

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

CALIBRACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE UN SISTEMA HÍBRIDO PARA GENERACIÓN DE CALEFACCIÓN Y AGUA CALIENTE SANITARIA PARA UNA VIVIENDA UNIFAMILIAR

Alumno: *Bengoetxea Larrea, Aritz*
Codirector: *Erkoreka González, Aitor*
Codirectora: *Pérez Iribarren, Estibaliz*
Departamento: Máquinas y Motores
Térmicos
Curso Académico: 2018/2019

Bilbao, 12, Junio, 2019

RESUMEN TRILINGÜE

En el presente documento se muestra el procedimiento seguido para optimizar una instalación híbrida formada por un motor de cogeneración de tecnología Stirling y una caldera de condensación con un tanque de almacenamiento térmico complementario.

Para el desarrollo de este proyecto se ha ensayado una instalación real durante la semana de máxima demanda de una vivienda unifamiliar. Posteriormente, se ha calibrado un modelo informático para la obtención de una simulación próxima a la realidad. Una vez se tiene el modelo calibrado se optimiza la instalación de manera multiobjetivo con propósito de reducir el coste de operación de la instalación y aumentar el rendimiento exergético de ésta. Por otra parte, se plantea como afectaría a la instalación una mejora del aislamiento térmico.

Dokumentu honetan, Stirling teknologiako kogenerazio motor baten eta biltegitratze termiko osagarria duen kondentsaziozko galdara baten instalazio hibridoa hobetzeko prozedura aurkezten da.

Proiektu honen garapenerako, benetako instalazio baten entsegua egin da familia bakarreko etxebizitza bateko eskakizun gehieneko astean. Ondoren, errealitatetik hurbil dagoen simulazioa lortzeko, eredu informatiko baten kalibrazioa egin da. Behin eredia kalibratuta, instalazioaren hobekuntza ematen da eta honen etekin exergetikoa handitzen da eta funtzionamendu kostua txikiagotzen da. Azkenik, isolamendu termikoaren hobekuntzak instalazioan zenolako eragina izango zuen aztertzen da.

This document shows the procedure followed to optimize a hybrid installation consisting of a Stirling technology cogeneration engine and a condensing boiler with a complementary thermal storage tank.

For the development of this project, a real installation was tested during the week of maximum demand for a single-family home. Subsequently, an existing computer model has been calibrated to obtain a simulation close to reality. Once the calibrated model is available, the installation is optimized in a multi-objective manner in order to reduce the operating cost of the installation and increase the exergetic performance of the installation. On the other hand, it considers how an improvement of the thermal insulation would affect the installation.

PALABRAS CLAVE

Instalación híbrida, aislamiento, multiobjetivo, calibración, optimización.

AGRADECIMIENTOS

Con el presente trabajo se acaba mi andadura en la Escuela de Ingeniería de Bilbao. Han sido unos años de esfuerzo y sacrificio que hoy se ven recompensados. A lo largo de este camino han aparecido obstáculos que se han superado a base de trabajo y actitud. Hoy no puedo olvidarme de toda la gente que ha estado presente en estos años y a quienes agradezco su presencia en estas líneas.

En primer lugar, a mi director Aitor Erkoreka y mi directora Estibaliz Pérez de Trabajo de Fin de Máster. A ellos les agradezco su tiempo, su dedicación y todo lo aprendido en este último año.

Agradecer también a los proyectos a través de los cuales se ha podido desarrollar este Trabajo de Fin de Máster. Por un lado, el proyecto IMMOEN 'Implementación de técnicas de calibración y optimización multiobjetivo automatizadas aplicado a simulación de modelos energéticos en edificios reales MONitorizados ENergéticamente' (Referencia del proyecto: ENE2015-65999-C2-2-R and ENE2015- 65999-C2-1-R (MINECO/FEDER) apoyado por el Ministerio de Economía y Competitividad y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional. Por otro lado, al proyecto financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades junto con el Fondo Europeo de Desarrollo Regional bajo el nombre de MONITHERM 'Investigación de técnicas de monitorización de viviendas habitadas para la caracterización térmica y metodología para identificar indicadores de operación claves' (Referencia de proyecto: RTI2018-096296-B-C22 (MCIU/AEI/FEDER, UE)

Al Laboratorio de Control de Calidad en la Edificación (LCCE) del Gobierno Vasco por las facilidades técnicas proporcionadas. Gracias a la instalación allí presente fue posible la recogida de datos para los cálculos del proyecto.

