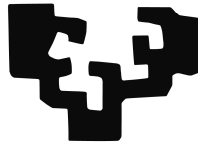


Tesis de máster

eman ta zabal zazu



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea

Estudio del comportamiento térmico del instrumento TriboLAB durante su estancia en la Estación Espacial Internacional desde la perspectiva del análisis de datos funcionales

Eva M^a Anglada

Donostia – San Sebastián, Septiembre de 2011

Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea

Departamento de Ciencia de la Computación e Inteligencia Artificial

Directora: Dra. Itziar Irigoien

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	4
ABSTRACT	5
RESUMEN.....	6
PALABRAS CLAVE.....	7
KEYWORDS.....	7
1. INTRODUCCIÓN	8
1.1. Objetivo de la tesis de máster.....	8
1.2. Origen de los datos	8
2. EL ANÁLISIS DE DATOS FUNCIONALES	10
2.1. Introducción.....	10
2.2. Los datos funcionales	11
2.3. El análisis de los datos.....	12
2.4. El entorno de desarrollo R	13
2.5. La noción de proximidad.....	14
2.5.1. Proximidad entre curvas mediante semimétricas	15
2.5.2. Semimétrica basada en el análisis de componentes principales.....	15
2.5.3. Semimétrica basada en la regresión parcial de mínimos cuadrados para datos multivariados	17
2.5.4. Semimétrica basada en derivadas	18
2.6. El escalado multidimensional.....	19
2.7. Otras técnicas empleadas.....	21
2.7.1. El suavizado de los datos (<i>smoothness</i>).....	22
2.7.2. El ajuste de las curvas: Splines.....	23
2.8. Tipo de análisis realizado.....	24
3. EL INSTRUMENTO TRIBOLAB.....	25
3.1. Antecedentes	25
3.2. La Estación Espacial Internacional	26
3.2.1. Características orbitales	26
3.2.2. El TriboLAB en la Estación Espacial Internacional	28
3.3. Configuración estructural	29
3.4. Modos de funcionamiento	30
3.5. Configuración térmica	32
3.6. Descripción del control térmico	32
3.7. Diseño del control térmico.....	35
4. DESCRIPCIÓN DE LOS DATOS.....	37
4.1. Entorno térmico.....	37
4.1.1. Descripción de los datos del entorno térmico	38
4.1.2. Interpretación de los datos del entorno térmico	39
4.2. Ensayos Térmicos.....	40
4.2.1. Descripción de los datos de los ensayos térmicos	41
4.2.2. Interpretación de los datos de los ensayos térmicos	44
4.3. Modelos Térmicos Matemáticos (TMM).....	47

4.3.1. Modelos térmicos matemáticos.....	47
4.3.2. Resultados de los TMM de los ensayos de balance termico.....	48
4.3.3. Resultados de los TMM del comportamiento en órbita.....	51
4.4. Comportamiento del TriboLAB en órbita.....	52
4.4.1. Descripción de los datos de telemetría.....	54
4.4.2. Interpretación de los datos de telemetría.....	54
5. ANÁLISIS DE LOS DATOS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	58
5.1. Comparación entre los ensayos térmicos y sus TMM.....	58
5.1.1. Comparación directa: Ensayos térmicos vs TMM.....	58
5.1.2. Análisis de coordenadas principales: Ensayos térmicos vs TMM.....	63
5.2. Comportamiento del TriboLAB en órbita.....	74
5.2.1. Estudio de los datos correspondientes al periodo de los termostatos.....	75
5.2.2. Estudio de los datos correspondientes al periodo de la órbita.....	83
5.3. Comparación entre el comportamiento en órbita y los TMM.....	91
5.3.1. Comparación directa: Telemetría vs TMM.....	91
5.3.2. Análisis de coordenadas principales: Telemetría vs TMM.....	96
6. CONCLUSIONES.....	99
7. LÍNEAS FUTURAS.....	103
8. BIBLIOGRAFÍA.....	104
ANEXO.....	106
I. LA ESTACIÓN ESPACIAL INTERNACIONAL.....	106
I.1.El ángulo beta.....	106
I.2.Ascensión recta del nodo de ascenso - RAAN.....	107
I.3.La variación del ángulo beta.....	107
II. EL TRIBOLAB.....	109
II.1. Experimentos tribológicos.....	109
II.2. Configuración estructural.....	110
II.3. Modos de operación.....	112
II.4. Descripción del control térmico.....	113
III. ENTORNO TÉRMICO.....	118
IV. MODELOS TÉRMICOS MATEMÁTICOS.....	120
V. TELEMETRÍA.....	123
V.1. Descripción de las temperaturas en órbita.....	123
VI. ANÁLISIS DE LOS DATOS.....	126
VI.1. Comparación entre los ensayos térmicos y sus TMM.....	126
VI.2. Comportamiento del TriboLAB en órbita.....	127
VI.3. Identificación de las órbitas estudiadas.....	130
VII. NOTACIÓN EMPLEADA.....	131
VIII. LISTADO DE ACRÓNIMOS.....	131

AGRADECIMIENTOS

A todas las personas implicadas en el proyecto TriboLAB, sin las cuales no hubiese sido posible llevar a cabo dicho proyecto y por lo tanto disponer de los datos objeto del estudio realizado en esta tesis de máster.

Agradecer también a INASMET y a TECNALIA el haberme facilitado la realización del máster al cual pertenece esta tesis y haberme permitido emplear la información correspondiente al proyecto TriboLAB para la realización de la misma.

Debo agradecer así mismo su labor a la directora de esta tesis de máster, Itziar Irigoien, sin cuya orientación no hubiese sido posible llevar a cabo este trabajo.

ABSTRACT

The main objective of this master thesis is to study the thermal behaviour of the TriboLAB instrument during its mission in the International Space Station, and to compare it with the behaviour predicted by the thermal mathematical models used in the design of its thermal control system.

This work deals in deep with the TriboLAB temperatures registered during the mission, making possible to reach a better knowledge about its thermal behaviour. As consequence, it will be feasible to put at the disposal of researchers interested in locating their instruments in one of the external facilities of the International Space Station, information about the real thermal behaviour of an equipment as the TriboLAB in these conditions. This information could be really interesting to help them in the design of their instruments thermal control system, especially now, when the life of the International Space Station has been extended until 2020.

The thermal control of spacecrafts is a key subject to assure not only their operation but also their survival, under the extreme conditions present at exterior space. The thermal control mission is to maintain the spacecraft components into their admissible temperature range, as in other case, they would not been able to operate or indeed to survive beyond these temperatures.

In addition, the work performed has made possible to check the applicability of some techniques belonging to functional data analysis, regarding to the study of this kind of datasets.

The validity of the TriboLAB thermal control system has been also verified, as well as the appropriate level of similarity between mathematical model results and registered temperatures in the instrument, not only in orbit but also during the thermal test campaign. Thermal control design is usually driven by means of the thermal mathematical models, so they are a key aspect in the design of the thermal control system of any spacecraft.

This study has been performed from the functional data analysis perspective.

RESUMEN

El objetivo principal de esta tesis de máster es el estudio del comportamiento térmico del instrumento TriboLAB durante su estancia en la Estación Espacial Internacional, junto con la comparación de dicho comportamiento con el pronosticado por los modelos térmicos matemáticos empleados en el diseño de su sistema de control térmico.

El trabajo realizado ha permitido profundizar de forma importante en el conocimiento del mencionado comportamiento. Ello permitirá poner a disposición de otros experimentadores interesados en ubicar sus instrumentos en los balcones exteriores de la Estación Espacial Internacional, información real acerca del comportamiento térmico de un equipo de las características del TriboLAB en dichas condiciones. Información de gran interés para ser empleada en el diseño del control térmico de sus instrumentos, especialmente ahora que la vida útil de la Estación Espacial Internacional ha sido prorrogada hasta 2020.

El control térmico de los equipos espaciales es un aspecto clave para asegurar su supervivencia y correcto funcionamiento bajo las extremas condiciones existentes en el espacio. Su misión es mantener los distintos componentes dentro de su rango de temperaturas admisibles, puesto que en caso contrario no podrían funcionar o incluso ni siquiera sobrevivir más allá de esas temperaturas.

Adicionalmente ha sido posible comprobar la aplicabilidad de distintas técnicas de análisis de datos funcionales en lo que respecta al estudio del tipo de datos aquí contemplado. Así mismo, se han comparado los resultados de la campaña de ensayos térmicos con los modelos térmicos matemáticos que han guiado el diseño del control térmico, y que son una pieza fundamental en el diseño del control térmico de cualquier instrumento espacial. Ello ha permitido verificar tanto la validez del sistema de control térmico diseñado para el TriboLAB como con la adecuada similitud existente entre los resultados de los modelos térmicos matemáticos y las temperaturas registradas en el equipo.

Todo ello, ha sido realizado desde la perspectiva del análisis de datos funcionales.

PALABRAS CLAVE

Análisis de datos funcionales, semimétrica, MDS, transmisión de calor, control térmico de satélites, Estación Espacial Internacional.

KEYWORDS

Functional data analysis, semimetric, MDS, heat transfer, spacecraft thermal control, International Space Station.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. OBJETIVO DE LA TESIS DE MÁSTER

El trabajo realizado en esta tesis de máster tiene como objetivo principal estudiar el comportamiento térmico del instrumento TriboLAB durante su estancia en la Estación Espacial Internacional, además de comparar dicho comportamiento con las predicciones realizadas por los modelos térmicos matemáticos empleados durante el diseño del sistema de control térmico del instrumento.

Ello permitirá poner a disposición de la comunidad científica información real acerca del comportamiento térmico de un equipo de las características del TriboLAB ubicado en los balcones exteriores de la Estación Espacial Internacional. Esta información resulta de gran interés para el diseño de los sistemas de control térmico de otros instrumentos científicos que puedan ser ubicados en los balcones exteriores de la Estación Espacial Internacional, especialmente ahora que su vida ha sido prorrogada hasta 2020.

El sistema de control térmico de los equipos espaciales es uno de los aspectos fundamentales de su diseño. Su misión es mantener los distintos componentes de los equipos dentro de sus intervalos admisibles de temperatura, pues de otro modo las extremas condiciones existentes en el espacio llevarían las temperaturas de los componentes más allá de esos límites poniendo en riesgo no solo su correcto funcionamiento sino incluso su supervivencia.

Adicionalmente, se desea comparar los resultados de la campaña de ensayos térmicos con los resultados de los modelos térmicos matemáticos que han guiado el diseño del control térmico, y que son una pieza fundamental en el diseño del control térmico de cualquier instrumento espacial.

Todo ello, ha sido realizado desde la perspectiva del análisis de datos funcionales.

1.2. ORIGEN DE LOS DATOS

Los datos estudiados en esta tesis de máster tienen su origen en el proyecto TriboLAB llevado a cabo en el centro tecnológico INASMET entre los años 1998 y 2010.

El TriboLAB es un instrumento específicamente diseñado para la realización de ensayos de tribología¹ en condiciones de microgravedad, los cuales han sido llevados a cabo en la Estación Espacial Internacional (ISS – *International Space Station*) durante los años 2008 y

¹ La tribología es la ciencia que estudia la fricción y el desgaste que tiene lugar durante el contacto entre superficies sólidas en movimiento, así como la lubricación existente entre ellas.

2009. Este instrumento ha sido desarrollado conjuntamente por INASMET y el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), centrándose la labor de INASMET en el diseño del sistema de control térmico, en el desarrollo de la mayor parte de las capas de lubricante objeto de los ensayos de tribología, y en la operación en órbita del instrumento.

Los datos empleados en el estudio que aquí se presenta, corresponden precisamente al proceso de diseño del control térmico y al comportamiento térmico del TribolAB en órbita.

Cabe mencionar que el centro tecnológico INASMET ha dejado de existir como tal el 1 de Enero de 2011, fusionándose con otros 7 centros tecnológicos más para formar TECNALIA Research & Innovation. Por ello, es en este nuevo centro, en el que se ha desarrollado la tesis de máster que aquí se presenta.

La financiación del TribolAB ha corrido a cargo de distintas instituciones entre las cuales cabe destacar la Agencia Espacial Europea (ESA), el Ministerio de Ciencia y Tecnología (MiCYT), y el Departamento de Educación, Universidades e Investigación del Gobierno Vasco. La Tabla 1 recoge la financiación recibida a lo largo de su desarrollo.

Título	TribolAB: Desarrollo de un experimento de tribología en la Estación Espacial Internacional.
Entidad financiadora	Diversas entidades (MiCYT, INTA, ESA): PNE/ESP98-1341, PNE/ESP99-0282-C02-02, PNE/008-2000-C-02, PNE/ESP2003-07234. ESTEC/13758/99/NL/SB
Entidades participantes	INASMET, INTA y ESTL-AEA (UK)
Investigador principal	ESP98-1341 (1998-1999): Javier Gómez-Elvira (INTA) ESP99-0282-C02-02 (1999-2000): J. I. Oñate (INASMET) y J. Gómez-Elvira (INTA) PNE-008/2000-C-02 (2000-2002): J. I. Oñate (INASMET) y R. Sanz (INTA) PNE- ESP 2003 – 07234 (2003-2006): I. Garmendia (INASMET) ESTEC/13758/99/NL/SB (Contrato ESA, 2000-04). JI Oñate (INASMET) y R Sanz (INTA)
Duración	8 años, 1998 – 2006
Número de investigadores participantes	15 investigadores.
Título	TribolAB V – Ensayos de tribología en la Estación Espacial Internacional con un nuevo lubricante sólido.
Entidad financiadora	Gobierno Vasco. Dpto. de Educación, Universidades e Investigación
Entidades participantes	Fundación INASMET.
Investigador principal	J. Ignacio Oñate
Duración	3 años (2008-2010)
Número de investigadores participantes	5 investigadores.

Tabla 1. Financiación del proyecto TribolAB.

2. EL ANÁLISIS DE DATOS FUNCIONALES

2.1. INTRODUCCIÓN

El análisis de datos funcionales es una rama de las matemáticas, y más concretamente de la estadística, que estudia y analiza la información contenida en curvas, superficies o cualquier elemento que varíe sobre un espacio continuo, aunque en este trabajo nos restringiremos únicamente al estudio de la información contenida en curvas y no en otro tipo de elementos.

Los métodos y modelos empleados en el análisis de datos funcionales guardan un cierto parecido con los empleados en el análisis de datos multivariados pudiendo complementarse con otras técnicas, como por ejemplo, los modelos de regresión lineales y no lineales o el análisis de componentes principales entre otros.

Los objetivos de este tipo de análisis son esencialmente los mismos que en cualquier otra área de la estadística, entre los que pueden mencionarse la obtención de una representación de los datos que facilite su entendimiento y/o resalte sus distintas características, el estudio de posibles patrones, de la variabilidad de los datos, la explicación del porqué de las variaciones de un resultado o de una variable dependiente a partir de datos de entrada o de variables independientes, o bien la comparación de conjuntos de datos con respecto a ciertos tipos de variaciones.

En función de la estrategia con que se aborde, el análisis de datos funcionales puede dividirse en tres categorías distintas: exploratorio, confirmatorio y predictivo.

- En el análisis de tipo **exploratorio**, la forma de estudiar los datos es '*abierta*'. Es decir, las distintas técnicas son aplicadas sobre los datos con la esperanza de que ello revele aspectos nuevos e interesantes de los mismos, además de proporcionar una mayor información sobre los aspectos más conocidos de dichos datos. La investigación exploratoria tiende a considerar únicamente los datos disponibles, prestando menos atención a otros aspectos complementarios como puedan ser las características de la población u otras situaciones que no estén incluidas en los datos.
- Los análisis **confirmatorios** por su parte, tienden a inferirse a partir de preguntas concretas sobre los datos, que son las que interesa resolver. Se asume que los datos presentan una cierta estructura, y se desea conocer si ciertas asunciones o hipótesis son o no confirmadas por los mismos.
- Los estudios **predictivos** en cambio emplean los datos disponibles con el fin de realizar una asunción o predicción sobre datos no disponibles, aunque este es un tipo de estudio menos común que los anteriores.

2.2. LOS DATOS FUNCIONALES

La primera cuestión es definir que se entiende por datos funcionales. En general, se puede considerar como un dato funcional cualquier observación que varíe sobre un dominio continuo. Aunque el dominio continuo más habitual es el tiempo, puede ser cualquier otro como la posición en el espacio, la temperatura, la presión, etc.

Existen numerosas situaciones, procedentes de los más diversos campos de la ciencia, donde los datos registrados en las observaciones son de tipo funcional. Es decir, para cada observación se dispone de una sucesión de datos registrados de modo discreto en distintos instantes dentro de un cierto rango (t_{min}, t_{max}) . De modo que un conjunto de datos funcionales estará formado por una serie de observaciones funcionales x_1, \dots, x_n , donde cada $x_{i(i=1, \dots, n)}$ consiste en J pares $(t_j, y_j)_{j=1, \dots, J}$, siendo y_j una observación de $x_i(t_j)$, una instantánea, por así decirlo, de la función para el valor del argumento igual a t_j (Tabla 2).

$x_1(t)$		$x_2(t)$...	$x_n(t)$	
t_1	y_1	t_1	y_1	...	t_1	y_1
t_2	y_2	t_2	y_2	...	t_2	y_2
.		.		.	.	
.		.		.	.	
.		.		.	.	
t_j	y_j	t_j	y_j	...	t_j	y_j

Tabla 2. Conjunto de datos funcionales expresado en forma de tabla.

De un modo un poco más general, podemos expresar cada observación como $\{x_i(t); t \in (t_{min}, t_{max})\}$ y el conjunto de datos funcionales como $\{x_i = \{x_i(t); t \in (t_{min}, t_{max})\}\}_{i=1, \dots, n}$ (Tabla 3) o como la familia $\{X(t_j)\}_{j=1, \dots, J}$.

$x_1(t_1)$	$x_2(t_1)$...	$x_n(t_1)$
$x_1(t_2)$	$x_2(t_2)$...	$x_n(t_2)$
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
$x_1(t_j)$	$x_2(t_j)$...	$x_n(t_j)$

Tabla 3. Conjunto de datos funcionales expresado en forma de matriz.

A pesar de tratarse de registros discretos, si la frecuencia de muestreo es lo suficientemente fina podemos considerar las muestras como observaciones de la familia continua $\mathcal{X}=\{X(t); t \in (t_{min}, t_{max})\}$.

Formalmente se denomina variable funcional (f.v.) a una variable aleatoria \mathcal{X} cuyos valores pertenecen a un espacio dimensional infinito (o espacio funcional), y se designa como dato funcional a una observación χ de \mathcal{X} . La expresión χ denota cualquier elemento no aleatorio de un espacio de dimensiones infinitas E siendo \mathcal{X} una variable funcional aleatoria evaluada en E . Del mismo modo $\{\chi_i\}_{i=1,\dots,n}$ denota n observaciones de una muestra $\{\mathcal{X}_i\}_{i=1,\dots,n}$ de una variable funcional aleatoria.

En los casos en que la frecuencia de muestreo no es suficiente, será necesario construir la curva a partir de los datos discretos, para lo que existen diferentes técnicas de ajuste o interpolación.

2.3. EL ANÁLISIS DE LOS DATOS

La filosofía básica del análisis de datos funcionales, es considerar los datos como entidades propias, y no como una mera sucesión de observaciones individuales. En general, un análisis de datos funcionales presenta tres etapas diferenciadas: la representación de los datos, su alineamiento y por último los resultados y su representación.

La representación de los datos: suavizado e interpolación

Como ya hemos introducido previamente los datos objeto del análisis no son realmente curvas sino datos discretos, por ello en muchos casos la primera tarea es la conversión de dichos valores a una función x_i cuyos valores $x_i(t)$ sean calculables para cualquier valor del argumento que deseemos. El procedimiento básico para la conversión de los datos discretos a la función buscada es la interpolación.

Ahora bien, es habitual que los datos procedentes de la observación contengan distintas alteraciones como pueda ser la presencia de errores de medición los cuales deben ser eliminados. El procedimiento habitual para ello, es la realización de un suavizado de los datos (*smoothness*), para lo que existen distintas técnicas.

Otro problema adicional que puede ser necesario gestionar es la ausencia de algunos valores (*missing values*), lo que puede obligar a eliminar algunos registros o a estimar los valores en dichos puntos mediante diferentes técnicas.

La sincronización o alineamiento de los datos

Un problema habitual en el análisis de datos funcionales es la determinación del punto de inicio de los mismos. Ello puede deberse a que el inicio del registro es arbitrario, o a la dificultad de comenzarlos exactamente en el instante deseado.

Lógicamente, el correcto alineamiento de los datos es fundamental para proceder al estudio de los mismos.

Los resultados y su representación

El último paso es la representación gráfica de los resultados de un modo que nos permita una mejor interpretación de los mismos. Lo cierto es que la representación de los resultados de un análisis de datos funcionales puede llegar a ser un verdadero desafío por lo que no es posible establecer a priori cual es la mejor técnica para ello.

2.4. EL ENTORNO DE DESARROLLO R

El estudio llevado a cabo en esta tesis de máster ha sido realizado, fundamentalmente, mediante el software R [1], el cual es un lenguaje y entorno de desarrollo especialmente orientado al análisis de datos. Es un proyecto GNU [2] similar al lenguaje S [3] y cuyo entorno fue desarrollado en Bell Laboratories² por John Chambers y sus colaboradores. De hecho, R puede ser considerado una implementación diferente de S, y aunque existen importantes diferencias entre ellos, una gran parte del código escrito para S puede ser ejecutado directamente en R.

Está disponible como software libre bajo los términos de la licencia GNU GPL (*General Public License*) [2] de la Free Software Foundation [4] y es capaz de funcionar bajo una gran variedad de plataformas UNIX así como bajo Windows y MacOS.

R proporciona una gran variedad de técnicas estadísticas y gráficas (modelización lineal y no lineal, análisis de series de tiempo, clasificación, clustering, etc.), además de una gran flexibilidad. No solo permite la manipulación y almacenamiento de datos de un modo efectivo, o las operaciones con matrices, sino que también dispone una amplia colección de funciones y herramientas ya implementadas. Es además un lenguaje de programación simple y efectivo, que permite al usuario implementar sus propias funciones e incluso enlazarlo a código escrito en C, C++ o FORTRAN.

² Formalmente AT&T, y ahora Lucent Technologies

2.5. LA NOCIÓN DE PROXIMIDAD

Las medidas de proximidad entre objetos matemáticos juegan un papel fundamental en los métodos estadísticos, por ello resulta de interés introducir los conceptos de *distancia*, *disimilitud*, *métrica* y *semimétrica*, aunque lo cierto es que la terminología varía en función de la fuente consultada. En lo que respecta al ámbito de este documento se ha decidido adoptar la correspondiente a las definiciones formales expuestas a continuación.

Una **disimilitud** o **casi-métrica** es una función $d: \Omega \times \Omega \rightarrow \mathbb{R}$, tal que verifica las siguientes propiedades:

- 1) $d(i, j) \geq 0 \quad \forall i, j \in \Omega$
- 2) $d(i, i) = 0 \quad \forall i \in \Omega$
- 3) $d(i, j) = d(j, i) \quad \forall i, j \in \Omega$

Una **semimétrica** es una disimilitud que además cumple:

$$d(i, j) \leq d(i, k) + d(k, j) \quad \forall i, j, k \in \Omega$$

Por último, una **métrica** es una semimétrica que cumple:

$$d(i, j) = 0 \Leftrightarrow i = j \quad \forall i, j \in \Omega$$

Estas definiciones se corresponden con la idea intuitiva de distancia, en la cual una función de acuerdo a ciertas reglas específicas, proporciona de un modo concreto la descripción del significado de los conceptos 'lejos' y 'cerca' para determinar la relación entre dos puntos i y j .

El tipo de distancia más habitual entre dos puntos es la **distancia euclídea**, también llamada **métrica L_2** o **norma euclídea $\|.\|$** , que es la distancia entre dos puntos de un espacio euclídeo³ y está definida por la suma de los cuadrados de los p componentes del vector $x=(x_1, \dots, x_p)$ que une ambos puntos. Más concretamente, siendo $x^t=(x_1, \dots, x_p)$ un vector de \mathbb{R}^p , la norma euclídea se obtiene mediante la siguiente expresión [Ec. 1].

³ En matemáticas, el espacio euclídeo es un tipo de espacio geométrico donde se satisfacen los axiomas de Euclides de la geometría. La recta, el plano euclídeo y el espacio tridimensional de la geometría euclidiana son casos especiales de espacio euclídeo de dimensiones 1, 2 y 3. El concepto de espacio euclídeo generaliza esas construcciones a más dimensiones.

$$\|x\|^2 = \sum_{j=1}^p (x_j)^2 \quad \text{[Ec. 1]}$$

Por ejemplo en un espacio bidimensional, la **distancia euclídea** no es si no la distancia 'ordinaria' que estamos acostumbrados a emplear, la que se mediría con una regla. De modo que la distancia entre el punto $P_1(x_1, y_1)$ y el punto $P_2(x_2, y_2)$ viene dada por la expresión mostrada a continuación [Ec. 2].

$$d(P_1, P_2) = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad \text{[Ec. 2]}$$

2.5.1. PROXIMIDAD ENTRE CURVAS MEDIANTE SEMIMÉTRICAS

Dadas dos curvas x_i, x_i' la distancia entre ellas podría obtenerse de distintos modos. Ahora bien, en función de las características de los datos a analizar, será más apropiado emplear un tipo u otro de distancia pues no todos proporcionarán la misma información.

En el contexto del análisis de datos funcionales donde los conjuntos de datos están formados por curvas, como es el caso que nos ocupa, es bastante común la utilización de **semimétricas** debido a que estas suelen adaptarse mucho mejor al estudio de este tipo de datos.

En el desarrollo de esta tesis de máster se ha considerado la utilización de tres tipos distintos de **semimétricas** especialmente formulados para datos similares a los estudiados, las cuales se explican en los siguientes subapartados y con mayor detalle en la referencia [5] de la bibliografía.

2.5.2. SEMIMÉTRICA BASADA EN EL ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES

En muchas situaciones con datos multivariados, el análisis de componentes principales clásico (PCA - *Principal Components Analysis*) se considera una herramienta útil para la representación de los datos en un espacio de menores dimensiones. El objetivo de este tipo de análisis es la representación de la información con un menor número de variables, facilitando así la interpretación de los datos, lo que se consigue construyendo nuevas variables denominadas componentes principales. Si se retienen todos los componentes principales calculados no se pierde nada de información pero tampoco se simplifica el problema, ahora bien, si es posible representar la mayor parte de la información contenida en los datos

originales con solo una parte de los componentes⁴, podremos retener únicamente esos componentes sin una pérdida de información importante.

Más recientemente, los métodos del PCA se han extendido al análisis de datos funcionales (FPCA), mostrando ser además una buena herramienta para el cálculo de las proximidades entre curvas en un espacio de menores dimensiones [5].

A través del FPCA es posible extraer una expresión que determina la proximidad entre dos curvas discretizadas x_i y $x_{i'}$ [Ec. 3].

$$d_q^{PCA}(x_i, x_{i'}) = \sqrt{\sum_{k=1}^q \left(\sum_{j=1}^J w_j (x_i(t_j) - x_{i'}(t_j)) [v_k]_j \right)^2} \quad [\text{Ec. 3}]$$

Donde:

$d_q^{PCA}(x_i, x_{i'})$ es la distancia entre las curvas x_i e $x_{i'}$.

q es el número de componentes principales retenidos y por tanto actúa como un parámetro de ajuste indicador del grado de resolución con que se aborda el problema.

J es el número de registros que forman la curva.

w_1, \dots, w_J son los coeficientes de aproximación de la integración, en general, $w_j = t_j - t_{j-1}$

v_1, v_2, \dots , son los vectores propios de la matriz de covarianzas asociados con los valores propios $\lambda_{1,n} > \lambda_{2,n} \dots$ [6]

Debido a las asunciones realizadas en su desarrollo matemático, el cual puede consultarse en la referencia [5] de la bibliografía, este tipo de semimétrica solo puede emplearse cuando los datos están balanceados, es decir las curvas están medidas en los mismos puntos, y el grado de discretización de las mediciones es suficientemente fino. Por otra parte presenta la ventaja de poder ser utilizada aunque las curvas no sean suaves.

Este tipo de semimétrica se ha utilizado a través de la función `semimetric.pca` implementada en R [7].

⁴ $q < p$, donde q es el número de componentes retenidos y p el número de componentes calculados.

2.5.3. SEMIMÉTRICA BASADA EN LA REGRESIÓN PARCIAL DE MÍNIMOS CUADRADOS PARA DATOS MULTIVARIADOS

Este tipo de regresión (MPLSR - *Multivariate Partial Least Regression*) fue desarrollada para predecir una respuesta multivariada a partir de variables independientes cuando existe un alto grado de colinealidad entre los predictores y/o cuando el número de predictores es muy alto comparado con el número de observaciones, como ocurre en el caso de los datos funcionales. El MPLSR realiza una descomposición simultánea del conjunto de predictores y del conjunto de respuestas, de modo que los componentes calculados maximizan la covarianza entre ambos conjuntos de variables.

En particular, proporciona p componentes, cada uno correspondiente a una respuesta, que dependen de un parámetro llamado número de factores (q). A mayor valor del número de factores, mejor ajuste de los datos, aunque un exceso de factores puede producir exceso de ruido a causa de una variabilidad demasiado elevada. Por lo tanto, el número de factores permite gestionar el equilibrio entre la exactitud y la variabilidad, de un modo similar al papel que juega el número de dimensiones retenidas en un análisis de componentes principales.

De igual modo que se ha visto para las distancias basadas en PCA, también el MPLSR es una buena herramienta para el cálculo de las proximidades entre curvas en un espacio de menores dimensiones [5].

Dadas dos curvas discretizadas x_i y $x_{i'}$, la distancia $d_q^{PLS}(x_i, x_{i'})$ puede aproximarse mediante la siguiente expresión [Ec. 4] extraída de la referencia [5] de la bibliografía:

$$d_q^{PLS}(x_i, x_{i'}) = \sqrt{\sum_{k=1}^p \left(\sum_{j=1}^J w_j (x_i(t_j) - x_{i'}(t_j)) [v_k^q]_j \right)^2} \quad [\text{Ec. 4}]$$

Donde:

$d_q^{PLS}(x_i, x_{i'})$ es la distancia entre las curvas x_i e $x_{i'}$.

q es el número de factores.

p es el número de componentes retenidos o de respuestas escalares

J es el número de registros que forman la curva (se asume que ambas curvas están balanceadas).

w_1, \dots, w_J son los coeficientes de aproximación de la integración, en general, $w_j = t_j - t_{j-1}$

v_1^q, v_2^q, \dots , son los vectores calculados por el MPLSR

Al igual que en el caso de las basadas en PCA este tipo de semimétrica solo puede emplearse cuando los datos están balanceados y el grado de discretización de las mediciones es suficientemente fino, siendo posible aplicarlas aunque las curvas no sean suaves. Este tipo de semimétrica se ha empleado mediante la función `semimetric.mplsr` implementada en R [7].

2.5.4. SEMIMÉTRICA BASADA EN DERIVADAS

Otra forma de construir semimétricas entre curvas es considerar las distancias entre sus derivadas. En concreto, dadas dos curvas x_i y $x_{i'}$, la semimétrica entre ambas puede calcularse como se muestra en la siguiente expresión [Ec. 5], extraída de la referencia [5] de la bibliografía.

$$d_q^{deriv}(x_i, x_{i'})^2 = \int (x_i^{(q)}(t) - x_{i'}^{(q)}(t))^2 dt \quad [\text{Ec. 5}]$$

Donde:

$d_q^{deriv}(x_i, x_{i'})$ es la distancia entre las curvas x_i e $x_{i'}$.

$x^{(q)}$ denota la derivada q-ésima de x .

Cabe destacar que el caso $d_0^{deriv}(x, 0)$ es igual a la clásica norma L_2 de x .

Con el fin de evitar problemas debidos a inestabilidades numéricas, es usual emplear una aproximación previa de las curvas del tipo B-Spline⁵. De este modo, la semimétrica no depende del grado de discretización de las mediciones ni requiere que los datos estén balanceados aunque sí es necesario que los datos no sean demasiado abruptos. En la referencia [5] de la bibliografía puede consultarse el desarrollo matemático de la expresión mediante curvas B-Spline.

Este tipo de semimétrica se ha empleado mediante la función `semimetric.deriv` implementada en R [7]

⁵ A diferencia de un spline normal (ver apartado 2.7.2), una B-Spline es una curva de interpolación a trozos donde los puntos que delimitan cada segmento no pertenecen a la curva sino que son puntos de control, es decir, dan forma a la curva pero sin que esta pase por ellos.

2.6. EL ESCALADO MULTIDIMENSIONAL

Una gran parte del trabajo del análisis de datos funcionales consiste en lograr la representación de los mismos en un espacio de menor dimensión, lo que facilita su análisis y su comprensión.

El escalado multidimensional, más conocido como MDS (*Multidimensional Scaling*), es un conjunto de técnicas estadísticas empleadas a menudo para visualizar la información relativa a las similitudes o disimilitudes existentes entre los datos.

Su objetivo es obtener una representación de los datos en un espacio euclídeo de dimensión pequeña, de modo que las distancias euclídeas existentes entre los objetos en este nuevo espacio sean representativas de las disimilitudes originales existentes entre los datos. Para ello, los algoritmos de MDS parten de una matriz que contiene las disimilitudes entre los datos dos a dos, y proporciona como resultado un conjunto de puntos en el nuevo espacio euclídeo de modo que las distancias euclídeas entre ellos sean aproximadamente iguales a las disimilitudes originales. Ello nos permite observar las distancias entre los datos de una forma mucho más intuitiva.

Existen diferentes técnicas de MDS, pero entre ellas pueden destacarse dos grandes grupos como son el escalado métrico (*metric scaling*) y el no métrico (*non-metric scaling*). La principal diferencia entre ellos es la forma de utilizar las disimilitudes. Así, mientras que en el escalado métrico la configuración de los objetos se obtiene a partir de los valores numéricos de las disimilitudes, el escalado no métrico se basa en las propiedades ordinales de las mismas, lo cual resulta más adecuado cuando el valor numérico es poco fiable.

En este caso se ha optado por la aplicación del **escalado métrico**, concretamente a través del **análisis de coordenadas principales** (*principal coordinates analysis*) también denominado **escalado clásico** (*classical scaling*) [8][9][10][11].

Dados n objetos y dada la matriz que contiene las distancias dos a dos entre dichos objetos $D=(d_{ij})_{i,j=1,\dots,n}$, el **análisis de coordenadas principales** busca las coordenadas que nos permitan representar dichas distancias en forma de distancias euclídeas. Las **coordenadas principales** de D , serán las p coordenadas $x_i = (x_{i1}, \dots, x_{ip})'$ de cada objeto i de manera que $d_{ij}^2=(x_i-x_j)'(x_i-x_j)$. Una vez obtenidas estas, el último paso es la reducción de la dimensión.

El procedimiento general es el siguiente:

1. En primer lugar se calcula la matriz A que contiene las distancias entre los n objetos dos a dos (d_{ij}):

$$A = \left(-\frac{1}{2} d_{ij}^2 \right) = -\frac{1}{2} D^{(2)}$$

2. Se calcula la matriz B:

$$B = HAH \quad \text{donde H es la matriz de centrado calculada como } H = I_n - \frac{1}{n} \mathbf{1}\mathbf{1}'$$

3. Se halla la descomposición espectral de la matriz B. Asumiendo que su rango sea p , que los valores propios sean $\lambda_1 > \dots > \lambda_p \geq 0$ y los vectores propios asociados sean u_1, \dots, u_p , de modo que:

$$Bu_i = \lambda_i u_i, \quad i = 1, \dots, p$$

4. De este modo es posible construir las matrices $U = (u_1, \dots, u_p)$ y $\Lambda = \text{diag}\{\lambda_1, \dots, \lambda_p\}$ y calcular la matriz X que contiene las coordenadas principales de los objetos.

$$X = U\Lambda^{1/2} \quad (n \times p)$$

Donde cada fila i de la matriz X contiene las coordenadas principales del objeto i .

5. Una vez obtenidas las coordenadas principales el paso siguiente es la reducción de la dimensión. Para una reducción de la dimensión desde p hasta q , donde $q < p$, seleccionaremos las q primeras coordenadas principales. Es decir, representaremos el objeto i mediante:

$$\mathbf{x}_i^* = (\mathbf{x}_{i1}, \dots, \mathbf{x}_{iq})'$$

Llamaremos d_{ij}^* a las distancias calculadas a partir de esas coordenadas truncadas

$$d_{ij}^{*2} = (\mathbf{x}_i^* - \mathbf{x}_j^*)'(\mathbf{x}_i^* - \mathbf{x}_j^*)$$

El porcentaje de variabilidad explicado por las q primeras dimensiones viene dado por:

$$\frac{\lambda_1 + \dots + \lambda_q}{\lambda_1 + \dots + \lambda_q + \dots + \lambda_p}$$

Concretamente en este caso el escalado métrico se ha aplicado mediante la función `cmdscale` implementada en R [12], la cual realiza el escalado multidimensional a partir de una matriz de disimilaridades. Como resultado, proporciona una matriz de q columnas cuyas filas contienen las coordenadas de los puntos seleccionados como representación de las disimilaridades, donde q es la dimensión del espacio sobre el cual van a ser representados los datos.

Tras la aplicación de la función y la obtención de las coordenadas correspondientes, se ha estudiado el porcentaje de variabilidad retenido por cada una de las coordenadas a partir de los

valores propios obtenidos en la descomposición espectral de la matriz de distancias, una vez comprobado que todos ellos son positivos ($\lambda_1 > \dots > \lambda_p \geq 0$).

Para una mayor información acerca de la descomposición espectral de una matriz puede consultarse la referencia [6] de la bibliografía.

2.7. OTRAS TÉCNICAS EMPLEADAS

Como en cualquier otro análisis de datos, se han empleado los estadísticos clásicos, como son la media, la varianza, la desviación estándar o la covarianza. Ahora bien, puesto que los datos son de tipo funcional, el cálculo de estos estadísticos es ligeramente diferente del habitual.

Dadas n curvas donde $x_i(t)$ representa los valores medidos en t para cada una de las curvas, la función de la media $\bar{x}(t)$ se obtiene mediante el cálculo, para cada uno de los instantes de medición (t), de la media de los valores en las distintas réplicas según se indica en la ecuación [Ec. 6]. De un modo similar se obtiene la función de la varianza [Ec. 7] y de la desviación estándar [Ec. 8]. La covarianza entre dos instantes t_1 y t_2 se obtiene según se indica en la ecuación [Ec. 9]

$$\bar{x}(t) = n^{-1} \sum_{i=1}^n x_i(t) \quad [\text{Ec. 6}]$$

$$\text{var } x(t) = (n-1)^{-1} \sum_{i=1}^n [x_i(t) - \bar{x}(t)]^2 \quad [\text{Ec. 7}]$$

$$\sigma_{x(t)} = \sqrt{\text{var } x(t)} \quad [\text{Ec. 8}]$$

$$\text{cov } x(t_1, t_2) = (n-1)^{-1} \sum_{i=1}^n \{x_i(t_1) - \bar{x}(t_1)\} \{x_i(t_2) - \bar{x}(t_2)\} \quad [\text{Ec. 9}]$$

Siendo n el número de curvas y $x_i(t)$ los valores en cada uno de los instantes de medición

En el análisis de datos funcionales, es muy habitual la utilización de las derivadas de la función, ya que permiten estudiar la topología de la misma proporcionando información de interés como puedan ser los picos, los valles o las pendientes. En este caso, el cálculo de las derivadas se ha llevado a cabo únicamente sobre una parte de las curvas con el objeto de estudiar su pendiente, la cual representa la velocidad de enfriamiento o calentamiento del instrumento.

2.7.1. EL SUAVIZADO DE LOS DATOS (*SMOOTHNESS*)

Los conjuntos de datos pueden contener una cierta cantidad de 'ruido' procedente del tipo de observación realizado, en cuyo caso la primera acción que debe llevarse a cabo es el suavizado de los mismos (*smoothness*).

Existen numerosas técnicas de suavizado [13], siendo la más sencilla la del suavizado lineal, donde el valor de la función $x(t)$ se estima como una combinación lineal de las observaciones discretas (y_j). Otros métodos de suavizado muy habituales son los que representan la función como la combinación lineal de K funciones bases conocidas. De estos últimos, el método más simple de estimación de los coeficientes de expansión (c_k) es mediante mínimos cuadrados, y el más conocido, el basado en la utilización de series de Fourier. Existen otros métodos que, por ejemplo, emplean bases polinomiales, regresiones de tipo spline, wavelets, etc. Por último, están los métodos basados en la ponderación local, donde la estimación de un punto t está influido de un modo más explícito por las observaciones de los puntos cercanos.

La técnica empleada en nuestro caso lleva a cabo el suavizado mediante el uso de una regresión polinomial con ponderación local (LOWESS o LOESS - *locally weighted scatterplot smoothing*). Este tipo de función, también llamada de regresión local, es uno de los muchos métodos modernos de regresión basados en los métodos clásicos como la regresión de mínimos cuadrados (*least squares regression*). Estos métodos modernos están diseñados para abordar las situaciones en las que los procedimientos clásicos no resultan adecuados o procedentes. A pesar de que computacionalmente resultan muy intensivos, con la actual capacidad de cálculo permiten alcanzar objetivos que no se logran fácilmente mediante los métodos tradicionales.

El éxito de este tipo de función radica en la combinación de la sencillez de la regresión lineal por mínimos cuadrados con la flexibilidad de la regresión no lineal. Para ello realiza un ajuste de modelos sencillos sobre subconjuntos locales de datos para crear una función que describe la parte determinista de la variación de los datos punto a punto [14][15].

Concretamente, se ha empleado la función `lowess` (*locally weighted scatterplot smoothing*) implementada en R, la cual está definida por un complejo algoritmo desarrollado por Cleveland [16][17].

2.7.2. EL AJUSTE DE LAS CURVAS: SPLINES

Puesto que en la práctica, los datos funcionales son obtenidos y registrados de un modo discreto, en muchos casos es necesario convertir los datos disponibles en bruto a funciones sobre las que podamos trabajar, para lo que pueden emplearse distintos tipos de ajustes (*fittings*) o interpolaciones.

En ocasiones puede ser suficiente la utilización de una interpolación simple, consistente en la unión de los datos adyacentes mediante segmentos de línea recta, pero esta aproximación puede ser inadecuada si posteriormente deseamos obtener información a partir de las derivadas de la función. Una alternativa es el ajuste mediante una serie de Fourier, que permite mantener la periodicidad de los datos y generalmente suele proporcionar resultados razonables con una constante y tres pares de términos de senos y cosenos [13]. Otra opción es el ajuste basado en splines polinomiales [13].

El uso de funciones de tipo spline es uno de los sistemas de aproximación más habituales en el estudio de datos funcionales no periódicos, y ha sido el empleado en este caso para el ajuste de los datos. Su éxito radica en la combinación de la rapidez de cálculo junto con una gran flexibilidad.

El primer paso en la definición de una función de spline es la división del intervalo sobre el que va a aproximarse la función en un número finito de subintervalos. Estos subintervalos, están separados entre si por unos valores denominados nudos o *knots*.

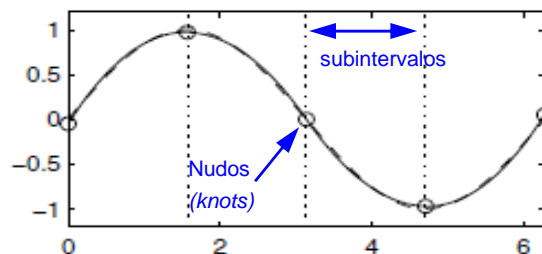


Fig. 1. Subintervalos y *knots* de una spline.

En cada uno de esos intervalos, la spline es un polinomio de orden⁶ m . Los polinomios adyacentes se unen de un modo homogéneo al llegar al *knot* que los separa, de modo que además, las derivadas de orden hasta $m-2$ encajen también suavemente en dichos *knots*. En el caso de que no se definan *knots* interiores en el intervalo de estudio, la función spline resultante sería simplemente un polinomio.

En definitiva, una función spline está determinada por dos aspectos: el orden de los polinomios de los segmentos y la secuencia de *knots*.

⁶ El orden de un polinomio es igual al número de constantes necesarias para definirlo, y por lo tanto, igual a su grado más uno.

En este caso el ajuste de los datos se ha llevado a cabo mediante la función `spline` implementada en R. Esta función permite realizar una interpolación basada en una spline cúbica de los datos seleccionados mediante distintos métodos, de los cuales se ha empleado el conocido como de Forsythe, Malcom y Moler, el cual realiza un ajuste cúbico perfecto a través de cuatro puntos al final de cada dato [18][19].

2.8. TIPO DE ANÁLISIS REALIZADO

Los datos sometidos a estudio en esta tesis de máster son fundamentalmente valores de temperatura medidos en distintos instantes de tiempo. Así pues, se trata de datos univariados cuyo dominio continuo es el tiempo.

Su estudio se ha abordado desde la perspectiva del análisis de datos funcionales mediante una estrategia exploratoria. Para ello, inicialmente se han estudiado distintos tipos de semimétricas, con el objetivo de evaluar su idoneidad para el estudio del tipo de datos aquí contemplado. Una vez seleccionada la semimétrica a emplear, se ha procedido a la construcción de la matriz de disimilaridades de cada uno de los grupos de datos estudiados. Finalmente, se ha realizado la representación de los resultados obtenidos para cada grupo, en un espacio euclídeo a través del escalado multidimensional, y más concretamente mediante el análisis de coordenadas principales.

3. EL INSTRUMENTO TRIBOLAB

3.1. ANTECEDENTES

Los mecanismos presentes en los distintos equipos que se envían al espacio (transbordadores espaciales, satélites, sondas, etc.) han de operar en un medio hostil caracterizado por la presencia de la radiación espacial, el vacío, las temperaturas extremas, la ausencia de gravedad, el oxígeno atómico y las microvibraciones.

La reproducción de todas estas condiciones ambientales en tierra no es posible a día de hoy, imposibilitando la realización de experimentos en condiciones suficientemente representativas de la situación en órbita. Ello, ha impulsado el desarrollo de instrumentos que permitan realizar la experimentación en plataformas espaciales.

El Tribolab es uno de estos instrumentos, capaz de ejecutar en órbita 2 tipos diferentes de experimentos sobre lubricantes como son los de varilla sobre disco (POD - *Pin On Disk*) y los de rodamientos (BB - *Ball Bearing*)⁷. Su objetivo es investigar con precisión el comportamiento de los sistemas de lubricación utilizados en los mecanismos espaciales, ayudando así a cubrir una necesidad esencial para obtener funcionamientos fiables en el futuro [20][21]. Durante su misión, el Tribolab llevó a cabo experimentos sobre capas de disulfuro de molibdeno (MoS_2) dopado con carburo de tungsteno, un lubricante sólido de altas prestaciones.

