	1.790	174.39	7.369	104.03	16.425	12.871	0.317			
Perfluorohexano	50.43	323.58				4.724	96.80	1.020	0.324	611.89	10.625	63.29	9.731	10.204	0.366			
R-14 lb	52.10	325.25				8.957	213.08	1.198	0.838	308.86	9.686	89.62	10.957	14.836	0.357			
R-365míc	49.71	322.86				8.031	172.80	1.479	0.995	369.35	11.486	76.92	14.703	12.326	0.324			
Acetona + Pentano	46.52	319.67				3.110	381.48	2.389	1.695	191.96	7.560	113.88	15.502	14.532	0.305			
Ciclopent+Metanol	50.12	323.27				1.953	495.36	2.024	1.329	330.27	8.500	129.70	14.176	20.229	0.357			
D.éter+ Met.metilo	49.40	322.55				4.662	404.43	2.291	1.416	224.59	9.883	150.26	15.608	14.779	0.317			
Acetona	63.22	336.37	25	Media	Acero pequeño	2.686	742.19	1.286	497.35	2.306	1.398	218.47	9.003	143.72	13.826	18.252	0.358	
Agua	59.75	332.90				0.129	2360.20	4.189	1.927	467.41	10.975	652.21	21.179	66.295	0.282			
Ciclopentano	65.86	339.01				4.435	379.28	1.994	1.385	277.78	8.512	114.26	15.014	16.358	0.375			
Diétil éter	64.86	338.01				7.770	331.17	2.660	1.734	156.10	8.550	115.95	18.743	11.812	0.322			
Isopentano	63.40	336.55				8.555	313.82	2.503	1.830	151.27	8.047	89.18	18.073	10.423	0.308			
Metanol	65.12	338.27				1.224	806.48	2.799	1.470	322.87	11.103	188.28	18.621	18.915	0.370			
N-Hexano	66.53	339.68				3.029	336.30	2.456	1.848	203.39	7.219	103.48	16.686	13.656	0.372			
N-Pentano	63.91	337.06				6.697	331.85	2.521	1.853	153.71	7.704	98.72	17.963	11.280	0.317			
Perfluorohexano	67.24	340.39				8.675	92.83	1.052	0.337	483.92	11.181	61.59	10.754	8.732	0.350			
R-14 lb	64.49	337.64				12.590	206.50	1.221	0.856	274.61	10.119	86.15	11.689	13.359	0.329			
R-365míc	63.91	337.06				1.510	166.15	1.029	1.029	312.19	12.066	69.68	16.209	10.814	0.320			
Acetona + Pentano	62.31	335.46				4.969	366.59	2.470	1.756	168.59	7.930	108.22	16.990	12.805	0.302			
Ciclopent+Metanol	64.95	338.10				3.185	481.75	2.102	1.393	286.15	8.856	124.89	15.446	18.295	0.332			
D.éter+ Met.metilo	63.66	336.81				7.060	387.79	2.372	1.454	198.86	10.318	144.72	16.921	13.142	0.309			

Tabla A V.5: Valor de las propiedades termofísicas de todos los fluidos ensayados para el termosifón de acero pequeño, con carga media. (Continuación).

SUSTANCIA	Temp. fluido		T.Amb. (°C)	CARGA	TERMOSIFÓN	ρ _s	ρ _l	ρ _v	h _{lg}	c _{pl}	c _{pv}	μ _l	μ _v	k _l	k _v	σ	R _{term}	
	°C	K																
Acetona	69.22	342.37	32	Media	Acero pequeño	1.592	735.15	3.201	490.86	2.332	1.415	208.95	9.182	141.45	14.273	17.512	0.332	
Agua	66.96	340.11				0.273	977.08	0.175	2342.49	4.193	1.940	419.74	11.204	658.75	21.811	15.640	15.482	0.283
Ciclohexano	72.66	345.81				2.063	698.23	5.329	373.87	2.028	1.417	261.35	8.660	112.03	15.640	15.482	0.365	
Dietil éter	71.46	344.61				3.204	649.95	9.271	324.87	2.724	1.754	148.03	8.715	113.70	19.397	11.072	0.319	
Isopentano	70.09	343.24				3.664	564.70	10.135	307.92	2.545	1.861	142.78	8.201	87.09	18.747	9.745	0.303	
Metanol	71.89	345.04				1.344	740.78	1.569	892.45	2.861	1.486	298.08	11.337	186.54	19.229	18.304	0.363	
N-Hexano	73.16	346.31				1.162	608.29	3.685	331.01	2.489	1.878	192.51	7.352	101.39	17.324	13.004	0.364	
N-Pentano	70.49	343.64				2.871	572.26	7.964	325.33	2.560	1.881	145.70	7.850	96.49	18.649	10.604	0.315	
Perfluorohexano	73.94	347.09				0.803	1581.78	10.853	91.15	1.065	0.342	442.82	11.397	60.91	11.174	8.162	0.344	
R-14 lb	71.34	344.49				3.308	1134.35	15.038	202.70	1.235	0.866	257.78	10.359	84.27	12.099	12.553	0.325	
R-365mfc	70.55	343.70				2.754	1152.81	15.426	162.88	1.526	1.045	288.94	12.341	66.33	16.802	10.125	0.313	
Acetona + Pentano	68.69	341.84				3.211	604.16	5.927	359.99	2.506	1.781	160.22	8.081	106.00	17.615	12.116	0.300	
Ciclohexano + Metanol	71.43	344.58				2.942	713.88	3.884	475.46	2.139	1.422	269.20	9.010	122.83	16.038	17.460	0.329	
D.éter + Met. metilo	70.26	343.41				3.845	746.24	8.455	379.79	2.412	1.471	188.24	10.519	142.20	17.535	12.394	0.306	
Acetona	79.84	352.99	43	Media	Acero pequeño	2.145	722.45	4.294	479.02	2.383	1.445	193.74	9.505	137.48	15.100	16.214	0.319	
Agua	77.74	350.89				0.432	970.99	0.269	238.49	4.200	1.964	362.42	11.548	667.03	22.809	63.101	0.278	
Ciclohexano	83.10	356.25				2.738	687.82	6.970	365.24	2.081	1.466	238.12	8.887	108.68	16.648	14.163	0.343	
Dietil éter	81.92	355.07				4.222	635.69	12.113	314.38	2.838	1.786	136.26	8.977	110.21	20.461	9.918	0.315	
Isopentano	80.75	353.90				4.760	551.76	13.110	297.88	2.616	1.909	130.33	8.452	83.86	19.854	8.683	0.298	
Metanol	82.94	356.09				1.942	729.32	2.305	467.99	2.971	1.511	262.36	11.723	183.80	20.266	17.277	0.357	
N-Hexano	83.71	356.86				1.585	597.50	4.950	322.30	2.544	1.927	176.74	7.565	98.13	18.363	11.978	0.338	
N-Pentano	81.13	354.28				3.785	559.85	10.413	314.39	2.628	1.925	133.71	8.088	92.99	19.786	9.527	0.310	
Perfluorohexano	84.14	357.29				1.125	1549.49	15.005	88.49	1.084	0.350	388.45	11.721	59.84	11.831	7.311	0.332	
R-14 lb	81.75	354.90				4.324	1111.21	19.454	196.64	1.257	0.880	234.58	10.723	81.49	12.731	11.345	0.315	
R-365mfc	81.11	354.26				3.710	1126.17	20.842	157.44	1.551	1.069	255.74	12.787	61.09	17.692	9.055	0.307	
Acetona + Pentano	79.38	352.53				4.265	591.47	7.851	348.88	2.569	1.823	147.36	8.337	102.37	18.690	10.975	0.293	
Ciclohexano + Metanol	81.76	354.91				4.023	701.45	5.240	464.98	2.198	1.467	244.48	9.254	119.60	17.025	16.143	0.322	
D.éter + Met. metilo	80.82	353.97				5.120	730.60	11.134	366.51	2.479	1.498	172.64	10.841	138.23	18.538	11.208	0.302	

Tabla A V.6: Valor de las propiedades termofísicas de todos los fluidos ensayados para el termosifón de acero pequeño, con carga alta.

SUSTANCIA	Temp. fluido		T.Amb. (°C)	CARGA	TERMOSIFÓN	P _v bar	ρ _l kg/m ³	ρ _v kg/m ³	h _{fg} kJ/kg·K	c _{pl} kJ/kg·K	c _{pv} kJ/kg·K	μ _l μPa·s	μ _v μPa·s	k _l mW/m	k _v mW/m	σ mN/m	R _{term} KW			
	°C	K																		
Acetona	51.44	324.59	10	Alta	Acero pequeño	0.863	755.77	1.863	509.73	2.259	1.365	239.49	8.659	148.24	12.993	19.717	0.382			
Agua	47.51	320.66				0.109	986.97	0.074	2389.68	4.185	1.909	572.37	10.590	639.13	20.175	68.373	0.334			
Ciclopentano	49.27	322.42				1.014	718.89	2.740	391.83	1.913	1.307	323.49	8.141	119.81	13.588	18.548	0.366			
Diétil éter	50.03	323.18				1.708	677.58	5.090	344.69	1.689	1.689	176.45	8.179	121.12	17.321	13.505	0.322			
Isopentano	46.83	319.98				1.928	591.20	5.451	327.52	2.406	1.753	175.08	7.666	94.55	16.475	12.134	0.301			
Metanol	48.33	321.48				0.490	764.16	0.630	108.35	2.664	1.433	396.58	10.526	192.75	17.214	20.374	0.353			
N-Hexano	46.27	319.42				0.450	634.64	1.574	351.42	2.362	1.752	242.42	6.815	110.04	14.816	15.682	0.337			
N-Pentano	48.82	321.97				1.535	596.20	4.385	346.09	2.438	1.791	174.20	7.372	103.99	16.438	12.857	0.317			
Perfluorheptano	54.56	327.71				0.376	1643.34	5.522	95.85	1.028	0.328	576.59	10.763	62.88	9.978	9.837	0.383			
R-141b	47.40	320.55				1.647	1185.04	7.816	215.49	1.190	0.831	323.36	9.522	90.96	10.683	15.404	0.333			
R-365mfc	49.10	322.25				1.407	1203.44	7.868	173.08	1.478	0.994	372.07	11.462	77.23	14.628	12.392	0.325			
Acetona + Pentano	46.03	319.18				1.645	629.69	3.063	381.93	2.386	1.693	192.76	7.549	114.06	15.457	14.586	0.297			
Ciclopent+Metanol	54.73	327.88				1.691	733.32	2.286	491.24	2.048	1.349	315.64	8.612	128.19	14.558	19.624	0.376			
D.éter + Met.metilo	49.75	322.90				2.087	775.16	4.712	404.03	2.292	1.417	223.91	9.893	150.12	15.629	14.738	0.322			
Acetona	65.18	338.33				25	Alta	Acero pequeño	1.370	739.90	2.847	495.25	2.315	1.403	215.28	9.062	142.97	13.970	18.010	0.393
Agua	61.34	334.49							0.212	980.08	0.138	2356.32	4.190	1.930	456.14	11.025	653.72	21.316	66.020	0.309
Ciclopentano	65.35	338.50							1.672	704.96	4.373	379.68	1.991	1.383	279.06	8.500	114.43	14.968	16.424	0.382
Diétil éter	64.55	337.70							2.642	659.07	7.705	331.46	2.657	1.733	156.49	8.542	116.05	18.712	11.847	0.318
Isopentano	62.04	335.19							2.971	574.11	8.258	314.99	2.495	1.823	153.07	8.015	89.61	17.938	10.562	0.298
Metanol	62.26	335.41							0.887	750.49	1.098	102.20	2.775	1.464	334.11	11.004	189.02	18.372	19.170	0.339
N-Hexano	60.58	333.73	0.761	620.81	2.522				340.91	2.427	1.820	213.87	7.100	105.38	16.125	14.246	0.315			
N-Pentano	63.97	337.12	2.401	579.64	6.707				331.79	2.522	1.854	153.64	7.705	98.70	17.969	11.274	0.320			
Perfluorheptano	67.54	340.69	0.648	1602.14	8.764				92.75	1.052	0.337	481.97	11.190	61.56	10.772	8.707	0.369			
R-141b	62.07	335.22	2.552	1154.34	11.804				207.82	1.216	0.852	280.89	10.035	86.82	11.545	13.645	0.318			
R-365mfc	63.88	337.03	2.266	1169.01	12.635				166.17	1.510	1.029	312.30	12.065	69.70	16.206	10.817	0.320			
Acetona + Pentano	61.14	334.29	2.581	612.85	4.807				367.55	2.464	1.752	170.18	7.903	108.64	16.877	12.932	0.299			
Ciclopent+Metanol	69.45	342.60	2.762	716.23	3.659				477.40	2.127	1.413	274.25	8.963	128.45	15.855	17.715	0.366			
D.éter + Met.metilo	64.26	337.41	3.269	754.89	7.179				387.07	2.375	1.455	197.86	10.336	144.48	16.936	13.074	0.314			

Tabla A V.6: Valor de las propiedades termofísicas de todos los fluidos ensayados para el termosifón de acero pequeño, con carga alta. (Continuación).

SUSTANCIA	Temp. fluido		TERMOSIFÓN	CARGA	T.Amb. (°C)	P _v bar	ρ _l kg/m ³	ρ _v kg/m ³	h _{fg} kJ/kg	c _{p,l} kJ/kg·K	c _{p,v} kJ/kg·K	μ _l μPa·s	μ _v μPa·s	k _l mW/m	k _v mW/m	σ mN/m	R _{term} KW
	°C	K															
Acetona	71.23	344.38	Acero pequeño	Alta	32	2.244	720.86	4.476	477.24	2.391	1.449	191.67	9.553	136.91	15.225	16.024	0.325
Agua	80.02	353.17				0.474	969.64	0.293	2399.69	4.202	1.970	352.03	11.622	668.56	23.028	62.685	0.301
Ciclopentano	82.45	355.60				2.692	688.50	6.857	365.79	2.078	1.463	239.51	8.873	108.89	16.583	14.244	0.339
Diétil éter	81.69	354.84				4.198	636.01	12.043	314.62	2.825	1.786	136.51	8.971	110.29	20.437	9.943	0.311
Isopentano	79.38	352.53				4.613	553.45	12.694	299.22	2.606	1.903	131.86	8.419	84.27	19.709	8.818	0.289
Metanol	79.21	352.36				1.698	733.23	2.030	876.47	2.932	1.502	273.82	11.592	184.71	19.909	17.628	0.330
N-Hexano	78.32	351.47				1.335	603.05	4.267	326.79	2.516	1.902	184.58	7.456	99.79	17.828	12.500	0.302
Perfluorheptano	85.25	358.40				1.157	1546.00	15.526	88.19	1.086	0.350	383.05	11.755	59.73	11.904	7.220	0.353
R-141b	79.90	353.05				4.108	1115.39	18.603	197.75	1.253	0.878	238.51	10.658	81.98	12.618	11.558	0.306
R-365mfc	81.16	354.31				3.715	1126.04	20.871	157.42	1.552	1.069	255.60	12.789	61.07	17.696	9.050	0.308
Acetona + Pentano	78.43	351.58				4.156	592.62	7.663	349.89	2.564	1.819	148.45	8.314	102.69	18.593	11.076	0.287
Ciclopent+Metanol	86.34	359.49				4.570	695.82	5.949	460.15	2.226	1.487	234.28	9.562	118.20	17.479	15.564	0.349
D.éter + Met.metilo	81.70	354.85				5.239	729.27	11.403	365.37	2.485	1.501	171.41	10.868	137.90	18.572	11.108	0.306

Tabla A V.7: Valor de las propiedades termofísicas de todos los fluidos ensayados para el termosifón de acero grande, con carga baja.

SUSTANCIA	Temp. fluido		T.Amb. (°C)	CARGA	TERMOSIFÓN	h _{fg}	c _{pl}	c _{pv}	μ _l	μ _v	k _l	k _v	σ	R _{term}			
	°C	K															
Agua	63,80	336,95	10	Baja	Acero grande	2350,29	4,191	1,934	439,57	11,103	655,99	21,530	68,655	0,146			
Diétil éter	67,15	340,30				329,01	2,682	1,741	155,24	8,607	115,16	18,968	13,301	0,168			
Isopentano	64,85	338,00				312,56	2,512	1,836	149,38	8,080	88,72	18,218	11,965	0,160			
N-Hexano	64,85	338,00				337,61	2,448	1,840	206,27	7,185	104,01	16,527	14,921	0,160			
Perfluorheptano	67,95	341,10				92,65	1,053	0,338	473,53	11,204	61,52	10,798	9,899	0,172			
R-141b	66,10	339,25				205,62	1,224	0,858	270,53	10,176	85,70	11,785	14,763	0,163			
R-368mfc	66,35	339,50				164,96	1,516	1,035	303,41	12,167	68,45	16,432	12,487	0,165			
Agua	75,30	348,45				25	Baja	Acero grande	2321,66	4,198	1,958	374,16	11,470	665,31	22,577	66,271	0,138
Diétil éter	80,90	354,05							315,44	2,817	1,783	137,36	8,951	110,55	20,356	11,807	0,162
Isopentano	78,45	351,60	300,12	2,600	1,899				132,91	8,397	84,54	19,611	10,449	0,155			
N-Hexano	78,20	351,35	326,89	2,515	1,901				184,75	7,454	99,82	17,817	13,569	0,157			
Perfluorheptano	81,15	354,30	89,28	1,078	0,347				403,47	11,627	60,16	11,636	8,790	0,168			
R-141b	79,55	352,70	197,95	1,252	0,877				239,27	10,646	82,07	12,597	13,263	0,159			
R-368mfc	79,70	352,85	158,19	1,548	1,066				259,93	12,727	61,78	17,574	11,096	0,160			
Agua	82,15	355,30	32	Baja	Acero grande				2304,25	4,204	1,976	342,79	11,690	669,92	23,236	64,904	0,147
Diétil éter	87,25	360,40							308,74	2,879	1,803	130,68	9,110	108,47	21,015	11,076	0,160
Isopentano	85,15	358,30				293,47	2,646	1,930	125,53	8,557	82,56	20,322	9,761	0,154			
N-Hexano	85,20	358,35				321,05	2,552	1,933	174,64	7,595	97,68	18,512	12,922	0,158			
Perfluorheptano	88,15	361,30				87,40	1,092	0,352	369,37	11,845	59,42	12,095	8,205	0,167			
R-141b	87,10	360,25				193,39	1,269	0,888	223,62	10,909	80,10	13,059	12,498	0,159			
R-368mfc	86,25	359,40				154,69	1,565	1,081	241,06	13,008	58,60	18,131	10,375	0,158			
Agua	93,05	366,20				43	Baja	Acero grande	2275,95	4,214	2,009	301,61	12,043	675,90	24,339	63,114	0,151
Diétil éter	97,60	370,75							297,07	2,973	1,835	120,53	9,369	105,16	22,113	9,917	0,157
Isopentano	96,05	369,20	281,65	2,726	1,979				114,36	8,823	79,45	21,510	8,693	0,152			
N-Hexano	95,95	369,10	311,83	2,612	1,982				160,43	7,814	94,46	19,607	11,888	0,157			
Perfluorheptano	98,55	371,70	84,45	1,113	0,360				324,93	12,161	58,31	12,797	7,344	0,165			
R-141b	97,85	371,00	186,51	1,296	0,902				203,26	11,285	77,37	13,725	11,279	0,157			
R-368mfc	96,80	369,95	148,79	1,593	1,104				213,52	13,471	53,66	19,113	9,267	0,156			

Tabla A V.8: Valor de las propiedades termofísicas de todos los fluidos ensayados para el termosifón de acero grande, con carga media.

SUSTANCIA	Temp. fluido		T.Amb. (°C)	CARGA	TERMOSIFÓN	CARGA	T.Amb. (°C)	P _v bar	ρ _l kg/m ³	ρ _v kg/m ³	h _{fg} kJ/kg	c _{pl} kJ/kg·K	c _{pv} kJ/kg·K	h _l kJ/kg	h _v kJ/kg	A _v m ²	k _l m/W/m	k _v m/W/m	σ mN/m	R _{term} K/W
	°C	K																		
Agua	62.90	336.05						0.203	979.26	0.148	2352.50	4.191	1.932	445.51	11.075	655.17	21.452	68.622	0.144	
Diétil éter	63.55	336.70						2.535	660.37	7.497	332.40	2.647	1.730	157.77	8.517	116.40	18.615	13.518	0.155	
Isopentano	66.40	339.55						3.197	569.05	9.238	311.21	2.522	1.844	147.39	8.116	88.24	18.373	12.026	0.163	
N-Hexano	62.70	335.85	10	Media	Acero grande	Media	10	0.800	618.72	2.695	339.28	2.438	1.830	210.05	7.142	104.70	16.324	14.756	0.155	
Perfluorheptano	65.80	338.95						0.562	1.607.68	8.257	93.18	1.049	0.336	493.40	11.134	61.74	10.664	10.204	0.169	
R-141b	63.40	336.55						2.648	1.151.51	12.231	207.10	1.219	0.854	277.42	10.081	86.45	11.624	14.836	0.161	
R-365mfc	64.45	337.60						2.212	1.167.64	12.856	165.89	1.511	1.031	310.22	12.088	69.41	16.259	12.326	0.161	
Ciclohex+Metanol	62.60	335.75						2.230	724.25	2.957	236.60	2.090	1.383	292.61	8.800	125.64	15.237	18.599	0.151	
Agua	74.85	348.00						0.532	972.66	0.240	2322.79	4.198	1.957	376.39	11.456	664.98	22.535	66.295	0.139	
Diétil éter	76.85	350.00						3.655	642.67	10.659	319.55	2.777	1.771	141.82	8.850	111.89	19.941	11.812	0.152	
Isopentano	79.90	353.05						4.491	552.81	12.851	298.72	2.610	1.906	131.28	8.431	84.11	19.764	10.423	0.158	
N-Hexano	76.40	349.55	25	Media	Acero grande	Media	25	1.230	605.01	4.043	328.37	2.506	1.893	187.48	7.418	100.38	17.640	13.656	0.153	
Perfluorheptano	81.55	354.70						0.956	1.557.66	13.845	89.18	1.079	0.348	401.42	11.640	60.11	11.662	8.732	0.170	
R-141b	78.20	351.35						3.933	1.119.19	17.847	198.75	1.249	0.875	242.20	10.599	82.43	12.515	13.359	0.157	
R-365mfc	78.40	351.55						3.299	1.133.13	19.324	158.87	1.545	1.063	263.86	12.671	62.42	17.465	10.814	0.157	
Ciclohex+Metanol	76.80	349.95						3.479	707.46	4.550	230.88	2.169	1.445	256.03	9.137	121.14	16.544	16.774	0.151	
Agua	81.55	354.70						0.465	968.73	0.311	2305.78	4.203	1.974	345.35	11.671	669.55	23.177	65.035	0.139	
Diétil éter	83.80	356.95						4.367	633.06	12.691	312.42	2.846	1.792	134.27	9.024	109.60	20.655	11.072	0.151	
Isopentano	86.50	359.65						5.253	544.52	14.977	292.08	2.656	1.936	124.09	8.589	82.17	20.467	9.745	0.157	
N-Hexano	83.15	356.30	32	Media	Acero grande	Media	32	1.493	598.08	4.875	322.77	2.541	1.924	177.53	7.554	98.30	18.307	13.004	0.153	
Perfluorheptano	88.70	361.85						1.197	1.535.19	17.241	87.25	1.093	0.353	366.85	11.862	59.36	12.131	8.162	0.161	
R-141b	84.85	358.00						4.641	1.104.16	20.950	194.77	1.264	0.884	228.15	10.831	80.68	12.921	12.553	0.157	
R-365mfc	85.05	358.20						3.941	1.115.87	23.221	155.34	1.562	1.078	244.41	12.956	59.18	18.027	10.125	0.156	
Ciclohex+Metanol	83.55	356.70						4.241	699.26	5.509	231.09	2.209	1.475	240.44	9.296	119.05	17.201	15.916	0.151	
Agua	92.35	365.50						0.710	962.01	0.459	2277.79	4.213	2.007	303.98	12.020	675.57	24.266	63.101	0.138	
Diétil éter	95.25	368.40						5.751	616.58	16.721	299.81	2.953	1.827	122.76	9.310	105.91	21.861	9.918	0.151	
Isopentano	97.25	370.40						6.661	530.43	19.032	280.26	2.736	1.984	113.19	8.853	79.12	21.643	8.683	0.154	
N-Hexano	94.05	367.20	43	Media	Acero grande	Media	43	2.010	586.61	6.494	313.48	2.601	1.973	162.84	7.775	95.02	19.411	11.978	0.153	
Perfluorheptano	96.15	369.30						1.491	1.512.12	21.484	85.15	1.108	0.358	334.60	12.089	58.57	12.633	7.311	0.161	
R-141b	95.55	368.70						5.956	1079.15	26.834	188.03	1.290	0.899	207.44	11.204	77.95	13.582	11.345	0.154	
R-365mfc	95.75	368.90						5.146	1086.81	30.842	149.39	1.590	1.101	216.12	13.424	54.14	19.008	9.055	0.153	
Ciclohex+Metanol	94.40	367.55						5.705	685.74	7.376	231.82	2.275	1.522	217.32	9.553	115.77	18.303	14.551	0.150	

Tabla A V.9: Valor de las propiedades termofísicas de todos los fluidos ensayados para el termosifón de acero grande, con carga alta.

SUSTANCIA	Temp. fluido		T. Amb. (°C)	p _v bar	ρ _l kg/m ³	ρ _v kg/m ³	h _{fg} kJ/kg	c _{pl} kJ/kg·K	c _{pv} kJ/kg·K	μ _l μPa·s	μ _v μPa·s	k _l mW/m	k _v mW/m	σ mN/m	R _{term} KW	
	°C	K														
Agua	63,45	336,60	10	0,207	978,97	0,151	2351,15	4,191	1,933	441,86	11,092	655,67	21,500	68,373	0,150	
Diétil éter	64,10	337,25		2,574	659,66	7,611	331,88	2,653	1,732	157,07	8,531	116,21	18,668	13,505	0,159	
Isopentano	64,95	338,10		3,070	570,74	8,903	312,48	2,513	1,837	149,25	8,082	88,69	18,228	12,134	0,161	
N-Hexano	63,55	336,70		0,826	617,89	2,766	338,62	2,442	1,834	208,55	7,159	104,43	16,404	15,682	0,153	
Perfluorheptano	67,25	340,40		0,883	1603,07	8,678	92,82	1,052	0,337	483,85	11,181	61,59	10,754	9,837	0,167	
R-141b	63,20	336,35		2,626	1151,93	12,166	207,20	1,219	0,854	277,94	10,074	86,50	11,612	15,404	0,155	
R-365mfc	64,30	337,45		2,192	1168,00	12,798	165,97	1,511	1,030	310,77	12,082	69,48	16,245	12,392	0,157	
Ciclohexil+Metanol	62,65	335,80		2,233	724,20	2,962	210,50	2,090	1,383	292,47	8,802	125,62	15,241	18,592	0,152	
Agua	76,75	349,90		25	0,365	971,56	0,259	2317,99	4,199	1,962	367,11	11,517	666,34	22,714	66,020	0,146
Diétil éter	78,50	351,65			3,818	640,41	11,116	317,89	2,794	1,776	139,99	8,891	111,34	20,109	11,847	0,157
Isopentano	78,55	351,70	4,338		554,48	12,447	300,03	2,601	1,899	132,80	8,399	84,51	19,622	10,562	0,156	
N-Hexano	77,30	350,45	1,268		604,09	4,147	327,63	2,510	1,897	186,11	7,436	100,10	17,728	14,246	0,152	
Perfluorheptano	80,50	353,65	0,916		1560,97	13,396	89,46	1,077	0,347	406,83	11,606	60,22	11,594	8,707	0,162	
R-141b	77,15	350,30	3,813		1121,54	17,392	199,36	1,247	0,874	244,51	10,562	82,71	12,451	13,645	0,152	
R-365mfc	78,25	351,40	3,271		1133,51	19,243	158,95	1,544	1,063	264,31	12,665	62,50	17,452	10,817	0,154	
Ciclohexil+Metanol	76,85	350,00	3,484		707,40	4,556	204,83	2,170	1,445	255,91	9,138	121,13	16,549	16,767	0,151	
Agua	82,85	356,00	32		0,477	967,94	0,326	2302,45	4,204	1,978	339,85	11,713	670,36	23,305	64,750	0,144
Diétil éter	84,90	358,05			4,500	631,51	13,039	311,26	2,857	1,795	133,11	9,051	109,24	20,769	11,084	0,155
Isopentano	85,40	358,55		5,103	545,92	14,604	293,21	2,648	1,931	125,26	8,563	82,49	20,349	9,890	0,155	
N-Hexano	83,85	357,00		1,534	597,36	4,968	322,19	2,545	1,927	176,54	7,568	98,09	18,377	13,563	0,150	
Perfluorheptano	86,95	360,10		1,124	1540,66	16,353	87,73	1,090	0,352	374,96	11,808	59,55	12,016	8,088	0,161	
R-141b	83,65	356,80		4,490	1106,90	20,360	195,50	1,261	0,883	230,62	10,789	81,00	12,847	12,807	0,151	
R-365mfc	84,80	357,95		3,905	1116,53	23,064	155,47	1,561	1,077	245,11	12,945	59,30	18,005	10,112	0,152	
Ciclohexil+Metanol	83,60	356,75		4,244	699,19	5,516	206,48	2,209	1,475	240,33	9,297	119,04	17,206	15,910	0,151	
Agua	93,00	366,15		43	0,713	961,59	0,470	2276,08	4,214	2,009	301,78	12,042	675,88	24,334	62,685	0,140
Diétil éter	95,05	368,20			5,740	616,87	16,642	300,04	2,951	1,827	122,96	9,305	105,97	21,840	9,943	0,153
Isopentano	96,05	369,20	6,465		532,04	18,540	281,65	2,726	1,979	114,36	8,823	79,45	21,510	8,818	0,153	
N-Hexano	94,25	367,40	2,032		586,40	6,527	313,30	2,602	1,974	162,58	7,779	94,96	19,432	12,500	0,148	
Perfluorheptano	97,30	370,45	1,531		1508,59	22,211	84,81	1,110	0,359	329,93	12,124	58,44	12,711	7,220	0,158	
R-141b	93,95	367,10	5,723		1082,96	25,878	189,07	1,286	0,897	210,41	11,149	78,35	13,483	11,558	0,148	
R-365mfc	95,70	368,85	5,129		1086,95	30,802	149,42	1,590	1,101	216,24	13,422	54,16	19,003	9,050	0,150	
Ciclohexil+Metanol	94,30	367,45	5,694		685,87	7,356	206,07	2,274	1,522	217,52	9,551	115,80	18,293	14,563	0,150	

Tabla A V.10: Valor de las propiedades termofísicas de todos los fluidos ensayados para el termosifón de aluminio (SCP), con carga baja.

SUSTANCIA	Temp. fluido		T. Amb. (°C)	CARGA	TERMOSIFÓN	P _v bar	ρ _l kg/m ³	ρ _v kg/m ³	h _{fg} kJ/kg	c _{p,l} kJ/kg·K	c _{p,v} kJ/kg·K	μ _l μPa·s	μ _v μPa·s	k _l mW/m	k _v mW/m	σ mN/m	R _{term} KW			
	°C	K																		
Agua	28,52	301,67	10	Baja	Prismático aluminio SCP	0,039	995,31	0,028	2434,11	4,182	1,888	832,19	10,007	613,50	18,785	71,437	0,626			
Diétil éter	24,77	297,92				0,710	708,06	2,225	366,57	1,614	220,79	7,548	130,28	15,059	16,481	0,461				
Isopentano	25,57	298,72				0,936	613,84	2,827	343,96	1,653	213,41	7,172	101,80	14,578	14,391	0,490				
N-Pentano	23,95	297,10				0,657	622,00	1,978	367,22	2,316	1,687	216,55	6,814	113,12	14,081	15,534	0,423			
R-141b	26,22	299,37				0,838	1227,85	3,991	225,81	1,156	0,799	402,16	8,783	97,19	94,77	18,001	0,560			
R-365míc	23,00	296,15				0,482	1260,51	2,979	184,12	1,428	0,929	514,33	10,415	90,49	10,150	15,307	0,448			
Acetona + Pentano	24,67	297,82				0,725	652,41	1,483	400,56	2,290	1,610	232,66	7,045	122,04	13,584	16,984	0,408			
D.éter+Met.metilo	22,36	295,51				0,806	811,40	1,876	434,23	2,169	1,346	287,72	9,058	161,10	13,321	17,963	0,400			
Agua	35,85	309,00				25	Baja	Prismático aluminio SCP	0,059	992,24	0,042	2417,13	4,183	1,895	713,23	10,230	624,21	19,297	70,277	0,508
Diétil éter	36,56	309,71							1,092	694,08	3,337	356,46	2,420	1,649	198,28	7,843	125,95	16,088	15,079	0,417
Isopentano	37,93	311,08	1,417	600,83	4,191				334,51	2,358	1,711	189,88	7,461	97,54	15,660	13,070	0,530			
N-Pentano	36,61	309,76	1,032	609,06	3,018				356,83	2,375	1,740	193,43	7,101	108,41	15,256	14,160	0,397			
Perfluorheptano	40,08	313,23	0,206	1688,57	3,127				99,11	1,000	0,316	714,44	10,278	64,32	9,119	11,138	0,637			
R-141b	41,28	314,43	1,408	1197,57	6,502				218,55	1,180	0,822	343,68	9,308	92,73	10,330	16,147	0,525			
R-365míc	35,99	309,14	0,826	1232,60	4,951				178,80	1,452	0,962	436,55	10,935	83,92	12,725	13,836	0,442			
Acetona + Pentano	35,67	308,82	1,150	640,86	2,185				391,23	2,338	1,653	210,76	7,306	117,89	14,528	15,741	0,366			
Ciclohex+Metanol	34,84	307,99	0,907	755,58	1,110				508,28	1,947	1,263	386,38	8,121	134,80	12,993	22,264	0,406			
D.éter+Met.metilo	36,35	309,50	1,339	793,19	3,074				419,05	2,226	1,382	252,28	9,485	155,44	14,465	16,302	0,378			

Tabla A V.10: Valor de las propiedades termodinámicas de todos los fluidos ensayados para el termosifón de aluminio (SCP), con carga baja. (Continuación).

SUSTANCIA	Temp. fluido		T.Amb. (°C)	CARGA	TERMOSIFÓN	P _s bar	ρ _l kg/m ³	ρ _s kg/m ³	h _{fg} kJ/kg	c _{pl} kJ/kg·K	c _{pv} kJ/kg·K	μ _l μPa·s	μ _v μPa·s	k _l mW/m	k _v mW/m	σ bar	R _{term} kg/m ³			
	°C	K																		
Agua	43,98	317,13	32	Baja	Prismático aluminio SCP	0,091	988,62	0,062	2398,06	4,184	1,904	609,97	10,481	634,87	19,901	689,58	0,508			
Diétil éter	42,06	315,21				1,318	687,41	3,984	351,69	2,460	1,665	188,92	7,980	123,97	16,584	14,432	0,390			
Isopentano	44,57	317,72				1,744	593,67	5,107	329,32	2,394	1,742	178,69	7,614	95,30	16,265	12,370	0,531			
N-Pentano	42,07	315,22				1,238	603,35	3,581	352,11	2,403	1,762	184,49	7,223	106,41	15,779	13,575	0,367			
Perfluorheptano	46,30	319,45				0,269	1,669,29	4,022	97,73	1,012	0,321	650,25	10,487	63,70	9,485	10,574	0,624			
R-141b	48,91	322,06				1,803	1,181,92	8,170	214,72	1,193	0,833	318,59	9,575	90,53	10,771	15,221	0,496			
R-365mfc	42,45	315,60				1,058	1,218,37	6,256	176,02	1,464	0,978	403,23	11,194	80,62	13,737	13,119	0,447			
Acetona + Pentano	41,49	314,64				1,416	634,62	2,650	386,06	2,365	1,676	200,36	7,443	115,72	15,046	15,090	0,352			
Ciclohex+Metanol	43,29	316,44				1,161	746,23	1,530	501,27	1,989	1,299	353,75	8,333	131,97	13,631	21,133	0,418			
D.éter+Met. metilo	42,89	316,04				1,671	784,47	3,805	411,79	2,257	1,399	237,84	9,684	152,83	15,020	15,535	0,370			
Agua	55,19	328,34				43	Baja	Prismático aluminio SCP	0,159	983,23	0,105	2371,26	4,187	1,920	502,47	10,831	647,64	20,796	67,078	0,500
Diétil éter	52,54	325,69							1,848	674,43	5,483	342,45	2,547	1,697	172,76	8,242	120,23	17,557	13,215	0,393
Isopentano	54,87	328,02							2,362	582,28	6,823	321,02	2,452	1,790	162,99	7,850	91,91	17,237	11,298	0,556
N-Pentano	52,28	325,43							1,707	592,49	4,848	342,92	2,456	1,805	169,22	7,448	102,76	16,781	12,493	0,351
Perfluorheptano	55,75	328,90	0,394	1,639,58	5,771				95,57	1,030	0,328	566,91	10,803	62,76	10,050	9,732	0,610			
R-141b	58,33	331,48	2,403	1,162,27	10,665				209,82	1,209	0,847	290,97	9,904	87,86	11,323	14,090	0,500			
R-365mfc	52,74	325,89	1,531	1,195,12	8,882				171,42	1,486	1,003	356,19	11,609	75,37	15,061	11,999	0,438			
Acetona + Pentano	51,66	324,81	1,959	623,50	3,642				376,69	2,414	1,715	183,89	7,681	112,02	15,977	13,966	0,346			
Ciclohex+Metanol	52,90	326,05	1,590	735,41	2,149				492,89	2,038	1,341	321,34	8,568	128,79	14,405	19,864	0,385			
D.éter+Met. metilo	53,13	326,28	2,321	770,51	5,216				400,15	2,311	1,426	217,45	9,997	148,79	15,916	14,348	0,372			

Tabla A V.11: Valor de las propiedades termofísicas de todos los fluidos ensayados para el termosifón de aluminio (SCP), con carga media.

SUSTANCIA	Temp. fluido		T _{Amb.} (°C)	CARGA	TERMOSIFÓN	ρ _s bar	ρ _l kg/m ³	ρ _v kg/m ³	h _{fg} kJ/kg	c _{pl} kJ/kg·K	c _{pv} kJ/kg·K	μ _l μPa·s	μ _v μPa·s	k _l mW/m	k _v mW/m	σ bar	R _{term} kg/m ³			
	°C	K																		
Agua	24,08	297,23	10	Media	Prismático aluminio SCP	0,030	997,08	0,022	2444,31	4,182	1,884	919,91	9,873	606,48	18,488	721,25	0,601			
Diétil éter	19,81	292,96				0,585	713,85	1,854	370,80	2,319	1,599	231,45	7,424	14,639	17,078	0,533				
Isopentano	28,24	301,39				1,027	611,06	3,087	341,94	2,308	1,665	208,00	7,235	14,806	14,104	0,599				
N-Pentano	21,89	295,04				0,608	624,07	1,839	368,83	2,307	1,678	220,67	6,767	13,896	15,759	0,523				
Perfluorheptano	26,58	299,73				0,110	1729,42	1,732	101,98	0,975	0,306	887,59	9,822	65,64	8,337	12,384	0,732			
R-141b	24,29	297,44				0,770	1231,69	3,734	226,72	1,154	0,796	410,69	8,715	97,77	9,369	18,241	0,513			
R-365míc	21,49	294,64				0,451	1263,70	2,798	184,72	1,426	0,925	524,45	10,354	91,25	9,796	15,481	0,441			
Acetona + Pentano	24,64	297,79				0,724	652,44	1,481	400,59	2,290	1,610	232,73	7,044	122,05	13,581	16,987	0,422			
D.éter + Met. metilo	22,03	295,18				0,796	811,82	1,853	434,58	2,168	1,345	288,63	9,048	161,24	13,295	18,003	0,406			
Agua	33,23	306,38				25	Media	Prismático aluminio SCP	0,051	993,36	0,036	2423,24	4,182	1,893	752,61	10,150	620,49	19,110	70,696	0,468
Diétil éter	36,32	309,47							1,083	694,36	3,311	356,67	2,418	1,648	198,70	7,837	126,04	16,067	15,106	0,466
Isopentano	41,47	314,62							1,585	597,02	4,662	331,75	2,377	1,728	183,80	7,543	96,34	15,981	12,696	0,674
N-Pentano	36,92	310,07							1,043	608,73	3,048	356,57	2,377	1,741	192,90	7,108	108,29	15,286	14,127	0,492
Perfluorheptano	40,19	313,34							0,207	1688,24	3,141	99,08	1,001	0,317	713,23	10,282	64,31	9,125	11,128	0,729
R-141b	35,81	308,96	1,169	1208,65	5,479				221,23	1,171	0,814	363,43	9,117	94,34	10,017	16,817	0,445			
R-365míc	35,28	308,43	0,803	1234,16	4,821				179,10	1,451	0,960	440,45	10,906	84,28	12,603	13,916	0,465			
Acetona + Pentano	37,64	310,79	1,237	638,75	2,335				389,49	2,347	1,661	207,14	7,352	117,15	14,702	15,519	0,423			
Ciclohexano + Metanol	37,32	310,47	0,971	752,85	1,223				506,26	1,959	1,274	376,34	8,184	133,97	13,176	21,931	0,434			
D.éter + Met. metilo	36,35	309,50	1,356	792,71	3,111				418,65	2,228	1,383	251,44	9,496	155,29	14,496	16,259	0,406			

Tabla A V.11: Valor de las propiedades termofísicas de todos los fluidos ensayados para el termosifón de aluminio (SCP), con carga media. (Continuación).

SUSTANCIA	Temp. fluido		Temp. Amb. (°C)	CARGA	TERMOSIFÓN	ρ _v kg/m ³	ρ _l kg/m ³	ρ _v kg/m ³	h _{fg} kJ/kg	c _{p,l} kJ/kg·K	c _{p,v} kJ/kg·K	μ _l μPa·s	μ _v μPa·s	k _l mW/m	k _v mW/m	σ bar	R _{term} kg/m ³			
	°C	K																		
Agua	42,21	315,36	32	Media	Prismático aluminio SCP	983,83	989,42	0,057	2402,23	4,184	1,902	630,30	10,426	632,66	19,767	69,248	0,473			
Dietil éter	40,93	314,08				688,78	3,844	1,662	190,78	7,952	124,37	14,564	0,417							
Isopentano	46,89	320,04				591,13	5,461	1,753	174,99	7,668	94,53	12,127	0,671							
N-Pentano	43,58	316,73				601,77	3,749	1,769	182,13	7,256	105,87	13,414	0,478							
Perfluorheptano	46,56	319,71				1,668,46	4,065	0,321	64,769	10,496	63,68	10,551	0,728							
R-141b	41,98	315,13				1,196,15	6,643	0,823	34,128	9,332	92,53	16,062	0,426							
R-365mfc	41,84	314,99				1,219,73	6,122	0,976	406,25	11,169	80,94	13,648	0,468							
Acetona + Pentano	42,03	315,18				634,04	2,696	1,678	199,44	7,455	115,53	15,094	0,378							
Ciclohexano+Metanol	44,67	317,82				744,69	1,609	1,305	348,79	8,367	131,50	20,949	0,433							
D.éter+Met.metilo	42,43	315,58				785,08	3,751	1,398	238,81	9,670	153,01	14,982	0,379							
Agua	53,98	327,13				43	Media	Prismático aluminio SCP	983,83	983,83	0,100	2374,19	4,187	1,918	512,54	10,793	646,36	20,696	67,285	0,478
Dietil éter	51,39	324,54							675,87	5,300	2,537	174,43	8,214	120,64	13,348	0,416				
Isopentano	56,82	329,97							580,07	7,193	1,799	160,21	7,895	91,28	11,097	0,577				
N-Pentano	53,88	327,03							590,75	5,077	1,812	166,97	7,483	102,19	12,324	0,465				
Perfluorheptano	57,16	330,31	1,635,14	6,076	0,330				55,580	10,849	62,62	10,135	0,718							
R-141b	52,13	325,28	1,175,26	8,964	0,838				308,78	9,687	89,61	10,958	0,413							
R-365mfc	52,15	325,30	1,196,47	8,711	1,001				358,71	11,585	75,67	12,062	0,465							
Acetona + Pentano	51,93	325,08	623,20	3,672	1,716				183,48	7,687	111,92	13,937	0,365							
Ciclohexano+Metanol	53,46	326,61	734,78	2,190	1,343				319,60	8,581	128,61	14,451	0,391							
D.éter+Met.metilo	52,98	327,13	770,72	5,192	1,426				217,74	9,992	148,85	15,902	0,372							

Tabla A V.12: Valor de las propiedades termofísicas de todos los fluidos ensayados para el termosifón de aluminio (SCP), con carga alta.

SUSTANCIA	Temp. fluido		T _{Amb.} (°C)	CARGA	TERMOSIFÓN	ρ _s bar	ρ _l kg/m ³	ρ _v kg/m ³	h _{fg} kJ/kg	c _{pl} kJ/kg·K	c _{pv} kJ/kg·K	μ _l μPa·s	μ _v μPa·s	k _l mW/m	k _v mW/m	σ bar	R _{term} kg/m ³			
	°C	K																		
Agua	22,33	295,48	10	Alta	Prismático aluminio SCP	0,027	997,75	0,020	2448,29	4,182	1,883	958,22	9820	603,62	18,375	723,92	0,586			
Diétil éter	24,51	297,66				0,703	708,37	2,204	366,79	2,343	1,613	221,33	7,541	130,38	15,036	16,512	0,497			
Isopentano	21,21	294,36				0,801	618,34	2,438	347,26	2,273	1,632	222,68	7,068	103,33	14,211	14,862	0,540			
N-Pentano	24,79	297,94				0,678	621,15	2,037	366,55	2,320	1,690	214,90	6,834	112,80	14,158	15,441	0,471			
Perfluorheptano	26,94	300,09				0,112	1728,33	1,762	101,90	0,975	0,306	882,14	9,834	65,60	8,358	12,349	0,731			
R-141b	23,74	296,89				0,753	1232,79	3,662	226,98	1,153	0,795	413,20	8,696	97,94	9,338	18,311	0,551			
R-365míc	22,62	295,77				0,474	1261,32	2,932	184,27	1,428	0,928	516,87	10,399	90,68	10,062	15,351	0,510			
Acetona + Pentano	23,79	296,94				0,695	653,33	1,435	401,29	2,286	1,607	234,58	7,024	122,38	13,510	17,085	0,550			
D.éter+Met.metilo	22,00	295,15				0,795	811,86	1,851	434,62	2,168	1,345	288,72	9,047	161,25	13,293	18,007	0,426			
Agua	35,85	309,00				25	Alta	Prismático aluminio SCP	0,050	992,24	0,042	2417,13	4,183	1,895	713,23	10,230	624,21	19,297	70,277	0,496
Diétil éter	38,50	311,65							1,168	691,73	3,555	354,78	2,434	1,655	194,90	7,891	125,25	16,262	14,850	0,507
Isopentano	34,77	307,92							1,279	604,20	3,802	336,95	2,341	1,696	195,54	7,388	98,61	15,377	13,406	0,519
N-Pentano	39,09	312,24	1,122	606,47	3,264				354,70	2,388	1,750	189,30	7,157	107,50	15,492	13,893	0,502			
Perfluorheptano	39,97	313,12	0,205	1688,91	3,113				99,13	1,000	0,316	715,66	10,274	64,33	9,113	11,148	0,733			
R-141b	38,10	311,25	1,265	1204,02	5,891				220,11	1,175	0,817	354,95	9,197	93,66	10,148	16,536	0,518			
R-365míc	36,63	309,78	0,847	1231,20	5,070				178,53	1,453	0,963	433,10	10,960	83,59	12,833	13,764	0,520			
Acetona + Pentano	36,61	309,76	1,191	639,86	2,256				390,40	2,342	1,657	209,02	7,328	117,54	14,611	15,635	0,472			
Ciclohex+Metanol	34,80	307,95	0,906	755,63	1,109				508,32	1,947	1,263	386,55	8,120	134,82	12,990	22,270	0,400			
D.éter+Met.metilo	36,54	309,69	1,348	792,93	3,094				418,84	2,227	1,383	251,84	9,491	155,36	14,481	16,279	0,472			

Tabla A V.12: Valor de las propiedades termofísicas de todos los fluidos ensayados para el termosifón de aluminio (SCP), con carga alta. (Continuación).

SUSTANCIA	Temp. fluido		T. Amb. (°C)	CARGA	TERMOSIFÓN	Temp. fluido	ρ _v bar	ρ _l kg/m ³	ρ _s kg/m ³	h _{fg} kJ/kg	c _{pl} kJ/kg·K	c _{pv} kJ/kg·K	μ _l μPa·s	μ _v μPa·s	k _l mW/m	k _v mW/m	σ mN/m	R _{term} K/W			
	°C	K																			
Agua	41,51	314,66	32	Alta	Prismático aluminio SCP	316,08	0,080	989,74	0,055	2403,88	4,183	1,902	638,66	10,404	631,77	19,714	69,362	0,477			
Diétil éter	42,93	316,08				314,69	1,357	686,34	4,095	350,93	2,467	1,668	187,49	8,002	123,65	16,664	14,330	0,478			
Isopentano	41,54	314,69				317,03	1,588	596,96	4,671	331,70	2,377	1,728	183,69	7,544	96,32	15,986	12,689	0,522			
N-Pentano	43,88	317,03				319,45	1,313	601,44	3,784	350,51	2,412	1,770	181,65	7,263	105,76	15,955	13,381	0,439			
Perfluorheptano	46,30	319,45				315,61	0,269	1669,29	4,022	97,73	1,012	0,321	650,25	10,487	63,70	9,485	10,574	0,726			
R-141b	42,46	315,61				316,13	1,464	1195,17	6,741	217,97	1,182	0,824	339,64	9,349	92,39	10,397	16,004	0,445			
R-365mfc	42,98	316,13				316,01	1,079	1217,20	6,374	175,79	1,465	0,979	400,65	11,215	80,36	13,813	13,061	0,492			
Acetona + Pentano	42,86	316,01				316,52	1,483	633,14	2,770	384,82	2,371	1,681	198,02	7,475	113,22	15,169	14,938	0,464			
Ciclohex+Metanol	43,37	316,52				315,47	1,164	746,14	1,534	501,20	1,989	1,300	353,45	8,335	131,94	13,637	21,122	0,420			
D éter+Met. metilo	42,32	315,47					1,640	785,22	3,738	412,42	2,254	1,398	239,04	9,667	153,05	14,972	15,601	0,408			
Agua	53,56	326,71				43	Alta	Prismático aluminio SCP	325,02	0,147	984,04	0,098	2375,20	4,187	1,917	516,10	10,780	645,92	20,661	67,356	0,477
Diétil éter	51,87	325,02							325,25	1,810	675,27	5,376	343,04	2,541	1,695	173,73	8,226	120,47	17,494	13,292	0,481
Isopentano	52,10	325,25							325,79	2,182	585,37	6,325	323,28	2,436	1,777	167,02	7,787	92,81	16,973	11,584	0,533
N-Pentano	52,64	325,79							329,48	1,726	592,09	4,899	342,58	2,458	1,806	168,71	7,456	102,63	16,817	12,455	0,376
Perfluorheptano	56,33	329,48	326,18	0,403	1637,74				5,896	95,44	1,031	0,329	562,28	10,822	62,70	10,085	9,681	0,720			
R-141b	51,83	324,98	326,44	1,975	1175,87				8,889	213,22	1,198	0,838	309,66	9,677	89,69	10,941	14,869	0,418			
R-365mfc	53,03	326,18	326,05	1,546	1194,47				8,965	171,29	1,486	1,004	354,99	11,621	75,22	15,094	11,968	0,473			
Acetona + Pentano	53,11	326,26	326,44	2,046	621,89				3,804	375,32	2,422	1,721	181,70	7,714	111,49	16,113	13,807	0,453			
Ciclohex+Metanol	53,29	326,44		1,611	734,96				2,178	492,54	2,040	1,343	320,11	8,577	128,66	14,437	19,813	0,403			
D éter+Met. metilo	52,90	326,05		2,304	770,84				5,188	400,42	2,310	1,425	217,89	9,989	148,89	15,895	14,374	0,403			

Tabla A V.13: Valor de las propiedades termofísicas de todos los fluidos ensayados para el termosifón de aluminio (CCP), con carga baja.

SUSTANCIA	Temp. fluido		T.Amb. (°C)	CARGA	TERMOSIFÓN	ρ _s kg/m ³	ρ _v kg/m ³	h _{fg} kJ/kg	c _{pl} kJ/kg·K	c _{pv} kJ/kg·K	μ _l μPa·s	μ _v μPa·s	k _l mW/m	k _v mW/m	σ mN/m	R _{term} KW
	°C	K														
Agua	14.01	287.16	10	Baja	Prismático aluminio CCP	1000.83	0.012	2467.15	4.183	1.875	1178.90	9.574	589.06	17.859	73.643	0.651
Diétil éter	20.06	293.21				713.55	1.872	370.58	2.320	1.600	230.88	7.430	132.03	14.660	17.047	0.450
Isopentano	22.16	295.31				617.36	2.519	346.54	2.277	1.637	220.62	7.091	103.00	14.290	14.760	0.464
N-Pentano	21.50	294.65				624.46	1.814	369.13	2.305	1.677	221.47	6.758	114.05	13.861	15.801	0.483
Perfluoroheptano	36.04	309.19				1700.94	2.639	99.98	0.993	0.313	760.87	10.142	64.71	8.884	11.507	0.611
R-141b	19.39	292.54				1241.40	3.138	228.99	1.146	0.788	433.62	8.544	99.25	9.097	18.854	0.481
R-365mfc	22.81	295.96				1260.91	2.956	184.20	1.428	0.928	515.59	10.407	90.59	10.106	15.329	0.439
Acetona + Pentano	22.05	295.20				655.12	1.345	402.71	2.279	1.600	238.40	6.982	123.05	13.365	17.283	0.430
D.éter+M.éter.meílico	20.65	293.80				813.58	1.760	436.05	2.163	1.342	293.53	9.006	161.80	13.186	18.169	0.420
Agua	34.25	307.40				25	Baja	Prismático aluminio CCP	992.92	0.038	2420.86	4.182	1.894	736.86	10.181	621.96
Diétil éter	34.81	307.96	696.17	3.149	357.97				2.407	1.644	201.39	7.799	126.59	15.933	15.285	0.424
Isopentano	36.34	309.49	602.53	3.991	335.74				2.349	1.704	192.71	7.424	98.08	15.517	13.240	0.577
N-Pentano	36.09	309.24	609.59	2.968	357.27				2.373	1.738	194.30	7.090	108.60	15.207	14.216	0.471
Perfluoroheptano	38.83	311.98	1692.39	2.970	99.38				0.998	0.316	728.30	10.236	64.44	9.046	11.251	0.599
R-141b	34.50	307.65	1211.28	5.254	221.86				1.169	0.812	366.37	9.071	94.72	9.943	16.977	0.464
R-365mfc	36.05	309.20	1232.47	4.962	178.77				1.452	0.962	436.22	10.937	83.89	12.736	13.829	0.440
Acetona + Pentano	34.16	307.31	642.46	2.076	392.54				2.331	1.647	213.57	7.270	118.45	14.396	15.910	0.446
Ciclohex+Metanol	31.52	304.67	759.21	0.973	510.95				1.932	1.249	400.47	8.056	135.93	12.753	22.712	0.508
D.éter+M.éter.meílico	34.62	307.77	795.47	2.900	420.95				2.218	1.378	256.30	9.432	156.13	14.321	16.505	0.402

Tabla A V.13: Valor de las propiedades termodinámicas de todos los fluidos ensayados para el termosifón de aluminio (CCP), con carga baja. (Continuación).