Por último, gracias a mi familia por haber estado siempre ahí.

“Caminante, no hay camino, se hace camino al andar.”

ÍNDICE

I. MEMORIA	1
1 INTRODUCCIÓN	1
2 CONTEXTO	2
3 OBJETIVOS Y ALCANCE	6
4 BENEFICIOS DEL TRABAJO	8
4.1 Beneficios técnicos	8
4.2 Beneficios económicos	8
4.3 Beneficios medioambientales	9
5 ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE	10
5.1 Calderas	11
5.2 Tecnologías de cogeneración	13
5.3 Energía solar térmica	15
5.4 Bomba de calor	16
5.5 Almacenamiento	18
5.6 Sistemas híbridos	18
5.7 Técnicas de calibración	19
5.8 Técnicas de optimización	20
6 ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS	22
6.1.1 Simulación	22
6.1.2 Trnsys	22
6.1.3 ANSYS	22
6.2 Calibración	23
6.3 Optimización	23
7 DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN PROPUESTA	24
II. METODOLOGÍA SEGUIDA EN EL DESARROLLO DEL TRABAJO	25
1 DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS Y PROCEDIMIENTOS	25
1.1 Descripción de la instalación	25
1.2 Lógica de funcionamiento de la instalación	30
1.3 Ensayos	34
1.4 Modelo Trnsys	37
1.5 Calibración	40
1.5.1 Método determinista	41
1.5.2 Genopt	42
1.5.3 Procedimiento genérico de calibración	43

1.5.4	Proceso de calibración del proyecto	44
1.6	Optimización	44
1.6.1	Optimización multiobjetivo con un algoritmo genético	44
2	DESCRIPCIÓN DE TAREAS	47
3	MEJORAS REALIZADAS	54
3.1	Mejoras físicas.....	54
3.1.1	1ª Modificación	54
3.1.2	2ª Modificación	54
3.1.3	3ª Modificación	54
3.1.4	4ª Modificación	55
3.1.5	5ª Modificación	55
3.1.6	6ª Modificación	55
3.1.7	7ª Modificación	55
3.1.8	8ª Modificación	55
3.1.9	9ª Modificación	56
3.2	Mejoras de control.....	56
3.3	Calibrado	56
4	CÁLCULOS.....	62
4.1	Simplificaciones e hipótesis de cálculo	62
4.2	Volúmenes de control	62
4.3	Balances de masa	66
4.4	Balance de energía	67
4.5	Calibración.....	72
4.6	Optimización	74
4.6.1	Funciones objetivo y variables de optimización	75
5	DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS	78
5.1	Ensayo experimental.....	78
5.2	Calibración.....	87
5.3	Optimización multiobjetivo.....	93
5.4	Resultados optimizaciones.....	99
III.	ASPECTOS ECONÓMICOS.....	104
1	PRESUPUESTO EJECUTADO	104
IV.	CONCLUSIONES.....	105
	BIBLIOGRAFÍA.....	108
	ANEXOS	110