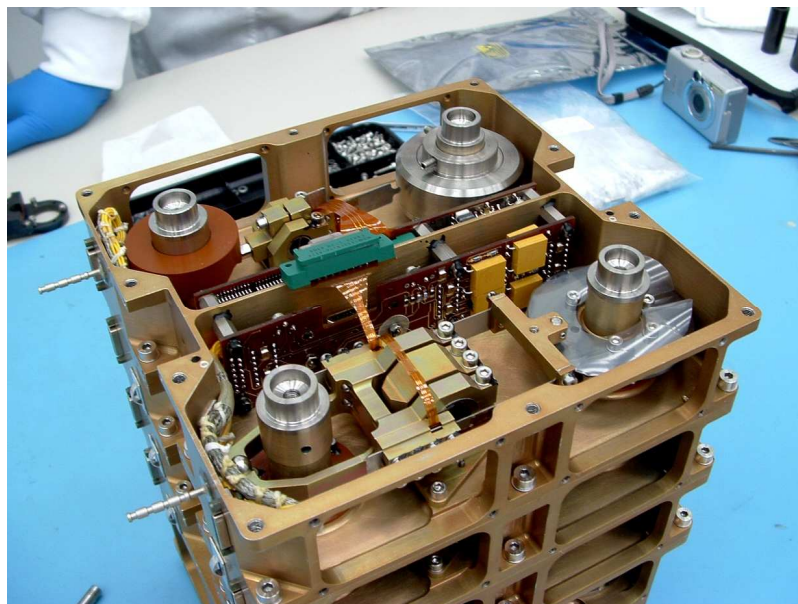


Fig. 2. Fotografía de una de las celdas de experimentos del Tribolab, donde se observa un experimento de BB (en segundo plano) y uno de POD (en primer plano).

⁷ En el apartado II.1 del anexo se incluye información adicional acerca de este tipo de experimentos.

3.2. LA ESTACIÓN ESPACIAL INTERNACIONAL

3.2.1. CARACTERÍSTICAS ORBITALES

La Estación Espacial Internacional (ISS) es una plataforma de investigación internacional, que se encuentra orbitando el planeta Tierra desde el lanzamiento de sus dos primeros módulos en 1998.

A pesar de que el fin de su vida útil estaba fijado en 2016, ésta ha sido recientemente prorrogada hasta 2020.



Fig. 3. Fotografía de la ISS. Fuente [22].

La ISS se mantiene en una órbita casi circular de baja altitud (LEO⁸ - *Low Earth Orbit*) cuyo valor medio varía entre los 278 y los 460 km de altura. Esta altitud es variable debido a la existencia de un ligero arrastre atmosférico que origina que la estación vaya sufriendo una pérdida de altura, por lo que necesita ser elevada a una mayor altitud varias veces a lo largo del año (Fig. 4). Por otra parte cuando los transbordadores espaciales se retiran, la estación sufre un aumento de altitud, por ello su altitud máxima normal es de 425 km. Su velocidad media es de 7.7 km/s, por lo que cada día completa 15.7 vueltas a la Tierra⁹.

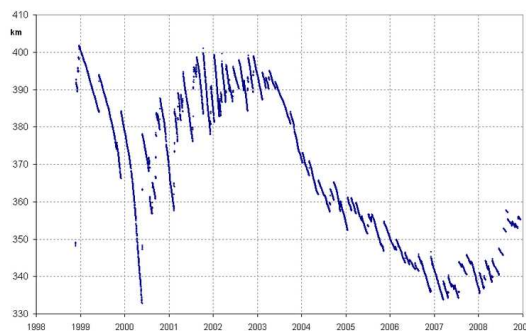


Fig. 4. Evolución de la altitud media de la ISS desde 1998 hasta Enero de 2009. Fuente [23].

La órbita de la ISS mantiene una inclinación sobre el plano del ecuador de 51.6° (Fig. 5). Pero la orientación de la estación es variable con el objeto de maximizar su energía y minimizar los efectos térmicos negativos, lo que depende principalmente del ángulo beta. El ángulo beta es el ángulo existente entre el vector solar y el plano orbital de la ISS, de modo que un ángulo beta elevado implica una mayor exposición solar en uno de los lados de la estación junto con

⁸ Se consideran órbitas LEO aquellas cuya altitud es inferior a 2000 km.

⁹ Se recuerda que la notación empleada para determinar las cifras decimales es el punto en lugar de la coma, con el objeto de mantener la coherencia del documento con la notación empleada por el software empleado en los cálculos.

cortos o incluso nulos periodos de eclipse. Por el contrario, un ángulo bajo implica periodos de eclipse más largos y un menor tiempo de exposición solar. En el apartado I del anexo se incluye información detallada acerca del ángulo beta de la ISS.

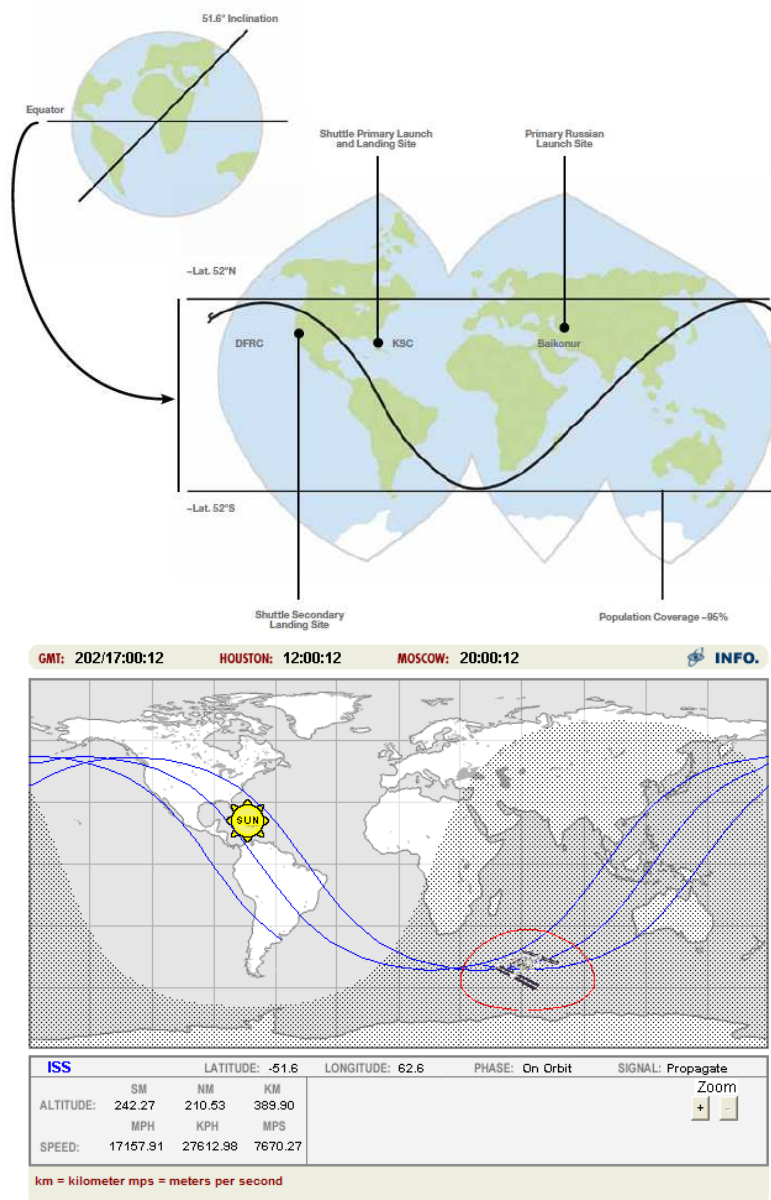


Fig. 5. Orbita de la ISS. Fuente [24].

3.2.2. EL TRIBOLAB EN LA ESTACIÓN ESPACIAL INTERNACIONAL

La misión STS-122 del transbordador espacial Atlantis de la NASA fue la encargada de poner en órbita el laboratorio Columbus de la Agencia Espacial Europea (ESA) hacia la Estación Espacial Internacional (ISS) el 7 de Febrero de 2008.

El laboratorio Columbus, construido por la ESA, es uno de los módulos que conforma la Estación Espacial Internacional. Se trata de un módulo cilíndrico de 4.5 m de diámetro y 6.9 m de longitud, destinado a la realización de experimentos científicos tanto en su interior como en el espacio exterior. Los experimentos situados en el exterior están alojados en dos balcones espaciales donde se ubican las dos plataformas exteriores de experimentación del módulo: EuTEF y SOLAR (Fig. 6).

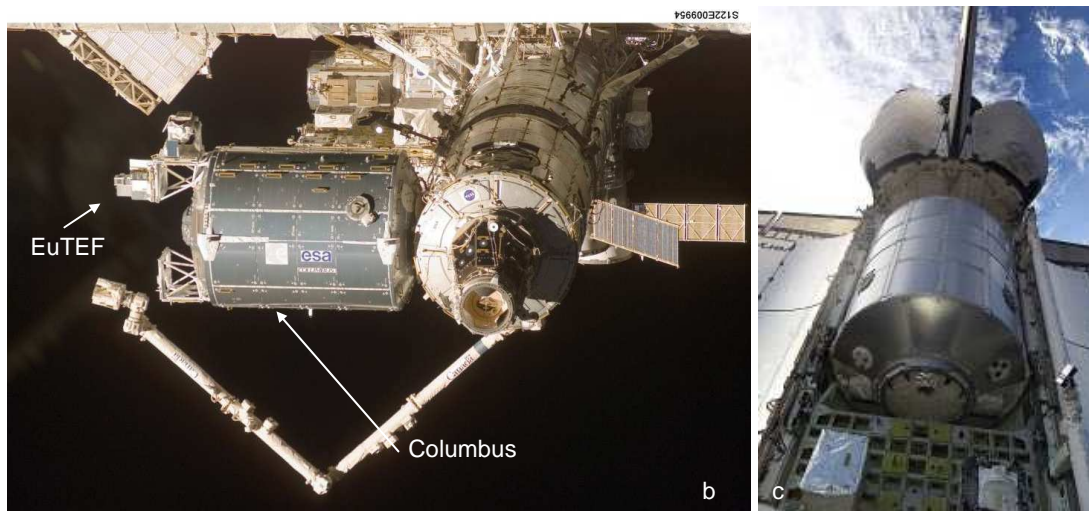
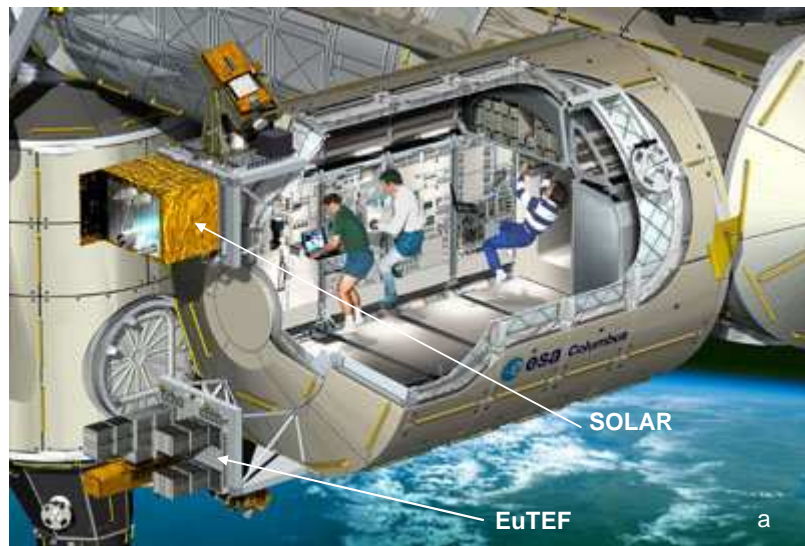


Fig. 6. (a) Imagen del módulo Columbus junto con sus dos plataformas exteriores. (b) Fotografía del módulo Columbus y plataforma EuTEF en la ISS. (c) Módulo Columbus en la bahía de carga del transbordador Atlantis esperando a ser instalado en la ISS. Fuente [22].

La plataforma exterior EuTEF (*European Technology Exposure Facility*), ha alojado 9 dispositivos tecnológicos desarrollados por diferentes empresas, universidades y centros de investigación, entre los cuales se encontraba el TriboLAB.

Tras 5 días en la bahía de carga del transbordador, la plataforma EuTEF fue instalada en el Columbus External Payload Adapter (CEPA), uno de los balcones exteriores del laboratorio europeo Columbus, dando comienzo así a la misión en órbita del TriboLAB.

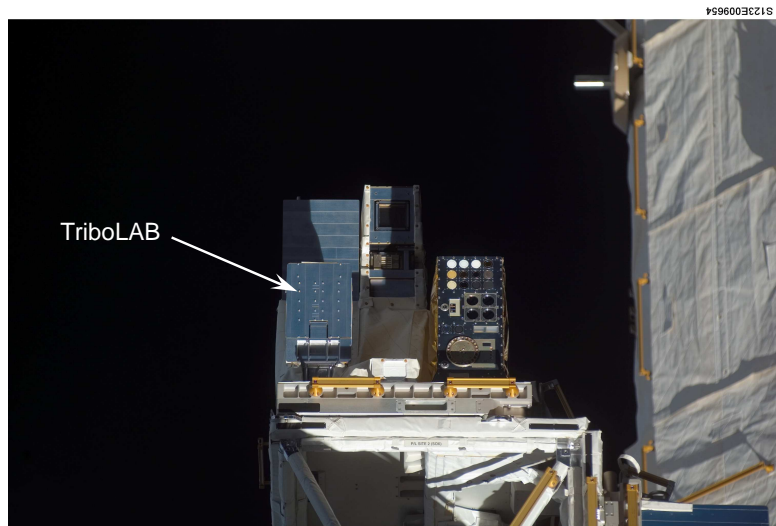


Fig. 7. Fotografía del TriboLAB junto al resto de instrumentos del EuTEF una vez instalado en el balcón exterior de la ISS. Fuente [22].

3.3. CONFIGURACIÓN ESTRUCTURAL

El TriboLAB está dividido en dos módulos generales: el módulo de experimentación y el módulo de control.

- El **módulo de experimentación** es el área donde se realizan los ensayos y se encuentra ubicado en la parte superior del instrumento (Fig. 8). Contiene las 4 celdas de experimentación, cada una de las cuales está compuesta por dos secciones: una para los ensayos de POD y otra para los ensayos de BB, de modo que en total el TriboLAB incluye 4 experimentos POD y 4 BB.
- En el **módulo de control** se encuentran instalados todos los elementos auxiliares necesarios para ejecutar los experimentos (tarjetas electrónicas, drivers, motores, etc.).

Además de estos dos módulos existe una estructura de soporte principal compuesta por cuatro patas, la cual sustenta el instrumento uniéndolo mecánicamente a EuTEF.

Todo ello está formado por una combinación de diferentes materiales entre los que se distinguen aleaciones de aluminio, de acero y de titanio así como otros materiales más específicos como por ejemplo el HAYNEX X-750, el VESPEL SP-1 o el Araldite 2014.

En el apartado II.2 del anexo, se incluye información más detallada acerca de la configuración estructural del instrumento.

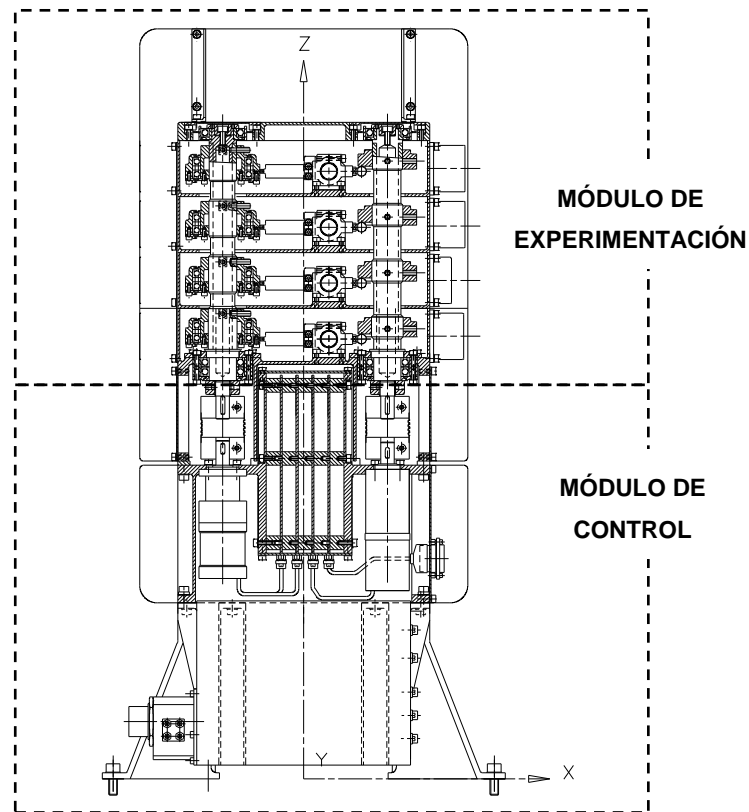


Fig. 8. Configuración estructural del TriboLAB.

3.4. MODOS DE FUNCIONAMIENTO

El TriboLAB dispone de distintos modos de funcionamiento, los cuales están altamente condicionados por la alimentación eléctrica disponible durante las distintas fases de la misión. El suministro de energía llega al TriboLAB a través de tres líneas de alimentación eléctrica diferentes:

- **Alimentación A o Nominal**, a 28 v. Esta línea únicamente ha estado disponible durante la estancia del TriboLAB en la ISS. Corresponde a la alimentación Nominal, cuya misión es proporcionar energía eléctrica al instrumento para su funcionamiento operativo. A pesar de ello, su disponibilidad a lo largo de toda la misión no estaba garantizada debido a las restricciones de potencia existentes en la ISS.

- **Alimentación B o de Survival**, a 120 v. Esta línea, al igual que la Nominal, únicamente ha estado disponible durante la estancia del TribolAB en la ISS. Pero a diferencia de aquella, la misión de esta línea es la de proporcionar energía eléctrica a una parte de los dispositivos de control térmico. Su disponibilidad a lo largo de toda la misión tampoco estaba garantizada.
- **Alimentación C o de Stay Alive**, a 28 v. Esta línea por el contrario, únicamente ha estado disponible durante la estancia del TribolAB en el transbordador espacial.

Dependiendo de la alimentación eléctrica disponible, de la fase de la misión, de si se está o no realizando experimentos científicos, etc. el TribolAB presenta una gran cantidad de modos de operación correspondientes a distintas situaciones de funcionamiento. Por ello, debido a su elevado número, se ha decidido restringir el estudio realizado en esta tesis de máster al comportamiento térmico del instrumento bajo 5 de los modos de operación existentes. Estos modos son los que se describen a continuación¹⁰.

- **Modo Stay Alive (SAM)**. El modo Stay Alive tiene lugar durante la estancia del TribolAB en la bahía de carga del transbordador. En este modo de operación el instrumento está apagado y únicamente el control térmico diseñado para este modo de operación está en funcionamiento.
- **Transfer phase o fase de traslado**. Esta fase comprende el traslado del TribolAB desde el transbordador hasta la ISS, y durante la misma el instrumento está completamente apagado y sin ningún tipo de alimentación eléctrica.
- **Modo Survival (SUM)**. El instrumento está en modo Survival, cuando se encuentra ubicado en la ISS pero únicamente dispone de la alimentación de Survival (B). Por lo tanto el instrumento se encuentra apagado y únicamente el control térmico diseñado para este modo de operación está activo.
- **Modo de Investigación (IIM) o Experimentación**. Este modo tiene lugar cuando el TribolAB está ubicado en la ISS, las alimentaciones A y B están disponibles y se están ejecutando los experimentos de tribología.
- **Modo Stand By (SBM)**. El instrumento está en modo Stand By cuando se encuentra ubicado en la ISS con las alimentaciones A y B disponibles, pero está a la espera de los telecomandos que le indiquen si debe iniciar o no alguno de los experimentos. Existe un modo adicional **Modo No Nominal (NNM) con alimentación de Survival disponible**, que si bien es técnicamente distinto del modo Stand By, no lo es desde el punto de vista térmico. Por ello, con el objeto de facilitar la comprensión del trabajo realizado en esta tesis, sus datos de temperatura se han considerado pertenecientes al modo Stand By.

¹⁰ El resto de modos pueden consultarse en el apartado II.3 del anexo

3.5. CONFIGURACIÓN TÉRMICA

El TriboLAB ha sido diseñado para soportar las extremas temperaturas a las que puede estar expuesto durante toda su vida, lo que incluye el transporte, la campaña de ensayos, el lanzamiento y la vida orbital.

Para su correcto funcionamiento, los distintos dispositivos mecánicos y electrónicos que forman el TriboLAB deben mantenerse entre ciertos límites de temperatura que son específicos para cada componente. Entre ellos, los sensores (montados en los experimentos), son los que presentan el intervalo de temperaturas de funcionamiento más restrictivo (entre 0 y 40 °C).

Debido a las limitaciones de potencia y de área de radiador existentes para la integración del TriboLAB en EuTEF, la utilización de este rango de temperaturas como valor objetivo para todo el equipo no permite alcanzar una solución válida. Para solventar esta dificultad, se decidió dividir el TriboLAB en dos partes térmicamente aisladas entre sí.

De este modo, el control térmico se ha diseñado en base a dos niveles de temperatura diferentes: una parte de temperatura más fría correspondiente a los módulos de los experimentos y una parte de temperatura más alta correspondiente a los módulos de los motores y la electrónica. Ello permite que el sistema de control térmico del instrumento sea mucho más efectivo posibilitando el cumplimiento de todos los requisitos de diseño.

3.6. DESCRIPCIÓN DEL CONTROL TÉRMICO

La idea principal que ha guiado el diseño del control térmico del TriboLAB ha sido la de conseguir un sistema lo más simple posible, con el objeto de minimizar tanto los costos como las probabilidades de fallos potenciales.

Por este motivo, se ha optado por un control térmico de tipo pasivo basado en la disipación de calor a través de una superficie denominada radiador hacia el espacio profundo en las situaciones calientes, y el uso de dispositivos calentadores para aumentar la temperatura del equipo en las situaciones frías.

A continuación se realiza una breve descripción de los componentes principales que forman el sistema de control térmico del TriboLAB¹¹.

- El **radiador**. La misión del radiador es disipar hacia el espacio exterior, el calor generado en el TriboLAB durante su funcionamiento. Ello permite que en las situaciones calientes, el instrumento permanezca dentro del rango de temperaturas admisibles. Está

¹¹ La información detallada puede consultarse en el apartado II.4 del anexo.

compuesto por todas las superficies existentes en la cara RAM¹² del TriboLAB, las cuales están recubiertas con material especial con el objeto de mejorar sus características termo-ópticas (Fig. 9 (a)).

▪ Las **mantas térmicas** (MLI – *Multi Layer Insulation*). Su misión es impedir la transmisión de calor a través de las caras no autorizadas. Por ello, están fabricadas en material aislante y recubren todas las caras del TriboLAB con la excepción del radiador (Fig. 9 (b)).

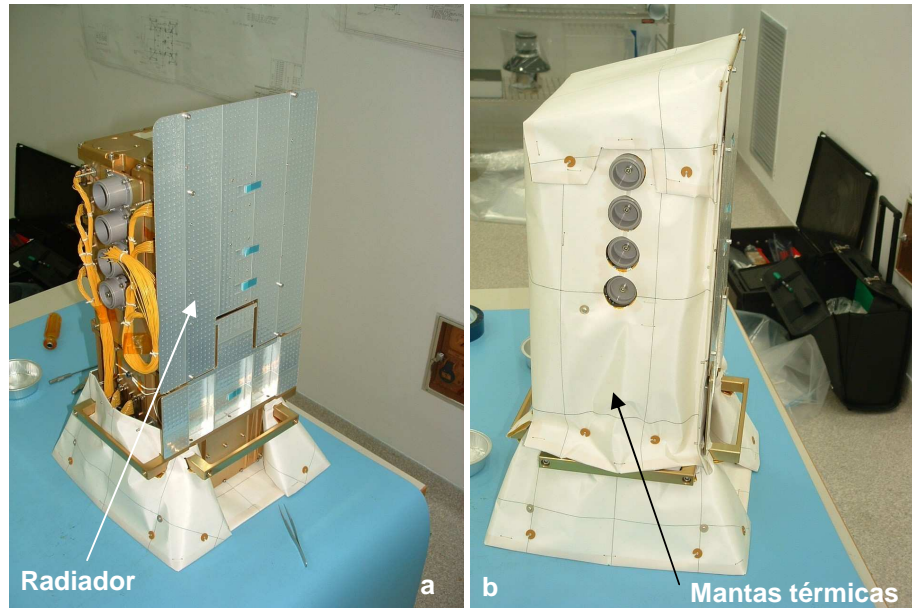


Fig. 9. (a) Imagen del radiador. (b) Imagen de las mantas térmicas.

▪ Los **heaters** no son sino unas resistencias eléctricas cuya misión es la de calentar el equipo en las situaciones frías, con el fin de mantenerlo dentro de su rango de temperaturas admisibles (Fig. 10). La posición y potencia de los heaters se definió de acuerdo a las necesidades del control térmico y a la alimentación eléctrica disponible, resultando en tres grupos distintos.

- Los **heaters de Stay Alive (STA)**, conectados a la alimentación C, operan cuando el TriboLAB está en modo Stay Alive. Su misión no es solo mantener el instrumento en su rango de temperaturas de no operación durante su estancia en el transbordador, sino también precalentar el equipo convenientemente de modo que este sea capaz de soportar la fase de traslado hasta la ISS.
- La misión de los **heaters de Survival (SURV)**, conectados a la alimentación B, es mantener el equipo dentro de su rango de temperaturas admisibles siempre que tengan alimentación eléctrica.

¹² La cara RAM del TriboLAB corresponde a la cara orientada hacia el vector de avance de la ISS.

- Los **heaters Nominales (TEM)**, conectados a la alimentación A, tienen dos misiones complementarias. Su función principal es asegurar las temperaturas adecuadas en las celdas de experimentos durante la ejecución de los mismos, pero también deben ser capaces de mantener el TriboLAB dentro de su rango de temperaturas de no operación en caso de que la alimentación B no esté disponible.

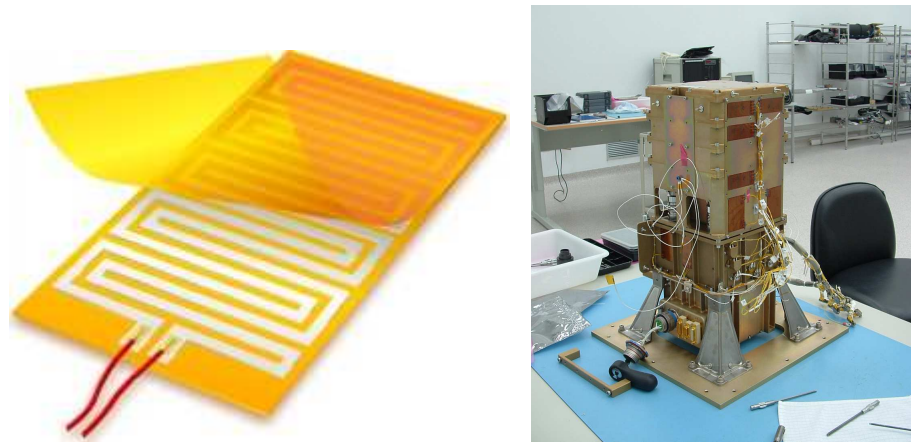


Fig. 10. Imagen de un heater (izquierda). Heaters instalados sobre el TriboLAB (derecha).

- Los **termostatos**. Si bien el funcionamiento de los heaters Nominales se encuentra controlado mediante software, no ocurre lo mismo con los heaters de Survival y Stay Alive los cuales son controlados mediante termostatos (Fig. 11). Tanto la posición como las temperaturas de operación de los termostatos han sido definidas como parte del diseño del control térmico.



Fig. 11 Imagen de un termostato.

- El **TRP (Temperature Reference Point)**, es un punto del TriboLAB considerado suficientemente representativo de la temperatura del equipo. De este modo, monitorizando la evolución térmica de este punto mediante un sensor de temperatura, se conoce el comportamiento térmico del instrumento.

3.7. DISEÑO DEL CONTROL TÉRMICO

Tal y como se ha introducido previamente, cualquier equipo espacial debe soportar condiciones ambientales muy extremas. Durante los periodos de eclipse las temperaturas son extremadamente bajas, mientras que durante los periodos de exposición, los flujos de calor solar inciden sobre el equipo con gran intensidad debido a la ausencia de atmósfera. Una dificultad adicional es la ausencia de aire que imposibilita la convección, limitando la evacuación del calor a la radiación hacia el espacio exterior, y en este caso en particular a la conducción hacia la ISS.

Tanto los componentes mecánicos como los electrónicos, especialmente estos últimos, únicamente son capaces de funcionar dentro de su intervalo de temperaturas de operación, e incluso pueden deteriorarse de forma irreversible si superan sus límites de temperatura de no operación (Tabla 4). Por ello, el objetivo del sistema de control térmico es mantener el equipo dentro de dichos intervalos en cualquiera de las situaciones esperadas a lo largo de la misión.

Componentes	Intervalo de operación	Intervalo de no operación	Encendido
Motor de giro continuo	$-40^{\circ}\text{C} < T < +80^{\circ}\text{C}$	$-55^{\circ}\text{C} < T < +90^{\circ}\text{C}$	$-55^{\circ}\text{C} < T$
Motor de posicionamiento	$-40^{\circ}\text{C} < T < +80^{\circ}\text{C}$	$-55^{\circ}\text{C} < T < +90^{\circ}\text{C}$	$-55^{\circ}\text{C} < T$
Rodamientos	$-40^{\circ}\text{C} < T < +80^{\circ}\text{C}$	$-55^{\circ}\text{C} < T < +90^{\circ}\text{C}$	$-55^{\circ}\text{C} < T$
Microswitches	$-55^{\circ}\text{C} < T < +100^{\circ}\text{C}$	$-55^{\circ}\text{C} < T < +100^{\circ}\text{C}$	$-55^{\circ}\text{C} < T$
Sensores	$+0^{\circ}\text{C} < T < +40^{\circ}\text{C}$	$-55^{\circ}\text{C} < T < +90^{\circ}\text{C}$	$-55^{\circ}\text{C} < T$
Electrónica	$-40^{\circ}\text{C} < T < +80^{\circ}\text{C}$	$-55^{\circ}\text{C} < T < +100^{\circ}\text{C}$	$-55^{\circ}\text{C} < T$

Tabla 4. Requisitos térmicos del TriboLAB.

El diseño del control térmico del TriboLAB se ha realizado mediante modelos térmicos matemáticos (TMM – *Thermal Mathematical Models*) siguiendo la metodología habitual aplicada en el diseño del control térmico de satélites. Así, en base a los entornos térmicos esperados y a los distintos modos de operación del instrumento se definen los dos casos críticos de diseño, los denominados caso caliente y caso frío.

- El **caso caliente** permite dimensionar el área del radiador, ya que representa la situación en que el equipo alcanzará las temperaturas más elevadas y en la que será necesario disipar la mayor cantidad de calor. Esta situación corresponde a la combinación del modo de operación del instrumento en que se producen las máximas disipaciones de calor junto con el entorno térmico más caliente esperado en órbita.

- El **caso frío** por el contrario, permite dimensionar los heaters, ya que representa la situación en que el equipo alcanzará las temperaturas más bajas. Esta situación corresponde a la combinación del modo de operación del instrumento con menores disipaciones, junto con el entorno térmico más frío esperado en órbita.

En este caso se ha prestado también especial atención a la situación correspondiente al traslado del equipo desde la bahía de carga del transbordador hasta la ISS. Puesto que durante dicho traslado el equipo no dispone de alimentación eléctrica, es necesario precalentarlo previamente de modo que sea capaz de soportar el enfriamiento producido durante su traslado (de una duración máxima de 5 horas) sin alcanzar temperaturas por debajo de su límite admisible.

Los modelos térmicos matemáticos son modelos representativos de la configuración termo-estructural del TriboLAB, los cuales permiten predecir tanto la distribución de temperaturas en el equipo como el calor intercambiado con el entorno, bajo unas condiciones de entorno térmico previamente definidas. Su resolución se ha llevado a cabo mediante un solver capaz de resolver las ecuaciones de transmisión de calor por conducción y radiación, para régimen transitorio.

Posteriormente, el diseño del control térmico se va refinando en base al estudio de otros casos de operación adicionales y a los datos correspondientes a las condiciones de contorno las cuales van siendo afinadas a medida que avanza el proceso de diseño.

4. DESCRIPCIÓN DE LOS DATOS

Los siguientes subapartados incluyen la descripción de los datos estudiados en esta tesis de máster, los cuales se clasifican en cuatro grupos distintos.

En primer lugar se realiza una breve descripción de los datos correspondientes a las condiciones de entorno térmico empleadas en el diseño del control térmico del TriboLAB, con el objeto de introducir al lector en el origen de los distintos comportamientos térmicos considerados durante el diseño del instrumento.

A continuación se muestran las temperaturas registradas en el TriboLAB durante la campaña de ensayos térmicos realizada para alcanzar la calificación de apto para el vuelo.

Posteriormente se describen los datos correspondientes a las distintas temperaturas obtenidas como resultado de los modelos térmicos matemáticos empleados en el diseño del control térmico del instrumento, para los distintos casos de diseño estudiados.

Por último, se exponen los datos correspondientes a las temperaturas registradas en el TriboLAB durante su misión a bordo de la Estación Espacial Internacional.

4.1. ENTORNO TÉRMICO

Tal y como se ha introducido previamente, el entorno a que está sometido el TriboLAB durante su misión resulta un factor clave en su comportamiento térmico.

Los datos correspondientes al entorno térmico esperado para cada uno de los experimentos incluidos en EuTEF durante la misión fueron proporcionados por Carlo Gavazzi Spazio (CGS), la compañía encargada de realizar la integración de los distintos instrumentos en la plataforma EuTEF.

Inicialmente CGS proporcionó un entorno térmico de partida estimado en base a la posición del EuTEF en la ISS, la orientación de esta última, el ángulo beta de su órbita, etc., el cual fue empleado por cada uno de los experimentadores en sus propios modelos matemáticos.

Posteriormente los modelos correspondientes a cada instrumento junto con sus resultados fueron enviados a CGS quien los integró en su modelo matemático representativo de toda la plataforma EuTEF junto con datos actualizados relativos a la órbita de la ISS, calculando así un nuevo entorno térmico para cada uno de los experimentos. De este modo, mediante sucesivas iteraciones, la predicción del entorno térmico se va refinando junto con los modelos matemáticos de la plataforma y de cada uno de los experimentos.

Como ya se ha indicado con anterioridad, el diseño del control térmico se basa en el estudio de distintas situaciones más calientes o más frías. Por lo que los datos proporcionados por CGS

no correspondían a un único entorno sino a cuatro distintos: entorno caliente, frío y nominal, los cuales tienen lugar una vez los instrumentos han sido ubicados en la ISS; y un entorno adicional correspondiente a la situación en que los instrumentos están en el transbordador junto con el traslado posterior hasta la ISS.

Cada uno de esos entornos térmicos definidos para el TriboLAB está determinado fundamentalmente por los flujos de calor que inciden sobre él, y por las condiciones de radiación hacia el espacio exterior.

Los flujos de calor se clasifican en tres tipos distintos en función de su procedencia: el **solar**, correspondiente a la luz del sol que incide directamente sobre el equipo; el **albedo**, el cual corresponde a la luz del sol que es reflejada por la tierra e incide sobre el equipo; y por último el **infrarrojo**, correspondiente al calor de infrarrojo emitido por la tierra.

Las temperaturas del entorno pueden agruparse también en dos tipos: la de la plataforma EuTEF y las temperaturas de sink (T_{sink}) correspondientes a la cara del radiador¹³. Ahora bien, debido a la configuración térmico-estructural del TriboLAB la transmisión de calor entre éste y el EuTEF es muy baja. Por ello, en lo que respecta a esta tesis, podemos centrarnos únicamente en las temperaturas correspondientes al espacio exterior hacia el cual se radia el calor, y entre estas, únicamente las correspondientes al radiador.

4.1.1. DESCRIPCIÓN DE LOS DATOS DEL ENTORNO TÉRMICO

A continuación se muestran los datos correspondientes a los flujos de calor absorbidos por el TriboLAB en órbita y las temperaturas de sink en la cara del radiador, los cuales fueron proporcionados por CGS tal y como se ha explicado previamente. Los datos mostrados en las imágenes corresponden al periodo de una órbita (1.55 horas).

A pesar de que se dispone de distintos valores para cada uno de los nodos de los TMM correspondientes al radiador, las imágenes muestran los datos simplificados para facilitar su comprensión. Así mismo no se ha incluido el entorno correspondiente a la estancia del instrumento en el transbordador y el traslado posterior. En el apartado III del anexo se incluyen las imágenes correspondientes a los datos completos, junto con los parámetros de la órbita correspondientes a cada caso.

La simplificación realizada en el caso de los flujos de calor ha consistido en realizar la suma de los mismos, mostrando así el flujo de calor total que llega al TriboLAB a través del radiador. En el caso de las temperaturas de sink resulta más apropiado calcular la media de las mismas.

¹³ Se denomina temperatura de sink o T_{sink} a la temperatura de referencia en la transmisión de calor por radiación, la cual representa la temperatura del cuerpo más frío hacia el cual es irradiado el calor, en este caso, el espacio exterior.

Todo ello se ha realizado de modo separado para los distintos entornos térmicos analizados (nominal, frío y caliente).

En el caso de los flujos de calor no es posible observar los datos correspondientes al entorno nominal, pero ello es debido a que coinciden con los del entorno frío.

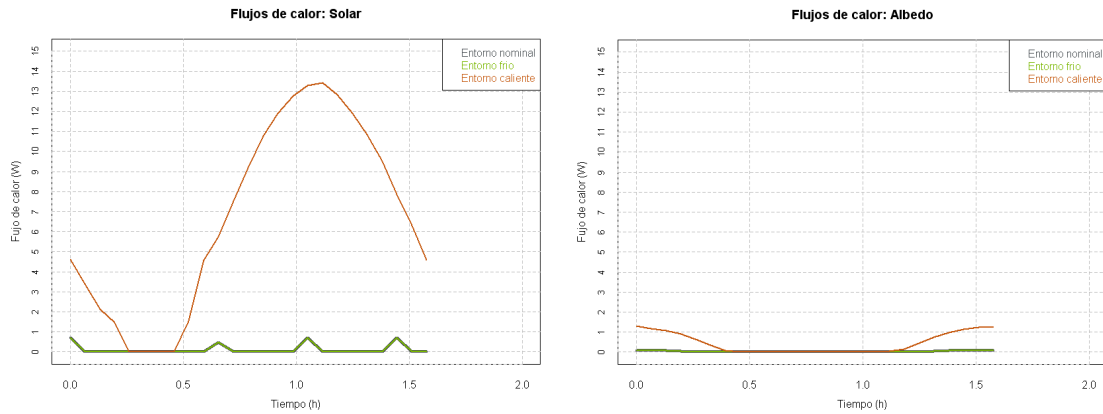


Fig. 12. Flujos de calor solar (izquierda) y de albedo (derecha).

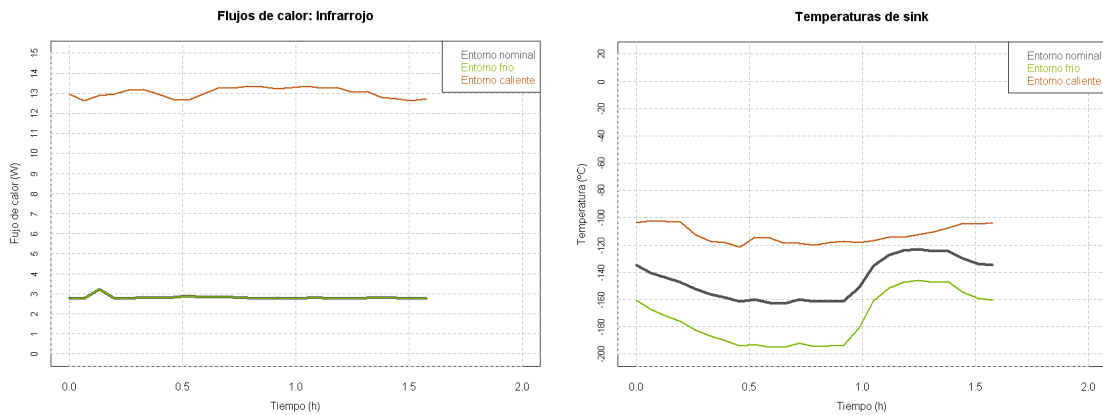


Fig. 13. Flujos de calor de infrarrojo (izquierda) y temperaturas de sink (derecha).

4.1.2. INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS DEL ENTORNO TÉRMICO

- En general las condiciones de contorno no son constantes durante toda la órbita, sino que presentan variaciones a lo largo de la misma. Estas variaciones son debidas principalmente a la existencia de periodos de eclipse junto con periodos de exposición solar. Por ello, las mayores variaciones se observan en los datos correspondientes al flujo de calor solar correspondiente al caso caliente (Fig. 12 (izquierda)).

- Los denominados entorno frío y nominal son prácticamente iguales en lo que respecta a los flujos de calor que inciden sobre el instrumento, diferenciándose únicamente en las temperaturas de sink que en el caso del entorno nominal resultan algo más elevadas.
- Por el contrario, en el caso del entorno caliente, los flujos de calor sí son mucho más elevados, especialmente los correspondientes al calor solar y al de infrarrojo. La temperatura de sink también es más elevada que en el resto de los casos.

4.2. ENSAYOS TÉRMICOS

El TriboLAB, como cualquier vehículo espacial, ha sido sometido a una campaña de ensayos térmicos consistente en un ensayo de ciclado térmico (*vacuum temperature cycling*) y un ensayo de balance térmico (*termal balance test*).

El objetivo del ensayo de ciclado es comprobar la no existencia de materiales defectuosos o errores de montaje. Pero desde el punto de vista de esta tesis de máster carece de interés.

El objetivo del ensayo de balance térmico es comprobar que el sistema de control térmico diseñado funciona correctamente y es capaz de mantener el equipo dentro de su rango de temperaturas admisibles, en los entornos térmicos esperados durante la misión. Adicionalmente permite comprobar la similitud entre los modelos térmicos matemáticos y el comportamiento real del equipo.

Ambos ensayos fueron superados satisfactoriamente, por lo que no fue necesario realizar modificaciones posteriores sobre el control térmico. Así mismo, la semejanza con los modelos matemáticos se considero suficientemente buena.

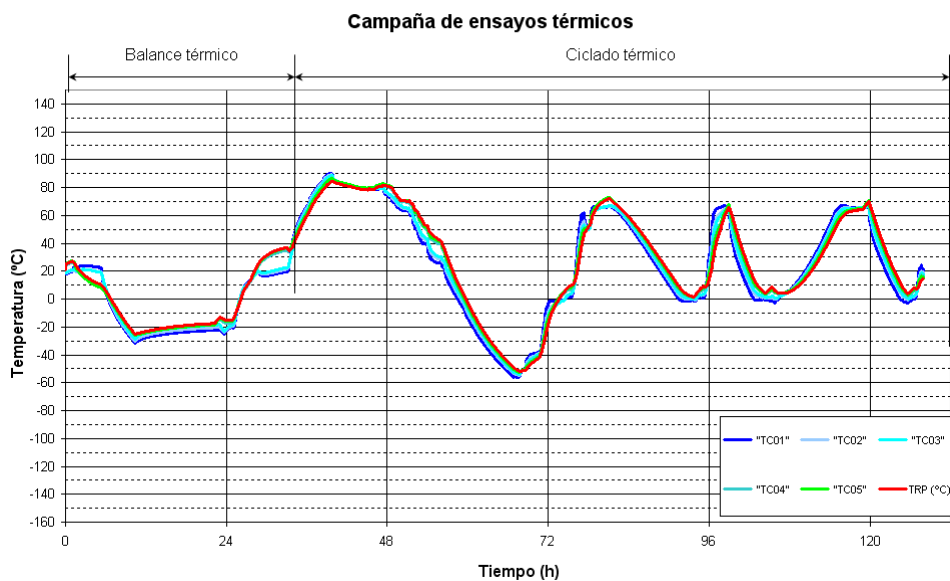


Fig. 14. Mediciones de temperatura realizadas sobre el TriboLAB durante la campaña de ensayos en los distintos puntos de medición (posiciones mostradas en las figuras Fig. 15 y Fig. 16)

4.2.1. DESCRIPCIÓN DE LOS DATOS DE LOS ENSAYOS TÉRMICOS

Los datos objeto de esta descripción corresponden a las temperaturas medidas en el instrumento durante la realización de los ensayos de balance térmico. Puesto que el número de situaciones ensayadas es muy elevado, debido a las numerosas combinaciones de modos de operación y entornos térmicos, se ha decidido restringir el estudio realizado en esta tesis a las 4 situaciones correspondientes a los principales casos de diseño: Modo Stay Alive, fase de traslado desde el transbordador hasta la ISS, modo Survival en entorno frío, y por último el modo de ejecución de experimentos en entorno caliente.

Las mediciones de temperatura se han obtenido mediante termopares¹⁴ fijados sobre la superficie del radiador del TriboLAB, cuyas posiciones se indican en la Fig. 15. Adicionalmente se han registrado las temperaturas en el TRP, cuya localización se indica en la Fig. 16.