SUSTANCIA	Temp. fluido		T.Amb. (°C)	CARGA	TERMOSIFÓN	P _s bar	ρ _l kg/m ³	ρ _s kg/m ³	h _{fg} kJ/kg	c _{pl} kJ/kg·K	c _{ps} kJ/kg·K	μ _l μPa·s	μ _s μPa·s	k _l mW/m	k _s mW/m	σ mN/m	R _{term} K/W			
	°C	K																		
Agua	42,67	315,82	32	Baja	Prismático aluminio CCP	0,085	989,22	0,059	2401,16	4,184	1,903	624,96	10,440	633,24	19,801	691,73	0,615			
Diétil éter	41,85	315,00				1,309	687,66	3,958	351,87	2,459	1,665	189,26	7,975	124,04	16,566	14,456	0,413			
Isopentano	44,72	317,87				1,752	593,50	5,129	329,20	2,395	1,743	178,45	7,618	95,25	16,279	12,355	0,580			
N-Pentano	42,95	316,10				1,274	602,43	3,678	351,34	2,407	1,766	183,11	7,242	106,09	15,864	13,481	0,453			
Perfluorheptano	46,03	319,18				0,266	1670,13	3,980	97,79	1,012	0,321	652,85	10,478	63,73	9,469	10,599	0,584			
R-141b	41,45	314,60				1,416	1197,22	6,536	218,47	1,180	0,822	343,09	9,314	92,68	10,339	16,126	0,442			
R-365mfc	42,76	315,91				1,070	1217,70	6,323	175,89	1,465	0,978	401,75	11,206	80,47	13,780	13,086	0,439			
Acetona + Pentano	40,45	313,60				1,366	635,75	2,561	387,00	2,360	1,671	202,17	7,418	116,11	14,952	15,206	0,446			
Ciclohex+Metanol	40,82	313,97				1,076	748,98	1,396	503,35	1,977	1,289	362,83	8,271	132,79	13,440	21,462	0,482			
D.éter+Met. metilo	41,90	315,05				1,617	785,79	3,687	412,89	2,252	1,397	239,95	9,654	153,22	14,936	15,651	0,420			
Agua	54,12	327,27				43	Baja	Prismático aluminio CCP	0,151	983,77	0,101	2373,85	4,187	1,918	511,38	10,797	646,51	20,707	67,261	0,539
Diétil éter	52,75	325,90							1,860	674,17	5,517	342,26	2,549	1,697	172,46	8,247	120,16	17,576	13,191	0,393
Isopentano	54,24	327,39							2,320	582,98	6,707	321,54	2,449	1,787	163,90	7,836	92,12	17,177	11,363	0,482
N-Pentano	53,83	326,98							1,789	590,80	5,069	341,48	2,464	1,811	167,04	7,482	102,21	16,936	12,330	0,436
Perfluorheptano	57,53	330,68	0,422	1633,96	6,159				95,16	1,034	0,330	552,91	10,861	62,58	10,157	9,576	0,574			
R-141b	52,16	325,31	1,995	1175,19	8,973				213,05	1,198	0,838	308,68	9,688	89,60	10,960	14,829	0,426			
R-365mfc	53,36	326,51	1,564	1193,69	9,064				171,14	1,487	1,004	353,57	11,634	75,05	15,132	11,932	0,423			
Acetona + Pentano	51,10	324,25	1,926	624,13	3,581				377,22	2,411	1,713	184,75	7,667	112,22	15,925	14,028	0,450			
Ciclohex+Metanol	52,94	326,09	1,592	735,37	2,152				492,85	2,038	1,341	321,22	8,569	128,77	14,408	19,859	0,479			
D.éter+Met. metilo	53,15	326,30	2,322	770,49	5,218				400,14	2,311	1,426	217,42	9,997	148,79	15,917	14,346	0,440			

Tabla A V.14: Valor de las propiedades termofísicas de todos los fluidos ensayados para el termosifón de aluminio (CCP), con carga media.

SUSTANCIA	Temp. fluido		T.Amb. (°C)	CARGA	TERMOSIFÓN	CARGA	T.Amb. (°C)	p _v bar	ρ _l kg/m ³	ρ _v kg/m ³	h _{fg} kJ/kg	c _{pl} kJ/kg·K	c _{pv} kJ/kg·K	μ _l μPa·s	μ _v μPa·s	k _l mW/m	k _v mW/m	σ mN/m	R _{term} KW
	°C	K																	
Agua	14,01	287,16	10	Media	Prismático aluminio CCP	Media	10	0,016	1000,83	0,012	2467,15	4,183	1,875	1178,90	9,574	589,06	17,859	73,643	0,647
Diétil éter	19,50	292,65						0,578	714,20	1,834	371,06	2,317	1,599	232,13	7,416	132,24	14,613	17,114	0,461
Isopentano	24,30	297,45						0,895	615,15	2,709	344,92	2,288	1,647	216,05	7,142	102,24	14,470	14,528	0,529
N-Pentano	21,72	294,87						0,604	624,24	1,828	368,96	2,306	1,678	221,02	6,763	113,96	13,880	15,778	0,489
Perfluorheptano	21,89	295,04						0,087	1743,20	1,389	102,94	0,966	0,302	961,40	9,664	66,09	8,069	12,824	0,624
R-141b	19,98	293,13						0,446	1240,23	3,205	228,72	1,147	0,789	430,75	8,565	99,07	9,130	18,780	0,471
R-368mfic	21,24	294,39						0,632	1264,23	2,769	184,82	1,425	0,924	526,15	10,344	91,38	9,736	15,510	0,460
Acetona + Pentano	21,86	295,01						0,835	653,32	1,335	402,86	2,278	1,599	238,82	6,978	123,12	13,350	17,305	0,432
D.éter+Met.meilto	23,29	296,44						0,835	810,20	1,942	433,23	2,173	1,349	285,13	9,086	160,72	13,396	17,852	0,453
Agua	34,25	307,40						25	Media	Prismático aluminio CCP	Media	25	0,054	992,92	0,038	2420,86	4,182	1,894	736,86
Diétil éter	35,11	308,26	1,038	695,81	3,181	357,71	2,409						1,645	200,85	7,806	126,48	15,959	15,249	0,434
Isopentano	39,10	312,25	1,471	599,57	4,343	333,60	2,364						1,716	187,84	7,488	97,14	15,765	12,946	0,531
N-Pentano	35,86	309,01	1,006	609,83	2,946	357,47	2,372						1,737	194,70	7,084	108,68	15,185	14,241	0,461
Perfluorheptano	38,25	311,40	0,190	1694,18	2,898	99,50	0,997						0,315	734,94	10,216	64,50	9,012	11,304	0,630
R-141b	34,81	307,96	1,129	1210,67	5,306	221,72	1,170						0,812	367,21	9,082	94,63	9,960	16,940	0,467
R-368mfic	36,08	309,23	0,829	1232,40	4,968	178,76	1,452						0,962	436,05	10,938	83,87	12,741	13,826	0,480
Acetona + Pentano	34,11	307,26	1,084	642,51	2,073	392,58	2,331						1,647	213,66	7,269	118,47	14,392	15,915	0,438
Ciclohex+Metanol	30,85	304,00	0,821	759,94	0,947	511,47	1,928						1,246	403,41	8,019	136,16	12,706	22,803	0,519
D.éter+Met.meilto	34,60	307,75	1,260	795,50	2,898	420,97	2,218						1,378	256,35	9,431	156,14	14,319	16,508	0,449

Tabla A V.14: Valor de las propiedades termofísicas de todos los fluidos ensayados para el termosifón de aluminio (CCP), con carga media. (Continuación).

SUSTANCIA	Temp. fluido		T.Amb. (°C)	CARGA	TERMOSIFÓN	CARGA	T.Amb. (°C)	P _s bar	ρ _l kg/m ³	ρ _v kg/m ³	h _{fg} kJ/kg	c _{pl} kJ/kg·K	c _{pv} kJ/kg·K	μ _l μPa·s	μ _v μPa·s	k _l mW/m	k _v mW/m	σ mN/m	R _{term} KW					
	°C	K																						
Agua	43,55	316,70	32	Media	Prismático aluminio CCP	Media	32	0,089	988,81	0,061	2399,07	4,184	1,904	614,81	10,467	634,34	19,868	69,028	0,565					
Diétil éter	42,19	315,34						1,324	687,24	4,001	351,58	2,461	1,666	188,70	7,984	123,92	16,597	14,416	0,416					
Isopentano	45,66	318,81						1,803	592,47	5,271	328,45	2,400	1,747	176,93	7,639	94,94	16,367	12,256	0,526					
N-Pentano	42,81	315,96						1,268	602,58	3,662	351,47	2,406	1,766	183,33	7,239	106,15	15,850	13,496	0,441					
Perfluorheptano	45,39	318,54						1,430	1196,62	6,596	218,32	1,181	0,823	342,07	9,324	92,60	10,356	16,090	0,447					
R-141b	41,75	314,90						1,072	1217,58	6,335	175,87	1,465	0,979	401,50	11,208	80,44	13,788	13,080	0,473					
R-365mfc	42,81	315,96						1,366	635,75	2,561	387,00	2,360	1,671	202,17	7,418	116,11	14,952	15,206	0,441					
Acetona + Pentano	40,45	313,60						1,068	749,25	1,383	503,56	1,975	1,288	363,76	8,265	132,87	13,421	21,495	0,520					
Ciclohex+Metanol	40,57	313,72						1,608	786,02	3,667	413,08	2,251	1,396	240,31	9,649	153,29	14,921	15,670	0,458					
D.étera+Met.metilo	41,73	314,88																						
Agua	54,12	327,27						43	Media	Prismático aluminio CCP	Media	43	0,151	983,77	0,101	2373,85	4,187	1,918	511,38	10,797	646,51	20,707	67,261	0,515
Diétil éter	53,30	326,45											1,892	673,48	5,607	341,77	2,553	1,699	171,66	8,261	119,96	17,629	13,128	0,598
Isopentano	56,27	329,42											2,458	580,69	7,088	319,85	2,461	1,797	160,99	7,883	91,46	17,373	11,153	0,512
N-Pentano	53,72	326,87											1,783	590,93	5,053	341,58	2,464	1,811	167,20	7,480	102,25	16,925	12,341	0,424
Perfluorheptano	56,53	329,68	0,406	1637,13	5,938	95,39	1,032						0,329	560,76	10,828	62,68	10,097	9,664	0,580					
R-141b	52,37	325,52	2,008	1174,75	9,027	212,94	1,199						0,838	308,05	9,696	89,54	10,973	14,804	0,418					
R-365mfc	53,27	326,42	1,559	1193,91	9,036	171,18	1,487						1,004	353,96	11,631	75,10	15,121	11,942	0,467					
Acetona + Pentano	50,94	324,09	1,917	624,30	3,564	377,37	2,411						1,712	184,99	7,664	112,27	15,910	14,045	0,450					
Ciclohex+Metanol	53,05	326,20	1,598	735,24	2,160	492,75	2,039						1,342	320,87	8,571	128,74	14,417	19,844	0,500					
D.étera+Met.metilo	52,95	326,10	2,308	770,76	5,188	400,36	2,310						1,426	217,79	9,991	148,87	15,900	14,369	0,470					

Tabla A V.15: Valor de las propiedades termofísicas de todos los fluidos ensayados para el termosifón de aluminio (CCP), con carga alta.

SUSTANCIA	Temp. fluido		T.Amb. (°C)	CARGA	TERMOSIFÓN	Temp. fluido	ρ _s kg/m ³	ρ _l kg/m ³	ρ _v kg/m ³	h _{fg} kJ/kg	c _{pl} kJ/kg·K	c _{pv} kJ/kg·K	μ _l μPa·s	μ _v μPa·s	k _l mW/m	k _v mW/m	σ mN/m	R _{term} KW	
	°C	K																	
Agua	17.49	290.64	10	Alta	Prismático aluminio CCP	17.49	999.57	999.57	0.015	2459.29	4.183	1.878	1078.14	9.677	595.34	18.070	73.124	0.658	
Diétil éter	20.06	293.21				20.06	619.81	619.81	2.320	1.872	370.58	2.320	1.600	230.88	7.430	132.03	14.660	17.047	0.475
Isopentano	19.77	292.92				19.77	619.81	619.81	2.320	1.872	370.58	2.320	1.600	230.88	7.430	132.03	14.660	17.047	0.475
N-Pentano	21.37	294.52				21.37	619.81	619.81	2.320	1.872	370.58	2.320	1.600	230.88	7.430	132.03	14.660	17.047	0.475
Perfluorheptano	40.08	313.23				40.08	619.81	619.81	2.320	1.872	370.58	2.320	1.600	230.88	7.430	132.03	14.660	17.047	0.475
R-141b	20.06	293.21				20.06	619.81	619.81	2.320	1.872	370.58	2.320	1.600	230.88	7.430	132.03	14.660	17.047	0.475
R-365mfc	21.99	295.14				21.99	619.81	619.81	2.320	1.872	370.58	2.320	1.600	230.88	7.430	132.03	14.660	17.047	0.475
Acetona + Pentano	22.02	295.17				22.02	619.81	619.81	2.320	1.872	370.58	2.320	1.600	230.88	7.430	132.03	14.660	17.047	0.475
D.éter+Met.meílico	21.20	294.35				21.20	619.81	619.81	2.320	1.872	370.58	2.320	1.600	230.88	7.430	132.03	14.660	17.047	0.475
Agua	34.58	307.73	25	Alta	Prismático aluminio CCP	34.58	992.78	992.78	0.039	2420.09	4.182	1.894	731.89	10.191	622.43	19.206	70.481	0.580	
Diétil éter	35.14	308.29				35.14	603.17	603.17	3.918	1.320	603.17	3.918	1.701	200.80	7.807	126.47	15.962	15.246	0.446
Isopentano	35.73	308.88				35.73	603.17	603.17	3.918	1.320	603.17	3.918	1.701	200.80	7.807	126.47	15.962	15.246	0.446
N-Pentano	35.42	308.57				35.42	603.17	603.17	3.918	1.320	603.17	3.918	1.701	200.80	7.807	126.47	15.962	15.246	0.446
Perfluorheptano	40.62	313.77				40.62	603.17	603.17	3.918	1.320	603.17	3.918	1.701	200.80	7.807	126.47	15.962	15.246	0.446
R-141b	34.96	308.11				34.96	603.17	603.17	3.918	1.320	603.17	3.918	1.701	200.80	7.807	126.47	15.962	15.246	0.446
R-365mfc	36.48	309.63				36.48	603.17	603.17	3.918	1.320	603.17	3.918	1.701	200.80	7.807	126.47	15.962	15.246	0.446
Acetona + Pentano	34.21	307.36				34.21	603.17	603.17	3.918	1.320	603.17	3.918	1.701	200.80	7.807	126.47	15.962	15.246	0.446
Ciclohex+Metanol	31.21	304.36				31.21	603.17	603.17	3.918	1.320	603.17	3.918	1.701	200.80	7.807	126.47	15.962	15.246	0.446
D.éter+Met.meílico	35.43	308.58				35.43	603.17	603.17	3.918	1.320	603.17	3.918	1.701	200.80	7.807	126.47	15.962	15.246	0.446

Tabla A V.15: Valor de las propiedades termofísicas de todos los fluidos ensayados para el termosifón de aluminio (CCP), con carga alta. (Continuación).

SUSTANCIA	Temp. fluido		T.Amb. (°C)	CARGA	TERMOSIFÓN	P _s bar	ρ _l kg/m ³	ρ _v kg/m ³	h _{fg} kJ/kg	c _{pl} kJ/kg·K	c _{pv} kJ/kg·K	μ _l pPa·s	μ _v pPa·s	k _l mW/m	k _v mW/m	σ mN/m	R _{term} K/W
	°C	K															
Agua	43,98	317,13	32	Alta	Prismático aluminio CCP	0,091	988,62	0,062	2398,06	4,184	1,904	609,97	10,481	634,87	19,901	68,958	0,560
Diétil éter	42,19	315,34				1,324	687,24	4,001	351,58	2,461	1,666	188,70	7,984	123,92	16,597	14,416	0,423
Isopentano	41,31	314,46				1,577	597,20	4,640	331,88	2,376	1,727	184,07	7,539	96,39	15,966	12,713	0,531
N-Pentano	42,44	315,59				1,253	602,96	3,621	351,79	2,405	1,764	183,91	7,231	106,28	15,815	13,535	0,423
Perfluorheptano	47,00	320,15				0,277	1,667,10	4,135	97,58	1,014	0,322	643,51	10,510	63,63	9,527	10,511	0,714
R-141b	41,81	314,96				1,433	1,196,49	6,609	218,29	1,181	0,823	341,85	9,327	92,58	10,360	16,083	0,459
R-365mfc	42,98	316,13				1,079	1,217,20	6,374	175,79	1,465	0,979	400,65	11,215	80,36	13,813	13,061	0,513
Acetona + Pentano	40,72	313,87				1,379	635,45	2,584	386,75	2,361	1,673	201,69	7,425	116,01	14,976	15,176	0,450
Ciclohex+Metanol	41,13	314,28				1,086	748,64	1,412	503,10	1,978	1,290	361,69	8,279	132,69	13,463	21,421	0,539
D.éter+Met. metilo	42,63	315,78				1,657	784,81	3,775	412,07	2,256	1,399	238,38	9,676	152,93	14,999	15,565	0,489
Agua	55,71	328,86				0,163	982,97	0,108	2370,00	4,187	1,920	498,25	10,847	648,18	20,839	66,989	0,537
Diétil éter	52,96	326,11				1,872	673,91	5,551	342,07	2,550	1,698	172,16	8,253	120,09	17,596	13,167	0,399
Isopentano	52,28	325,43				2,193	585,17	6,355	323,14	2,437	1,778	166,77	7,791	92,75	16,989	11,566	0,426
N-Pentano	53,53	326,68				1,773	591,13	5,026	341,76	2,463	1,810	167,46	7,476	102,32	16,906	12,361	0,404
Perfluorheptano	57,28	330,43				0,418	1,634,74	6,104	95,22	1,033	0,330	554,83	10,853	62,60	10,142	9,598	0,708
R-141b	52,42	325,57	2,011	1,174,65	9,039	212,92	1,199	0,838	307,91	9,697	89,53	10,976	14,798	0,429			
R-365mfc	53,18	326,33	1,554	1,194,12	9,009	171,22	1,486	1,004	354,35	11,627	75,15	15,111	11,952	0,490			
Acetona + Pentano	51,15	324,30	1,929	624,07	3,586	377,17	2,412	1,713	184,67	7,669	112,20	15,929	14,022	0,457			
Ciclohex+Metanol	53,48	326,63	1,621	734,75	2,191	492,37	2,041	1,343	319,54	8,582	128,60	14,453	19,788	0,541			
D.éter+Met. metilo	53,98	327,13	2,383	769,33	5,358	399,17	2,316	1,428	215,86	10,023	148,46	15,992	14,249	0,527			

Anexo VI
**Equipo para alimentación a potencia
constante de módulos Peltier**

A VI.1. Equipo de control de potencia

El estudio que se ha realizado ha tenido por objeto el diseño, fabricación y puesta a punto de una fuente de potencia constante (véanse los capítulos 4 y 5) para alimentación de módulos Peltier. Estos módulos varían su potencia con la temperatura, factor que se desea eliminar en los ensayos de disipación de calor estos módulos. Los ensayos se han realizado utilizando el termosifón prismático de aluminio.

Para la fuente se ha pensado en un [1] convertidor DC/DC, tipo buck, que se ha controlado mediante lazos de control: uno interno de control de la corriente en la inductancia; otro externo de control de la corriente de entrada y un tercer lazo intermedio de control de la tensión en la carga. Además, en el diseño se han incluido circuitos de protección y seguridad para los distintos componentes del sistema.

El estudio que se ha realizado consta de cuatro apartados:

- a) Estudio del convertidor buck para los tiempos de encendido y apagado.
- b) Análisis del lazo de control en la corriente de la inductancia, mediante un control en histéresis.
- c) Análisis del lazo de control de tensión en la carga, para un controlador PI, de acción proporcional e integral.
- d) Análisis del lazo de control de corriente a la entrada, para un controlador PI, de acción proporcional e integral.

En la figura A VI.1 se muestra [2] de manera general, mediante un diagrama de bloques, el control de la corriente en la inductancia que se va a colocar en el convertidor de corriente continua. En este diagrama se ha introducido el convertidor buck, así como los tres lazos a través de los cuales se ha realizado el control.

A VI.2. Lazo de control de corriente

El control de la corriente ha permitido asegurar que, ante variaciones bruscas en la carga, aquella siempre se mantenga constante. De este modo, se ha obtenido un sistema estable a través del cual, ninguno de los componentes del circuito podrán sufrir daños por la aparición de corrientes o tensiones no deseadas.

Una de las características de este convertidor ha sido que la frecuencia de conmutación se haya mantenido constante para cualquier punto de trabajo. En la realidad no ha sido del todo posible, pues su frecuencia de conmutación está directamente relacionada con la tensión de salida que se modificará dependiendo de la carga que se demande.

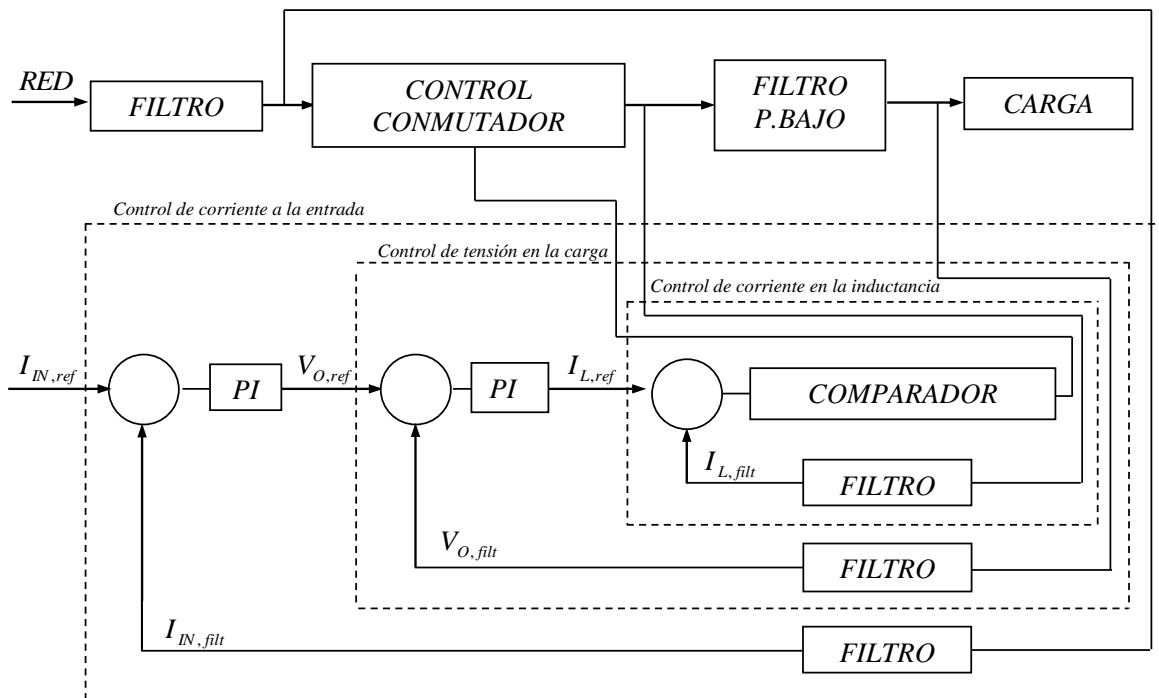


Figura A VI.1: Diagrama de bloques para el control del convertidor.

A VI.3. Lazo de control de tensión

Uno de los lazos que se ha estudiado, para el convertidor buck, es el de tensión. Es un lazo intermedio que ha aportado la corriente de referencia de la inductancia, mediante el control de la tensión en la carga. De este modo se ha asegurado que sobretensiones no deseadas hayan podido afectar a la carga de forma negativa. Se ha verificado su correcto funcionamiento a través de los resultados que se han obtenido por medio de un programa de simulación, tipo PSIM.

El lazo de tensión ha conllevado el control de la corriente de la inductancia, cuya frecuencia de trabajo es muy superior a la del lazo que lo contiene. Esto hace que la corriente en la inductancia se haya podido modelizar como una fuente de corriente constante.

Las características fundamentales del lazo de la tensión son las siguientes:

- El bloque de acción proporcional-integral, corrige el error que se ha establecido entre la tensión de referencia y la tensión real. Esta tensión real se ha medido en la carga, y antes de ser comparada con la tensión de referencia, se ha filtrado para evitar señales no deseadas.
- Las saturaciones de la I_L de referencia que han podido aparecer por el propio control del lazo de tensión, han quedado limitadas al valor máximo de trabajo del lazo interno de corriente. En el caso de este control, el bloque de saturación ha sido limitado a 4V. Aunque se habla de variables cuya magnitud difiere de la que le corresponde en la realidad, se ha hecho que las magnitudes de todas las variables que intervienen en el control se hayan codificado a valores de tensión.
- Cuando se producen saturaciones en el control, se ha provocado la inhabilitación de la parte integral del PI. Este hecho, ha impedido que el valor que se ha obtenido del PI haya seguido creciendo, pero se ha mantenido el valor acumulado mientras el control del lazo ha estado saturado.

El regulador que se ha utilizado para el cálculo del lazo de tensión ha sido un controlador PI, de acción proporcional e integral. Éste ha funcionado tratando de corregir el error que ha podido haber entre el valor de tensión de referencia, respecto al valor de tensión real.

A VI.4. Lazo del regulador

Para completar el control del convertidor buck, se ha estudiado el tercer lazo que ha llevado incorporado el equipo. Este ha sido el más exterior de los tres y con él se ha controlado la potencia que se ha previsto que debe entregar el convertidor. El control se ha realizado a través de la corriente de entrada y ésta ha quedado limitada a las especificaciones del diseño. De este modo, también han quedado asegurados los componentes del circuito, frente a corrientes descontroladas que hubiesen podido aparecer. El sistema de control que se ha aplicado es el mismo que el que se ha utilizado para el control del lazo de tensión.

Las características fundamentales del diagrama de bloques para el lazo de la corriente de entrada son:

- Se ha corregido el error establecido entre la corriente de entrada de referencia, respecto de la corriente filtrada, mediante el bloque de acción de control proporcional.
- Las saturaciones de la tensión de entrada de referencia que hayan podido aparecer por el propio control del lazo de tensión, han quedado limitadas al valor máximo de trabajo del lazo interno de tensión. En el caso de este control, el bloque de saturación las ha limitado a 15V.
- Cuando se producen saturaciones en el control, se provoca la inhabilitación de la parte integral del PI. Este hecho ha impedido que el valor obtenido del PI haya seguido creciendo, pero ha mantenido el valor acumulado mientras el control del lazo está saturado.
- Se ha considerado al lazo interno del control de la tensión como un bloque de ganancia unitaria. Esto ha sido así porque la frecuencia de trabajo del lazo de tensión es mucho mayor que el de la corriente de entrada. Esta consideración introduce un error cuando han aparecido cambios muy bruscos, ya sea en la referencia o en la carga, pero durante los periodos estables su efecto se puede despreciar.

- Se ha tenido una ganancia variable que ha dependido de las condiciones de trabajo del convertidor. Ésta se ha proporcionado por el bloque que eleva al cuadrado la tensión de salida y el bloque que contiene la resistencia de carga. Los valores que se han tomado para diseñar el PI han sido aquellos en los que se ha previsto que trabaje el convertidor.

A VI.5. Medida y filtrado de la corriente de entrada

La medida de corriente a la entrada del buck se ha realizado por medio de una celda LEM de corriente. Mediante la misma se ha obtenido una tensión proporcional a la corriente que se ha medido y esto ha permitido que sea utilizada en los circuitos de control, ya que estos se regulan con las referencias de tensión.

Una celda LEM de corriente [3] consta de dos devanados: primario y secundario. La corriente que se desea medir pasa por el primario. Los amperios-vueltas del primario crean un campo magnético que debe ser compensado por los amperios-vueltas que aparecen en el secundario. Un circuito detector de inducción activa un generador de corriente en el secundario hasta que los amperios-vuelta del primario sean igual que los del secundario. De este modo se obtiene una corriente en el secundario proporcional a la que circula por el primario.

En definitiva, se cumple que los amperios-vuelta del primario son iguales a los del secundario. La relación que se va a utilizar para esta celda va a ser $4/1000$.

La intensidad por el secundario se hace pasar por una resistencia exterior a la celda que se ha conectado a tierra. Si se conoce el valor de la resistencia y se mide la tensión entre sus extremos, se obtiene una medida directamente proporcional a la intensidad que circula por el primario.

La celda LEM se ha alimentado con una tensión que varía de [+15,-15] voltios.

A VI.6. Circuito de protección y seguridad

Los procesos de arranque y los cambios bruscos de carga o referencias provocan que el PI se sature. Esto implica que la señal a la salida del PI sea mucho mayor de lo deseado, provocando una regulación descontrolada que puede dañar, las pastillas Peltier. Con el fin de evitar este tipo de situaciones, el PI se ha preparado de forma que pueda ser inhabilitado cuando pueda sobrepasar aquellos valores para los que no ha sido diseñado.

Cuando sólo se tiene un único módulo Peltier puede llegar ocurrir que se le solicite una potencia superior a la que se puede suministrar. Esto puede hacer que el circuito se sature, anulando todo control sobre la pastilla. Esta situación se ha evitado mediante un circuito que avisa cuando el control llega a entrar en saturación.

A VI.7. Diseño y resultados finales

Los resultados del funcionamiento del convertidor se han obtenido contrastando los ensayos reales con respecto a los de simulación. En general, la valoración que se ha obtenido para el convertidor con este tipo de ensayos se ha considerado aceptable. En la figura A VI.2 se muestra la placa que se ha construido para el convertidor buck.

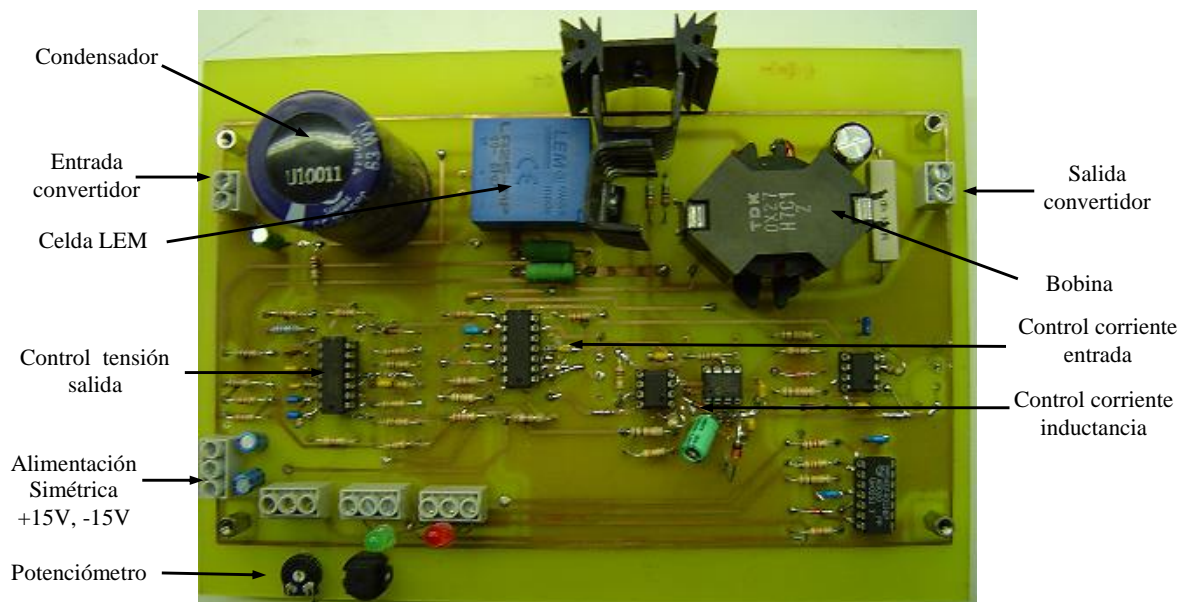


Figura A VI.2: Placa del convertidor buck.

A VI.7.1. Escalones de referencia

En los escalones de referencia de los ensayos reales, las sobreoscilaciones son similares a cómo se han obtenido de los ensayos de simulación, incluso algo inferiores, lo que hace que el convertidor sufra menos. Los tiempos de estabilización han sido los mismos que se habían obtenido en los ensayos de simulación. Basta con contrastar para un mismo ensayo, la gráfica real con la obtenida mediante simulación. En los cambios de referencia para potencias máximas, las saturaciones entran en funcionamiento, siendo éstas absorbidas en los tiempos establecidos.

A VI.7.2. Escalones en la carga

Para cambios bruscos de carga realizados en el prototipo experimental, la corriente de entrada sufre unas oscilaciones, también obtenidas en el prototipo de simulación. Esto ha permitido comprobar que existe un alto grado de similitud entre los prototipos experimentales y los de simulación también en el lazo de control de la corriente de entrada.

Los tiempos de respuesta y estabilización se han considerado totalmente aceptables para su aplicación final.

A VI.7.3. Frecuencia de trabajo

El diseño de la frecuencia de trabajo, que se ha realizado con el lazo interno de corriente mediante el control por histéresis, es algo inferior a la que se ha obtenido mediante los ensayos de simulación. Ésta depende en parte de la bobina y aunque su diseño ha sido bastante bueno no es fácil conseguir exactamente los mismos hercios con los que se han realizado los ensayos de simulación.

A VI.7.4. Rendimientos

Los rendimientos no han sido todo lo satisfactorio que se esperaba del convertidor. Se ha observado que cuando la potencia suministrada a las células Peltier disminuye, empeora el rendimiento del convertidor. Esto es debido a que el convertidor tiene unas pérdidas internas que no se pueden despreciar cuando el convertidor suministra potencias pequeñas.

Se considera que el rendimiento mejoraría si se disminuyese la frecuencia de conmutación y se añadieran otros componentes, como mosfets en paralelo.

A VI.8. Planos del equipo

En las siguientes figuras (véase desde la Fig. A VI.3 hasta la Fig. A VI.9) se muestran los planos de diseño del equipo.

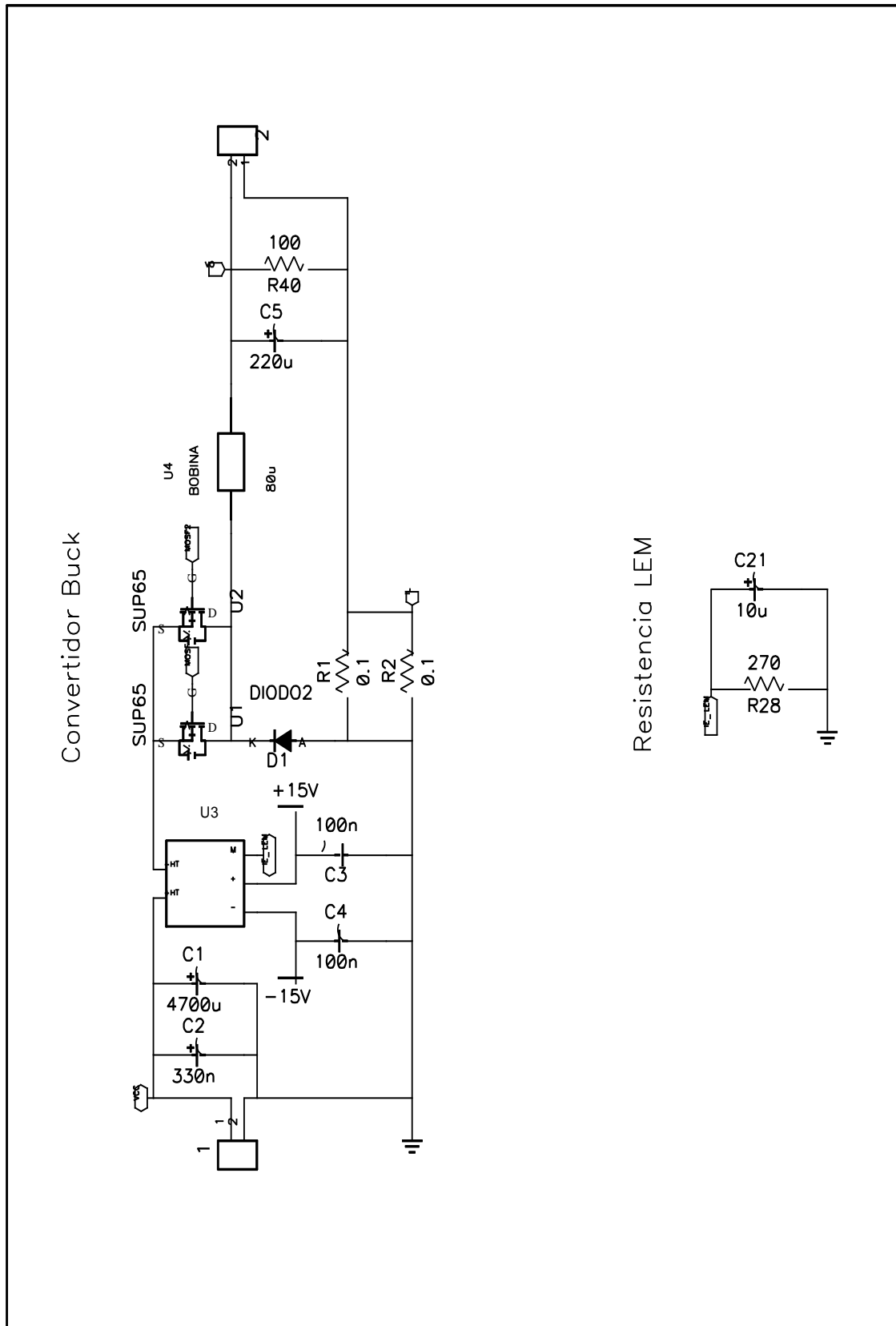


Figura A VI.3: Convertidor buck.

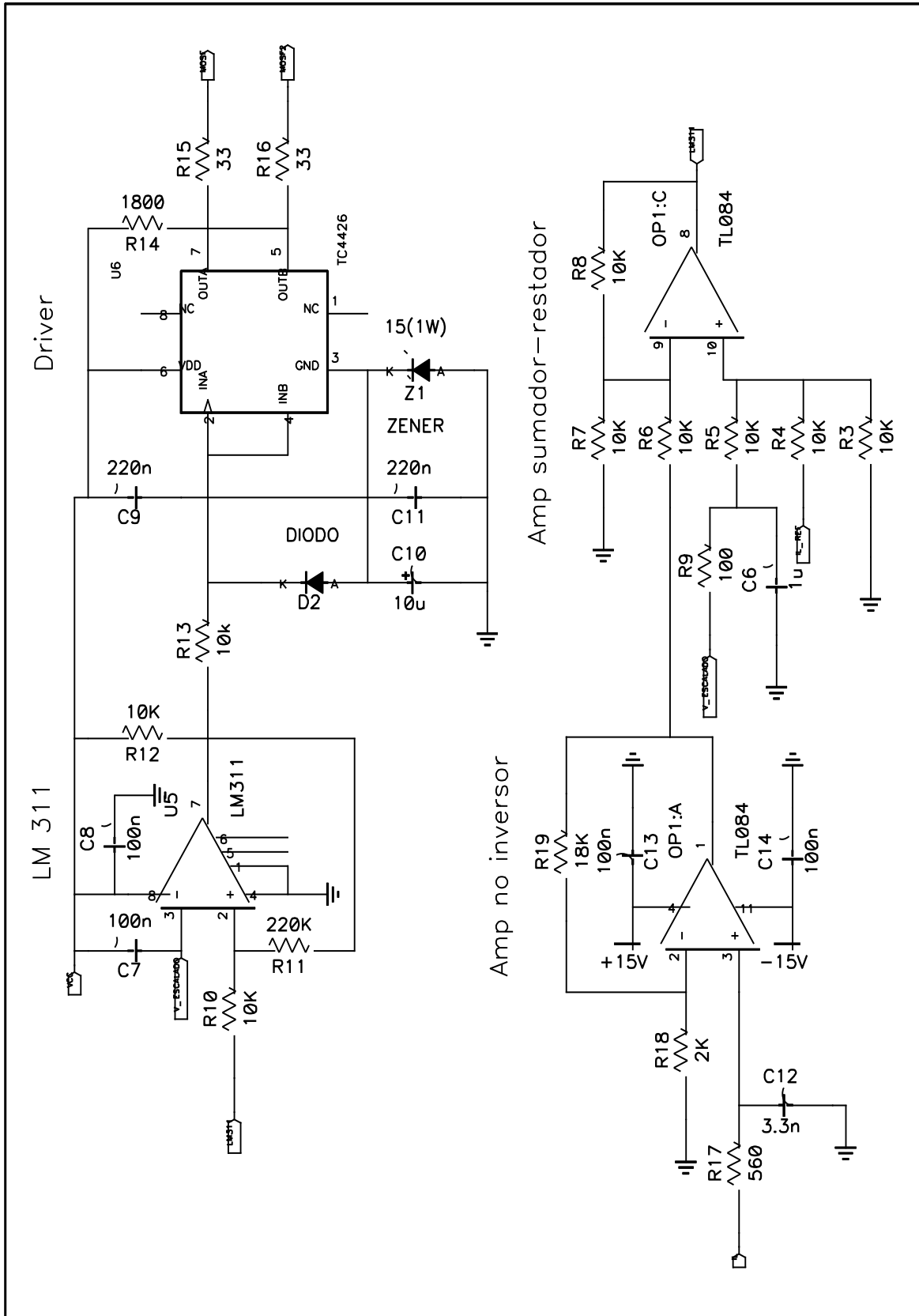


Figura A VI.4: Lazo de corriente en la bobina.

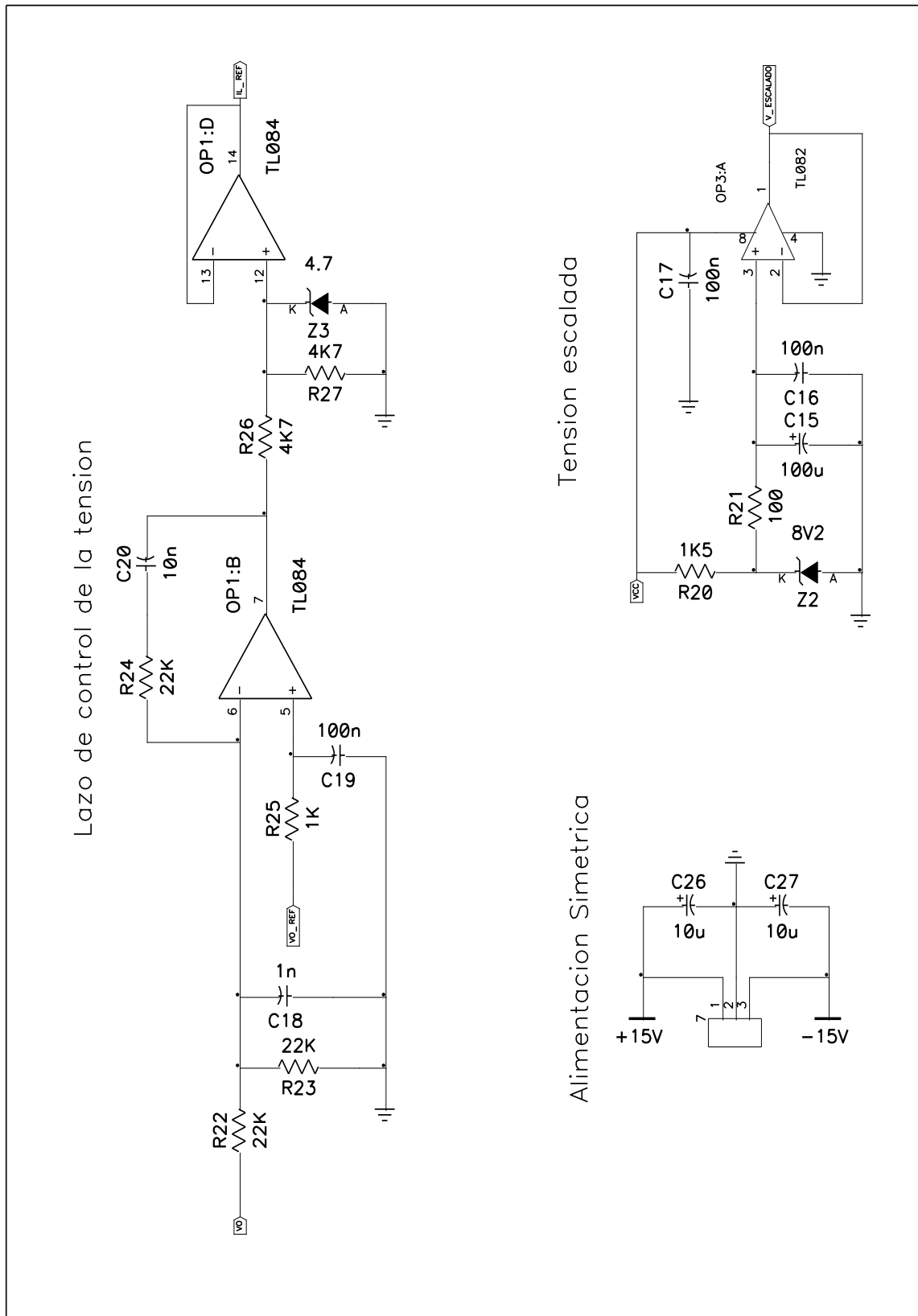


Figura A VI.5: Lazo de control de la tension.

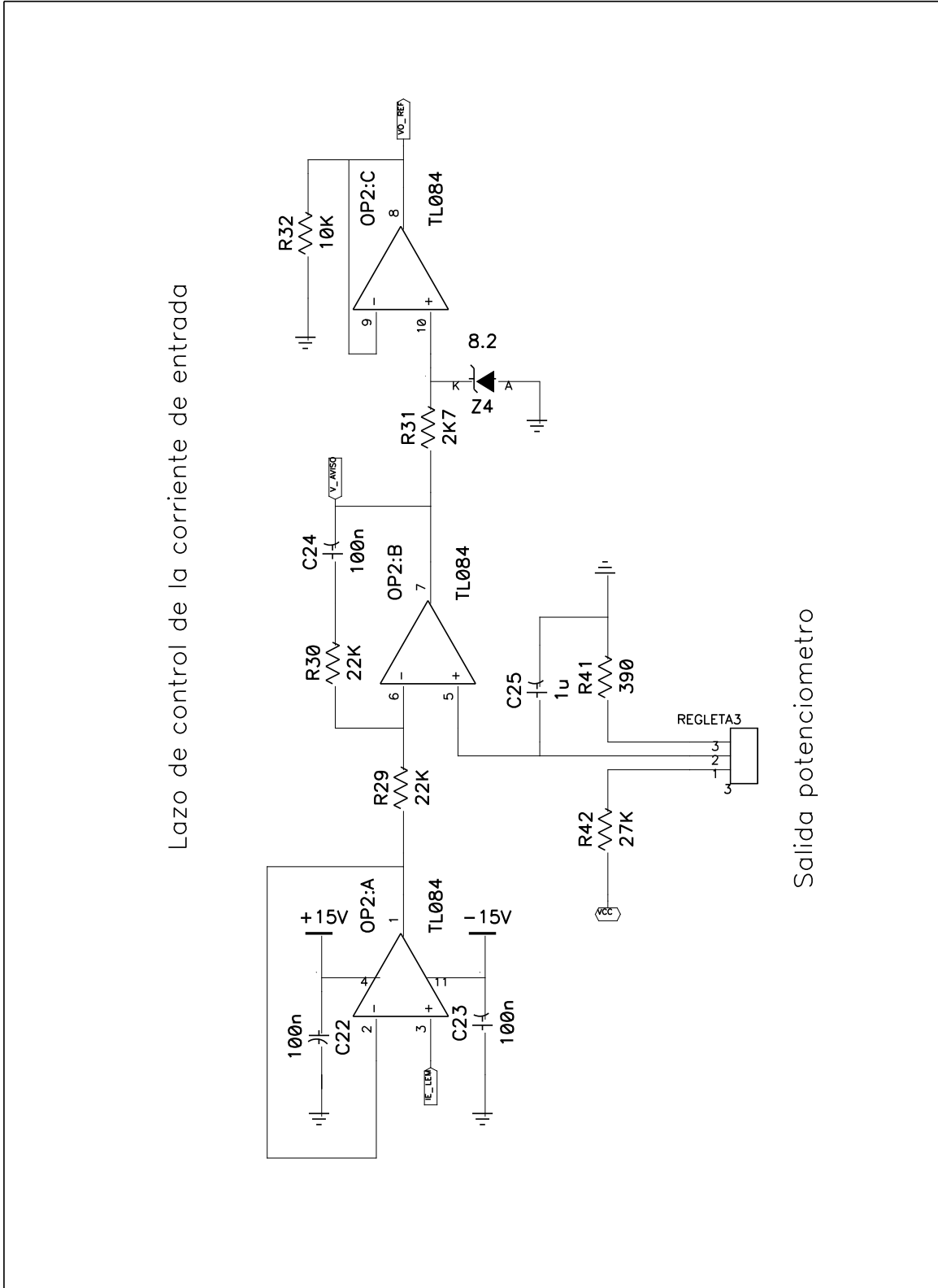


Figura A VI.6: Lazo de control de la corriente de entrada.

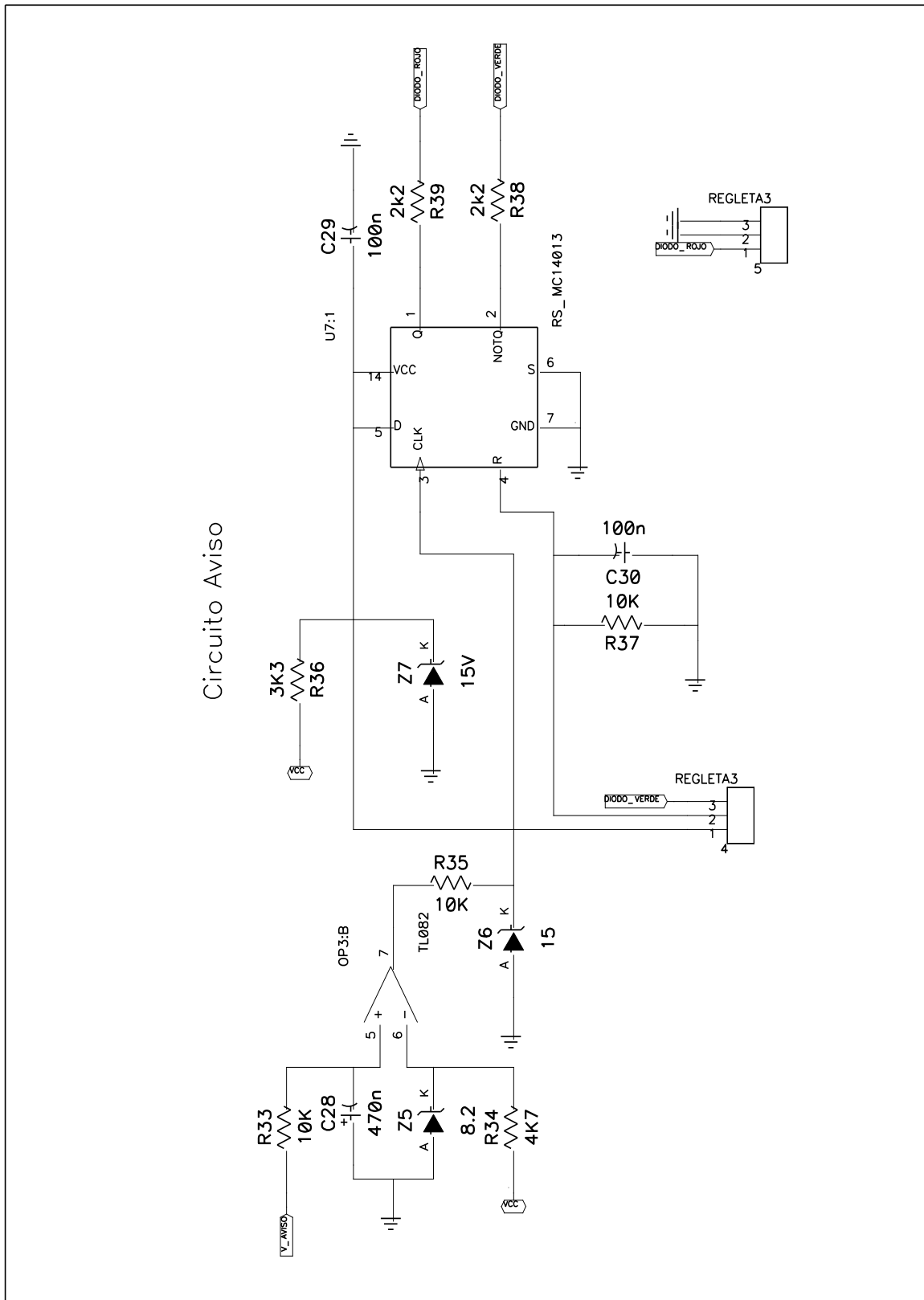


Figura A VI.7: Circuito de seguridad y protección.

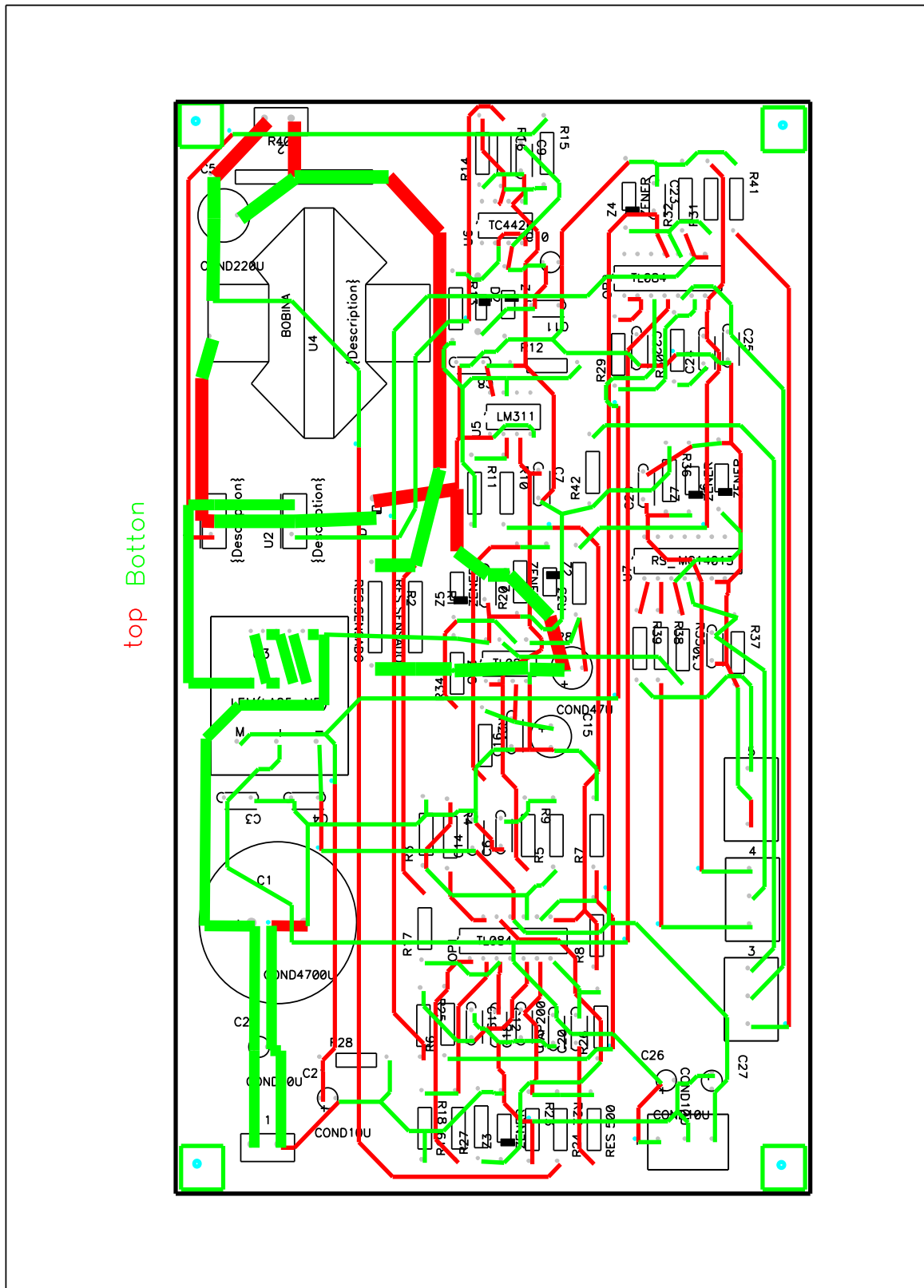


Figura A VI.8: Placa del convertidor buck.