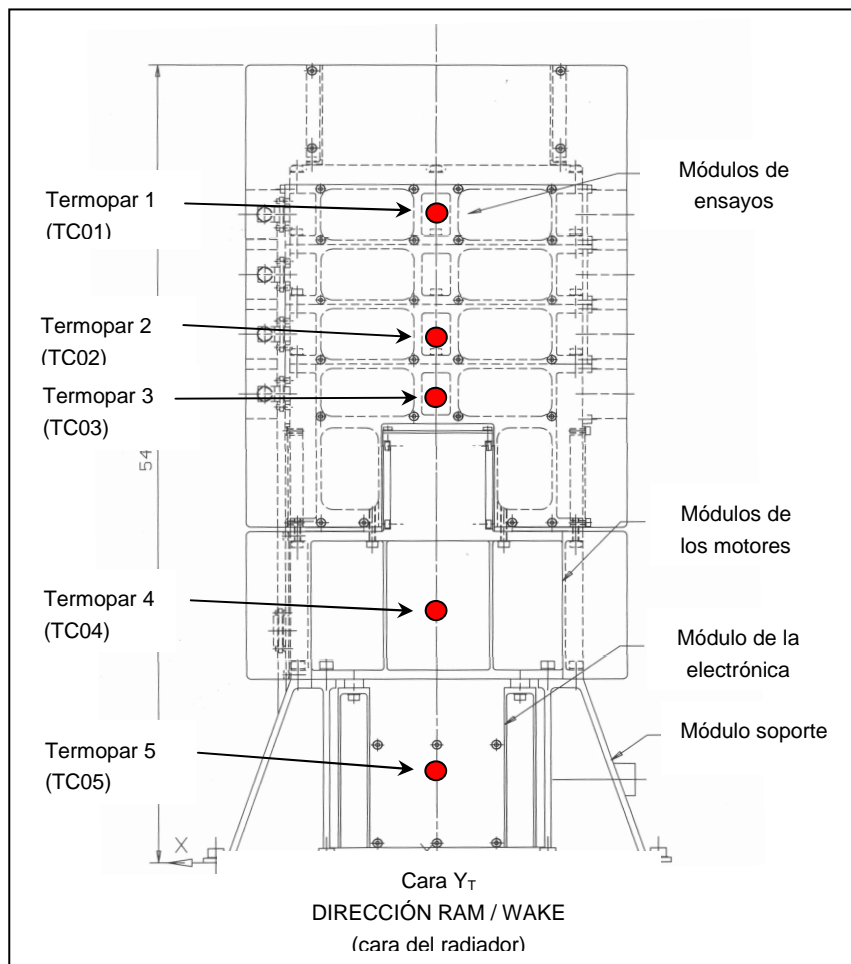


Fig. 15. Posición de los termopares durante los ensayos térmicos.

¹⁴ Un termopar es un sensor de temperatura formado por la unión de dos metales distintos los cuales producen un voltaje que es función de la diferencia de temperatura entre uno de los extremos (punto de medición) y el otro (temperatura ambiente). De este modo, mediante el registro de ese voltaje es posible determinar la diferencia de temperatura entre ambos extremos.

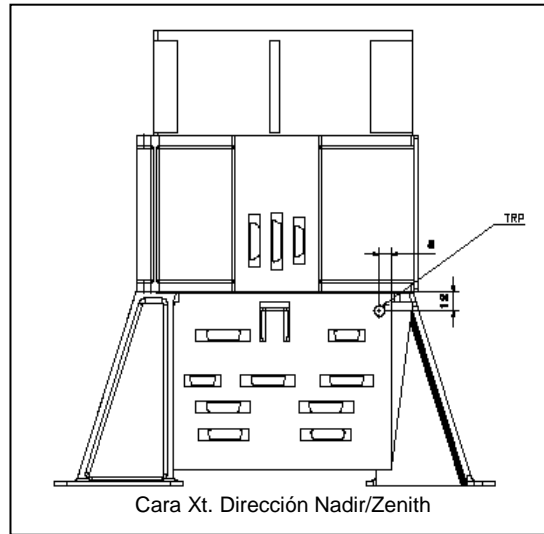


Fig. 16. Posición del TRP.

Las imágenes siguientes muestran la evolución de la temperatura del TriboLAB durante el desarrollo de los ensayos térmicos.

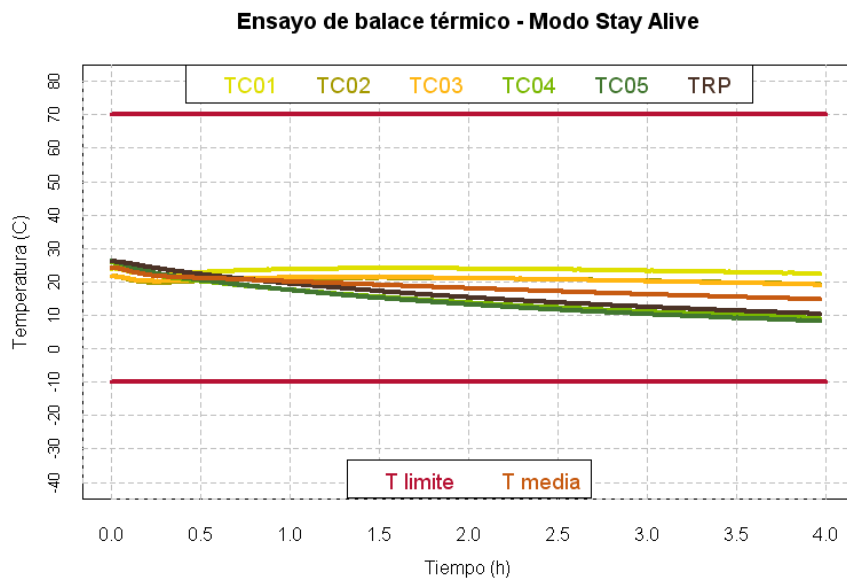


Fig. 17. Temperaturas del TriboLAB durante el ensayo de balace térmico. Modo Stay Alive en entorno frío.

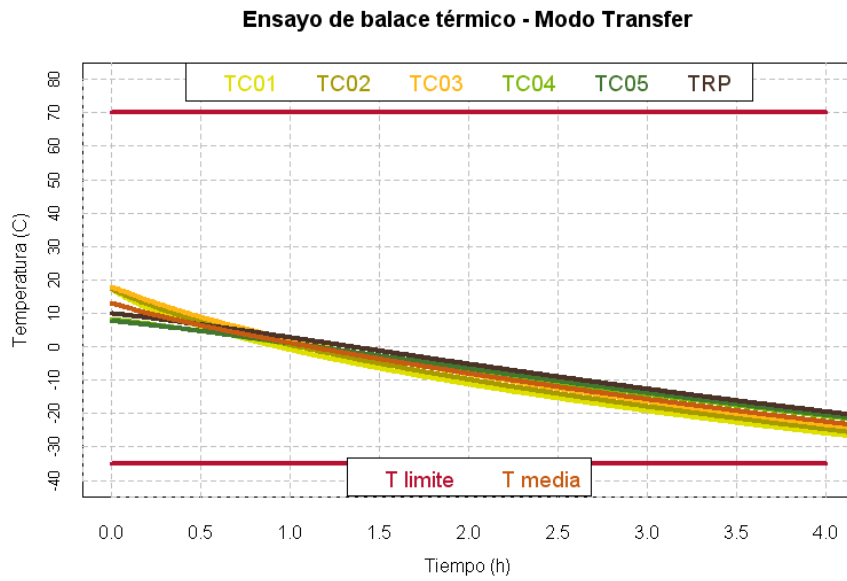


Fig. 18. Temperaturas del TriboLAB durante el ensayo de balance térmico. Operación de traslado desde el transbordador hasta la ISS en entorno frío.

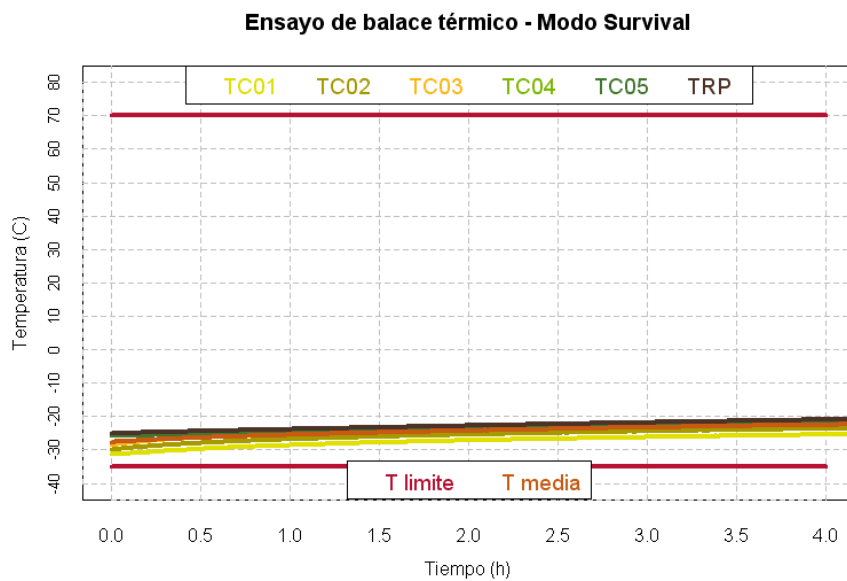


Fig. 19. Temperaturas del TriboLAB durante el ensayo de balance térmico. Modo Survival en entorno frío.

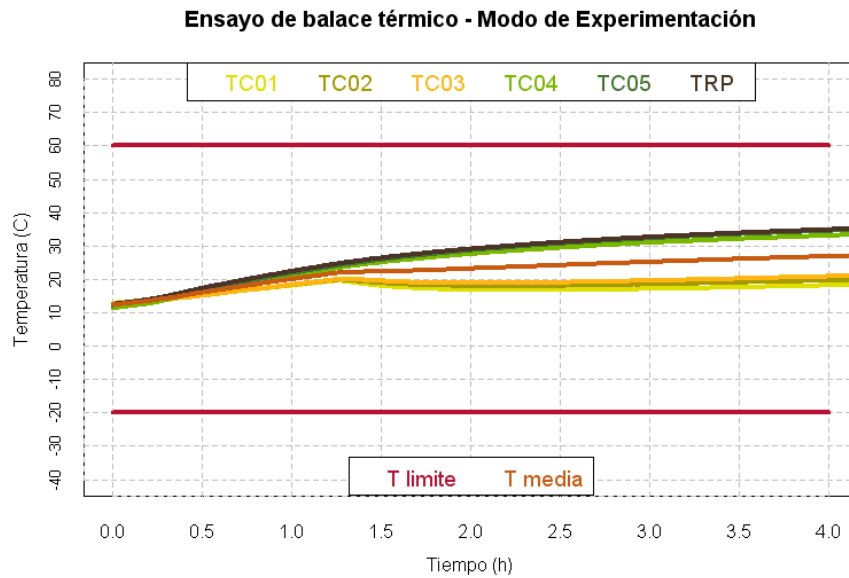


Fig. 20. Temperaturas del TriboLAB durante el ensayo de balace térmico.
Modo de Experimentación en entorno caliente.

4.2.2. INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS DE LOS ENSAYOS TÉRMICOS

- En todos los casos el sistema de control térmico diseñado para cada uno de los modos de funcionamiento del TriboLAB funcionó correctamente, manteniendo el equipo dentro de los valores de temperatura admisibles (T_{limite} en las imágenes previas).
- Con la excepción del modo Transfer, para el cual la duración del ensayo estaba fijada en 5 horas, el tiempo de ensayo viene dado por el tiempo que tarda el equipo en alcanzar la estabilización térmica.

Para ello, el criterio de estabilización definido inicialmente fue de una velocidad de variación de temperatura menor de $1^{\circ}\text{C}/\text{h}$. Ahora bien, en el caso de los modos de Stay Alive y de Experimentación dicho criterio fue modificado adoptándose un valor de $2^{\circ}\text{C}/\text{h}$. El motivo de esta modificación fue la restricción de tiempo existente para la ejecución de los ensayos, junto con el hecho de que las temperaturas registradas en el equipo se encontraban muy alejadas de los valores límite (Fig. 17 y Fig. 20).

La Fig. 21 muestra la derivada de la temperatura media registrada durante el ensayo de los casos estudiados, representativa de la velocidad de enfriamiento/calentamiento del instrumento.

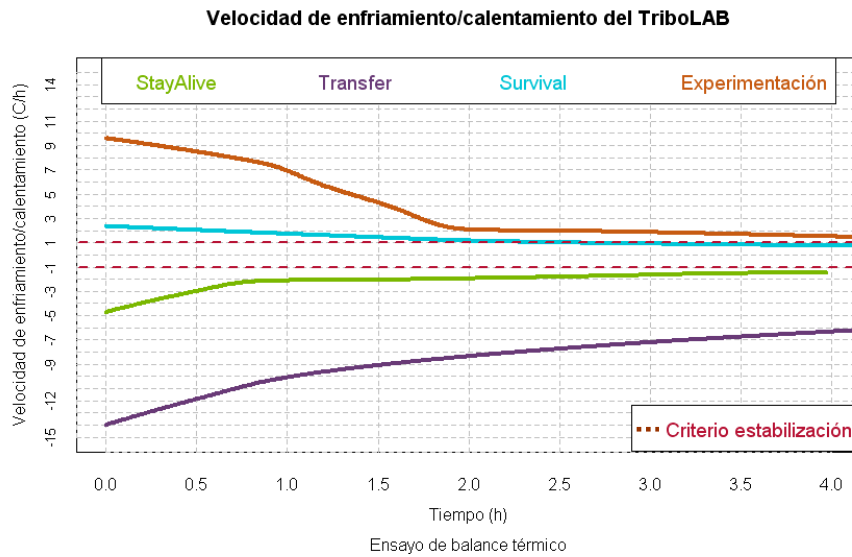


Fig. 21. Velocidad de enfriamiento/calentamiento del TriboLAB durante el ensayo de balance térmico.

- El estudio tanto de la varianza como de la desviación estándar de las temperaturas del equipo, nos proporciona una indicación del gradiente térmico existente en el mismo (Fig. 22 y Fig. 23).

Así cuando las temperaturas del equipo son bajas, como es el caso de los modos de Transfer y Survival, la temperatura del equipo es muy homogénea a partir de la primera media hora de ensayo (desviación estándar menor de 3 °C).

Por el contrario cuando las temperaturas del equipo son más elevadas, como en el caso de los modos Stay Alive y de Experimentación, el gradiente en el equipo es mayor alcanzando valores de desviación estándar de hasta 8°C. Ello es debido a la configuración térmica del equipo, diseñada para mantener temperaturas más elevadas en la parte inferior del equipo y más bajas en la parte superior (ver apartado 3.5).

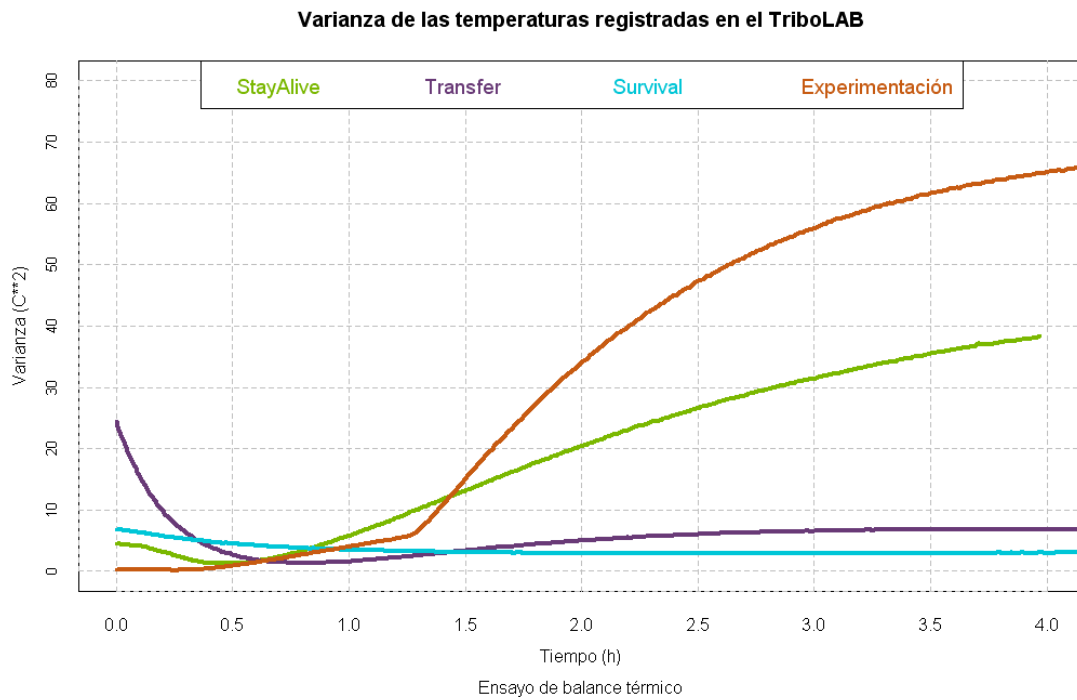


Fig. 22. Varianza de las temperaturas del TribolAB durante el ensayo de balance térmico.

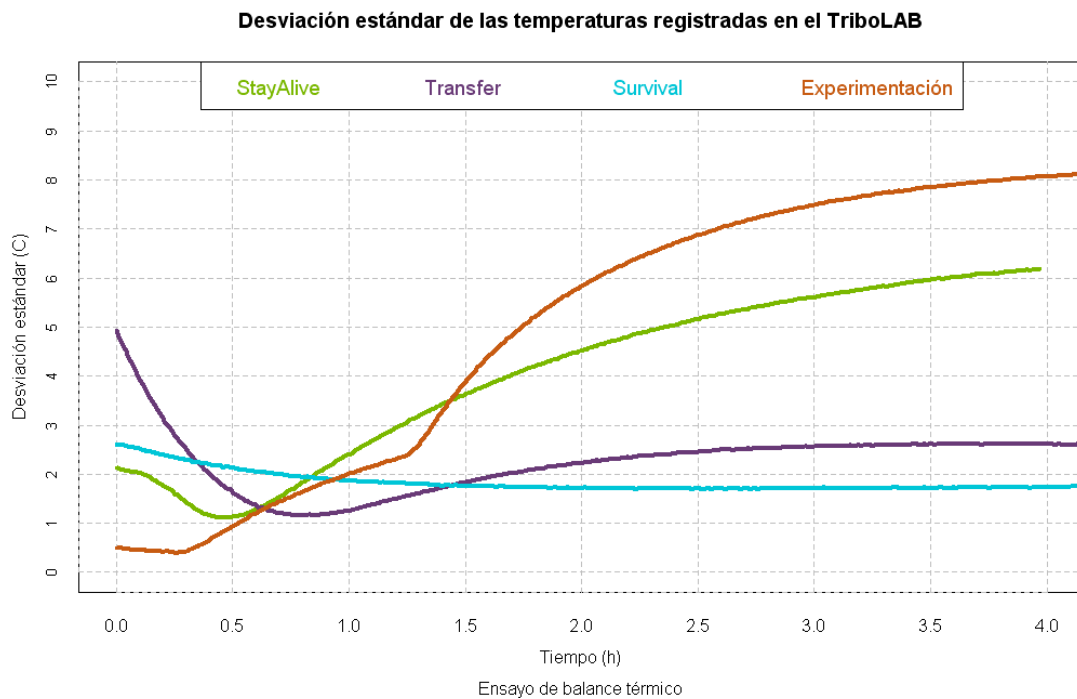


Fig. 23. Desviación estándar de las temperaturas del TribolAB durante el ensayo de balance térmico.

4.3. MODELOS TÉRMICOS MATEMÁTICOS (TMM)

Los datos objeto de esta descripción corresponden a las temperaturas obtenidas como resultado de los modelos térmicos matemáticos empleados en el diseño del control térmico del TriboLAB.

Tras una breve introducción (apartado 4.3.1) se muestran los resultados correspondientes a las simulaciones representativas de los ensayos de balance térmico (apartado 4.3.2). Por ello, los valores de temperatura que se indican corresponden a los nodos del modelo matemático que representan las áreas del TriboLAB más próximas a los puntos donde fueron medidas las temperaturas durante la fase de ensayos.

Posteriormente, se muestran los resultados de las simulaciones correspondientes al comportamiento del instrumento en órbita (apartado 4.3.3). En este caso, únicamente se incluyen los valores de temperatura correspondientes al nodo 85030, el cual representa el TRP y por ello la temperatura del instrumento en órbita. Tan solo se muestran los resultados correspondientes al modo de operación Stand By, por ser este el modo seleccionado para el estudio del comportamiento del TriboLAB en órbita.

4.3.1. MODELOS TÉRMICOS MATEMÁTICOS

La estrategia de diseño del control térmico del TriboLAB se ha basado en la realización de modelos térmicos matemáticos (TMM – *Thermal Mathematical Models*) cada vez más representativos del equipo, junto con su verificación mediante ensayos térmicos.

Los modelos matemáticos se han llevado a cabo aplicando el método de los nodos [25]. En este método la estructura a modelizar se divide en sectores cuya temperatura se considera uniforme, sustituyendo cada uno de ellos por un nodo al cual se le asigna la misma capacidad térmica que presentaba el sector al que sustituye. Por otra parte, se calculan los valores correspondientes a las conductancias lineales (de conducción) entre los distintos nodos así como las conductancias radiativas (de radiación). Con todo ello, se forma el modelo sobre el que se aplican las distintas condiciones de contorno representativas de cada caso.

La resolución de los modelos se ha llevado a cabo mediante la aplicación TMG incluida en el software I-DEAS de Siemens PLM Software.

A pesar de que el modelo matemático del TriboLAB está formado por 47 nodos, a continuación se indica únicamente la posición de los nodos cuyas temperaturas han sido estudiadas en esta tesis de máster (Fig. 24). La información detallada del modelo matemático puede consultarse en el apartado IV del anexo.

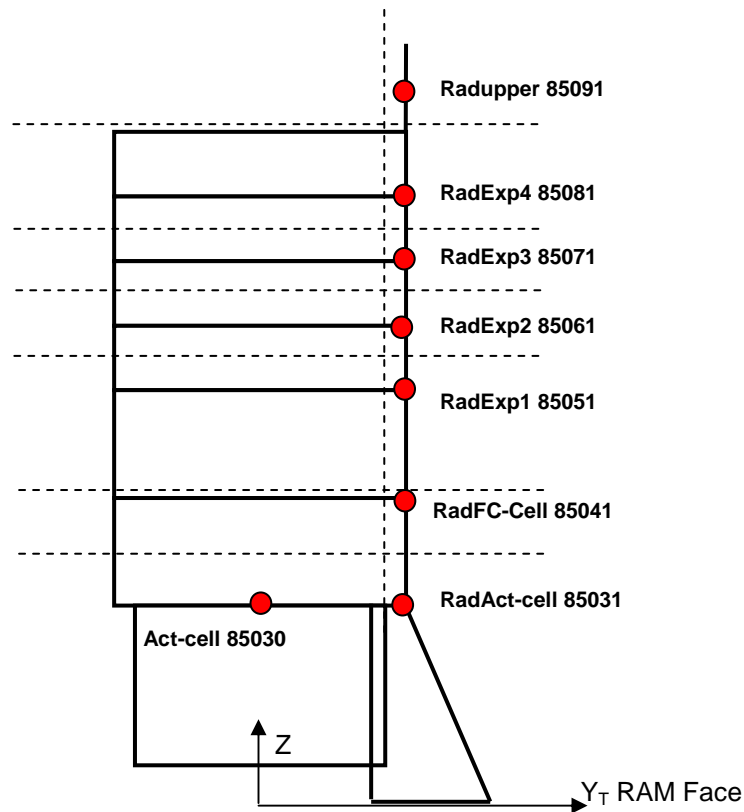


Fig. 24. Discretización parcial del TriboLAB.

4.3.2. RESULTADOS DE LOS TMM DE LOS ENSAYOS DE BALANCE TERMICO

El objeto de las simulaciones representativas de los ensayos de balance térmico es doble. Por una parte, permite predecir la duración de los ensayos y el comportamiento del equipo durante los mismos, de modo que pueda planificarse una campaña de ensayos que permita la comprobación completa del funcionamiento del sistema de control térmico. Por otra parte, posibilita verificar el grado de semejanza entre los modelos matemáticos y el comportamiento real del equipo, ya que si ésta no es suficiente, resulta necesario reajustar los modelos con el objeto de disponer de modelos suficientemente representativos que permitan predecir el comportamiento del equipo en órbita.

Las imágenes siguientes muestran la evolución de la temperatura del TriboLAB prevista por los modelos térmicos matemáticos durante el desarrollo de los ensayos térmicos.

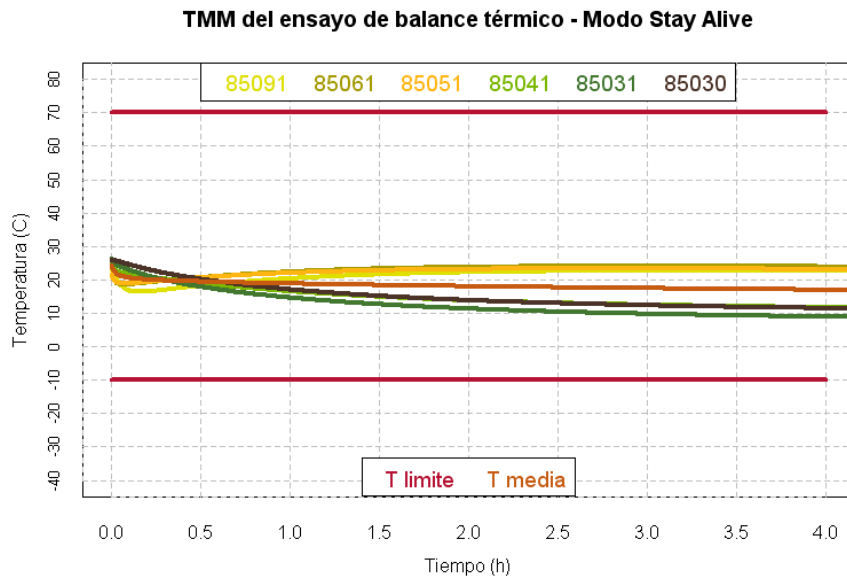


Fig. 25. Temperaturas del TriboLAB según los TMM del ensayo de balance térmico. Modo Stay Alive en entorno frío.

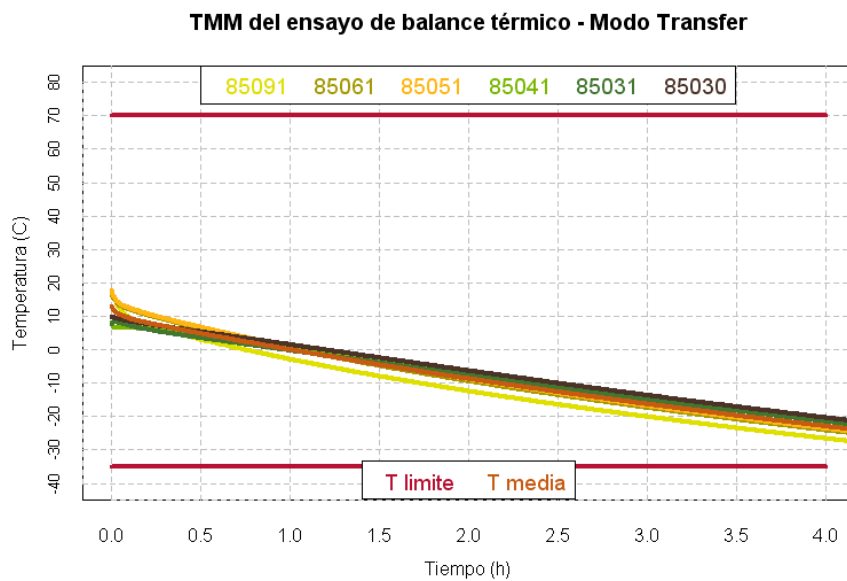


Fig. 26. Temperaturas del TriboLAB según los TMM del ensayo de balance térmico. Operación de traslado desde el transbordador hasta la ISS en entorno frío.

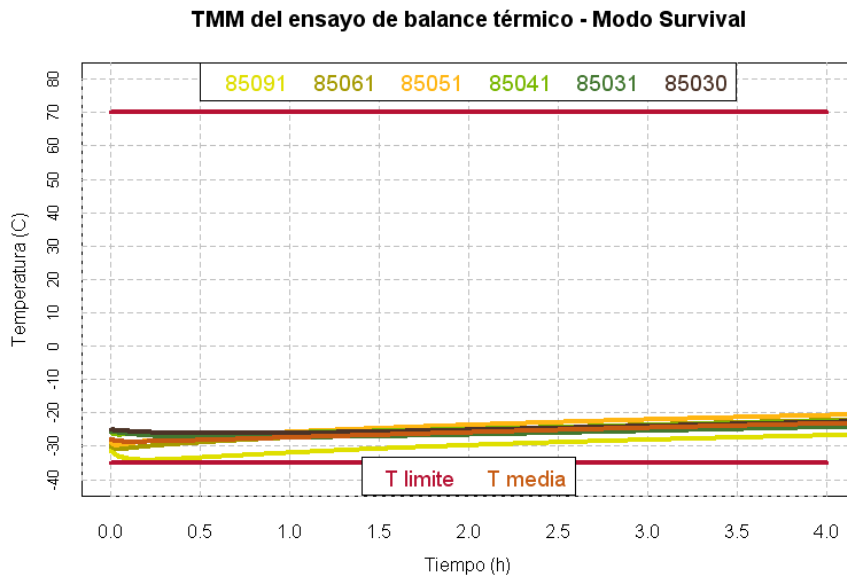


Fig. 27. Temperaturas del Tribolab según los TMM del ensayo de balance térmico. Modo Survival en entorno frío.

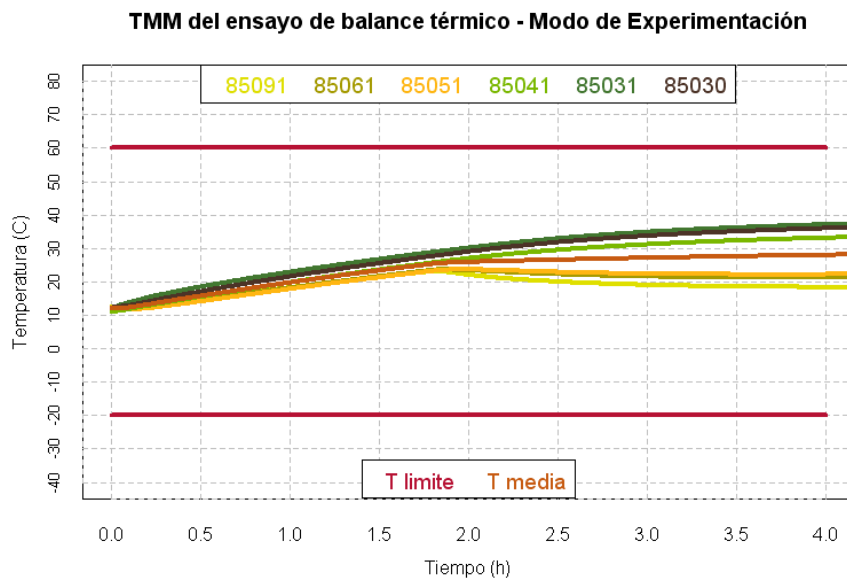


Fig. 28. Temperaturas del Tribolab según los TMM del ensayo de balance térmico. Modo de Experimentación en entorno caliente.

Interpretación de los resultados de los TMM de los ensayos térmicos

Tal y como puede observarse en una primera aproximación los resultados de los modelos matemáticos representan bastante bien el comportamiento observado durante los ensayos de balance térmico. Posteriormente, en el apartado 5.1 de esta memoria se presenta el estudio comparativo detallado entre los resultados de los modelos matemáticos y los ensayos térmicos.

4.3.3. RESULTADOS DE LOS TMM DEL COMPORTAMIENTO EN ORBITA

El objetivo de las simulaciones representativas del comportamiento en órbita es guiar el diseño del control térmico de modo que este sea efectivo en todas las posibles situaciones que puedan darse en órbita.

Las imágenes siguientes muestran la evolución de la temperatura del TriboLAB prevista por los modelos térmicos matemáticos para el comportamiento en órbita del instrumento en modo Stand By bajo distintas condiciones: Entorno caliente (Caliente); entorno frío con disipaciones nominales (Frío), mínimas (Frío Min.) y máximas (Frío Max.); y entorno nominal también con disipaciones nominales (Nominal), mínimas (Nominal Min.) y máximas (Nominal Max.)¹⁵.

Tal y como se ha indicado previamente, únicamente se muestran los valores correspondientes al nodo representativo del TRP (nodo 85030).

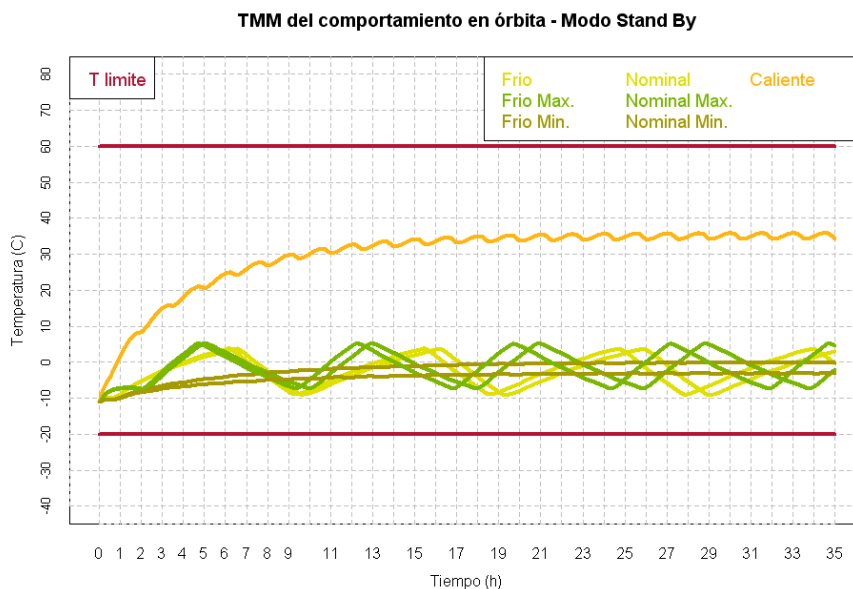


Fig. 29. Temperaturas del TriboLAB según los TMM del comportamiento en órbita. Modo Stand By bajo distintas condiciones.

¹⁵ Valores de disipación considerados. Nominal 8.77 W, mínimo 7,02 W y máximo 13,58 W.

Interpretación de los resultados de los TMM del comportamiento en órbita

Los resultados de los modelos matemáticos predicen el correcto comportamiento del control térmico, el cual es capaz de mantener el equipo entre sus temperaturas límite en todos los casos estudiados.

Posteriormente, en el apartado 5.3 de esta memoria se presenta el estudio comparativo detallado entre los resultados de los modelos matemáticos y el comportamiento en órbita del TriboLAB.

4.4. COMPORTAMIENTO DEL TRIBOLAB EN ÓRBITA

La Estación Terrena de Control de TriboLAB (TGCS - *TriboLAB Ground Control Station*) es un software específicamente desarrollado para llevar a cabo el control y monitorización del TriboLAB en tiempo real durante su estancia en la ISS. Además puede trabajar en modo moviola monitorizando el funcionamiento del instrumento durante un periodo de tiempo dado, contenido en ficheros de telemetría.

La telemetría del TriboLAB ha sido proporcionada por ERASMUS¹⁶ en formato CCSDS, de modo que se dispone de un archivo por cada uno de los días que el instrumento ha estado en la ISS. Cada uno de estos archivos contiene los datos de telemetría cada 1 segundo.

Los archivos CCSDS son archivos binarios que consisten en una sucesión de words (palabras de 2 Bytes) que contienen los datos de estado del equipo (housekeeping) y los datos de ciencia (resultados de los experimentos en curso)

La Fig. 30 muestra un paquete de telemetría del TriboLAB contenido en uno de dichos ficheros tras realizar una conversión a ASCII. Los datos están representados en hexadecimal en words y cada línea representa una sucesión de words recibidos. Se muestra en color azul un paquete de telemetría de ciencia de TriboLAB y en color magenta un ejemplo de telemetría de Housekeeping (HK).

Ahora bien, a pesar de que la TGCS permite monitorizar el comportamiento del TriboLAB, no permite exportar la temperatura del TRP. Por ello se ha desarrollado un programa adicional capaz de extraer de los archivos CCSDS, los datos de temperatura del TRP y escribirlos en formato ASCII en forma de tablas (tiempo, temperatura).

¹⁶ El centro ERASMUS, situado en las instalaciones de la Agencia Espacial Europea en Noordwijk (Holanda), es el encargado de las comunicaciones entre los experimentadores y la ISS.

Adicionalmente la TGCS, tras la lectura de cada archivo CCSDS, sí que proporciona un archivo ASCII denominado EventLogger_YYYY-MM-DD, el cual contiene los eventos ocurridos durante ese día. Entre los distintos tipos de eventos que se registran en este fichero se encuentran las transiciones del TriboLAB de un modo a otro de funcionamiento. Información de vital interés para poder interpretar correctamente las variaciones de temperatura registradas durante la misión.

```
1bd2 c006 00d5 3376 c355 4a46 1300 a3b8 8181 0201 0000 4200 005c 0000 0000 0200
0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000
0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000
0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000
0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000
0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000
0399 3376 c355 f945 1300 a3a9 a192 0108 0000 0000 0000 1b1c 000d 0000 042a 0097
0644 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000
0131 0200 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 042a 0000

0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000
0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0020 0ffc 0001 0000 0000 0000 042a 03f4
0442 0460 0000 0000 0000 0000 0000 0000 006d 0001 047f 0935 0487 0488 0485 043d
046f 0483 0407 04bb 03ff 03fb 0644 048a 0000 0000 0000 0000 0000 0403 0003 0835
0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000
0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000
0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000
0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000
0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000
0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000
0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000
0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000
0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000
0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000
0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000
00d5 3376 c355 4a46 1300 a3b8 8181 0201 0001 4200 005c 1d62 739d 0200 0000 0000
0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000
0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000
0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000
```

Fig. 30. Aspecto de uno de los paquetes de telemetría del TriboLAB en formato CCSDS tras su conversión en ASCII.

4.4.1. DESCRIPCIÓN DE LOS DATOS DE TELEMETRÍA

La figura Fig. 31 muestra las temperaturas registradas en el TRP del TriboLAB durante todo el tiempo en que ha permanecido instalado en la ISS. Tal y como puede comprobarse, el sistema de control térmico diseñado funcionó correctamente manteniendo el equipo en su rango de temperaturas de operación durante toda la misión.

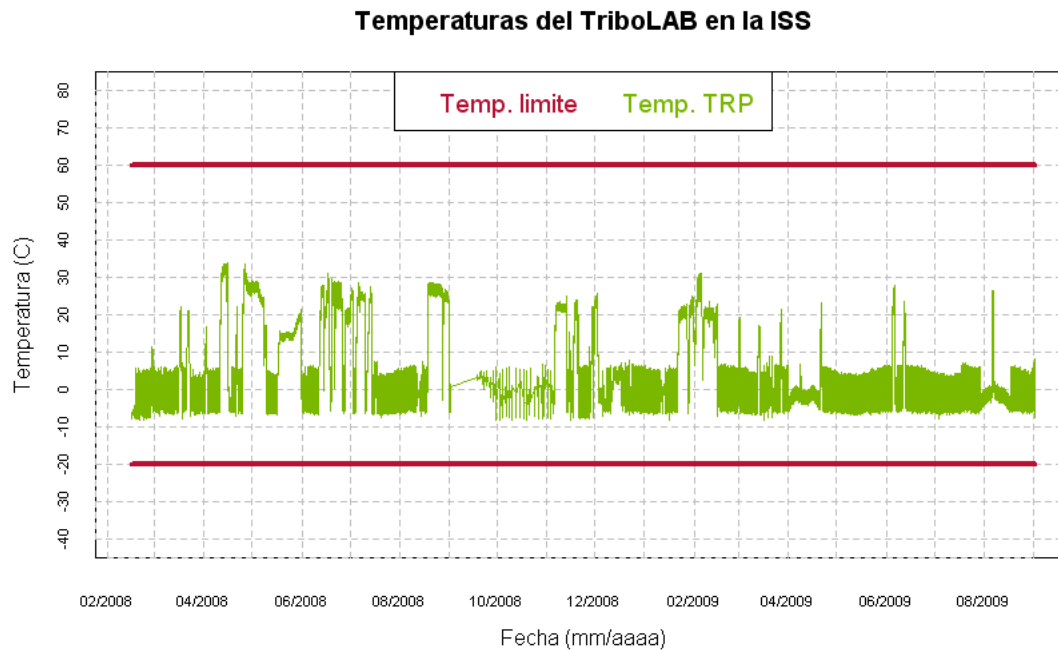


Fig. 31. Temperatura del TriboLAB en órbita.

4.4.2. INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS DE TELEMETRÍA

En la figura Fig. 31 se observan dos niveles distintos de temperatura de funcionamiento. La mayor parte de los valores se encuentra en un rango de temperaturas comprendido entre -10 y +10°C, aunque durante determinados periodos de tiempo se alcanzan valores superiores a los +10°C.

Tras el estudio de los archivos de eventos, se ha comprobado que las temperaturas con valores superiores a los +10°C corresponden a periodos durante los cuales el TriboLAB se encontraba ejecutando experimentos, mientras que las temperaturas inferiores corresponden a periodos en los que el TriboLAB se encontraba en un modo de espera o reposo.

Tomando en consideración el hecho de que los modos de ejecución de experimentos presentan una mayor complejidad desde el punto de vista térmico, además de representar un periodo de tiempo menor en comparación con la duración de la misión, y por supuesto, el hecho de que parte de los datos referidos a los mismos están sujetos a confidencialidad, finalmente se ha decidido centrar el estudio de la telemetría a los modos en que el TriboLAB se encontraba en modo de reposo.

Las temperaturas que hemos denominado como de reposo, comprendidas entre -10°C y $+10^{\circ}\text{C}$, en realidad pueden corresponder a distintos submodos de funcionamiento. Ahora bien, debido a que desde el punto de vista térmico dichos submodos son análogos, en pos de facilitar el entendimiento del trabajo realizado en esta tesis los consideraremos todos iguales y nos referiremos a ellos como modo de Stand By.

Tras un estudio más detallado de las temperaturas, mediante su separación por meses (ver apartado V del anexo) se ha seleccionado un primer grupo de datos para la realización de un análisis de partida de los valores típicos de temperatura registrados en el TriboLAB en modo Stand By (Fig. 32).

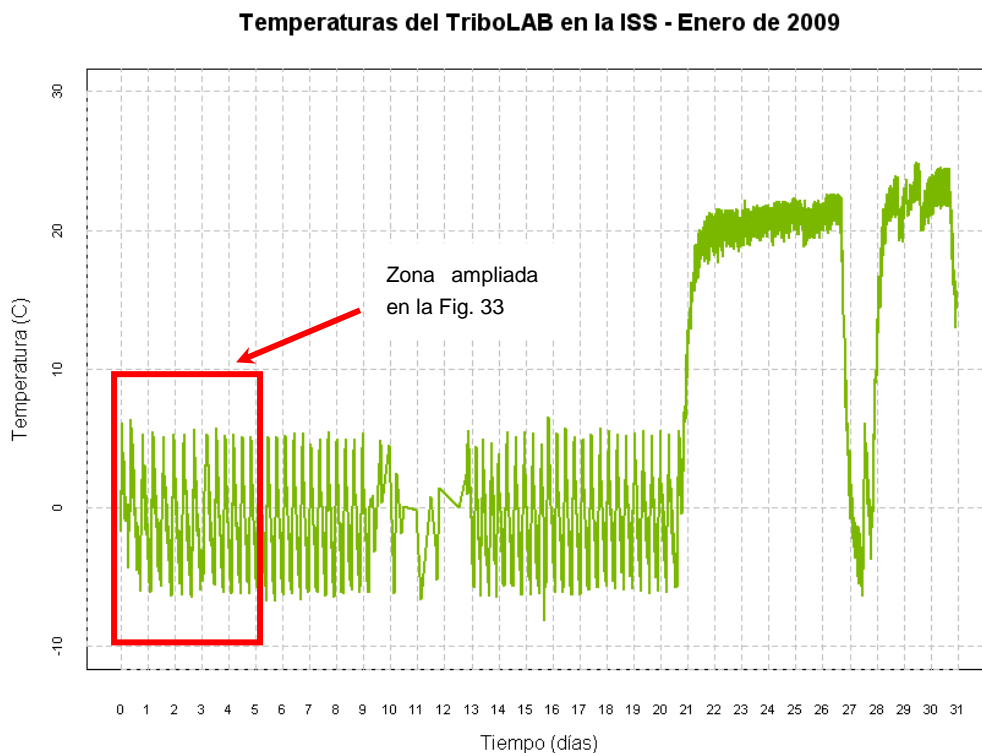


Fig. 32. Temperaturas del TriboLAB durante el mes de enero de 2009.

Temperaturas del TriboLAB en la ISS - Enero de 2009

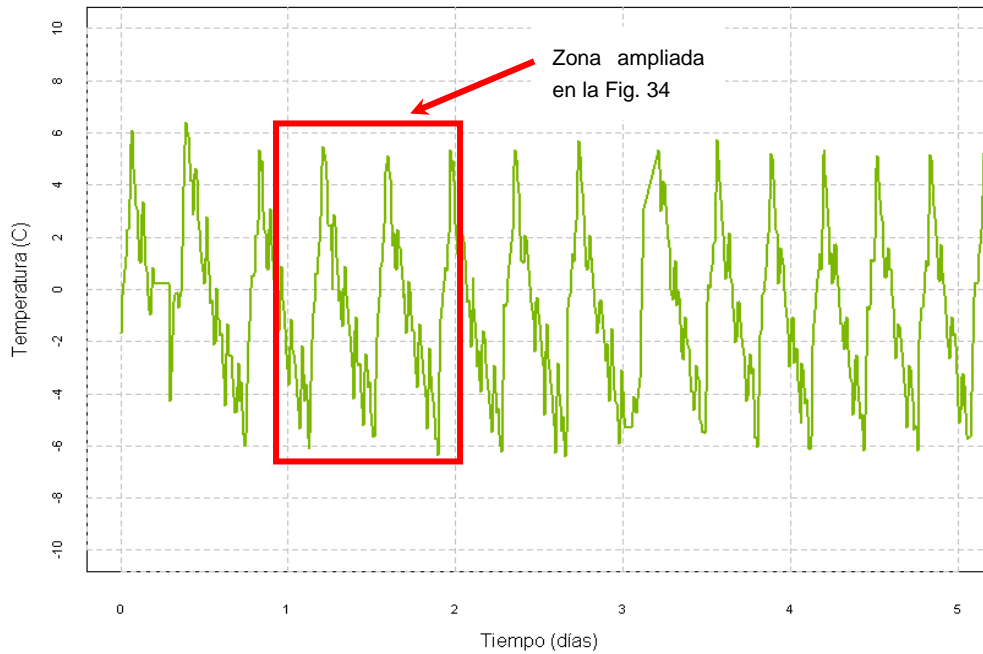


Fig. 33. Temperaturas del TriboLAB durante los 5 primeros días del mes de Enero de 2009.