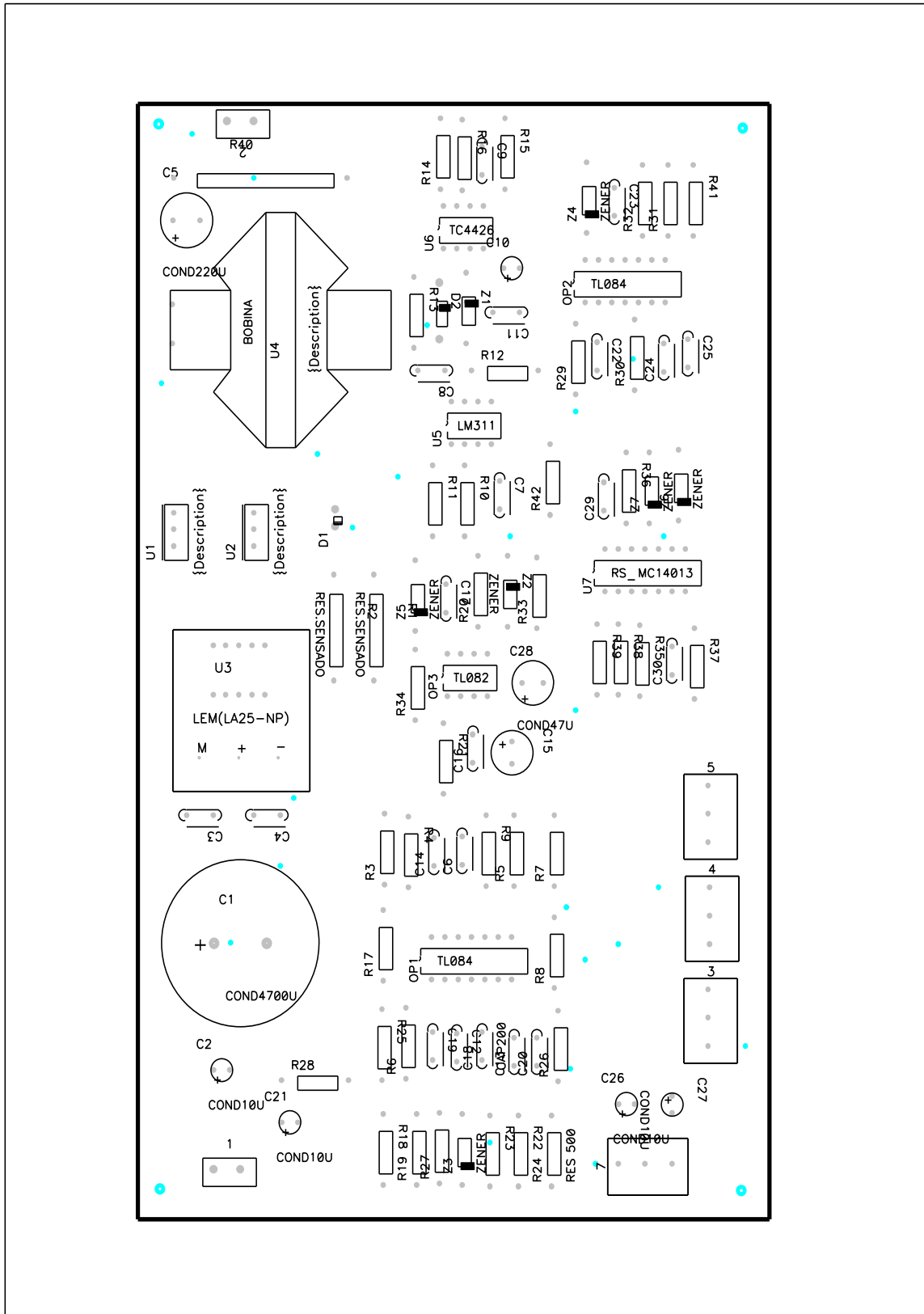


Figura A VI.9: Componentes de la placa

REFERENCIAS

- [1] Muñoz Sáez, J. L., Hernández González, S. *Sistemas de Alimentación Conmutados*. Ed. Paraninfo. Madrid. 1997. 495 pp. ISBN 84-283-2347-X.
- [2] Kuo, B. C. *Sistemas de control automático*. Séptima edición. Editorial Prentice-Hall. Mexico. 1996. ISBN 968-880-723-0.
- [3] Sedra, A. S., Smith, K. C. *Microelectronic Circuit*. Fourth Edition. Oxford University Press. 1998. ISBN 0-19-510370-X.

Anexo VII
Análisis complementario de
resultados

A VII.1. Estudio de regresión para el termosifón de acero pequeño

A VII.1.1. Regresión múltiple

A continuación se muestra la regresión lineal múltiple, de tipo clásico, que se ha realizado para este termosifón. Se procede de forma similar al apartado 7.4.1. Como ya se ha apuntado y como se verá más adelante, debido a los problemas de multicolinealidad, hubo que recurrir a una regresión múltiple especial, denominada regresión ridge.

a) Datos estudiados

- Variable dependiente: R_{term} (resistencia térmica).
- Variables independientes: Propiedades termofísicas: $\rho_l, \rho_v, h_{fg}, c_{pl}, c_{pv}, \mu_l, \mu_v, k_l, k_v, \sigma$.

En total son 10 variables independientes + 1 variable dependiente. Las tablas se pasan a escala logarítmica para conseguir expresiones en forma de factores elevados a un exponente, en vez de en forma de sumandos polinómicos que es como habitualmente se obtienen los resultados de las regresiones.

Análisis de correlaciones

- a) Entre R_{term} y las variables explicativas.

Se exponen las correlaciones de mayor magnitud entre la variable respuesta y las explicativas. Este análisis puede orientar en la determinación de qué variables deberían entrar en el modelo de regresión ya que a priori presentan una mayor relación con R_{term} .

Tabla A VII.1: Correlaciones entre R_{term} y las variables explicativas.

Variable	Correlación
h_{fg}	-0,2082
c_{pl}	-0,3803
c_{pv}	-0,3769
μ_l	0,2970
k_l	-0,2680
k_v	-0,5252

- b) Se aprecian fuertes correlaciones entre las variables explicativas. Por resumir, se muestran aquellas que superan el 0,8.

Hay 11 correlaciones entre variables por encima del 80%; estas son:

1) $\rho_{l-c_{pv}}$ (-0,8575); 2) $\rho_{v-h_{fg}}$ (-0,8675); 3) ρ_{v-k_l} (-0,9069); 4) $\rho_{v-\sigma}$ (-0,9341);

5) $h_{fg-c_{pl}}$ (0,8576); 6) h_{fg-k_l} (0,9411); 7) $h_{fg-\sigma}$ (0,8754); 8) $c_{pl-c_{pv}}$ (0,8698);

9) c_{pl-k_v} (0,8813); 10) c_{pv-k_v} (0,8182); 11) $k_l-\sigma$ (0,9460);

Se puede detectar un importante problema de multicolinealidad.

b) Elección del mejor conjunto de regresión

Se persigue reducir el número de variables explicativas de forma que se eliminen aquellas con menor poder explicativo, las menos relevantes, y simplificar, de esta forma, el modelo de regresión.

B.1. Criterio de mayor R^2 ajustada

B.2. Criterio de menor Cp de Mallows

Estos dos apartados se han unido ya que el análisis ha dado los mismos resultados indistintamente del criterio empleado.

A continuación se muestran las salidas de Statgraphics para este estudio.

Tabla A VII.2: Elección del conjunto de regresión.

Selección del Modelo de Regresión - ln Rterm				
Variable dependiente: ln Rterm				
Variables independientes:				
A=ln dl				
B=ln dv				
C=ln hfg				
D=ln Cpl				
E=ln Cpv				
F=ln ul				
G=ln uv				
H=ln kl				
I=ln kv				
J=ln ts				
Modelos con Mayor R-Cuadrada Ajustada				
CME	R-Cuadrada	R-Cuadrada Ajustada	Cp	Variables Incluidas
0,00255856	59,1726	57,3864	14,615	BCDFGHI
0,00259738	58,5531	56,7398	17,1432	BCDFGIJ
0,0026278	58,0677	56,2332	19,1239	ABCDFHI
0,00264721	57,758	55,9099	20,388	ABCDFIJ
0,002662	56,9909	55,6635	19,5183	ACFIJ
0,00266697	57,1767	55,5808	20,7603	ABCFIJ
0,00267084	57,3808	55,5162	21,9271	ABCFGIJ
Modelos con Menor Cp				
CME	R-Cuadrada	R-Cuadrada Ajustada	Cp	Variables Incluidas
0,00255856	59,1726	57,3864	14,615	BCDFGHI
0,00259738	58,5531	56,7398	17,1432	BCDFGIJ
0,0026278	58,0677	56,2332	19,1239	ABCDFHI
0,002662	56,9909	55,6635	19,5183	ACFIJ
0,00264721	57,758	55,9099	20,388	ABCDFIJ
0,00266697	57,1767	55,5808	20,7603	ABCFIJ
0,00267637	57,0257	55,4242	21,3765	ACFHII

Las conclusiones de este estudio son:

- El mejor conjunto de regresión es el formado por las variables:

$$\rho_v, h_{fg}, c_{pl}, \mu_l, \mu_v, k_l, k_v$$

- Las variables más relevantes, a tener en cuenta para la regresión lineal, son las mismas que constituyen el considerado como mejor conjunto de regresión pero añadiendo la variable ρ_l . Se introduce dicha variable debido a que aparece incluida en el tercer conjunto de regresión señalado por ambos criterios (ABCDFHI) y teóricamente es una variable termofísica relevante.

$$\rho_l, \rho_v, h_{fg}, c_{pl}, \mu_l, \mu_v, k_l, k_v$$

B.3. Regresión paso a paso

Para aplicar este criterio se parte ya de la selección de variables hecha anteriormente con los criterios de mayor R^2 ajustada y menor C_p ; esto es, se parte del siguiente conjunto:

$$\rho_l, \rho_v, h_{fg}, c_{pl}, \mu_l, \mu_v, k_l, k_v$$

- Hacia adelante.
- Hacia atrás.

Al igual que pasaba antes con los criterios de selección del mejor conjunto de variables, estos dos métodos de regresión arrojan el mismo resultado y será el que se tomará como final de la regresión.

Se muestran, en la tabla siguiente, las salidas que ofrece Statgraphics.

Tabla A VII.3: Resultados de la regresión múltiple.

Regresión Múltiple - ln Rterm					
Variable dependiente: ln Rterm					
Variables independientes:					
ln dl					
ln dv					
ln hfg					
ln Cpl					
ln ul					
ln uv					
ln kl					
ln kv					
Parámetro	Estimación	Error Estándar	Estadístico T	Valor-P	
CONSTANTE	-1,64226	0,321224	-5,11249	0,0000	
ln dv	0,134253	0,0276294	4,85905	0,0000	
ln hfg	0,140297	0,0211637	6,6291	0,0000	
ln Cpl	0,648086	0,113046	5,73292	0,0000	
ln ul	0,406101	0,061819	6,56919	0,0000	
ln uv	-0,18184	0,0613014	-2,96632	0,0035	
ln kl	-0,216128	0,0313372	-6,89685	0,0000	
ln kv	-0,645373	0,0896854	-7,19596	0,0000	
Análisis de Varianza					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	0,593313	7	0,084759	33,13	0,0000
Residuo	0,409369	160	0,00255856		
Total (Corr.)	1,00268	167			
R-cuadrada = 59,1726 por ciento					
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 57,3864 por ciento					
Error estándar del est. = 0,0505822					
Error absoluto medio = 0,0388523					
Estadístico Durbin-Watson = 1,94173 (P=0,3535)					
Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0,0276786					

El modelo resultante es:

$$\ln R_{\text{term}} = -1,64226 + 0,134253 \cdot \ln \rho_v + 0,140297 \cdot \ln h_{fg} + 0,648086 \cdot \ln c_{pl} + 0,406101 \cdot \ln \mu_l - 0,18184 \cdot \ln \mu_v - 0,216128 \cdot \ln k_l - 0,645373 \cdot \ln k_v$$

Eliminando los logaritmos y redondeando los coeficientes, el modelo quedaría:

$$R_{\text{term}} = 0,1935 \cdot \left(\frac{\rho_v^{1,34} \cdot h_{fg}^{1,40} \cdot c_{pl}^{6,48} \cdot \mu_l^{4,06}}{\mu_v^{1,82} \cdot k_l^{2,16} \cdot k_v^{6,45}} \right)^{1/10} \quad (\text{A VII.1})$$

El modelo obtenido es, obviamente, estadísticamente relevante, pues basta con fijarse en los valores de los estadísticos que muestra la pantalla de Statgraphics. Sin embargo, esta relación de variables es difícilmente explicable desde el punto de vista termofísico; de hecho, pueden reseñarse algunas características de este modelo que resultan poco lógicas:

- Aparece la densidad del vapor, ρ_v , y, sin embargo, no aparece la del líquido, ρ_l , que teóricamente es más relevante.
- La entalpía de vaporización, h_{fg} , está situada en el numerador, lo que indicaría que a mayor capacidad de la sustancia para evacuar calor durante los cambios de fase, mayor resistencia térmica presenta el sistema, cosa que va contra toda lógica; esto es, la entalpía de vaporización debería estar en el denominador favoreciendo la transferencia de calor y no entorpeciendo.
- Está presente la conductividad térmica del vapor, k_v , cuando no debería ser una variable relevante del sistema. Si se atiende a que el vapor se desplaza dentro del tubo a velocidades muy altas, la lógica indica que la convección debe prevalecer sobre la conductividad, en la fase gaseosa al menos.

Esta distorsión en el modelo puede explicarse por las altas correlaciones que aparecen entre las variables independientes; esto es, la distorsión se debe a la presencia de multicolinealidad.

En la matriz de correlaciones calculada por Statgraphics pueden verse, resaltadas en rojo, las elevadas correlaciones entre algunas variables explicativas.

Tabla A VII.4: Correlaciones entre variables explicativas

Matriz de Correlación para las estimaciones de los coeficientes				
	CONSTANTE	ln dv	ln hfg	ln Cpl
CONSTANTE	1,0000	-0,8318	-0,3406	-0,3511
ln dv	-0,8318	1,0000	0,2776	0,7402
ln hfg	-0,3406	0,2776	1,0000	-0,0363
ln Cpl	-0,3511	0,7402	-0,0363	1,0000
ln ul	-0,8251	0,9426	0,2097	0,7796
ln uv	0,7384	-0,5827	-0,2297	-0,0395
ln kl	-0,3255	0,1907	-0,3658	-0,2449
ln kv	0,0544	-0,5672	-0,0350	-0,8922

	ln ul	ln uv	ln kl	ln kv
CONSTANTE	-0,8251	0,7384	-0,3255	0,0544
ln dv	0,9426	-0,5827	0,1907	-0,5672
ln hfg	0,2097	-0,2297	-0,3658	-0,0350
ln Cpl	0,7796	-0,0395	-0,2449	-0,8922
ln ul	1,0000	-0,5888	0,0393	-0,5299
ln uv	-0,5888	1,0000	-0,5040	-0,1723
ln kl	0,0393	-0,5040	1,0000	0,2795
ln kv	-0,5299	-0,1723	0,2795	1,0000

La multicolinealidad desdibuja la verdadera influencia de las variables predictivas sobre la variable respuesta y, por tanto, puede dar lugar a conjuntos de regresión que, si bien parecen ser los más adecuados, llevarían a interpretaciones y conclusiones erróneas.

Habiendo presentado estos dos argumentos, el termofísico (falta de coherencia con la teoría aceptada por la comunidad científica) y el estadístico (presencia de multicolinealidad), se rechaza el modelo resultante obtenido con esta regresión.

A VII.1.2. Regresión múltiple con las variables termofísicas más relevantes

A la vista de que la regresión lineal clásica, basada únicamente en criterios estadísticos, no ofrece resultados válidos, se procede a realizar una regresión múltiple que, con base en criterios estadísticos, tenga presente en mayor medida los fundamentos de la transferencia de calor.

Se vuelven a introducir en el modelo todas las variables independientes en estudio:

$$\rho_l, \rho_v, h_{fg}, c_{pl}, c_{pv}, \mu_l, \mu_v, k_l, k_v, \sigma$$

Debido a que la multicolinealidad invalida los contrastes habituales que permiten inferir qué variables son las más influyentes, los criterios de salida y entrada de las variables se van a fundamentar en:

- a) Correlaciones entre variables explicativas: se eliminarán aquellas variables que estén fuertemente correladas y que no discrepen con los dos siguientes criterios.
- b) Teorías científicas aceptadas: se tomarán como referencia los modelos expuestos con anterioridad (Imura [1], Faghri [2], Nusselt [3]...) a la hora de elegir qué regresores entran o salen. Las variables consideradas como termofísicamente relevantes según lo que se puede deducir de la bibliografía consultada son:

$$\rho_l, \rho_v, h_{fg}, c_{pl}, \mu_l, k_l$$

- c) Variaciones en R^2 , R^2 ajustada y el Error Absoluto Medio (EAM): servirán para saber cómo de acertada es la entrada y salida de una variable

A continuación se expone de forma somera el proceso de eliminación de variables partiendo del modelo de regresión que las incluye a todas.

- 1) Primera eliminación: k_v

Presenta fuertes correlaciones con 7 variables independientes de las cuales 5 (en azul) pertenecen al grupo de las relevantes. Además, no se trata de una variable de relevancia ya que el vapor se mueve a velocidades elevadas dentro del termosifón por lo que la transferencia de calor se da simultáneamente con la transferencia de masa (convección); la conductividad del vapor, por tanto, no debería presentar un papel significativo.

Tabla A VII.5: Correlaciones entre k_v y las demás variables explicativas

Correlaciones	ln k_v
ln d_l	-0,7577
ln d_v	-0,8302
ln h_{fg}	-0,6468
ln C_{pl}	-0,9164
ln C_{pv}	-0,6419
ln u_l	-0,8168
ln u_v	0,6053
ln k_l	0,4913
ln k_v	1,0000
ln t_s	0,3698

2) Segunda eliminación: μ_v

Fuertes correlaciones con 5 variables independientes, no siendo tampoco una variable muy a tener en cuenta para los fenómenos de cambio de fase en termosifones.

Tabla A VII.6: Correlaciones entre μ_v y las demás variables explicativas

Correlaciones	ln μ_v
ln dl	-0,8981
ln dv	-0,8101
ln hfg	-0,8703
ln Cpl	-0,5174
ln Cpv	-0,2000
ln ul	-0,6260
ln μ_v	1,0000
ln kl	0,0995
ln ts	0,4415

3) Tercera eliminación: c_{pv}

Muestra correlaciones de consideración con 3 variables independientes. Tampoco se trata de una de las variables que se han tomado como relevantes en la bibliografía científica consultada.

Tabla A VII.7: Correlaciones entre c_{pv} y las demás variables explicativas

Correlaciones	ln Cpv
ln dl	0,1770
ln dv	-0,4633
ln hfg	-0,2606
ln Cpl	-0,7239
ln Cpv	1,0000
ln ul	0,2801
ln kl	0,6327
ln ts	-0,7900

4) Cuarta eliminación: σ

Fuertes correlaciones con 2 variables independientes relevantes. No se trata tampoco de una variable importante para la construcción del modelo; sin embargo, sí que sería una propiedad relevante si se estuviese trabajando con tubos de calor donde la vuelta del líquido al evaporador tiene lugar por capilaridad; sin embargo, en los termosifones este retorno se debe únicamente a la fuerza de gravedad.

Tabla A VII.8: Correlaciones entre σ y las demás variables explicativas.

Correlaciones	ln ts
ln dl	0,2121
ln dv	0,3871
ln hfg	-0,0628
ln Cpl	0,5489
ln ul	0,0201
ln kl	-0,6333
ln ts	1,0000

Tras el proceso de eliminación, el conjunto final de variables resulta ser:

$$\rho_l, \rho_v, h_{fg}, c_{pl}, \mu_l, k_l$$

Validación del modelo

A continuación se muestra la salida de Statgraphics con los valores de los principales estadísticos que son testigo de la bondad del modelo.

Tabla A VII.9: Resultado de la regresión.

Regresión Múltiple - ln Rterm

Variable dependiente: ln Rterm
 Variables independientes:
 ln dl
 ln dv
 ln hfg
 ln Cpl
 ln ul
 ln kl

		<i>Error</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimación</i>	<i>Estándar</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
CONSTANTE	0,178546	0,268732	0,664401	0,5074
ln dl	-0,289613	0,0596139	-4,85814	0,0000
ln dv	-0,0168789	0,016435	-1,02701	0,3060
ln hfg	0,0241576	0,0293674	0,822597	0,4120
ln Cpl	-0,229332	0,0526652	-4,35453	0,0000
ln ul	0,163341	0,049554	3,29623	0,0012
ln kl	-0,0424078	0,0461355	-0,919201	0,3594

Análisis de Varianza

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo	0,489419	6	0,0815699	25,59	0,0000
Residuo	0,513263	161	0,00318797		
Total (Corr.)	1,00268	167			

R-cuadrada = 48,811 por ciento
 R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 46,9034 por ciento
 Error estándar del est. = 0,0564621
 Error absoluto medio = 0,0441558
 Estadístico Durbin-Watson = 2,01916 (P=0,5492)
 Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0,0102206

a) Pruebas individuales de los coeficientes de regresión.

Aunque la multicolinealidad, que sigue presente también en este modelo, quita fiabilidad a los contrastes estadísticos aquí se van a tener en cuenta como medida orientativa de la bondad del ajuste. Se observan tres valores bastante superiores al 0,05 que se toma como referencia para el estadístico p-valor. Éstos corresponden a las variables ρ_v , h_{fg} y k_l lo que estaría indicando que no presentan relevancia estadística; sin embargo no pueden descartarse ya que son muy importantes para explicar el funcionamiento de la tecnología tipo termosifón.

b) ANOVA del modelo (análisis de varianza).

El p-valor del modelo es de 0,000 lo que señala que existe una relación estadísticamente significativa entre el conjunto de variables explicativas y la variable respuesta.

c) Estadísticos para la bondad del ajuste de regresión.

A la vista de estos estadísticos puede afirmarse que el modelo de regresión, aunque incluye variables estadísticamente poco relevantes, resulta válido si se atiende al análisis de varianza realizado y a los estadísticos que se exponen a continuación. Se tiene:

- $R^2 = 48,811 \%$;
- $R^2_{ajustada} = 46,9034 \%$;
- Error absoluto medio = 0,0441558;

Tras analizar los parámetros que marcan lo bueno o malo del ajuste se presenta el modelo de regresión:

$$\ln R_{\text{term}} = 0,178546 - 0,289613 \cdot \ln \rho_l - 0,0168789 \cdot \ln \rho_v + 0,0241576 \cdot \ln h_{fg} - 0,229332 \cdot \ln c_{pl} + 0,163341 \cdot \ln \mu_l - 0,0424078 \cdot \ln k_l$$

Eliminando los logaritmos y redondeando los coeficientes, el modelo quedaría:

$$R_{\text{term}} = 1,1955 \cdot \left(\frac{h_{fg}^{0,24} \cdot \mu_l^{1,63}}{\rho_l^{2,90} \cdot \rho_v^{0,17} \cdot c_{pl}^{2,29} \cdot k_l^{0,42}} \right)^{1/10} \quad (\text{A VII.2})$$

Esta relación de variables, aunque se ha hecho buscando una mayor coherencia con la bibliografía científica de referencia, sigue siendo difícilmente explicable desde el punto de vista termofísico. Esto se debe fundamentalmente a la ubicación de la variable h_{fg} en el modelo. La entalpía de vaporización, h_{fg} , está situada en el numerador, lo que indicaría que a mayor capacidad de la sustancia para evacuar calor durante los cambios de fase, mayor resistencia térmica presenta el sistema, cosa que va contra toda lógica; por lo tanto, h_{fg} debería ir en el denominador favoreciendo la transferencia de calor y no entorpeciendo.

Esta mala adecuación de los resultados a la teoría termofísica puede seguir explicándose por las fuertes correlaciones que persisten entre variables independientes y que muestran un importante problema de multicolinealidad.

En la matriz de correlaciones calculada por Statgraphics pueden verse, remarcadas en rojo, las elevadas correlaciones entre algunas variables explicativas.

Tabla A VII.10: Matriz de Correlación para las estimaciones de los coeficientes.

	ln dl	ln dv	ln hfg	ln Cpl	ln ul	ln kl
ln dl	1,0000	-0,5403	0,6251	0,2227	-0,7278	-0,7702
ln dv	-0,5403	1,0000	-0,1983	0,3231	0,8246	0,4581
ln hfg	0,6251	-0,1983	1,0000	-0,0815	-0,4259	-0,7661
ln Cpl	0,2227	0,3231	-0,0815	1,0000	0,4099	-0,3283
ln ul	-0,7278	0,8246	-0,4259	0,4099	1,0000	0,4211
ln kl	-0,7702	0,4581	-0,7661	-0,3283	0,4211	1,0000

Otra manera de detectar la multicolinealidad [4] es mediante el uso del factor de inflación de varianza VIF. La multicolinealidad es severa cuando $VIF > 30$ e importante cuando $VIF > 10$. Statgraphics ofrece estos valores y, como puede verse en la tabla siguiente, la multicolinealidad es ciertamente relevante.

Tabla A VII.11: Factores de Inflación de Varianza.

ln dl	ln dv	ln hfg	ln Cpl	ln ul	ln kl
16,567	19,851	25,2124	17,0339	19,2621	33,7238

A VII.1.3. Regresión ridge

La regresión ridge es un método de regresión lineal múltiple que trata de paliar la inflación de varianza que causa la multicolinealidad. A cambio de esto introduce un cierto grado de sesgo en la estimación de los coeficientes de regresión.

A partir del supuesto de que existe multicolinealidad, para determinar la entrada o salida de las variables explicativas, no se emplean los estadísticos de contraste. Se procede de una forma algo más subjetiva en la que hay que tener en cuenta algunas pautas:

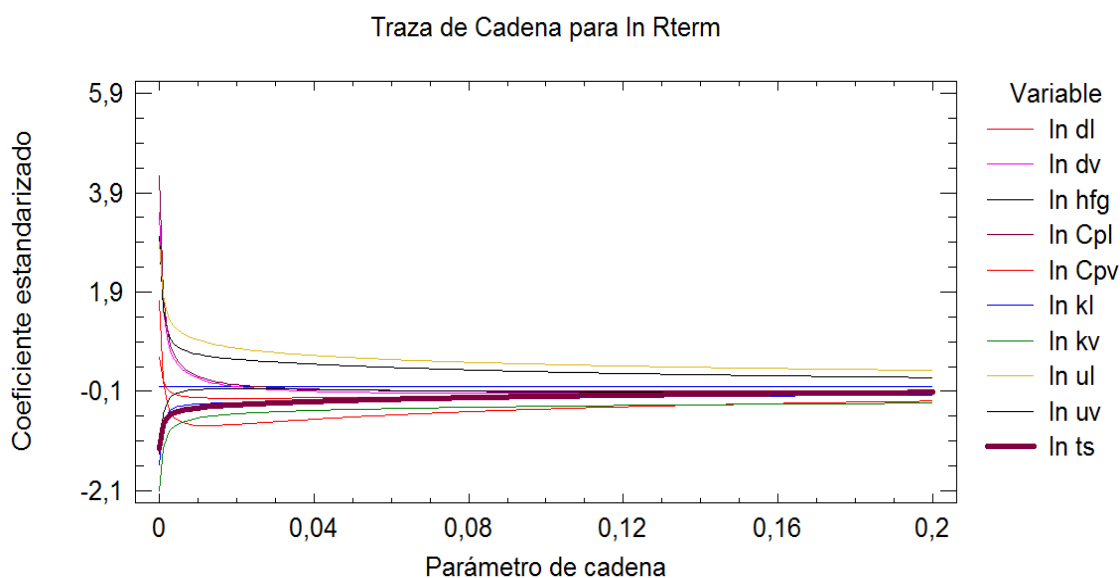
- Eliminar las variables cuyos coeficientes sean estables pero de poco valor.
- Eliminar las variables con coeficientes estandarizados inestables que tienden a cero.
- Eliminar las variables con coeficientes estandarizados inestables.

En este tipo de regresión se incluye un nuevo parámetro denominado parámetro de cadena. Éste ha de ser escogido por el investigador, tal y como se explicó en el apartado 7.1.5.2.

El proceso que se ha seguido para llevar a cabo la regresión ridge para este termosifón cilíndrico de acero pequeño se detalla a continuación.

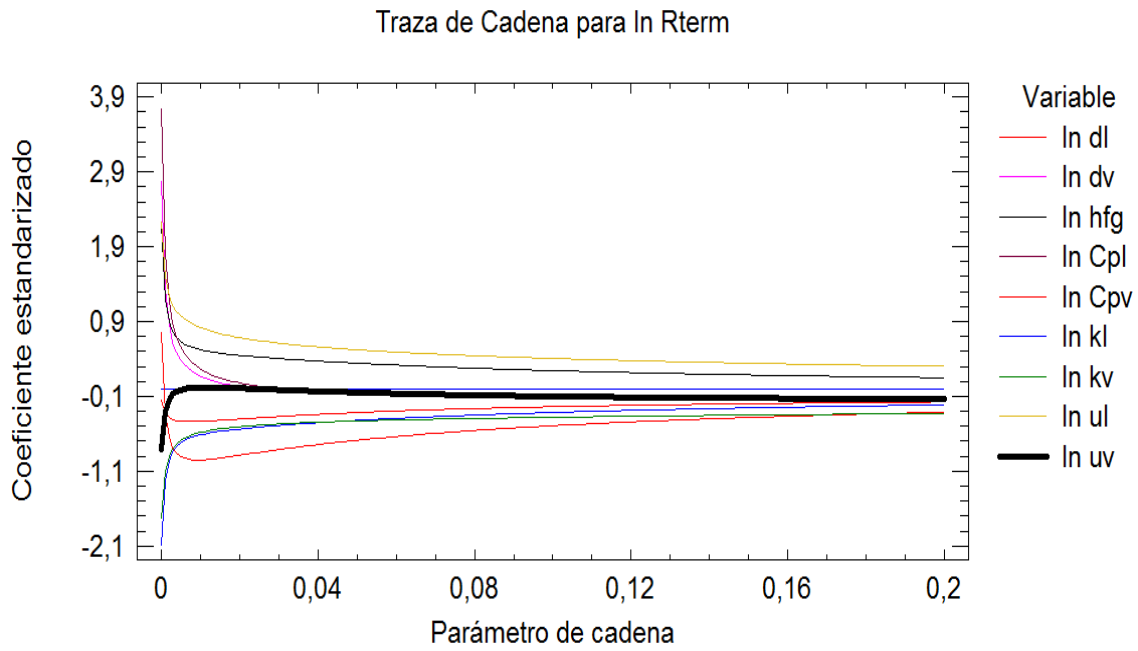
a) Selección de las variables mediante la curva ridge

Se parte de un modelo que incluye a todas las variables regresoras. Con la curva ridge presente se siguen las directrices de selección de variables expuestas anteriormente sin olvidar, claro está, los criterios termofísicos para evitar que salga un conjunto de variables poco coherente. De esta forma se tiene:



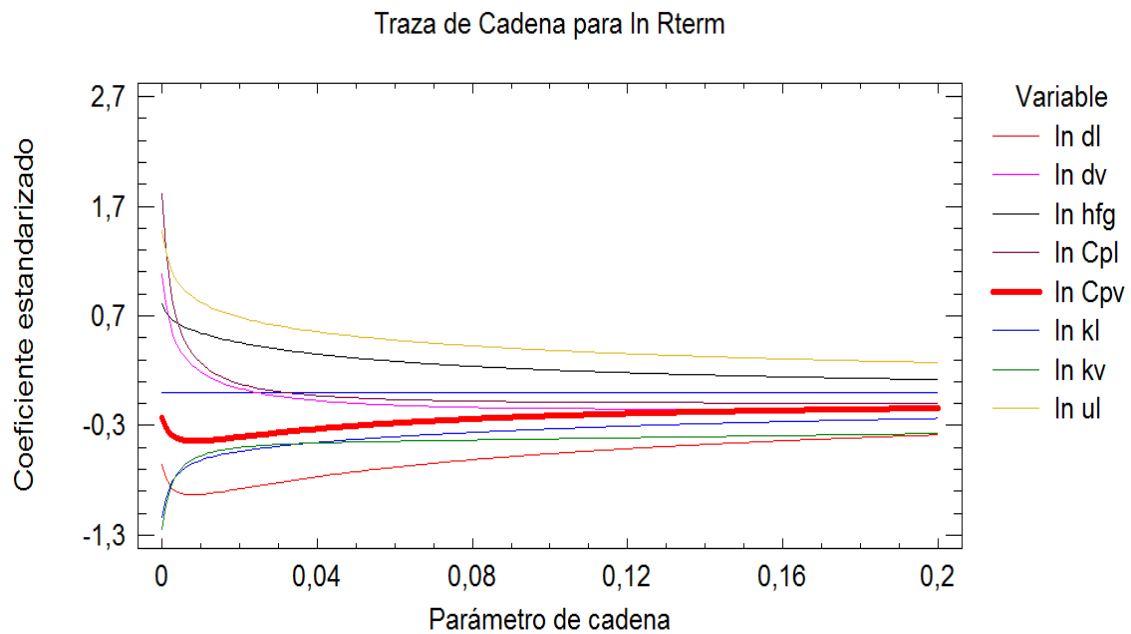
Gráfica A VII.1: Curva ridge para termosifón de acero pequeño.

Primeramente se elimina σ (ln *ts*) que como se puede apreciar (línea granate más gruesa) tiende a anularse rápidamente.



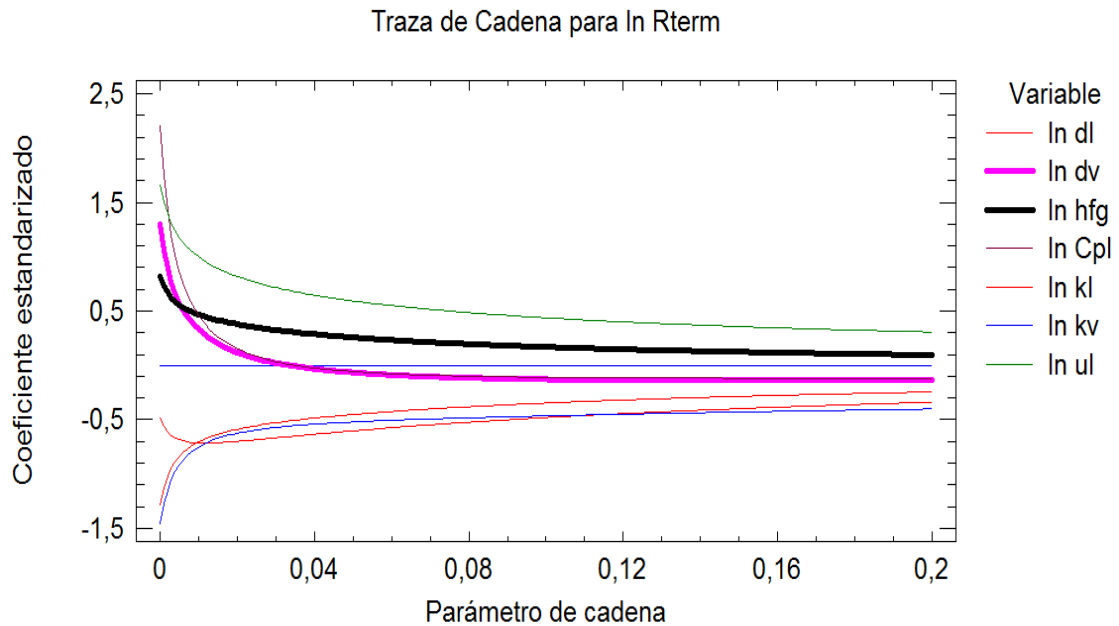
Gráfica A VII.2: Curva ridge para termosifón de acero pequeño.

Para μ_v ($\ln u_v$) se observa que cuando el resto de variables ya presentan valores de sus coeficientes relativamente estables, los de ésta no lo son: muestra valores muy bajos y cambiantes de signo. Se elimina del modelo.



Gráfica A VII.3: Curva ridge para termosifón de acero pequeño.

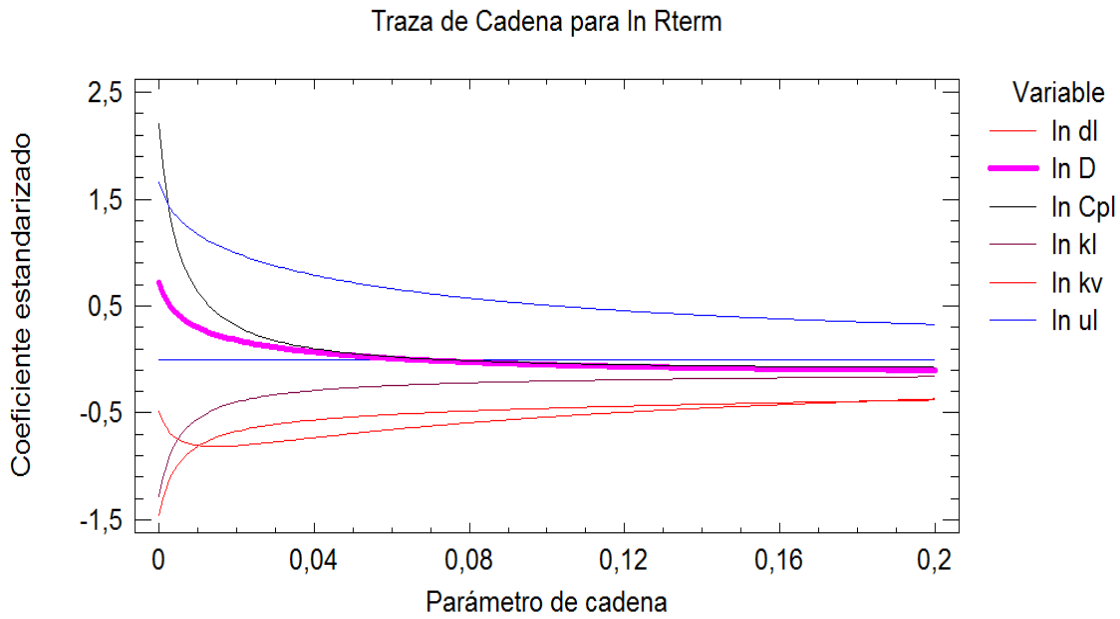
La siguiente variable en ser eliminada es c_{pv} ($\ln c_{pv}$). Es la que tiene un coeficiente estandarizado que parece tender más rápidamente a cero.



Gráfica A VII.4: Curva ridge para termosifón de acero pequeño.

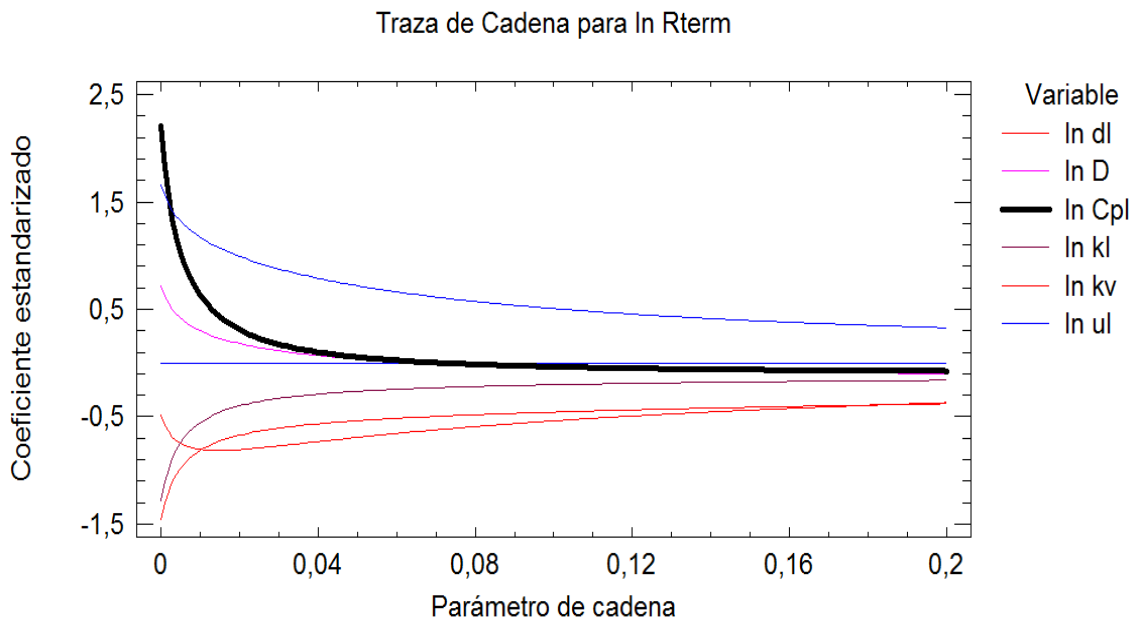
La variable que debería salir ahora sería h_{fg} (línea negra), pero se sabe que es una variable explicativa fundamental desde el punto de vista térmico; también se sabe que h_{fg} y ρ_v están muy relacionadas así que se probó a eliminar ρ_v (línea rosa), pero en los siguientes pasos h_{fg} seguía manteniéndose en valores positivos y, por tanto, poco lógicos desde el punto de vista termofísico. Se unieron ambas variables definiendo una nueva variable, producto de ambas, ($D = \rho_v \cdot h_{fg}$) buscando una mayor estabilidad del modelo.

Esta nueva variable D presenta unidades de densidad de energía (kJ/m^3) por lo que puede interpretarse como un testigo de la cantidad de energía que transporta el vapor de cada sustancia por unidad de volumen. Esta idea de unir ρ_v y h_{fg} como un producto en una sola variable aparece en un artículo [5] de Palm y Khodabandeh.



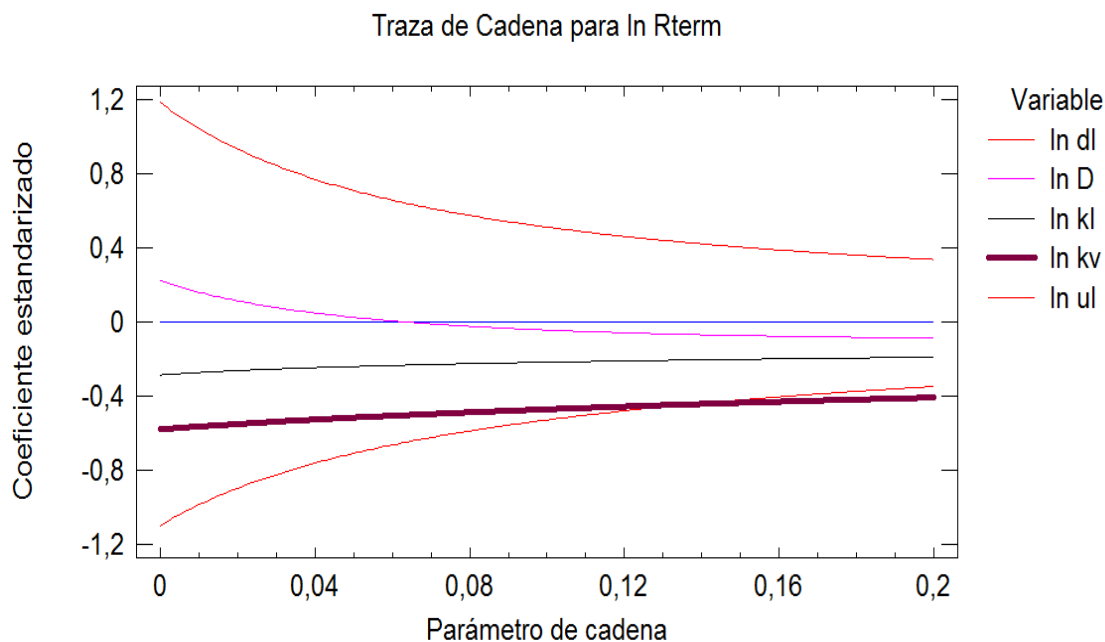
Gráfica A VII.5: Curva ridge para termosifón de acero pequeño.

Ahora se puede apreciar cómo la nueva variable D (línea rosa) que contiene a h_{fg} , es más estable y presenta valores negativos, lo que es termofísicamente más razonable. Habiendo conseguido esto, se sigue con la eliminación de variables.



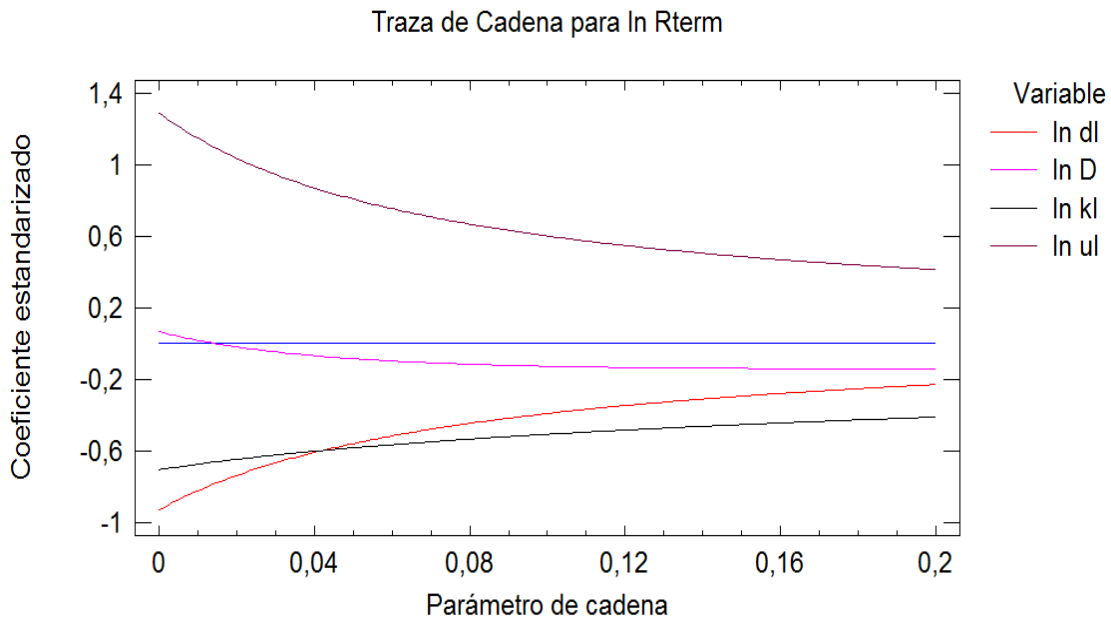
Gráfica A VII.6: Curva ridge para termosifón de acero pequeño.

A continuación se elimina del modelo la variable c_{pl} ($\ln c_{pl}$). Presenta un valor de coeficiente estandarizado pequeño y resulta una variable inestable: inicialmente su coeficiente estandarizado presenta un valor positivo elevado para reducirlo rápidamente hasta valores cercanos a cero y negativos.



Gráfica A VII.7: Curva ridge para termosifón de acero pequeño.

Aunque k_v ($\ln k_v$) es una de las variables más estables que aparecen en la traza, presenta una correlación muy fuerte con la nueva variable D (haciendo un estudio de correlaciones resulta que k_v y D presentan una correlación de $-0,7849$) por lo que es probable que esté distorsionando los resultados. Se prueba a quitarla:



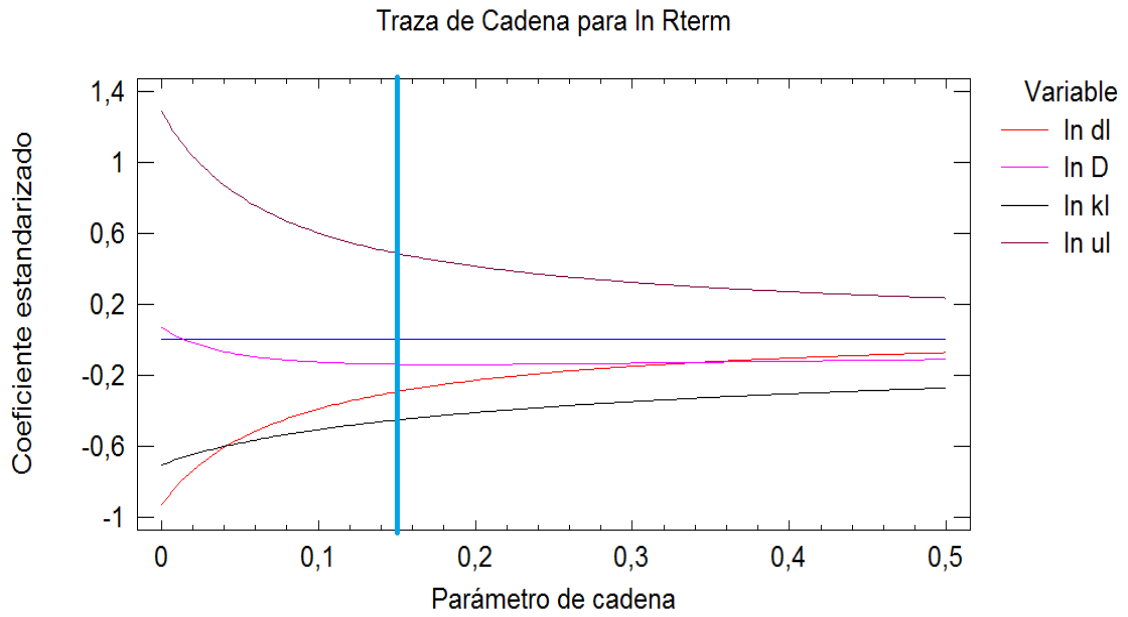
Gráfica A VII.8: Curva ridge para termosifón de acero pequeño.

Una vez eliminada k_v parece que todas las variables presentan valores bastante estables para sus coeficientes estandarizados, habiendo mejorado notablemente la estabilidad de D . Puede concluirse, por tanto, que el conjunto final de variables para el modelo de regresión será el siguiente:

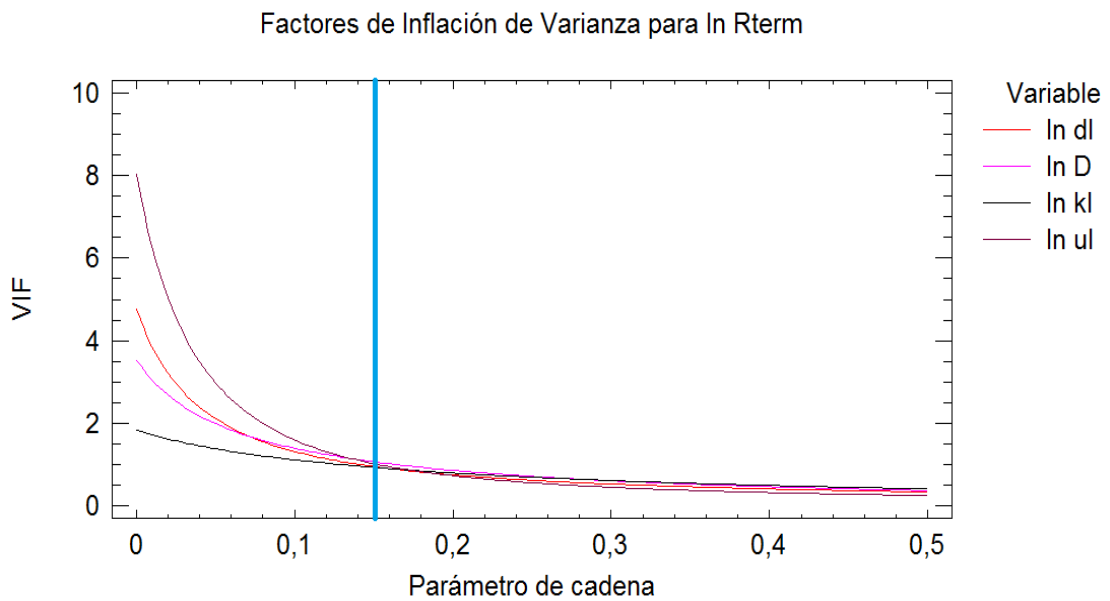
$$\rho_l, (\rho_v \cdot h_{fg}), \mu_l, k_l$$

b) Selección del parámetro de cadena

Analizando las gráficas que se presentan a continuación podrá elegirse un parámetro de cadena (o parámetro ridge) que disipe la multicolinealidad en gran medida, pero que a su vez no reduzca demasiado el poder explicativo del modelo. Es decir, que al aumentar el valor del parámetro de cadena disminuyen los valores de R^2 y de $R^2_{ajustada}$.



Gráfica A VII.9: Parámetro de cadena para termosifón de acero pequeño.



Gráfica A VII.10: VIF para termosifón de acero pequeño.

Se ha tomado como parámetro de cadena 0,15 ya que es un valor relativamente bajo en el que los coeficientes están medianamente estabilizados y el valor de VIF se sitúa en valores próximos a 1. Esto puede apreciarse de forma más clara en la tabla siguiente.

Tabla A VII.12: Factores de Inflación de Varianza.

Parámetro de Cadena	ln dl	ln D	ln ul	ln kl	R-Cuadrada
0,15	0,955433	1,07019	1,02348	0,934281	24,58

c) Validación del modelo

A continuación se muestra la salida de Statgraphics.

Tabla A VII.13: Resultados de la regresión ridge.

<u>Regresión en Cadena - ln Rterm</u>		
Variable dependiente: ln Rterm		
Variables independientes:		
ln dl		
ln D		
ln ul		
ln kl		
Número de casos completos: 168		
Resultados del Modelo para el Parámetro de Cadena = 0,15		
		<i>Factor de Inflación de Varianza</i>
<i>Parámetro</i>	<i>Estimado</i>	
CONSTANTE	-0,722938	
ln dl	-0,076079	0,955433
ln D	-0,0163888	1,07019
ln ul	0,0976501	1,02348
ln kl	-0,063751	0,934281
R-Cuadrada = 24,5812 por ciento R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 22,7304 por ciento Error estándar del est. = 0,0642981 Error medio absoluto = 0,0485532 Estadístico Durbin-Watson = 2,2674 (P=0,9585) Autocorrelación residual de retardo 1 = -0,134482		
Análisis de Residuos		
	<i>Estimación</i>	<i>Validación</i>
n	168	
CME	0,00413425	
MAE	0,0485532	
MAPE		
ME	-3,85274E-16	
MPE		

El estadístico R^2 indica que el modelo, así ajustado, explica el 24,5812% de la variabilidad de R_{term} . El estadístico $R^2_{ajustada}$ es 22,7304%. El error estándar estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 0,0642981. El error absoluto medio (MAE) de 0,0485532 es el valor promedio de los residuos.

El modelo de regresión resultante es:

$$\ln R_{term} = -0,722938 - 0,076079 \cdot \ln \rho_1 - 0,0163888 \cdot \ln D + 0,0976501 \cdot \ln \mu_1 - 0,063751 \cdot \ln k_1$$

Quitando los logaritmos y redondeando los coeficientes, el modelo quedaría:

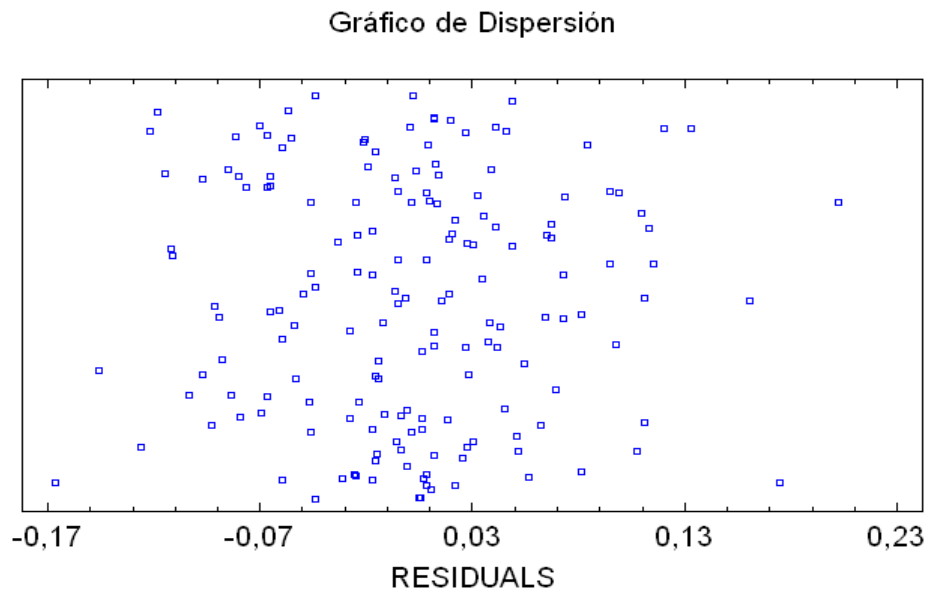
$$R_{\text{term}} = 0,4853 \cdot \left(\frac{\mu_1^{0,98}}{\rho_1^{0,76} \cdot (\rho_v \cdot h_{fg})^{0,16} \cdot k_1^{0,64}} \right)^{1/10} \quad (\text{A VII.3})$$

d) Diagn osis del modelo

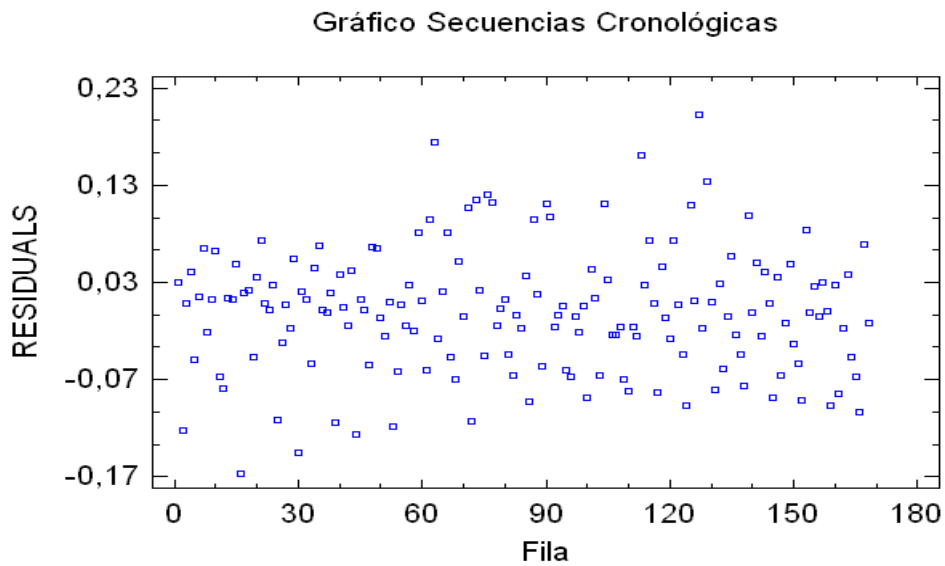
A continuación se presentan los estadísticos y gráficas que indicarán si el modelo es adecuado según los criterios estadísticos.