Temperaturas del TriboLAB en la ISS

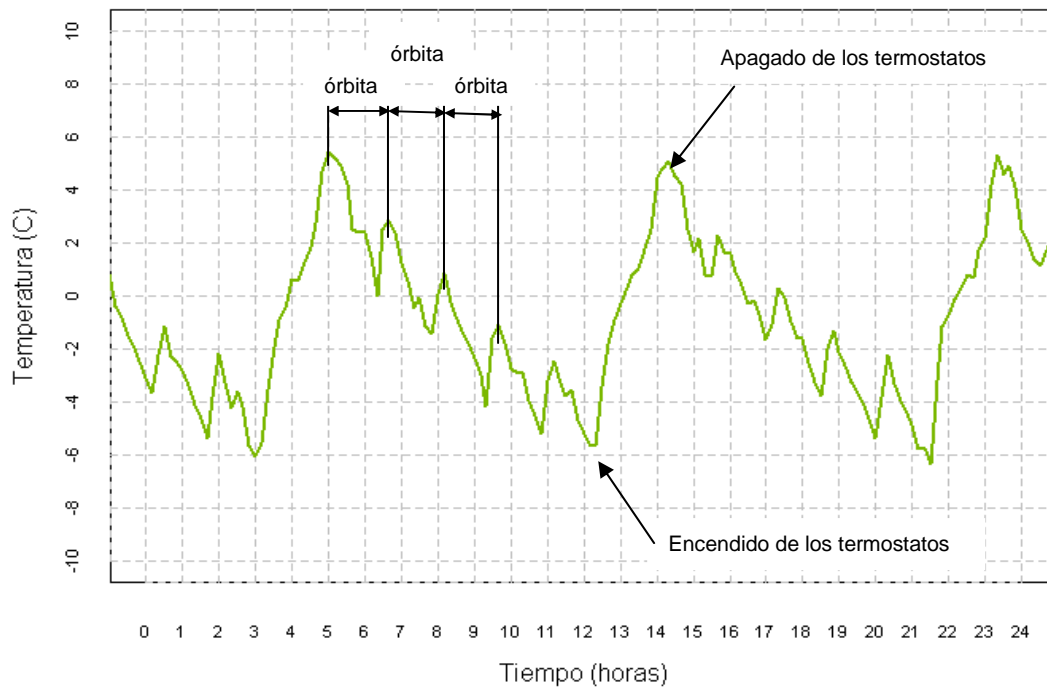


Fig. 34. Temperaturas del TriboLAB en órbita durante un día.

El estudio de los datos mostrados en la figura Fig. 34 permite detectar claramente el ciclo de encendido y apagado de los termostatos que regulan el encendido de los heaters de Survival, los cuales son los encargados del control térmico en este modo de operación.

Así mismo, es posible detectar los periodos correspondientes a las órbitas de la ISS. En lo que respecta a cada una de esas órbitas se observa que la velocidad de enfriamiento no es constante sino que durante un periodo de tiempo hay una caída de temperatura que luego se recupera parcialmente. Este efecto está relacionado con el periodo de eclipse de la órbita explicado previamente (ver 3.2). Se estima que para cada órbita de la ISS se da un periodo de eclipse de aproximadamente 30 minutos y uno de luz solar del orden de 1 hora.

Posteriormente, en el apartado 5.2 de esta memoria se presenta el estudio comparativo detallado entre distintas órbitas y en el 5.3 la comparación con los resultados de los modelos matemáticos.

5. ANÁLISIS DE LOS DATOS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

5.1. COMPARACIÓN ENTRE LOS ENSAYOS TÉRMICOS Y SUS TMM.

5.1.1. COMPARACIÓN DIRECTA: ENSAYOS TÉRMICOS VS TMM

Tal y como puede observarse en las figuras siguientes (Fig. 35, Fig. 36, Fig. 37 y Fig. 38) los resultados de los modelos térmicos matemáticos coinciden bastante bien con los resultados obtenidos en los ensayos térmicos.

El único modo en que los resultados presentan mayores diferencias es en el modo de Experimentación (Fig. 38) donde parece que el apagado de los heaters Nominales (cambio de tendencia de parte de los nodos al alcanzar los 20°C) se produce un poco más tarde en el modelo matemático que en la realidad. Ello es debido a que en el TMM no hay un nodo específicamente dedicado al sensor que regula dichos heaters, sino que se emplea un nodo representativo de toda una celda de experimentos.

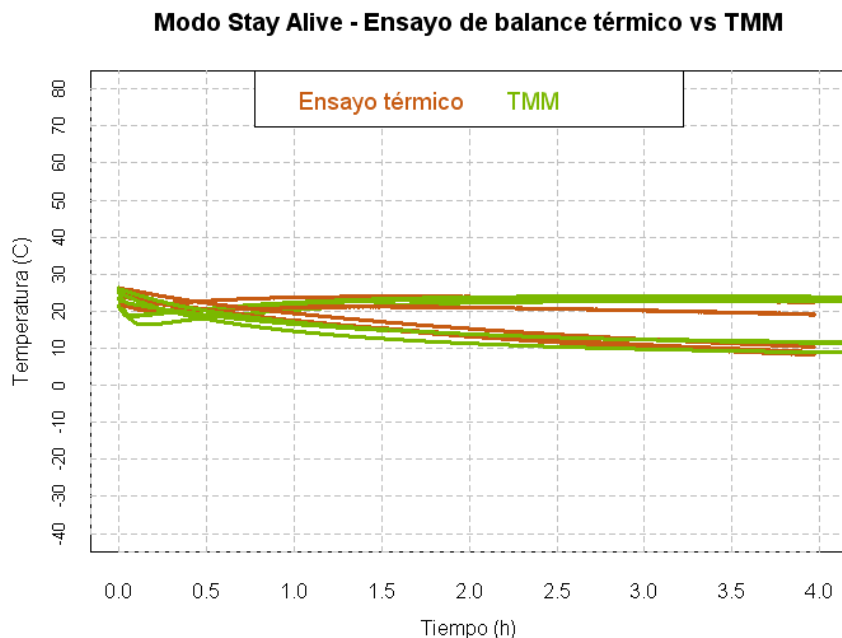


Fig. 35. Temperaturas del ensayo de balance térmico en modo Stay Alive vs resultados de su modelo térmico matemático correspondiente.

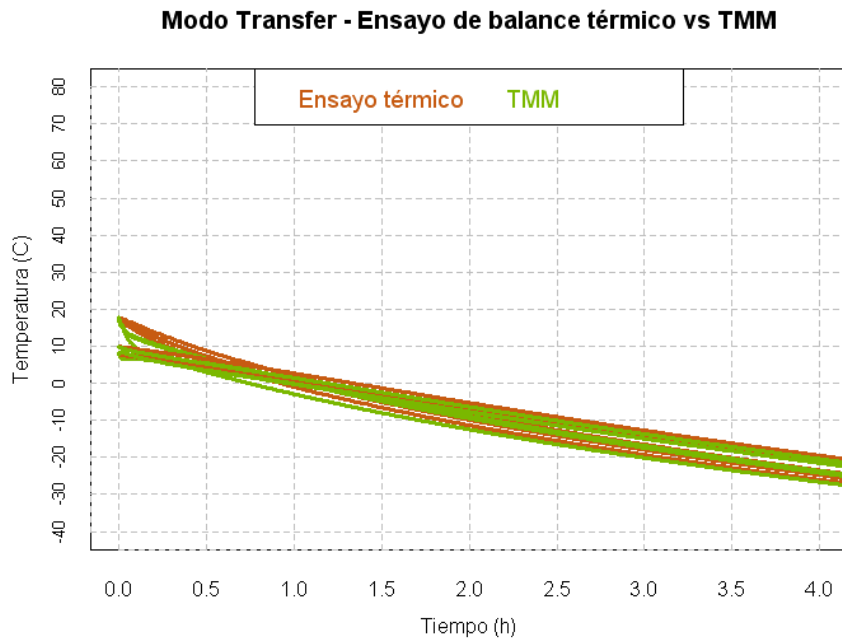


Fig. 36. Temperaturas del ensayo de balance térmico en modo Transfer vs resultados de su modelo térmico matemático correspondiente.

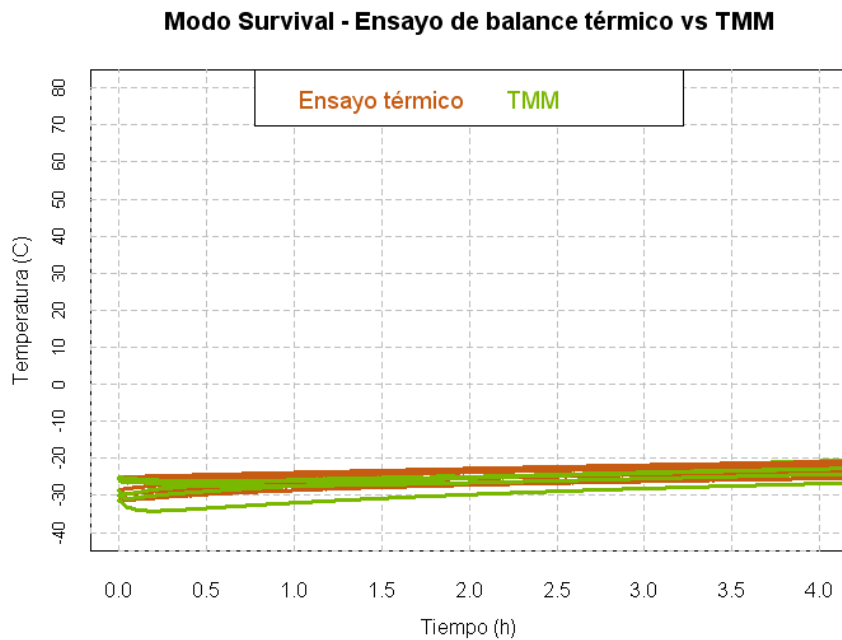


Fig. 37. Temperaturas del ensayo de balance térmico en modo Survival vs resultados de su modelo térmico matemático correspondiente.

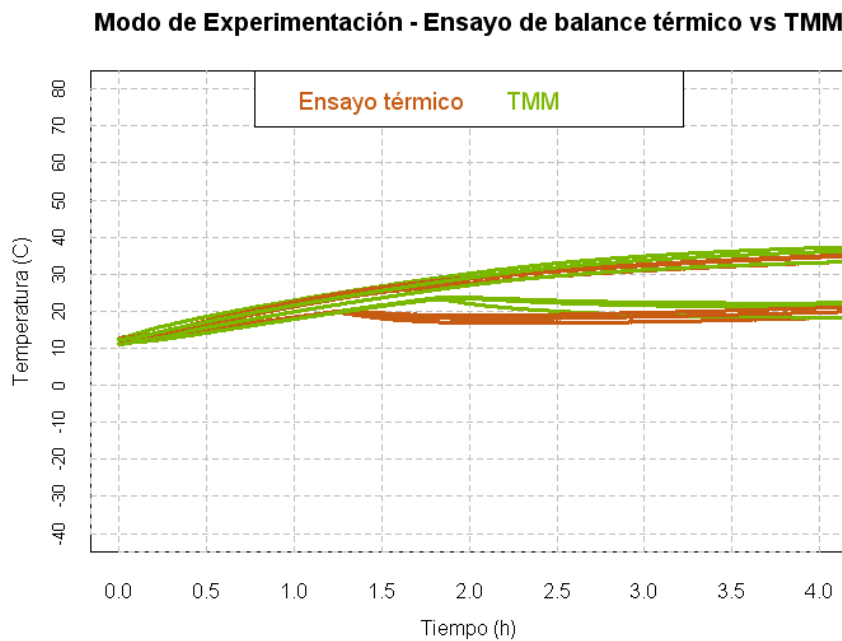


Fig. 38. Temperaturas del ensayo de balance térmico en modo de Experimentación vs resultados de su modelo térmico matemático correspondiente.

El criterio adoptado para considerar que los TMM eran suficientemente representativos del comportamiento del instrumento y por lo tanto no era necesario un reajuste de los mismos, fue que la diferencia entre las temperaturas registradas en el ensayo y en los TMM fuera inferior a 5°C. Considerando para ello las temperaturas registradas en los puntos de interés una vez alcanzada la estabilización térmica del equipo, es decir, al final del ensayo.

Las siguientes imágenes (Fig. 39, Fig. 40, Fig. 41 y Fig. 42) muestran la diferencia entre las temperaturas medidas en los ensayos de balance térmico y las temperaturas obtenidas como resultado de los modelos térmicos matemáticos.

En el modo Stay Alive la diferencia se ha mantenido dentro del criterio de aceptación en todos los puntos durante la duración del ensayo (Fig. 39). A pesar de que la diferencia de temperaturas no está estabilizada y parece que podría continuar aumentando hasta sobrepasar dicho criterio, se decidió no reajustar el modelo matemático para este caso. El motivo es la verificación durante el ensayo (Fig. 17) de que el control térmico mantiene el equipo suficientemente alejado de sus temperaturas límites, junto con el hecho de que el modo Stay Alive únicamente tiene lugar una vez, al inicio de la misión.

En el caso del modo de traslado hasta la ISS (Fig. 40) y del modo Survival (Fig. 41) las diferencias son menores de 5°C en todo momento, presentando un comportamiento bastante estable por lo que se consideró que los TMM cumplían el criterio de aceptación.

En el caso del modo de Experimentación hay ciertos nodos que en algún momento presentan una diferencia mayor de los 5°C establecidos como límite, debido a la diferencia del instante de desactivación de los heaters explicada previamente. Posteriormente, a medida que avanza la estabilización térmica, la diferencia se mantiene dentro del intervalo de aceptación. Por todo ello, tampoco en este caso se consideró necesario reajustar el modelo térmico matemático.

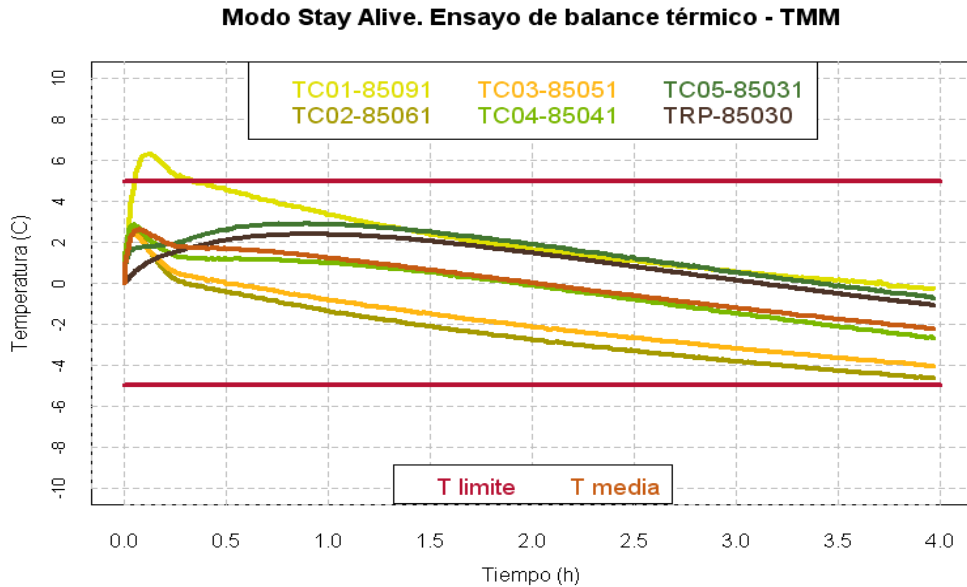


Fig. 39. Diferencia entre las temperaturas del ensayo de balance térmico en modo Stay Alive y los resultados de su modelo térmico matemático correspondiente.

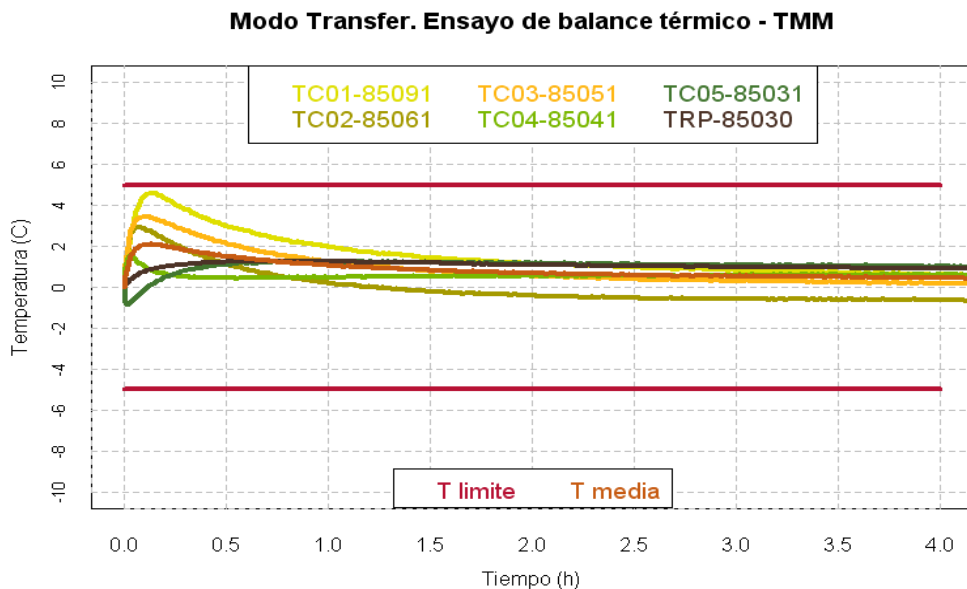


Fig. 40. Diferencia entre las temperaturas del ensayo de balance térmico en modo Transfer y los resultados de su modelo térmico matemático correspondiente.

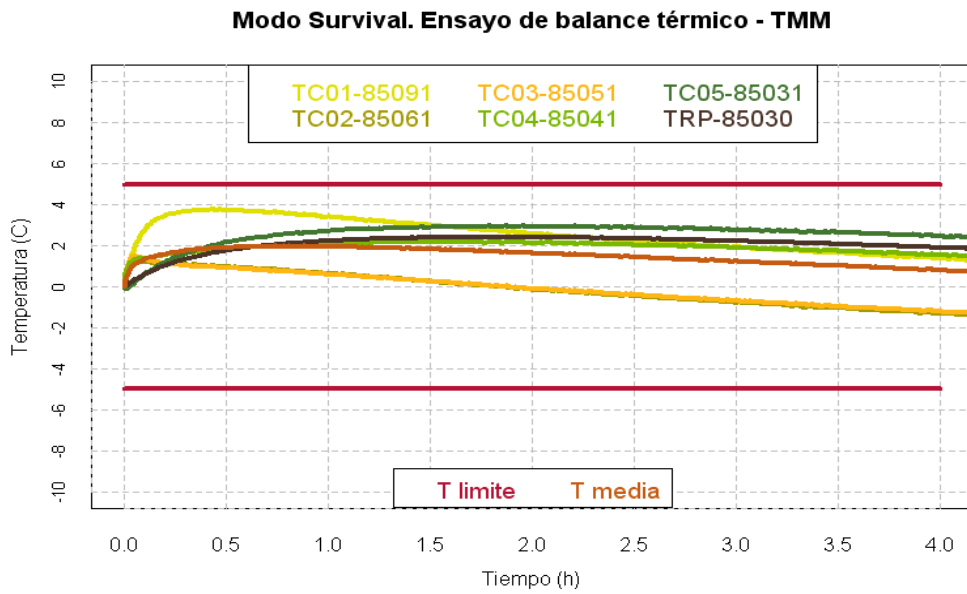


Fig. 41. Diferencia entre las temperaturas del ensayo de balance térmico en modo Survival y los resultados de su modelo térmico matemático correspondiente.

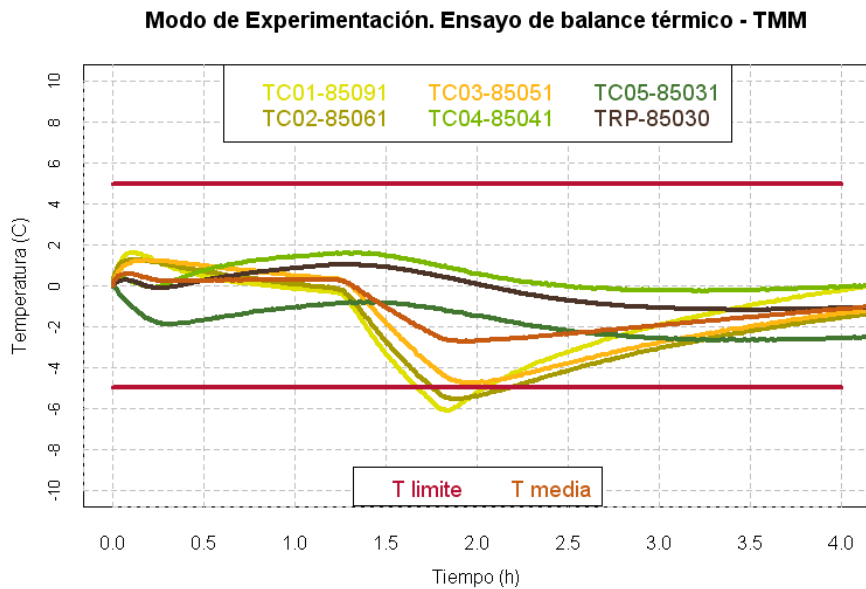


Fig. 42. Diferencia entre las temperaturas del ensayo de balance térmico en modo de Experimentación y los resultados de su modelo térmico matemático correspondiente.

5.1.2. ANÁLISIS DE COORDENADAS PRINCIPALES: ENSAYOS TÉRMICOS VS TMM

Con el objeto de profundizar en el análisis de la concordancia entre los resultados de los modelos térmicos matemáticos y las temperaturas registradas durante la realización de los ensayos de balance térmico, se ha decidido abordar este estudio mediante la aplicación de un análisis de coordenadas principales.

Debido a los distintos tipos de semimétricas aplicables al estudio de datos funcionales, se ha realizado un estudio preliminar previo (apartado 5.1.2.1) con el objeto de evaluar cual es el tipo de semimétrica más indicado para el estudio del tipo de datos funcionales analizados en esta tesis de máster.

Posteriormente, una vez determinado el tipo de semimétrica a emplear, se ha procedido al cálculo de las mismas sobre los datos objeto del estudio, y a la aplicación posterior del análisis de coordenadas principales (apartado 5.1.2.2).

5.1.2.1 Estudio preliminar de distintos tipos de semimétricas

Se han evaluado los 3 tipos de semimétricas especialmente formulados para el análisis de datos funcionales, previamente explicados en el apartado 2 de esta memoria: la semimétrica basada en PCA, la basada en MPLSR y la basada en derivadas. Para ello, tras el cálculo de las mismas se ha realizado un análisis de coordenadas principales, cuyos resultados se indican en los apartados siguientes.

Con el objeto de poder evaluar correctamente la adecuación de los distintos tipos de semimétrica al estudio de los datos de interés, se ha decidido partir de datos donde la relación entre los mismos es totalmente conocida. Por ello se ha seleccionado uno de los modelos térmicos matemáticos del TriboLAB, concretamente los resultados correspondientes al caso en que el instrumento se encuentra en la ISS en modo Survival y en un entorno térmico frío. Adicionalmente se han realizado distintas simulaciones de este mismo caso pero modificando las disipaciones de los heaters en un -20%, -10%, +1%, +10% y +20% (denominadas en las imágenes siguientes como Dec20, Dec10, Inc01, Inc10 e Inc20 respectivamente).

Un incremento en la potencia de los heaters implica un aumento de la temperatura de los nodos, del mismo modo que una disminución de la potencia implica un descenso de la misma. De este modo, considerando el caso inicial como caso de referencia, los resultados correspondientes a los modelos donde los heaters han sufrido una modificación mayor deberán presentar valores de distancia superiores con el caso de referencia.

Caso de referencia - TMM del ensayo de balace térmico (Modo Survival)

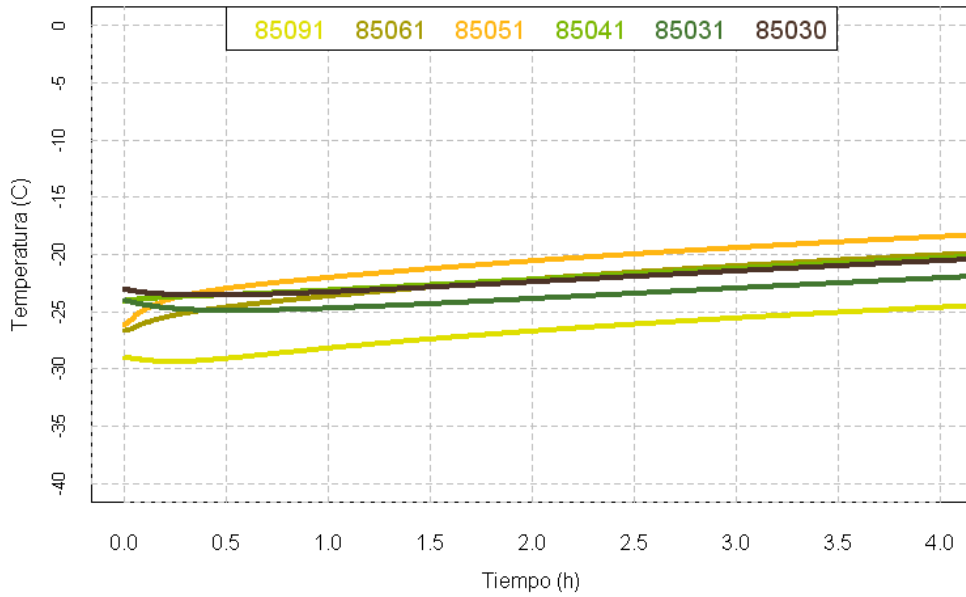


Fig. 43. Temperaturas del caso de referencia.

5.1.2.1.1. Semimétrica basada en PCA

Tras el análisis de coordenadas principales sobre la matriz de distancias basadas en PCA¹⁷, se ha comprobado como las dos primeras coordenadas retienen prácticamente el 100% de la variabilidad (ver la Fig. 44).

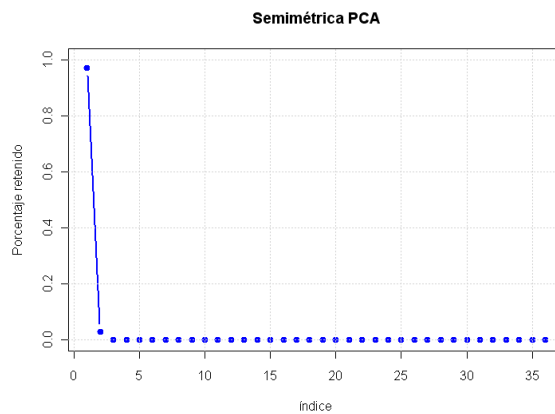


Fig. 44. Porcentaje de variabilidad retenido por las coordenadas principales. Semimétrica basada en PCA.

¹⁷ Parámetros empleados: Número de componentes retenidos igual a 2 ($q = 2$).

La representación, sobre las dos primeras coordenadas, de las distancias calculadas (Fig. 45), permite observar como el caso Inc01, correspondiente a un incremento de la potencia de los heaters del 1%, presenta las menores distancias con el caso de referencia (denominado Ref en las imágenes siguientes), pues sus valores casi se superponen. En cambio a medida que la variación de potencia es mayor la distancia con el caso de referencia aumenta en uno u otro sentido dependiendo de si la variación corresponde a un incremento o una disminución de potencia.

La línea roja indicada en la figura viene a representar la potencia aplicada a los heaters del modelo, y por lo tanto valores de temperatura en el instrumento mayores o menores en un caso u otro. Por otra parte, la línea azul viene a representar la distribución de temperatura a lo largo del equipo, pues como puede observarse en la Fig. 43 el nodo 85091 presenta las temperaturas más bajas del equipo.

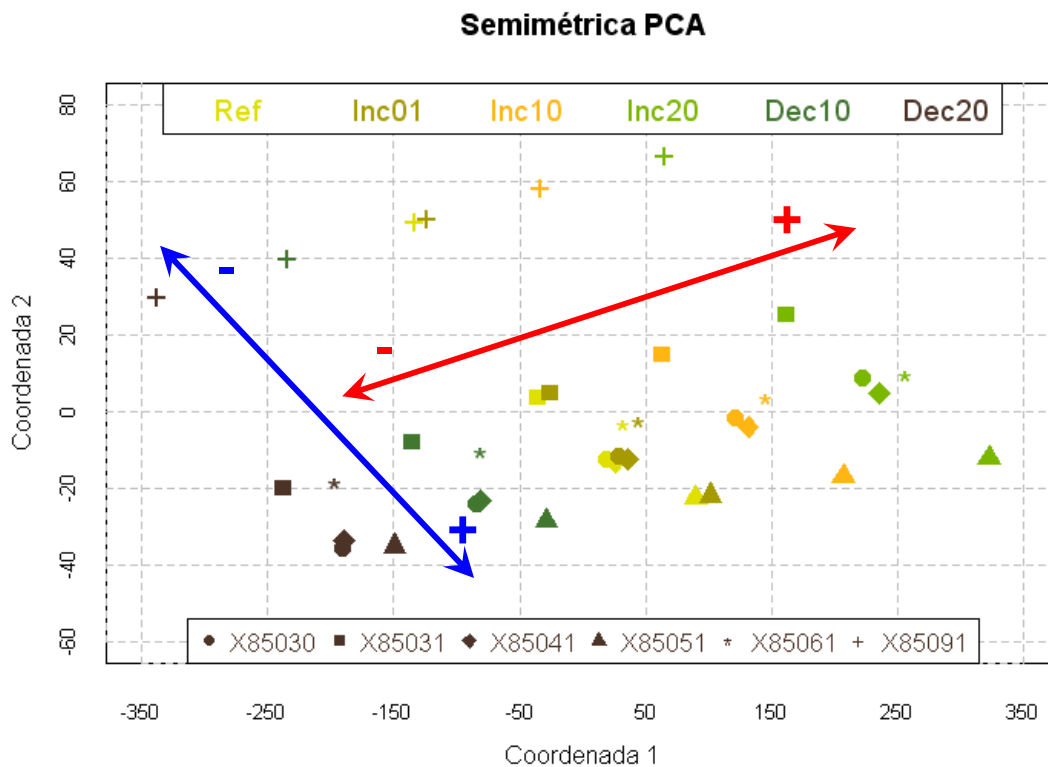


Fig. 45. Resultados del análisis de coordenadas principales sobre la matriz de distancias basadas en PCA. Representación según las dos primeras coordenadas.

5.1.2.1.2. Semimétrica basada en MPLSR

También en este caso las dos primeras coordenadas retienen prácticamente el 100% de la variabilidad de los datos, aunque en esta ocasión la variabilidad retenida por la segunda coordenada es mayor que en el caso anterior (ver Fig. 46)¹⁸.

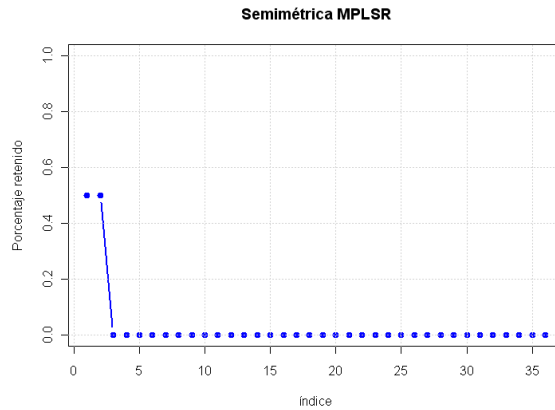


Fig. 46. Porcentaje de variabilidad retenido por las coordenadas principales.
Semimétricas basadas en MPLSR.

La representación, sobre las dos primeras coordenadas, de las distancias calculadas (Fig. 47) es muy similar a la observada para la semimétricas basadas en PCA. Aunque en este caso la orientación de las coordenadas es diferente y además la coordenada 2 representa mejor el gradiente de temperaturas en el equipo.

También en este caso la línea roja indicada en la figura viene a representar la diferencia de temperaturas en el instrumento entre un caso y otro debido a la variación de potencia. Así mismo la línea azul viene a representar la distribución de temperatura a lo largo del equipo.

¹⁸ Parámetros empleados en el cálculo de las semimétricas: Número de factores retenidos igual a 2 ($q = 2$).

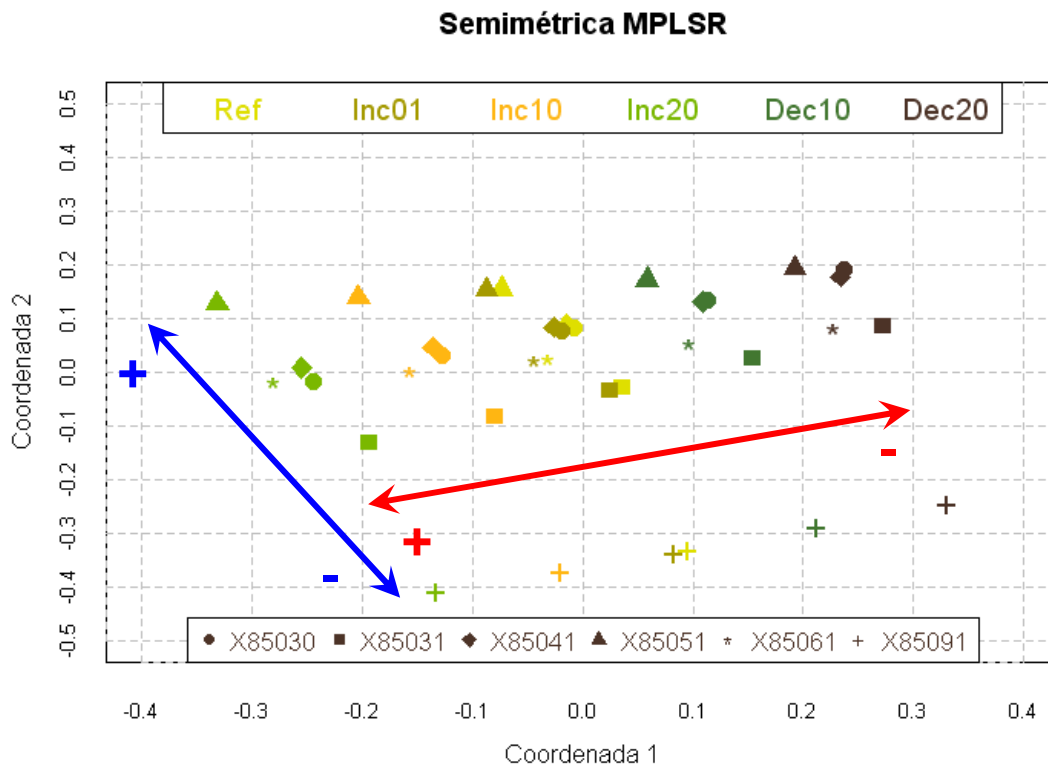


Fig. 47. Resultados del análisis de coordenadas principales sobre la matriz de distancias basadas en MPLSR. Representación según las dos primeras coordenadas.

5.1.2.1.3. Semimétrica basada en derivadas (DERIV)

Este tipo de semimétrica, está basada en un ajuste previo de los datos a curvas de tipo B-Spline. Por ello, se ha considerado necesario comprobar la calidad de dicho ajuste previamente al cálculo de las semimétricas.

Comprobación del ajuste de las curvas mediante B-Splines

Tras estudiar distintos ajustes de B-Splines realizados bajo distintos parámetros, finalmente se ha comprobado que con un ajuste basado en la primera derivada y un número de knots igual a 40, se obtiene un ajuste de B-Splines sobre las curvas suficientemente satisfactorio.

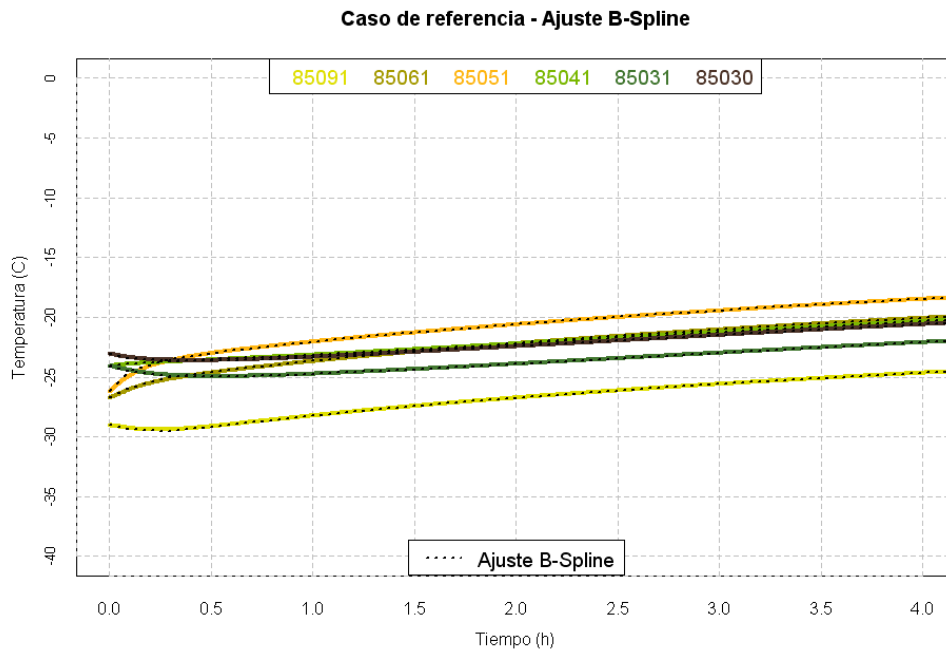


Fig. 48. Ajuste de las curvas del caso de referencia mediante B-splines.

Evaluación de la semimétrica

Al igual que en los casos previos, también en este las dos primeras coordenadas retienen prácticamente el 100% de la variabilidad, siendo la coordenada 1 la que retiene la mayor parte de la misma (81%) (ver Fig. 49)¹⁹.

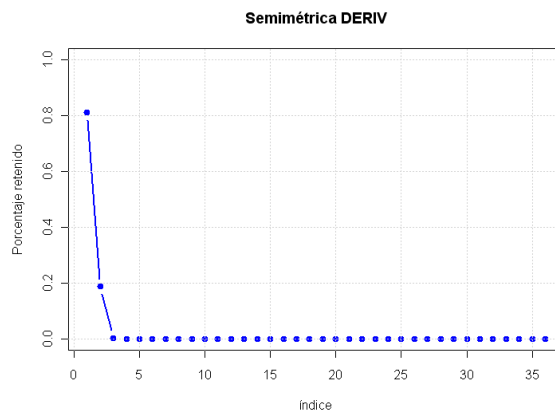


Fig. 49. Porcentaje de variabilidad retenido por las coordenadas principales. Semimétricas basadas en derivadas (DERIV).

¹⁹ Parámetros empleados en el cálculo de las semimétricas: derivada de orden 2 (q), 40 knots ($nknots=40$).

La representación, sobre las dos primeras coordenadas, de las distancias calculadas (Fig. 50), presenta ciertas similitudes con las basadas en PCA y MPLSR, pero también algunas diferencias.

En este caso, también la línea roja indicada en la figura viene a representar la diferencia de temperaturas en el instrumento entre un caso y otro debido a la variación de potencia aplicada. La línea azul, aunque al igual que en los casos previos está relacionada con la distribución térmica a lo largo del equipo, en esta ocasión no representa los valores de las curvas de temperatura sino su aceleración. Así, los nodos 85051 y 85061 son los únicos que presentan un aumento de temperatura durante todo el periodo estudiado, mientras que el resto de los nodos presentan un leve enfriamiento inicial seguido de un calentamiento posterior (ver la Fig. 43).

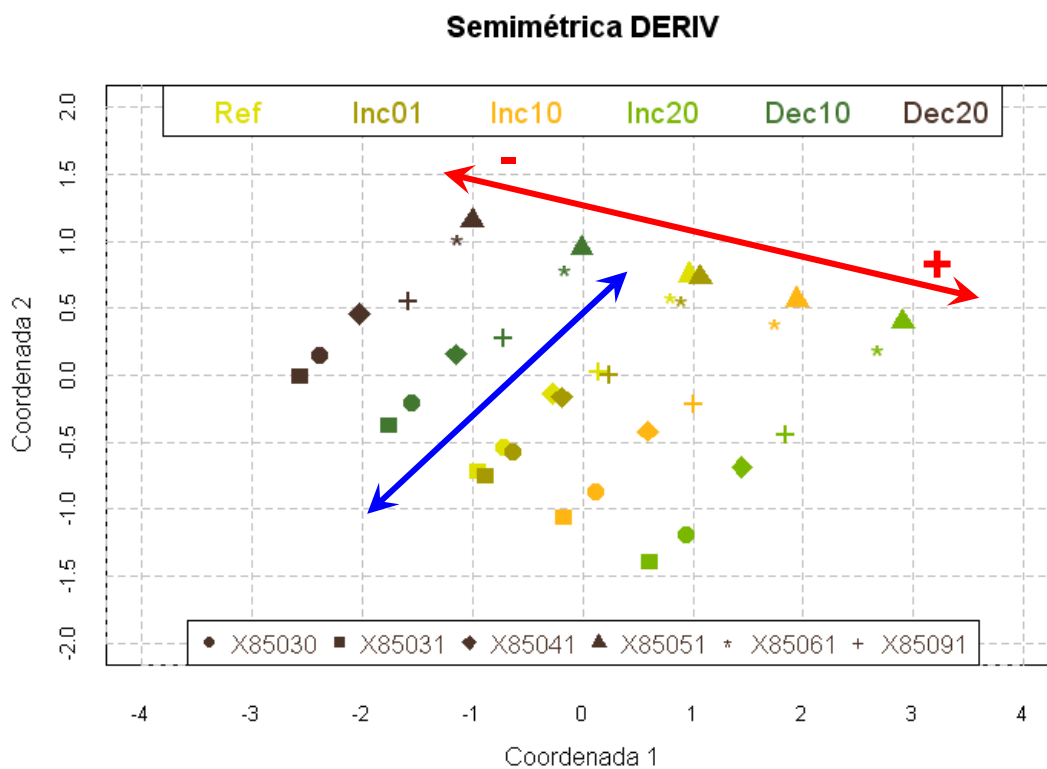


Fig. 50. Resultados del análisis de coordenadas principales sobre la matriz de distancias basadas en derivadas. Representación según las dos primeras coordenadas.

Conclusiones del estudio de semimétricas

Tras el análisis realizado se ha decidido descartar la semimétrica basada en derivadas (DERIV) pues en este caso resulta de mayor interés la información relativa a los valores de temperatura que la relacionada con la aceleración de dichas curvas.

Finalmente se ha decidido seleccionar la semimétrica basada en PCA para el conjunto de datos del TriboLAB.

5.1.2.2 Análisis de coordenadas principales sobre los ensayos térmicos y sus TMM

La Fig. 51 muestra el análisis de coordenadas principales realizado sobre los resultados de los ensayos térmicos y sus modelos matemáticos, empleando la semimétrica basada en PCA, representado sobre sus dos primeras coordenadas.

En el apartado VI.1 del anexo puede observarse la imagen correspondiente a este mismo estudio pero empleando semimétricas basadas en MPLSR.

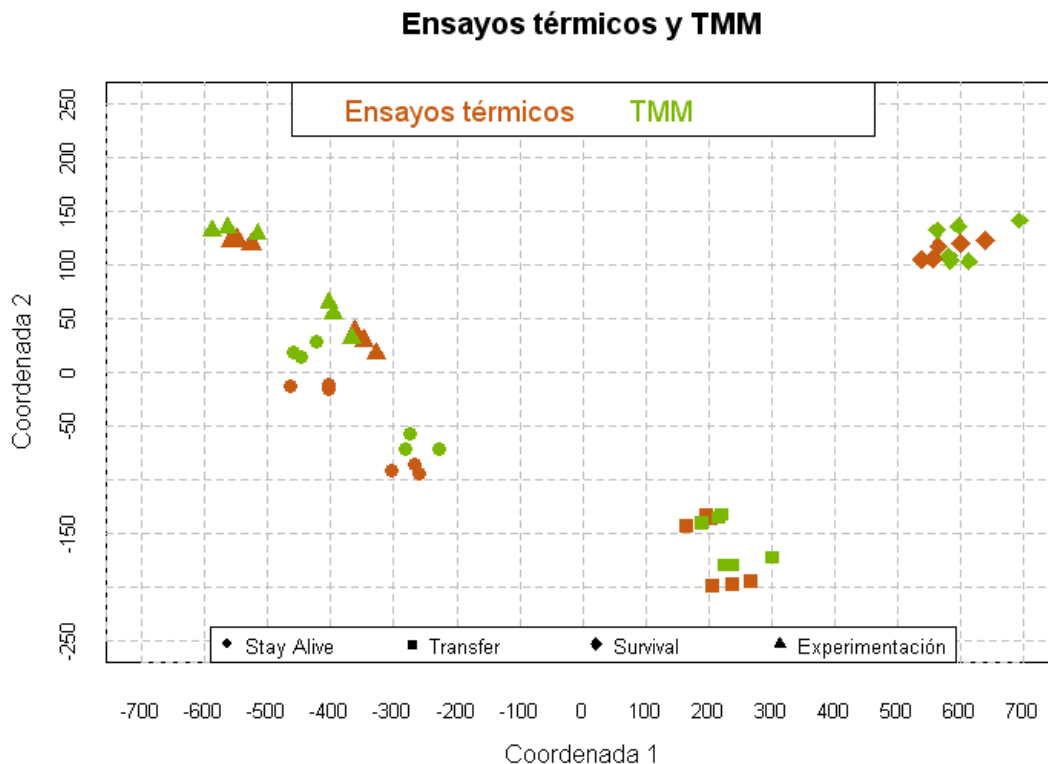


Fig. 51. Comparativa entre los ensayos térmicos y los resultados de los modelos térmicos matemáticos.

La representación de las distancias sobre las dos primeras coordenadas muestra claramente la presencia de distintos grupos aislados correspondientes a los distintos modos de funcionamiento estudiados (representados por distintos símbolos).

Aunque en el caso del modo Stay Alive y el modo de Experimentación, la diferencia entre ambos no es tan clara, en la siguiente figura (Fig. 52), se han destacado los distintos grupos con línea azul discontinua para una mayor facilidad de interpretación.

Ensayos térmicos y TMM

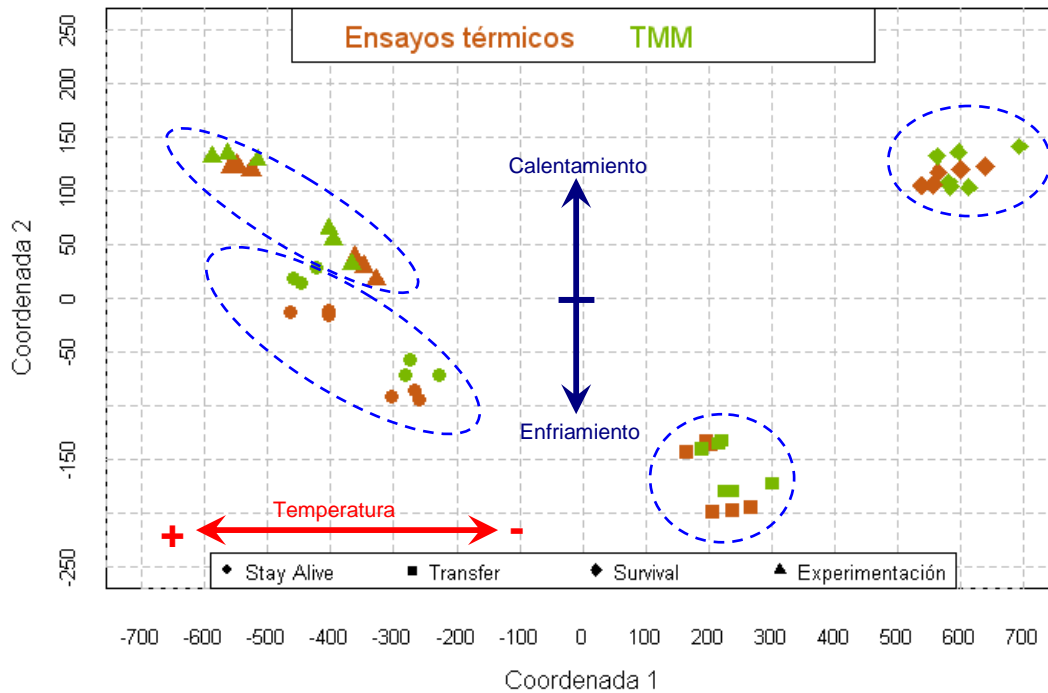


Fig. 52. Comparativa entre los ensayos térmicos y los resultados de los modelos térmicos matemáticos.

La coordenada 1 representa claramente la temperatura, mostrando los resultados del modo Survival (el más frío) en un extremo, y los del modo de Experimentación (el más caliente) en el otro.

La coordenada 2 parece estar relacionada con la evolución térmica del instrumento durante el periodo de tiempo estudiado. Así, las zonas del instrumento que han experimentado un calentamiento presentan valores positivos en dicha coordenada, mientras que las zonas que han experimentado un enfriamiento presentan valores negativos.

Se observa también muy claramente la presencia de dos subgrupos dentro de cada uno de los grupos principales, representativos de la existencia en el TriboLAB de dos zonas con distinto comportamiento térmico, como ya se explicó previamente en el apartado dedicado a la descripción del instrumento. Únicamente en el modo de Survival, no se aprecia esta diferenciación por ser la temperatura del equipo mucho más homogénea que en los casos previos.

En lo que respecta a la comparativa de los modelos matemáticos con sus ensayos térmicos correspondientes, se observa que si bien existen diferencias entre ambos estas no son muy acusadas.

Las imágenes siguientes muestran los mismos resultados indicados previamente pero graficados por separado para cada uno de los modos de funcionamiento.

En todos los casos se observa claramente cómo los modelos matemáticos reproducen muy bien el comportamiento del TriboLAB en lo que respecta a la presencia de dos zonas diferenciadas con distintas temperaturas de operación, correspondientes a la parte superior (más caliente) e inferior (más fría) del instrumento.

En lo que respecta a la correspondencia punto a punto entre las temperaturas de los nodos de los modelos matemáticos y las registradas en los ensayos, se observa como ésta no es igual de buena en todos los casos.

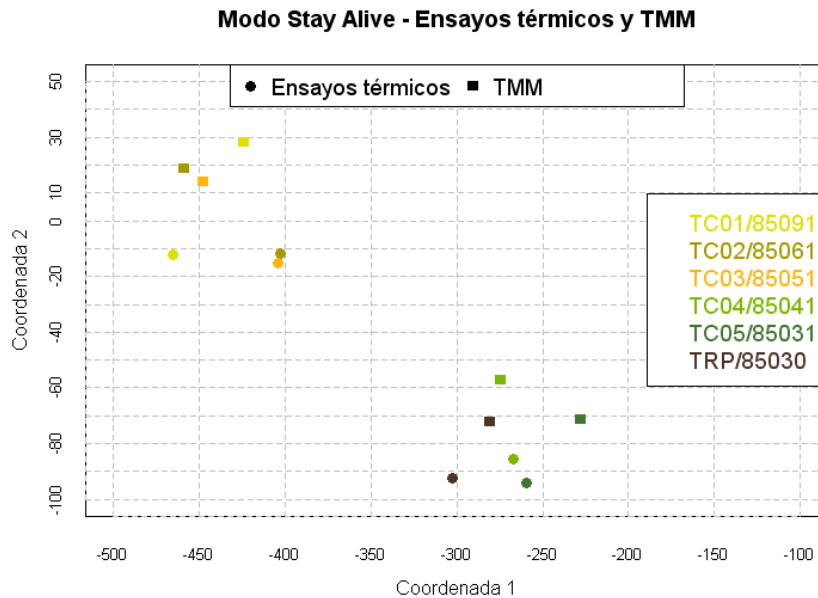


Fig. 53. Comparativa entre los ensayos térmicos y los resultados de los modelos térmicos matemáticos. Modo Stay Alive.

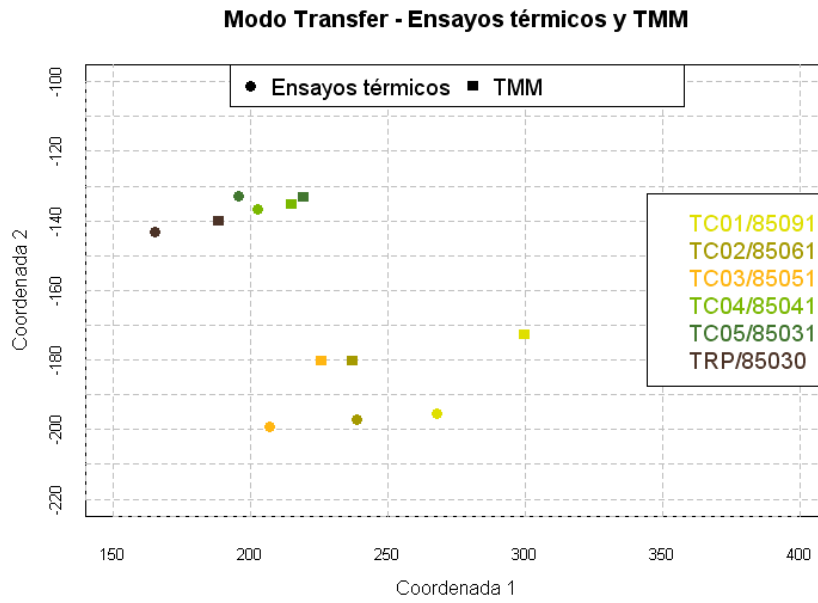


Fig. 54. Comparativa entre los ensayos térmicos y los resultados de los modelos térmicos matemáticos. Modo Transfer.

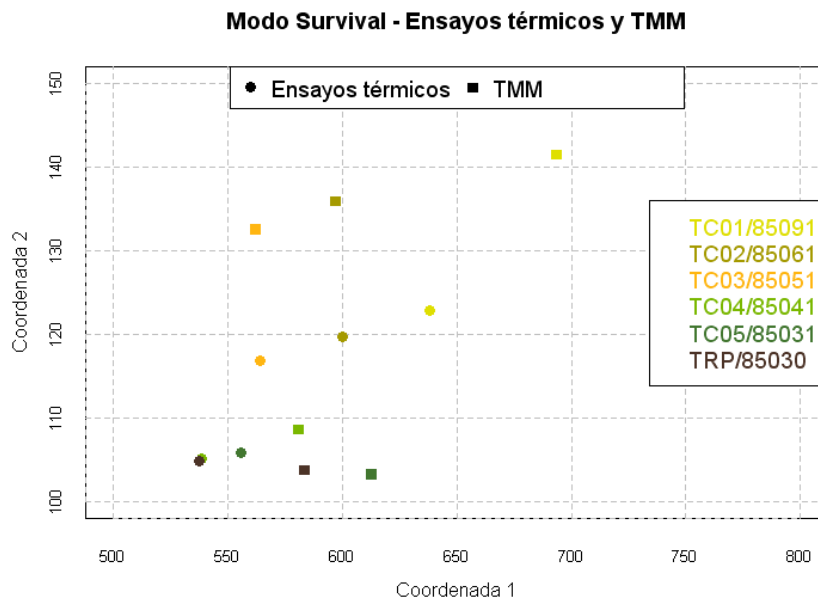


Fig. 55. Comparativa entre los ensayos térmicos y los resultados de los modelos térmicos matemáticos. Modo Survival.

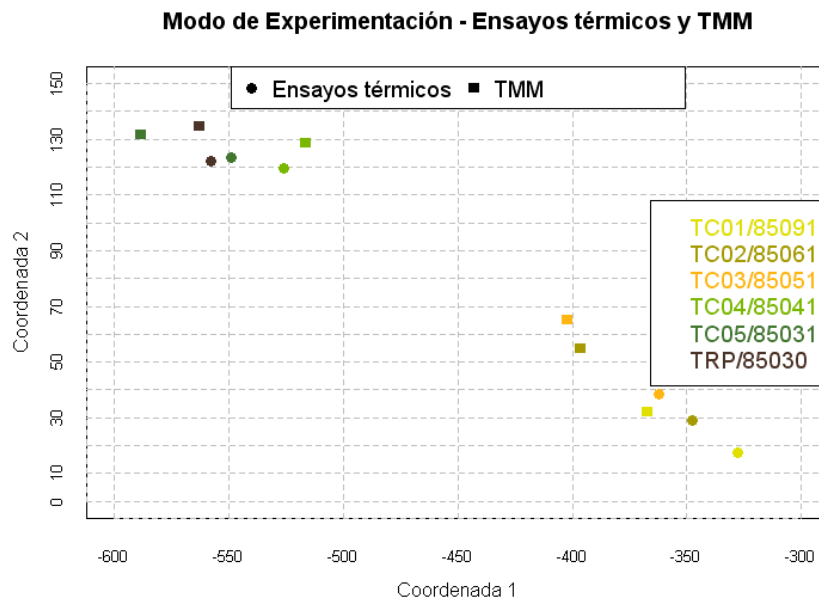


Fig. 56. Comparativa entre los ensayos térmicos y los resultados de los modelos térmicos matemáticos. Modo de Experimentación.

5.2. COMPORTAMIENTO DEL TRIBOLAB EN ÓRBITA

Con el objeto de analizar el comportamiento del TriboLAB en modo Stand By durante su estancia en la ISS, se ha decidido realizar una selección aleatoria de órbitas para su posterior estudio.

Se han seleccionado 51 fechas aleatorias correspondientes a periodos en los que el instrumento se encontraba en modo Stand By.

Debido al gran número de datos contenidos en los archivos de telemetría (datos cada 1 segundo), se ha procedido a filtrar los datos correspondientes a las fechas preseleccionadas junto con los de días cercanos a las mismas con el fin de evitar dificultades debidas a limitaciones de memoria del software empleado en el análisis. De este modo, tras evaluar distintas alternativas (ver el apartado VI.2 del anexo), los registros de datos se han limitado a valores de 1 dato por minuto, lo que permite un aligeramiento considerable de las necesidades de memoria sin una pérdida de exactitud importante.

Con el objeto de realizar una selección de periodos comparables entre sí para proceder a su sincronización, se ha buscado el instante de apagado de termostatos inmediatamente posterior a las fechas aleatorias previamente generadas. Una vez detectado el instante de apagado de los termostatos se han realizado dos extracciones distintas de los datos de telemetría:

- Un periodo de 10 horas tras el apagado de los termostatos. De modo que se dispone de los datos correspondientes a al menos a un ciclo de termostatos.
- Un periodo de 94 minutos, correspondiente a una órbita de la ISS. Realmente el periodo de una órbita es de 5677 segundos (94.62 minutos), pero debido al filtrado de datos realizados solo se dispone de datos cada 1 minuto.

5.2.1. ESTUDIO DE LOS DATOS CORRESPONDIENTES AL PERIODO DE LOS TERMOSTATOS

5.2.1.1 Tratamiento de los datos de los periodos de los termostatos

Finalmente se han seleccionado 51 curvas correspondientes a otros tantos ciclos de termostatos, las cuales se muestran a continuación separadas por meses para una mayor claridad de los datos (Fig. 57 y Fig. 58).

Tal y como puede observarse se distinguen claramente dos tipos de comportamiento en lo que se refiere a los intervalos de temperatura. Mientras que la mayor parte de los ciclos oscilan entre -6 y +6 °C aproximadamente, durante los datos correspondientes al mes de Abril tanto de 2008 como de 2009 se observan algunos ciclos que mantuvieron sus temperaturas entre -6 y +1 °C.

El análisis de este último tipo de ciclos, nos permite ver que las oscilaciones (entre -6 y +1 °C) se producen en intervalos cercanos a 1.5 horas, por lo que esas oscilaciones no son debidas a ciclos de termostatos sino a los periodos de eclipse de la órbita. Probablemente o bien el entorno térmico correspondiente a esos periodos fue más frío que durante el resto del tiempo o bien durante los mismos la potencia disipada por los heaters fue menor, de modo que la temperatura del equipo no se elevó por encima de la temperatura de apagado de los termostatos y estos se mantuvieron permanentemente encendidos. También el mes de Noviembre presenta un comportamiento ligeramente diferente alcanzando temperaturas mínimas más bajas que en el resto de los meses.

Por otra parte, en lo que corresponde al periodo de los ciclos, se aprecia la existencia de cierta dispersión, con ciclos que oscilan entre 9 horas o más y otros de tan solo 6 horas. En principio los ciclos más cortos estarían asociados a entornos térmicos más fríos, lo que origina una mayor velocidad de enfriamiento y una encendido más temprano de los heaters.

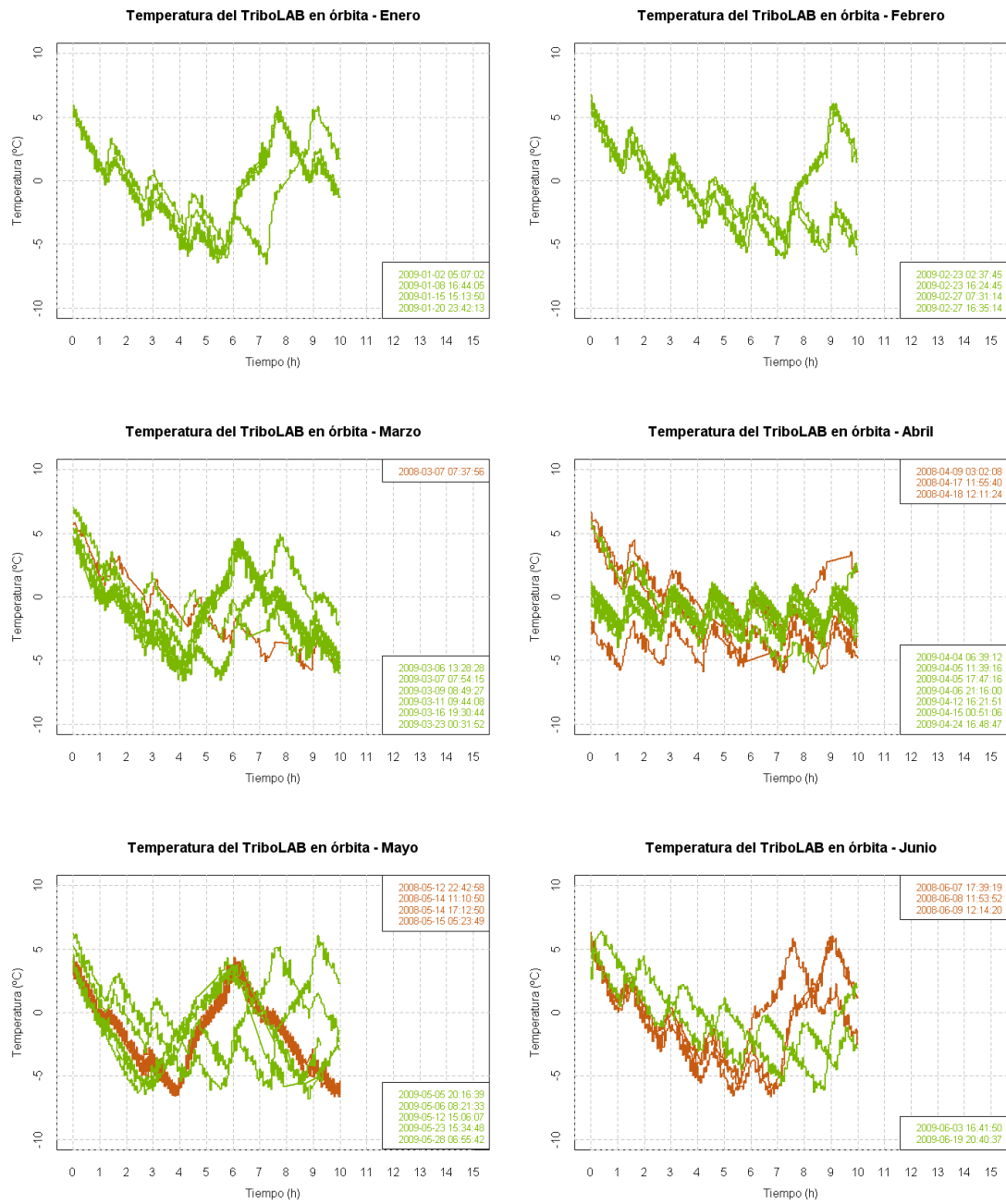


Fig. 57. Temperatura del TriboLAB en órbita correspondiente a los periodos seleccionados pertenecientes a los seis primeros meses del año.

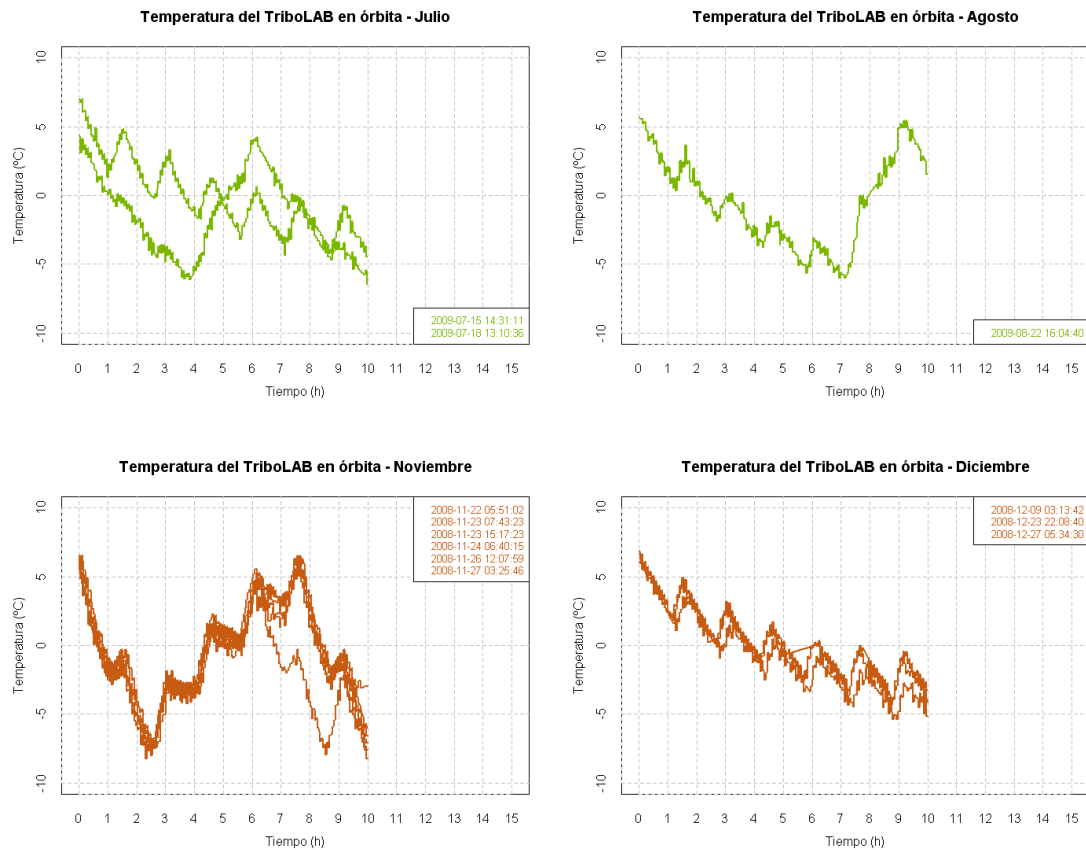


Fig. 58. Temperatura del TriboLAB en órbita correspondiente a los periodos seleccionados pertenecientes a los seis últimos meses del año.

Tal y como puede observarse en las imágenes previas, a pesar del filtrado realizado las curvas siguen siendo muy escalonadas por lo que no resultan apropiadas para su estudio. Por ello, se ha decidido suavizarlas.

Ello se ha realizado mediante la aplicación de la función `lowess` implementada en R. Esta función, previamente explicada en el apartado 2.7.1 de esta tesis, se basa en un ajuste polinomial local. Tras su aplicación con un valor de ajuste²⁰ igual a 0.05/3 se obtienen los resultados mostrados en las imágenes siguientes (Fig. 59 y Fig. 60).

²⁰ Este factor indica la proporción de puntos del gráfico considerados en el suavizado de cada valor, de modo que a mayores valores de este factor, mayores suavizados.

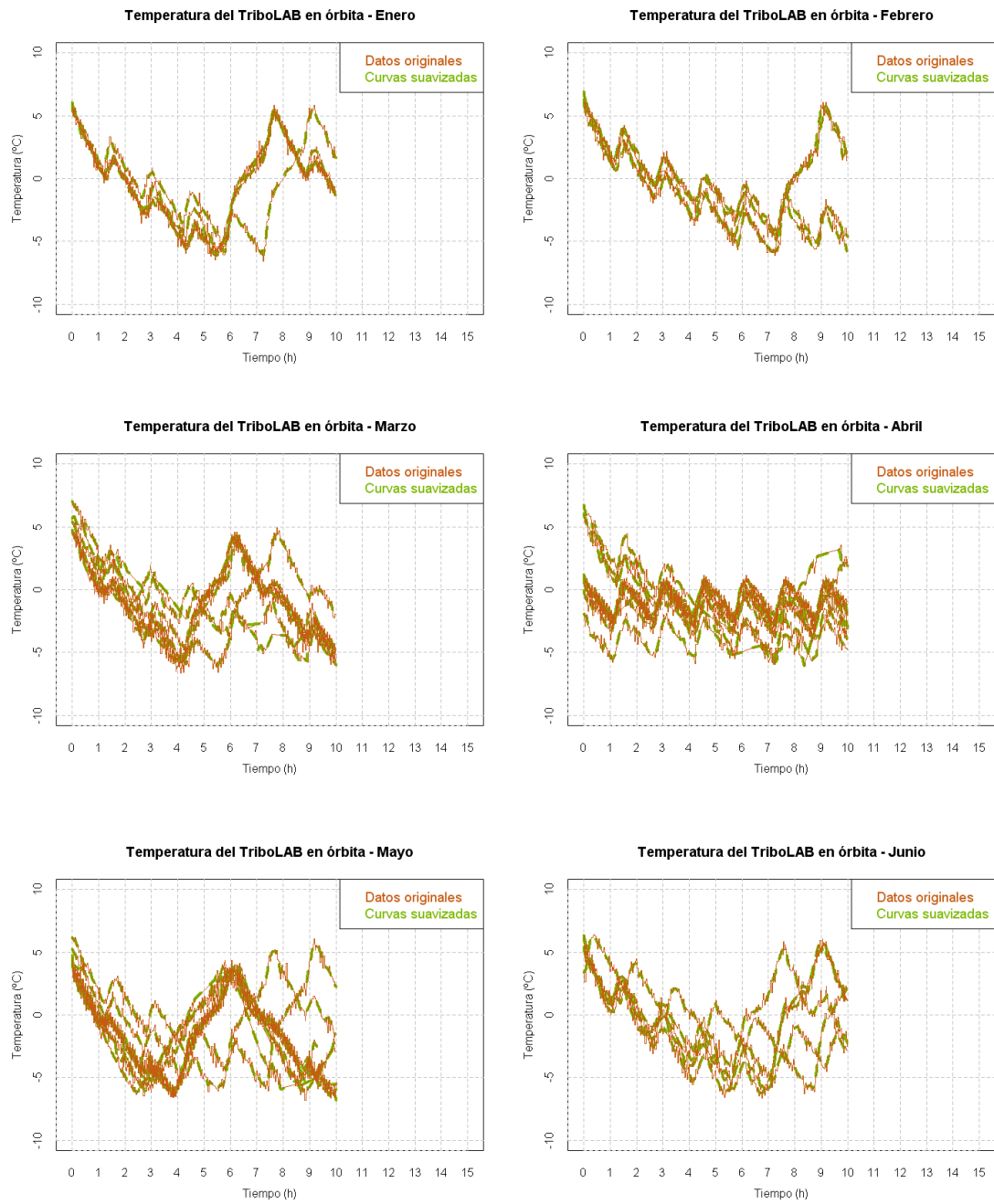


Fig. 59. Temperatura del TriboLAB en órbita junto con sus curvas suavizadas correspondiente a los periodos seleccionados pertenecientes a los seis primeros meses del año.

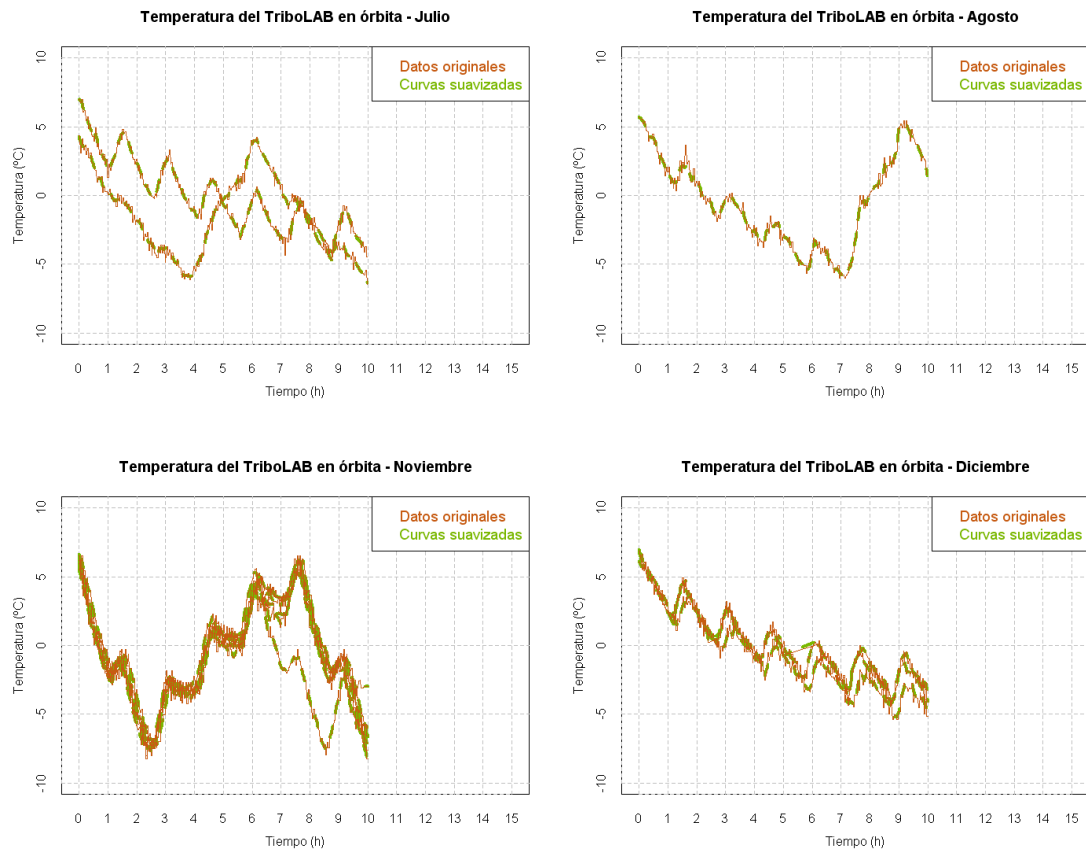


Fig. 60. Temperatura del TriboLAB en órbita junto con sus curvas suavizadas correspondiente a los periodos seleccionados pertenecientes a los seis últimos meses del año.

Una vez suavizadas las curvas el siguiente problema que nos encontramos es que los datos no están balanceados, es decir, a pesar de que se han sincronizados los inicios de los registros y aunque todas las curvas cubren un periodo de 10 horas, no todas presentan el mismo número de datos debido a la pérdida de paquetes de información que se producía ocasionalmente durante la recepción de la telemetría.

Si bien es cierto que la función de suavizado empleada realiza una regresión polinomial que le permite suavizar la curva a pesar de la existencia de saltos entre los datos, la curva resultante tras el suavizado presenta el mismo número de datos que la curva original.

La metodología empleada para conseguir balancear los datos ha sido la realización de un ajuste de los mismos a curvas de tipo spline. Para ello se ha empleado la función implementada en R denominada `spline` (previamente explicada en el apartado 2.7.2), en la cual se han definido puntos de interpolación fijos cada 5 minutos para todas las curvas, consiguiendo así tener todos los datos correctamente balanceados.

Las imágenes siguientes (Fig. 61 y Fig. 62) muestran los resultados del ajuste realizado, con el objeto de poder comparar los datos originales con las curvas correspondientes al ajuste final.

Se han eliminado los datos de tres orbitas, pues la elevada presencia de valores NA (*missing values*) en las mismas, imposibilitaba un buen ajuste de la curva. Por ello finalmente se han estudiado un total de 48 curvas.

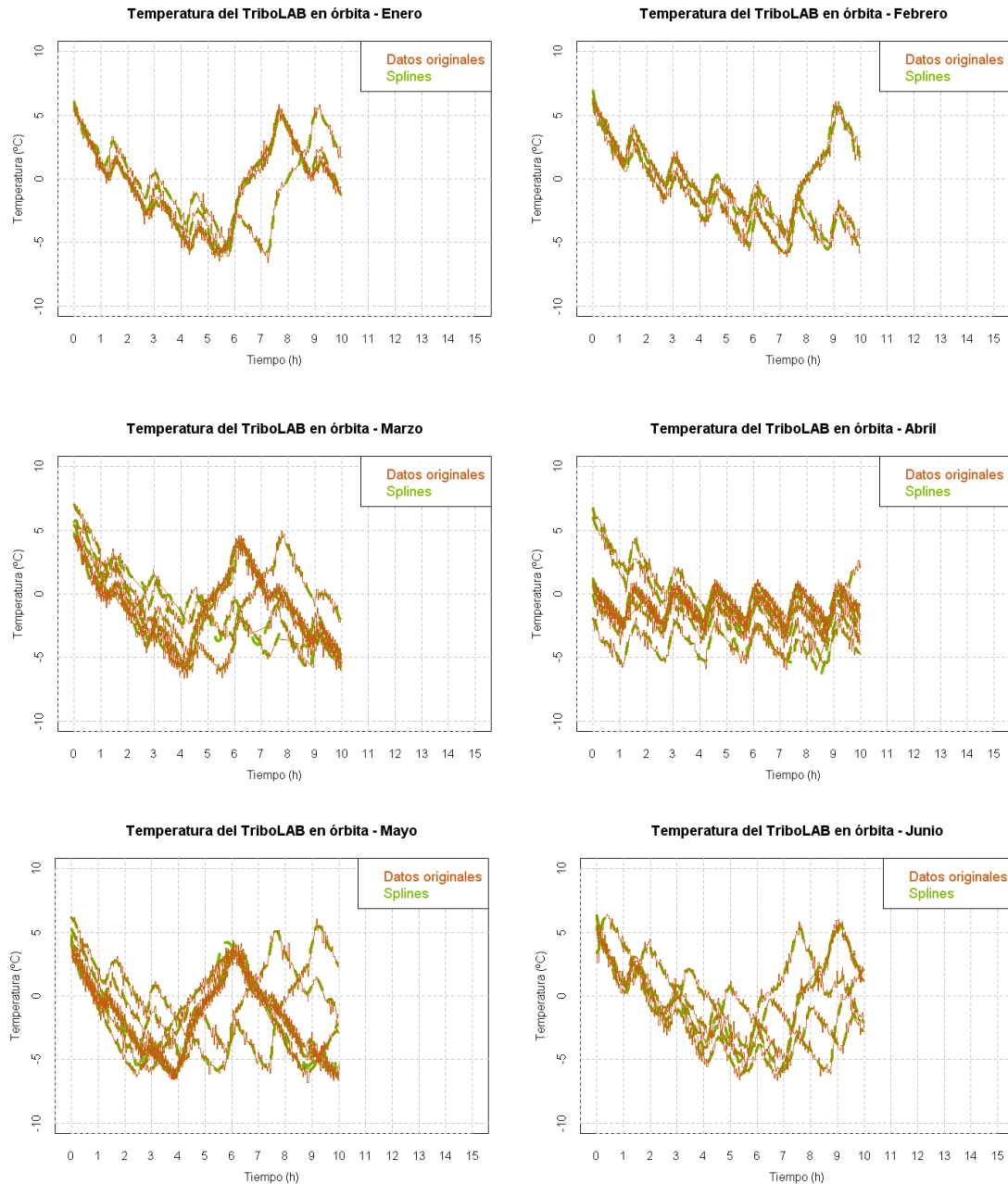


Fig. 61. Temperatura del TriboLAB en órbita junto con sus ajustes mediante splines correspondiente a los periodos seleccionados pertenecientes a los seis primeros meses del año.

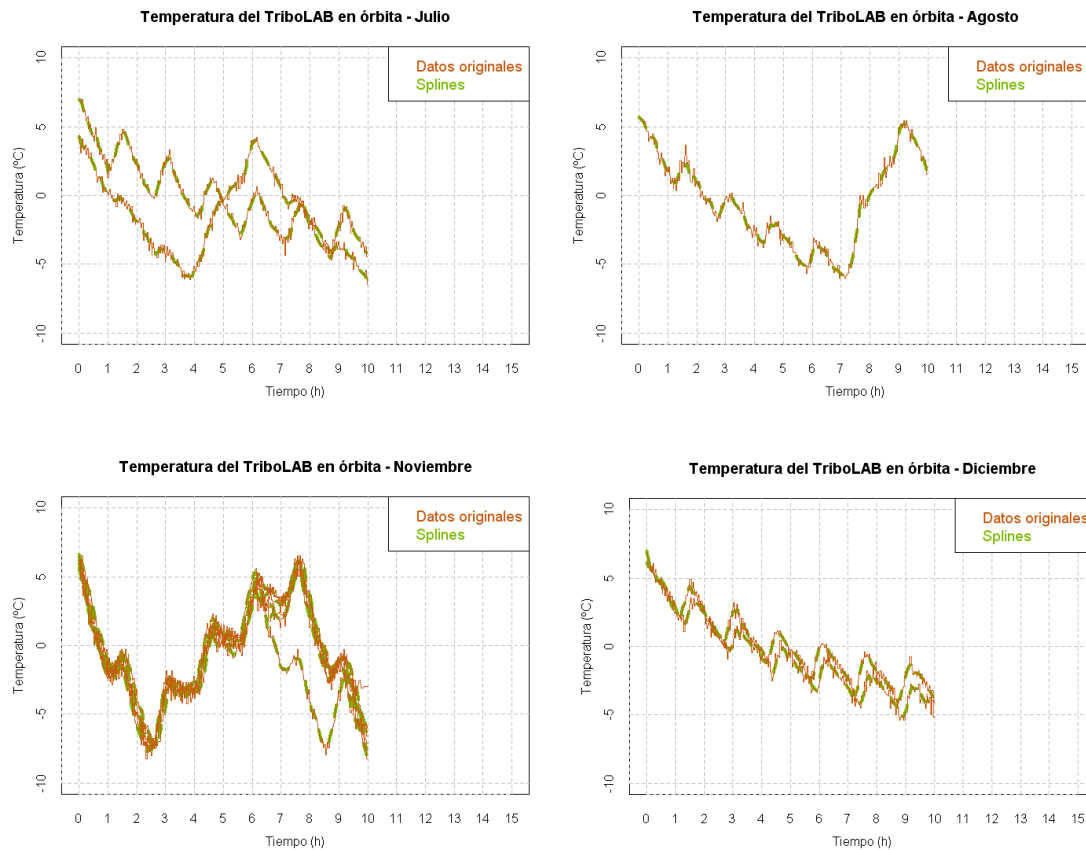


Fig. 62. Temperatura del Tribolab en órbita junto con sus ajustes mediante splines correspondiente a los periodos seleccionados pertenecientes a los seis últimos meses del año.

5.2.1.2 Análisis de coordenadas principales de los periodos de los termostatos

La Fig. 63 muestra la representación de las curvas correspondientes a las temperaturas del Tribolab registradas durante los periodos correspondientes a distintos ciclos de termostatos, sobre sus dos primeras componentes (retención de variabilidad igual al 100%).

Tras el estudio de la misma se puede concluir que la coordenada 1 recoge la variabilidad del periodo de los termostatos en los distintos ciclos mientras que la coordenada 2 representaría la variabilidad de temperaturas entre los distintos ciclos estudiados.

La diferenciación de las curvas en base al año al cual corresponden los datos de temperatura, muestra un comportamiento igual de disperso en ambos casos, por lo que no se aprecian diferencias entre uno y otro año.

Comparativa entre ciclos de termostatos

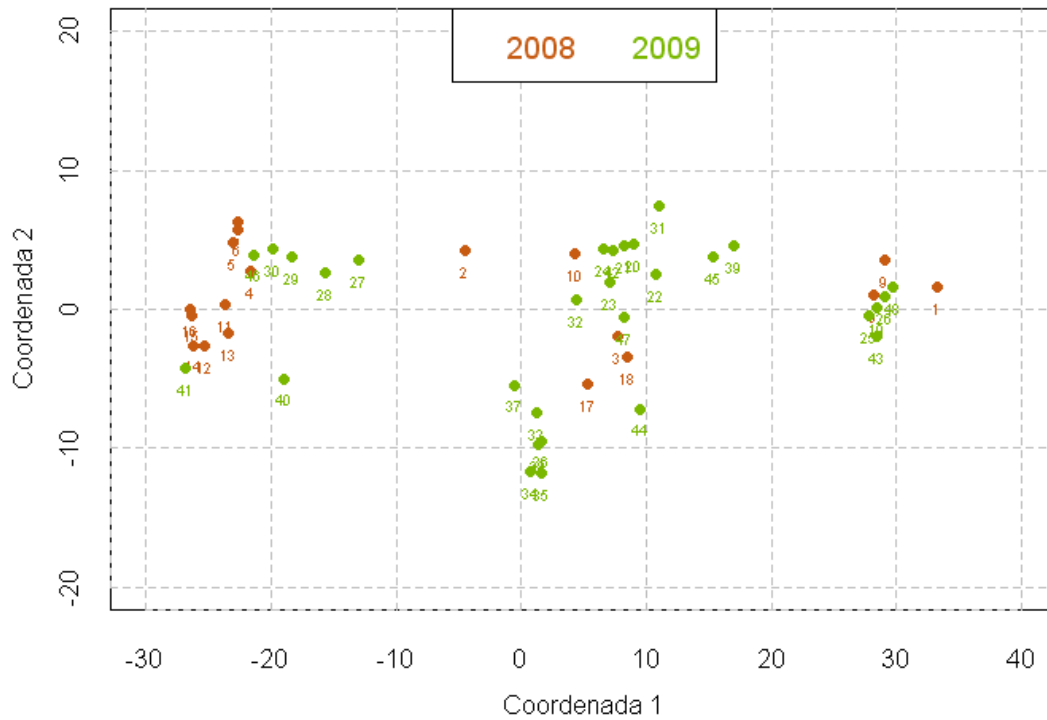


Fig. 63. Comparativa de las curvas de temperatura registradas en el TriboLAB durante distintos ciclos de termostatos²¹.

La diferenciación de las curvas en base al mes al cual corresponde el ciclo representado (Fig. 64) permite observar la presencia de algunos meses cuyos ciclos presentan un comportamiento muy similar (su representación aparece muy agrupada, por ejemplo noviembre) mientras que en otros hay una mayor variabilidad (su representación aparece muy repartida en gráfico). De lo que se concluye que aunque en ciertos meses si hay un cierto componente estacional, este tampoco es muy definido.

²¹ En el apartado VI.3 se incluye la relación entre el número de órbita indicado en el gráfico y la fecha correspondiente a la misma.

Comparativa entre ciclos de termostatos

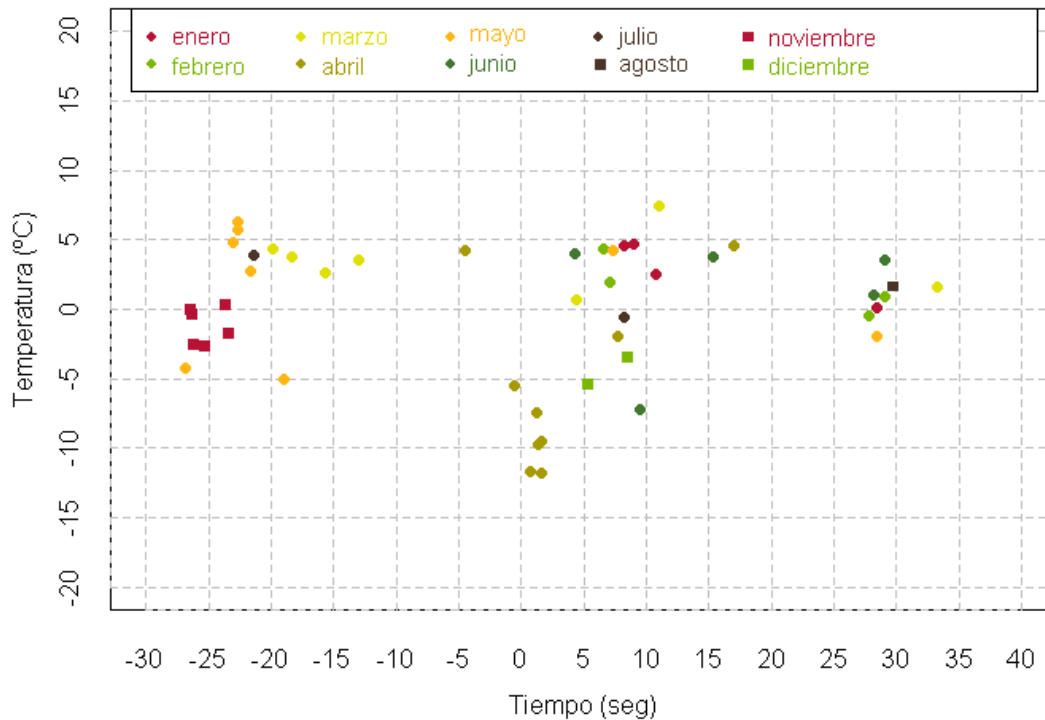


Fig. 64. Comparativa de las curvas de temperatura registradas en el TriboLAB durante distintos ciclos de termostatos.

5.2.2. ESTUDIO DE LOS DATOS CORRESPONDIENTES AL PERIODO DE LA ÓRBITA

5.2.2.1 Tratamiento de los datos de los periodos de la órbita

Al igual que se ha realizado anteriormente en el estudio de los ciclos de termostatos, se muestran a continuación las imágenes correspondientes a los periodos de las órbitas estudiadas separadas por meses para una mayor claridad.

Al igual que en el caso de los ciclos de los termostatos, también en este caso se distinguen dos tipos de comportamientos en lo que se refiere a los intervalos de temperaturas. La mayor parte de las órbitas estudiadas muestran temperaturas comprendidas entre 0 y +6 °C aproximadamente, con la excepción de los meses de Abril y Noviembre donde se observan valores más bajos.

Por otra parte, en lo que corresponde al periodo de las órbitas, también se aprecia la existencia de una cierta dispersión, pero menor que la observada en el caso de los termostatos. Todas las

órbitas estudiadas alcanzan el punto de temperatura mínima entre los minutos 60 y 80, aunque la mayor parte de las mismas lo hace sobre el minuto 70.

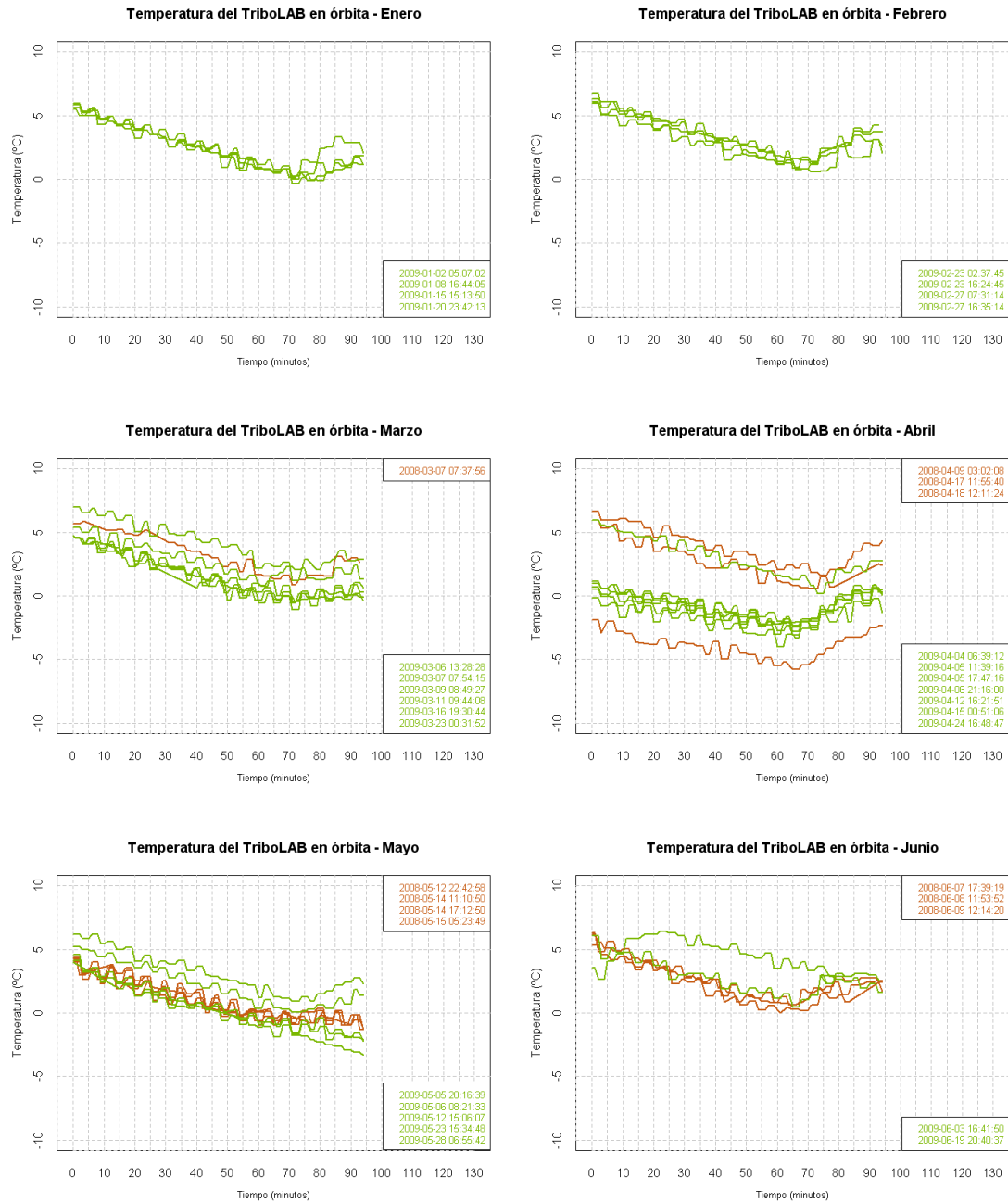


Fig. 65. Temperatura del TriboLAB en órbita correspondiente a las órbitas seleccionadas pertenecientes a los seis primeros meses del año.