D.1. Residuales

a) Gráfico de dispersión.



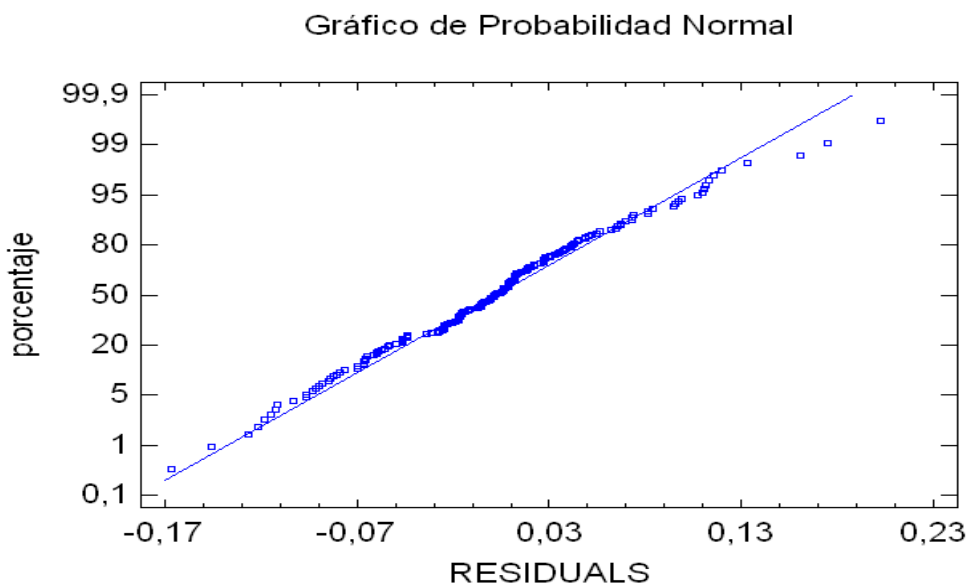
Gráfica A VII.11: Dispersión para termosifón de acero pequeño.



Gráfica A VII.12: Secuencias cronológicas para termosifón de acero pequeño.

No hay tendencias ni agrupaciones especiales; los residuos son aleatorios, no les influye el orden en que se han introducido los datos. Esto último también se puede saber observando el valor del estadístico Durbin-Watson = 2,2674 que al estar próximo a 2 confirma la interpretación hecha para el gráfico.

b) Percentiles de la distribución normal –QQ-norms.



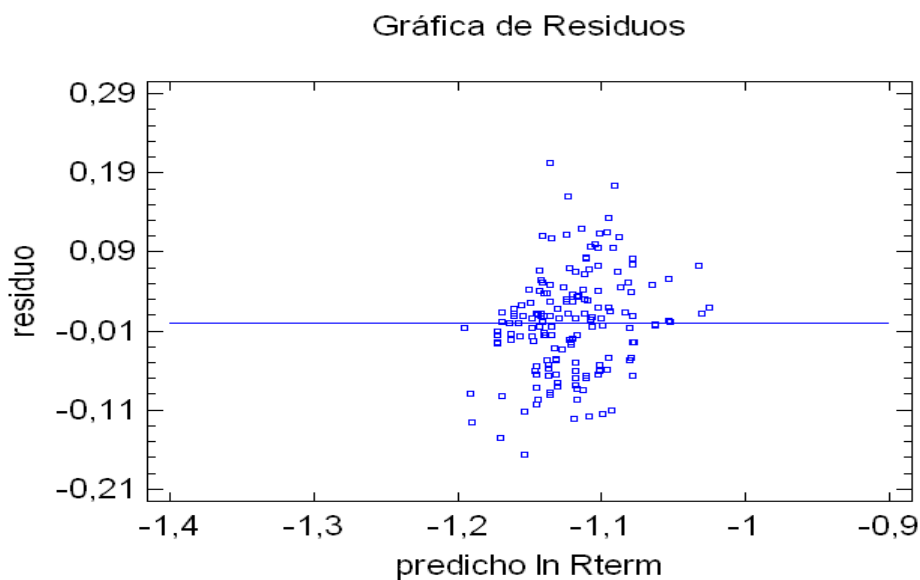
Gráfica A VII.13: Distribución normal para termosifón de acero pequeño.

Los residuos se ajustan bastante bien a la distribución normal. Esto también puede comprobarse atendiendo a los valores que arrojan el sesgo estandarizado y la curtosis; ambos están dentro del rango (-2,2), por lo que puede afirmarse que no hay desviaciones significativas de la normalidad.

Tabla A VII.14: Validación del supuesto de distribución normal.

Sesgo Estandarizado	1,07442
Curtosis Estandarizada	0,960388

c) Gráficos de los residuales frente a los valores ajustados.

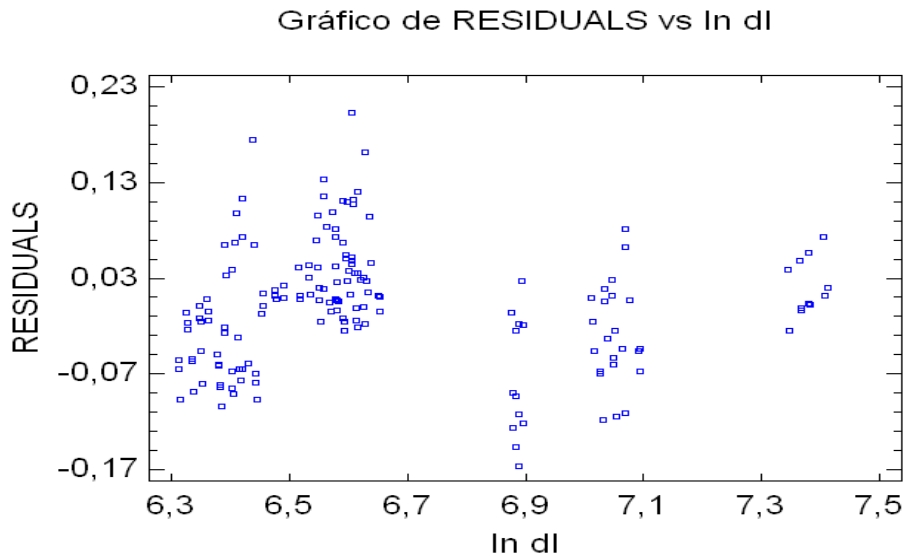


Gráfica A VII.14: Residuales para termosifón de acero pequeño.

No aparecen agrupaciones de residuos ni una tendencia concreta que revele heterocedasticidad (varianza no constante). No se observan tampoco puntos anómalos.

d) Gráficos de los residuales frente a las variables explicativas

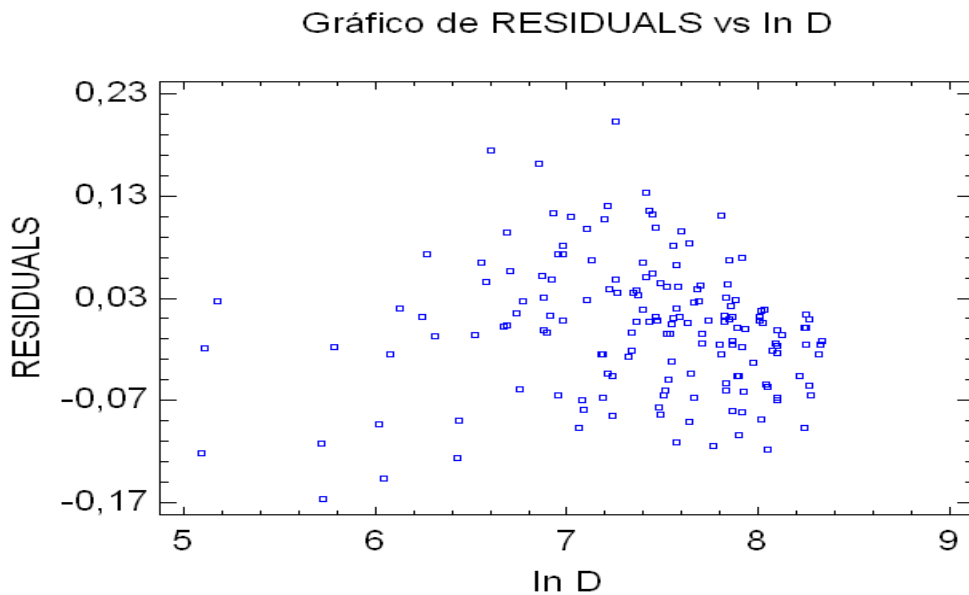
d.1.) Residuales frente a $\ln \rho_1$



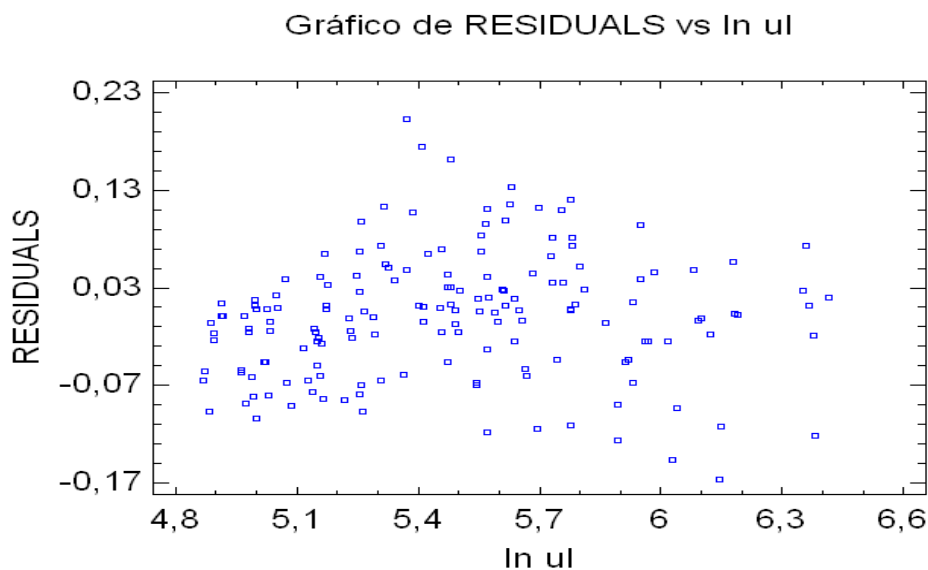
Gráfica A VII.15: Residuales para termosifón de acero pequeño.

Aparecen agrupaciones de residuos por sustancias; esto tiene cierta lógica ya que no todas las sustancias se mueven en el mismo rango de valores para sus distintas propiedades, en este caso la densidad de líquido. Por ejemplo, los datos agrupados más a la derecha corresponden al perfluoroheptano, así como los que se agrupan en torno al valor de 6,9 pertenecen al agua. Este hecho podrá observarse también en alguna de las gráficas que siguen.

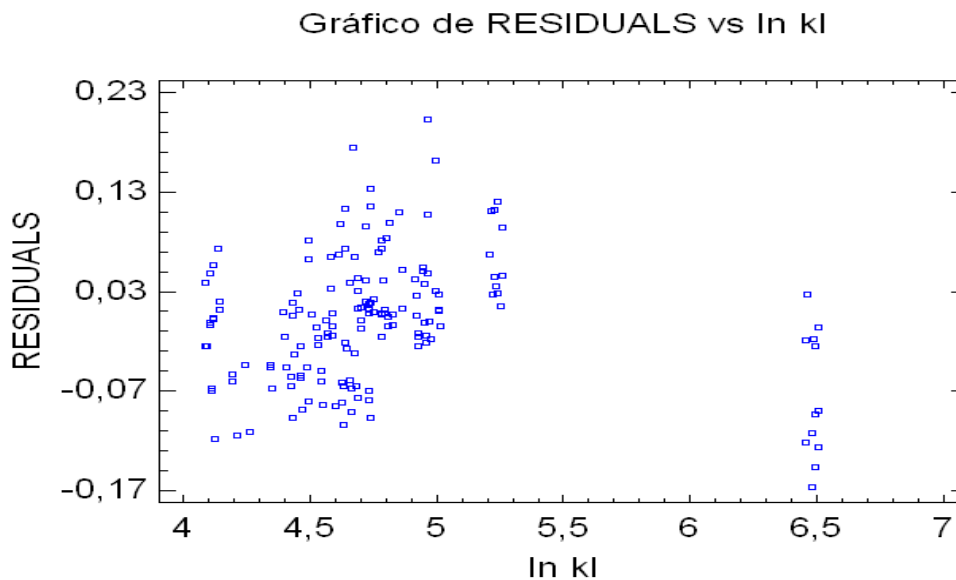
d.2.) Residuales frente a $\ln(\rho_v \cdot h_{fg})$.



Gráfica A VII.16: Residuales para termosifón de acero pequeño.

d.3.) Residuales frente a $\ln \mu_1$ 

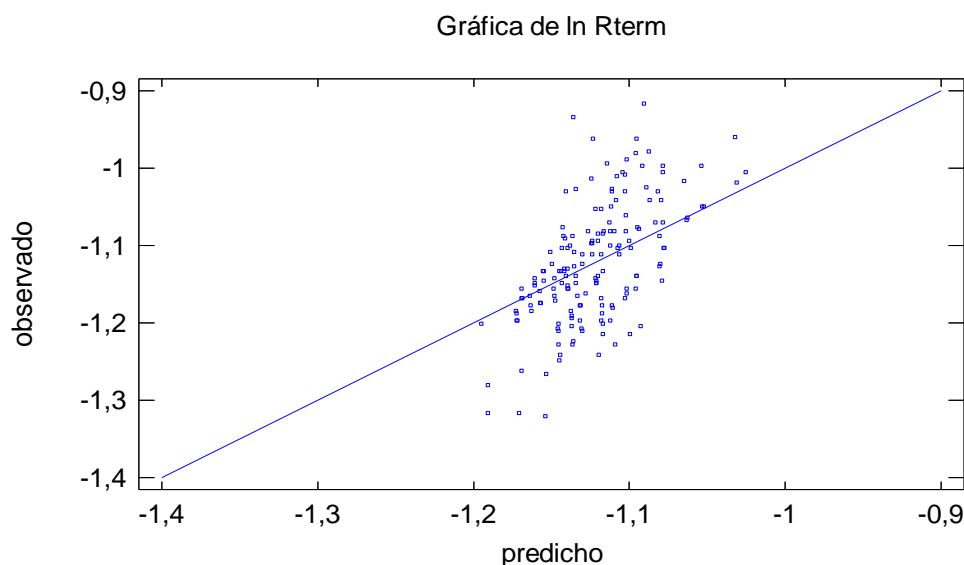
Gráfica A VII.17: Residuales para termosifón de acero pequeño.

d.4.) Residuales frente a $\ln k_1$ 

Gráfica A VII.18: Residuales para termosifón de acero pequeño.

A la vista de los gráficos presentados puede concluirse que no hay tendencias específicas de los residuos solamente las consabidas agrupaciones por sustancia que ya han sido señaladas. Tampoco hay puntos claramente atípicos o influyentes.

e) Gráficos de valores observados frente a valores ajustados.



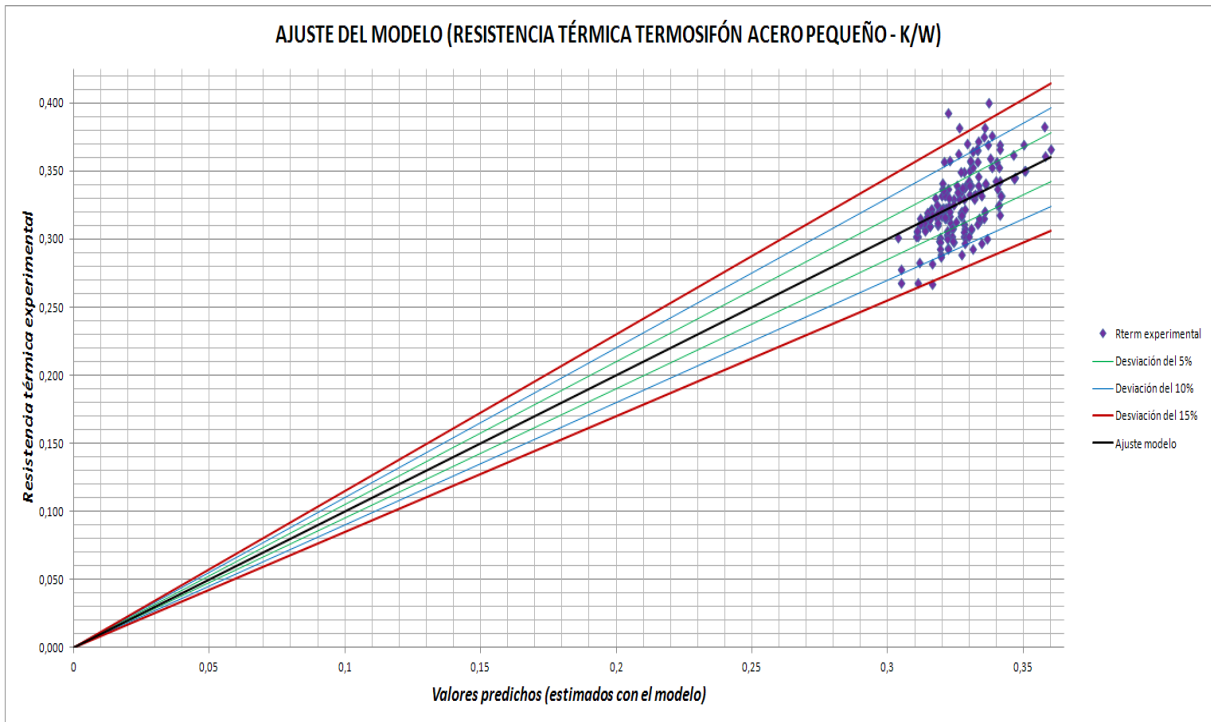
Gráfica A VII.19: Valores ajustados para termosifón de acero pequeño.

El ajuste parece adecuado, los valores observados se ciñen bastante bien a la diagonal. Tampoco se aprecian aquí puntos claramente distorsionadores.

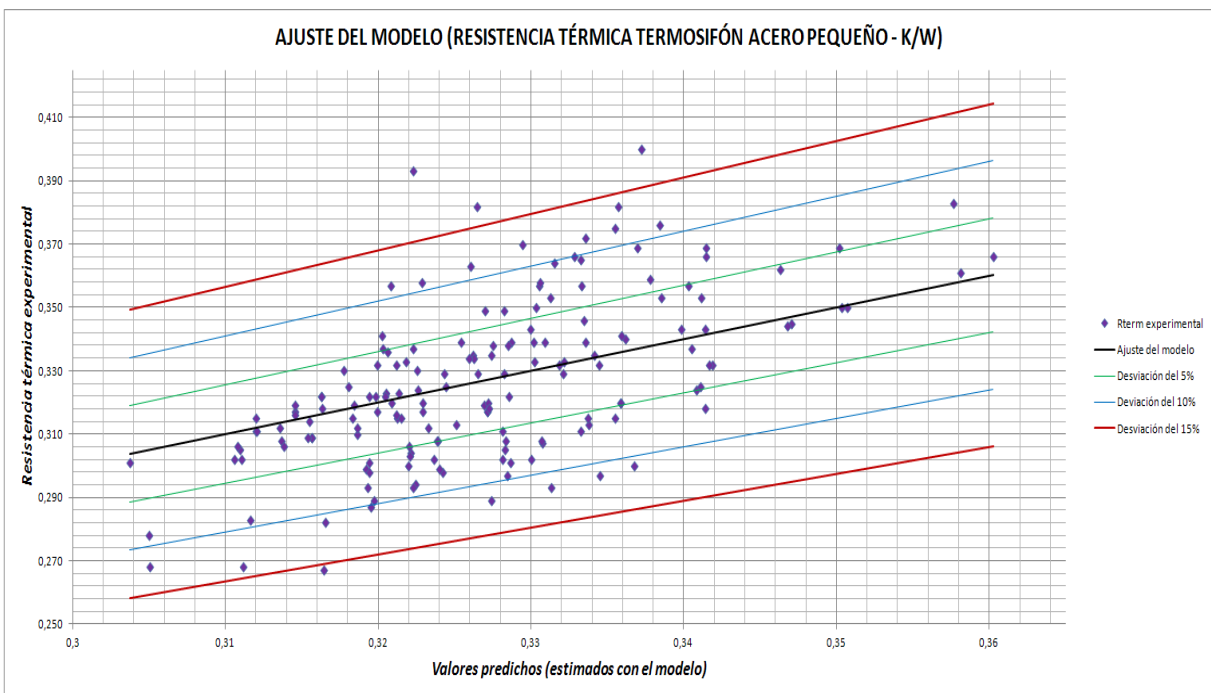
En las dos hojas siguientes se muestra la gráfica A VII.19 representada con Excel, donde aparece también la acotación del error cometido en la estimación. En estas dos gráficas, la A VII.20 y la A VII.21, puede verse cómo casi la totalidad de los puntos caen entre las líneas que delimitan el error al $\pm 10\%$, siendo anecdóticos los puntos que presentan un error absoluto superior al 15% (4 puntos de 168, menos del 2,5%). Este tipo de representación aparece con frecuencia (véase [6], [7] y [8]) en artículos de transferencia de calor.

Tras todo este proceso de validación y a la vista de las últimas gráficas puede concluirse que el modelo matemático de regresión es adecuado para explicar el comportamiento del termosifón de acero pequeño.

De este estudio se deduce también, como dato de relevancia, que el tipo de sustancia empleada explica cerca del 25% de la transferencia de calor dentro del termosifón. El estadístico $R^2 = 24,58\%$ es el indicador de este hecho.



Gráfica A VII.20: Ajuste del modelo del termosifón de acero pequeño



Gráfica A VII.21: Ajuste del modelo del termosifón de acero pequeño

A VII.1.4. Regresión múltiple

A continuación se muestra la regresión lineal múltiple, de tipo clásico, que se ha realizado para este termosifón. Se procede de forma similar al apartado 7.4.1. Además, como ocurría con los otros termosifones, debido a los problemas de multicolinealidad, hubo que descartar esta regresión y recurrir a la regresión ridge.

a) Datos estudiados

- Variable dependiente: R_{term} (resistencia térmica).
- Variables independientes: Propiedades termofísicas: $\rho_l, \rho_v, h_{fg}, c_{pl}, c_{pv}, \mu_l, \mu_v, k_l, k_v, \sigma$.

En total son: 10 variables independientes + 1 variable dependiente. Las tablas se pasan a escala logarítmica.

Análisis de correlaciones

- a) Entre R_{term} y las variables explicativas.

Se exponen las correlaciones de mayor magnitud entre la variable respuesta y las explicativas. Este análisis puede orientar en la determinación de qué variables deberían entrar en el modelo de regresión, ya que a priori presentan una mayor relación con R_{term} .

Tabla A VII.15: Correlaciones entre R_{term} y las variables explicativas.

Variable	Correlación
ρ_l	0,2739
ρ_v	0,6280
h_{fg}	-0,7486
c_{pl}	-0,6701
c_{pv}	-0,6069
k_l	-0,7253
k_v	-0,6348
σ	-0,7050

- b) Se aprecian fuertes correlaciones entre las variables explicativas. Se muestran, por resumir, aquellas que superan el 0,8.

Hay 13 correlaciones entre variables por encima del 80%; estas son:

- 1) $\rho_{I-C_{pv}}$ (-0,8478); 2) $\rho_{I-\mu_1}$ (0,8313); 3) $\rho_{I-\mu_v}$ (0,8455); 4) ρ_v-h_{fg} (-0,8877);
- 5) ρ_v-k_1 (-0,9434); 6) $\rho_v-\sigma$ (-0,9481); 7) $h_{fg}-c_{pl}$ (0,8737); 8) $h_{fg}-k_1$ (0,9582);
- 9) $h_{fg}-\sigma$ (0,9199); 10) $c_{pl}-c_{pv}$ (0,8810); 11) $c_{pl}-k_v$ (0,9185); 12) $c_{pv}-k_v$ (0,8701);
- 13) $k_1-\sigma$ (0,9721);

Lo anterior implica un importante problema de multicolinealidad.

b) Elección del mejor conjunto de regresión

Se persigue reducir el número de variables explicativas de forma que se eliminen aquellas con menor poder explicativo, las menos relevantes, y simplificar, de esta forma, el modelo de regresión.

B.1. Criterio de mayor R^2 ajustada

B.2. Criterio de menor Cp de Mallows

Estos dos estudios se han realizado conjuntamente, ya que el análisis ha dado los mismos resultados indistintamente del criterio empleado.

A continuación se muestran las salidas de Statgraphics para este estudio.

Tabla A VII.16: Elección del conjunto de regresión.

Selección del Modelo de Regresión - ln Rterm				
Variable dependiente: ln Rterm				
Variables independientes:				
A=ln dl				
B=ln dv				
C=ln hfg				
D=ln Cpl				
E=ln Cpv				
F=ln ul				
G=ln uv				
H=ln kl				
I=ln kv				
J=ln ts				
Modelos con Mayor R-Cuadrada Ajustada				
		<i>R-Cuadrada</i>		<i>Variables</i>
<i>CME</i>	<i>R-Cuadrada</i>	<i>Ajustada</i>	<i>Cp</i>	<i>Incluidas</i>
0,000518345	76,8128	74,8805	7,00924	ABDEHIJ
0,000543848	75,6719	73,6446	11,0934	ABDFHIJ
0,000548249	75,1831	73,4313	10,8435	ABDHIJ
0,000549471	75,4204	73,3721	11,9938	ABCDHIJ
0,000551234	75,3415	73,2866	12,2762	BCDEHIJ
0,000552515	75,2842	73,2246	12,4813	ABDGHIJ
0,000560815	74,6143	72,8223	12,8797	BDEHIJ
0,000572691	74,0767	72,2468	14,8042	BCDFHI
Modelos con Menor Cp				
		<i>R-Cuadrada</i>		<i>Variables</i>
<i>CME</i>	<i>R-Cuadrada</i>	<i>Ajustada</i>	<i>Cp</i>	<i>Incluidas</i>
0,000518345	76,8128	74,8805	7,00924	ABDEHIJ
0,000548249	75,1831	73,4313	10,8435	ABDHIJ
0,000543848	75,6719	73,6446	11,0934	ABDFHIJ
0,000549471	75,4204	73,3721	11,9938	ABCDHIJ
0,000551234	75,3415	73,2866	12,2762	BCDEHIJ
0,000552515	75,2842	73,2246	12,4813	ABDGHIJ
0,000560815	74,6143	72,8223	12,8797	BDEHIJ
0,000572691	74,0767	72,2468	14,8042	BCDFHI

Las conclusiones de este estudio son:

- El mejor conjunto de regresión es aquel formado por las variables:

$$\rho_l, \rho_v, c_{pl}, c_{pv}, \mu_v, k_l, k_v, \sigma$$

- Las variables más relevantes, a tener en cuenta para la regresión lineal, son las mismas que constituyen el considerado como mejor conjunto de regresión pero añadiendo la variable h_{fg} . Se introduce dicha variable debido a que es fundamental en la explicación del funcionamiento de los termosifones, en cuanto está basado en los cambios de fase líquido – vapor. Así pues el conjunto de variables a tener en cuenta sería:

$$\rho_l, \rho_v, h_{fg}, c_{pl}, c_{pv}, \mu_v, k_l, k_v, \sigma$$

B.3. Regresión paso a paso

Para aplicar este criterio se parte ya de la selección de variables hecha anteriormente con los criterios de mayor R^2 ajustada y menor C_p ; esto es, se parte del siguiente conjunto:

$$\rho_l, \rho_v, h_{fg}, c_{pl}, c_{pv}, \mu_v, k_l, k_v, \sigma$$

- Hacia adelante.

Se muestran a continuación las salidas que ofrece Statgraphics.

Tabla A VII.17: Resultados de la regresión múltiple.

<u>Regresión Múltiple - ln Rterm</u>					
Variable dependiente: ln Rterm					
Variables independientes:					
ln dl					
ln dv					
ln hfg					
ln Cpl					
ln Cpv					
ln kl					
ln kv					
ln ts					
		Error	Estadístico		
Parámetro	Estimación	Estándar	T	Valor-P	
CONSTANTE	-1,65429	0,0199246	-83,0272	0,0000	
ln hfg	-0,0372313	0,00347613	-10,7106	0,0000	
Análisis de Varianza					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	0,105226	1	0,105226	114,72	0,0000
Residuo	0,0825541	90	0,000917268		
Total (Corr.)	0,18778	91			
R-cuadrada = 56,0367 por ciento					
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 55,5483 por ciento					
Error estándar del est. = 0,0302864					
Error absoluto medio = 0,0246827					
Estadístico Durbin-Watson = 1,03094 (P=0,0000)					
Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0,469112					

El modelo corresponde a:

$$\ln R_{\text{term}} = -1,65429 - 0,0372313 \cdot \ln h_{fg}$$

Eliminando los logaritmos y redondeando el coeficiente, el modelo quedaría como se muestra a continuación:

$$R_{\text{term}} = 0,1912 \cdot \left(\frac{1}{h_{fg}^{0,37}} \right)^{1/10} \quad (\text{A VII.4})$$

El modelo obtenido es estadísticamente relevante, tal y como indican los valores que arroja la pantalla de Statgraphics. Sin embargo, sorprende notablemente este resultado, ya que la variable h_{fg} ha sido incluida, de forma artificiosa, por criterios termofísicos y había sido desechada previamente por el análisis estadístico. De todas formas, aunque resulte un modelo a descartar, principalmente por el reducido número de variables explicativas involucrado, sí que parece corroborar la gran importancia de la entalpía de vaporización en la explicación del funcionamiento de los termosifones; en el termosifón en estudio (acero grande) esta variable es razón, por sí sola, del 56% de la variabilidad de la resistencia térmica (valor de R^2).

- Hacia atrás

Se muestran a continuación las salidas que ofrece Statgraphics.

Tabla A VII.18: Resultados de la regresión múltiple.

Regresión Múltiple - ln Rterm					
Variable dependiente: ln Rterm					
Variables independientes:					
ln dl					
ln dv					
ln hfg					
ln Cpl					
ln Cpv					
ln ul					
ln uv					
ln kl					
ln kv					
ln ts					
Parámetro	Estimación	Error Estándar	Estadístico T	Valor-P	
CONSTANTE	-1,27939	0,219997	-5,81549	0,0000	
ln dl	0,148592	0,0526524	2,82213	0,0060	
ln dv	0,0620728	0,0148045	4,19283	0,0001	
ln Cpl	0,679359	0,101174	6,71474	0,0000	
ln Cpv	-0,105331	0,0433499	-2,42978	0,0172	
ln kl	-0,300902	0,053196	-5,65648	0,0000	
ln kv	-0,499052	0,0788866	-6,3262	0,0000	
ln ts	0,241721	0,0722528	3,34549	0,0012	
Análisis de Varianza					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	0,144239	7	0,0206056	39,75	0,0000
Residuo	0,043541	84	0,000518345		
Total (Corr.)	0,18778	91			
R-cuadrada = 76,8128 por ciento					
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 74,8805 por ciento					
Error estándar del est. = 0,0227672					
Error absoluto medio = 0,0174421					
Estadístico Durbin-Watson = 1,43421 (P= 0,0032)					
Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0,281867					

El modelo resultante es:

$$\ln R_{term} = -1,27939 + 0,148592 \cdot \ln \rho_l + 0,0620728 \cdot \ln \rho_v + 0,679359 \cdot \ln c_{pl} - \\ - 0,105331 \cdot \ln c_{pv} - 0,300902 \cdot \ln k_l - 0,499052 \cdot \ln k_v + 0,241721 \cdot \ln \sigma$$

Quitando los logaritmos y redondeando los coeficientes, el modelo quedaría:

$$R_{term} = 0,2782 \cdot \left(\frac{\rho_l^{1,49} \cdot \rho_v^{0,62} \cdot c_{pl}^{6,79} \cdot \sigma^{2,42}}{c_{pv}^{1,05} \cdot k_l^{3,01} \cdot k_v^{4,99}} \right)^{1/10} \quad (\text{A VII.5})$$

El modelo obtenido es, obviamente, estadísticamente relevante, basta con fijarse en los valores de los estadísticos que muestra la pantalla de Statgraphics. Sin embargo, esta relación de variables es difícilmente explicable desde el punto de vista termofísico; de hecho, pueden reseñarse algunas características de este modelo que resultan poco lógicas:

- La entalpía de vaporización, h_{fg} , no aparece y sin embargo se sabe que es fundamental para explicar la transferencia de calor en los cambios de fase líquido - vapor. De hecho el análisis de regresión anterior la situaba como la variable independiente más importante al crear un modelo en el que h_{fg} era el único regresor a considerar.
- Está presente la conductividad térmica del vapor, k_v , cuando no debería ser una variable relevante del sistema. Si se atiende a que el vapor se desplaza dentro del tubo a velocidades muy altas, la lógica indica que la convección debe prevalecer sobre la conductividad, en la fase gaseosa al menos.
- Aparece la tensión superficial, σ , que no debería ser de relevancia, ya que la vuelta del líquido al evaporador tiene lugar por gravedad y no por capilaridad como ocurre en las mechas de los tubos de calor.

Esta distorsión en el modelo puede explicarse por las altas correlaciones que aparecen entre las variables independientes; esto es, la distorsión se debe a la presencia de multicolinealidad.

En la matriz de correlaciones calculada por Statgraphics pueden verse, resaltadas en rojo, las elevadas correlaciones entre algunas variables explicativas.

Tabla A VII.19: Correlaciones entre variables explicativas

Matriz de Correlación para las estimaciones de los coeficientes							
	ln dl	ln dv	ln Cpl	ln Cpv	ln kl	ln kv	ln ts
ln dl	1,0000	-0,1038	0,3730	0,7130	0,0882	-0,7111	-0,4025
ln dv	-0,1038	1,0000	0,8140	-0,6866	-0,8253	-0,5121	0,8730
ln Cpl	0,3730	0,8140	1,0000	-0,3570	-0,8324	-0,8420	0,6585
ln Cpv	0,7130	-0,6866	-0,3570	1,0000	0,7076	-0,1440	-0,8853
ln kl	0,0882	-0,8253	-0,8324	0,7076	1,0000	0,4542	-0,9268
ln kv	-0,7111	-0,5121	-0,8420	-0,1440	0,4542	1,0000	-0,2161
ln ts	-0,4025	0,8730	0,6585	-0,8853	-0,9268	-0,2161	1,0000

La multicolinealidad desdibuja la verdadera influencia de las variables predictoras sobre la variable respuesta y, por tanto, puede dar lugar a conjuntos de regresión que, si bien parecen ser los más adecuados, llevarían a interpretaciones y conclusiones erróneas.

Habiendo presentado estos dos argumentos, el termofísico (falta de coherencia con la teoría aceptada por la comunidad científica) y el estadístico (presencia de multicolinealidad), se rechaza el modelo resultante obtenido con la regresión.

A VII.1.5. Regresión múltiple con las variables termofísicamente relevantes

A la vista de que la que la regresión lineal clásica basada únicamente en criterios estadísticos, no ofrece resultados válidos, se procede a realizar una regresión múltiple que, con base en criterios estadísticos, tenga presente en mayor medida los fundamentos de la transferencia de calor.

Se vuelven a introducir en el modelo todas las variables independientes en estudio:

$$\rho_l, \rho_v, h_{fg}, c_{pl}, c_{pv}, \mu_l, \mu_v, k_l, k_v, \sigma$$

Debido a que la multicolinealidad invalida los contrastes habituales que permiten inferir qué variables son las más influyentes, los criterios de salida y entrada de las variables se van a fundamentar en:

- Correlaciones entre variables explicativas: se eliminarán aquellas variables que estén fuertemente correladas y que no discrepen con los dos siguientes criterios.

- b) Las variables consideradas como termofísicamente relevantes, según las teorías científicas aceptadas en la bibliografía consultada, son:

$$\rho_l, \rho_v, h_{fg}, c_{pl}, \mu_l, k_l$$

- c) Variaciones en R^2 , $R^2_{ajustada}$ y el Error Absoluto Medio (EAM): servirán para saber cómo de acertada es la entrada y salida de una variable.

A continuación se expone de forma somera el proceso de eliminación de variables partiendo del modelo de regresión que las incluye a todas.

- 1) Primera eliminación: k_v

Presenta fuertes correlaciones con 3 variables independientes. Además, no se trata de una variable de relevancia, ya que el vapor se mueve a velocidades elevadas dentro del termosifón, por lo que la transferencia de calor tiene lugar simultáneamente a la transferencia de masa (convección); la conductividad del vapor, por tanto, no debería presentar un papel significativo.

Tabla A VII.20: Correlaciones entre k_v y las demás variables explicativas

Correlaciones	ln k_v
ln dl	-0,1418
ln dv	0,1498
ln hfg	0,0817
ln Cpl	-0,6707
ln Cpv	-0,5030
ln ul	0,0690
ln uv	-0,6633
ln kl	0,1245
ln k_v	1,0000
ln ts	0,2866

- 2) Segunda eliminación: μ_v

Presenta fuertes correlaciones con 4 variables independientes, no siendo tampoco una variable muy a tener en cuenta para los fenómenos de cambio de fase en termosifones.

Tabla A VII.21: Correlaciones entre μv y las demás variables explicativas.

Correlaciones	ln uv
ln dl	-0,1032
ln dv	-0,8610
ln hfg	-0,5238
ln Cpl	-0,7218
ln Cpv	-0,0614
ln ul	-0,7334
ln uv	1,0000
ln kl	-0,0773
ln ts	-0,0252

3) Tercera eliminación: c_{pv}

Muestra correlaciones con 3 variables independientes. Tampoco se trata de una de las variables que se han tomado como relevantes en la bibliografía científica consultada.

Tabla A VII.22: Correlaciones entre c_{pv} y las demás variables explicativas.

Correlaciones	ln Cpv
ln dl	0,3051
ln dv	-0,2861
ln hfg	-0,0195
ln Cpl	-0,8457
ln Cpv	1,0000
ln ul	0,1745
ln kl	0,8638
ln ts	-0,8428

4) Cuarta eliminación: σ

Presenta fuertes correlaciones con las 5 variables a tener en consideración. No se trata tampoco de una variable importante para la construcción del modelo; sí que sería una propiedad relevante si se estuviese trabajando con tubos de calor donde la vuelta del líquido al evaporador tiene lugar por capilaridad; sin embargo, en los termosifones este retorno se debe únicamente a la fuerza de la gravedad.

Tabla A VII.23: Correlaciones entre σ y las demás variables explicativas.

Correlaciones	ln ts
ln dl	0,8110
ln dv	-0,7058
ln hfg	-0,8798
ln Cpl	0,5894
ln ul	-0,8174
ln kl	-0,7515
ln ts	1,0000

5) Modificación del conjunto de variables final: introducción de la variable ($\rho_v \cdot h_{fg}$)

Se ha propuesto una nueva variable ($\rho_v \cdot h_{fg}$), que en las gráficas que muestran las salidas de Statgraphics se denotará como D . Con esta variable se reducen las correlaciones entre regresores (ρ_v y h_{fg} presentaban correlaciones de relevancia con ρ_l además de con otras variables, tal y como se indica en la tabla siguiente) y mejora el valor de $R^2_{ajustada}$.

Tabla A VII.24: Correlaciones entre qv y hfg y las demás variables explicativas.

Correlaciones	ln dv	ln hfg
ln dl	-0,8718	-0,6039
ln dv	1,0000	0,6191
ln hfg	0,6191	1,0000
ln Cpl	0,3022	-0,0102
ln ul	0,9530	0,6859
ln kl	0,2089	-0,4953

6) Quinta eliminación: c_{pl}

Presenta una correlación bastante fuerte con k_l y atendiendo también a los p-valores: presenta un valor muy superior al 0,05 que corresponde al nivel de confianza con el que se está trabajando (95%). Además, al eliminar esta variable del modelo, mejora el valor de $R^2_{ajustada}$.

Tabla A VII.25: Correlaciones entre cpl y las demás variables explicativas.

Correlaciones	ln Cpl
ln dl	0,1362
ln D	0,2040
ln Cpl	1,0000
ln ul	0,2597
ln kl	-0,9218

Tabla A VII.26: P-valores de las variables que quedan en el modelo.

	Valor-P
ln dl	0,0005
ln D	0,0002
ln Cpl	0,8321
ln ul	0,0013
ln kl	0,0011

Tras el proceso de eliminación - modificación, el conjunto final de variables resulta ser:

$$\rho_l, (\rho_v \cdot h_{fg}), \mu_l, k_l$$

Validación del modelo

A continuación se muestra la salida de Statgraphics con los valores de los principales estadísticos que son testigo de la bondad del modelo.

Tabla A VII.27: Resultado de la regresión.

Regresión Múltiple - ln Rterm

Variable dependiente: ln Rterm

Variables independientes:

ln dl

ln D

ln ul

ln kl

		Error	Estadístico	
Parámetro	Estimación	Estándar	T	Valor-P
CONSTANTE	-1,17941	0,16598	-7,10578	0,0000
ln dl	0,18551	0,0504458	3,67741	0,0004
ln D	-0,0767877	0,0192594	-3,98702	0,0001
ln ul	-0,206678	0,0606654	-3,40686	0,0010
ln kl	-0,0499688	0,00537406	-9,29815	0,0000

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	0,119836	4	0,0299589	38,36	0,0000
Residuo	0,0679444	87	0,00078097		
Total (Corr.)	0,18778	91			

R-cuadrada = 63,817 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 62,1534 por ciento

Error estándar del est. = 0,0279458

Error absoluto medio = 0,022217

Estadístico Durbin-Watson = 1,26984 (P=0,0001)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0,361202

a) Pruebas individuales de los coeficientes de regresión.

Aunque la multicolinealidad, que sigue presente también en este modelo, quita fiabilidad a los contrastes estadísticos aquí se van a tener en cuenta como medida orientativa de la bondad del ajuste. De esta forma se observa que todos los p-valor de los coeficientes de regresión son menores a 0,05, lo que indica que son estadísticamente relevantes a un nivel de confianza del 95%. El mayor valor de este estadístico es 0,001 y corresponde a μ_1 .

b) ANOVA del modelo (análisis de varianza).

El p-valor del modelo es de 0,000 lo que señala que existe una relación estadísticamente significativa entre el conjunto de variables explicativas y la variable respuesta.

c) Estadísticos para la bondad del ajuste de regresión.

A la vista de estos estadísticos puede afirmarse que el modelo de regresión, aunque incluye variables estadísticamente poco relevantes, resulta válido si se atiende al análisis de varianza realizado y a los estadísticos que se exponen a continuación. Se tiene:

- $R^2 = 63,817 \%$;
- $R^2_{ajustada} = 62,1534 \%$;
- Error absoluto medio = 0,022217;

Tras analizar los parámetros que marcan lo bueno o malo del ajuste se presenta el modelo de regresión:

$$\ln R_{\text{term}} = -1,17941 + 0,18551 \cdot \ln \rho_l - 0,0767877 \cdot \ln (\rho_v \cdot h_{fg}) - 0,206678 \cdot \ln \mu_l - 0,0499688 \cdot \ln k_l$$

Eliminando los logaritmos y redondeando los coeficientes, el modelo quedaría:

$$R_{\text{term}} = 0,3075 \cdot \left(\frac{\rho_l^{1,86}}{(\rho_v \cdot h_{fg})^{0,77} \cdot \mu_l^{2,07} \cdot k_l^{0,5}} \right)^{1/10} \quad (\text{A VII.6})$$

Esta relación de variables, aunque se ha hecho buscando una mayor coherencia con la bibliografía científica de referencia, presenta con esta última una incongruencia importante debido a la ubicación de la variable μ_l en el modelo. La vuelta del líquido desde el condensador al evaporador se produce fundamentalmente por gravedad resbalando por la cara interna del termosifón; es aquí donde la viscosidad del líquido juega un papel importante. A mayor viscosidad mayor rozamiento y por tanto mayor dificultad para que el líquido regrese a la zona de evaporación. Este entorpecimiento al avance del líquido debería empeorar la transferencia de calor y, en consecuencia, aumentar el valor de la resistencia térmica. Sin embargo esta variable se encuentra situada en el denominador de la expresión obtenida para R_{term} , lo que se traduciría en que al aumentar el valor de viscosidad, esto es, al aumentar la dificultad para que el líquido vuelva al evaporador, disminuiría el valor de la resistencia térmica facilitando la transferencia de calor. Tal y como se ha expuesto, esto va contra toda lógica, por lo que no puede aceptarse el modelo así configurado.

Esta mala adecuación de los resultados a la teoría termofísica se puede seguir explicando por las persistentes fuertes correlaciones entre variables independientes, que muestran un grave problema de multicolinealidad.

En la matriz de correlaciones calculada por Statgraphics pueden verse, remarcadas en rojo, las elevadas correlaciones entre algunas variables explicativas.

Tabla A VII.28: Matriz de Correlación para las estimaciones de los coeficientes.

	ln dl	ln D	ln ul	ln kl
ln dl	1,0000	-0,9232	-0,9840	0,1730
ln D	-0,9232	1,0000	0,9579	0,0783
ln ul	-0,9840	0,9579	1,0000	-0,1165
ln kl	0,1730	0,0783	-0,1165	1,0000

Otra manera de detectar la multicolinealidad es mediante el uso del factor de inflación de varianza VIF. La multicolinealidad es severa cuando $VIF > 30$ e importante cuando $VIF > 10$. Statgraphics ofrece estos valores y, como puede verse en la tabla siguiente, la multicolinealidad es ciertamente relevante. Debido a esto se realiza a continuación la regresión ridge.

Tabla A VII.29: Factores de Inflación de Varianza.

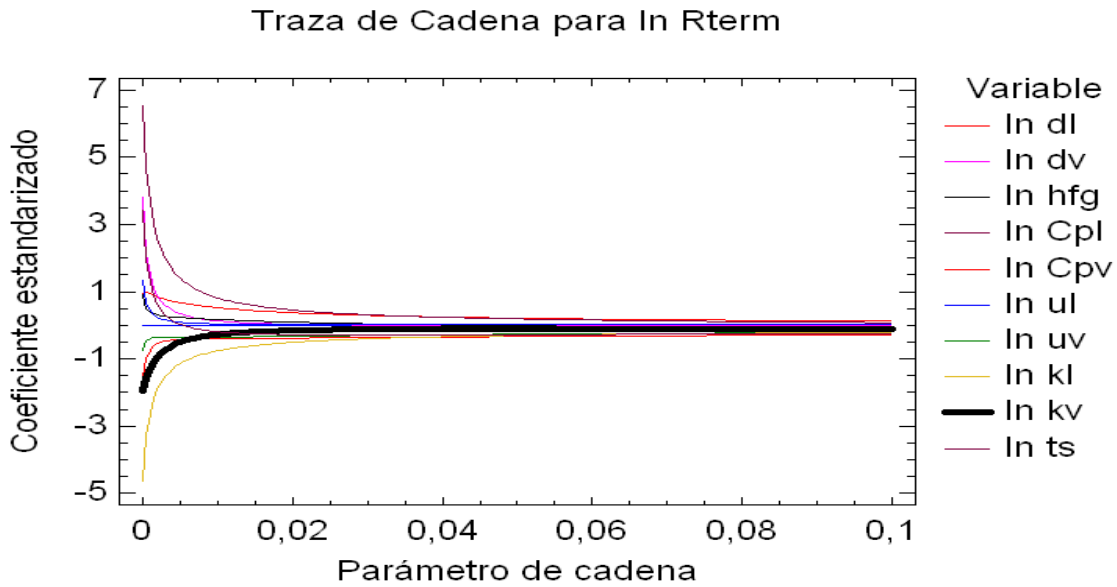
ln dl	ln D	ln ul	ln kl
37,1591	22,9991	71,2031	1,84629

A VII.1.6. Regresión ridge

A continuación se va a detallar el proceso que se ha seguido para llevar a cabo la regresión ridge para el termosifón cilíndrico de acero grande.

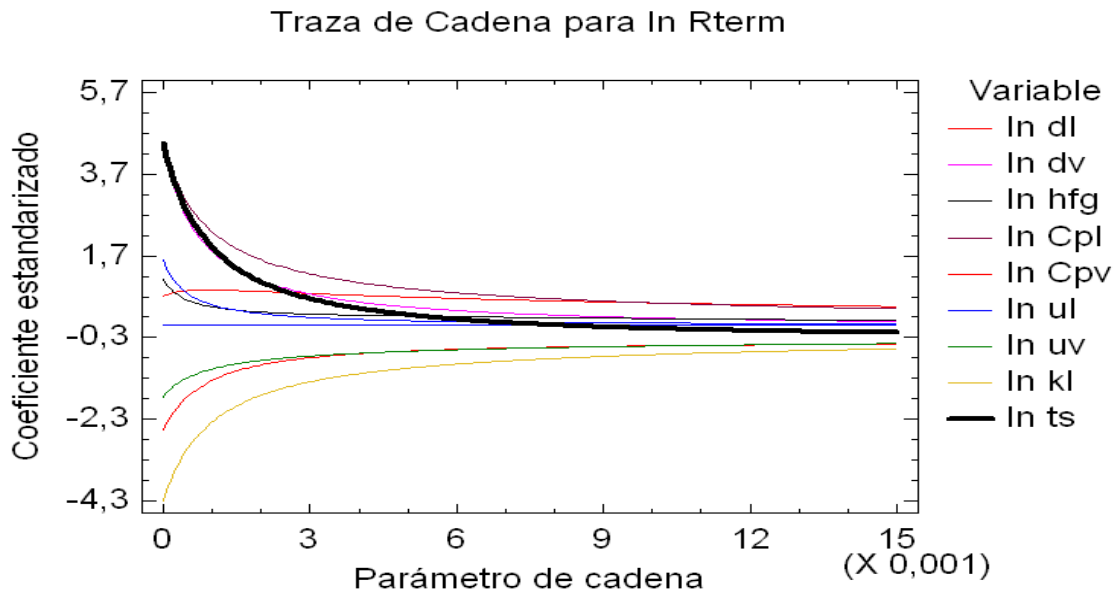
a) Selección de las variables mediante la curva ridge

Se parte de un modelo que incluye a todas las variables regresoras. Con la curva ridge presente se siguen las directrices de selección de variables expuestas anteriormente sin olvidar, claro está, los criterios termofísicos para evitar que salga un conjunto de variables poco coherente. De esta forma se tiene:



Gráfica A VII.22: Curva ridge para termosifón de acero grande.

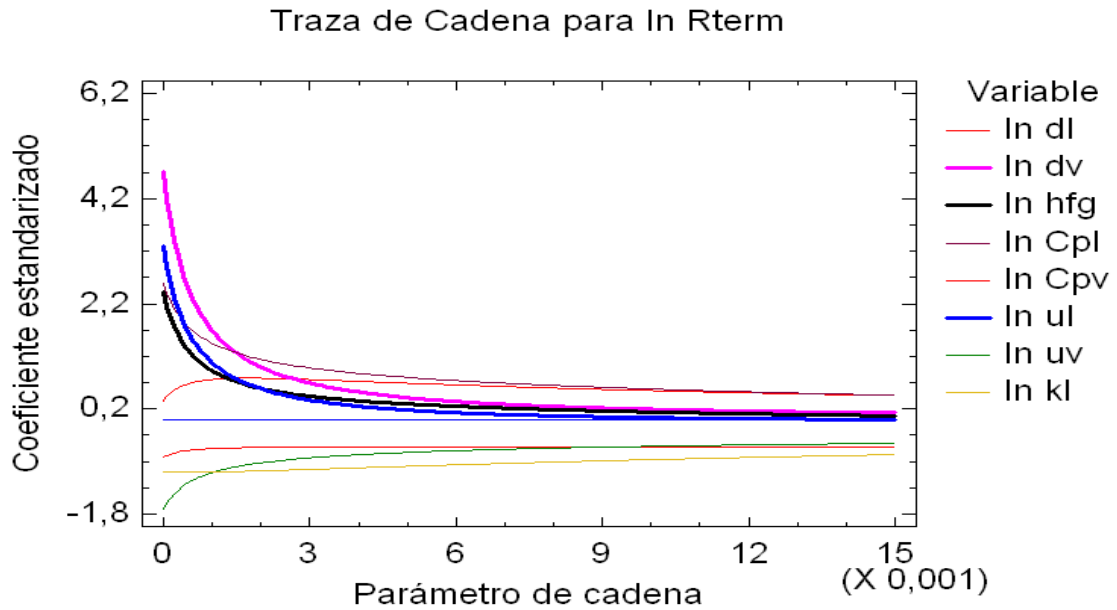
Primeramente se elimina k_v ($\ln k_v$) que como se puede apreciar (línea negra más gruesa) tiende a anularse rápidamente.



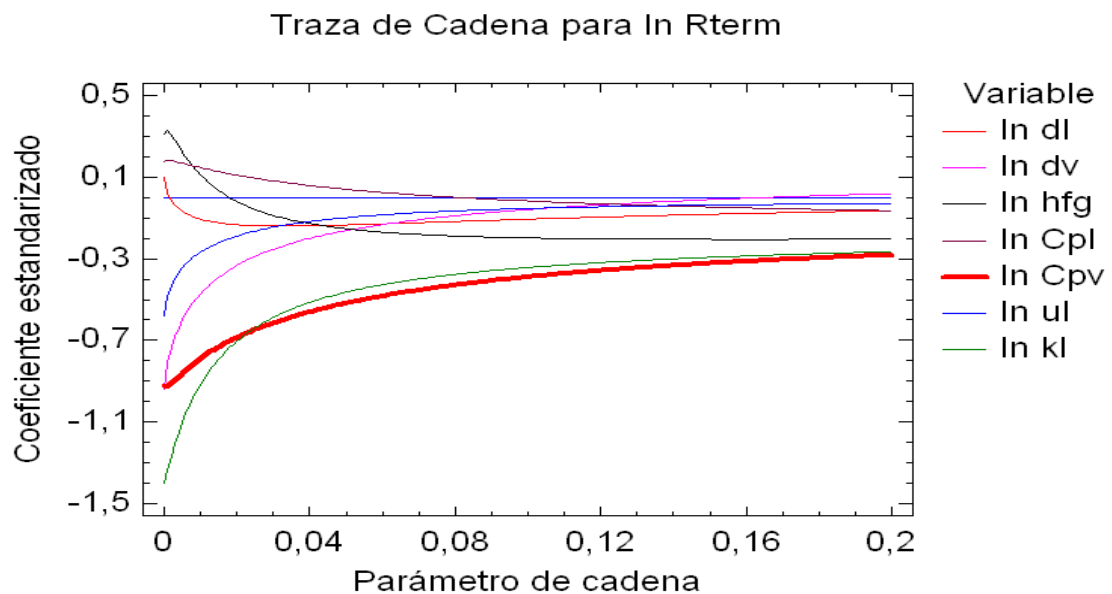
Gráfica A VII.23: Curva ridge para termosifón de acero grande.

A continuación se quita la variable σ ($\ln ts$). Atendiendo a la traza de esta variable (línea negra) es la que se anula con mayor rapidez.

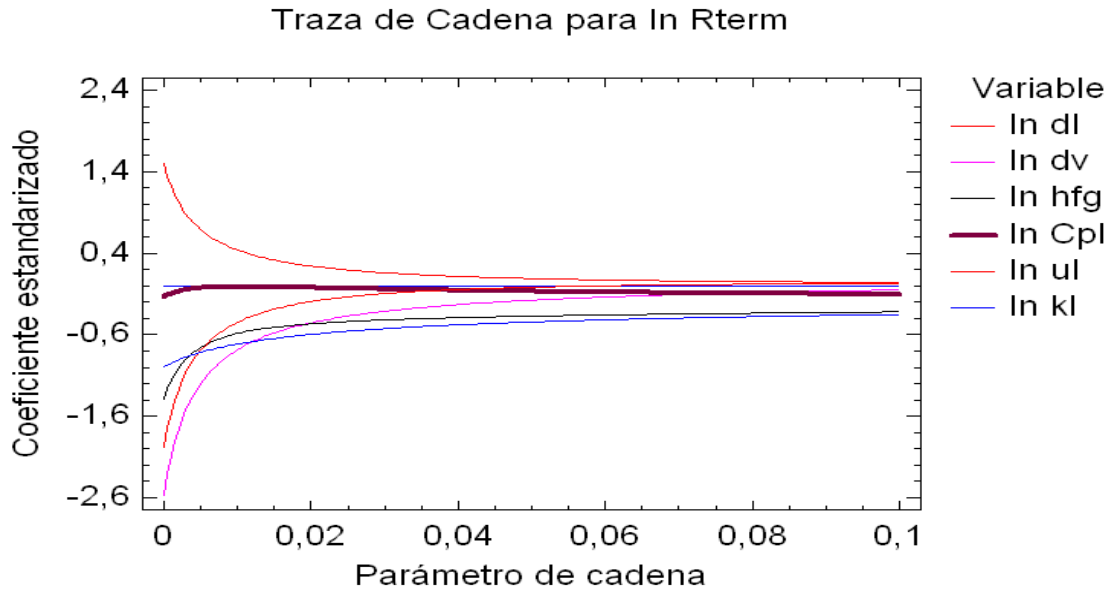
Lo mismo ocurre para μ_v ($\ln u_v$) indicada con la línea verde oscuro así que se elimina del modelo.



Las siguientes variables candidatas a salir serían ρ_v , h_{fg} y μ_i ; sin embargo se sabe que representan a propiedades termofísicas fundamentales para explicar el funcionamiento de la tecnología tipo termosifón. En su lugar se elimina la variable μ_v (línea verde) que aun siendo más estable que las anteriores, es la que más rápidamente se anula de entre las restantes.



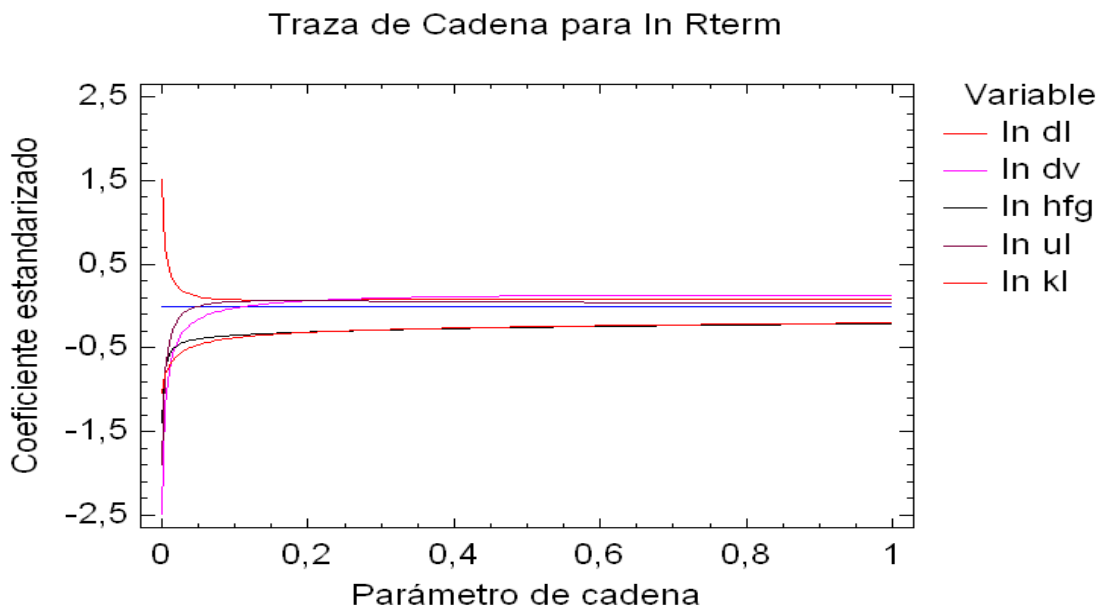
Se aparta del modelo a la variable c_{pv} ($\ln c_{pv}$) que si bien, atendiendo a su traza, es de las variables más estables, se sabe que está muy correlacionada con otras variables independientes. En la siguiente gráfica se verá cómo las trazas del resto de regresores se vuelven más estables al eliminarla.



Gráfica A VII.26: Curva ridge para termosifón de acero grande.

La variable c_{pl} ($\ln c_{pl}$) presenta una traza muy estable, pero con un valor muy próximo a cero; por esto es la siguiente y última en ser eliminada del modelo.

Las trazas quedarían finalmente como se observa a continuación.



Gráfica A VII.27: Curva ridge para termosifón de acero grande.

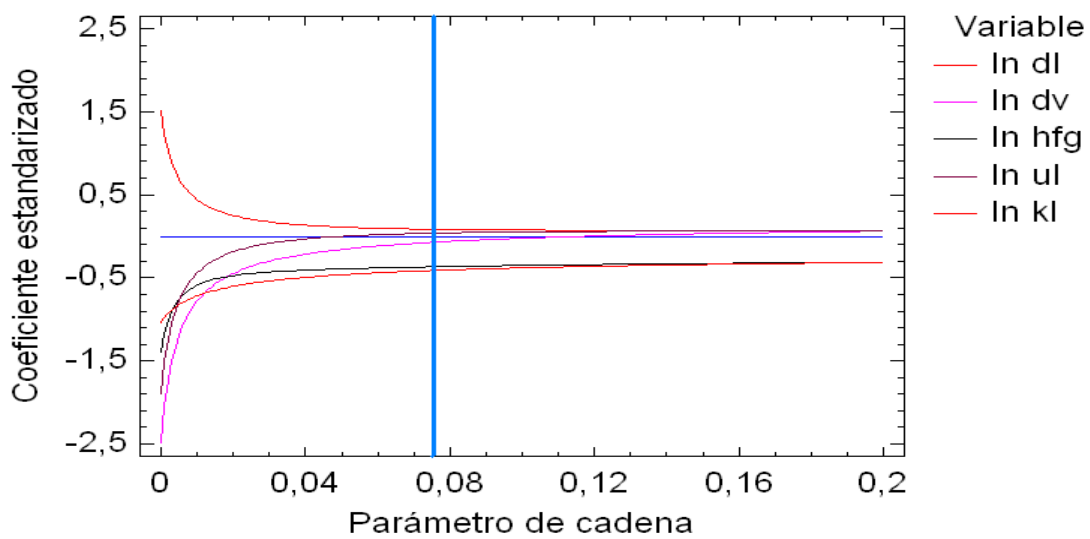
El conjunto final de variables para el modelo de regresión será el siguiente:

$$\rho_1, \rho_v, h_{fg}, \mu_1, k_1$$

b) Selección del parámetro de cadena

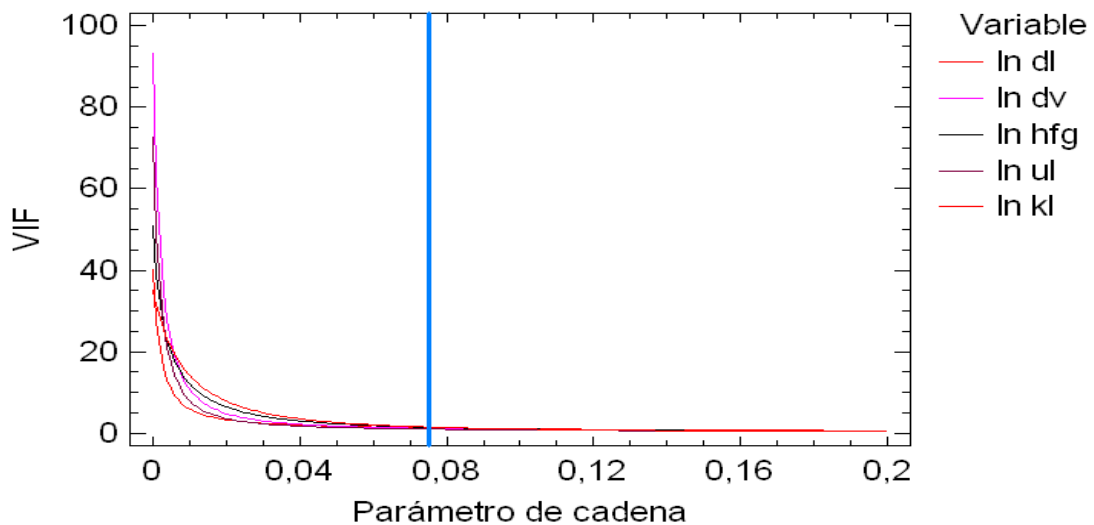
Analizando las gráficas que se presentan a continuación podrá elegirse un parámetro de cadena (o parámetro ridge) que disipe la multicolinealidad en gran medida, pero que a su vez no reduzca demasiado el poder explicativo del modelo. Es decir, que al aumentar el valor del parámetro de cadena disminuyen los valores de R^2 y de $R^2_{ajustada}$.

Traza de Cadena para ln Rterm



Gráfica A VII.28: Parámetro de cadena para termosifón de acero grande.

Factores de Inflación de Varianza para ln Rterm



Gráfica A VII.29: VIF para termosifón de acero grande.

Se ha tomado como parámetro de cadena 0,075, ya que es un valor relativamente bajo en el que los coeficientes están medianamente estabilizados y el valor de VIF se sitúa en valores próximos a 1. Esto puede apreciarse de forma más clara en la tabla siguiente.

Tabla A VII.30: Factores de Inflación de Varianza.

Parámetro de Cadena	ln dl	ln dv	ln hfg	ln ul	ln kl	R-Cuadrada
0,075	1,33896	1,17853	1,45834	1,02179	1,53656	55,13

c) Validación del modelo

A continuación se muestra la salida de Statgraphics.

Tabla A VII.31: Resultados de la regresión ridge.

Regresión en Cadena - ln Rterm		
Variable dependiente: ln Rterm		
Variables independientes:		
ln dl		
ln dv		
ln hfg		
ln ul		
ln kl		
Número de casos completos: 92		
Resultados del Modelo para el Parámetro de Cadena = 0,075		
		<i>Factor de Inflación de Varianza</i>
<i>Parámetro</i>	<i>Estimado</i>	
CONSTANTE	-1,73382	
ln dl	0,0108085	1,33896
ln dv	-0,00235391	1,17853
ln hfg	-0,0182771	1,45834
ln ul	0,00415566	1,02179
ln kl	-0,0252592	1,53656
R-Cuadrada = 55,1323 por ciento R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 52,5237 por ciento Error estándar del est. = 0,0304553 Error medio absoluto = 0,0240063 Estadístico Durbin-Watson = 1,0932 Autocorrelación residual de retardo 1 = 0,444402		
Análisis de Residuos		
	<i>Estimación</i>	<i>Validación</i>
n	92	
CME	0,000927526	
MAE	0,0240063	
MAPE		
ME	-2,63075E-16	
MPE		

El estadístico R^2 indica que el modelo, así ajustado, explica el 55,1323% de la variabilidad de R_{term} . El estadístico $R^2_{ajustada}$ es 52,5237%. El error estándar de estimación muestra que la desviación estándar de los residuos es 0,0304553. El error absoluto medio (MAE) de 0,0240063 es el valor promedio de los residuos.

El modelo de regresión resultante es:

$$\ln R_{term} = -1,73382 + 0,0108085 \cdot \ln \rho_l - 0,00235391 \cdot \ln \rho_v - 0,0182771 \cdot \ln h_{fg} + 0,00415566 \cdot \ln \mu_l - 0,0252592 \cdot \ln k_l$$

Quitando los logaritmos y redondeando los coeficientes, el modelo quedaría:

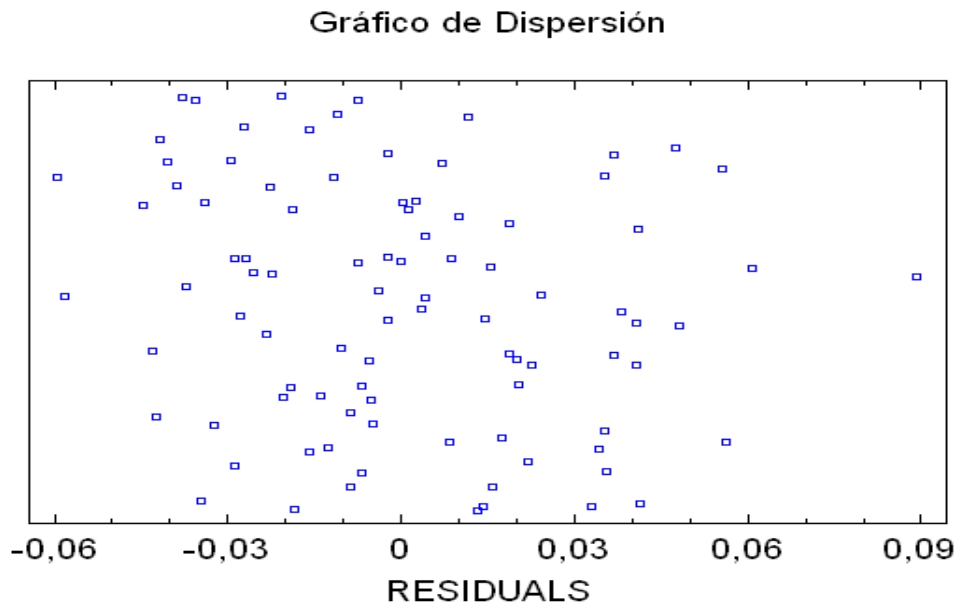
$$R_{\text{term}} = 0,1766 \cdot \left(\frac{\rho_l^{0,11} \cdot \mu_l^{0,04}}{\rho_v^{0,02} \cdot h_{\text{fg}}^{0,18} \cdot k_l^{0,25}} \right)^{1/10} \quad (\text{A VII.7})$$

d) Diagnósis del modelo

A continuación se presentan los estadísticos y gráficas que indicarán si el modelo es adecuado según los criterios estadísticos.

D.1. Residuales.

a) Gráfico de dispersión.

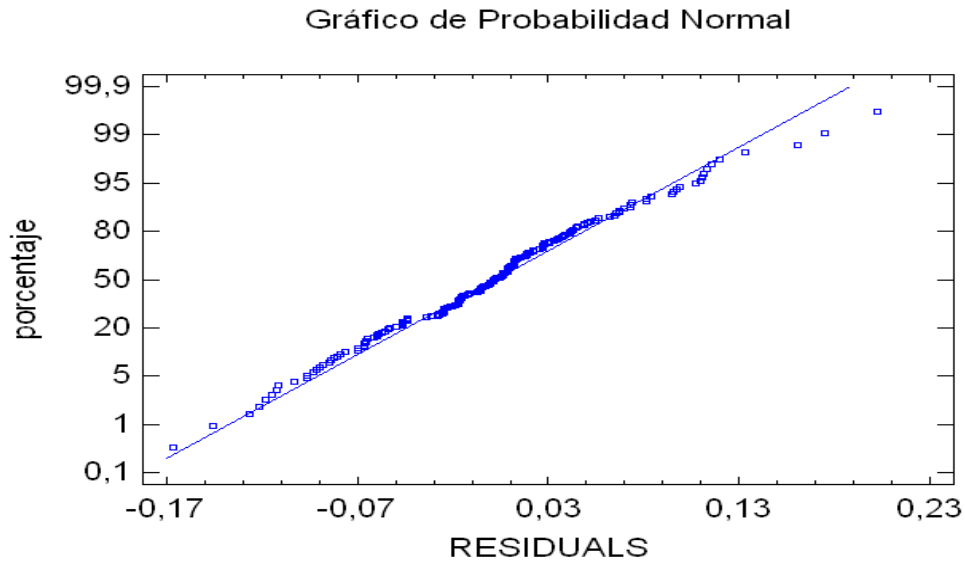


Gráfica A VII.30: Dispersión para termosifón de acero grande.

No hay tendencias ni agrupaciones especiales; los residuos parecen ser totalmente aleatorios.

b) Percentiles de la distribución normal –QQ-norms.

Los residuos se ajustan bastante bien a la distribución normal.



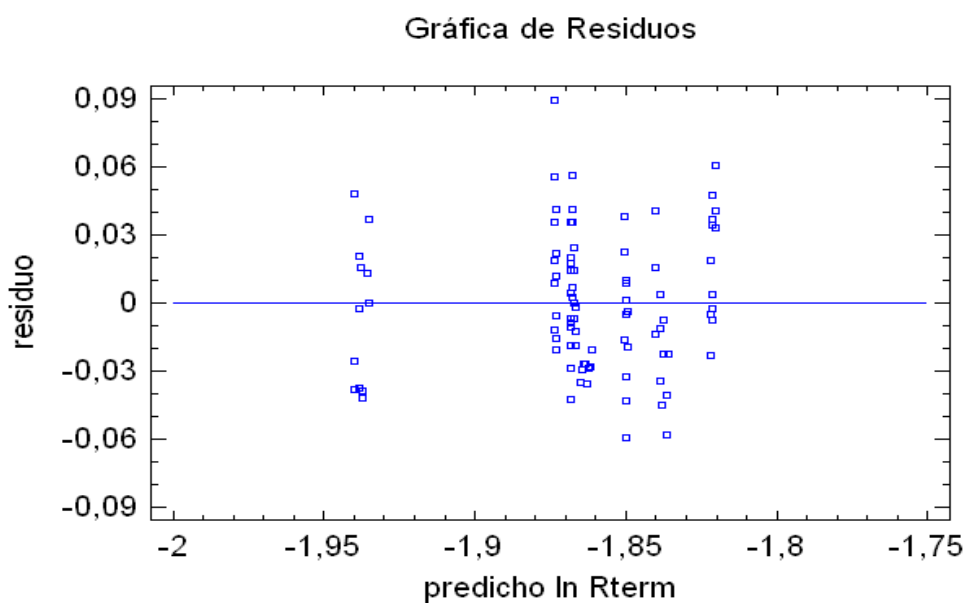
Gráfica A VII.31: Distribución normal para termosifón de acero grande.

Esto también puede comprobarse atendiendo a los valores que arrojan el sesgo estandarizado y la curtosis; ambos están dentro del rango (-2,2), por lo que puede afirmarse que no hay desviaciones significativas de la normalidad.

Tabla A VII.32: Validación del supuesto de distribución normal.

Sesgo Estandarizado	1,47803
Curtosis Estandarizada	-0,361458

c) Gráficos de los residuales frente a los valores ajustados.

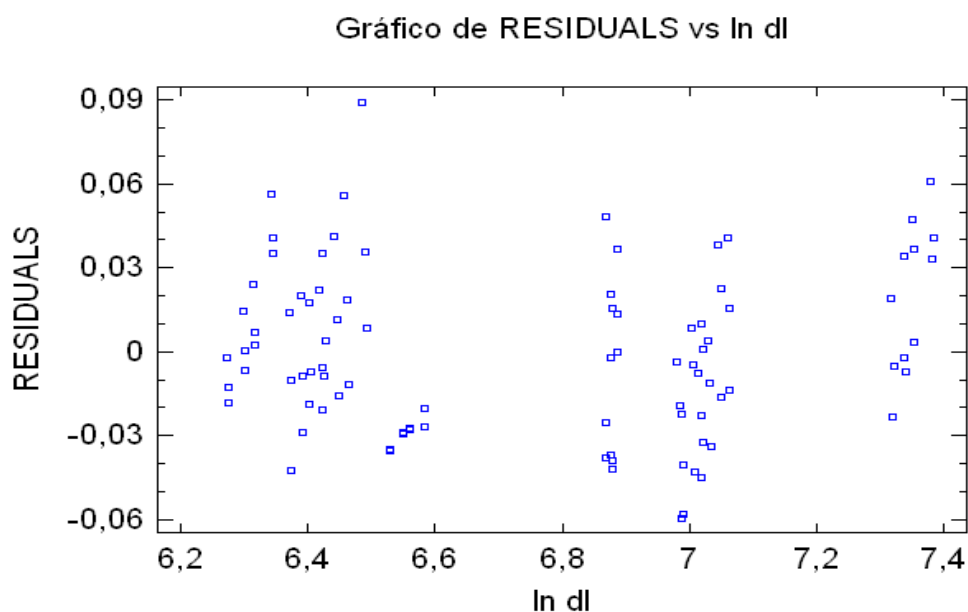


Gráfica A VII.32: Residuales para termosifón de acero grande.

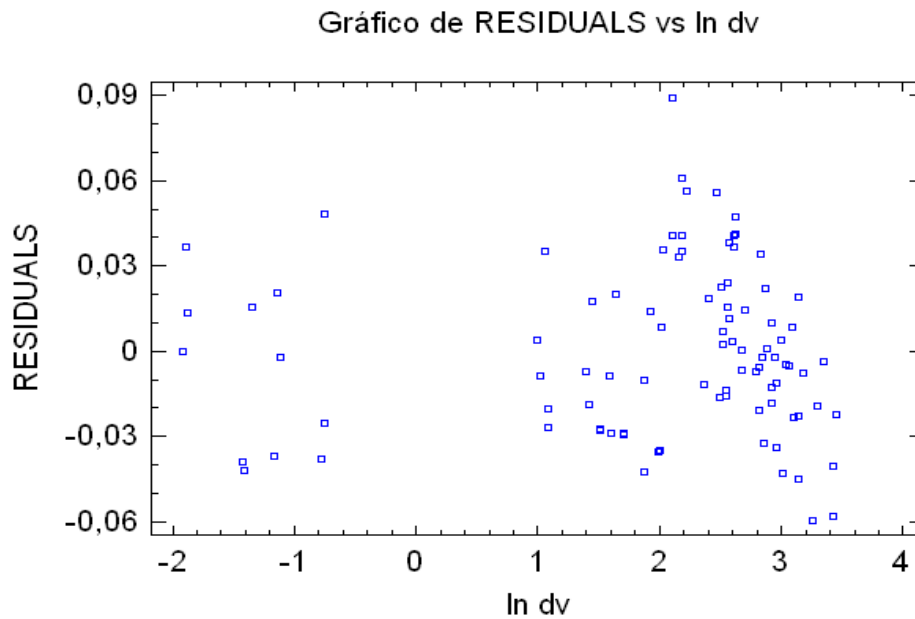
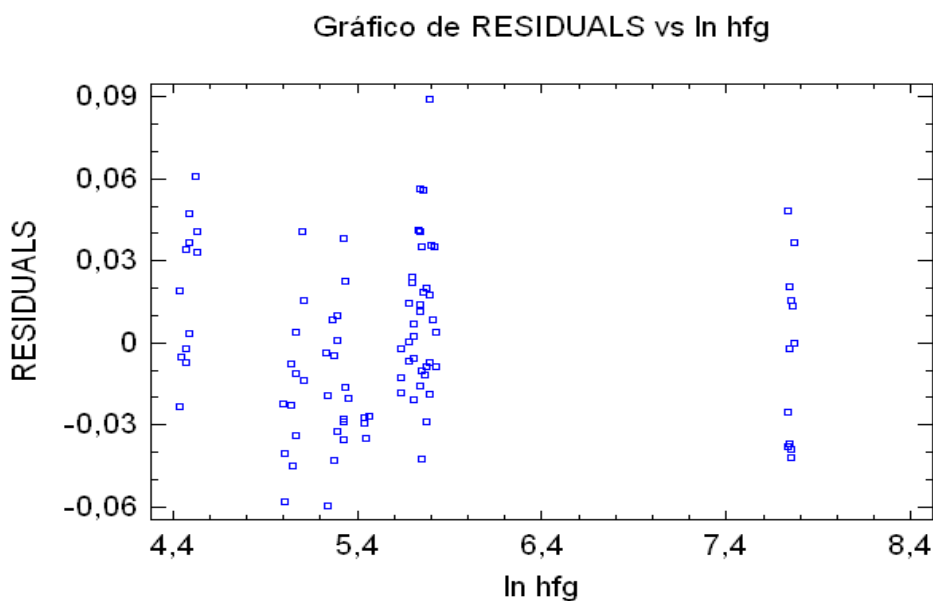
Aparecen ciertas agrupaciones de datos por sustancia como ya ocurría en termosifones anteriores. Aquí tal vez sean más acusadas, debido a que el número de sustancias ensayadas es menor y no hay lugar para la "mezcla" o superposición de observaciones. Como ejemplo de esta agrupación por sustancia cabe indicar que los puntos situados más a la derecha (mayor resistencia térmica) pertenecen al perfluoroheptano, mientras que los puntos ubicados más a la izquierda (menor resistencia térmica) corresponden al agua. No se observan tampoco puntos anómalos.

d) Gráficos de los residuales frente a las variables explicativas

d.1.) Residuales frente a $\ln \rho_l$

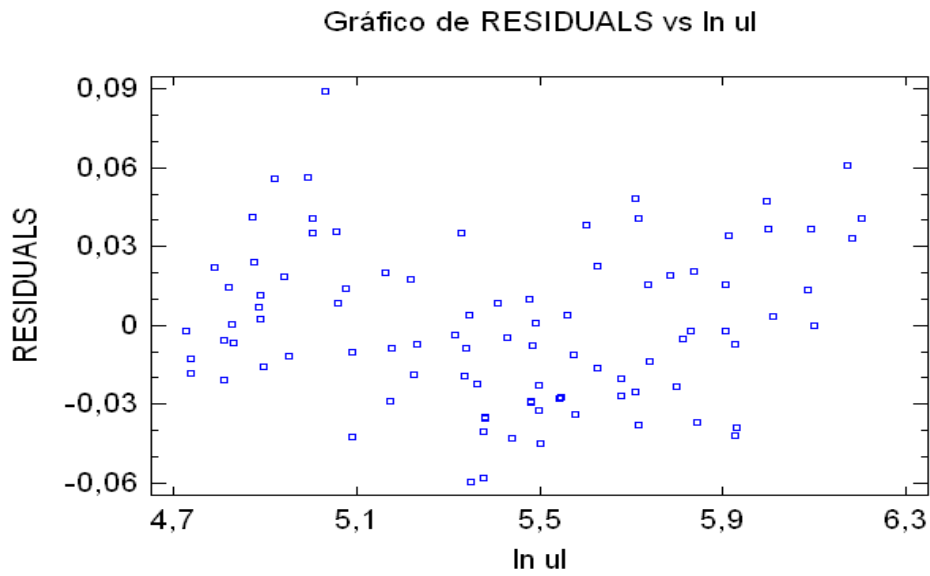


Aparecen agrupaciones de residuos por sustancias; esto tiene cierta lógica, ya que no todas las sustancias se mueven en el mismo rango de valores para sus distintas propiedades, en este caso la densidad de líquido. Por ejemplo, los datos agrupados más a la derecha corresponden al perfluoroheptano, así como los que se agrupan en torno al valor de 6,9 pertenecen al agua. Este hecho podrá observarse también en alguna de las gráficas que siguen.

d.2.) Residuales frente a $\ln \rho_v$ d.3.) Residuales frente a $\ln h_{fg}$ 

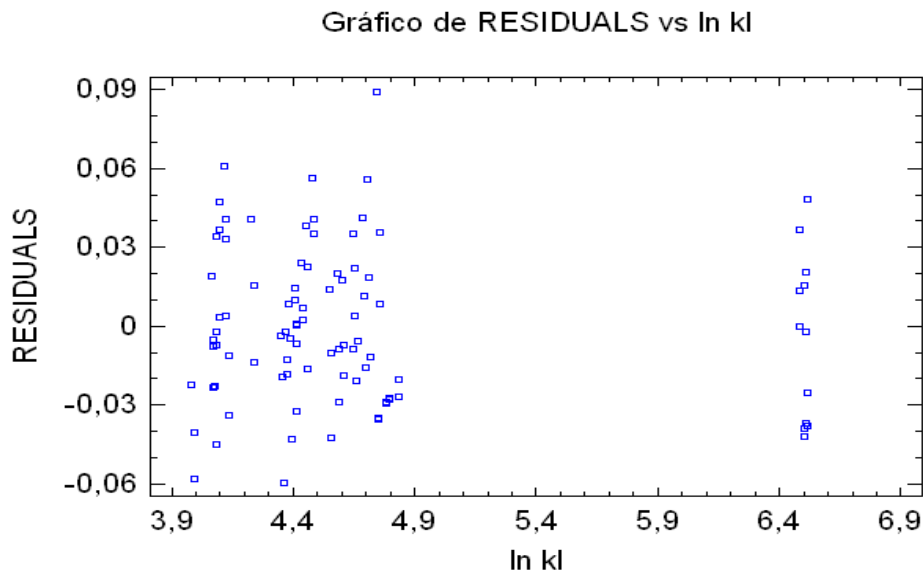
Siguen apareciendo las agrupaciones por sustancia. Es este caso se debe a la gran diferencia entre los valores de entalpía de vaporización entre sustancias. De hecho los puntos situados más a la derecha corresponden al agua que es la sustancia con el mayor valor de h_{fg} de todas las ensayadas, mientras que los ubicados más a la izquierda pertenecen al perfluoroheptano.

d.4.) Residuales frente a $\ln \mu_1$



Gráfica A VII.36: Residuales para termosifón de acero grande.

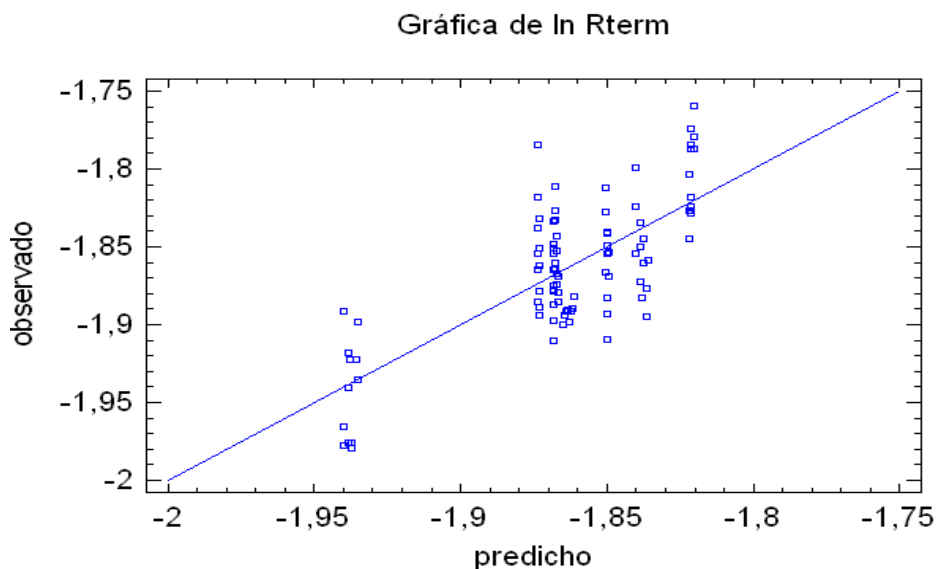
d.5.) Residuales frente a $\ln k_1$



Gráfica A VII.37: Residuales para termosifón de acero grande.

A la vista de los gráficos presentados puede concluirse que no hay tendencias específicas de los residuos, solamente las consabidas agrupaciones por sustancia que ya han sido señaladas. Tampoco hay puntos claramente atípicos o influyentes.

e) Gráficos de valores observados frente a valores ajustados.



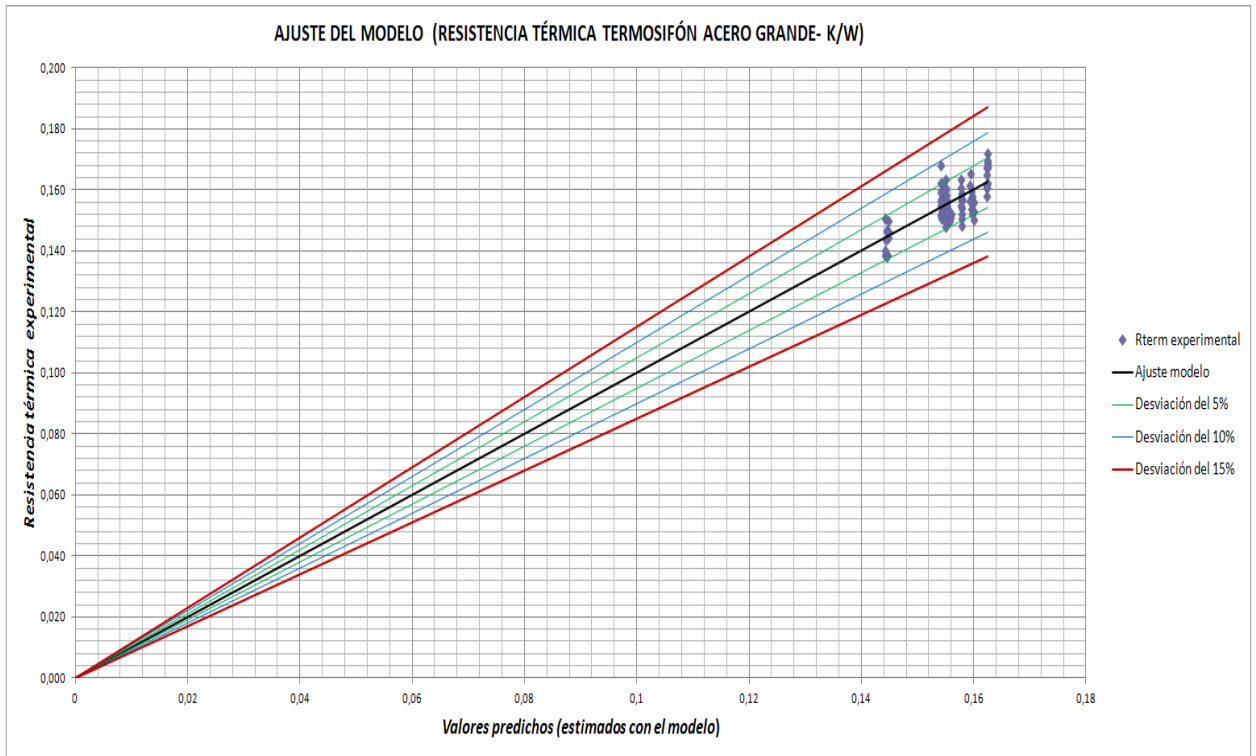
Gráfica A VII.38: Valores ajustados para termosifón de acero grande.

El ajuste parece adecuado, aunque se observa la notable agrupación por sustancias que ha sido ya repetidamente señalada.

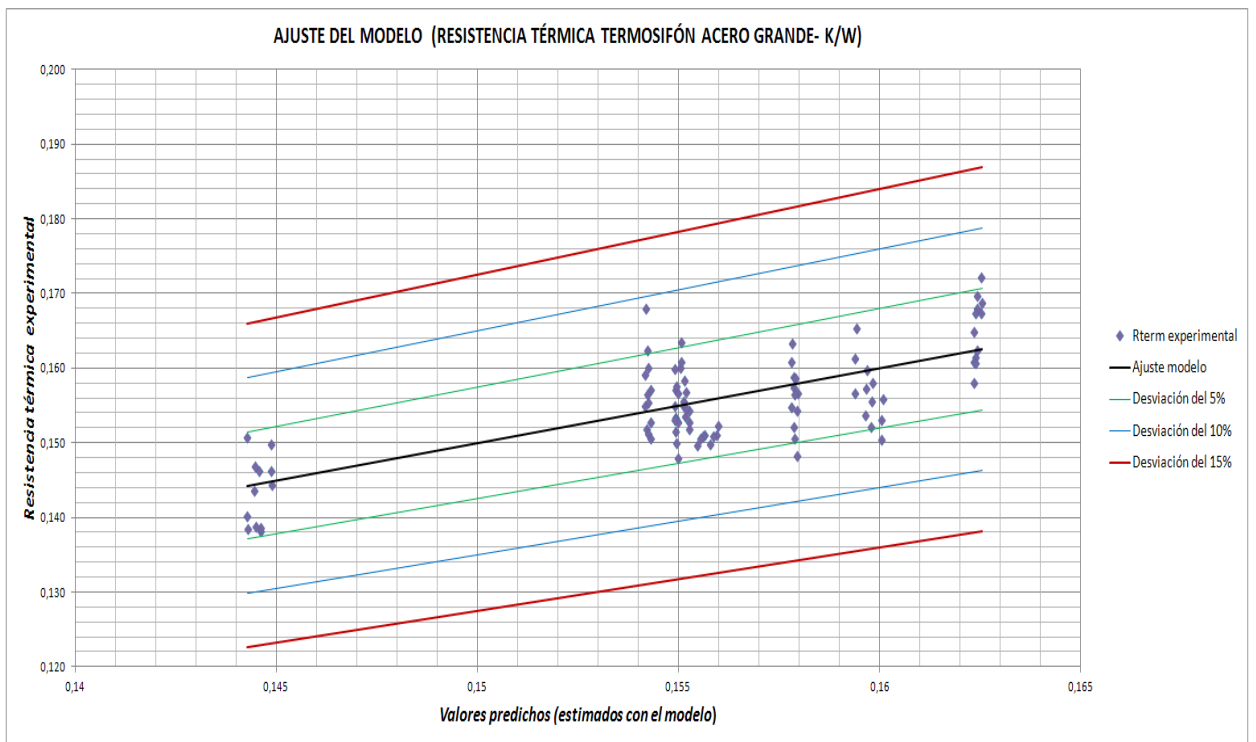
En las dos hojas siguientes se muestra la gráfica A VII.38, representada con Excel, donde aparece también la acotación del error cometido en la estimación. En éstas dos gráficas, A VII.39 y A VII.40, puede verse como casi la totalidad de los puntos caen entre las líneas que delimitan el error al $\pm 5\%$, siendo anecdóticos los puntos que presentan un error absoluto superior al 10% (2 puntos de 92, algo más del 2 %).

Tras todo este proceso de validación y a la vista de las últimas gráficas puede concluirse que el modelo matemático de regresión es adecuado para explicar el comportamiento del presente termosifón de acero grande.

De este estudio se deduce también, como dato de relevancia, que el tipo de sustancia empleada explica más del 50 % de la variabilidad de R_{term} . El estadístico $R^2 = 55,13\%$ es el que lo indica.



Gráfica A VII.39: Ajuste del modelo del termosifón de acero grande.



Gráfica A VII.40: Ajuste del modelo del termosifón de acero grande

A VII.2. Estudio de regresión para el termosifón prismático de aluminio sin control de potencia (SCP)

A VII.2.1. Regresión múltiple

A continuación se muestra la regresión lineal múltiple que se ha realizado para el termosifón prismático de aluminio sin control de potencia. Se procede de forma similar al apartado 7.4.1. Además, como ocurría con los termosifones anteriores, debido a los problemas de multicolinealidad, hubo que descartar esta regresión y recurrir a la regresión ridge.

a) Datos estudiados

- Variable dependiente: R_{term} (resistencia térmica).
- Variables independientes: Propiedades termofísicas: $\rho_l, \rho_v, h_{fg}, c_{pl}, c_{pv}, \mu_l, \mu_v, k_l, k_v, \sigma$.

En total son 10 variables independientes + 1 variable dependiente. Las tablas se pasan a escala logarítmica.

Análisis de correlaciones

- a) Entre R_{term} y las variables explicativas.

Se exponen las correlaciones de mayor magnitud entre la variable respuesta y las explicativas. Este análisis puede orientar en la determinación de qué variables deberían entrar en el modelo de regresión, ya que a priori presentan una mayor relación con R_{term} .

Tabla A VII.33: Correlaciones entre R_{term} y las variables explicativas.

Variable	Correlación
ρ_l	0,5085
h_{fg}	-0,2665
c_{pl}	-0,3274
c_{pv}	-0,5570
μ_l	0,4988
μ_v	0,2500
k_v	-0,3743

- b) Se aprecian fuertes correlaciones entre las variables explicativas. Se muestran, por resumir, aquellas que superan el 0,8.

Hay 14 correlaciones entre variables independientes por encima del 80%; estas son:

- 1) $\rho_{l-c_{pv}}$ (-0,8512); 2) $\rho_{l-\mu_l}$ (0,8385); 3) $\rho_{l-\mu_v}$ (0,8353); 4) ρ_v-h_{fg} (-0,8515);
 5) ρ_v-k_1 (-0,9141); 6) $\rho_v-\sigma$ (-0,9480); 7) $h_{fg}-c_{pl}$ (0,9525); 8) $h_{fg}-k_1$ (0,9628);
 9) $h_{fg}-\sigma$ (0,9030); 10) $c_{pl}-c_{pv}$ (0,8780); 11) $c_{pl}-k_1$ (0,8101); 12) $c_{pl}-k_v$ (0,9380);
 13) $c_{pv}-k_v$ (0,8733); 14) $k_1-\sigma$ (0,9583);

Se puede detectar un importante problema de multicolinealidad.

b) Elección del mejor conjunto de regresión

Se persigue reducir el número de variables explicativas de forma que se eliminen aquellas con menor poder explicativo, las menos relevantes, y simplificar, de esta forma, el modelo de regresión.

B.1. Criterio de mayor R^2 ajustada

B.2. Criterio de menor Cp de Mallows

Estos dos estudios se han realizado conjuntamente, ya que el análisis ha dado los mismos resultados indistintamente del criterio empleado.

A continuación se muestran las salidas de Statgraphics para este estudio.

Tabla A VII.34: Elección del conjunto de regresión.

Selección del Modelo de Regresión - ln Rterm				
Variable dependiente: ln Rterm				
Variables independientes:				
A=ln dl				
B=ln dv				
C=ln hfg				
D=ln Cpl				
E=ln Cpv				
F=ln ul				
G=ln uv				
H=ln kl				
I=ln kv				
J=ln ts				
Modelos con Mayor R-Cuadrada Ajustada				
<i>CME</i>	<i>R-Cuadrada</i>	<i>R-Cuadrada Ajustada</i>	<i>Cp</i>	<i>Variables Incluidas</i>
0,0147813	59,8593	57,2576	9,09972	ABCDGJ
0,0149185	59,4869	56,8611	10,1119	ACDEGHJ
0,014953	59,3932	56,7613	10,3666	ABCDEGH
0,0150068	58,8696	56,6056	9,78967	ABDEFG
0,0150275	58,813	56,5458	9,94349	ACDEGH
0,0150353	59,1697	56,5233	10,974	ACDGHJ
0,0150421	59,1511	56,5035	11,0245	ACDFGHJ
Modelos con Menor Cp				
<i>CME</i>	<i>R-Cuadrada</i>	<i>R-Cuadrada Ajustada</i>	<i>Cp</i>	<i>Variables Incluidas</i>
0,0147813	59,8593	57,2576	9,09972	ABCDGJ
0,0150068	58,8696	56,6056	9,78967	ABDEFG
0,0150275	58,813	56,5458	9,94349	ACDEGH
0,0149185	59,4869	56,8611	10,1119	ACDEGHJ
0,014953	59,3932	56,7613	10,3666	ABCDEGH
0,0150353	59,1697	56,5233	10,974	ACDGHJ
0,0150421	59,1511	56,5035	11,0245	ACDFGHJ

Las conclusiones de este estudio son:

- El mejor conjunto de regresión es aquel formado por las variables:

$$\rho_l, \rho_v, h_{fg}, c_{pl}, \mu_l, \mu_v, \sigma$$

- Las variables más relevantes, a tener en cuenta para la regresión lineal, son las mismas que constituyen el considerado como mejor conjunto de regresión pero añadiendo la variable k_l . La conductividad térmica del líquido se incluye “artificialmente” porque se sabe que es una variable relevante según la bibliografía consultada y porque, además, aparece recogida en el segundo conjunto del procedimiento mayor R^2 ajustada.

$$\rho_l, \rho_v, h_{fg}, c_{pl}, \mu_l, \mu_v, k_l, \sigma$$

B.3. Regresión paso a paso

Para aplicar este criterio se parte ya de la selección de variables hecha anteriormente con los criterios de mayor R^2 ajustada y menor C_p ; esto es, se parte del siguiente conjunto:

$$\rho_l, \rho_v, h_{fg}, c_{pl}, \mu_l, \mu_v, k_l, \sigma$$

- Hacia adelante

Se muestran a continuación las salidas que ofrece Statgraphics.

Tabla A VII.35: Resultados de la regresión múltiple.

Regresión Múltiple - ln Rterm					
Variable dependiente: ln Rterm					
Variables independientes:					
ln dl					
ln dv					
ln hfg					
ln Cpl					
ln ul					
ln uv					
ln kl					
ln ts					
		<i>Error</i>	<i>Estadístico</i>		
<i>Parámetro</i>	<i>Estimación</i>	<i>Estándar</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>	
CONSTANTE	-6,07177	0,549786	-11,0439	0,0000	
ln dl	1,34296	0,139531	9,62486	0,0000	
ln Cpl	0,910489	0,144826	6,28677	0,0000	
ln uv	-1,17791	0,172098	-6,84443	0,0000	
ln kl	-0,37773	0,0697143	-5,41826	0,0000	
Análisis de Varianza					
<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo	2,12607	4	0,531518	31,88	0,0000
Residuo	1,8509	111	0,0166748		
Total (Corr.)	3,97698	115			
R-cuadrada = 53,4595 por ciento					
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 51,7824 por ciento					
Error estándar del est. = 0,129131					
Error absoluto medio = 0,0964043					
Estadístico Durbin-Watson = 2,22555 (P=0,8870)					
Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0,121902					

El modelo corresponde a:

$$\ln R_{\text{term}} = -6,07177 + 1,34296 \cdot \ln \rho_l + 0,910489 \cdot \ln c_{pl} - 1,17791 \cdot \ln \mu_v - 0,37773 \cdot \ln k_l$$

Eliminando los logaritmos y redondeando el coeficiente, el modelo quedaría como se muestra a continuación:

$$R_{\text{term}} = 0,0023 \cdot \left(\frac{\rho_l^{13,43} \cdot c_{pl}^{9,1}}{\mu_v^{11,78} \cdot k_l^{3,78}} \right)^{1/10} \quad (\text{A VII.8})$$

El modelo obtenido es estadísticamente relevante, tal y como indican los valores que arroja la pantalla de Statgraphics. Sin embargo, cabe destacar que se producen algunas incongruencias con la teoría científica sustentada por la bibliografía consultada. De esta forma no parece lógico que se excluyan del modelo la entalpía de vaporización, h_{fg} , y la viscosidad del líquido, μ_l , y sí que aparezca la viscosidad del vapor, μ_v , variable que no se recoge en ninguno de los modelos consultados en la bibliografía.

Esta distorsión en el modelo puede explicarse por las altas correlaciones que aparecen entre las variables independientes; esto es, la distorsión se debe a la presencia de multicolinealidad.

En la matriz de correlaciones calculada por Statgraphics pueden verse, resaltadas en rojo, las elevadas correlaciones entre algunas variables explicativas.

Tabla A VII.36: Correlaciones entre variables explicativas

Matriz de Correlación para las estimaciones de los coeficientes				
	ln dl	ln Cpl	ln uv	ln kl
ln dl	1,0000	0,8418	-0,7336	-0,7011
ln Cpl	0,8418	1,0000	-0,3435	-0,9413
ln uv	-0,7336	-0,3435	1,0000	0,1639
ln kl	-0,7011	-0,9413	0,1639	1,0000

- Hacia atrás

Se muestran a continuación las salidas que ofrece Statgraphics.

Tabla A VII.37: Resultados de la regresión múltiple

Regresión Múltiple - ln Rterm

Variable dependiente: ln Rterm
 Variables independientes:
 ln dl
 ln dv
 ln hfg
 ln Cpl
 ln ul
 ln uv
 ln kl
 ln ts

Parámetro	Estimación	Error		Estadístico T	Valor-P
		Estándar			
CONSTANTE	-16,5238	3,20667		-5,15294	0,0000
ln dl	1,86408	0,341213		5,4631	0,0000
ln dv	0,469126	0,134448		3,48927	0,0007
ln hfg	0,695293	0,251539		2,76415	0,0067
ln Cpl	1,48634	0,305835		4,85993	0,0000
ln ul	1,20003	0,279097		4,29971	0,0000
ln uv	-3,06289	0,546485		-5,60471	0,0000
ln ts	-0,89654	0,289115		-3,10098	0,0025

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	2,38059	7	0,340084	23,01	0,0000
Residuo	1,59639	108	0,0147813		
Total (Corr.)	3,97698	115			

R-cuadrada = 59,8593 por ciento
 R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 57,2576 por ciento
 Error estándar del est. = 0,121579
 Error absoluto medio = 0,0893826
 Estadístico Durbin-Watson = 2,255 (P=0,9146)
 Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0,132675

El modelo resultante es:

$$\ln R_{\text{term}} = -16,5238 + 1,86408 \cdot \ln \rho_1 + 0,469126 \cdot \ln \rho_v + 0,695293 \cdot \ln h_{fg} + 1,48634 \cdot \ln c_{pl} + 1,20003 \cdot \ln \mu_1 - 3,06289 \cdot \ln \mu_v - 0,89654 \cdot \ln \sigma$$

Quitando los logaritmos y redondeando los coeficientes, el modelo quedaría:

$$R_{\text{term}} = (6,67 \cdot 10^{-8}) \cdot \left(\frac{\rho_l^{18,64} \cdot \rho_v^{4,69} \cdot h_{fg}^{6,95} \cdot c_{pl}^{14,86} \cdot \mu_l^{12}}{\mu_v^{30,62} \cdot \sigma^{8,97}} \right)^{1/10} \quad (\text{A VII.9})$$

El modelo obtenido es, obviamente, estadísticamente relevante, basta con fijarse en los valores de los estadísticos que muestra la pantalla de Statgraphics. Sin embargo, esta relación de variables es difícilmente explicable desde el punto de vista termofísico; de hecho, pueden reseñarse algunas características de este modelo que resultan poco lógicas:

- La entalpía de vaporización, h_{fg} , está situada en el numerador, lo que indicaría que a mayor capacidad de la sustancia para evacuar calor durante los cambios de fase, mayor resistencia térmica presenta el sistema, cosa que va contra toda lógica; esto es, la entalpía de vaporización debería estar en el denominador favoreciendo la transferencia de calor y no entorpecéndola.
- No aparece la conductividad del líquido, k_l , siendo ésta una variable importante si se atiende a los modelos recogidos por la bibliografía
- Están presentes la viscosidad del vapor, μ_v , y la tensión superficial, σ , cuando se sabe que no son variables relevantes para el funcionamiento de los termosifones.

Esta distorsión en el modelo (corroborada también por el elevado valor de los coeficientes que acompañan a las variables) puede explicarse por las altas correlaciones que aparecen entre las variables independientes; esto es, la distorsión se debe a la presencia de multicolinealidad.

En la matriz de correlaciones calculada por Statgraphics pueden verse, resaltadas en rojo, las elevadas correlaciones entre algunas variables explicativas.

Tabla A VII.38: Correlaciones entre variables explicativas

Matriz de Correlación para las estimaciones de los coeficientes							
	ln dl	ln dv	ln hfg	ln Cpl	ln ul	ln uv	ln ts
ln dl	1,0000	0,5962	0,7927	0,5579	0,4986	-0,8414	-0,6753
ln dv	0,5962	1,0000	0,4744	0,9110	0,9575	-0,9024	-0,1712
ln hfg	0,7927	0,4744	1,0000	0,2368	0,5107	-0,6735	-0,9278
ln Cpl	0,5579	0,9110	0,2368	1,0000	0,8407	-0,8246	0,0052
ln ul	0,4986	0,9575	0,5107	0,8407	1,0000	-0,8526	-0,2533
ln uv	-0,8414	-0,9024	-0,6735	-0,8246	-0,8526	1,0000	0,4326
ln ts	-0,6753	-0,1712	-0,9278	0,0052	-0,2533	0,4326	1,0000

La multicolinealidad desdibuja la verdadera influencia de las variables predictoras sobre la variable respuesta y, por tanto, puede dar lugar a conjuntos de regresión que, si bien parecen ser los más adecuados, llevarían a interpretaciones y conclusiones erróneas.

Habiendo presentado estos dos argumentos, el termofísico (falta de coherencia con la teoría aceptada por la comunidad científica) y el estadístico (presencia de multicolinealidad), se rechaza el modelo resultante obtenido con la regresión.

A VII.2.2. Regresión múltiple con las variables termofísicamente relevantes

A la vista de la que la regresión lineal basada únicamente en criterios estadísticos, no ofrece resultados válidos, se procede a realizar una regresión múltiple que, con base en criterios estadísticos, tenga presente en mayor medida los fundamentos de la transferencia de calor

Se vuelven a introducir en el modelo todas las variables independientes en estudio:

$$\rho_l, \rho_v, h_{fg}, c_{pl}, c_{pv}, \mu_l, \mu_v, k_l, k_v, \sigma.$$

Debido a que la multicolinealidad invalida los contrastes habituales que permiten inferir qué variables son las más influyentes, los criterios de salida y entrada de las variables se van a fundamentar en:

- a) Correlaciones entre variables explicativas: se eliminarán aquellas variables que estén fuertemente correladas y que no discrepen con los dos siguientes criterios.
- b) Las variables consideradas como termofísicamente relevantes, según las teorías científicas aceptadas en la bibliografía consultada, son:

$$\rho_l, \rho_v, h_{fg}, c_{pl}, \mu_l, k_l$$

- c) Variaciones en R^2 , $R^2_{ajustada}$ y el Error Absoluto Medio (EAM): servirán para saber cómo de acertada es la entrada y salida de una variable.

A continuación se expone de forma somera el proceso de eliminación de variables partiendo del modelo de regresión que las incluye a todas.

1) Primera eliminación: μ_v

Presenta fuertes correlaciones con 4 variables independientes. No es una variable muy a tener en cuenta para los fenómenos de cambio de fase en termosifones.

Tabla A VII.39: Correlaciones entre μ_v y las demás variables explicativas

Correlaciones	ln uv
ln dl	-0,4781
ln dv	-0,7742
ln hfg	-0,3850
ln Cpl	-0,1308
ln Cpv	-0,5973
ln ul	-0,8690
ln uv	1,0000
ln kl	-0,4012
ln kv	-0,1454
ln ts	0,6127

2) Segunda eliminación: k_v

Presenta fuertes correlaciones con 4 variables independientes que son del grupo de las relevantes. Además no se trata de una variable de relevancia, ya que el vapor se mueve a velocidades elevadas dentro del termosifón por lo que la transferencia de calor tiene lugar simultáneamente a la transferencia de masa (convección); la conductividad del vapor, por tanto, no debería presentar un papel significativo.

Tabla A VII.40: Correlaciones entre k_v y las demás variables explicativas.

Correlaciones	ln uv
ln dl	-0,1032
ln dv	-0,8610
ln hfg	-0,5238
ln Cpl	-0,7218
ln Cpv	-0,0614
ln ul	-0,7334
ln uv	1,0000
ln kl	-0,0773
ln ts	-0,0252

3) Tercera eliminación: c_{pv}

Muestra correlaciones de consideración con 3 variables independientes. Tampoco se trata de una de las variables que se han tomado como relevantes en la bibliografía científica consultada.

Tabla A VII.41: Correlaciones entre c_{pv} y las demás variables explicativas.

Correlaciones	ln Cpv
ln dl	0,4782
ln dv	-0,6595
ln hfg	0,4492
ln Cpl	-0,7971
ln Cpv	1,0000
ln ul	-0,1812
ln kl	0,0207
ln ts	-0,7498

4) Cuarta eliminación: σ

Presenta fuertes correlaciones con 4 variables independientes importantes. No se trata tampoco de una variable importante para la construcción del modelo; sí que sería una propiedad relevante si se estuviese trabajando con tubos de calor donde la vuelta del líquido al evaporador tiene lugar por capilaridad; sin embargo, en los termosifones este retorno se debe únicamente a la fuerza de la gravedad.

Tabla A VII.42: Correlaciones entre σ y las demás variables explicativas.