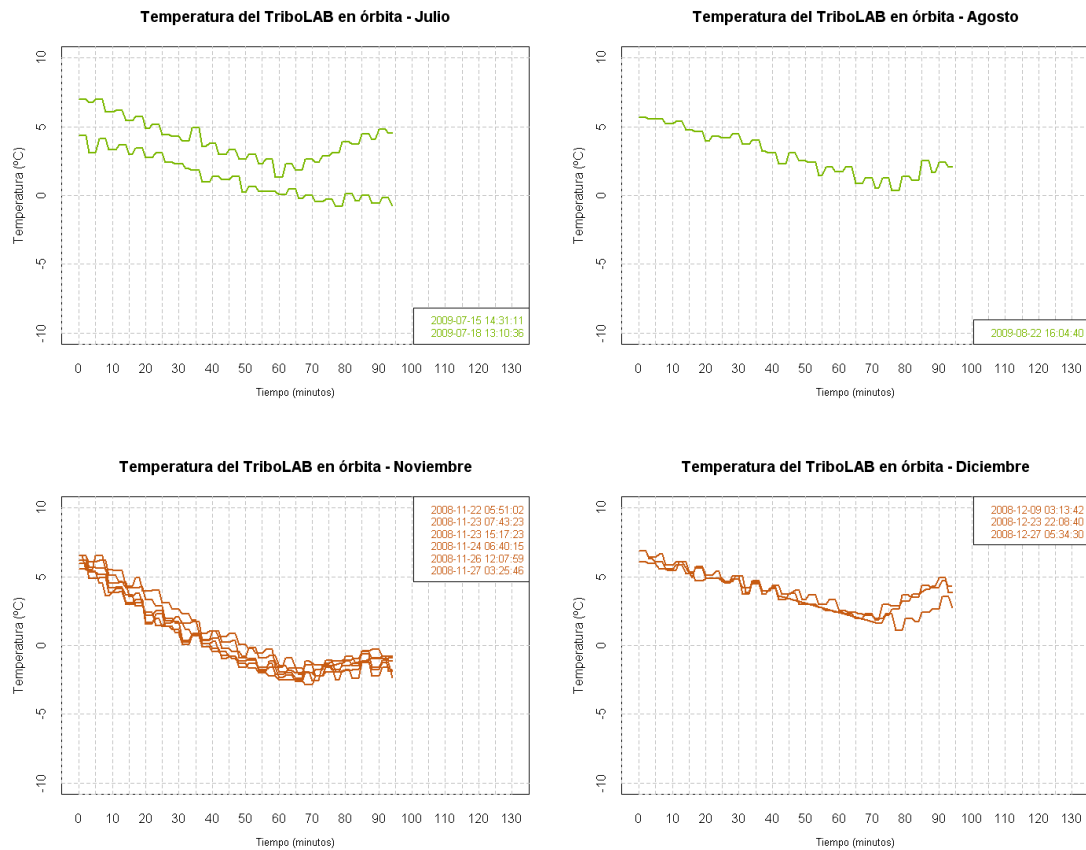


Fig. 66. Temperatura del TriboLAB en órbita correspondiente a las órbitas seleccionadas pertenecientes a los seis últimos meses del año.

También en este caso es necesario proceder a un suavizado de las curvas con el fin de eliminar el escalonado tan acusado que presentan. Al igual que en el caso de los ciclos de termostatos se ha empleado la función `lowess` implementada en R, pero en este caso con una valor de ajuste de filtrado mayor, igual a 1/3. Tras su aplicación se han obtenido los resultados mostrados en las imágenes siguientes (Fig. 67 y Fig. 68).



Fig. 67. Temperatura del TriboLAB en órbita junto con sus curvas suavizadas correspondiente a los periodos seleccionados pertenecientes a los seis primeros meses del año.

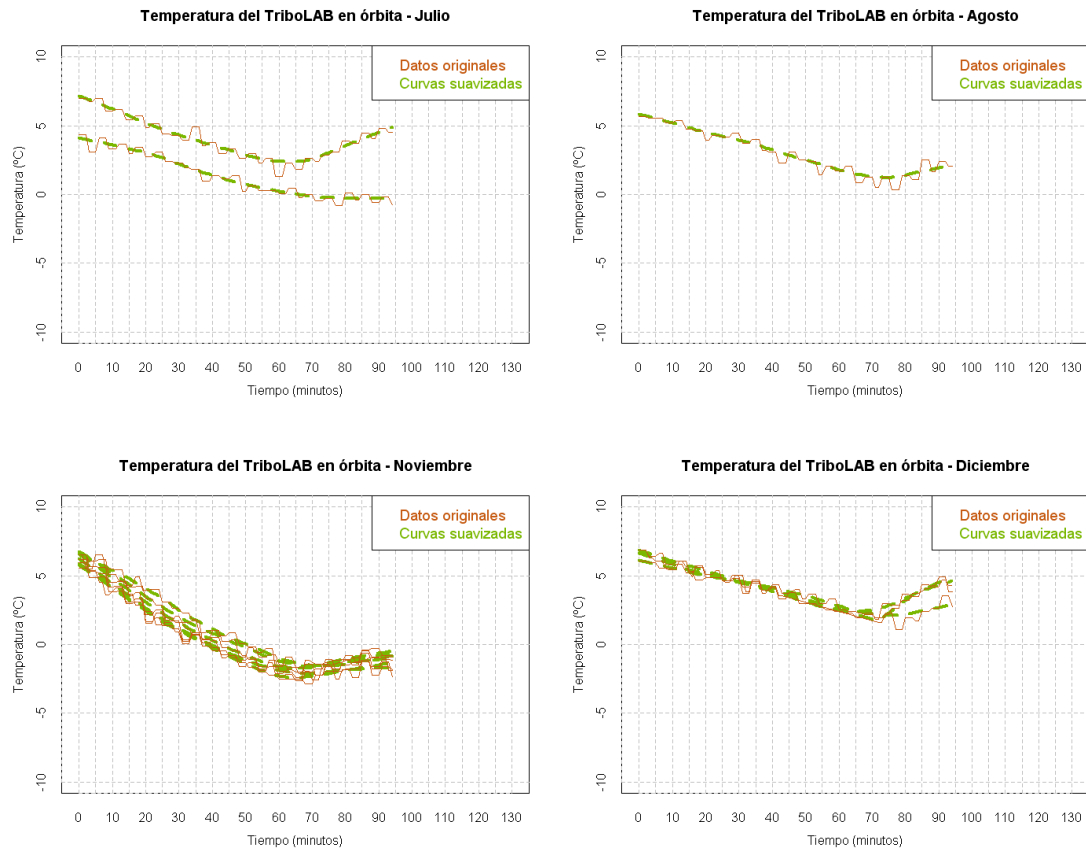


Fig. 68. Temperatura del TriboLAB en órbita junto con sus curvas suavizadas correspondiente a los periodos seleccionados pertenecientes a los seis últimos meses del año.

Una vez suavizadas las curvas, de nuevo nos encontramos el problema de los datos no balanceados debido a la pérdida de paquetes de información ocurrida ocasionalmente durante la recepción de la telemetría.

Al igual que se ha realizado previamente con los datos correspondientes a los ciclos de los termostatos, también en este caso la estrategia adoptada a consistido en la realización de un ajuste de los mismos a curvas de tipo spline. De igual modo el ajuste se ha realizado mediante la función `spline` implementada en R, aunque en este caso los puntos de interpolación se han establecido cada 1 minuto.

Las imágenes siguientes (Fig. 69 y Fig. 70) muestran los resultados del ajuste realizado, con el objeto de poder comparar los datos originales con las curvas correspondientes al ajuste final. También en esta ocasión se han eliminado los datos de tres orbitas debido a la elevada presencia de valores NA, estudiando finalmente un total de 48 órbitas.

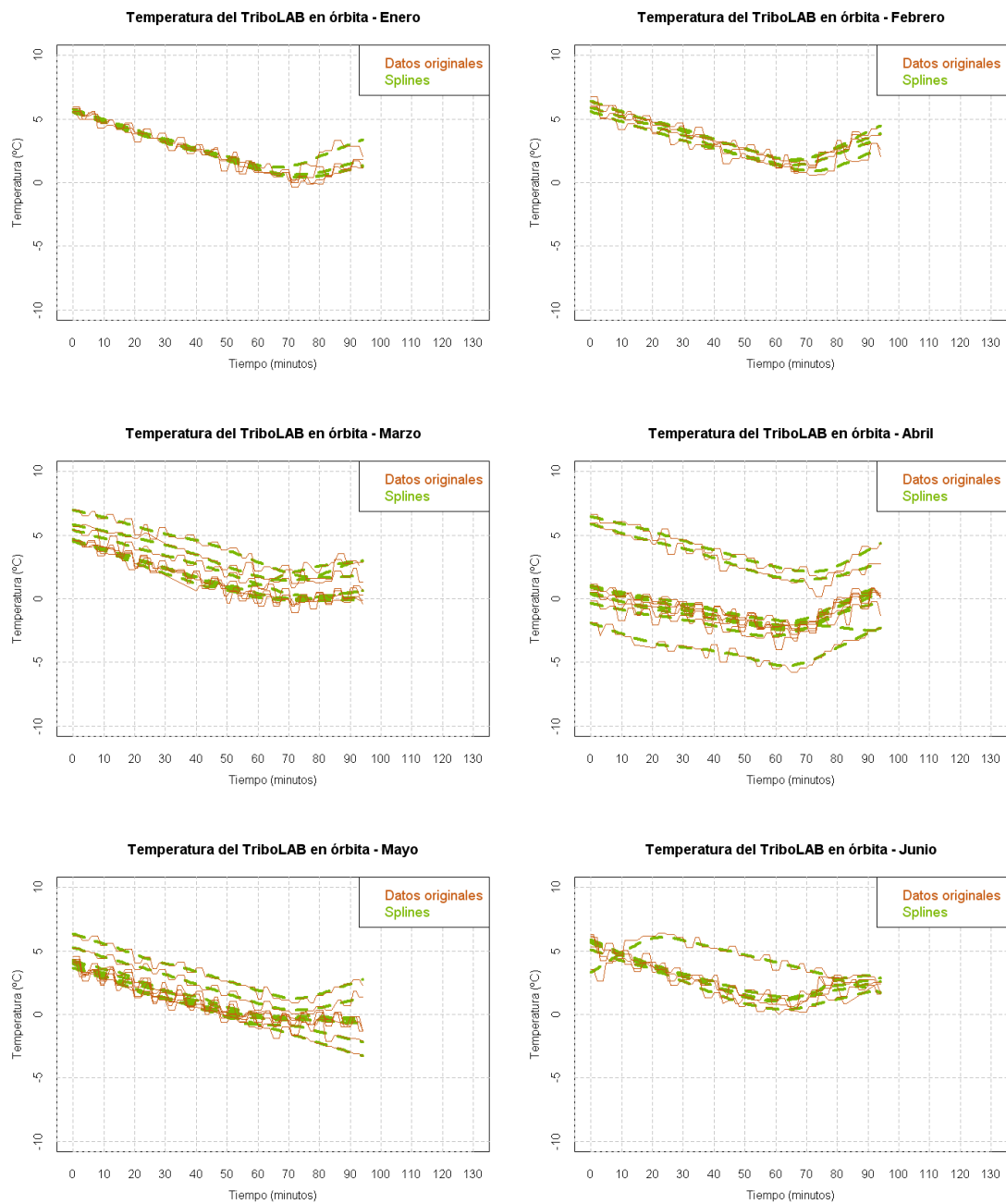


Fig. 69. Temperatura del TriboLAB en órbita junto con sus ajustes mediante splines correspondiente a los periodos seleccionados pertenecientes a los seis primeros meses del año.

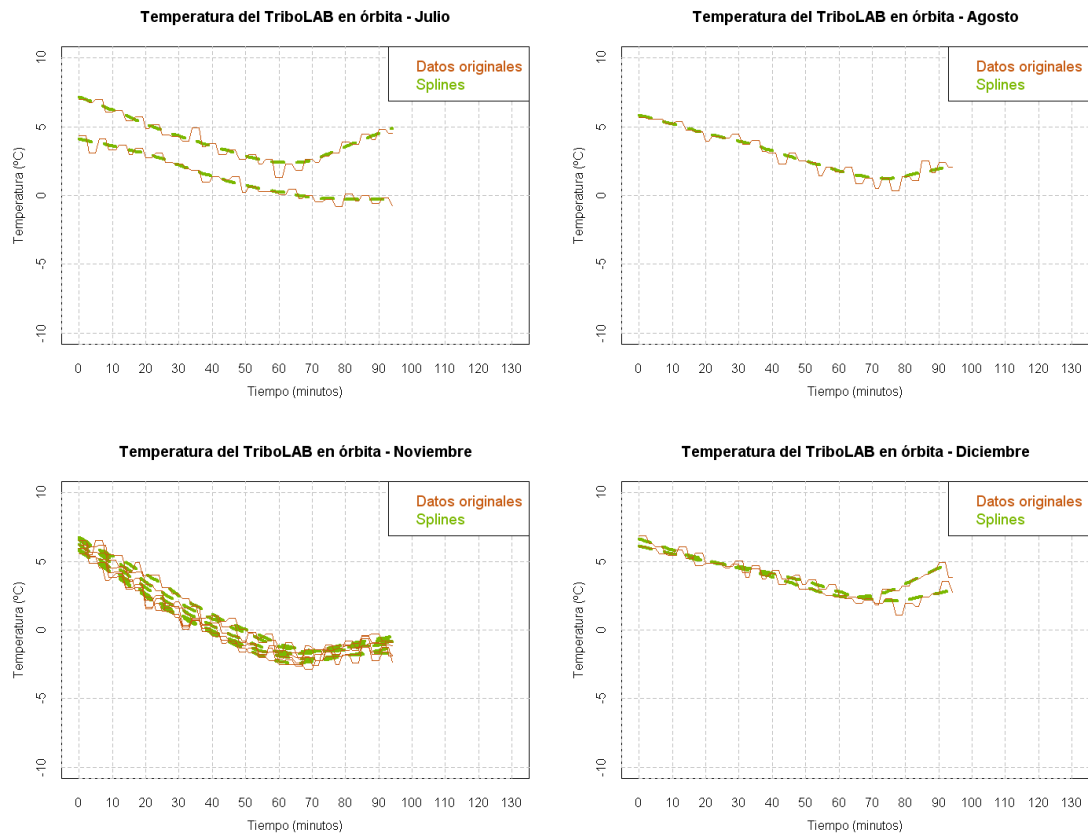


Fig. 70. Temperatura del TriboLAB en órbita junto con sus ajustes mediante splines correspondiente a los periodos seleccionados pertenecientes a los seis últimos meses del año.

5.2.2.2 Análisis de coordenadas principales de los periodos de la órbita

La Fig. 71 muestra la representación de las curvas correspondientes a las temperaturas del TriboLAB registradas durante los periodos correspondientes a las órbitas estudiadas, sobre sus dos primeras componentes (retención de variabilidad igual al 100%).

En este caso, al contrario de lo que ocurría con los ciclos de los termostatos, la coordenada 1 recoge la variabilidad de las temperaturas de las distintas órbitas, mientras que la coordenada 2 parece estar más relacionada con los periodos de las órbitas.

La diferenciación de las curvas en base al año al cual corresponden los datos de temperatura también muestra un comportamiento igual de disperso para ambos años, tal y como ocurría en el caso de los ciclos de termostatos.

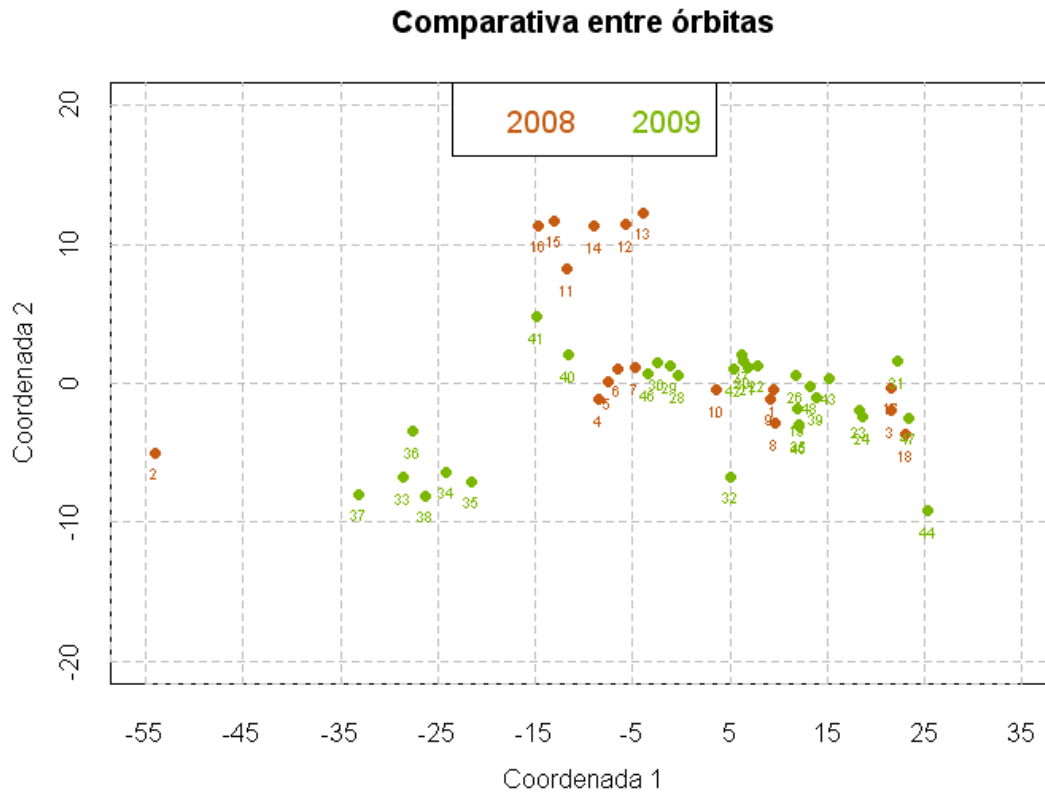


Fig. 71. Comparativa de las curvas de temperatura registradas en el TriboLAB durante distintas órbitas²².

La diferenciación de las curvas en base al mes al cual corresponde la órbita representada (Fig. 72) permite observar la presencia de algunos meses cuyas órbitas presentan un comportamiento muy similar (su representación aparece muy agrupada, por ejemplo noviembre) mientras que en otros hay una mayor variabilidad (su representación aparece muy repartida en gráfico). Por lo tanto al igual que ocurría con los periodos de los termostatos parece haber un cierto componente de estacionalidad pero poco acusado.

²² En el apartado VI.3 se incluye la relación entre el número de órbita indicado en el gráfico y la fecha correspondiente a la misma.

Comparativa entre orbitas

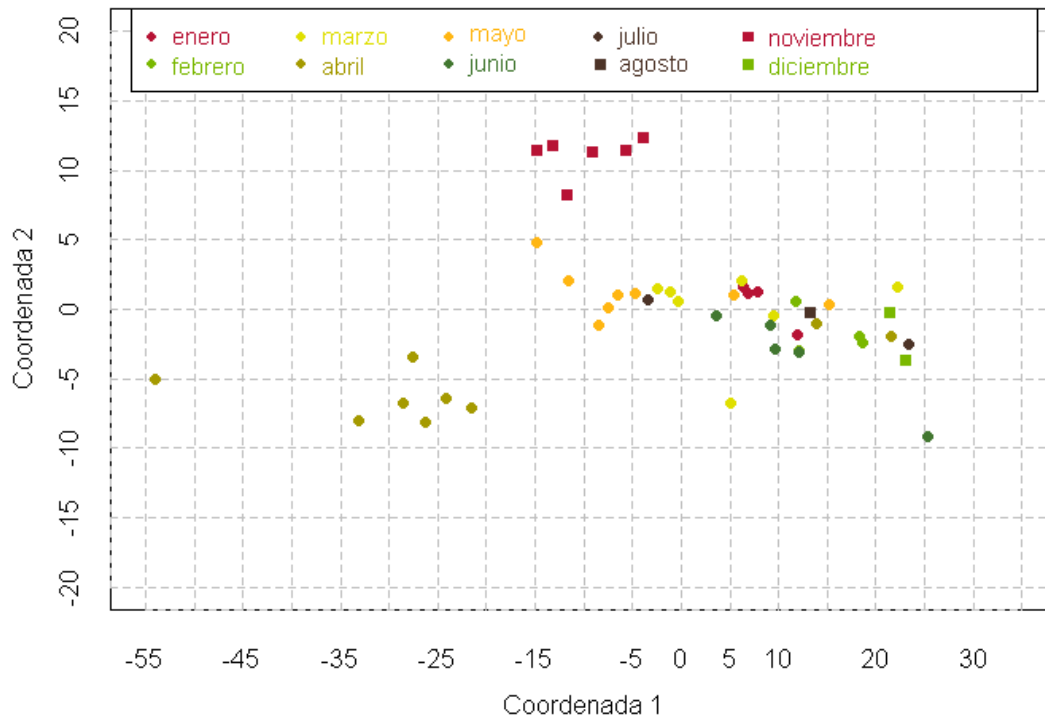


Fig. 72. Comparativa de las curvas de temperatura registradas en el TriboLAB durante distintas órbitas.

5.3. COMPARACIÓN ENTRE EL COMPORTAMIENTO EN ÓRBITA Y LOS TMM.

5.3.1. COMPARACIÓN DIRECTA: TELEMETRÍA VS TMM

Se ha realizado una primera comparación directa de los datos de telemetría con los resultados de los modelos matemáticos de su comportamiento en órbita.

Para ello se han seleccionado los resultados de los modelos matemáticos representativos del modo de operación estudiado bajo distintas condiciones de funcionamiento (ver 4.3.3) y se han sincronizado sus resultados a partir de uno de los puntos de apagado de los termostatos. En el caso de los modelos matemáticos correspondientes a los casos caliente y nominal con disipaciones mínimas, los cuales no presentan encendidos/apagados de termostatos, se han tomado los datos una vez alcanzada la estabilización térmica.

En lo que respecta a los datos de telemetría, inicialmente se han seleccionado los datos correspondientes a los primeros días de Enero de 2009, puesto que como se vio en el apartado 5.2.1.1 de esta memoria presentan un comportamiento que podríamos considerar bastante

típico. Las imágenes siguientes muestran la comparativa entre estos datos y los modelos matemáticos.

Lo primero que se observa es que el modelo matemático correspondiente al funcionamiento en entorno caliente (Fig. 73) presenta un comportamiento totalmente diferente del observado en órbita, con temperaturas mucho más elevadas (en torno a a los 35°C). De todos modos, resulta muy interesante comprobar como los resultados del modelo matemático reproducen el comportamiento oscilatorio correspondiente a las fases de eclipse y exposición solar que se producen durante la órbita.

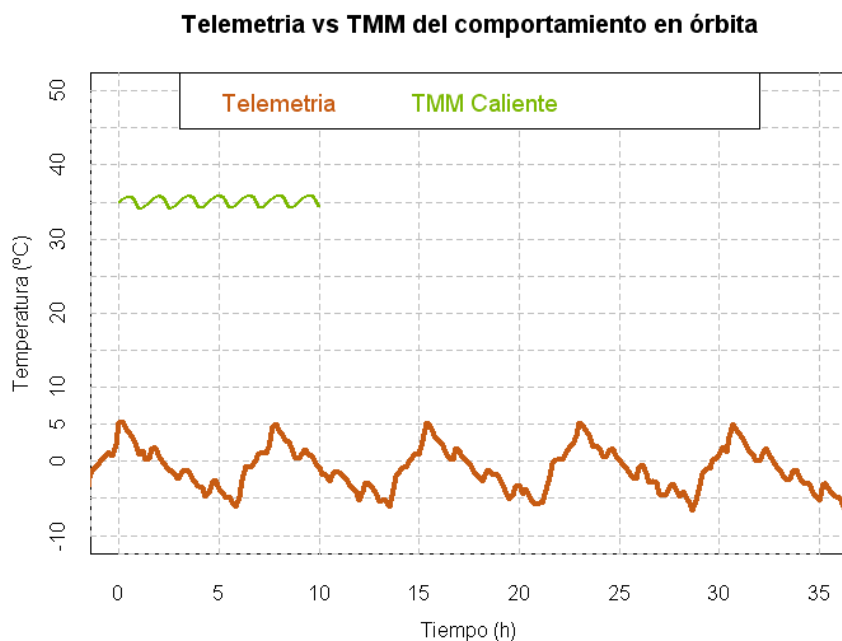


Fig. 73. Comparativa de la telemetría del TriboLAB en órbita con los resultados de los modelos matemáticos del modo Stand By en un entorno caliente.

El resto de casos, tanto en entorno frío (Fig. 74) como en entorno nominal (Fig. 75) presentan las oscilaciones típicas correspondientes a los ciclos de los termostatos, con la excepción de los casos de funcionamiento con disipaciones mínimas. Estos últimos, presentan un comportamiento similar al observado en el caso caliente en cuanto a la uniformidad de las temperaturas, con una leve oscilación relacionada con la órbita, solo que a temperaturas mucho más bajas (entre -5°C y 0°C) y mucho más cercanas a las observadas en órbita.

Respecto al resto de los resultados, en particular los del caso correspondiente al entorno nominal con disipaciones máximas, encajan muy bien con el comportamiento observado en órbita durante esos primeros días de Enero.

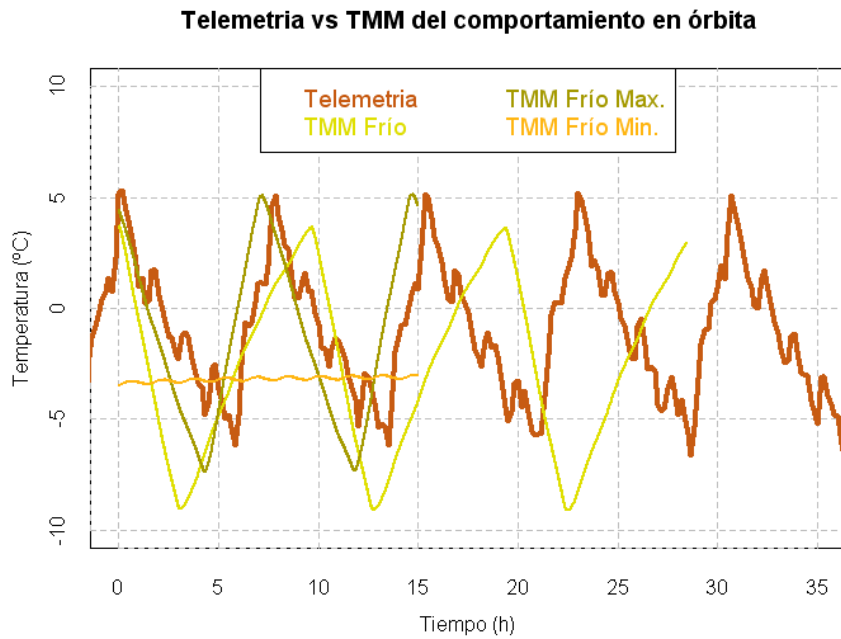


Fig. 74. Comparativa de la telemetría del TriboLAB en órbita con los resultados de los modelos matemáticos del modo Stand By en entorno frío.

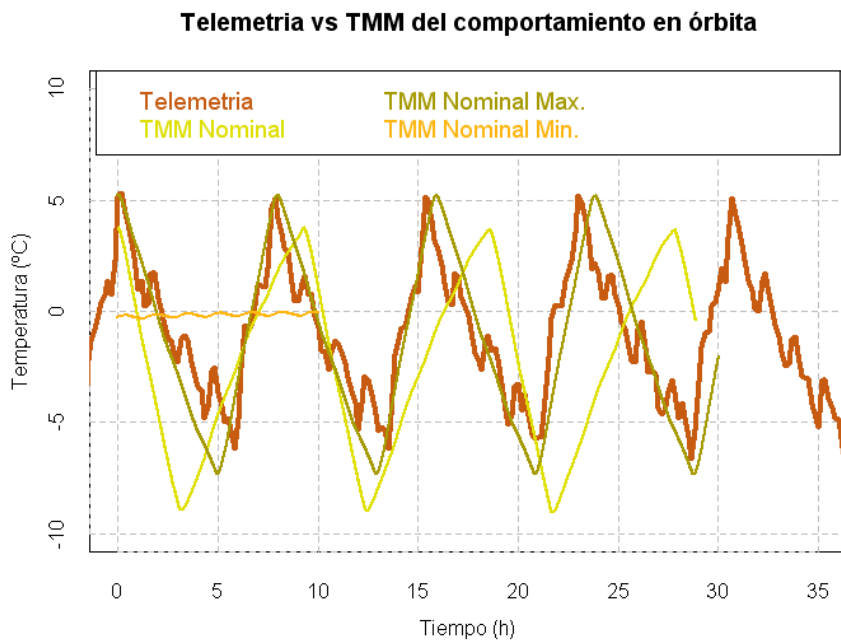


Fig. 75. Comparativa de la telemetría del TriboLAB en órbita con los resultados de los modelos matemáticos del modo Stan By en entorno Nominal.

Con el objeto de realizar una comparativa un poco más en profundidad se ha decidido comparar los modelos matemáticos con algunos de los ciclos de termostatos estudiados previamente en el apartado 5.2.1. Para ello se han seleccionado 5 de dichos ciclos, representativos de los distintos comportamientos observados. Para una mayor claridad se ha realizado un gráfico dedicado a cada uno de los modelos matemáticos empleados, los cuales se muestran a continuación.

Resulta especialmente interesante la Fig. 76, donde se observa que los modelos correspondientes al funcionamiento con disipaciones mínimas, en contra de lo que parecía en un primer momento, encajan muy bien con uno de los tipos de ciclos observados durante el comportamiento en órbita (indicado con línea verde gruesa en la mencionada figura). Los resultados correspondientes al entorno nominal coinciden con las temperaturas máximas registradas en ese tipo de ciclo, mientras que los del caso frío lo hacen con las mínimas.

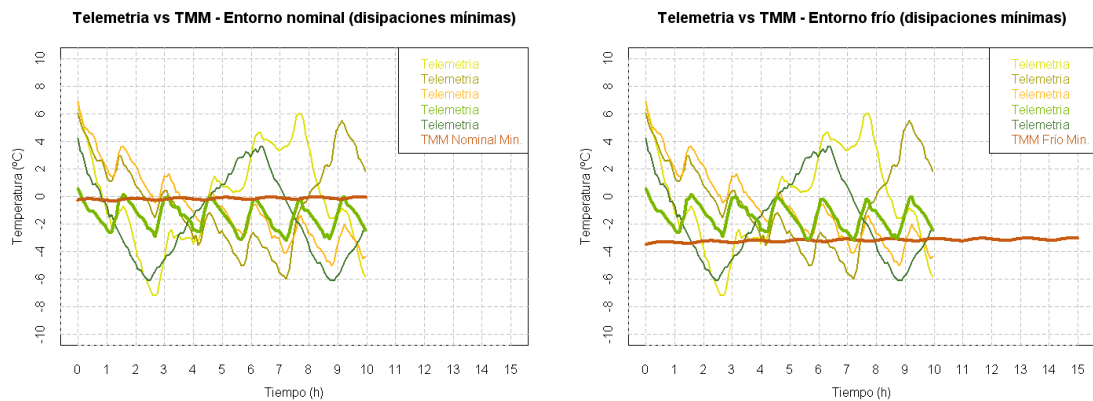


Fig. 76. Comparativa de la telemetría del TriboLAB en órbita con los resultados de los modelos matemáticos en entorno nominal y frío con disipaciones mínimas.

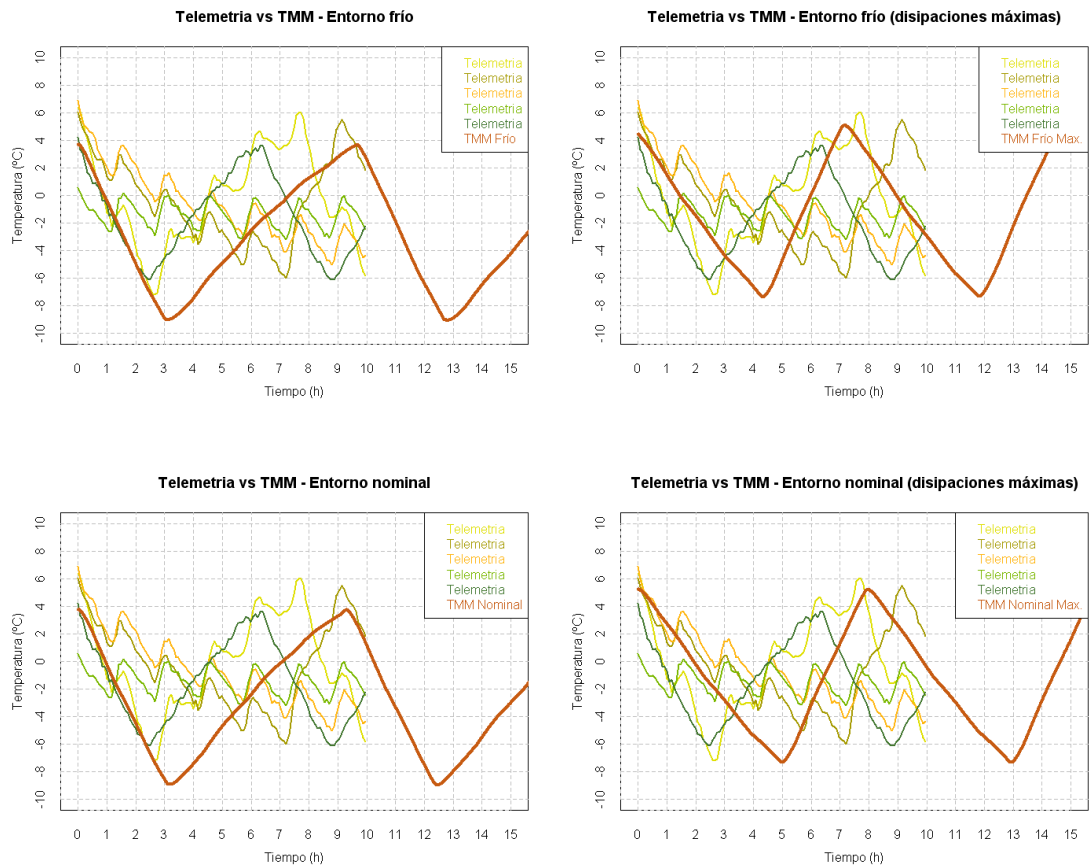


Fig. 77. Comparativa de la telemetría del TriboLAB en órbita con los resultados de los modelos matemáticos en entorno nominal y frío con disipaciones nominales y máximas.

Por lo demás el resto de los casos coinciden en mayor o menor medida con parte de los ciclos observados en órbita, en unos casos presentando una buena reciprocidad con la velocidad de enfriamiento de algunos ciclos, en otros con el periodo de encendido de los termostatos, etc.

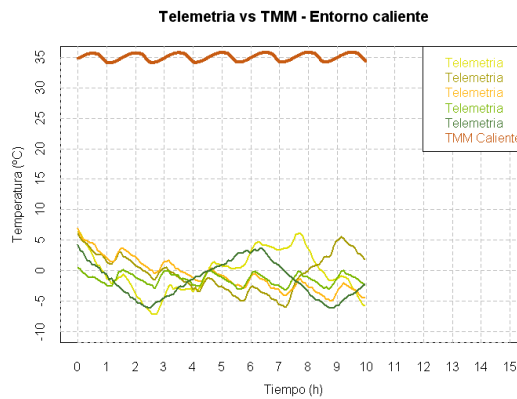


Fig. 78. Comparativa de la telemetría del TriboLAB en órbita con los resultados de los modelos matemáticos del modo Stand By en entorno caliente (disipaciones nominales).

5.3.2. ANÁLISIS DE COORDENADAS PRINCIPALES: TELEMETRÍA VS TMM

Tras el análisis de coordenadas principales realizado, la siguiente figura (Fig. 79) muestra la representación, sobre sus dos primeras componentes, de las temperaturas del TriboLAB registradas durante los periodos correspondientes a las órbitas estudiadas y las correspondientes a los resultados de los modelos matemáticos (retención de variabilidad igual al 100%).

Se observa claramente que el punto correspondiente a los resultados de simulación del caso caliente (Hot) se encuentra muy alejado del resto, lo cual es coherente con lo observado previamente en la comparación directa realizada. Por ello, se ha decidido descartar dicho punto.

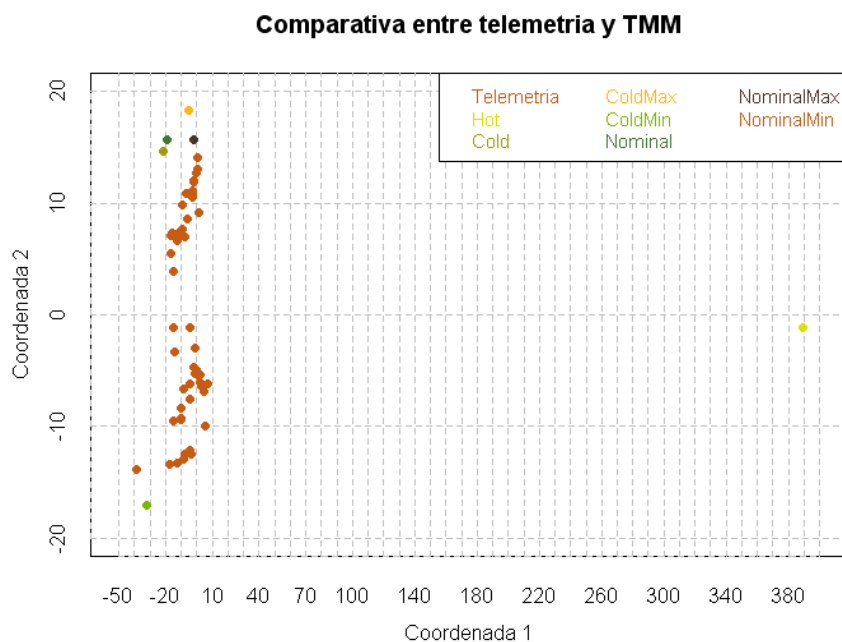


Fig. 79. Comparativa de las temperaturas registradas en órbita y las obtenidas en los modelos matemáticos.

El estudio de los resultados una vez eliminado el punto representativo de la simulación del caso caliente, permite observar como los correspondientes a las temperaturas registradas en órbita se encuentran englobados dentro del perímetro definido por los puntos correspondientes a las temperaturas procedentes de los modelos matemáticos (ver Fig. 80). Este efecto es coherente con lo esperado, pues el diseño del control térmico se basa en el estudio de los modelos correspondientes a los casos más críticos que pueden tener lugar en órbita, esperando que el comportamiento en órbita se encuentre comprendido dentro de estos extremos. Únicamente los resultados de los modelos matemáticos correspondientes al entorno nominal presentan un comportamiento un poco peor de lo previsto, pues se esperaba que apareciesen más agrupados con los correspondientes al comportamiento en órbita.

Comparativa entre telemetria y TMM

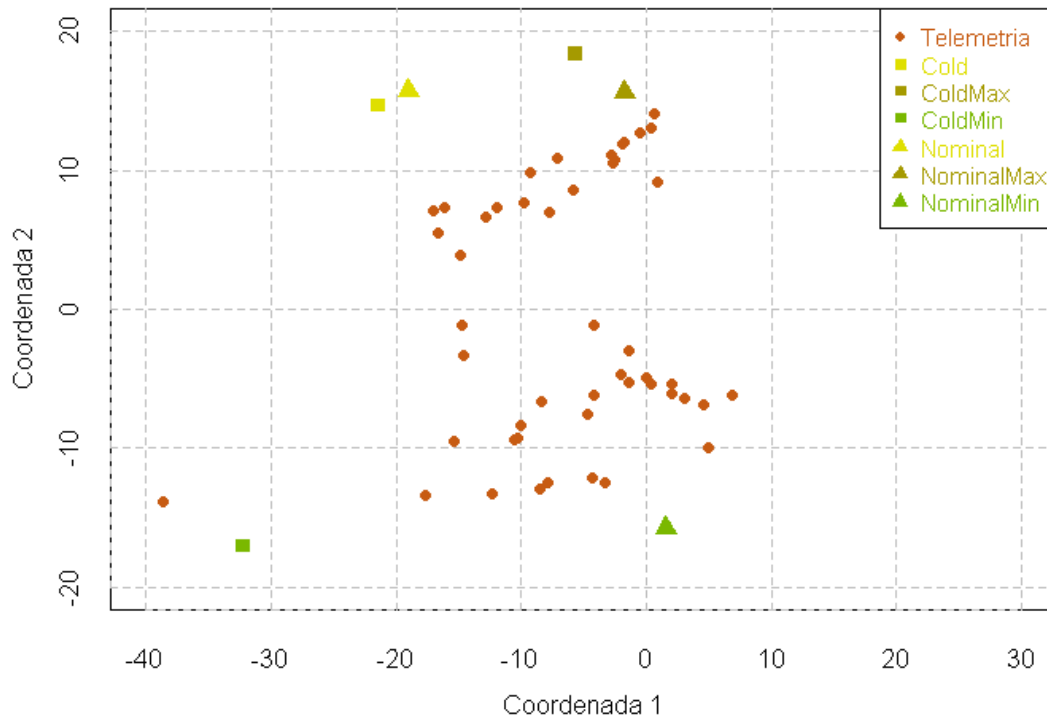


Fig. 80. Comparativa de las temperaturas registradas en órbita y las obtenidas en los modelos matemáticos.

Resulta también de gran interés la presencia de dos tipos diferentes de agrupamientos de nodos.

El primer tipo de agrupación es el mostrado en la siguiente figura (Fig. 81), donde se observan 3 grupos claramente diferenciados relacionados con el tipo de disipación considerada en los modelos matemáticos. Uno de los grupos contiene los resultados correspondientes a modelos con disipaciones nominales, otro los de disipaciones máximas y otro los de mínimas.

El segundo tipo de agrupación, mostrado en la figura (Fig. 82), contiene por una parte los resultados de los modelos correspondientes al entorno nominal y por otras los de entorno frío.

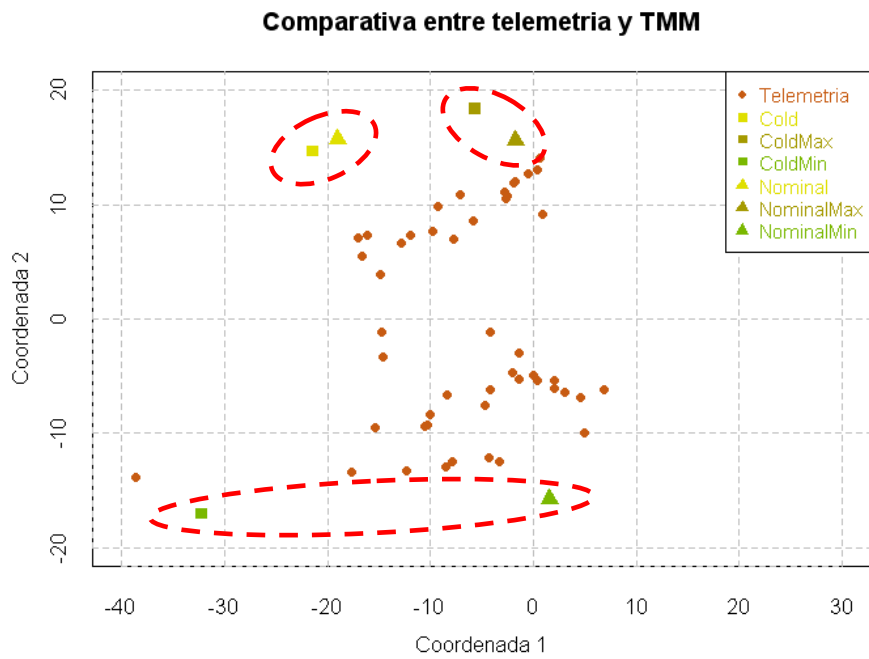


Fig. 81. Comparativa de las temperaturas registradas en órbita y las obtenidas en los modelos matemáticos.