Correlaciones	ln ts
ln dl	-0,6675
ln dv	0,6762
ln hfg	-0,8661
ln Cpl	0,5732
ln ul	0,4701
ln kl	0,4534
ln ts	1,0000

5) Modificación del conjunto de variables final: introducción de la variable $(\rho_v \cdot h_{fg})$

Con esta variable se reducen las correlaciones entre regresores (ρ_v y h_{fg} presentaban correlaciones de relevancia con ρ_l , tal y como se indica en la tabla siguiente), aunque empeora el valor de $R^2_{ajustada}$ (pasa de ser 47,9261 a bajar levemente hasta 47,5625%).

Tabla A VII.43: Correlaciones entre q_v y h_{fg} y las demás variables explicativas.

Correlaciones	ln dv	ln hfg
ln dl	-0,6507	0,7875
ln dv	1,0000	-0,3048
ln hfg	-0,3048	1,0000
ln Cpl	0,1125	0,3687
ln ul	0,9001	-0,4954
ln kl	0,4844	-0,9375

Tras el proceso de eliminación - modificación, el conjunto final de variables resulta ser:

$$\rho_l, (\rho_v \cdot h_{fg}), c_{pl}, \mu_l, k_l$$

Validación del modelo

A continuación se muestra la salida de Statgraphics con los valores de los principales estadísticos que son testigo de la bondad del modelo.

Tabla A VII.44: Resultado de la regresión.

Regresión Múltiple - ln Rterm

Variable dependiente: ln Rterm

Variables independientes:

ln dl
ln D
ln Cpl
ln ul
ln kl

Parámetro	Estimación	Error		Estadístico	
		Estándar	T	Valor-P	
CONSTANTE	-0,0598812	0,833405	-0,0718513	0,9429	
ln dl	0,475728	0,155454	3,06026	0,0028	
ln D	-0,212125	0,0500112	-4,24155	0,0000	
ln Cpl	0,304291	0,151579	2,00748	0,0472	
ln ul	-0,209981	0,140069	-1,49912	0,1367	
ln kl	-0,307687	0,0766674	-4,01327	0,0001	

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	1,98222	5	0,396444	21,86	0,0000
Residuo	1,99476	110	0,0181341		
Total (Corr.)	3,97698	115			

R-cuadrada = 49,8424 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 47,5625 por ciento

Error estándar del est. = 0,134663

Error absoluto medio = 0,103325

Estadístico Durbin-Watson = 1,935 (P=0,3640)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0,0262718

a) Pruebas individuales de los coeficientes de regresión.

Aunque la multicolinealidad, que sigue presente también en este modelo, quita fiabilidad a los contrastes estadísticos aquí se van a tener en cuenta como medida orientativa de la bondad del ajuste. De esta forma se observa que todos los p-valor de los coeficientes de regresión son menores a 0,05, a excepción del correspondiente a μ_1 (0,1367). Esta variable, aunque no entra en el 95% de nivel de confianza, no se aparta del modelo debido a que se sabe que es una variable de relevancia para explicar el funcionamiento de la tecnología termosifón, no en vano determina la velocidad de vuelta del líquido desde el condensador al evaporador.

b) ANOVA del modelo (análisis de varianza).

El p-valor del modelo es de 0,000, lo que señala que existe una relación estadísticamente significativa entre el conjunto de variables explicativas y la variable respuesta.

c) Estadísticos para la bondad del ajuste de regresión.

A la vista de estos estadísticos puede afirmarse que el modelo de regresión, aunque incluye variables estadísticamente poco relevantes, resulta válido si se atiende al análisis de varianza realizado y a los estadísticos que se exponen a continuación. Se tiene:

- $R^2 = 49,8424 \%$;
- $R^2_{ajustada} = 47,5625 \%$;
- Error absoluto medio = 0,103325;

Tras analizar los parámetros que marcan lo bueno o malo del ajuste se presenta el modelo de regresión:

$$\ln R_{\text{term}} = -0,0598812 + 0,475728 \cdot \ln \rho_l - 0,212125 \cdot \ln (\rho_v \cdot h_{\text{fg}}) + 0,304291 \cdot \ln c_{pl} \\ - 0,209981 \cdot \ln \mu_l - 0,307687 \cdot \ln k_l$$

Eliminando los logaritmos y redondeando los coeficientes, el modelo quedaría:

$$R_{\text{term}} = 0,9419 \cdot \left(\frac{\rho_l^{4,76} \cdot c_{pl}^{3,04}}{(\rho_v \cdot h_{\text{fg}})^{2,12} \cdot \mu_l^{2,1} \cdot k_l^{3,08}} \right)^{1/10} \quad (\text{A VII.10})$$

Esta relación de variables, aunque se ha hecho buscando una mayor coherencia con la bibliografía científica de referencia, presenta con esta última una incongruencia importante, debido a la ubicación de la variable μ_l en el modelo. La vuelta del líquido desde el condensador al evaporador se produce fundamentalmente por gravedad resbalando por la cara interna del termosifón; es aquí donde la viscosidad del líquido juega un papel importante. A mayor viscosidad mayor rozamiento y por tanto mayor dificultad para que el líquido regrese a la zona de evaporación. Este entorpecimiento al avance del líquido debería empeorar la transferencia de calor y, en consecuencia, aumentar el valor de la resistencia térmica. Sin embargo esta variable se encuentra situada en el denominador de la expresión obtenida para R_{term} , lo que se traduciría en que al aumentar el valor de viscosidad, esto es, al aumentar la dificultad para que el líquido vuelva al evaporador, disminuiría el valor de la resistencia térmica facilitando la transferencia de calor. Tal y como se ha expuesto, esto va contra toda lógica por lo que no puede aceptarse el modelo así configurado.

Esta mala adecuación de los resultados a la teoría termofísica se puede seguir explicando por las persistentes fuertes correlaciones entre variables independientes, que muestran un grave problema de multicolinealidad.

En la matriz de correlaciones calculada por Statgraphics pueden verse, remarcadas en rojo, las elevadas correlaciones entre algunas variables explicativas.

Tabla A VII.45: Matriz de Correlación para las estimaciones de los coeficientes.

	ln dl	ln D	ln Cpl	ln ul	ln kl
ln dl	1,0000	-0,3947	0,4595	-0,6800	-0,2475
ln D	-0,3947	1,0000	0,3458	0,8569	-0,2338
ln Cpl	0,4595	0,3458	1,0000	0,2606	-0,8987
ln ul	-0,6800	0,8569	0,2606	1,0000	-0,3370
ln kl	-0,2475	-0,2338	-0,8987	-0,3370	1,0000

Otra manera de detectar la multicolinealidad es mediante el uso del factor de inflación de varianza VIF. La multicolinealidad es severa cuando $VIF > 30$ e importante cuando $VIF > 10$. Statgraphics ofrece estos valores y, como puede verse en la tabla siguiente, la multicolinealidad es ciertamente relevante. Debido a esto se realiza a continuación la regresión ridge.

Tabla A VII.46: Factores de Inflación de Varianza.

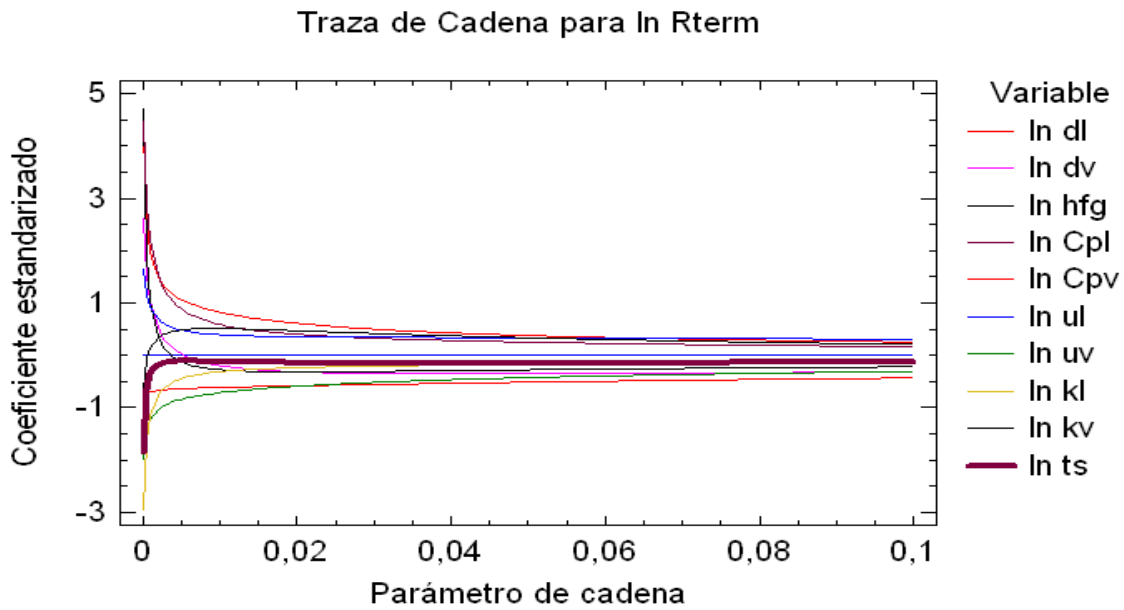
ln dl	ln D	ln Cpl	ln ul	ln kl
17,3132	11,4127	22,7794	30,8831	13,334

A VII.2.3. Regresión ridge

A continuación se va a detallar el proceso que se ha seguido para llevar a cabo la regresión ridge para este termosifón, el termosifón prismático de aluminio sin control de potencia.

a) Selección de las variables mediante la curva ridge

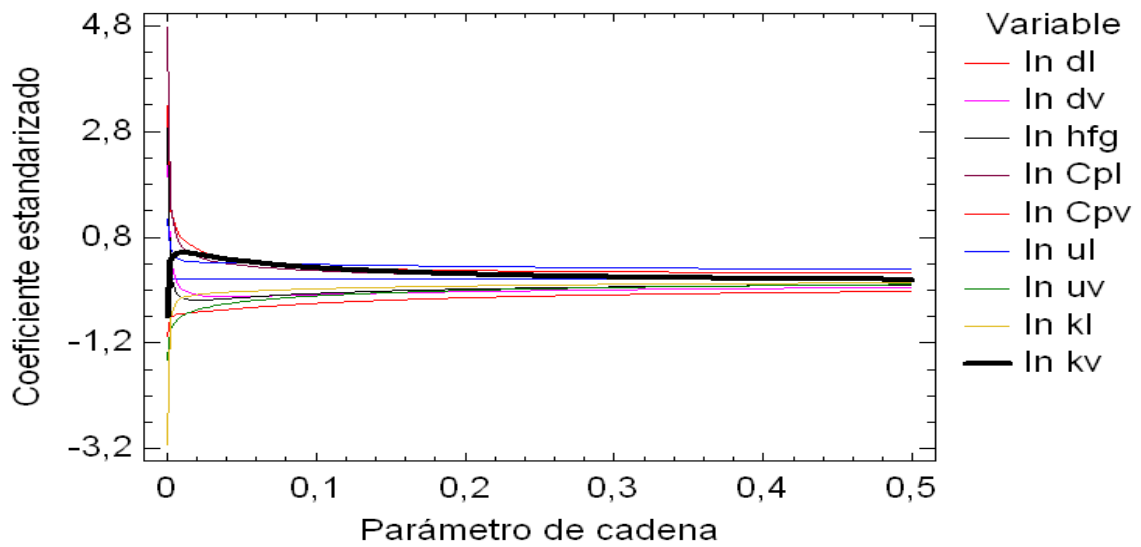
Se parte de un modelo que incluye a todas las variables regresoras. Con la curva ridge presente se siguen las directrices de selección de variables expuestas anteriormente sin olvidar, claro está, los criterios termofísicos para evitar que salga un conjunto de variables poco coherente. De esta forma se obtiene la gráfica siguiente:



Gráfica A VII.41: Curva ridge para termosifón prismático de aluminio (SCP).

Primeramente se elimina σ ($\ln ts$) que como se puede apreciar (línea granate más gruesa) presenta un valor muy próximo a cero.

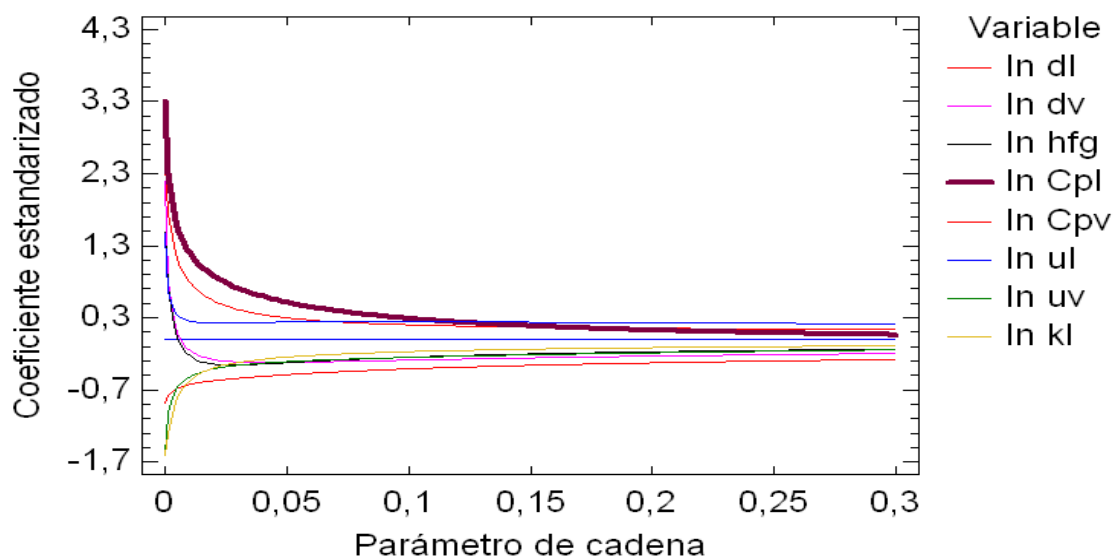
Traza de Cadena para In Rterm



Gráfica A VII.42: Curva ridge para termosifón prismático de aluminio (SCP).

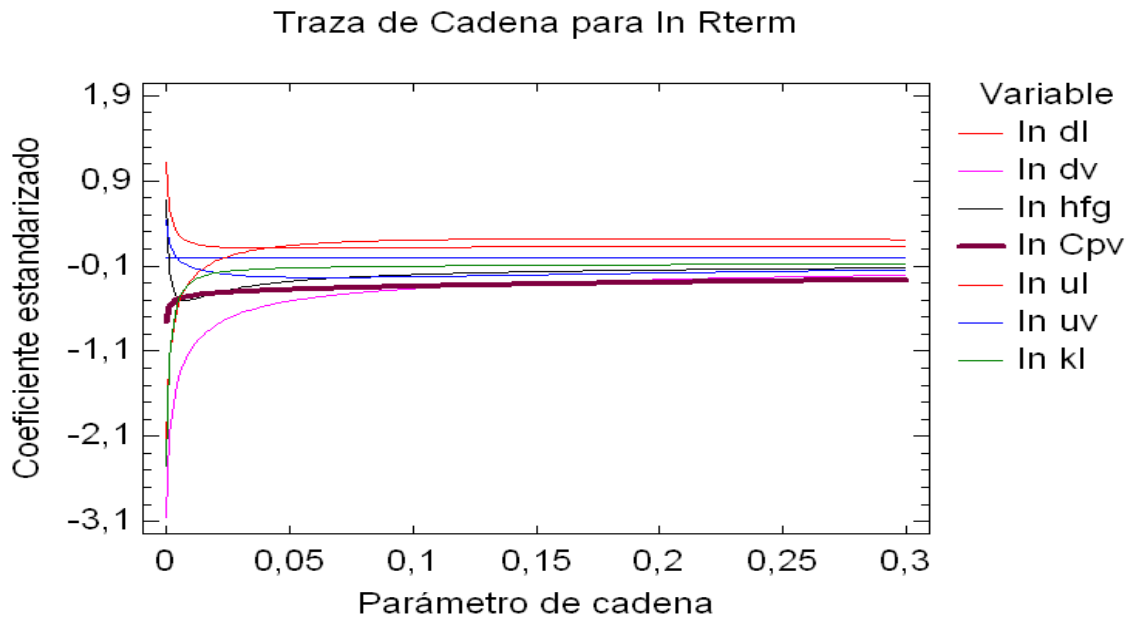
La siguiente variable en salir del modelo es k_v ($\ln k_v$). Es la que parece ser más inestable y la que más rápidamente tiende a anularse.

Traza de Cadena para In Rterm



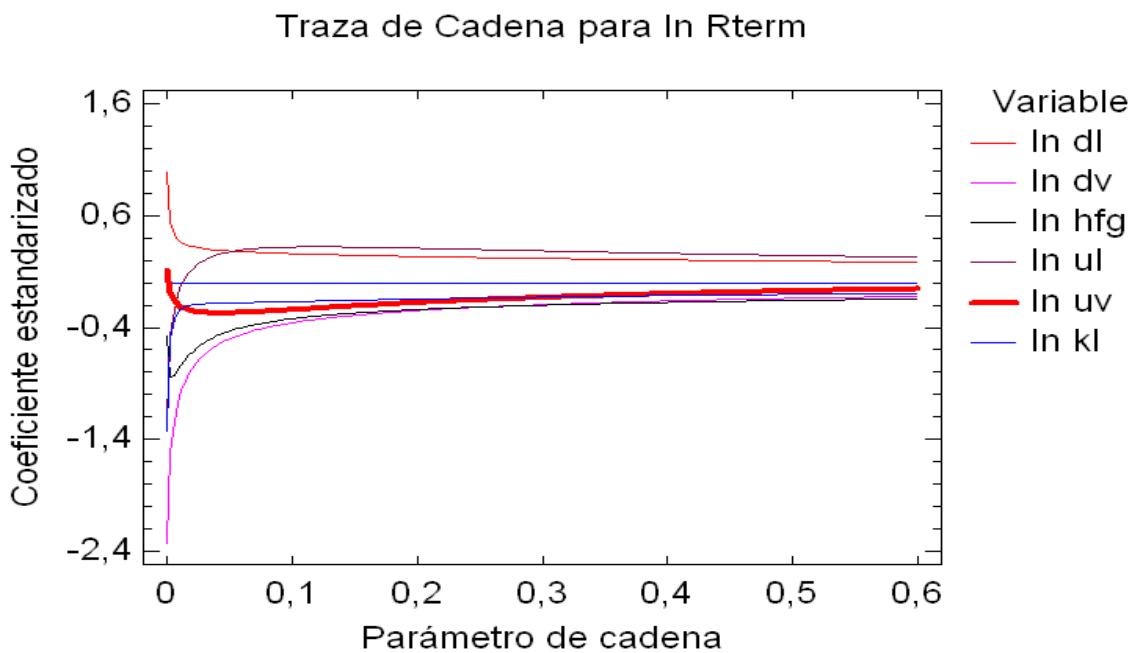
Gráfica A VII.43: Curva ridge para termosifón prismático de aluminio (SCP).

A continuación se quita c_{pl} . Si se observa su traza (línea granate) es la que tiende más rápido a cero.



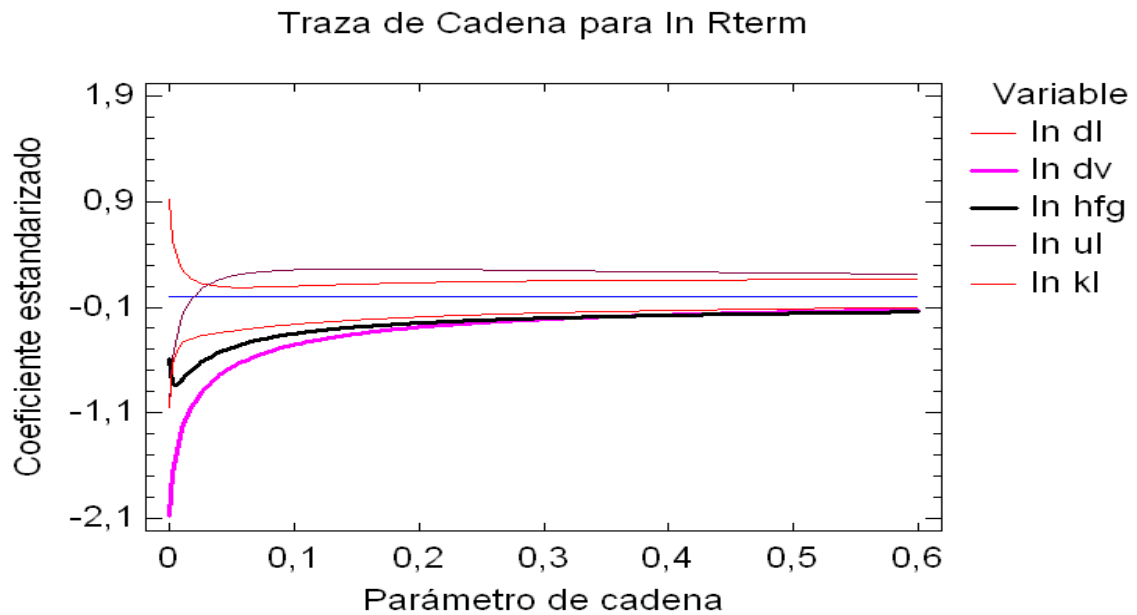
Gráfica A VII.44: Curva ridge para termosifón prismático de aluminio (SCP).

La siguiente variable en ser eliminada es c_{pv} (línea granate más gruesa). Aunque es una de las variables más estables de la traza se sabe que presenta correlaciones fuertes entre otras variables, pudiendo influir en sus coeficientes. Se quita del modelo. En la siguiente traza se verá que el resto de variables se vuelve más estable indicando el acierto en esta eliminación a priori poco lógica.



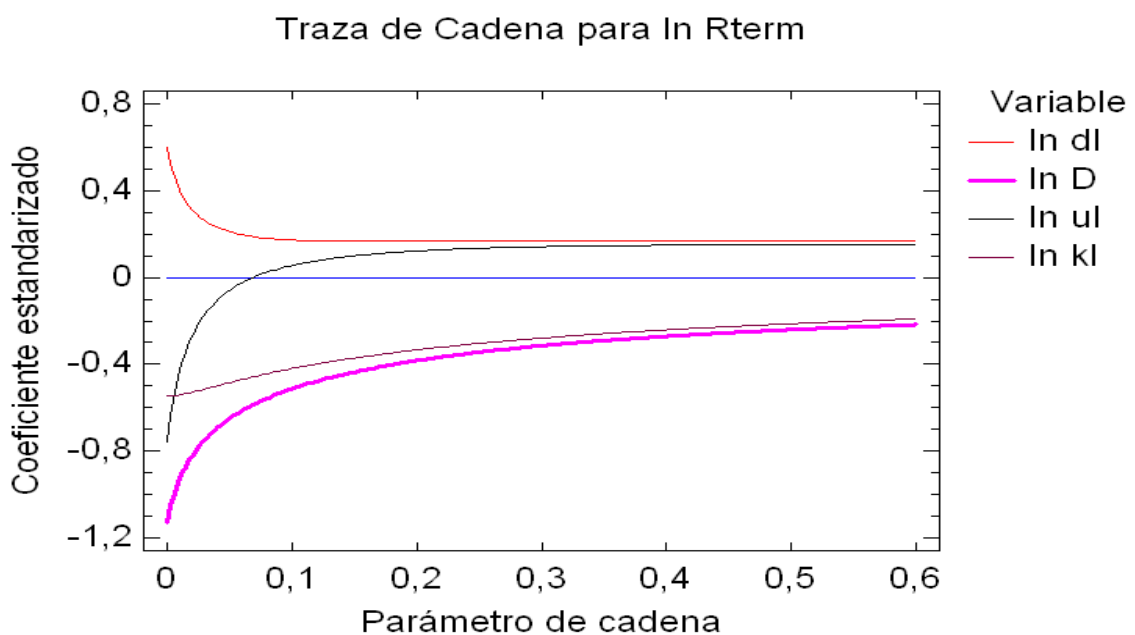
Gráfica A VII.45: Curva ridge para termosifón prismático de aluminio (SCP).

La siguiente variable en salir del modelo es μ_v ($\ln u_v$). Es la que parece tender más rápidamente a cero.



Gráfica A VII.46: Curva ridge para termosifón prismático de aluminio (SCP).

Todas las trazas parecen ser bastante estables. Sólo cabe indicar que conforme el parámetro de cadena aumenta de valor las trazas de ρ_v y h_{fg} convergen, pasando a formar una sola línea. Ante esto, y tal y como se ha hecho en casos anteriores se combinan ambas variables en el producto $D = \rho_v \cdot h_{fg}$. El resultado es unas trazas ridge más estables si cabe:



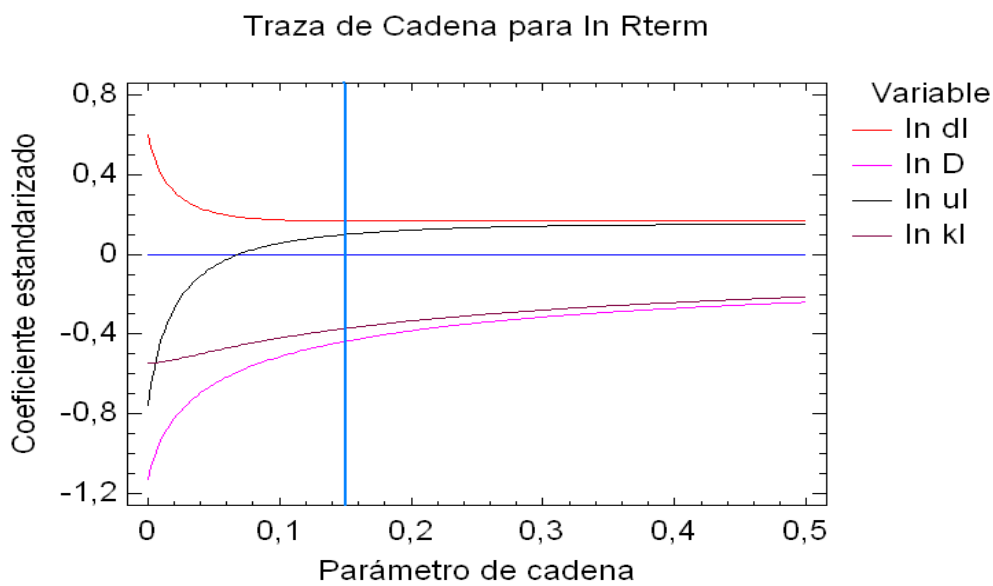
Gráfica A VII.47: Curva ridge para termosifón prismático de aluminio (SCP).

Puede concluirse, por tanto, que el conjunto final de variables para el modelo de regresión será el siguiente:

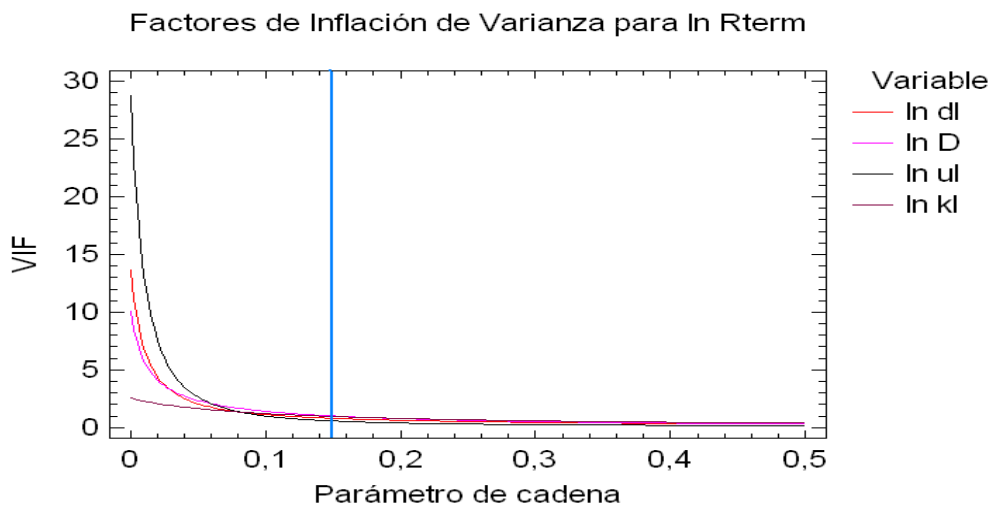
$$\rho_l, (\rho_v \cdot h_{fg}), \mu_l, k_l$$

b) Selección del parámetro de cadena

Analizando las gráficas que se presentan a continuación podrá elegirse un parámetro de cadena (o parámetro ridge) que disipe la multicolinealidad en gran medida, pero que a su vez no reduzca demasiado el poder explicativo del modelo. Es decir, que al aumentar el valor del parámetro de cadena disminuyen los valores de R^2 y de $R^2_{ajustada}$.



Gráfica A VII.48: Parámetro de cadena para termosifón prismático de aluminio (SCP).



Gráfica A VII.49: VIF para termosifón prismático de aluminio (SCP).

Se ha tomado como parámetro de cadena 0,15, ya que es un valor relativamente bajo en el que los coeficientes están medianamente estabilizados y el valor de VIF es razonablemente pequeño (en torno a 1). Esto puede apreciarse de forma más clara en la tabla siguiente.

Tabla A VII.47: Factores de Inflación de Varianza.

Parámetro de Cadena	ln dl	ln D	ln ul	ln kl	R-Cuadrada
0,15	0,797657	1,01171	0,574209	0,963135	37,24

c) Validación del modelo

A continuación se muestra la salida de Statgraphics.

Tabla A VII.48: Resultados de la regresión ridge.

Regresión en Cadena - ln Rterm		
Variable dependiente: ln Rterm		
Variables independientes:		
ln dl		
ln D		
ln ul		
ln kl		
Número de casos completos: 116		
Resultados del Modelo para el Parámetro de Cadena = 0,15		
		<i>Factor de Inflación de Varianza</i>
<i>Parámetro</i>	<i>Estimado</i>	
CONSTANTE	-0,377471	
ln dl	0,0920241	0,797657
ln D	-0,095588	1,01171
ln ul	0,0370409	0,574209
ln kl	-0,11548	0,963135
Análisis de Residuos R-Cuadrada = 37,2372 por ciento R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 34,9755 por ciento Error estándar del est. = 0,143256 Error medio absoluto = 0,116811 Estadístico Durbin-Watson = 1,64468 (P=0,0277) Autocorrelación residual de retardo 1 = 0,171069		
	<i>Estimación</i>	<i>Validación</i>
n	116	
CME	0,0205224	
MAE	0,116811	
MAPE		
ME	-1,4452E-16	
MPE		

El estadístico R^2 indica que el modelo, así ajustado, explica el 37,2372% de la variabilidad de R_{term} . El estadístico $R^2_{ajustada}$ es 34,9755%. El error estándar de estimación muestra que la desviación estándar de los residuos es 0,143256. El error absoluto medio (MAE) de 0,116811 es el valor promedio de los residuos.

El modelo de regresión resultante es:

$$\ln R_{\text{term}} = -0,377471 + 0,0920241 \cdot \ln \rho_l - 0,095588 \cdot \ln (\rho_v \cdot h_{fg}) + 0,0370409 \cdot \ln \mu_l - 0,11548 \cdot \ln k_l$$

Quitando los logaritmos y redondeando los coeficientes, el modelo quedaría:

$$R_{\text{term}} = 0,6856 \cdot \left(\frac{\rho_l^{0,92} \cdot \mu_l^{0,37}}{(\rho_v \cdot h_{fg})^{0,96} \cdot k_l^{1,15}} \right)^{1/10} \quad (\text{A VII.11})$$

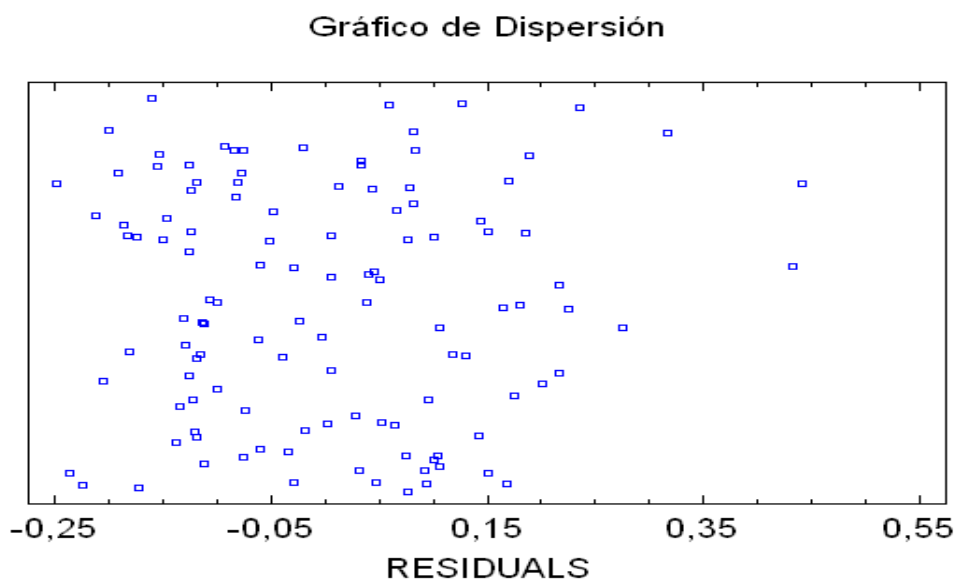
Hay que resaltar que éste no va a ser el resultado final de la regresión para este termosifón ya que, como se verá en el apartado siguiente, los residuos no siguen una distribución normal y habrá que eliminar alguna observación para que esto se cumpla. Al hacer estos cambios el modelo va a variar, no en las variables que lo van a integrar (las trazas ridge son muy similares y por tanto el proceso de selección de variables permanece igual), pero sí en el valor del parámetro de cadena y, por tanto, en el valor de los coeficientes (exponentes).

d) Diagnósis del modelo

A continuación se presentan los estadísticos y gráficas que indicarán si el modelo es adecuado según los criterios estadísticos.

D.1. Residuales

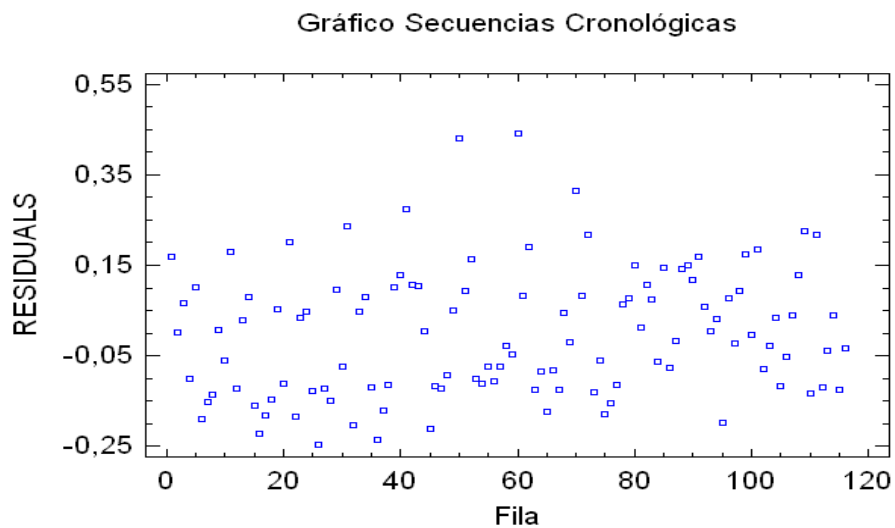
a) Gráfico de dispersión.



Gráfica A VII.50: Dispersión para termosifón prismático de aluminio (SCP).

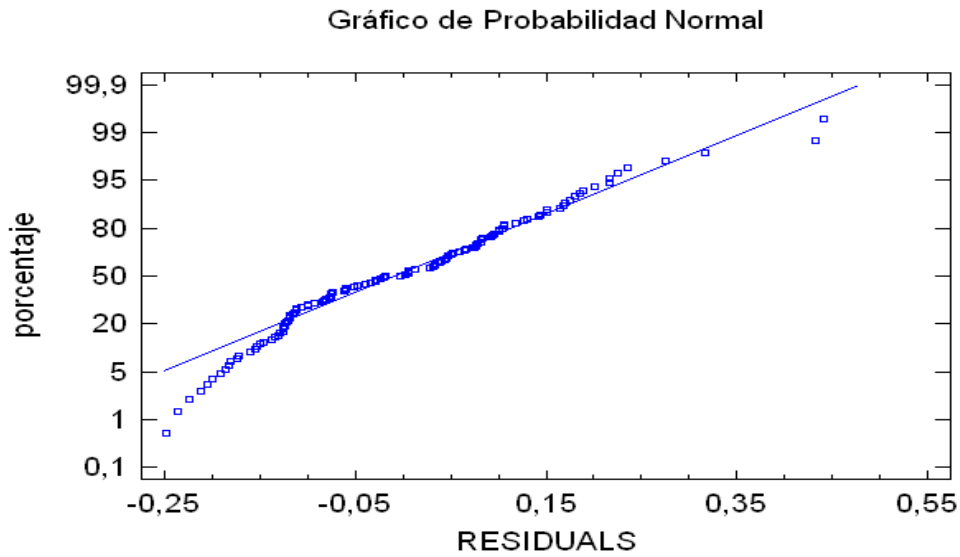
Se observan un par de puntos a la derecha que se desmarcan de la nube de puntos principal (pertenecen al isopentano). Como se observará más adelante, éstos corresponden a observaciones que impiden tener una distribución normal en los residuos, por tanto, serán eliminadas.

No parece haber tendencias específicas; los residuos son aleatorios, no les influye el orden en que se han introducido los datos. Esto último queda desmentido, sin embargo, por el valor del estadístico Durbin-Watson = 1,64468 que se encuentra alejado del valor 2 y presenta un p-valor de 0,0277, indicando que no hay aleatoriedad entre los residuos y el orden en que se han introducido las observaciones para el análisis. Esto mejoraría tan solo con introducir los datos siguiendo otro orden cosa que no modificaría, en absoluto, el análisis realizado, únicamente el valor de este estimador.



Gráfica A VII.51: Secuencias cronológicas para termosifón prismático de aluminio (SCP).

b) Percentiles de la distribución normal –QQ-norms.



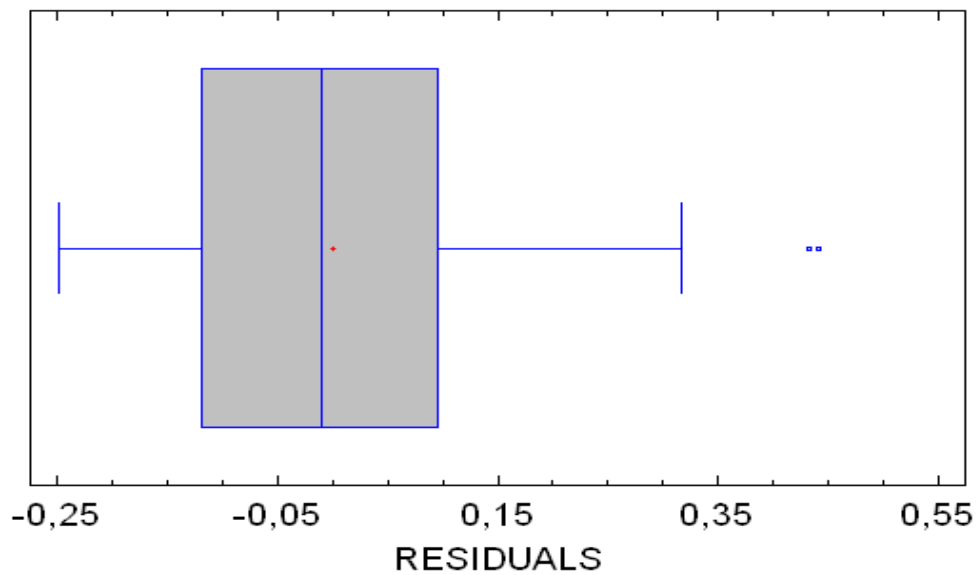
Gráfica A VII.52: Distribución normal para termosifón prismático de aluminio (SCP).

Los residuos presentan alguna desviación respecto de la distribución normal; los dos puntos situados más a la derecha del gráfico se separan claramente de la diagonal. Llama la atención la cola que aparece a la izquierda, pero ésta no resulta tan relevante como se verá posteriormente. La desviación respecto a la normal puede comprobarse atendiendo a los valores que arrojan el sesgo estandarizado y la curtosis; el primero se aleja del intervalo indicado para la normalidad (-2, 2); se concluye por tanto que hay desviaciones con respecto a la distribución normal.

Tabla A VII.49: Validación del supuesto de distribución normal.

Sesgo Estandarizado	2,5427
Curtosis Estandarizada	0,360499

Gráfico de Caja y Bigotes



Gráfica A VII.53: Gráfico de Caja y Bigotes para termosifón prismático de aluminio (SCP).

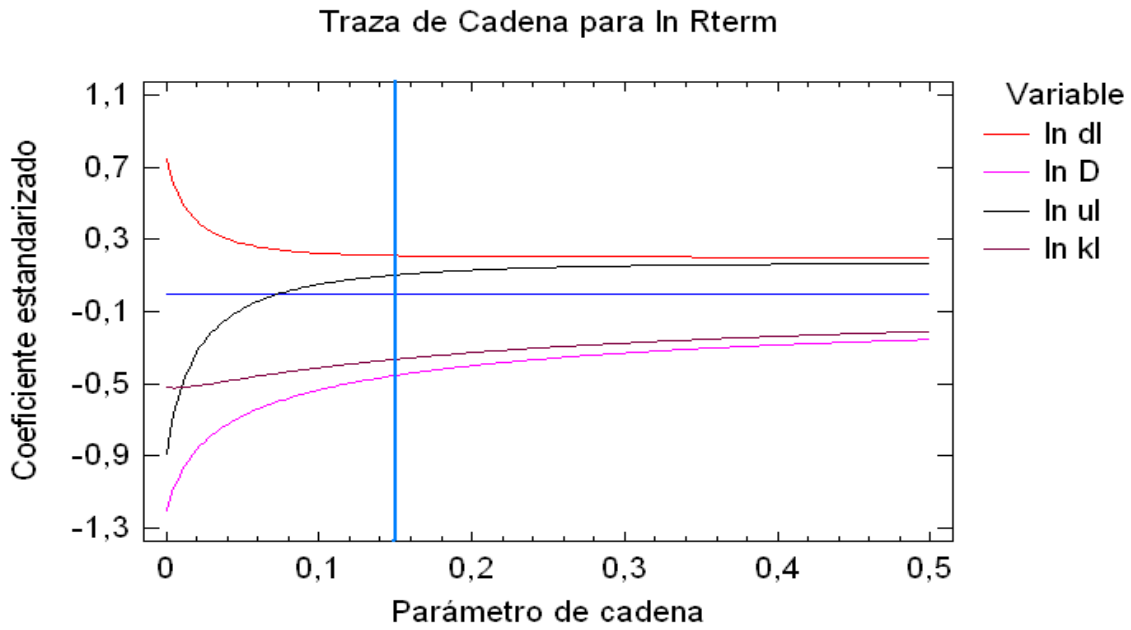
Para que la hipótesis de normalidad vuelva a ser válida se va a proceder a eliminar las observaciones cuyos residuos se desvían de esta suposición (constituyen residuos atípicos). Son los puntos marcados en el gráfico de caja y bigotes anterior, y corresponden a dos observaciones del isopentano. Este gráfico mide la dispersión y la simetría.

Tras esta modificación, en la que el número de observaciones ha pasado de ser 116 a ser 114, hay que volver a definir el modelo.

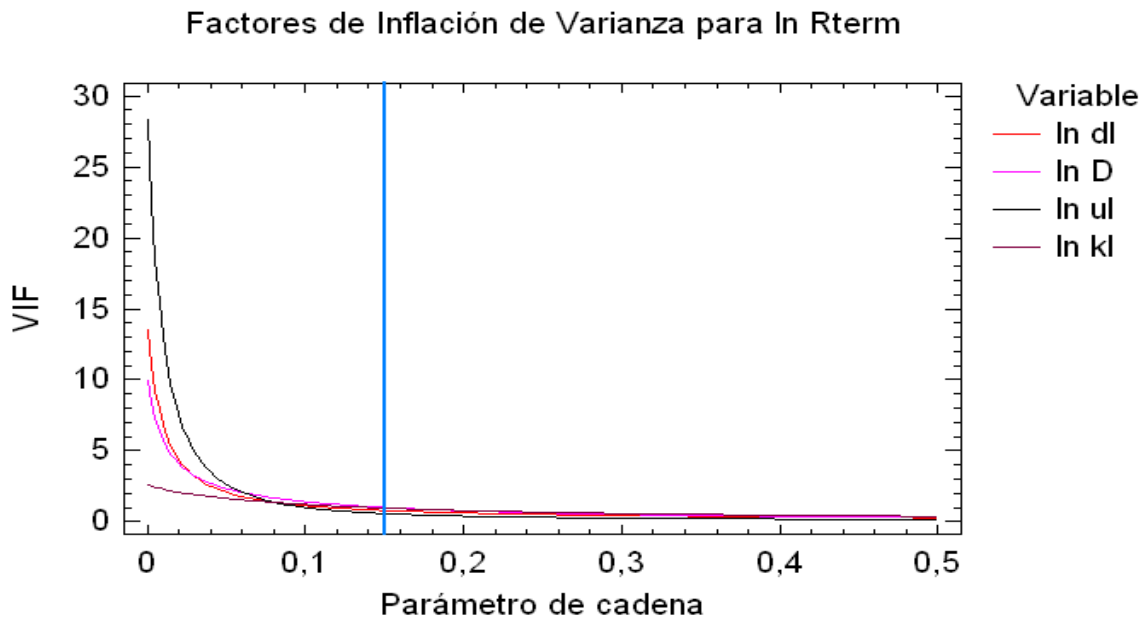
La traza ridge final no se ha modificado en gran medida si se compara con la anterior, así que puede deducirse que el proceso de selección de variables sigue siendo válido y el conjunto final de variables corresponderá al mismo que se tenía previamente:

$$\rho_1, (\rho_v \cdot h_{fg}), \mu_1, k_1$$

El parámetro de cadena se sigue manteniendo también en 0,15.



Gráfica A VII.54: Parámetro de cadena para termosifón prismático de aluminio (SCP).



Gráfica A VII.55: VIF para termosifón prismático de aluminio (SCP).

Los criterios seguidos para tomar de nuevo un valor de 0,15 han sido los mismos que para el caso anterior: estabilidad de los coeficientes (las trazas son casi horizontales y/o varían muy lentamente) y valores para la inflación de varianza cercanos a 1.

Tabla A VII.50: Factores de Inflación de Varianza.

Parámetro de Cadena	ln dl	ln D	ln ul	ln kl	R-Cuadrada
0,15	0,797468	1,00956	0,578493	0,964486	43,87

La pantalla de salida de Statgraphics para este nuevo modelo sería:

Tabla A VII.51: Resultados de la regresión ridge.

Regresión en Cadena - ln Rterm		
Variable dependiente: ln Rterm		
Variables independientes:		
ln dl		
ln D		
ln ul		
ln kl		
Número de casos completos: 114		
Resultados del Modelo para el Parámetro de Cadena = 0,15		
		<i>Factor de Inflación de Varianza</i>
<i>Parámetro</i>	<i>Estimado</i>	
CONSTANTE	-0,554954	
ln dl	0,114164	0,797468
ln D	-0,0971303	1,00956
ln ul	0,0376769	0,578493
ln kl	-0,109962	0,964486
Análisis de Residuos		
	<i>Estimación</i>	<i>Validación</i>
n	114	
CME	0,0172047	
MAE	0,110115	
MAPE		
ME	-3,95882E-16	
MPE		

El estadístico R^2 indica que el modelo, así ajustado, explica el 43,87% de la variabilidad de R_{term} . El estadístico R^2_{ajustada} es 41,8102%. El error estándar de estimación muestra que la desviación estándar de los residuos es 0,131167. El error absoluto medio (MAE) de 0,110115 es el valor promedio de los residuos.

El modelo de regresión resultante es:

$$\ln R_{\text{term}} = -0,554954 + 0,114164 \cdot \ln \rho_1 - 0,0971303 \cdot \ln (\rho_v \cdot h_{fg}) + 0,0376769 \cdot \ln \mu_1 - 0,109962 \cdot \ln k_1$$

Quitando los logaritmos y redondeando los coeficientes, el modelo, ahora ya sí el definitivo, quedaría como sigue:

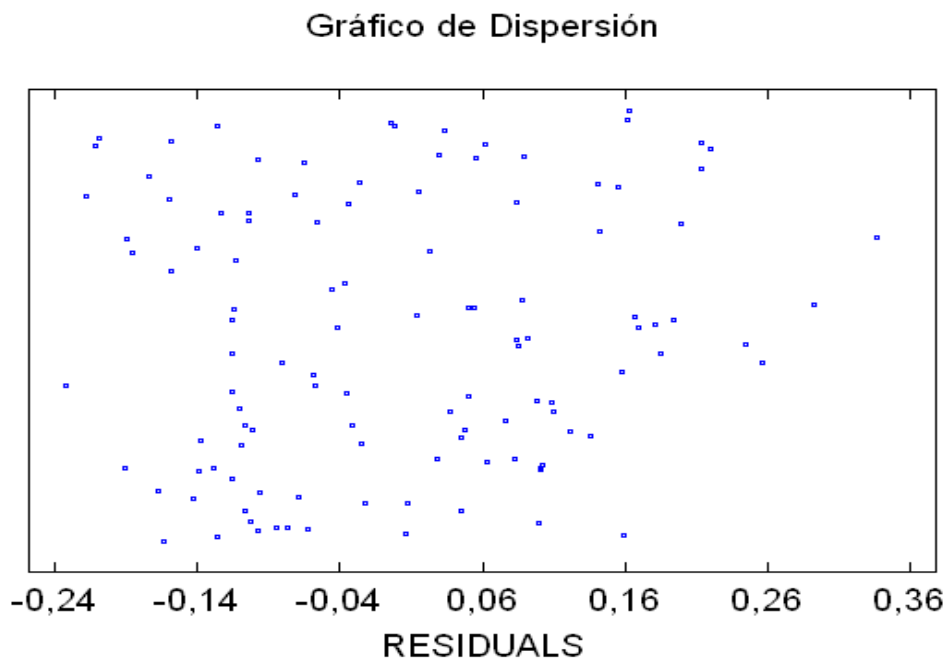
$$R_{\text{term}} = 0,5741 \cdot \left(\frac{\rho_1^{1,14} \cdot \mu_1^{0,38}}{(\rho_v \cdot h_{fg})^{0,97} \cdot k_1^{1,1}} \right)^{1/10} \quad (\text{A VII.12})$$

Comparando este modelo con el que se tenía anteriormente hay que destacar un par de ideas:

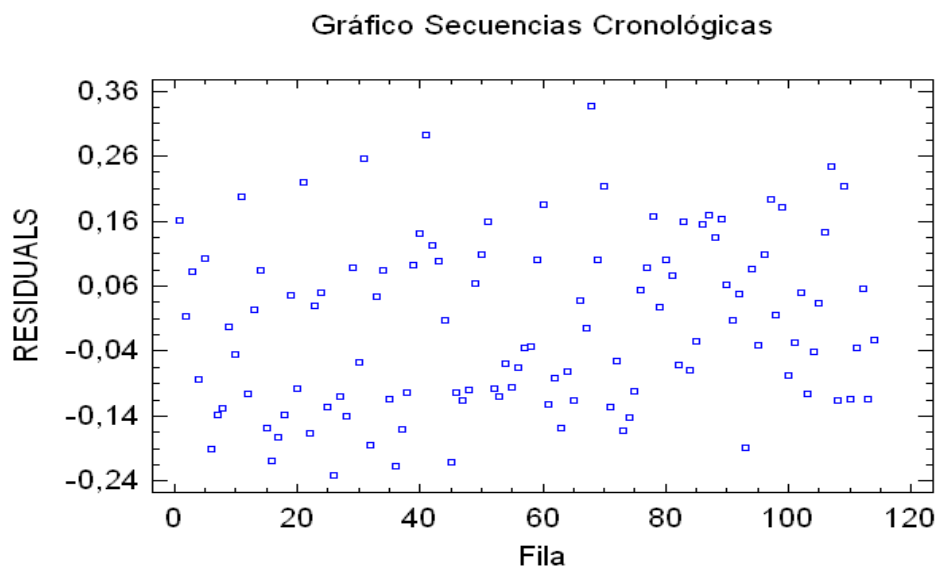
- La fórmula final es muy similar a la anterior.
- Los valores de los estadísticos que indican la bondad del ajuste han mejorado notablemente justificando, más si cabe, la eliminación de los observaciones indicadas. Los valores de R^2 y $R^2_{ajustada}$, antes se situaban en torno al 35% y ahora sin embargo han subido al entorno del 43%. Así mismo el error absoluto medio ha pasado de situarse cercano al 12% para bajar hasta el 11%.

Se realiza otra vez el análisis de los residuos para validar este nuevo modelo.

a) Gráfico de dispersión.



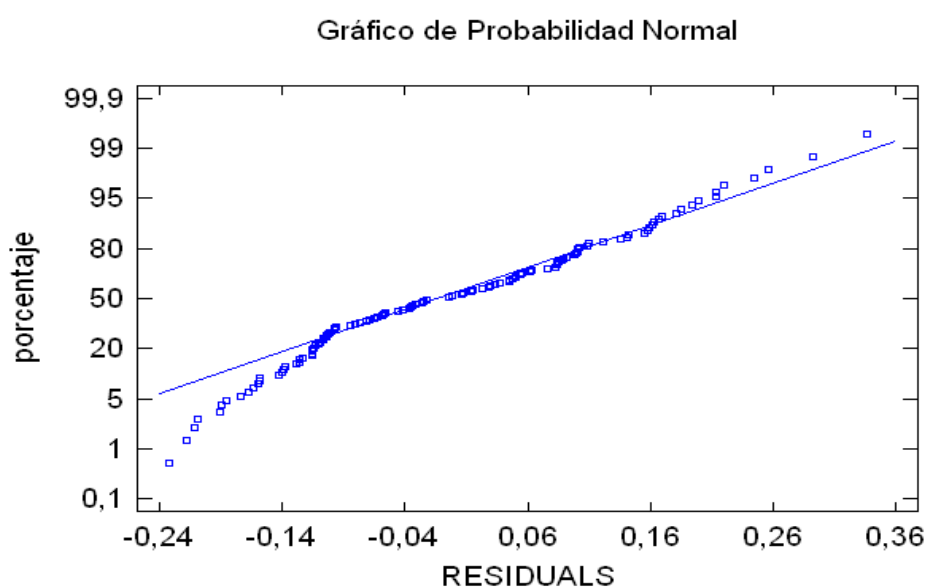
Gráfica A VII.56: Dispersión para termosifón prismático de aluminio (SCP).



Gráfica A VII.57: Secuencias cronológicas para termosifón prismático de aluminio (SCP).

No parece haber tendencias específicas; los residuos son aleatorios, no les influye el orden en que se han introducido los datos. Esto último queda desmentido, sin embargo, por el valor del estadístico Durbin-Watson = 1,61923 que se encuentra alejado del valor 2 y presenta un p-valor de 0,0208, indicando que no hay aleatoriedad entre los residuos y el orden en que se han introducido las observaciones para el análisis. Esto mejoraría, tal y como se ha indicado anteriormente, con introducir los datos siguiendo otro orden, cosa que no modificaría, en absoluto, el análisis realizado, únicamente el valor de este estimador.

b) Percentiles de la distribución normal –QQ-norms.



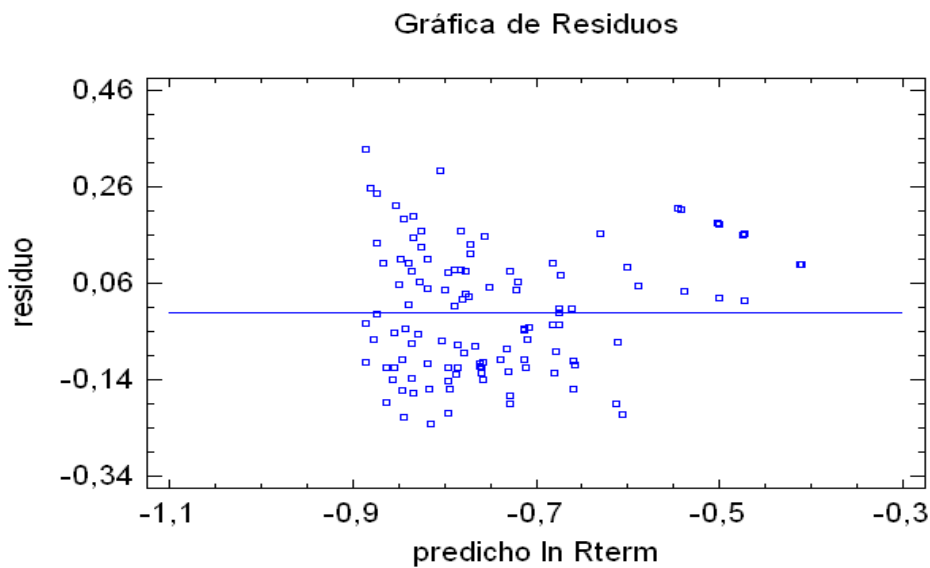
Gráfica A VII.58: Distribución normal para termosifón prismático de aluminio (SCP).