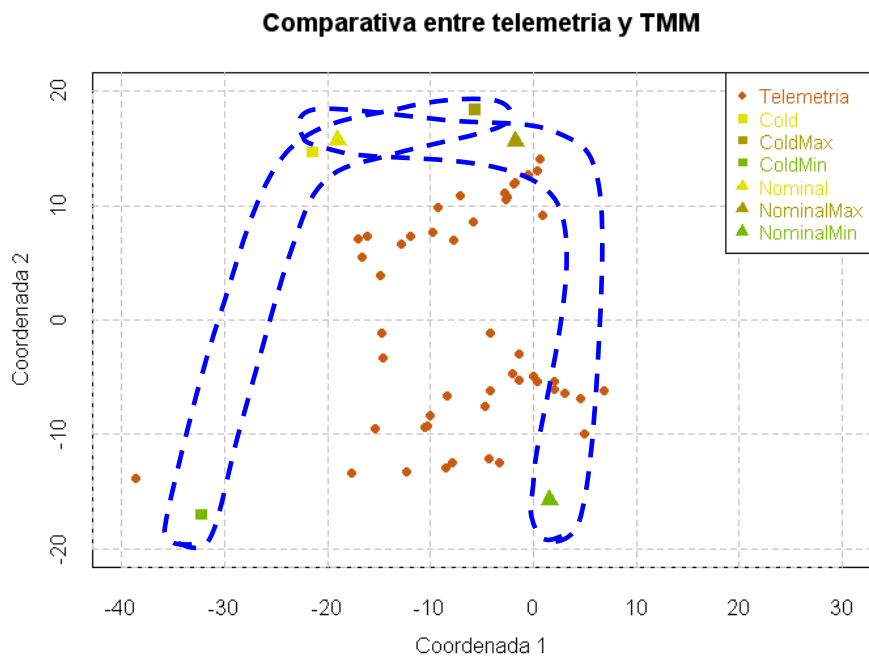


Fig. 82. Comparativa de las temperaturas registradas en órbita y las obtenidas en los modelos matemáticos.

6. CONCLUSIONES

El trabajo realizado en esta tesis de máster ha permitido profundizar de forma importante en el conocimiento del comportamiento térmico del TriboLAB durante su estancia en la Estación Espacial Internacional.

Adicionalmente ha sido posible comprobar tanto la utilidad de las técnicas empleadas en lo que respecta al estudio de este tipo de datos, como la validez del sistema de control térmico diseñado para el TriboLAB junto con la adecuada relación existente entre los resultados de los modelos térmicos matemáticos y las temperaturas registradas en el equipo.

El análisis del comportamiento del instrumento en órbita es la parte del estudio realizado que presenta mayor interés, ya que este se desconocía casi por completo. El resto de los aspectos estudiados, aunque pendientes de la confirmación proporcionada por el trabajo realizado, eran esperables. La utilidad de este tipo de técnicas para el estudio de los datos era predecible, y aunque no se había realizado un estudio tan detallado del comportamiento del equipo durante los ensayos térmicos y de su comparación con los modelos matemáticos, es un hecho que el equipo superó con éxito ambos aspectos pues de otro modo no hubiese recibido la calificación de apto para el vuelo. Así mismo, el correcto funcionamiento del equipo durante su misión permitía suponer el adecuado diseño y funcionamiento del sistema de control térmico.

COMPORTAMIENTO DEL TRIBOLAB EN ÓRBITA

El análisis de los datos correspondientes a las curvas de temperatura registradas en el TriboLAB durante su estancia en la Estación Espacial Internacional ha permitido comprobar como el equipo se mantuvo en todo momento dentro de sus temperaturas de operación con un margen bastante amplio sobre sus valores límite, lo que verifica el correcto diseño y funcionamiento del sistema de control térmico.

El estudio realizado ha dejado patente la sencillez con que es posible determinar, en base al registro de temperaturas, los periodos en que el equipo se encontraba o no ejecutando los experimentos de tribología.

Restringiéndonos ya a los datos correspondientes al modo de funcionamiento estudiado, resulta llamativo comprobar la claridad con la que pueden identificarse tanto los ciclos de los termostatos, con sus instantes de encendido y apagado, como los ciclos correspondientes a las órbitas e incluso los periodos de eclipse y exposición solar.

Por otra parte, aunque a primera vista el comportamiento del TriboLAB parece muy uniforme durante toda la misión (en modo Stand By), lo cierto es que tras profundizar en el estudio de los datos se han revelado diferencias importantes no solo entre distintos ciclos de termostatos sino también entre distintas orbitas. Las diferencias observadas no radican tanto en el rango de

temperaturas entre el cual oscilan los datos, sino en las velocidades de enfriamiento y por lo tanto en la duración de los ciclos.

Estas variaciones de comportamiento están influidas principalmente por las condiciones ambientales derivadas tanto de la orientación de la Estación Espacial Internacional como de los parámetros de su órbita. Aunque se observa una cierta tendencia de temporalidad, de modo que los datos de algunos meses presentan un comportamiento muy similar, ésta no es muy acusada.

ADECUACIÓN DE LAS TÉCNICAS EMPLEADAS

Se ha comprobado que la utilización de las técnicas habituales del análisis de datos funcionales, y más específicamente el análisis de coordenadas principales a partir de semimétricas basadas en PCA, es una buena herramienta para el estudio del tipo de datos aquí manejado.

De todos modos, a pesar de que estas técnicas permiten observar con gran claridad el nivel de semejanza entre las distintas curvas estudiadas, lo cierto es que resulta difícil establecer a priori valores de referencia que permitan establecer si la similitud entre las curvas es satisfactoria. Es decir, la magnitud de las disimilaridades calculadas no ofrece una interpretación intuitiva.

ENSAYOS TÉRMICOS

El estudio realizado sobre los datos correspondientes a los ensayos térmicos ha permitido observar claramente la capacidad del sistema de control térmico para mantener el equipo dentro de su intervalo de temperaturas límite. Así mismo, ha sacado a la luz el nivel de efectividad de la configuración térmica diseñada en base a la utilización de una zona del equipo más fría, la zona superior, y otra más caliente, la zona inferior, y como esta diferencia es más acusada en los modos en que se alcanzan temperaturas más elevadas.

MODELOS TÉRMICOS MATEMÁTICOS

Si bien no ha sido mencionado con anterioridad en esta memoria, lo cierto es que la metodología habitual seguida en los procesos de diseño del control térmico pasa por la utilización de distintos modelos térmicos matemáticos con diferentes grados de discretización. De este modo, suele disponerse de modelos formados por un mayor número de nodos que permiten un estudio más detallado del comportamiento térmico de las distintas zonas del

equipo, junto los denominados '*modelos reducidos*' los cuales están formados por un menor número de nodos por lo que resultan menos exactos pero más ágiles.

En el caso del TriboLAB los modelos reducidos han sido empleados para su integración en el modelo completo de la plataforma EuTEF, por lo que estaban restringidos a un número máximo de nodos. Estos modelos han sido también los empleados en esta tesis de máster.

El proceso de convertir un modelo detallado en uno reducido pasa por determinar cuales son los nodos del modelo que presentan un comportamiento más similar entre ellos, con el objeto de unificarlos en un único nodo representativo de esa zona.

Las técnicas de análisis de datos empleadas en el trabajo realizado permiten observar de un modo inequívoco y con gran claridad, qué puntos del instrumento presentan un comportamiento térmico más similar entre sí. Esto convierte a estas técnicas en una herramienta de gran interés en la toma de decisión de colapsado de nodos para la consecución de los modelos matemáticos reducidos. En el caso de modelos con un número de nodos muy elevado podrían aplicarse adicionalmente técnicas de clasificación no supervisada mediante '*clustering*', por ejemplo, con el objeto de detectar los nodos colapsables.

Del mismo modo que el análisis de datos funcionales facilita la identificación del comportamiento térmico de las distintas zonas del equipo, simplifica también la detección de los casos de cálculo fruto de las distintas combinaciones de disipaciones, condiciones de contorno, etc., con un comportamiento más similar. De modo que en una primera aproximación del diseño podamos restringirnos únicamente a los casos más extremos.

COMPARACIÓN DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS CON LOS ENSAYOS TÉRMICOS

Aunque la existencia de un nivel de similitud suficiente entre los ensayos y los modelos era conocida, pues fue un requisito necesario para la aceptación del TriboLAB, hasta ahora no se había abordado un estudio en profundidad de la misma.

Las técnicas de análisis aplicadas sobre los datos han permitido observar una buena similitud en la mayoría de los puntos de medición para la mayor parte de los casos, y aunque en otros la semejanza es menor resulta en cualquier caso suficiente para cumplir los estrictos criterios de aceptación de este tipo de dispositivo espacial.

Todo ello confirma tanto la validez de la modelización realizada en el caso concreto del instrumento TriboLAB como la utilidad de este tipo de técnicas para evaluar la similitud entre modelización y realidad. Aunque tal y como se ha mencionado previamente, sería deseable que los valores indicadores del grado de similitud fueran más interpretables en el contexto, lo que facilitaría la evaluación de la misma.

COMPARACIÓN DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS CON LA TELEMETRÍA EN ÓRBITA

El estudio realizado ha mostrado que las predicciones del comportamiento térmico del TriboLAB en órbita realizadas en base a los modelos matemáticos son correctas y en general se aproximan con suficiente exactitud al comportamiento observado.

El comportamiento registrado durante la estancia del equipo en la Estación Espacial Internacional queda englobado por los resultados extraídos del conjunto de casos estudiados en las simulaciones. Este efecto es coherente con lo esperado, pues el diseño del control térmico se basa en el estudio de los modelos correspondientes a los casos más críticos que pueden tener lugar, esperando que el comportamiento en órbita se encuentre comprendido dentro de estos extremos. Únicamente los resultados de los modelos matemáticos correspondientes al entorno nominal presentan un comportamiento un poco peor de lo previsto, pues se esperaba que apareciesen más agrupados con los correspondientes al comportamiento en órbita.

7. LÍNEAS FUTURAS

En lo que respecta al estudio concreto del comportamiento térmico del instrumento TriboLAB, los resultados obtenidos en el estudio llevado a cabo en esta tesis de máster son lo suficientemente interesantes como para hacer deseable la continuidad del trabajo realizado, abordando el análisis de los datos correspondientes al resto de los modos de funcionamiento no estudiados hasta el momento.

En lo referente a la investigación sobre la aplicabilidad de las técnicas de análisis de datos funcionales a conjuntos de datos como los estudiados en esta tesis, los resultados obtenidos hasta el momento ponen de manifiesto el interés en dos líneas de investigación distintas. La evaluación de métodos de clasificación no supervisada aplicada a datos funcionales, y la búsqueda de técnicas que permitan obtener una evaluación de la similitud de los datos mediante valores que recojan en mayor medida el sentido físico de los mismos permitiendo establecer valores de referencia a priori, en ambos casos orientadas a tipos de datos como los considerados en este trabajo.

Por último, se considera de interés proceder a la divulgación en la comunidad científica de los resultados obtenidos, debido a la utilidad que la información aquí presentada puede tener para otros experimentadores interesados en ubicar sus experimentos en los balcones exteriores de la Estación Espacial Internacional.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Chambers and et al, "The R Project for Statistical Computing." The R Foundation for Statistical Computing, 2011.
- [2] Free Software Foundation Inc., "GNU General Public License," 2007. [Online]. Available: <http://www.gnu.org/licenses/gpl.html>.
- [3] J. Chambers, "The S System." [Online]. Available: <http://cm.bell-labs.com/cm/ms/departments/sia/S/index.html>.
- [4] Free Software Foundation Inc., "Free Software Foundation." [Online]. Available: <http://www.fsf.org/about/>.
- [5] F. Ferraty and P. Vieu, *Nonparametric Functional Data Analysis - Theory and Practice*, First. New York: Springer Science + Bussines Media, Inc., 2006, p. 258.
- [6] G. Strang, *Introduction to Linear Algebra*, 4th ed. Wellesley Cambridge, 2009.
- [7] M. Febrero-Bande and M. Oviedo de la Fuente, "Refrence manual of R package: Functional Data Analysis and Utilities for Statistical Computing (fda.usc)," *The Comprehensive R Archive Network (CRAN)*. The Comprehensive R Archive Network (CRAN), p. 123, 27-Apr-2011.
- [8] J. C. Gower, "Some distance properties of latent root and vector methods used in multivariate analysis," *Biometrika*, vol. 53, no. 3/4, pp. 325-328, 1966.
- [9] W. J. Krzanowski and F. H. C. Marriott, *Multivariate Analysis. Distributions, Ordination and Inference*, vol. Part I. Arnold, E, 1994, p. 280.
- [10] K. V. Mardia, J. T. Kent, and J. M. Bibby, *Multivariate Analysis*, Frist. Academic Press, 1980, p. 521.
- [11] G. A. F. Seber, *Multivariate Observations*, vol. 547. New York: Wiley, 2004, p. 686.
- [12] R Development Core Team and contributors, "R function: CMDSCALE." [Online]. Available: <http://stat.ethz.ch/R-manual/R-patched/library/stats/html/cmdscale.html>.
- [13] J. O. Ramsay and B. W. Silverman, *Functional Data Analysis*, First. New York: Springer, 1997, p. 310.
- [14] W. S. Cleveland, "Robust Locally Weighted Regression and Smoothing Scatterplots," *Journal of the American Statistical Association*, vol. 74, pp. 829-836, 1979.
- [15] W. S. Cleveland and S. J. Devlin, "Locally Weighted Regression: An Approach to Regression Analysis by Local Fitting," *Journal of the American Statistical Association*, vol. 83, pp. 596-610, 1988.
- [16] R Development Core Team and contributors, "R function: LOWESS." [Online]. Available: <http://stat.ethz.ch/R-manual/R-patched/library/stats/html/lowess.html>.
- [17] W. S. Cleveland, "LOWESS: A program for Smoothing Scatterplots by Robust Locally Weighted Regression," *The American Statistician*, vol. 35, pp. 54-54, 1981.

- [18] G. E. Forsythe, M. A. Malcon, and C. B. Moler, *Computer Methods for Mathematical Computations*. New Jersey: Prentice-Hall, 1977, p. 259.
- [19] F. N. Fritsch and R.E. Carlson, "Monotone Piecewise Cubic Interpolation," *SIAM Journal on Numerical Analysis*, vol. 17, pp. 238-246, 1980.
- [20] I. Garmendia et al., "The vacuum Tribology model (VTM) of TriboLAB," in *10th European Space Mechanisms and Tribology Symposium, Proceedings*, 2003, vol. 524, pp. 67-70.
- [21] I. Garmendia et al., "TriboLAB: Características de un Tribómetro para un Experimento de Tribología Espacial en la ISS," in *Proceedings of Ibertrib 2007 - Congreso Ibérico de Tribología*, 2007.
- [22] NASA, "NASA." [Online]. Available: <http://www.nasa.gov/>.
- [23] Rmw, "Mean altitude of the International Space Station from November 1998 until 2009," *International Space Station*, 2010. [Online]. Available: [http://en.wikipedia.org/wiki/File:Internationale_Raumstation_Bahn%C3%B6he_\(dumb_version\).png](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Internationale_Raumstation_Bahn%C3%B6he_(dumb_version).png).
- [24] NASA, "ISS orbital tracking." [Online]. Available: <http://spaceflight.nasa.gov/realdata/tracking/>.
- [25] D. G. Gilmore, *Spacecraft Thermal Control Handbook*, 2nd ed., vol. I. El Segundo, California: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2002, p. 835.
- [26] NASA, "What are the ISS Attitudes?," NASA. [Online]. Available: http://spaceflight.nasa.gov/station/flash/iss_attitude.html.
- [27] Divad, "Equinoxes-solstice," *Wikimedia Commons*, 01-Jun-2010. [Online]. Available: <http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Equinoxes-solstice-ES.svg>.

ANEXO

I. LA ESTACIÓN ESPACIAL INTERNACIONAL

I.1. EL ÁNGULO BETA

El *ángulo beta* (β) es el ángulo medido entre el vector solar y el plano orbital de cualquier objeto espacial que se encuentre orbitando la Tierra. En el caso de la ISS, su plano orbital se encuentra inclinado 51.6° sobre el plano del ecuador de nuestro planeta²³, el cual a su vez, presenta una inclinación de 23.4° sobre el vector solar (Fig. 83).

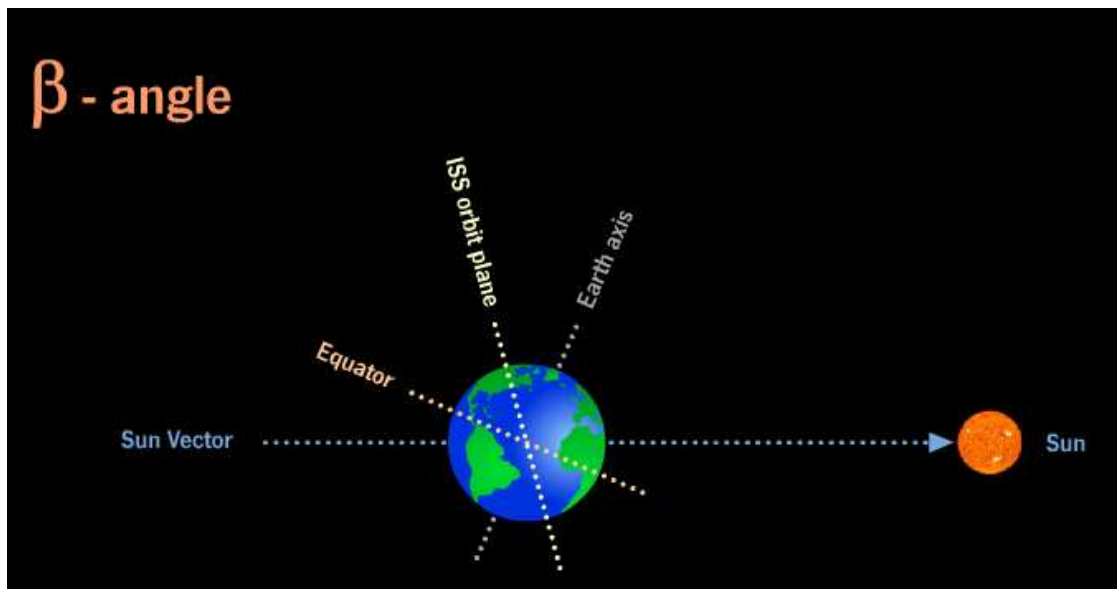


Fig. 83. Ángulo beta. Fuente [26].

El ángulo beta resulta un parámetro fundamental pues un ángulo elevado implica una mayor exposición solar en uno de los lados de la estación junto con cortos o incluso nulos periodos de eclipse, mientras que un ángulo bajo implica periodos de eclipse más largos y un menor tiempo de exposición solar (Fig. 84).

²³ Las inclinaciones inferiores a 90° implican que el satélite recorre la órbita en el mismo sentido que la rotación de la Tierra.

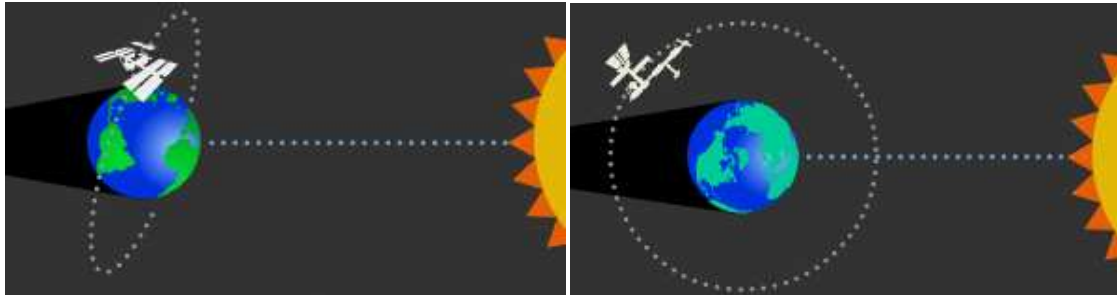


Fig. 84. Ángulo beta elevado (izquierda). Ángulo beta bajo (derecha). Fuente [26].

I.2. ASCENSIÓN RECTA DEL NODO DE ASCENSO - RAAN

Otro concepto de interés es la 'ascensión recta del nodo de ascenso' (RAAN – *right ascension of the ascending node*). Se define como nodo de ascenso, el punto de la órbita en el que un objeto cruza el plano ecuatorial cuando se mueve de sur a norte. Así, la 'ascensión recta del nodo de ascenso' (RAAN) corresponde al ángulo existente entre el nodo de ascenso y el equinoccio de primavera medido sobre el plano ecuatorial Fig. 85.

Debido a que la Tierra no es una esfera perfecta, el RAAN varía entre órbitas consecutivas en un fenómeno denominado regresión nodal. En el caso de la ISS, se estima que la variación del RAAN es del orden de -5 °/día.

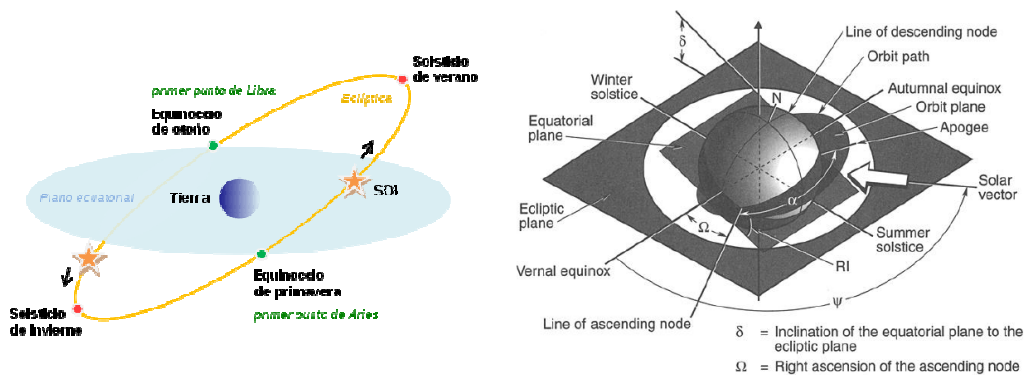


Fig. 85. Equinoccio de primavera (izquierda) [27] y RAAN (derecha) [25].

I.3. LA VARIACIÓN DEL ÁNGULO BETA

Debido a la rotación de la Tierra sobre el Sol a lo largo del año y al fenómeno de regresión nodal introducido previamente, el ángulo beta del plano orbital de la ISS va modificándose con el tiempo. Debido a las implicaciones que ello tiene en la exposición solar, la orientación de la

ISS se modifica de acuerdo al ángulo beta existente en cada momento, con el objeto de maximizar su energía y minimizar los efectos térmicos negativos [26].

La Fig. 86 muestra gráficamente distintos valores del ángulo beta de la ISS. Así mismo la Fig. 87 muestra la variación del ángulo beta estimada para la ISS a lo largo de un año²⁴, donde se observa que el valor absoluto de β se encuentra en el intervalo comprendido entre un mínimo de 0° y un máximo de 75.4° correspondiente a la suma de la inclinación de la órbita (51.6°) más la máxima declinación del sol (23.5°).

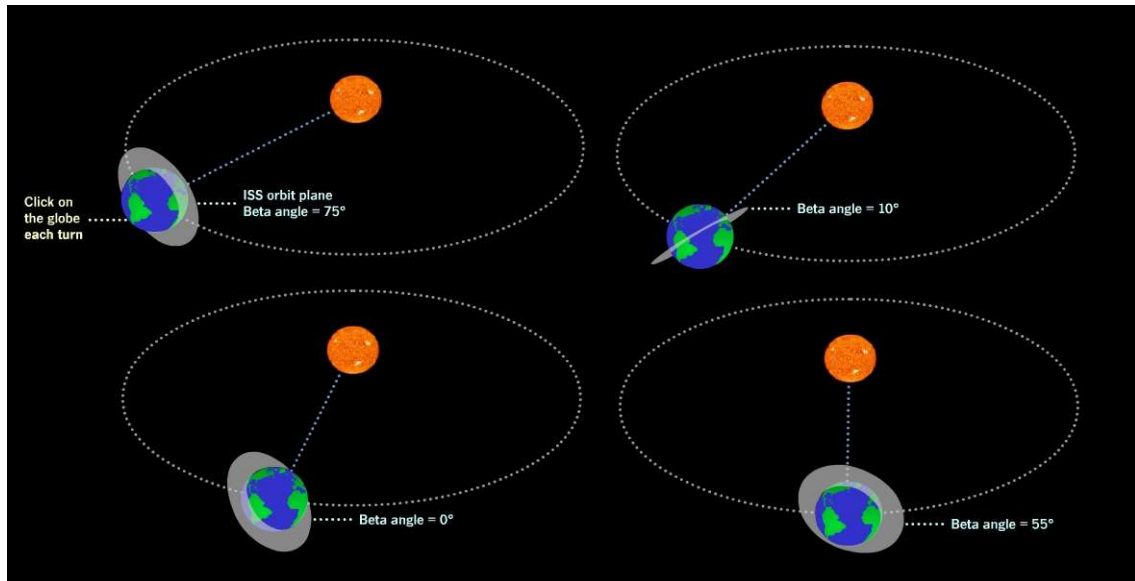


Fig. 86. Ejemplos de la variación del ángulo beta de la ISS. Fuente [26].

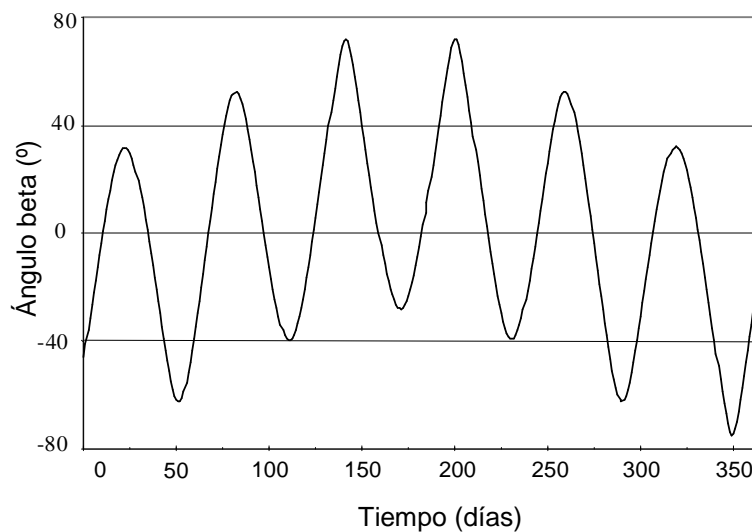


Fig. 87. Variación del ángulo beta de la ISS a lo largo de un año.

²⁴ Valores calculados para el año 2003.

II. EL TRIBOLAB

II.1. EXPERIMENTOS TRIBOLÓGICOS

Un experimento de varilla sobre disco, conocido habitualmente como Pin on Disk o POD (Fig. 88 izquierda) es un análisis tribológico básico recomendado en el desarrollo de cualquier lubricante. Consiste en un disco giratorio cubierto por una película de lubricante sólido sobre el cual se ejerce una fuerza normal a través de una varilla creando así una fuerza de fricción. A través de las mediciones de ambas fuerzas, realizadas mediante galgas extensométricas, puede obtenerse el coeficiente de fricción del tribosistema.

La finalidad de los experimentos de rodamientos, conocidos habitualmente como Ball Bearing o BB (Fig. 88 derecha) es analizar el comportamiento de los lubricantes en este tipo de mecanismo más complejo. Así, la pista interior se fija a un eje giratorio y la exterior es retenida por un brazo que mide la variación del par de torsión producido por la fricción del rodamiento mediante galgas extensométricas.

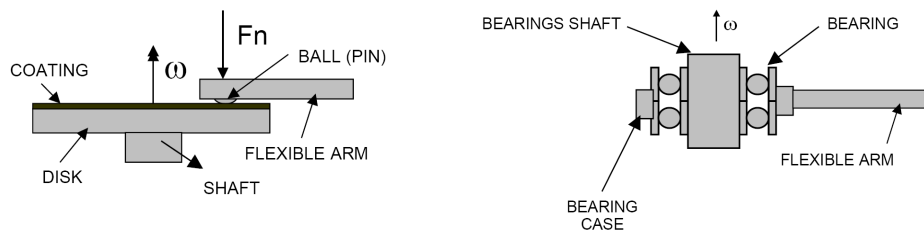


Fig. 88. Esquema conceptual de un experimento de POD (izquierda) y uno de BB (derecha).

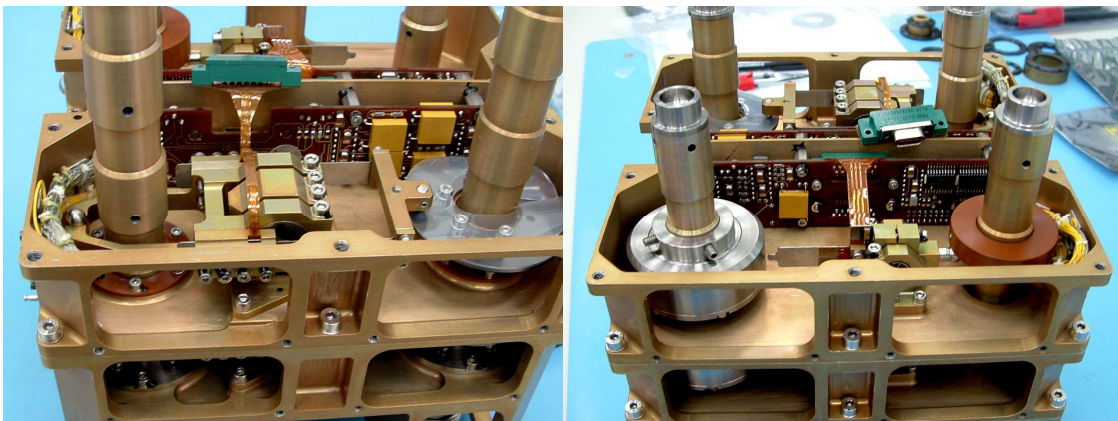


Fig. 89. Fotografía de uno de los experimentos de POD del TriboLAB (izquierda) y de uno de BB (derecha).

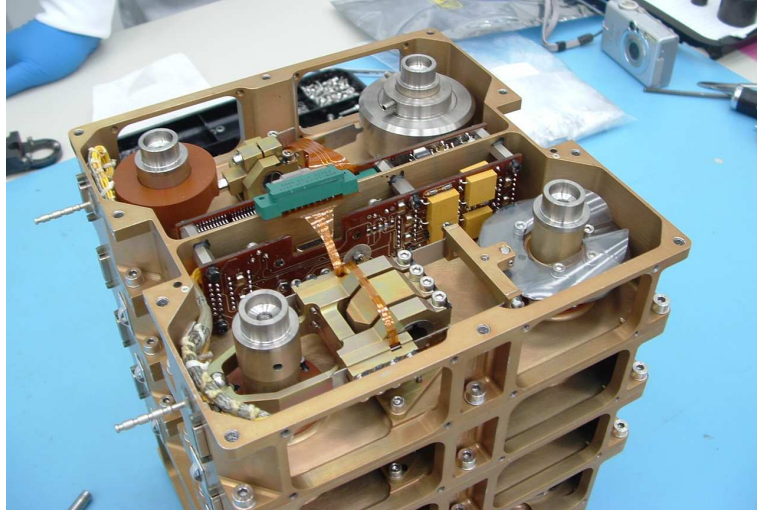


Fig. 91. Fotografía de detalle de una de las celdas de experimentación.

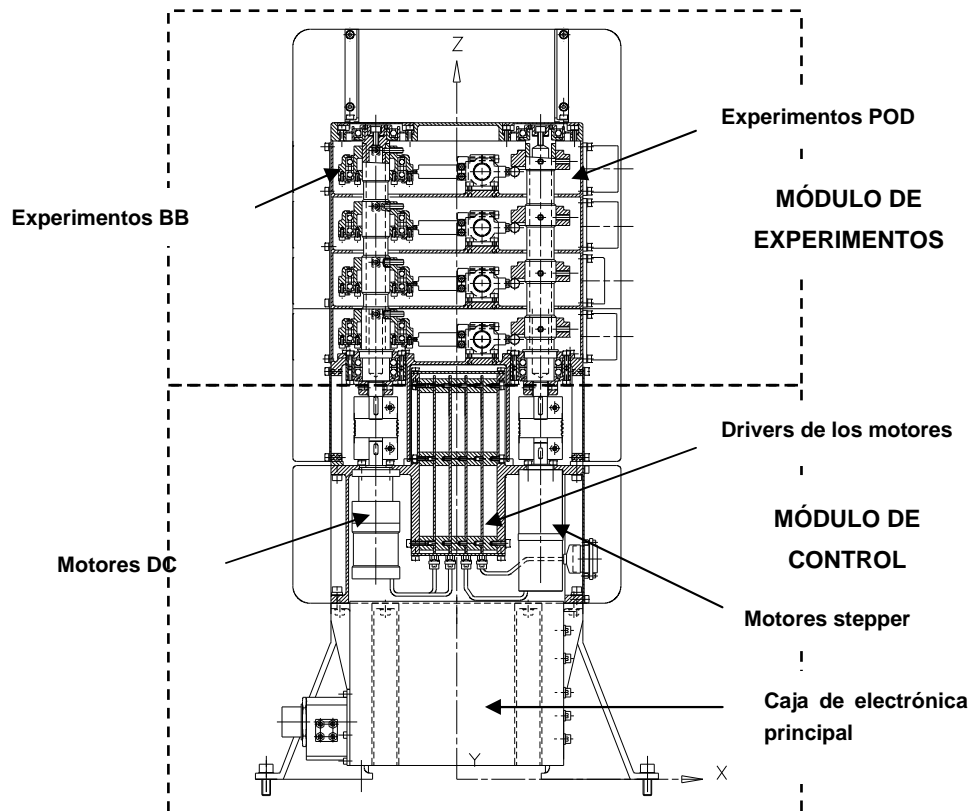


Fig. 92. Croquis de la configuración estructural del TriboLAB.

II.3. MODOS DE OPERACIÓN

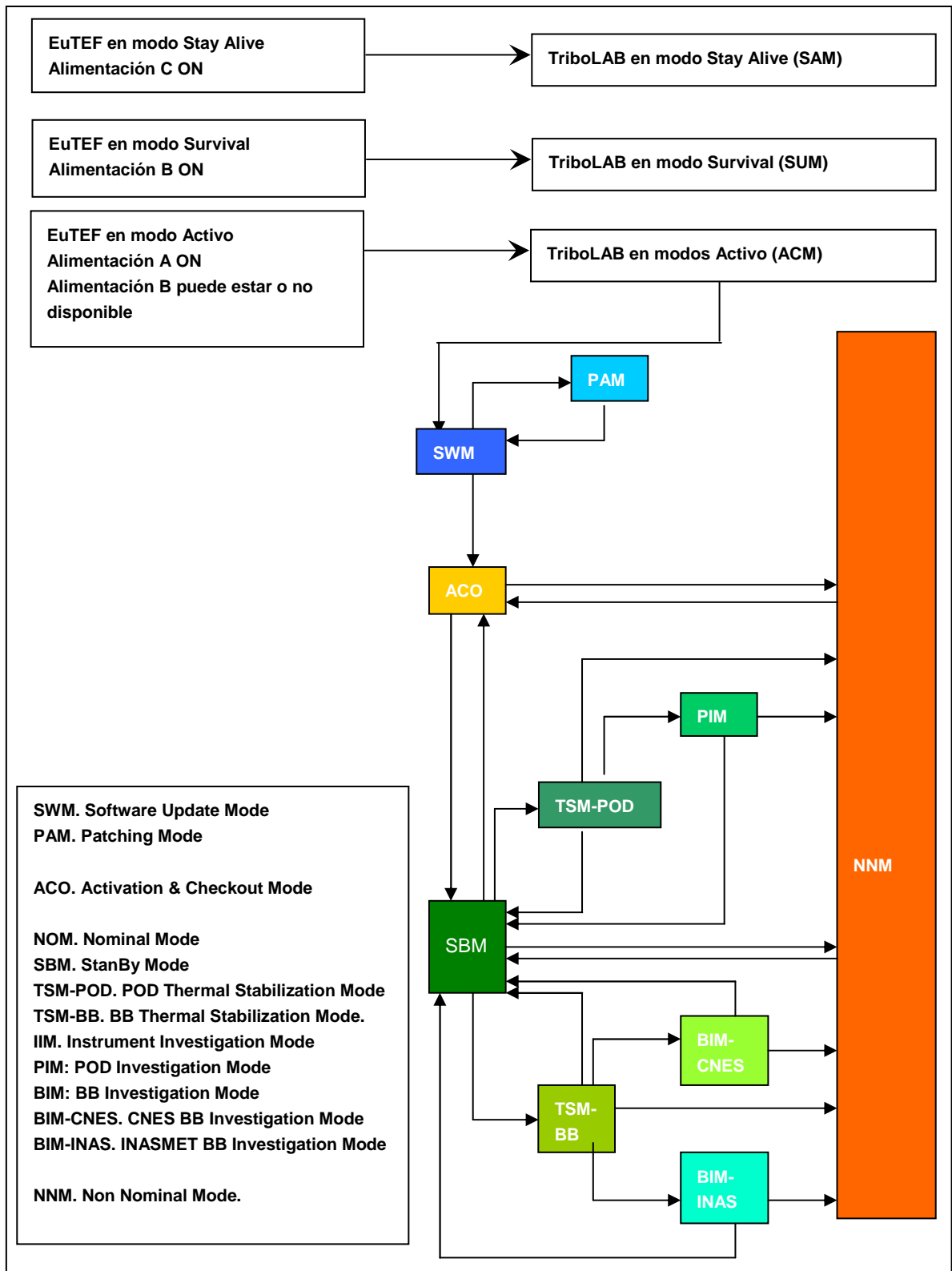


Fig. 93. Modos de operación del TriboLAB.

II.4. DESCRIPCIÓN DEL CONTROL TÉRMICO

II.4.1. EL RADIADOR

Está compuesto por todas las superficies existentes en la cara RAM²⁵ del TriboLAB, sumando en total una superficie de 0.1151m². Con el objeto de mejorar sus características termo-ópticas, se encuentra recubierto por cinta térmica perforada 10 mil Teflon x Silver x Inconel 9703 PSA. La Tabla 5 muestra las propiedades termo-ópticas de la cinta térmica, tanto al inicio de su vida (BOL – *Beginning of life*) como al final (EOL – *End of life*).

		Absortividad	Emisividad
10 mil Teflon x Silver x Inconel x 9703 PSA	BOL	0.08	0.83
	EOL	0.15	0.85

Tabla 5. Propiedades termo-ópticas de la cinta térmica del radiador

Adicionalmente, con el objeto de mejorar la conducción de calor entre el instrumento y el radiador, se aplica un material especial denominado genéricamente '*thermal filler*' entre ambas superficies. El material empleado en este caso es el Cho-Therm 62-15-0808-1671. Este material, compuesto por resinas de silicona reforzadas con óxido de magnesio, óxido de aluminio y otros materiales similares que aumentan su conductividad térmica, se adapta perfectamente a las superficies mejorando la transmisión de calor entre ellas.

II.4.2. LAS MANTAS TÉRMICAS

Debido a la configuración estructural del TriboLAB, no es posible cubrir toda la superficie necesaria con una sola manta, siendo necesario el uso de 3 mantas (una para la cara del TriboLAB orientada a EuTEF, otra para las patas y otra para el resto del instrumento).

Las mantas, diseñadas y fabricadas por Austrian Aerospace directamente sobre el TriboLAB en un diseño hecho a medida, presentan una composición como la mostrada en la Fig. 94, siendo capaces de soportar temperaturas de hasta 120°C. Además, todas ellas están equipadas con 2 cables que aseguran la unión eléctrica de las mantas a la estructura. La Tabla 6 y la Tabla 7 indican sus principales propiedades térmicas.

²⁵ La cara RAM del TriboLAB corresponde a la cara orientada hacia el vector de avance de la ISS.

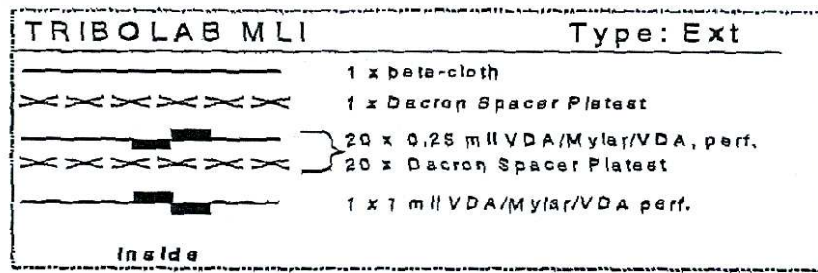


Fig. 94. Composición de las mantas térmicas del TriboLAB.

PROPIEDADES ÓPTICAS DEL BETA CLOTH		
	Absortividad Solar (α)	Emisividad de infrarrojo (ϵ)
BOL	0.29	0.8
EOL	0.44	0.8

Tabla 6. Propiedades ópticas de la capa de beta cloth.

CONDUCTANCIA DE LAS 20 CAPAS DEL MLI	
Temperatura (°C)	Conductancia (W/m ²)
-85	4.0 x 0.00434
-45	4.0 x 0.00954
10	4.0 x 0.01306
50	4.0 x 0.02057
70.5	4.0 x 0.02752

Tabla 7. Conductancia del MLI.

II.4.3. LOS HEATERS

Los **heaters** empleados son de tipo flexible fabricados en Kapton por RICA específicamente para aplicaciones aeroespaciales. Todos ellos son de calidad ESA SCC level B, de acuerdo con la especificación 4009/002 e incorporan un cable tipo ESA/SCC3901/013-22 (2 μ AG, AWG26) correspondiente a la variante 22 de la especificación de ESA.

Están fijados, mediante el adhesivo que llevan incorporado, sobre las superficies exteriores del TriboLAB (cubiertas posteriormente por las mantas térmicas). Aunque la mayoría de ellos son de doble cara, únicamente en el caso de los heaters Nominales (TEM) se ha empleado la doble cara para proporcionar un circuito redundante.

La potencia disipada por los heaters es función del valor de su resistencia y del voltaje de funcionamiento, por ello en el diseño del control térmico no se contempla una única potencia de funcionamiento sino un rango de ellas (Tabla 8). En el cálculo de dicho rango se tiene en consideración la tolerancia indicada por el fabricante sobre su valor de resistencia y la variación de voltaje que puede esperarse en las líneas de alimentación que llegan al instrumento durante la misión (Tabla 9).

LÍNEA DE ALIMENTACIÓN	Ref. del heater	Potencia mínima (W)	Potencia nominal (W)	Potencia máxima (W)
Línea A Nominal	H01TEM	4.77	5.81	6.56
	H02TEM	4.77	5.81	6.56
	H03TEM	4.77	5.81	6.56
	TOTAL	14.31	17.43	19.68
Línea B Survival	H01SURV	5.59	7.20	8.42
	H02SURV	5.59	7.20	8.42
	H03SURV	5.59	7.20	8.42
	TOTAL	16.77	21.60	25.26
Línea C Stay Alive	H01STA	4.06	5.81	7.40
	H02STA	4.06	5.81	7.40
	H03STA	18.29	26.13	33.29
	TOTAL	26.81	37.75	48.09

Tabla 8. Valores de potencia considerados para los heaters.

Línea de alimentación	Voltaje nominal (Vdc)	Voltaje mínimo (Vdc)	Voltaje máximo (Vdc)
Línea A	28.0	26.0	29.0
Línea B	120.0	108.3	126.5
Línea C	28.0	24.0	30.8

Tabla 9. Variaciones de voltaje esperadas en las líneas de alimentación (información proporcionada por ESA).

II.4.4. LOS TERMOSTATOS

Los termostatos empleados en el TriboLAB son de tipo bimetálico sellados herméticamente. Concretamente se han empleado los termostatos fabricados por COMEPA para aplicaciones espaciales denominados 'Thermopa model 47'.

Los termostatos están fijados a las superficies exteriores del TriboLAB mediante tornillos y adhesivo. La Tabla 10 recoge las temperaturas de funcionamiento de cada uno de ellos.

Línea de alimentación	Referencia	Número de componente	T cierre (°C)	T apertura (°C)
Survival	T01SURV	370200102B019009HY	9	19
	T02SURV	370200102B019009HY	9	19
	T03SURV	370200102B004611HY	-11	4
	T04SURV	370200102B004611HY	-11	4
Stay Alive	T01STA	370200102B056046HY	46	56
	T02STA	370200102B060050HY	50	60
	T03STA	370200102B056046HY	46	56
	T04STA	370200102B060050HY	50	60

Tabla 10. Temperaturas de operación de los termostatos.

II.4.5. CIRCUITOS DEL CONTROL TÉRMICO

Los circuitos correspondientes a los heaters de Stay Alive y de Survival, ambos controlados por termostatos, se muestran en la Fig. 95 y en la Fig. 96 respectivamente.

Aunque la idea inicial fue la utilización de termostatos también para el control de los heaters Nominales (control pasivo), el estrecho rango de temperaturas de operación imposibilita esta opción. Puesto que cuando el TriboLAB está en modo activo (línea A disponible), las tarjetas electrónicas están siempre encendidas, se decidió que el control de estos heaters se realizase mediante software (control activo).

Los distintos submodos de operación existentes cuando el TriboLAB está en modo activo, se han clasificado en 3 grupos distintos, para cada uno de los cuales se ha diseñado un control térmico específico (Tabla 11 y Fig. 97).

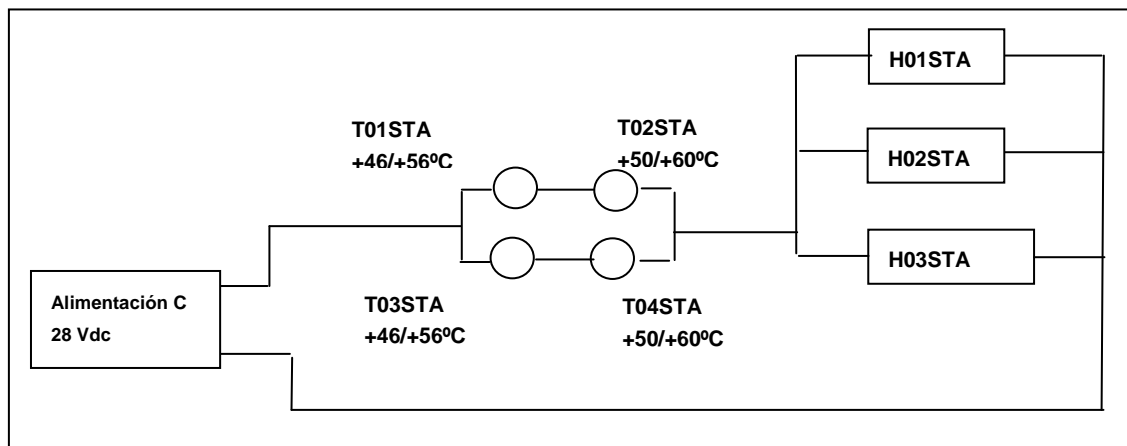


Fig. 95. Circuito del control térmico conectado a la línea de Stay Alive.