Los residuos presentan alguna desviación respecto de la distribución normal; los dos puntos situados más a la derecha del gráfico se separan claramente de la diagonal. Llama la atención la cola que aparece a la izquierda, pero ésta no resulta tan relevante como se verá posteriormente. La desviación respecto a la normal puede comprobarse atendiendo a los valores que arrojan el sesgo estandarizado y la curtosis; el primero se aleja del intervalo indicado para la normalidad (-2, 2); se concluye por tanto que hay desviaciones con respecto a la distribución normal.

Tabla A VII.52: Validación del supuesto de distribución normal.

Sesgo Estandarizado	1,36972
Curtosis Estandarizada	-1,61319

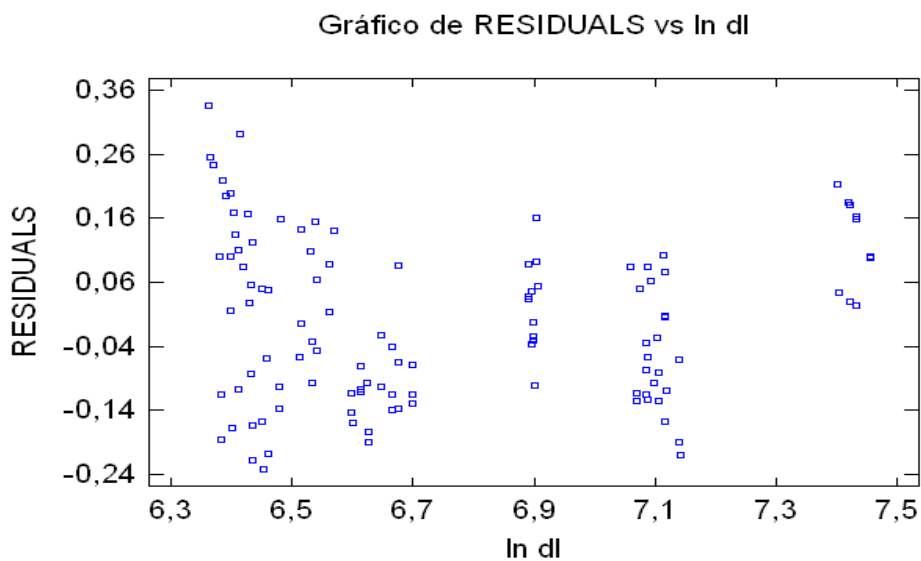
c) Gráficos de los residuales frente a los valores ajustados.



Gráfica A VII.59: Residuales para termosifón prismático de aluminio (SCP).

No aparecen agrupaciones de residuos ni una tendencia concreta que revele heterocedasticidad (varianza no constante). No se observan tampoco puntos anómalos.

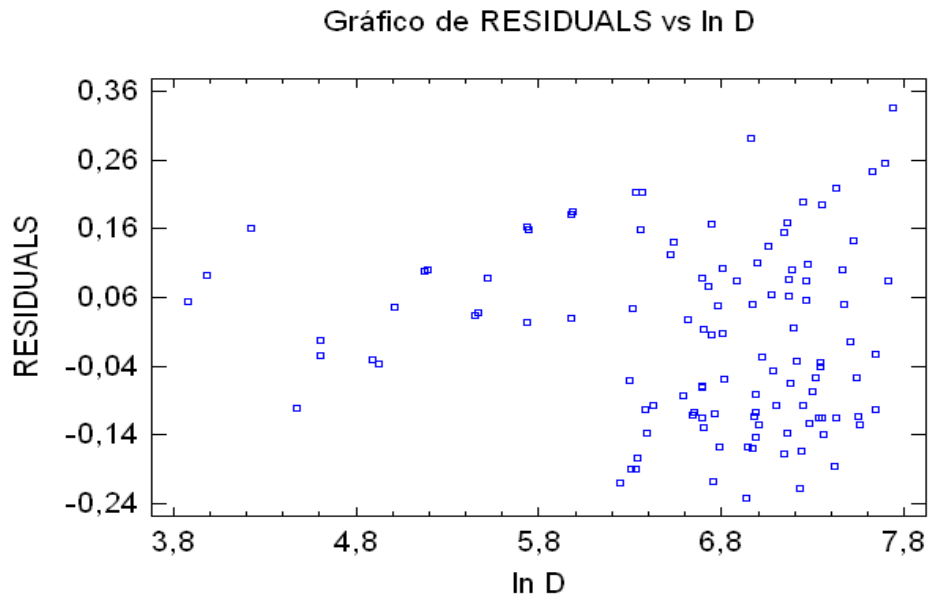
d) Gráficos de los residuales frente a las variables explicativas

d.1.) Residuales frente a $\ln \rho_l$ 

Gráfica A VII.60: Residuales para termosifón prismático de aluminio (SCP).

Aparecen agrupaciones de residuos por sustancias; esto tiene cierta lógica ya que no todas las sustancias se mueven en el mismo rango de valores para sus distintas propiedades, en este caso la densidad de líquido. Por ejemplo, los datos agrupados más a la derecha corresponden al perfluoroheptano, así como los que se agrupan en torno al valor de 6,9 pertenecen al agua. Este hecho podrá observarse también en alguna de las gráficas que siguen.

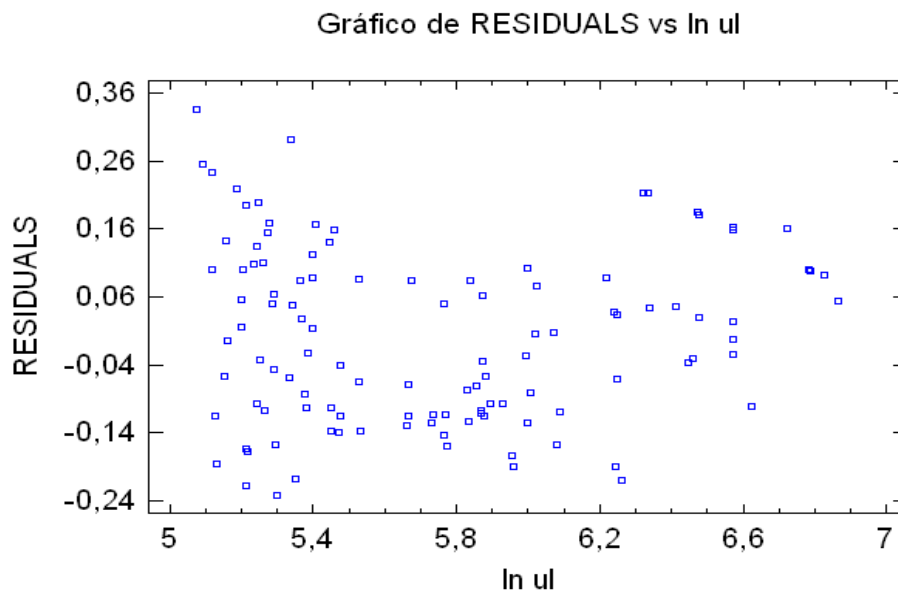
d.2.) Residuales frente a $\ln(\rho_v \cdot h_{fg}) = \ln D$



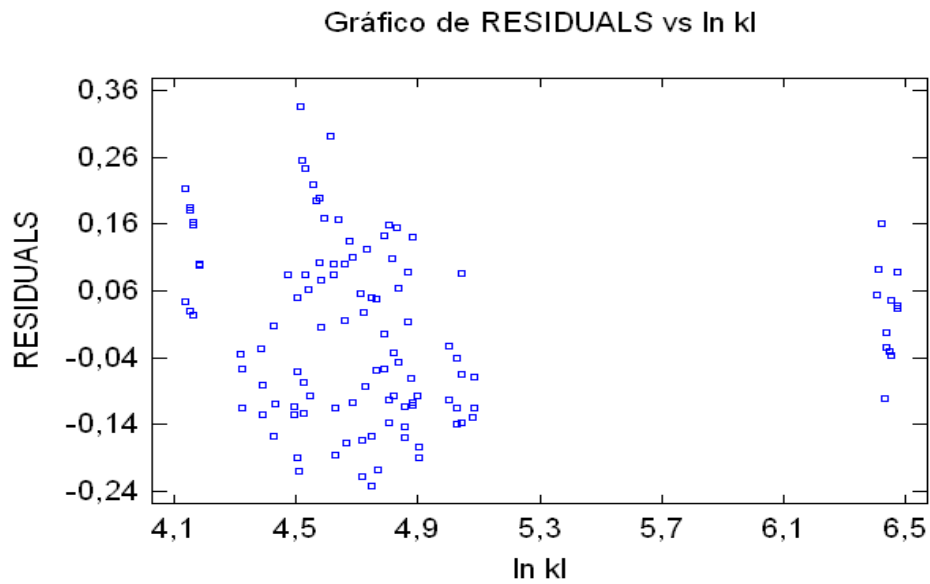
Gráfica A VII.61: Residuales para termosifón prismático de aluminio (SCP).

Los puntos de la izquierda, que se encuentran bastante separados de la nube general, corresponden al agua.

d.3.) Residuales frente a $\ln \mu_1$



Gráfica A VII.62: Residuales para termosifón prismático de aluminio (SCP).

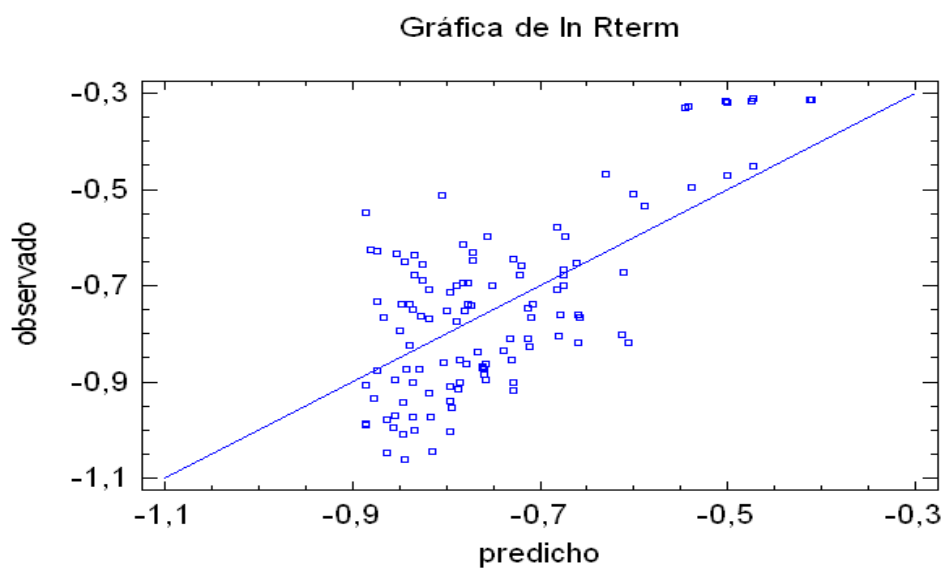
d.4.) Residuales frente a $\ln k_1$ 

Gráfica A VII.63: Residuales para termosifón prismático de aluminio (SCP).

Los puntos correspondientes al agua quedan agrupados a la derecha, haciendo notar que es la sustancia con mayor conductividad térmica de las ensayadas en este termosifón.

A la vista de los gráficos presentados puede concluirse que no hay tendencias específicas de los residuos, solamente las consabidas agrupaciones por sustancias que ya han sido señaladas. Tampoco hay puntos claramente atípicos o influyentes.

e) Gráficos de valores observados frente a valores ajustados.



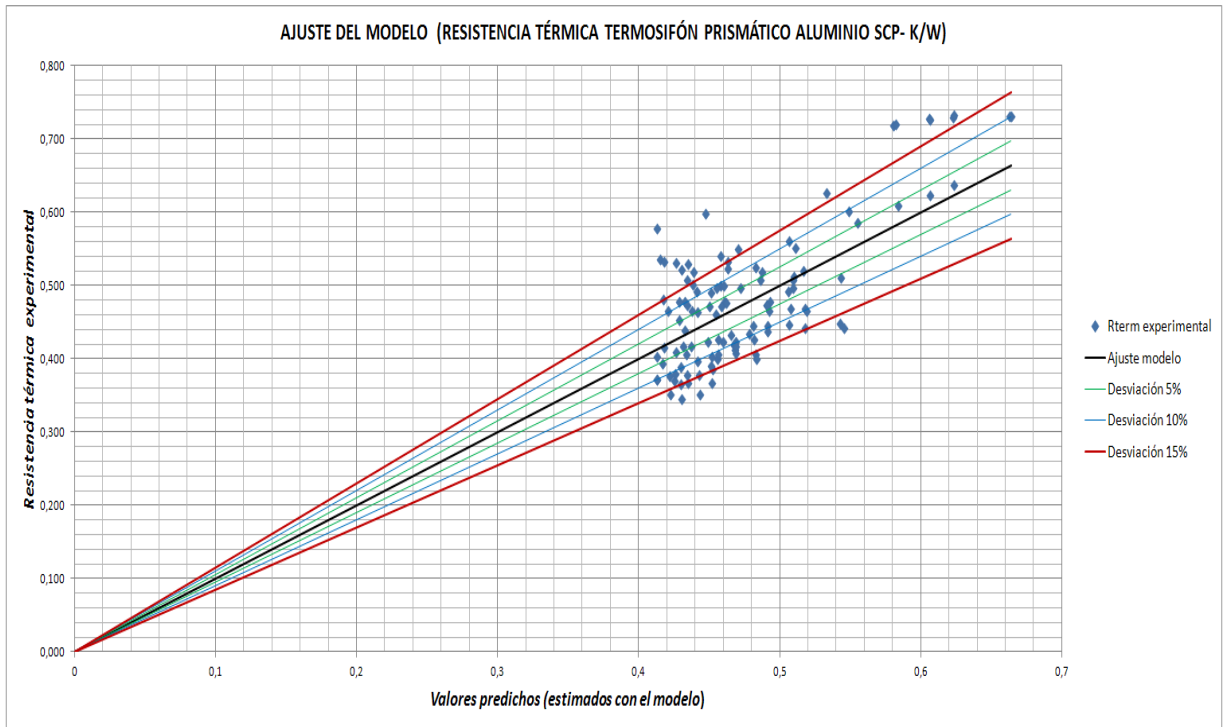
Gráfica A VII.64: Valores ajustados para termosifón prismático de aluminio (SCP).

El ajuste parece adecuado, los valores se ciñen bastante bien a la diagonal. Tampoco se aprecian aquí puntos claramente distorsionadores.

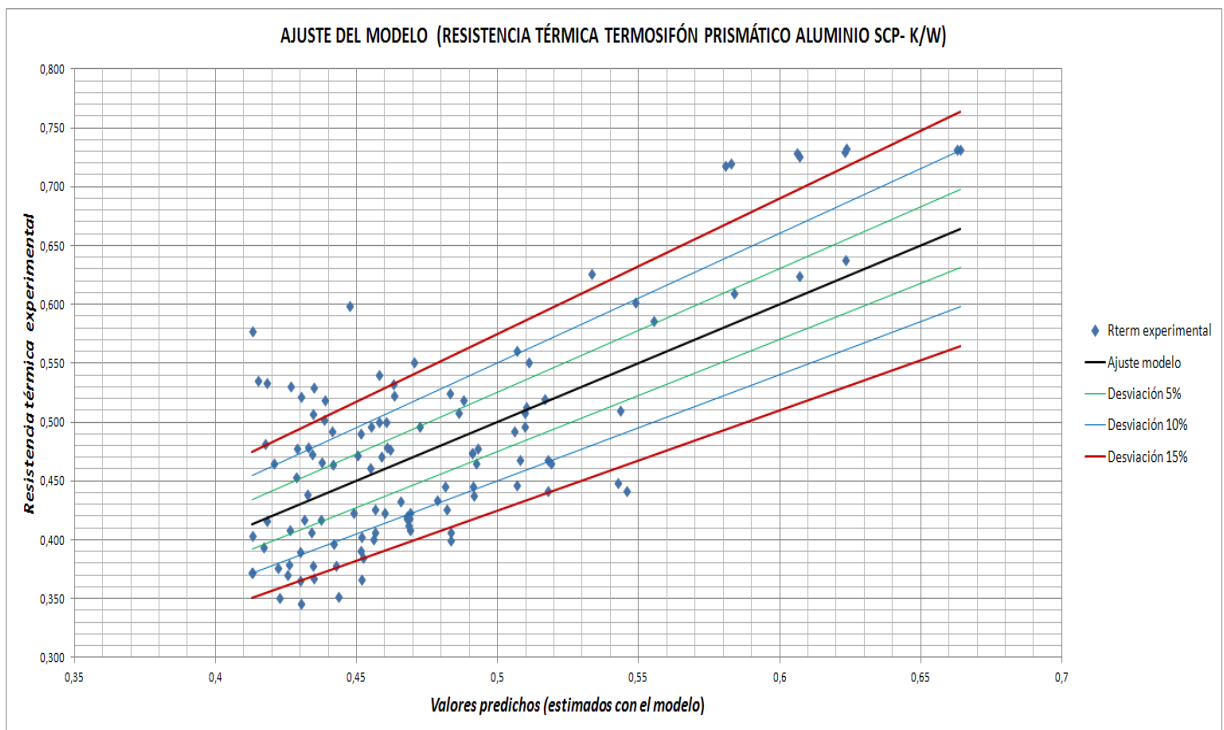
En las hojas siguientes se muestra la gráfica A VII.64, representada con Excel, donde aparece también la acotación del error cometido en la estimación. En estas dos gráficas, la A VII.65 y la A VII.66, puede verse cómo la mayoría de los puntos caen entre las líneas que delimitan el error al $\pm 10\%$, sin embargo son también muchos los puntos que superan un error del 15% (28 de 114 lo que supone casi un 25 %).

Tras todo este proceso de validación y a la vista de las últimas gráficas puede concluirse que el modelo matemático de regresión es adecuado para explicar el comportamiento del presente termosifón prismático de aluminio sin control de potencia.

De este estudio se deduce también, como dato de relevancia, que el tipo de sustancia empleada explica cerca del 45% de la variabilidad de R_{term} . El estadístico $R^2 = 43,87\%$ es el que lo indica.



Gráfica A VII.65: Ajuste del modelo del termosifón prismático aluminio sin control de potencia.



Gráfica A VII.66: Ajuste del modelo del termosifón prismático aluminio sin control de potencia.

A VII.3. Análisis de experimentos y superficies de respuesta

A VII.3.1. Introducción al análisis de superficie de respuesta

La Metodología de Superficies de Respuesta (RSM) es un conjunto de técnicas matemáticas utilizadas en el tratamiento de problemas en los que una respuesta de interés está influida por varios factores de carácter cuantitativo. El propósito inicial de estas técnicas es diseñar un experimento que proporcione valores razonables de la variable respuesta y, a continuación, determinar el modelo matemático que mejor se ajusta a los datos obtenidos. El objetivo final es establecer los valores de los factores que optimizan el valor de la variable respuesta.

El análisis de superficie de respuesta que va a exponerse irá acompañado de un análisis de experimentos [9] que relacionará la resistencia térmica con las variables categorizadas previamente a la experimentación (tipo de termosifón, carga y temperatura ambiente) prescindiendo de las propiedades termofísicas en las que se centra el estudio anterior de regresión. De esta forma se tratará de mostrar en qué condiciones externas a la sustancia se maximiza la transferencia de calor, o lo que es lo mismo, se minimiza R_{term} .

A continuación se muestran los resultados obtenidos mediante la metodología de superficie de respuesta. Se seguirá el mismo esquema que se ha seguido con la regresión múltiple, se expondrán primero los resultados de los estudios individuales para cada uno de los 5 termosifones y se finalizará con un estudio general de los datos provenientes del conjunto de todos ellos.

A VII.3.2. Estudio de superficie de respuesta para termosifón de acero pequeño

a) Datos estudiados

- Variable dependiente: R_{term} (resistencia térmica).

Las variables independientes se explican a continuación:

- a) Coeficiente de llenado o nivel de carga (*Carga*): presenta tres niveles.

Bajo (50 %)

Medio (70 %)

Alto (90 %).

Hay que tomar una escala numérica para que el método de superficie de respuesta pueda realizarse. La escala escogida es la que se muestra a continuación.

Tabla A VII.53: Escala de categorización de la variable Carga.

Bajo	Medio	Alto
0,5	0,75	1

b) Temperatura ambiente (T_{amb}): presenta cuatro niveles.

10 °C 25 °C 32 °C 43 °C

En total son: 2 variables independientes + 1 variable dependiente.

Se tienen también 14 bloques, uno por cada sustancia ensayada en este termosifón, y a cada bloque le corresponden 12 observaciones (cuatro temperaturas para cada uno de los tres niveles de carga)

Tabla A VII.54: Bloques planteados para el estudio de superficie de respuesta.

Bloque	Sustancia
1	Acetona
2	Agua
3	Ciclopentano
4	Dietil éter
5	Isopentano
6	Metanol
7	N-Hexano
8	N-Pentano
9	Perfluoroheptano
10	R-141b
11	R-365mfc
12	Acetona + Pentano
13	Ciclopentano + Metanol
14	Dietil éter + Metanoato de metilo

Esta vez las tablas no se convierten a escala logarítmica. Se va a trabajar con una expresión polinómica para construir la superficie de respuesta, por tanto se emplearán los datos originales sin modificar.

b) Análisis de correlaciones

No se han detectado correlaciones relevantes entre las variables explicativas por lo que la interpretación de los estadísticos del modelo podrá hacerse sin dificultad.

Tabla A VII.55: Matriz de correlación para los efectos estimados.

		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
(1)	promedio	1,0000	0,0090	-0,0896	-0,6679	-0,0065	-0,5440	-0,0056
(2)	A:Carga+bloque	0,0090	1,0000	0,0051	0,0181	-0,0615	-0,0103	-0,0092
(3)	B:T ambiente+bloque	-0,0896	0,0051	1,0000	0,0185	0,0143	0,0669	-0,0002
(4)	AA+bloque	-0,6679	0,0181	0,0185	1,0000	0,0057	-0,0213	-0,0046
(5)	AB+bloque	-0,0065	-0,0615	0,0143	0,0057	1,0000	0,0142	-0,0033
(6)	BB+bloque	-0,5440	-0,0103	0,0669	-0,0213	0,0142	1,0000	0,0038
(7)	bloque	-0,0056	-0,0092	-0,0002	-0,0046	-0,0033	0,0038	1,0000

c) Validación del modelo

A continuación se muestra la salida de Statgraphics.

Tabla A VII.56: Validación del modelo de superficie de respuesta

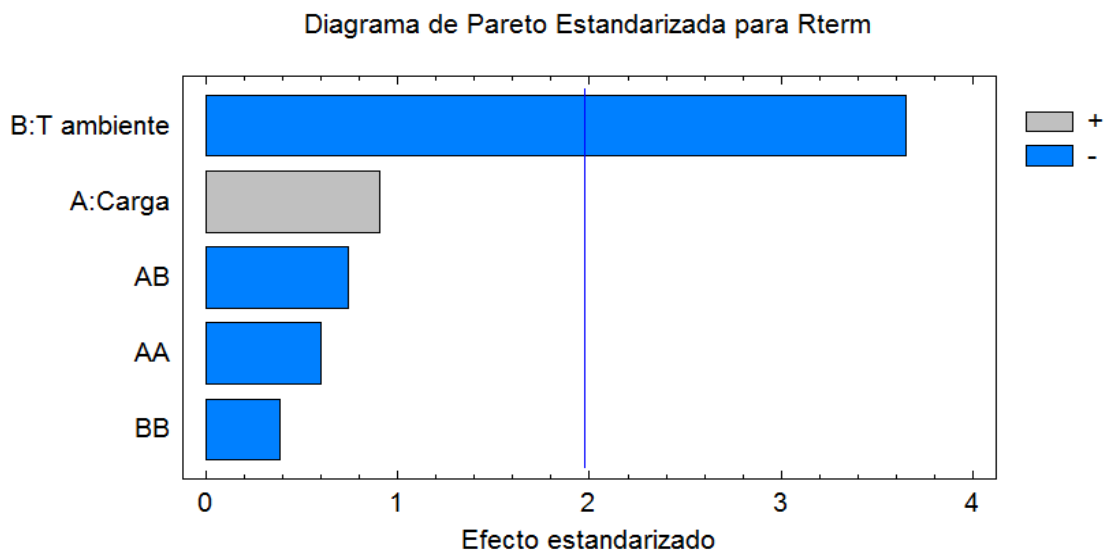
Análisis de Varianza para Rterm					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Carga+bloque	0,00110415	1	0,00110415	9,60	0,0023
B:T ambiente+bloque	0,00774813	1	0,00774813	67,39	0,0000
AA+bloque	0,000176515	1	0,000176515	1,54	0,2174
AB+bloque	0,000161887	1	0,000161887	1,41	0,2374
BB+bloque	0,0000739256	1	0,0000739256	0,64	0,4240
bloques	0,0725257	13	0,0055789	48,52	0,0000
Error total	0,0164414	143	0,000114975		
Total (corr.)	0,0974604	161			

R-cuadrada = 83,1302 por ciento
R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 82,5895 por ciento
Error estándar del est. = 0,0107226
Error absoluto medio = 0,00802622
Estadístico Durbin-Watson = 1,99379 (P=0,4843)
Autocorrelación residual de Lag 1 = 0,000762646

El estadístico R^2 indica que el modelo, explica el 83,1302% de la variabilidad de R_{term} . El estadístico R^2_{ajustada} es 82,5895%. El error estándar de estimación muestra que la desviación estándar de los residuos es 0,0107226. El error absoluto medio (MAE) de 0,00802622 es el valor promedio de los residuos.

Si se atiende a los p-valor y la razón-F se aprecia que la única variable estadísticamente significativa a la hora de explicar la variabilidad de R_{term} es la temperatura ambiente. La carga no aparece como relevante. Si se hace el análisis prescindiendo de la organización por bloques el valor de R^2 desciende hasta un 8,7%. Esto es debido a la influencia de los bloques lo que indica que el tipo de sustancia y, por tanto, sus propiedades termofísicas (analizadas en la regresión lineal) son fundamentales para entender la transferencia de calor en un termosifón. Sin embargo, hay que hacer notar que si se prescinde de los bloques, el modelo no cambia, los efectos siguen siendo los mismos. El estudio se hace por tanto considerando la organización por bloques.

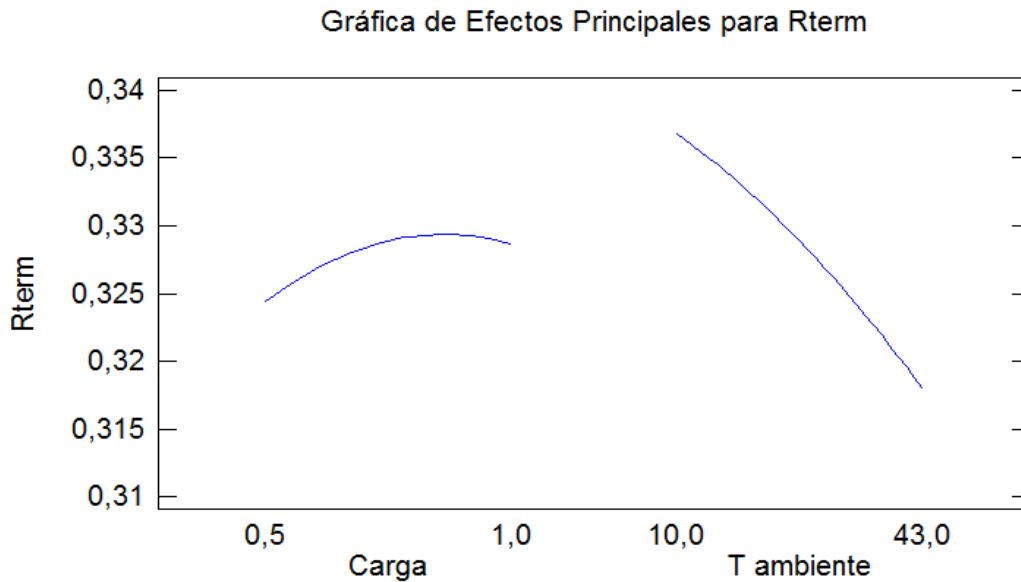
El gráfico de Pareto que se muestra a continuación señala que el efecto más importante (y el único realmente influyente) es la temperatura ambiente, T_{amb} , (B), pudiendo despreciarse los demás (A, AA, AB y BB). De todas formas se dejan en el modelo, ya que no se busca una fórmula que permita estimar con la mayor exactitud posible el valor de R_{term} . Lo que se pretende con esta modelización es conocer orientativamente para qué condiciones de carga y temperatura el termosifón trabaja de manera óptima.



Gráfica A VII.67: Gráfico de Pareto.

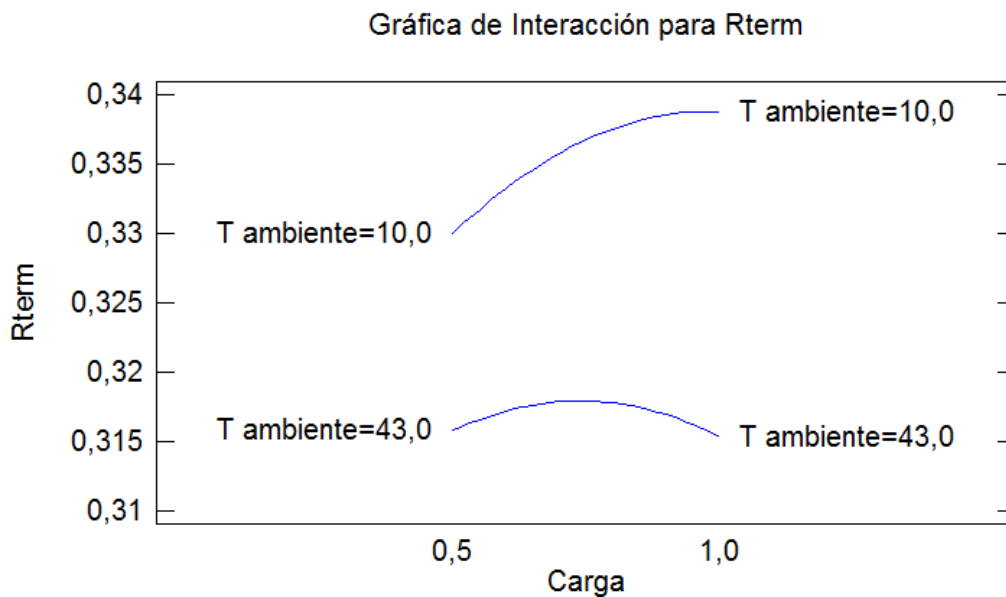
En la siguiente gráfica se muestra cómo varía R_{term} al variar los efectos principales de forma individual (*Carga* y T_{amb}). Esto es, refleja cómo varía R_{term} con la variación de la *Carga* si T_{amb} se mantiene constante y viceversa.

Puede apreciarse que la curva de variación de R_{term} con la *Carga* no presenta una tendencia clara, parece que R_{term} aumenta inicialmente con la *Carga* pero finalmente se estabiliza e incluso disminuye cuando la *Carga* toma el valor 1. Por el contrario, la curva que relaciona R_{term} con la temperatura ambiente (T_{amb}) muestra claramente que al aumentar esta última, disminuye la resistencia a la transferencia de calor.



Gráfica A VII.68: Gráfica de efectos principales.

La gráfica de interacción que puede verse a continuación, analiza cómo varía R_{term} al variar conjuntamente ambos efectos.



Gráfica A VII.69: Gráfica de interacción.

Para la temperatura más baja, 10°C, al aumentar la carga aumenta también la resistencia térmica. Sin embargo, el efecto de la carga, se disipa conforme la temperatura ambiente se hace mayor, por lo que para 43°C, donde la resistencia térmica es notablemente menor que para 10°C, el nivel de carga apenas influya. Esto apoya los resultados anteriores que permiten afirmar que el único factor a tener en cuenta para explicar la variación de R_{term} es la T_{amb} .

d) Resultados

Tras haber realizado la validación del modelo y haber explicado sus características y las de las variables que lo constituyen, se presentan los resultados y su interpretación.

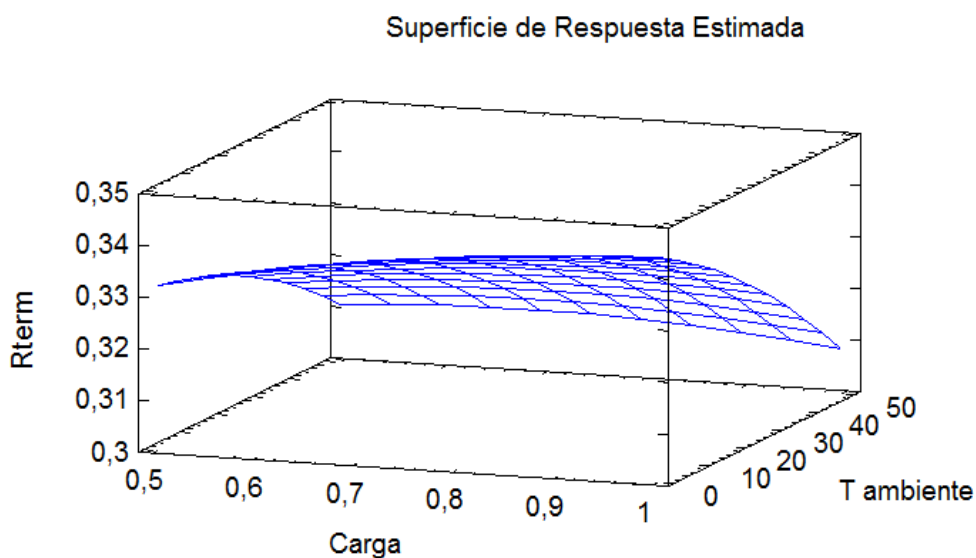
d.1. Ecuación de regresión

La ecuación resultante es:

$$R_{\text{term}} = 0,301258 + 0,0801394 \cdot \text{Carga} + 0,00015113 \cdot T_{\text{amb}} - 0,0379249 \cdot \text{Carga}^2 - 0,00056206 \cdot \text{Carga} \cdot T_{\text{amb}} - 0,00000566757 \cdot T_{\text{amb}}^2 \quad (\text{A VII.13})$$

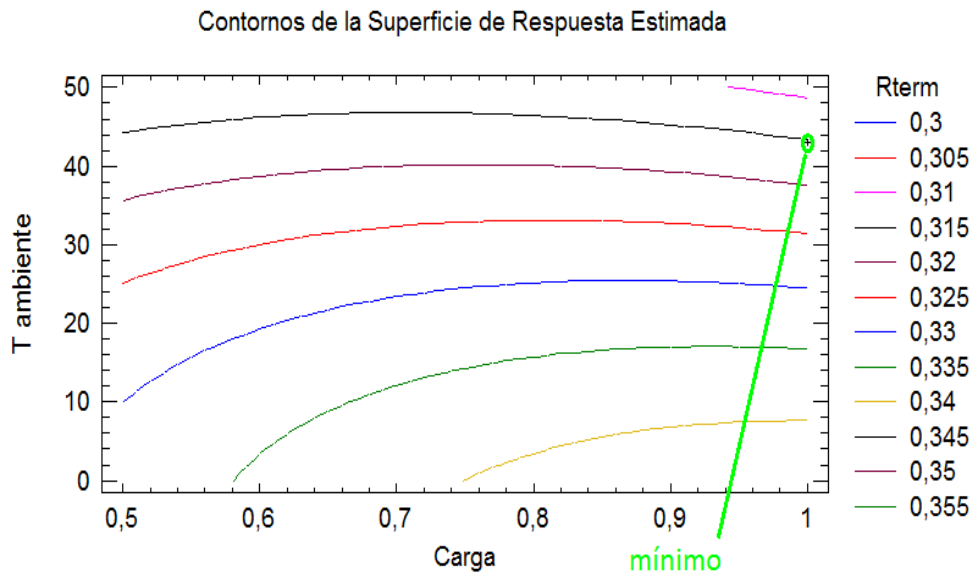
d.2. Superficie de respuesta

Muestra, en tres dimensiones, cómo es la variación estimada de R_{term} con la variación de las variables Carga y T_{amb} . Se trata de la representación gráfica de la ecuación de regresión. Esta superficie de respuesta es útil para visualizar el óptimo, en este caso el mínimo de R_{term} y el comportamiento del modelo.



Gráfica A VII.70: Gráfica de superficie de respuesta.

Otra gráfica que ayuda a comprender el comportamiento del modelo son los contornos de la superficie de respuesta. De hecho permite localizar, de forma más clara, los valores de las variables de entrada para los que se alcanza el valor óptimo.



Gráfica A VII.71: Gráfica de contornos de la superficie de respuesta.

Se aprecia que el mínimo valor de R_{term} tiene lugar para una *Carga* de 1 (carga alta) y una T_{amb} situada en los 43°C. A continuación se dan los resultados exactos de la optimización.

d.3. Resultado de la optimización

Las gráficas de la superficie de respuesta dan una orientación sobre donde se encuentra el óptimo. Sin embargo, Statgraphics calcula también el resultado exacto de dicha optimización; de esta forma se obtiene:

Tabla A VII.57: Resultado de la optimización.

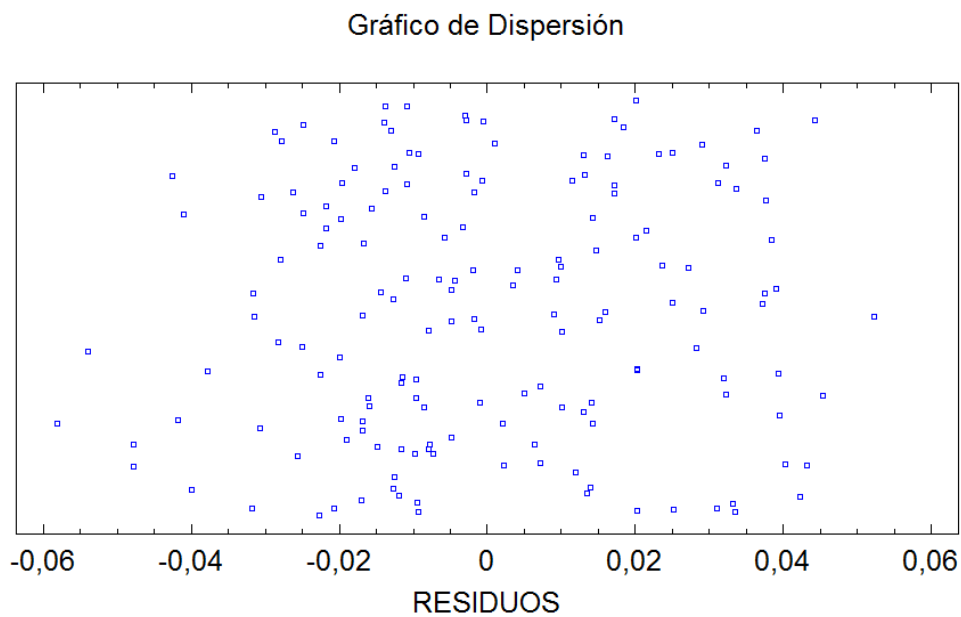
Optimizar Respuesta			
Meta: minimizar R_{term}			
Valor óptimo = 0,315323			
Factor	Bajo	Alto	Óptimo
Carga	0,5	1,0	1,0
T ambiente	10,0	43,0	43,0

Como se puede apreciar, el valor óptimo para R_{term} es 0,315 y se alcanza para un valor de $Carga = 1$ (carga alta) y una $T_{\text{amb}} = 43$ °C.

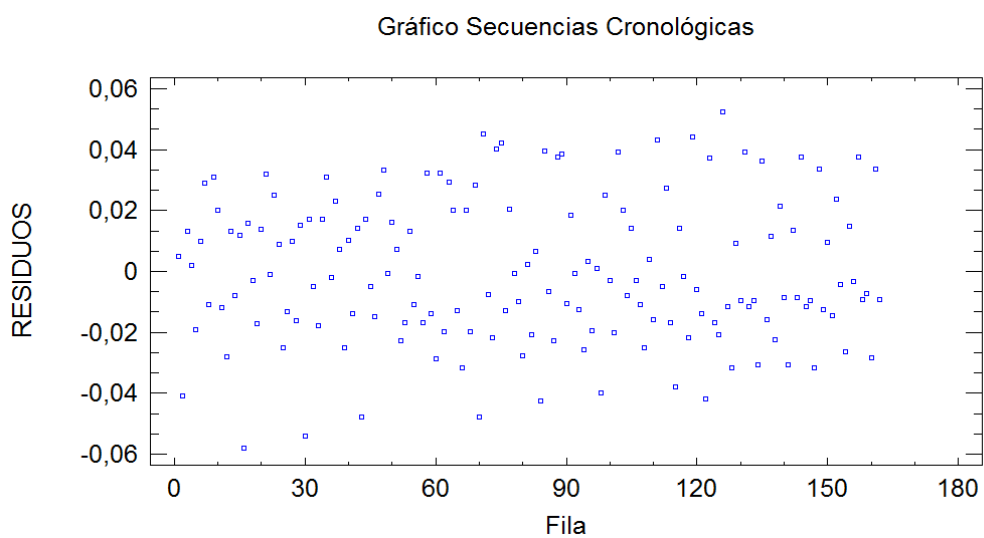
e) Diagnóstico del modelo

De la misma forma que se hizo para la regresión lineal múltiple, hay que realizar un estudio de los residuos para terminar de confirmar que el modelo es adecuado.

a) Gráficos de dispersión.



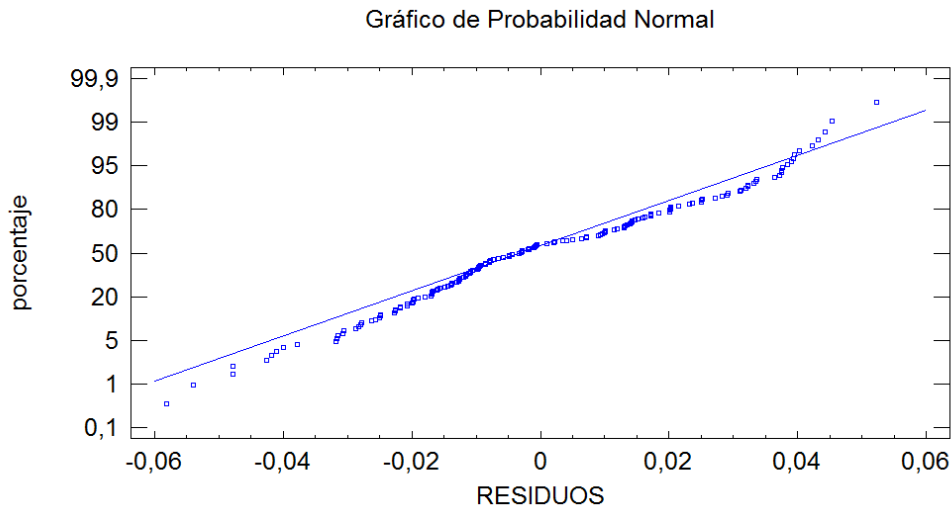
Gráfica A VII.72: Gráfica de dispersión.



Gráfica A VII.73: Gráfica de secuencias cronológicas.

No hay tendencias ni agrupaciones especiales; los residuos son aleatorios, no les influye el orden en que se han introducido los datos. Esto último también se puede determinar observando el valor del estadístico Durbin-Watson = 1,99379 que al estar próximo a 2, véase la tabla 7.56, confirma la interpretación hecha para el gráfico.

b) Percentiles de la distribución normal –QQ-norms.



Gráfica A VII.74: Gráfica de distribución normal.

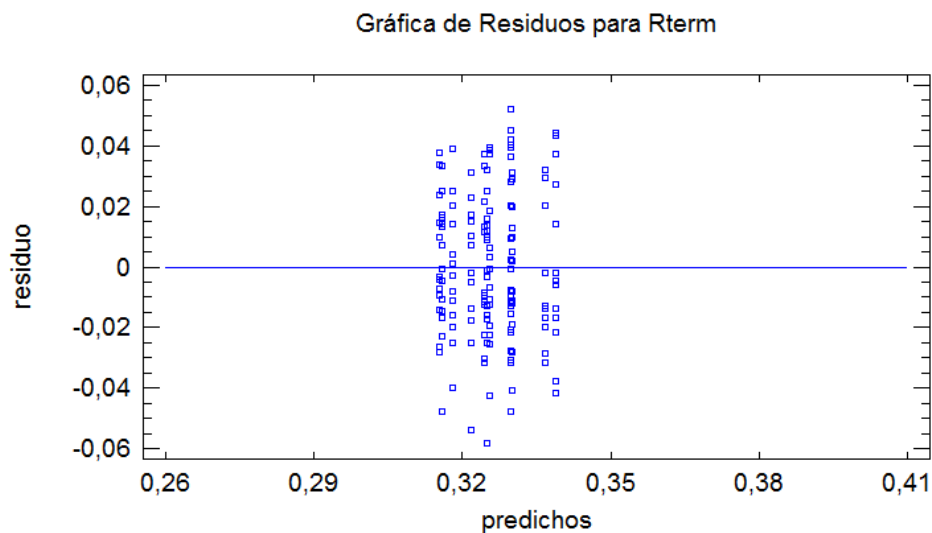
Los residuos parecen ajustarse bastante bien a la distribución normal. Esto lo corroboran los valores que arrojan el sesgo estandarizado y la curtosis; ambos están en el rango (-2,2).

Tabla A VII.58: Validación del modelo de distribución normal.

Sesgo Estandarizado	0,421596
Curtosis Estandarizada	-1,58383

c) Gráficos de los residuales frente a los valores ajustados.

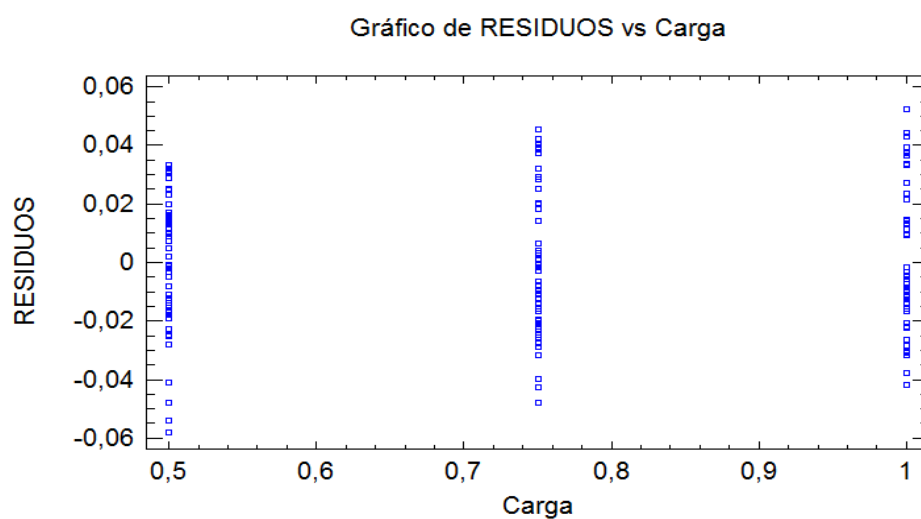
No se aprecian agrupaciones de datos ni una tendencia concreta que revele heterocedasticidad (varianza no constante). No se observan tampoco puntos anómalos.



Gráfica A VII.75: Gráfica de residuos frente a valores predichos

d) Gráficos de los residuales frente a factores principales.

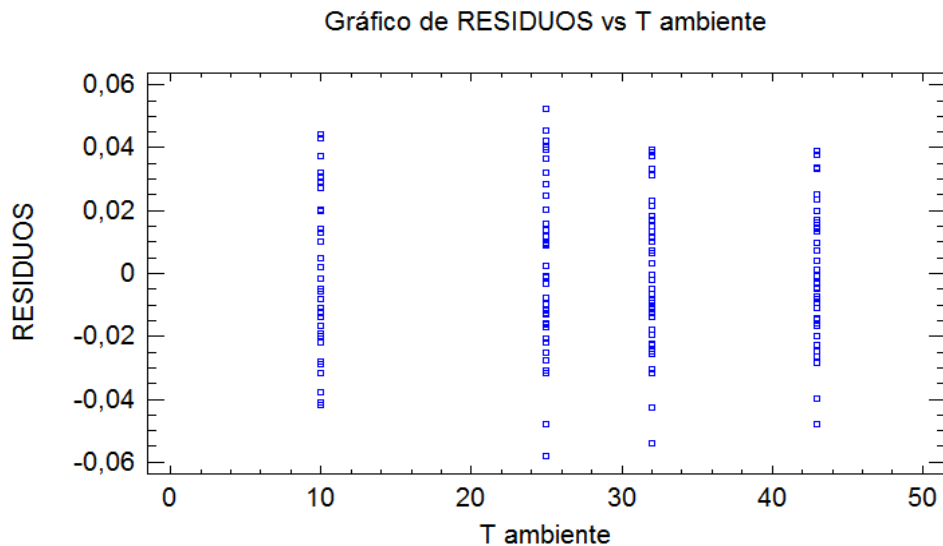
d.1.) Residuales frente a *Carga*.



Gráfica A VII.76: Gráfica de residuos frente al nivel de carga.

d.2.) Residuales frente a T_{amb} .

No se observan puntos con residuos especialmente elevados ni una tendencia clara que desmienta la aleatoriedad de su distribución.



Gráfica A VII.77: Gráfica de residuos frente a la temperatura ambiente.

La conclusión final de este estudio sería que el único factor externo a la sustancia que influye en la transferencia de calor, y por tanto en el valor de la resistencia térmica, es la temperatura ambiente expresada en la variable T_{amb} . La variable *Carga* (coeficiente de llenado del termosifón) no presenta una influencia clara sobre la variable dependiente y parece no repercutir sobre la transferencia de calor.

A VII.3.3. Estudio de superficie de respuesta para termosifón de acero grande

a) Datos estudiados

- Variable dependiente: R_{term} (resistencia térmica).
- Variables independientes:

a) Nivel de carga (*Carga*): presenta tres niveles.

Bajo (40 %) Medio (60 %) Alto (75 %).

Hay que tomar una escala numérica para que el método de superficie de respuesta pueda realizarse. La escala escogida es la que se muestra a continuación.

Tabla A VII.59: Escala de categorización de la variable Carga.

Bajo	Medio	Alto
0,5	0,75	1

b) Temperatura ambiente (T_{amb}): presenta cuatro niveles.

10 °C 25 °C 32 °C 43 °C

En total son: 2 variables independientes + 1 variable dependiente.

Se tienen también 8 bloques, uno por cada sustancia ensayada en este termosifón, y a cada bloque le corresponden 12 observaciones (4 temperaturas para cada uno de los tres niveles de carga). Hay que hacer notar que para la mezcla azeotrópica Ciclopentano + Metanol hubo que descartar algunos datos que daban valores poco fiables y, por tanto, en vez de tener las 96 observaciones que debieran ser, se ha trabajado con 92.

Tabla A VII.60: Bloques planteados para el estudio de superficie de respuesta.

Bloque	Sustancia
1	Agua
2	Dietil éter
3	Isopentano
4	N-Hexano
5	Perfluoroheptano
6	R-141b
7	R-365mfc
8	Ciclopentano + Metanol

Las tablas no se convierten a escala logarítmica. Se va a trabajar con una expresión polinómica para construir la superficie de respuesta, por tanto se emplearán los datos originales sin modificar.

b) Análisis de correlaciones.

No se han detectado correlaciones relevantes entre las variables explicativas, por lo que la interpretación de los estadísticos del modelo podrá hacerse sin dificultad.

Tabla A VII.61: Matriz de correlación para los efectos estimados.

		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
(1)	promedio	1,0000	-0,0039	-0,0913	-0,6598	0,0098	-0,5715	-0,0286
(2)	A:Carga+bloque	-0,0039	1,0000	0,0467	-0,0806	-0,1285	-0,0018	0,0472
(3)	B:Tamb+bloque	-0,0913	0,0467	1,0000	0,0103	-0,1131	0,0115	0,0315
(4)	AA+bloque	-0,6598	-0,0806	0,0103	1,0000	0,0052	0,0028	-0,0143
(5)	AB+bloque	0,0098	-0,1285	-0,1131	0,0052	1,0000	0,0053	-0,0096
(6)	BB+bloque	-0,5715	-0,0018	0,0115	0,0028	0,0053	1,0000	0,0236
(7)	bloque	-0,0286	0,0472	0,0315	-0,0143	-0,0096	0,0236	1,0000

c) Validación del modelo

A continuación se muestra la salida de Statgraphics.

Tabla A VII.62: Validación del modelo de superficie de respuesta.

Análisis de Varianza para Rterm					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Carga+bloque	0,000369005	1	0,000369005	59,57	0,0000
B:Tamb+bloque	0,000443983	1	0,000443983	71,68	0,0000
AA+bloque	0,000055864	1	0,000055864	9,02	0,0036
AB+bloque	1,34539E-10	1	1,34539E-10	0,00	0,9963
BB+bloque	0,0000153812	1	0,0000153812	2,48	0,1193
bloques	0,001937	7	0,000276715	44,67	0,0000
Error total	0,00046455	75	0,00000619401		
Total (corr.)	0,00371408	87			

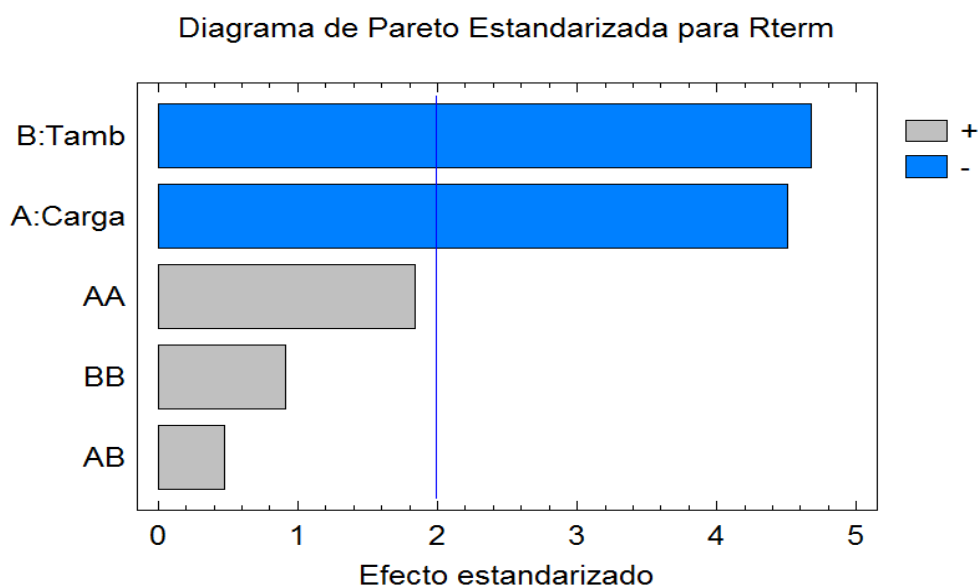
R-cuadrada = 87,4922 por ciento
R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 86,7295 por ciento
Error estándar del est. = 0,00248878
Error absoluto medio = 0,00185158
Estadístico Durbin-Watson = 1,9418 (P=0,2391)
Autocorrelación residual de Lag 1 = 0,00444289

El estadístico R^2 indica que el modelo, así ajustado, explica el 87,8922 % de la variabilidad de R_{term} . El estadístico $R^2_{ajustada}$ es 86,7295 %. El error estándar de estimación muestra que la desviación estándar de los residuos es 0,00248878. El error absoluto medio (MAE) de 0,00185158 es el valor promedio de los residuos.

Si se atiende a los p-valor y la razón-F se aprecia que las únicas variables estadísticamente significativas a la hora de explicar la variabilidad de R_{term} son la temperatura ambiente (T_{amb}) y la carga ($Carga$), no teniendo gran relevancia sus productos cruzados salvo, tal vez, el cuadrado de la carga (indicado en la tabla de análisis de varianza como AA)

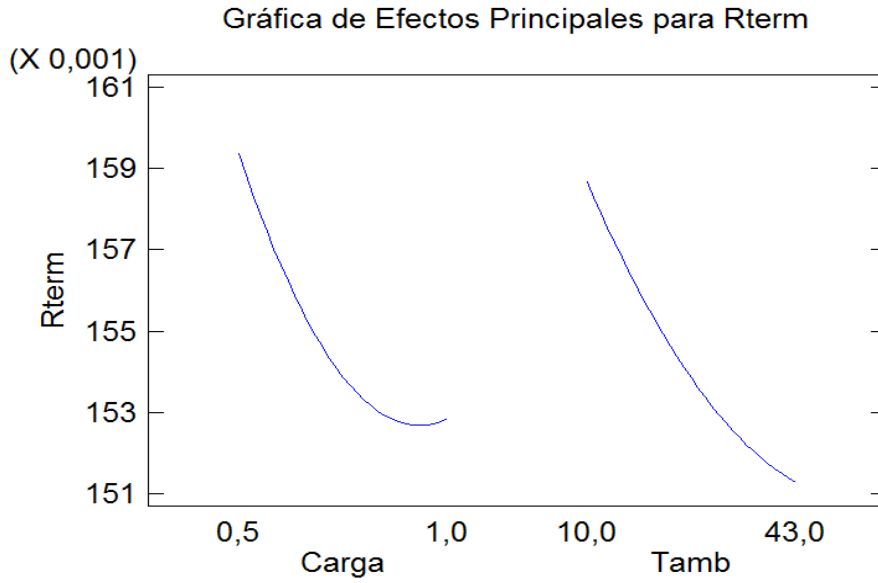
Si se hace el análisis prescindiendo de la organización por bloques el valor de R^2 desciende hasta un 35,34 %. Esto es debido a la influencia de los bloques, lo que indica que el tipo de sustancia y, por tanto, sus propiedades termofísicas (analizadas en la regresión lineal) son fundamentales para entender la transferencia de calor en un termosifón. Sin embargo, hay que hacer notar que si se prescinde de los bloques, el modelo no cambia, los efectos siguen siendo los mismos. El estudio se hace, por tanto, considerando la organización por bloques.

El gráfico de Pareto que se muestra a continuación corrobora el análisis realizado anteriormente. Los efectos más importantes sobre la resistencia térmica, R_{term} , corresponden a la T_{amb} y a la $Carga$, pudiendo despreciarse los productos cruzados entre ambas variables (AA, AB y BB). De todas formas se dejan en el modelo, ya que no se busca una fórmula que permita estimar con la mayor exactitud posible el valor de R_{term} . Lo que se pretende con esta modelización es conocer orientativamente para qué condiciones de carga y temperatura el termosifón trabaja de manera óptima.



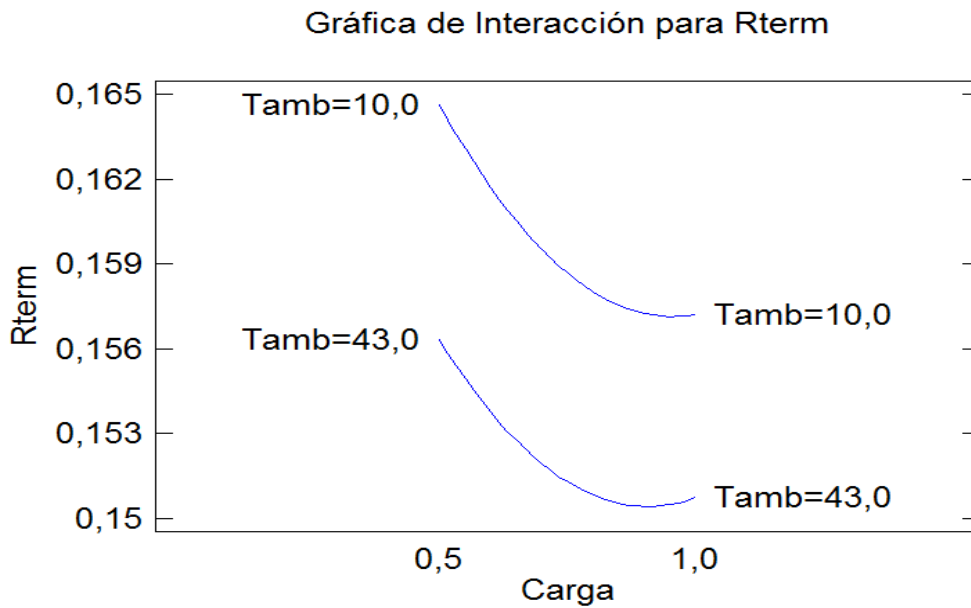
Gráfica A VII.78: Gráfico de Pareto.

En la gráfica A VII.79 se muestra cómo varía R_{term} al variar los efectos principales de forma individual ($Carga$ y T_{amb}). Esto es, refleja cómo varía R_{term} con la variación de la $Carga$ si T_{amb} se mantiene constante y viceversa.



Gráfica A VII.79: Gráfica de efectos principales.

Pueden apreciarse claramente las tendencias. Éstas estarían indicando que R_{term} es, en la práctica, inversamente proporcional tanto al nivel de carga como a la variación de la temperatura ambiente. Dicho de otra forma, conforme aumenta el nivel de carga y aumenta la temperatura ambiente se mejora notablemente la transferencia de calor (disminuye el valor de R_{term}).



Gráfica A VII.80: Gráfica de interacción.

La gráfica A VII.80 analiza cómo varía R_{term} al variar conjuntamente ambos efectos. Como cabía esperar, la resistencia térmica disminuye con el aumento de temperatura, la curva de 10°C se sitúa más arriba que la de 43°C, y también con el aumento del nivel de carga; las curvas “isotermas” son descendentes.

d) Resultados

Tras haber realizado la validación del modelo y haber explicado sus características y las de las variables que lo constituyen, se presentan los resultados y su interpretación.

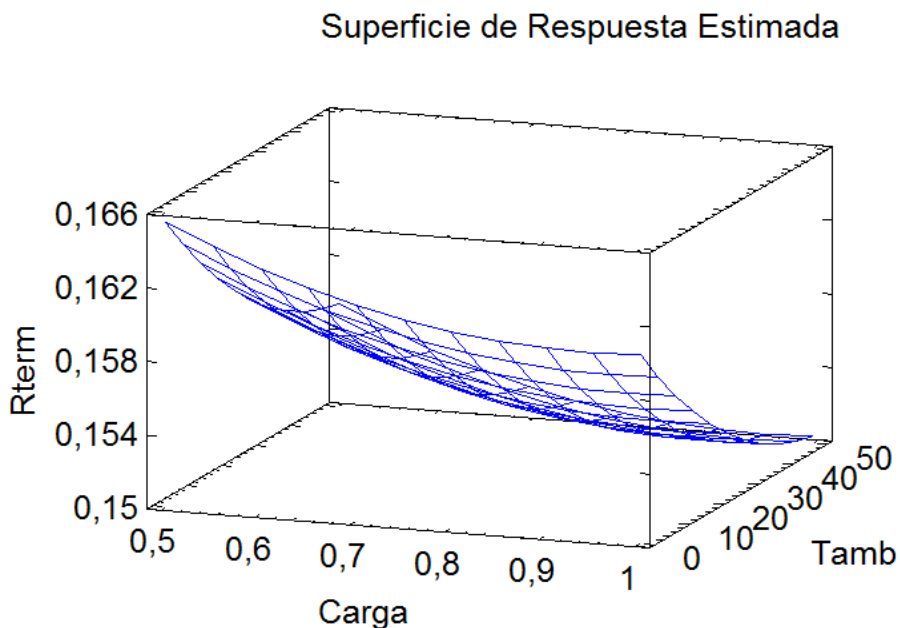
d.1. Ecuación de regresión.

La ecuación resultante es:

$$R_{\text{term}} = 0,184266 - 0,0511645 \cdot \text{Carga} - 0,00036197 \cdot T_{\text{amb}} + 0,0271621 \cdot \text{Carga}^2 - 5,08704 \cdot 10^{-7} \cdot \text{Carga} \cdot T_{\text{amb}} + 0,00000329442 \cdot T_{\text{amb}}^2 \quad (\text{A VII.14})$$

d.2. Superficie de respuesta.

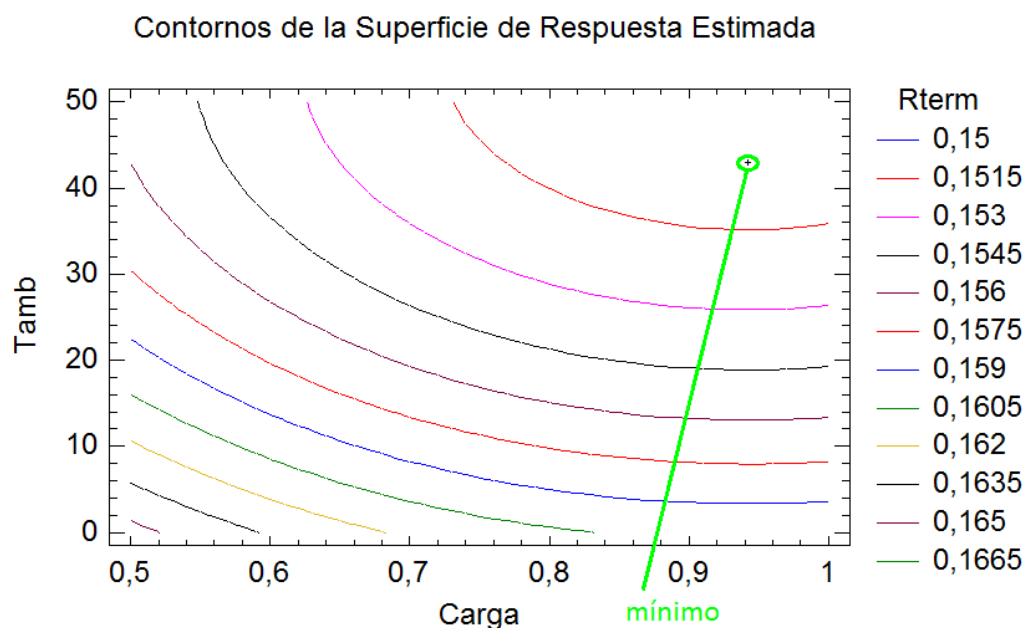
Muestra, en tres dimensiones, cómo es la variación estimada de R_{term} con la variación de las variables Carga y T_{amb} . Se trata de la representación gráfica de la ecuación de regresión.



Gráfica A VII.81: Gráfica de superficie de respuesta.

Esta superficie de respuesta es útil para visualizar el óptimo (en este caso el mínimo de R_{term}) y el comportamiento del modelo.

Otra gráfica que ayuda a comprender el comportamiento del modelo son los contornos de la superficie de respuesta. De hecho permite localizar, de forma más clara, los valores de las variables de entrada para los que se alcanza el valor óptimo.



Gráfica A VII.82: Gráfica de contornos de la superficie de respuesta.

Se aprecia que el mínimo valor de R_{term} tiene lugar para una *Carga* de 1 (carga alta) y una T_{amb} situada en 43°C (máxima temperatura ambiente contemplada en la experimentación). A continuación se dan los resultados exactos de la optimización.

d.3. Resultado de la optimización

Las gráficas de la superficie de respuesta dan una orientación acerca de dónde se encuentra el óptimo. Sin embargo, Statgraphics halla también el resultado exacto de dicha optimización; de esta forma se obtiene la tabla A VII.63.

Como se puede apreciar en la tabla siguiente el valor óptimo para R_{term} es 0,15, y se alcanza para un valor de $Carga = 0,94$ (carga muy próxima a la alta) y una $T_{\text{amb}} = 43$ °C.

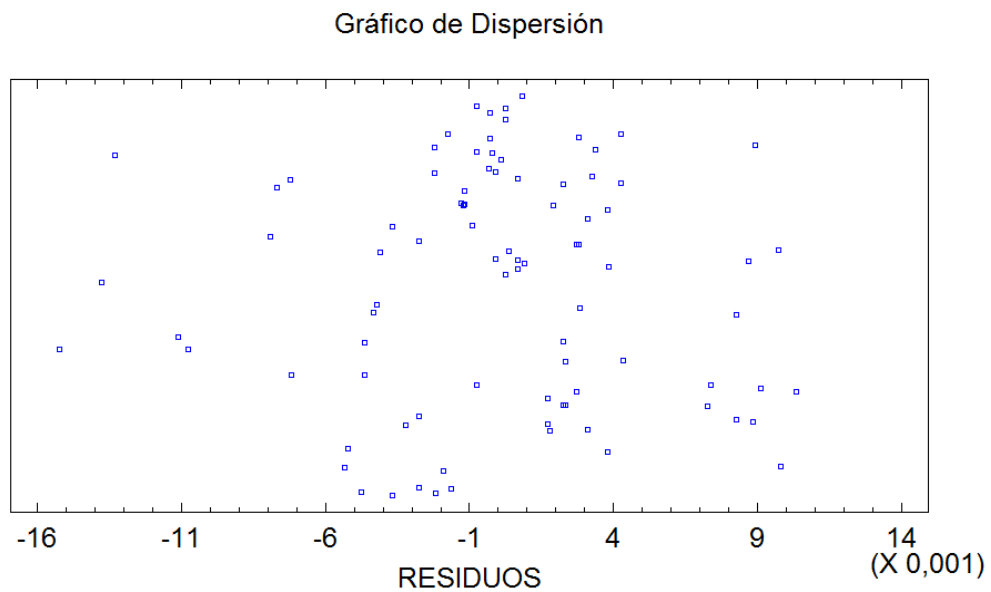
Tabla A VII.63: Resultado de la optimización

Optimizar Respuesta			
Meta: minimizar Rterm			
Valor óptimo = 0,150677			
<i>Factor</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	<i>Óptimo</i>
Carga	0,5	1,0	0,942329
Tamb	10,0	43,0	43,0

e) Diagnósis del modelo

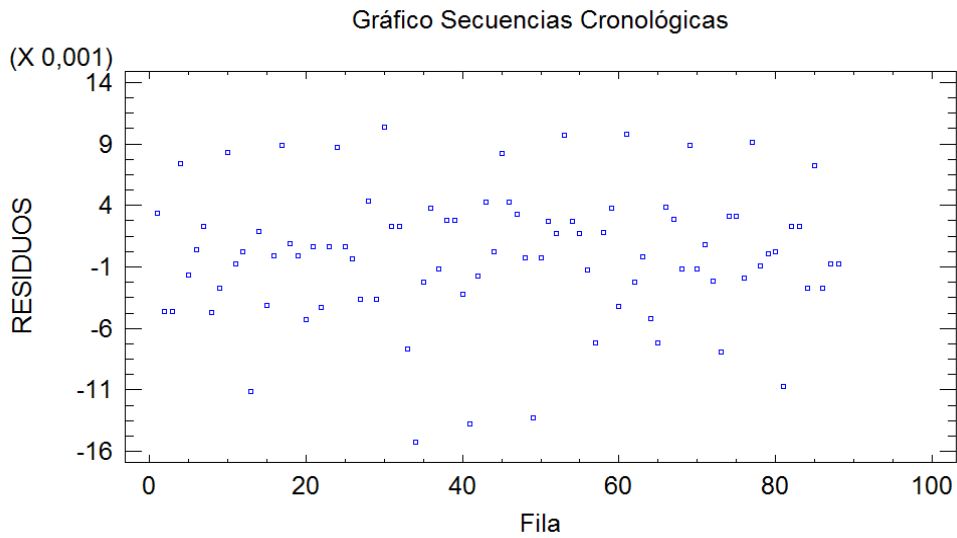
Se realiza un estudio de los residuos para terminar de confirmar que el modelo es adecuado.

a) Gráficos de dispersión.



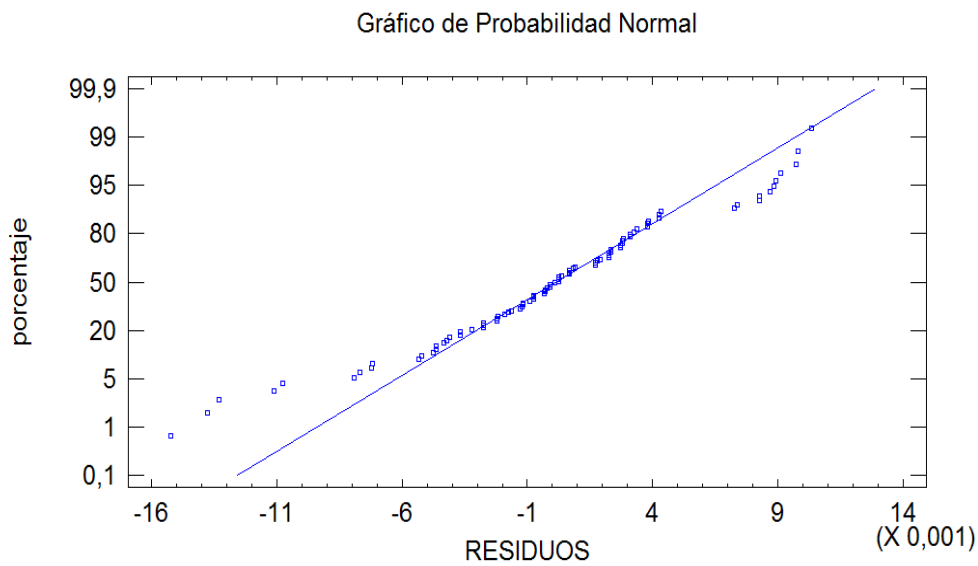
Gráfica A VII.83: Gráfico de dispersión.

No hay tendencias ni agrupaciones especiales; los residuos son aleatorios, no les influye el orden en que se han introducido los datos. Esto último también se puede saber observando el valor del estadístico Durbin-Watson = 1,9418 (tabla A VII.62) que al estar próximo a 2 confirma la interpretación hecha para el gráfico.



Gráfica A VII.84: Gráfico de secuencias cronológicas.

b) Percentiles de la distribución normal –QQ-norms.



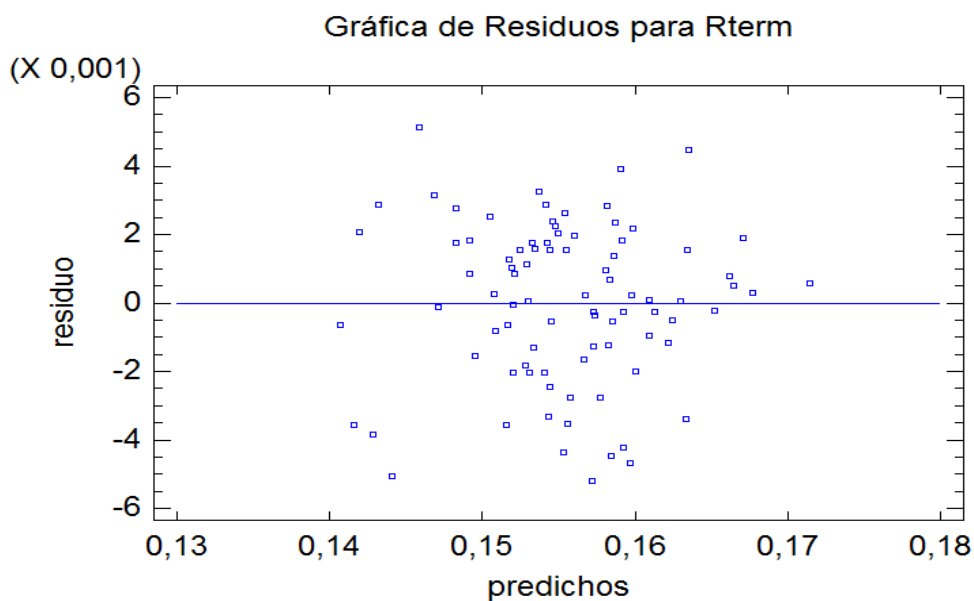
Gráfica A VII.85: Gráfico de probabilidad normal.

Los residuos parecen ajustarse bastante bien a la distribución normal. Esto lo corroboran los valores que arrojan el sesgo estandarizado y la curtosis; ambos están dentro del rango (-2,2).

Tabla A VII.64: Validación del modelo de distribución normal.

Sesgo Estandarizado	-1,6869
Curtosis Estandarizada	1,42247

c) Gráficos de los residuales frente a los valores ajustados.

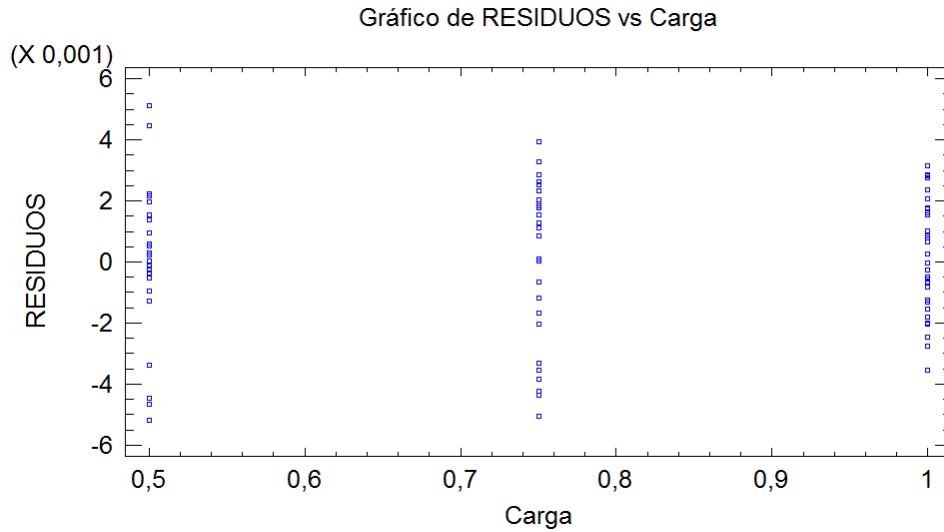


Gráfica A VII.86: Gráfica de residuos frente a valores predichos

No se aprecian agrupaciones de datos ni una tendencia concreta que revele heterocedasticidad (varianza no constante). No se observan tampoco puntos anómalos.

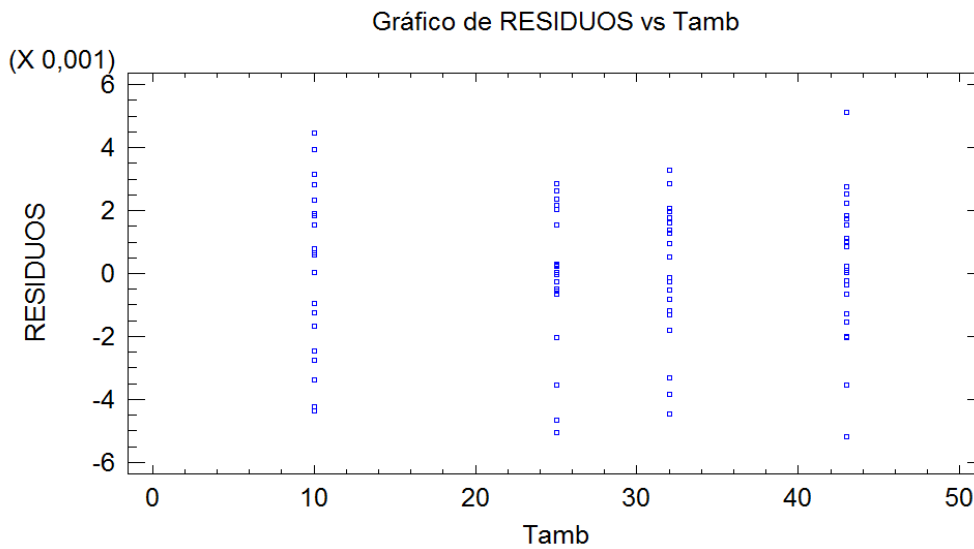
d) Gráficos de los residuales frente a factores principales.

d.1.) Residuales frente a *Carga*.



Gráfica A VII.87: Gráfico de residuos frente al nivel de carga.

d.2.) Residuales frente a T_{amb} .



Gráfica A VII.88: Gráfico de residuos frente a la temperatura ambiente.

No se observan puntos con residuos especialmente elevados ni una tendencia clara que desmienta la aleatoriedad de su distribución.

La conclusión final de este estudio sería que para el termosifón de acero grande sí que son influyentes las variables $Carga$ y T_{amb} . Aun así hay que tener presente la gran importancia que

presenta la organización por bloques, y en consecuencia el tipo de sustancia, en el poder explicativo sobre la resistencia térmica: prescindiendo de los bloques R^2 disminuye desde un valor del 87,5% (con bloques) hasta el 35,3%.

A VII.3.4. Estudio de superficie de respuesta para termosifón prismático de aluminio sin control de potencia (SCP)

a) Datos estudiados

Variable dependiente: R_{term} (resistencia térmica)

Variables independientes:

a) Nivel de carga (*Carga*): presenta tres niveles.

Bajo (13 %) Medio (19 %) Alto (28 %).

Hay que tomar una escala numérica para que el método de superficie de respuesta pueda realizarse. La escala escogida es la que se muestra a continuación.

Tabla A VII.65: Escala de categorización de la variable Carga.

Bajo	Medio	Alto
0,5	0,75	1

b) Temperatura ambiente (T_{amb}): presenta cuatro niveles.

10 °C 25 °C 32 °C 43 °C

En total son: 2 variables independientes + 1 variable dependiente.

Se tienen también 9 bloques, uno por cada sustancia ensayada en este termosifón, y a cada bloque le corresponden 12 observaciones (4 temperaturas para cada uno de los tres niveles de carga)

Tabla A VII.66: Bloques planteados para el estudio de superficie de respuesta.

Bloque	Sustancia
1	Agua
2	Dietil éter
3	Isopentano
4	N-Pentano
5	Perfluoroheptano
6	R-141b
7	R-365mfc
8	Acetona + N-Pentano
9	Dietil éter + Metanoato de metilo

Las tablas no se convierten a escala logarítmica. Se va a trabajar con una expresión polinómica para construir la superficie de respuesta, por tanto se emplearán los datos originales sin modificar.

b) Análisis de correlaciones.

No se han detectado correlaciones relevantes entre las variables explicativas, por lo que la interpretación de los estadísticos del modelo podrá hacerse sin dificultad.

Tabla A VII.67: Matriz de correlación para los efectos estimados.

		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
(1)	promedio	1,0000	-0,0014	-0,0657	-0,7102	-0,0408	-0,5572	0,1237
(2)	A:Carga+bloque	-0,0014	1,0000	0,0712	-0,0071	-0,1264	-0,0020	0,0040
(3)	B:Tamb+bloque	-0,0657	0,0712	1,0000	-0,0048	-0,0206	0,0083	0,0208
(4)	AA+bloque	-0,7102	-0,0071	-0,0048	1,0000	0,0600	0,0674	-0,0970
(5)	AB+bloque	-0,0408	-0,1264	-0,0206	0,0600	1,0000	0,0743	-0,0363
(6)	BB+bloque	-0,5572	-0,0020	0,0083	0,0674	0,0743	1,0000	-0,0904
(7)	bloque	0,1237	0,0040	0,0208	-0,0970	-0,0363	-0,0904	1,0000

c) Validación del modelo

A continuación se muestra la salida de Statgraphics.

Tabla A VII.68: Validación del modelo de superficie de respuesta

Análisis de Varianza para Rterm					
<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A:Carga+bloque	0,0339674	1	0,0339674	26,29	0,0000
B:Tamb+bloque	0,0381097	1	0,0381097	29,50	0,0000
AA+bloque	0,000980025	1	0,000980025	0,76	0,3860
AB+bloque	0,00102391	1	0,00102391	0,79	0,3756
BB+bloque	0,00075044	1	0,00075044	0,58	0,4478
bloques	0,741854	9	0,0824282	63,80	0,0000
Error total	0,124029	96	0,00129197		
Total (corr.)	0,95891	110			

R-cuadrada = 87,0656 por ciento
R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 86,4497 por ciento
Error estándar del est. = 0,035944
Error absoluto medio = 0,0281843
Estadístico Durbin-Watson = 2,2894 (P=0,9360)
Autocorrelación residual de Lag 1 = -0,152763

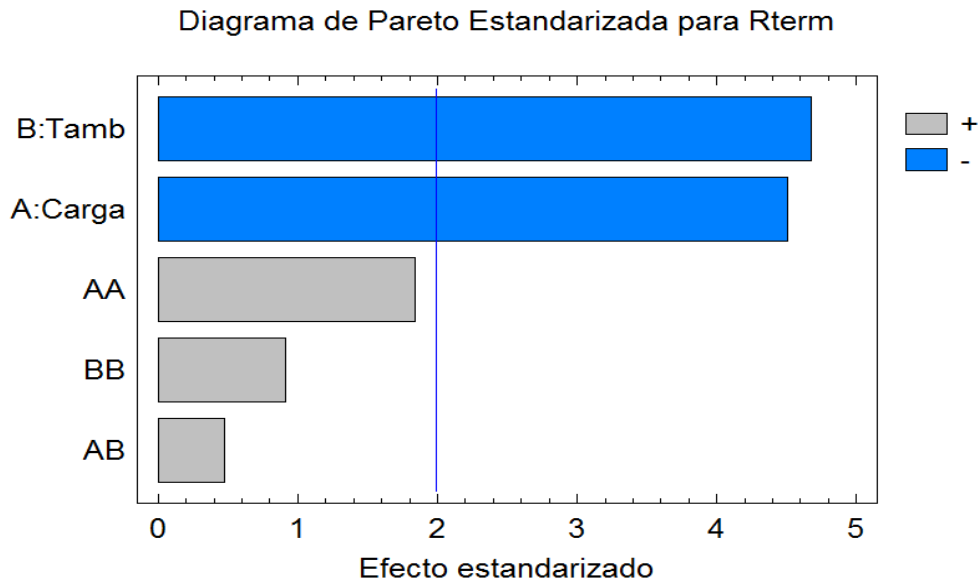
El estadístico R^2 indica que el modelo, explica el 87,0656 % de la variabilidad de R_{term} . El estadístico $R^2_{ajustada}$ es 86,4497 %. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 0,035944. El error absoluto medio (MAE) de 0,02818437 es el valor promedio de los residuos.

Si se atiende a los p-valor y la razón-F se aprecia que las únicas variables estadísticamente significativas a la hora de explicar la variabilidad de R_{term} son la temperatura ambiente (T_{amb}) y la carga (*Carga*), no teniendo gran relevancia sus productos cruzados.

Si se hace el análisis prescindiendo de la organización por bloques el valor de R^2 desciende hasta un 9,7 %. Esto es debido a la influencia de los bloques, lo que indica que el tipo de sustancia y, por tanto, sus propiedades termofísicas (analizadas en la regresión lineal) son fundamentales para entender la transferencia de calor en un termosifón. Sin embargo, hay que hacer notar que si se prescinde de los bloques, el modelo no cambia, los efectos siguen siendo los mismos. El estudio se hace por tanto considerando la organización por bloques.

El gráfico de Pareto que se muestra a continuación corrobora el análisis realizado anteriormente. Los efectos más importantes sobre la resistencia térmica, R_{term} , corresponden a la T_{amb} y a la *Carga*, pudiendo despreciarse los productos cruzados entre ambas variables (AA, AB y BB). De todas formas se dejan en el modelo, ya que no se busca una fórmula que permita estimar con la mayor exactitud posible el valor de R_{term} . Lo que se pretende con esta

modelización es conocer orientativamente para qué condiciones de carga y temperatura el termosifón trabaja de manera óptima.

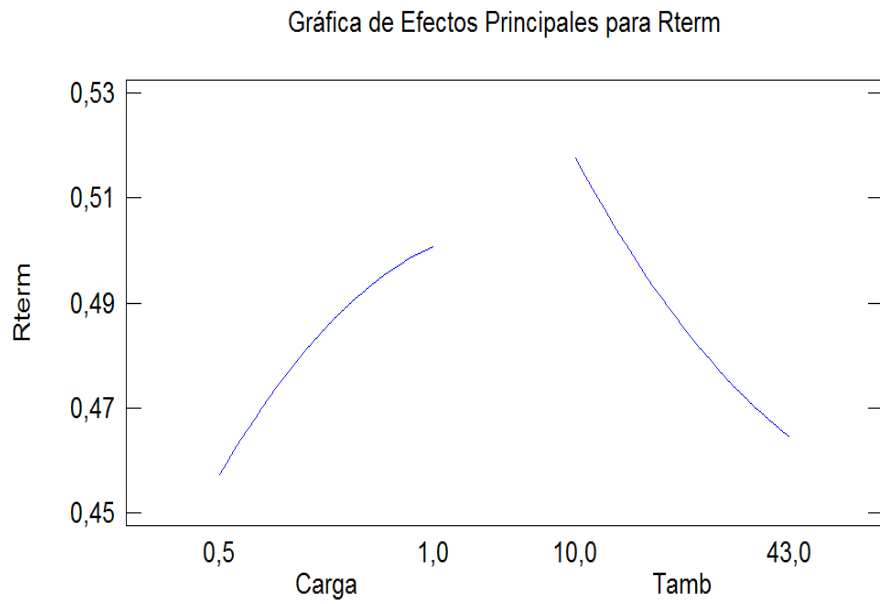


Gráfica A VII.89: Gráfico de Pareto.

En la gráfica A VII.90 se muestra cómo varía R_{term} al variar los efectos principales de forma individual (*Carga* y T_{amb}). Esto es, refleja cómo varía R_{term} con la variación de la *Carga* si T_{amb} se mantiene constante y viceversa.

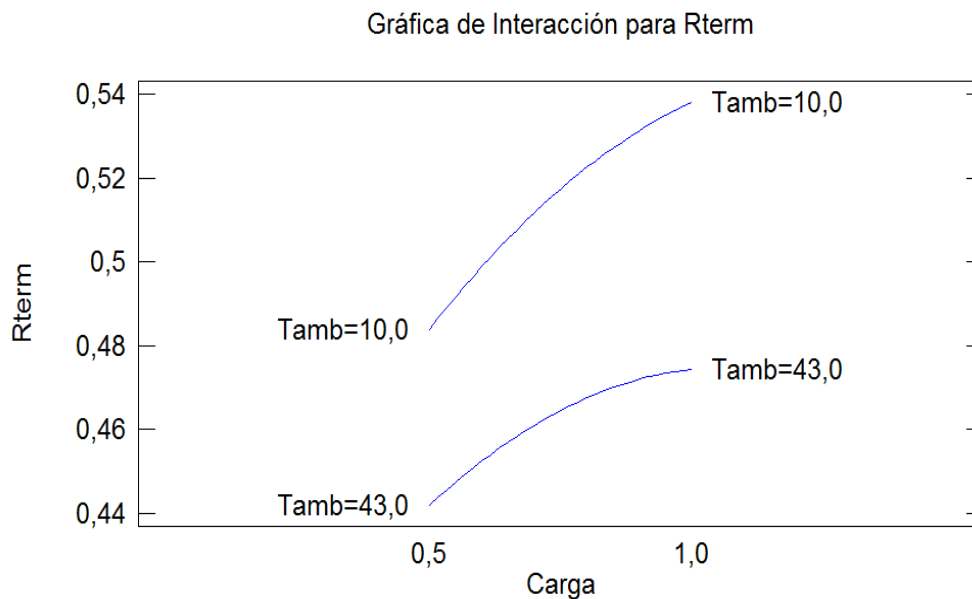
Pueden apreciarse claramente las tendencias. Éstas estarían indicando lo siguiente:

- R_{term} es directamente proporcional al nivel de carga: al aumentar el volumen de fluido en el interior del termosifón aumenta el valor de la resistencia térmica y empeora, en consecuencia, la transferencia de calor.
- R_{term} es inversamente proporcional a la temperatura ambiente: al aumentar ésta la resistencia térmica disminuye mejorando la transmisión de calor.



Gráfica A VII.90: Gráfica de efectos principales.

La gráfica de interacción que puede verse a continuación, analiza cómo varía R_{term} al variar conjuntamente ambos efectos.



Gráfica A VII.91: Gráfica de interacción.

Como cabía esperar, la resistencia térmica disminuye con el aumento de temperatura, la curva de 10 °C se sitúa más arriba que la de 43 °C, y aumenta con el nivel de carga; las curvas “isotermas” son ascendentes.

d) Resultados

Tras haber realizado la validación del modelo y haber explicado sus características y las de las variables que lo constituyen, se presentan los resultados y su interpretación.

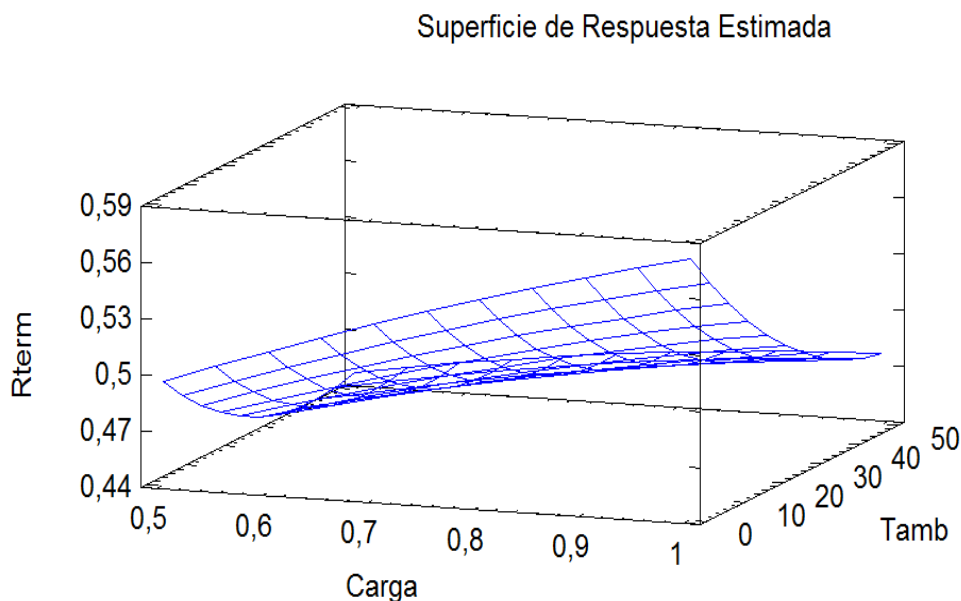
d.1. Ecuación de regresión

La ecuación resultante es:

$$R_{\text{term}} = 0,373585 + 0,280727 \cdot \text{Carga} - 0,00151717 \cdot T_{\text{amb}} - 0,0748591 \cdot \text{Carga}^2 - 0,00221088 \cdot \text{Carga} \cdot T_{\text{amb}} + 0,0000339839 \cdot T_{\text{amb}}^2 \quad (\text{A VII.15})$$

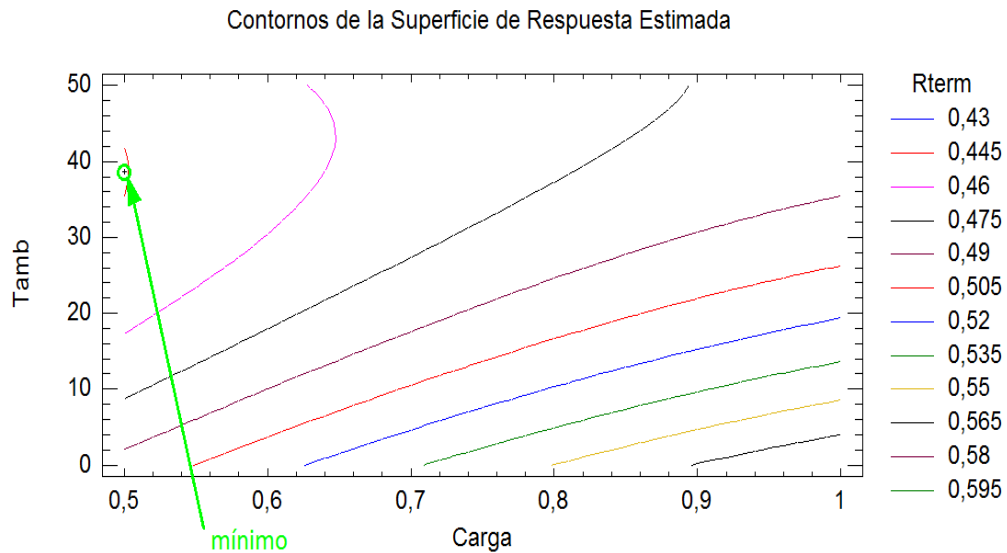
d.2. Superficie de respuesta

Muestra, en tres dimensiones, cómo es la variación (estimada) de R_{term} con la variación de las variables Carga y T_{amb} . Se trata de la representación gráfica de la ecuación de regresión. Esta superficie de respuesta es útil para visualizar el óptimo (en este caso el mínimo de R_{term}) y el comportamiento del modelo.



Gráfica A VII.92: Gráfica de superficie de respuesta.

Otra gráfica que ayuda a comprender el comportamiento del modelo son los contornos de la superficie de respuesta. De hecho permite localizar, de forma más clara, los valores de las variables de entrada para los que se alcanza el valor óptimo.



Gráfica A VII.93: Gráfica de contornos de la superficie de respuesta.

Se aprecia que el mínimo valor de R_{term} tiene lugar para una *Carga* de 0,5 (carga baja) y una T_{amb} situada en 43°C (máxima temperatura ambiente contemplada en la experimentación). A continuación se dan los resultados exactos de la optimización.

d.3. Resultado de la optimización

Las gráficas de la superficie de respuesta dan una orientación acerca de dónde se encuentra el óptimo. Sin embargo, Statgraphics saca también el resultado exacto de dicha optimización; de esta forma se obtiene:

Tabla A VII.69: Resultado de la optimización.

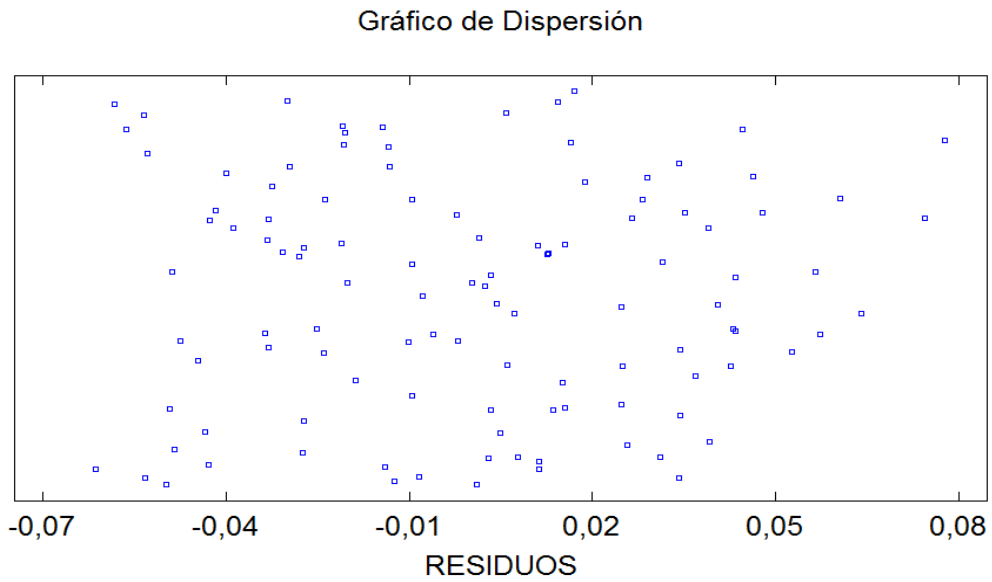
Optimizar Respuesta			
Meta: minimizar R_{term}			
Valor óptimo = 0,444636			
Factor	Bajo	Alto	Óptimo
Carga	0,5	1,0	0,5
Tamb	10,0	43,0	38,5979

Como se puede apreciar, el valor óptimo para R_{term} es 0,445, y se alcanza para un valor de $Carga = 0,5$ (carga baja) y una $T_{amb} = 38,6$ °C.

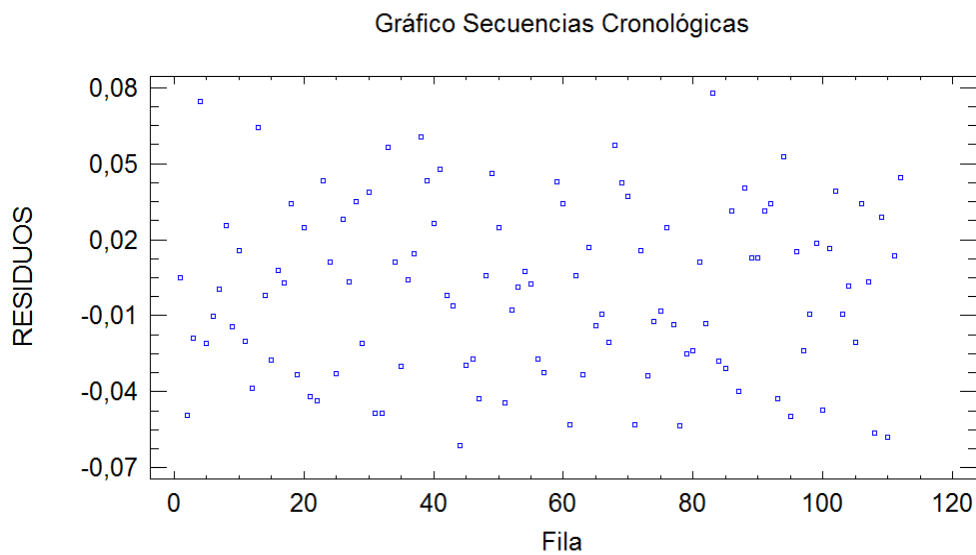
e) Diagnósis del modelo

Se realiza un estudio de los residuos para terminar de confirmar que el modelo es adecuado.

a) Gráficos de dispersión.



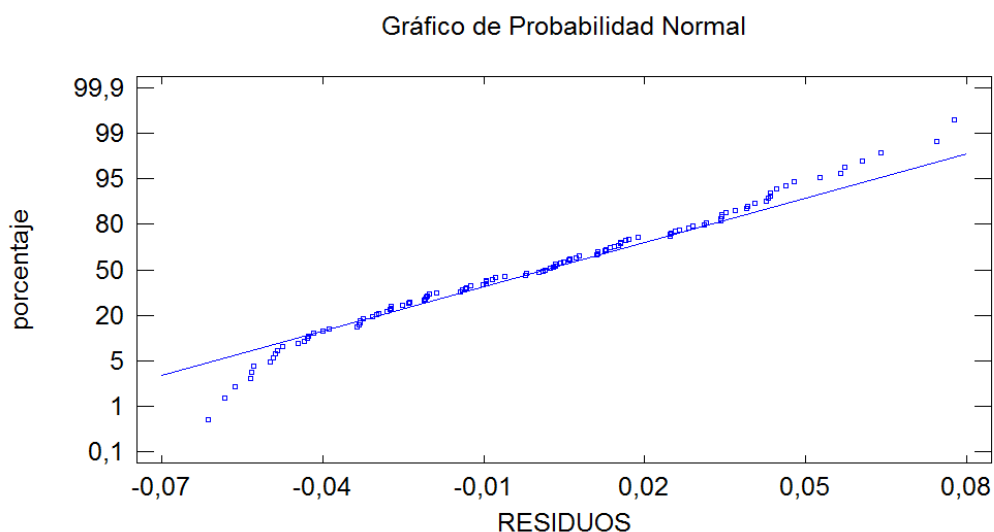
Gráfica A VII.94: Gráfico de dispersión.



Gráfica A VII.95: Gráfico de secuencias cronológicas.

No hay tendencias ni agrupaciones especiales; los residuos son aleatorios, no les influye el orden en que se han introducido los datos. Esto último también se puede saber observando el valor del estadístico Durbin-Watson = 2,2894 (tabla A VII.68) que al estar próximo a 2 confirma la interpretación hecha para el gráfico.

b) Percentiles de la distribución normal –QQ-norms.



Gráfica A VII.96: Gráfica de probabilidad normal

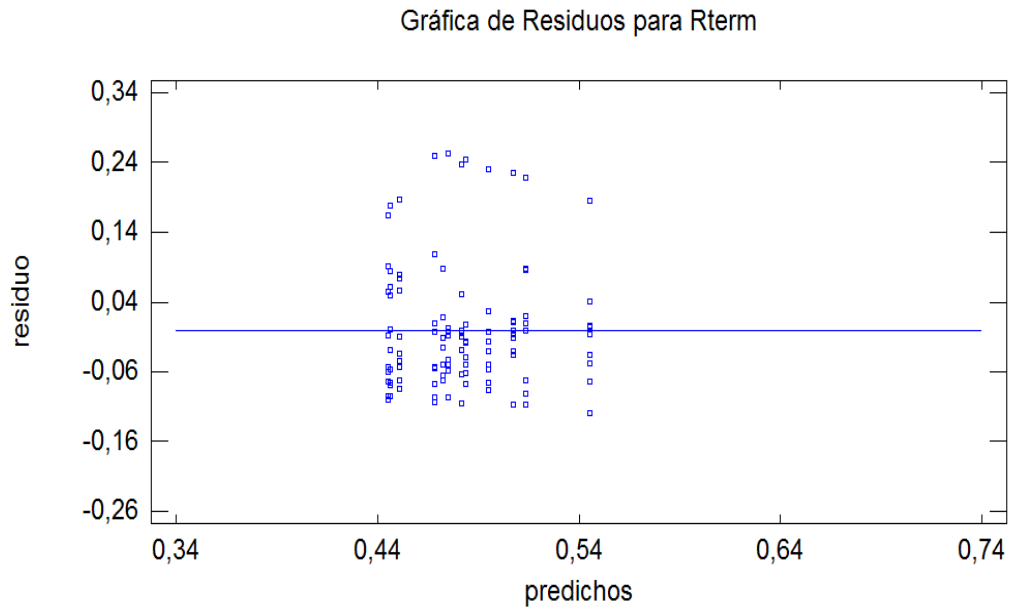
Los residuos parecen ajustarse bastante bien a la distribución normal. Esto lo corroboran los valores que arrojan el sesgo estandarizado y la curtosis; ambos están dentro del rango (-2,2).

Tabla A VII.70: Validación del modelo de distribución normal.

Sesgo Estandarizado	0,588614
Curtosis Estandarizada	-1,78776

c) Gráficos de los residuales frente a los valores ajustados.

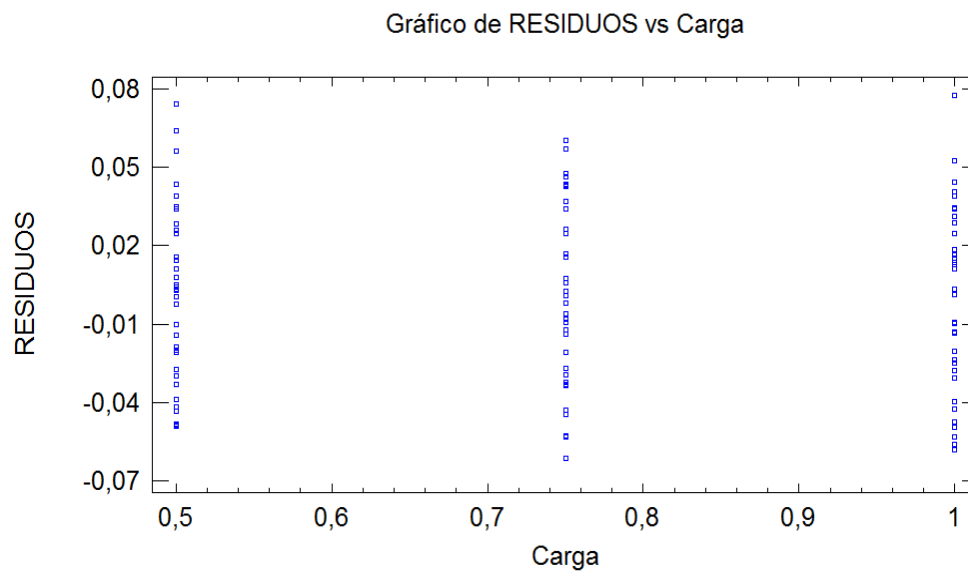
No se aprecian agrupaciones de datos ni una tendencia concreta que revele heterocedasticidad (varianza no constante). No se observan tampoco puntos anómalos.



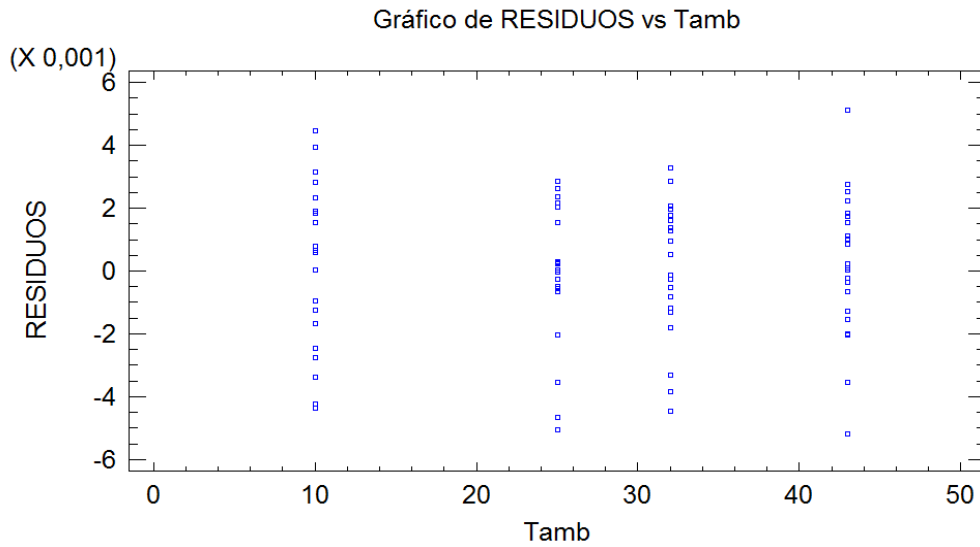
Gráfica A VII.97: Gráfica de residuos frente a valores predichos

d) Gráficos de los residuales frente a factores principales.

d.1.) Residuales frente a *Carga*.



Gráfica A VII.98: Gráfico de residuos frente al nivel de carga.

d.2.) Residuales frente a T_{amb} 

Gráfica A VII.99: Gráfico de residuos frente a la temperatura ambiente.

No se observan puntos con residuos especialmente elevados ni una tendencia clara que desmienta la aleatoriedad de su distribución.

La conclusión final de este estudio sería que para el termosifón prismático sin control de potencia (SCP) sí que son influyentes las variables *Carga* y T_{amb} . Aun así hay que tener presente la gran importancia que presenta la organización por bloques, y en consecuencia el tipo de sustancia, en el poder explicativo sobre la resistencia térmica: prescindiendo de los bloques R^2 disminuye desde un valor del 87,0 % (con bloques) hasta el 9,7 %.

REFERENCIAS

- [1] Imura, H., Kusuda, H., Ogata, J., Miyazaki, T., Sakamoto, N. *Heat Transfer in two-phase closed-type thermosiphon*. Heat Transfer-Japan Research, 1979, (8), pp. 41-53.
- [2] Faghri, A. *Heat Pipe Science and Technology*. Washington; Taylor Francis, 1995. 874 p. ISBN 1-56032-383-3.
- [3] Nusselt, W. *Die Oberflächenkondensation des Wasserdampfes*. Z. Ver.-Deutch. Ing. 1916. Vol. 60, pp. 541-569.
- [4] Polhemus, N.W. *How to deal with multicollinearity when fitting a regression model using Statgraphics Centurion*. Ed. Statpoint Technologies, Inc. 2005.
- [5] Palm, B., Khodabandeh, R. *Choosing working fluid for two-phase thermosyphon systems for cooling of electronics*. Journal of Electronic Packaging, Transactions of ASME, 2003, Vol. 125 (2), pp. 276-281.
- [6] Cavallini, A., Censi, G., Del Col, D., Doretti, L., Longo, G. A., Rossetto, L. *Experimental investigation on condensation heat transfer and pressure drop on new HFC refrigerants (R134a, R125, R32, R410A, R236ea) in a horizontal smooth tube*. International Journal of Refrigeration, 2001, Vol 24, pp. 73-87.
- [7] Hashimoto, H., Kaminaga, F. *Heat transfer characteristics in a condenser of closed two-phase thermosyphon: effect of entrainment on heat transfer deterioration*. Heat Transfer Asian Research, 2002, Vol. 31, (3), pp. 212-225.
- [8] Cieslinski, J., Fiuk, A. *Heat transfer characteristics of a two-phase thermosyphon heat exchanger*. Applied Thermal Engineering, 2013, Vol. 51, pp 112-118.
- [9] Montgomery, D.C. *Diseño y análisis de experimentos*. México: Ed. Limusa Wiley. 2002. Segunda edición. 686 p. ISBN 968-18-6156-6.