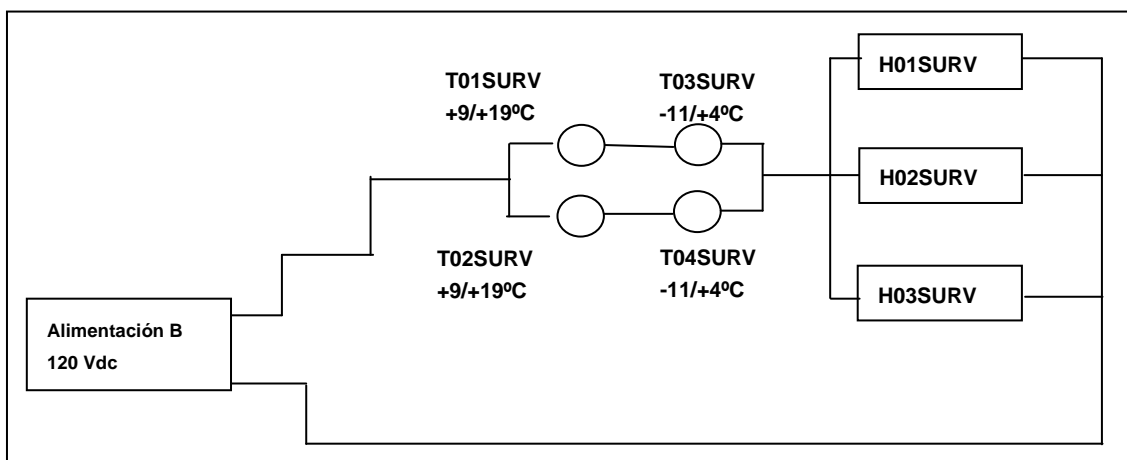


Fig. 96. Circuito del control térmico conectado a la línea de Survival.

GRUPO	Sub-Modo	Línea de alimentación	Control Térmico
GRUPO 1	SWM and PAM	Línea B disponible	Basado en el circuito conectado a la línea B (heaters de Survival)
	SBM		
	NNM		
GRUPO 2	ACO	Línea B disponible	Basado en el circuito conectado a la línea A (heaters Nominales -TEM) controlado por el algoritmo denominado "Science Thermal Control"
	TSM-POD		
	TSM-BB		
	PIM		
	BIM-CNES		
BIM-INAS			
GRUPO 3	NNM	Línea B no disponible	Basado en el circuito conectado a la línea A (heaters Nominales – TEM) controlado por el algoritmo denominado "Survival Thermal Control"

Tabla 11. Clasificación de los sub-modos activos de acuerdo a su control térmico.

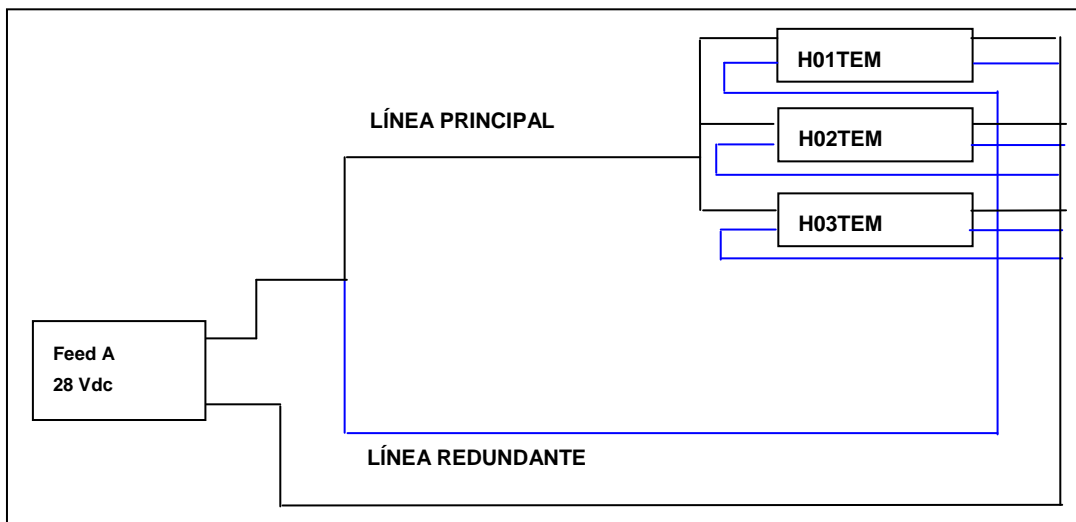


Fig. 97. Circuito de control térmico del modo activo.

II.4.6. TERMISTORES

La medición de la temperatura del TriboLAB en ciertos puntos considerados de interés, como por ejemplo el TRP, se lleva a cabo mediante el uso de termistores, concretamente del modelo G1K7D357 fabricados por BetaTHERM.

III. ENTORNO TÉRMICO

Las Fig. 98 y Fig. 99 muestran los valores correspondientes a los flujos de calor y temperaturas de sink que forman los distintos entornos térmicos de diseño del TriboLAB (caliente, frío y nominal), los cuales fueron proporcionados por CGS. Tal y como puede observarse, para cada tipo de entorno y cada instante de tiempo, no se dispone un único valor sino de una serie de ellos correspondientes a los valores indicados para cada nodo del radiador del TMM.

En el caso de los flujos de calor no es posible observar los datos correspondientes al entorno Nominal, pero ello es debido a que coinciden con los del entorno frío.

La Tabla 12 recoge los parámetros de la órbita en base a los cuales se han estimado las condiciones de entorno térmico.

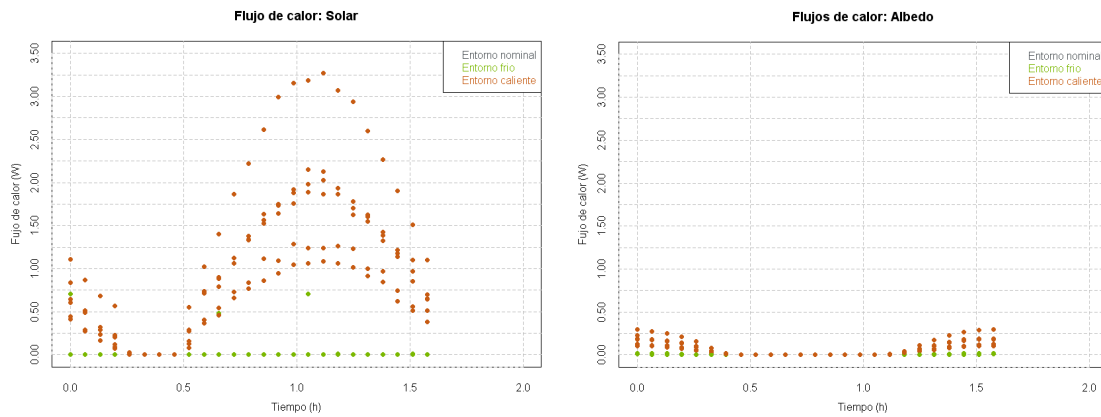


Fig. 98. Flujos de calor solar y de albedo.

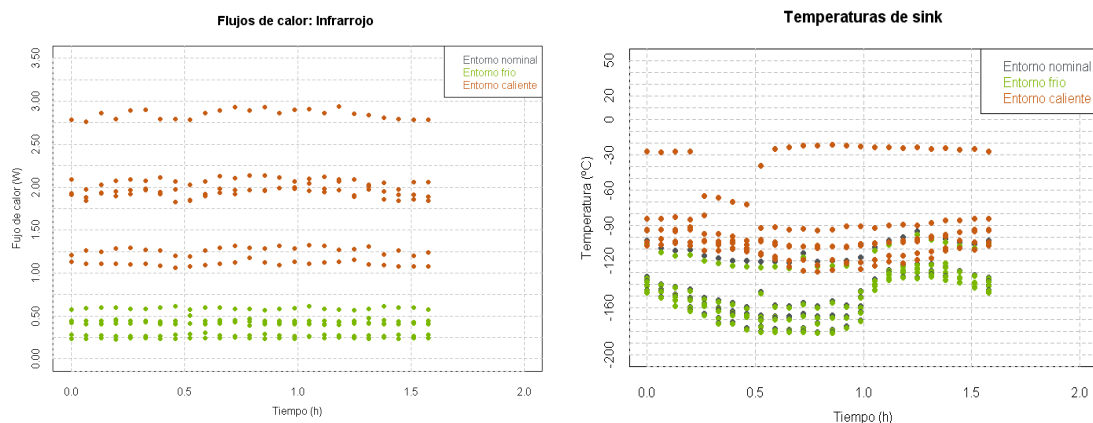


Fig. 99. Flujos de calor de infrarrojo y temperaturas de sink hacia el cual está orientado el radiador.

Tipo de entorno	X (roll)	Y (pitch)	Z (yaw)	Beta (°)	Altitud (millas náuticas)	Altitud (km)
Caliente en la ISS	+15	-20	+15	-75	150	277.8
Frío en la ISS	-15	+25	+15	+75	150	277.8
Frío en el transbordador y durante el traslado hacia la ISS	Orientación correspondiente a la maniobra de aproximación del transbordador			+75	270	500

Tabla 12. Posición y ángulos beta correspondientes a los casos más críticos esperados en la cara RAM donde está situado el radiador.

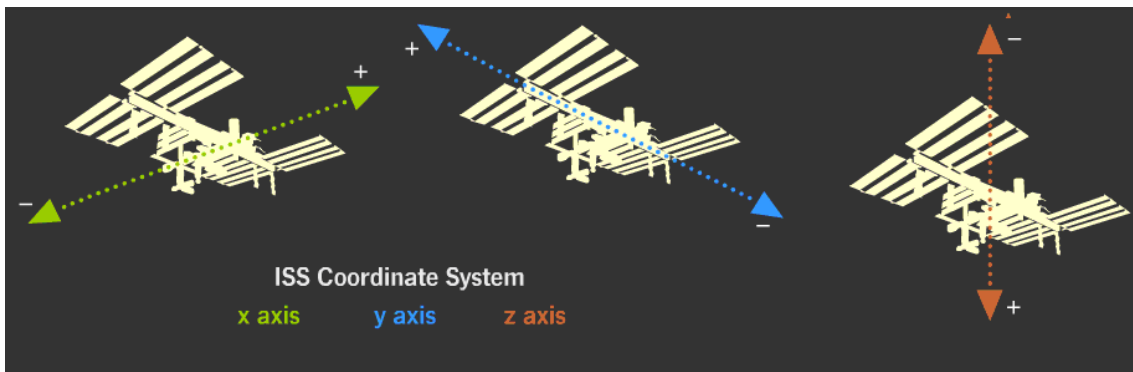


Fig. 100. Ejes de coordenadas de la Estación Espacial Internacional. Fuente [26]

IV. MODELOS TÉRMICOS MATEMÁTICOS

La estructura modular del TriboLAB ha permitido alcanzar la discretización mostrada en la Fig. 101, donde las líneas discontinuas representan los planos de corte imaginarios que dividen el instrumento en distintos volúmenes. Cada uno de los volúmenes está representado por 3 nodos numerados según el siguiente criterio:

- **850x0.** Cada uno de estos nodos representa uno de los mencionados volúmenes en que se ha dividido el instrumento, con la excepción de la pared del radiador.
- **850x1.** Cada uno de estos nodos representa la pared de radiador asociada a ese volumen.
- **850x2.** Cada uno de estos nodos representa el MLI que cubre la superficie asociada a cada uno de los volúmenes mencionados.

La razón de esta distribución radica en que nuestro interés es disponer de una estimación de la temperatura en cada celda de experimentos, la cual puede ser considerada casi isoterma.

Además hay nodos adicionales que representan los componentes con altas disipaciones (motores, electrónica, etc.). EuTEF se representa con el nodo 10000.

La Fig. 101 muestra los nodos que componen el modelo matemático, con la excepción del nodo representativo del EuTEF y los nodos representativos del ambiente.

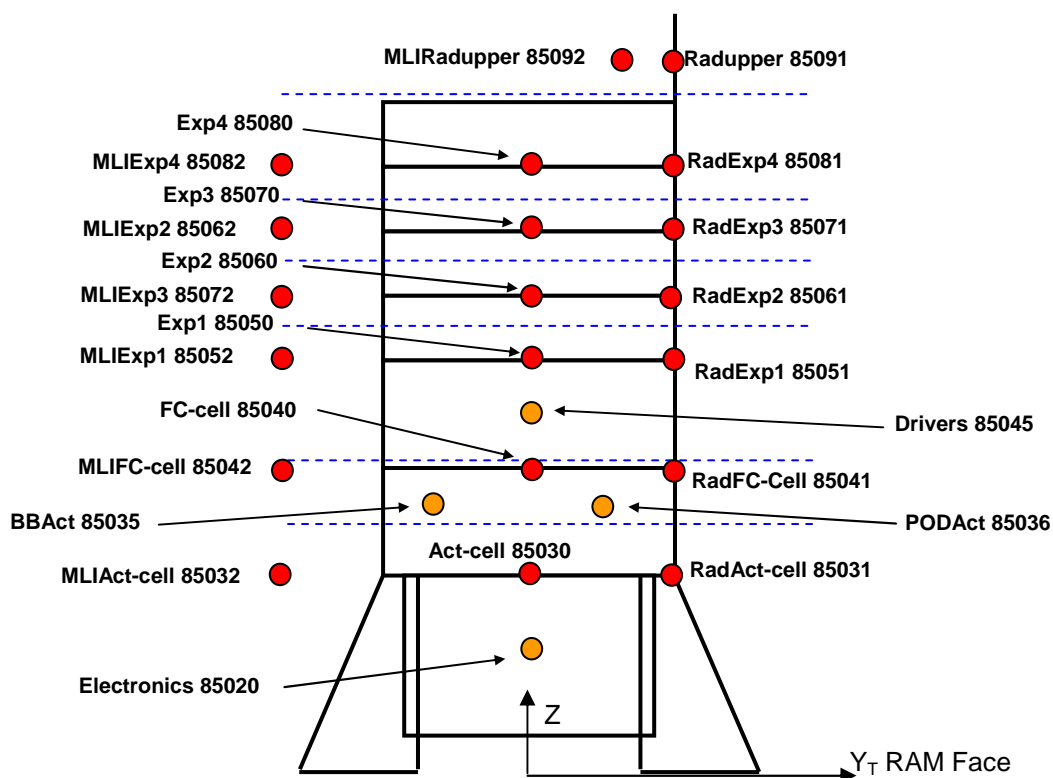


Fig. 101. Discretización nodal del TriboLAB utilizada en los modelos térmicos matemáticos.

Tanto las conductancias lineales entre los nodos del modelo como las conductancias radiativas con el espacio exterior, han sido calculadas manualmente de acuerdo a las propiedades de los materiales y la configuración geométrica del equipo.

El cálculo de las conductancias radiativas internas (conductancias de radiación entre los nodos del instrumento), se ha realizado con la ayuda de la aplicación TMG incluida en el software I-DEAS de Siemens PLM Software.

Para ello se ha realizado un modelo geométrico de CAD de las celdas del TriboLAB, el cual se ha discretizado mediante una malla elementos finitos de tipo shell. A continuación, tras asignarles las propiedades termo-ópticas de sus materiales, los elementos tipo shell asociados con cada nodo de nuestro modelo térmico han sido agrupados, procediendo a la resolución del cálculo y obteniendo como resultado las conductancias de radiación entre los nodos del modelo térmico.

Las siguientes figuras muestran algunos ejemplos de las discretizaciones realizadas, donde los colores representan el nodo del modelo térmico al que están asociados.

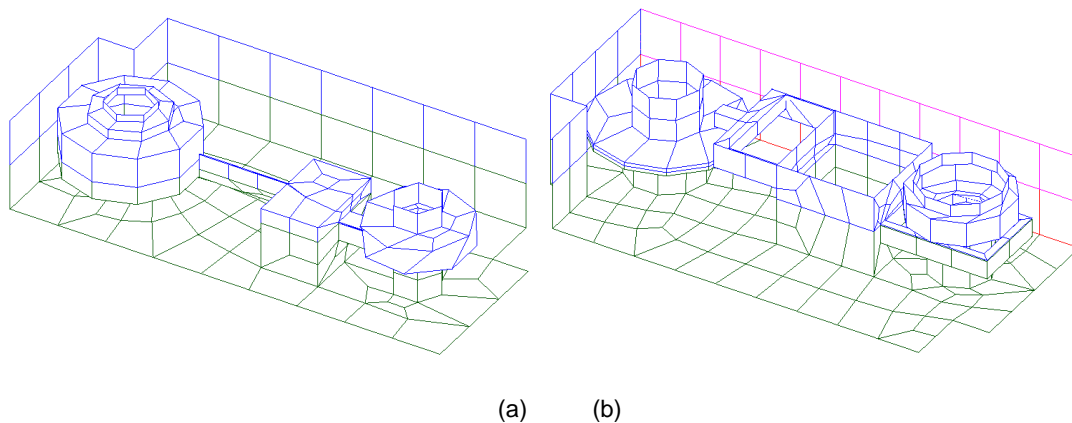


Fig. 102. Malla empleada para el cálculo de las conductancias radiativas entre los nodos de las celdas de experimentos. a) Lado de experimentos BB, b) lado de experimentos POD.

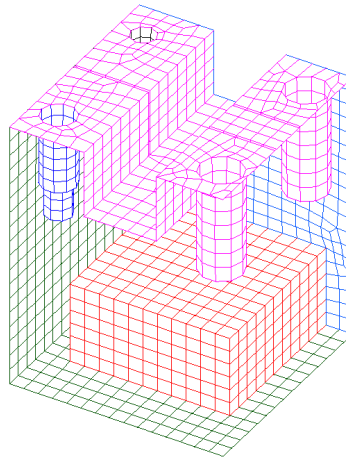


Fig. 103. Malla empleada para el cálculo de las conductancias radiativas entre los nodos de la celda de los motores.

V. TELEMETRÍA

V.1. DESCRIPCIÓN DE LAS TEMPERATURAS EN ÓRBITA

Las siguientes imágenes muestran los valores de temperatura registrados en el TriboLAB durante su estancia en la Estación Espacial Internacional.

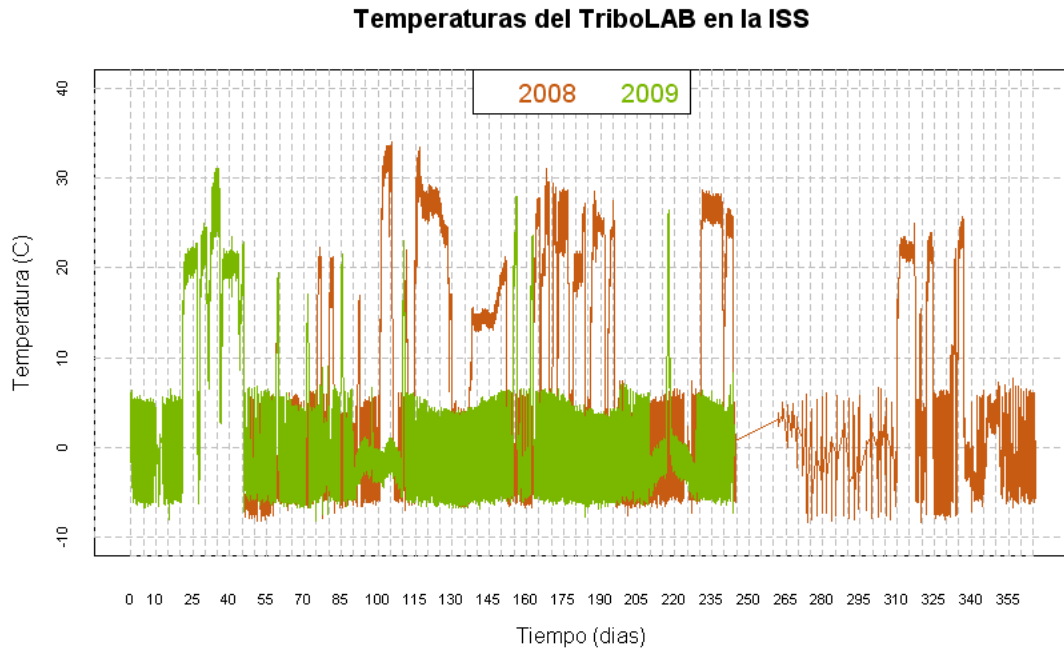


Fig. 104. Temperatura del TriboLAB en órbita. Superposición de los datos de 2008 y 2009.

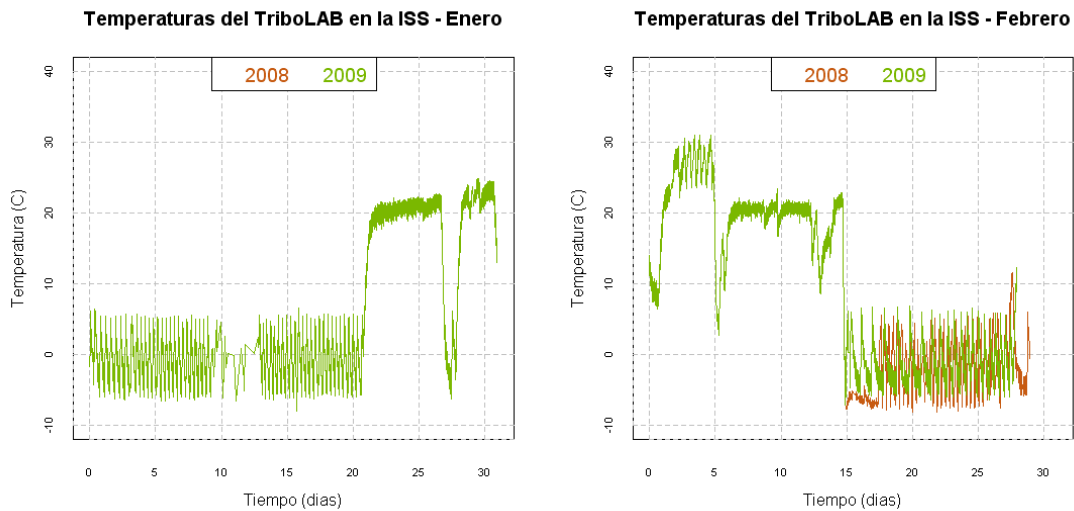


Fig. 105. Temperatura registrada en el TriboLAB durante parte de los años 2008 y 2009.

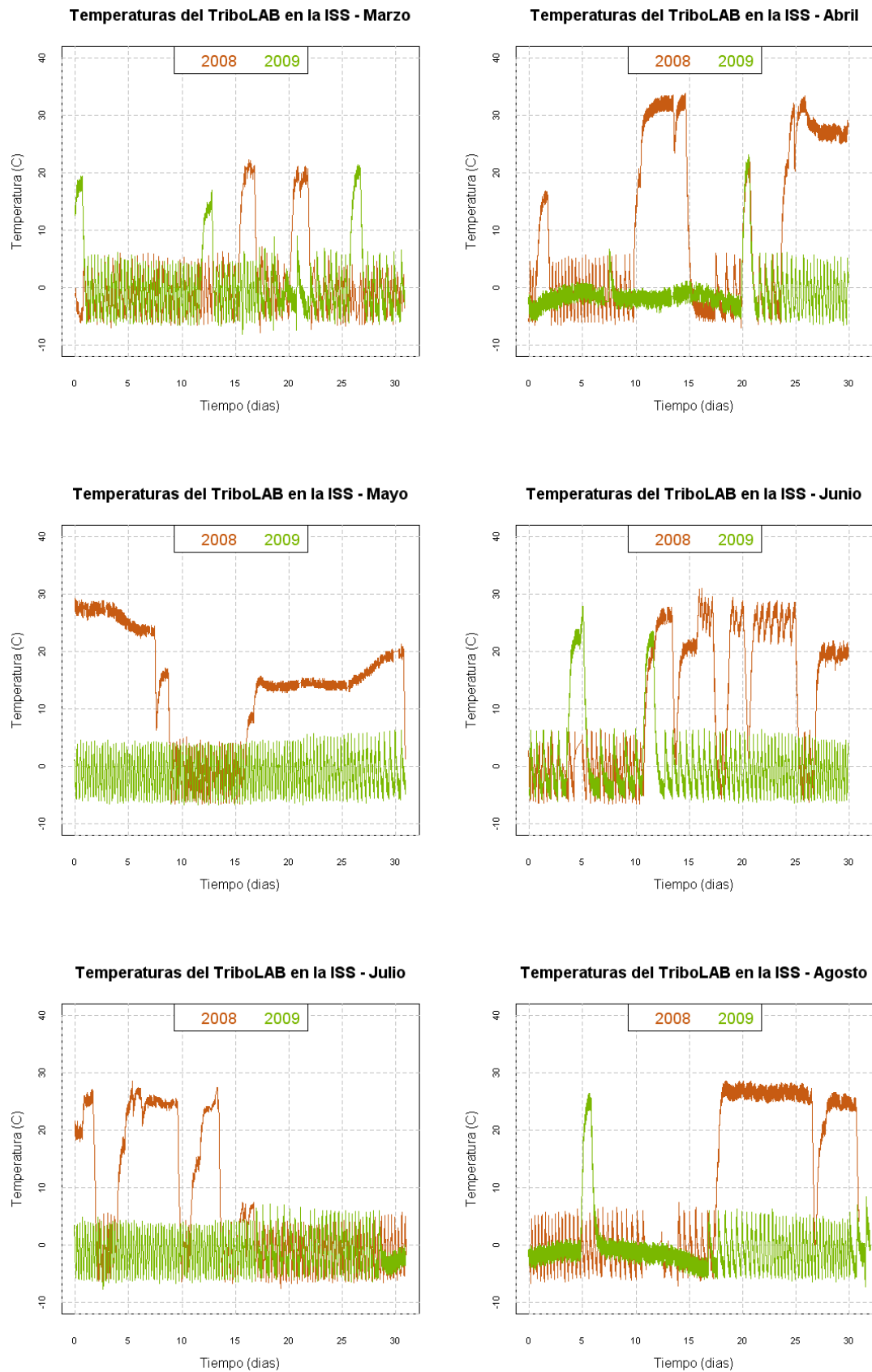


Fig. 106. Temperatura registrada en el Tribolab durante parte de los años 2008 y 2009.

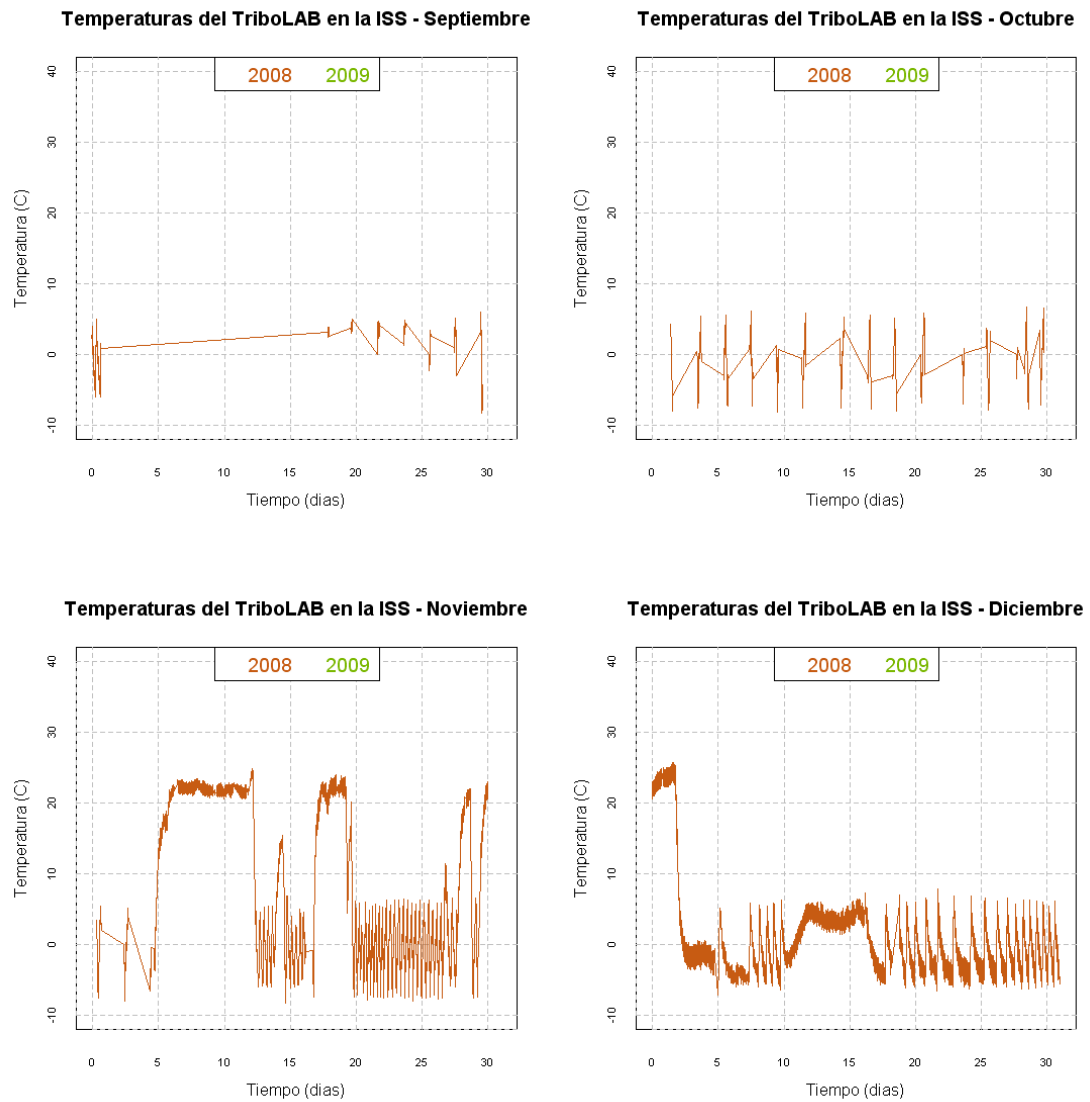


Fig. 107. Temperatura registrada en el TriboLAB durante parte de los años 2008 y 2009.

VI. ANÁLISIS DE LOS DATOS

VI.1. COMPARACIÓN ENTRE LOS ENSAYOS TÉRMICOS Y SUS TMM.

La Fig. 108 muestra los resultados del análisis de coordenadas principales realizado sobre los resultados de los ensayos térmicos y sus modelos matemáticos empleando la semimétrica basada en MPLSR, representados sobre sus dos primeras coordenadas.

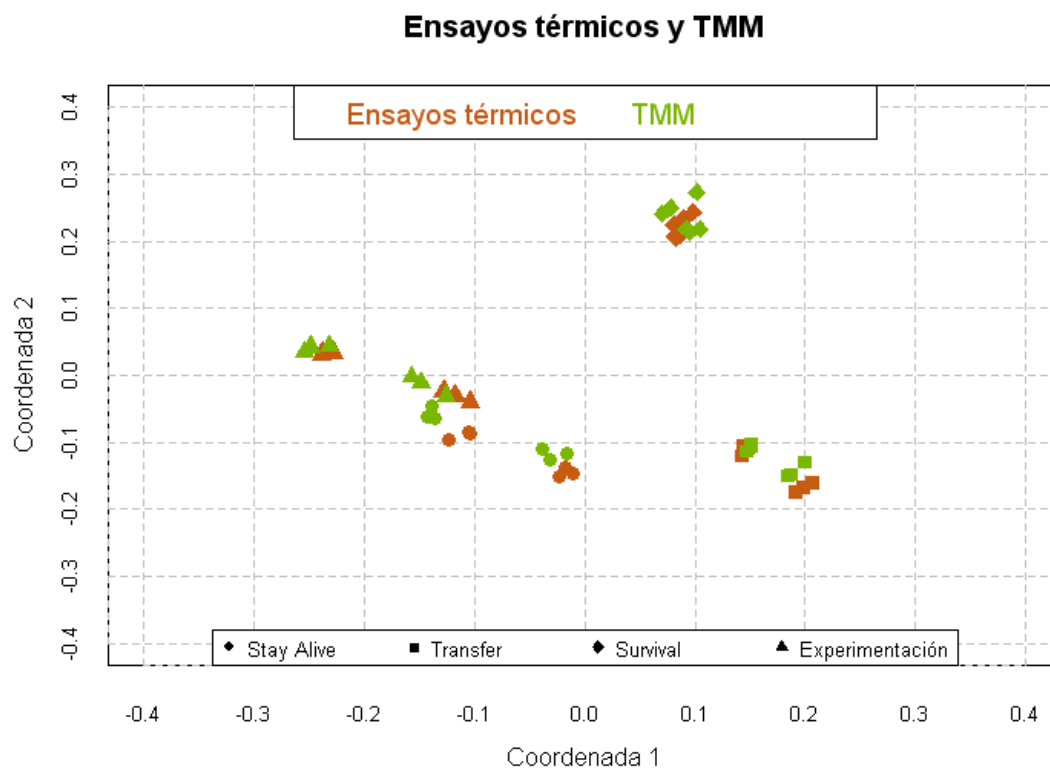


Fig. 108. Comparativa entre los ensayos térmicos y los resultados de los modelos térmicos matemáticos.

VI.2. COMPORTAMIENTO DEL TRIBOLAB EN ÓRBITA.

La imágenes siguientes muestran los resultados obtenidos mediante el filtrado de las curvas de telemetría del TriboLAB bajo distintas cadencias de filtrado.

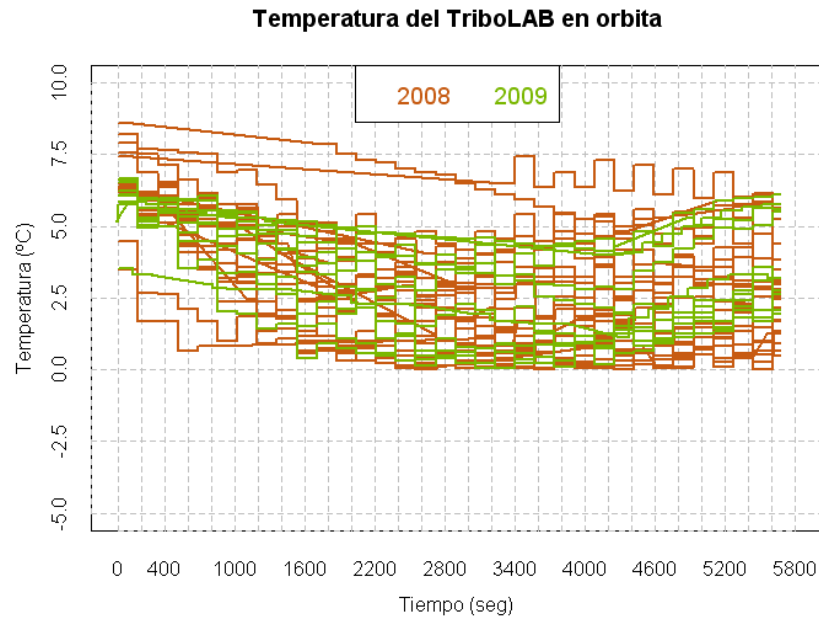


Fig. 109. Temperatura del TriboLAB en órbita. Datos filtrados cada 1 segundo. 38 órbitas.

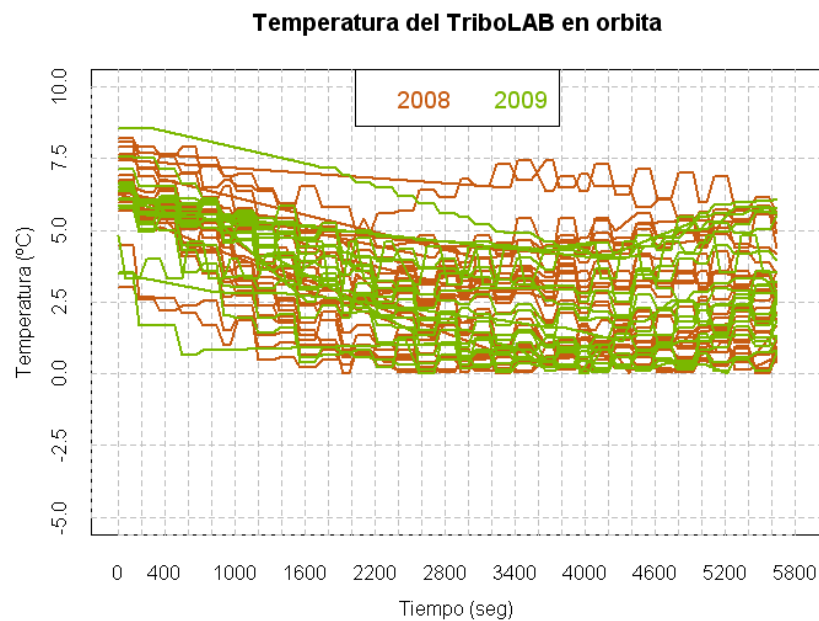


Fig. 110. Temperatura del TriboLAB en órbita. Datos filtrados cada 1 minuto. 57 órbitas.

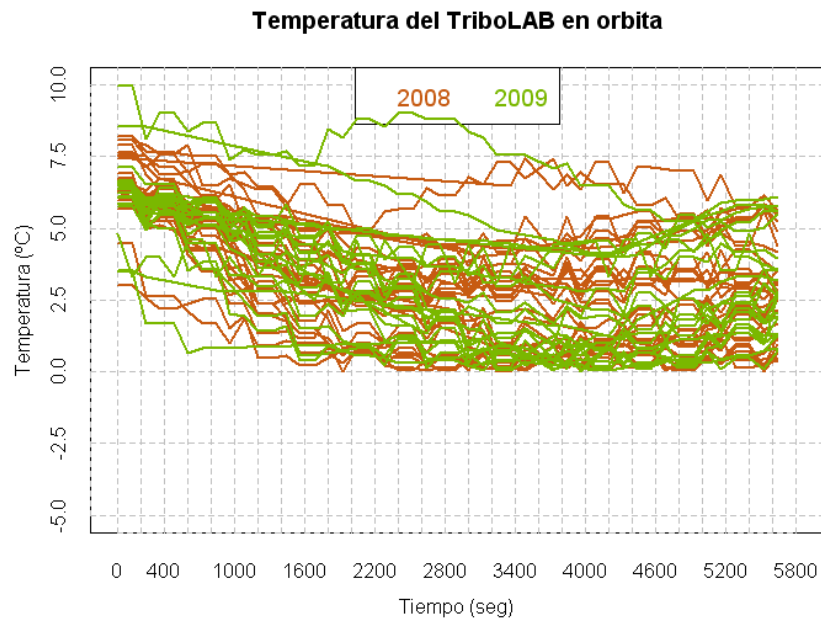


Fig. 111. Temperatura del TriboLAB en órbita. Datos filtrados cada 2 minutos. 58 órbitas.

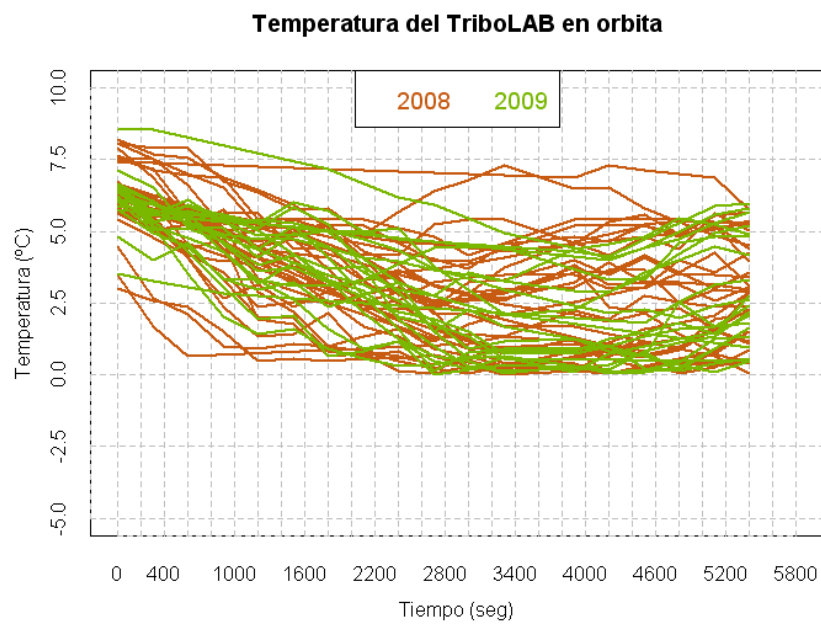


Fig. 112. Temperatura del TriboLAB en órbita. Datos filtrados cada 5 minutos. 59 órbitas.

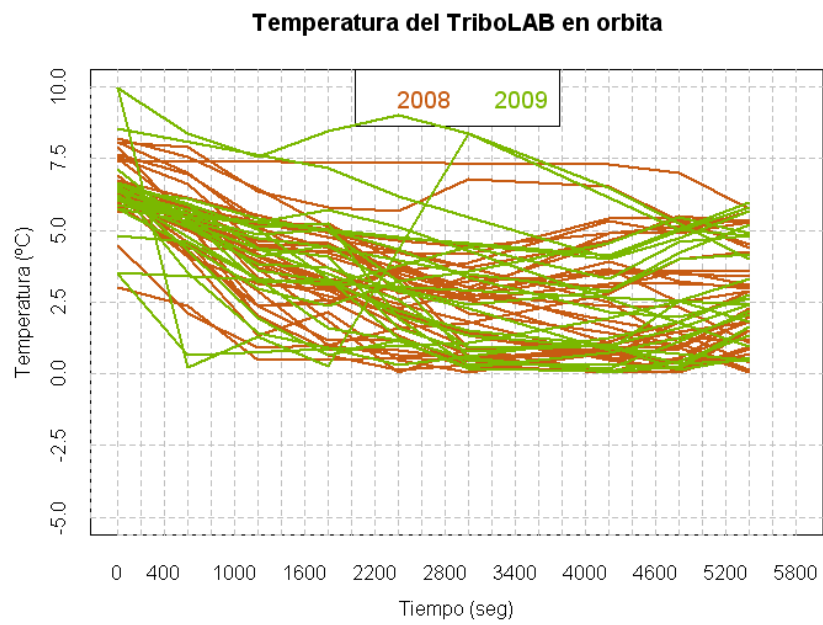


Fig. 113. Temperatura del TriboLAB en órbita. Datos filtrados cada 10 minutos. 64 órbitas.

VI.3. IDENTIFICACIÓN DE LAS ÓRBITAS ESTUDIADAS.

Nº de orbita	Fecha y hora	Nº de orbita	Fecha y hora
1.....	2008-03-06 19:40:45	25	2009-02-26 20:19:39
2.....	2008-04-17 06:57:25	26	2009-02-27 16:35:09
3.....	2008-04-18 04:18:05	27	2009-03-06 13:21:58
4.....	2008-05-12 20:29:23	28	2009-03-07 02:02:10
5.....	2008-05-14 02:54:04	29	2009-03-09 05:51:24
6.....	2008-05-14 08:39:57	30	2009-03-10 23:16:42
7.....	2008-05-15 03:10:28	31	2009-03-16 09:36:42
8.....	2008-06-07 15:13:54	32	2009-03-22 21:49:30
9.....	2008-06-08 09:38:54	33	2009-04-04 03:49:11
10.....	2008-06-09 02:38:54	34	2009-04-05 00:49:10
11.....	2008-11-21 18:22:32	35	2009-04-05 12:31:04
12.....	2008-11-22 20:31:37	36	2009-04-06 10:37:50
13.....	2008-11-23 10:18:57	37	2009-04-12 04:07:19
14.....	2008-11-24 01:36:57	38	2009-04-14 11:59:56
15.....	2008-11-26 06:52:59	39	2009-04-24 12:25:37
16.....	2008-11-26 22:13:52	40	2009-05-05 11:03:01
17.....	2008-12-09 03:13:36	41	2009-05-12 12:29:08
18.....	2008-12-26 22:59:59	42	2009-05-23 12:35:01
19.....	2009-01-02 03:10:38	43	2009-05-28 04:30:28
20.....	2009-01-08 14:29:57	44	2009-06-03 03:42:53
21.....	2009-01-15 12:54:27	45	2009-06-19 16:40:39
22.....	2009-01-20 14:06:28	46	2009-07-15 03:42:53
23.....	2009-02-23 00:35:19	47	2009-07-18 05:58:33
24.....	2009-02-23 14:22:39	48	2009-08-22 08:15:42

VII. NOTACIÓN EMPLEADA

El carácter empleado en esta tesis de máster para denotar el símbolo decimal es el ‘.’ en lugar de la ‘,’ con el objeto de mantener la coherencia con los resultados extraídos de los programas de análisis empleados (fundamentalmente R).

VIII. LISTADO DE ACRÓNIMOS

ACM	<i>Active mode</i> - Modo activo
BB	<i>Ball bearing</i> - Rodamientos
CEPA	<i>Columbus External Payload Adapter</i> - Adaptador exterior del Columbus para experimentación
CGS	Carlo Gavazzi Spazio
EDS	Escalado multidimensional
ESA	<i>European Space Agency</i> - Agencia Espacial Europea
EuTEF	<i>European Technology Exposure Facility</i> - Instalación europea para experimentación
FPCA	<i>Functional principal components analysis</i> - Análisis de componentes principales sobre datos funcionales
GNU GPL	<i>GNU General Public License</i> - Licencia pública general GNU
IIM	<i>Instrument Investigation mode</i> - Modo de investigación del instrumento
INTA	Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial
ISS	<i>International Space Station</i> - Estación Espacial Internacional
LEO	<i>Low Earth orbit</i> - Órbita terrestre de baja altura
LOESS	<i>Locally weighted scatterplot smoothing</i> - Suavizado con ponderación lineal
LOWESS	<i>Locally weighted scatterplot smoothing</i> - Suavizado con ponderación lineal
MDS	<i>Multidimensional scaling</i> - Escalado multidimensional
MiCYT	Ministerio de Ciencia y Tecnología
MLI	<i>Multi Layer Insulation</i> - Aislamiento multicapas
MPLSR	<i>Multivariate partial least regression</i> - Regresión parcial multivariada de mínimos cuadrados

NA	<i>Missing values</i> - valores perdidos
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i> - Administración nacional de aeronáutica y espacio
NNM	<i>Non nominal mode</i> - Modo No Nominal
PCA	<i>Principal components analysis</i> - Análisis de componentes principales
POD	<i>Pin on disk</i> - Varilla sobre disco
RAAN	<i>Right ascension of the ascending node</i> - Ascensión recta del nodo de ascenso
SAM	<i>Stay Alive mode</i> - Modo Stay Alive
SBM	<i>Stand By mode</i> - Modo Stand By
STA	<i>Stay Alive mode</i> - Modo Stay Alive
SUM	<i>Survival mode</i> - Modo Survival
SURV	<i>Survival mode</i> - Modo Survival
TEM	<i>TriboLAB experiment mode</i> - Modo de experimentación del TriboLAB
TGCS	<i>TriboLAB ground control station</i> - Estación terrena de control del TriboLAB
TMM	<i>Thermal mathematical models</i> - Modelos térmicos matemáticos
TRP	<i>Temperature Reference Point</i> - Punto de temperatura de referencia