Índice de imágenes

Imagen 1: Origen de la producción eléctrica en España: Abril 2019.	3
Imagen 2: Caldera de condensación.	12
Imagen 3: Caldera de biomasa doméstica.	12
Imagen 4: Motor de combustión interna alternativo.	13
Imagen 5: Motor de combustión externa.	14
Imagen 6: Microturbina de gas.	15
Imagen 7: Colector solar.	16
Imagen 8: Bomba de calor aire-aire.	17
Imagen 9: Bomba de calor aire-agua.	17
Imagen 10: Bomba geotérmica.	18
Imagen 11: (a) Motor Stirling. (b) Caldera de condensación.	19
Imagen 12: Motor Stirling Remeha eVita.	25
Imagen 13: Caldera de condensación Baxi-Roca.	26
Imagen 14: Fan-Coil Sedical Ross.	26
Imagen 15: Tanque de almacenamiento térmico Vaillant.	27
Imagen 16: Control SCADA de la instalación.	27
Imagen 17: Esquema resumen de la instalación ensayada.	29
Imagen 18: Lógica de control de la instalación.	33
Imagen 19: Pantalla de configuración de lógica de control en SCADA.	34
Imagen 20: Funcionamiento optimización.	45
Imagen 21: Diagrama de Gantt del proyecto.	53
Imagen 22: Horno de calibración.	57
Imagen 23: Volumen de control de la caldera.	63
Imagen 24: Volumen de control del Stirling.	64
Imagen 25: Volumen de control del aerotermo.	64
Imagen 26: Volumen de control ACS.	65
Imagen 27: Volumen de control del tanque de almacenamiento.	65
Imagen 28: Volumen de control general.	66

Índice de tablas

Tabla 1: Resumen equipos instalación.	28
Tabla 2: Relación de Types utilizados en el modelo informático.	40
Tabla 3: Parámetros de optimización.	46
Tabla 4: Valores de de temperatura para referencia 30°C.	57
Tabla 5: Valores de temperatura para referencia 50°C.	58
Tabla 6: Valores de temperatura para referencia 70°C.	58
Tabla 7: Valores medios para calibración de sonda de temperatura.	58
Tabla 8: Valores de caudales para referencia 1530 L/h.	59
Tabla 9: Valores de caudales para referencia 2470 L/h.	60
Tabla 10: Valores de caudales para referencia 3250 L/h.	60
Tabla 11: Valores medios para calibración de caudalímetro.	60
Tabla 12: Composición Gas Natural.	62
Tabla 13: Relación entradas/salidas volúmenes de control.	66
Tabla 14: Rendimientos de volúmenes de control.	70

Tabla 15: Valores promedio de variables del primer paso de calibración.....	73
Tabla 16: Valores promedio de las variables del segundo paso de calibración tras 48 horas.....	74
Tabla 17: Variables de optimización y rango de variación de estas.	76
Tabla 18: Resultados ensayo experimental.	83
Tabla 19: Parámetros de calibración.	88
Tabla 20: Valores límites inferior, superior, inicial y calibrado.....	88
Tabla 21: Reducciones obtenidas en errores individuales y totales.....	89
Tabla 22: Resultados test experimental vs primera calibración.....	91
Tabla 23: Valores inferior, superior, inicial y calibrado de parámetros 2ª calibración.....	92
Tabla 24: Reducciones obtenidas en errores individuales y totales en la segunda calibración. ...	92
Tabla 25: Comparación resultados experimental, 1ªCalibración y 2ªCalibración.	93
Tabla 26: Coeficientes de pérdidas para diferentes niveles de aislamiento térmico.	94
Tabla 27: Resultados de simulaciones con diferente nivel de aislamiento térmico. 17, 15 y 10%, 5%, 0%.	95
Tabla 28: Mejora obtenida en optimización del caso experimental.	98
Tabla 29: Mejoras obtenidas en optimizaciones del resto de casos. (a) 15% y 10% de pérdidas. (b) 5% y 0% de pérdidas.	98
Tabla 30: Valores de variables de optimización.....	99
Tabla 31: Resultados del caso experimental, simulación no optimizada y optimizada.....	100
Tabla 32: Resultados no-optimizados y optimizados de los diferentes casos en función del nivel de aislamiento térmico.	101
Tabla 33: Desglose del presupuesto del proyecto.	104

Índice gráficas

Gráfica 1: Demanda mensual de calefacción.....	35
Gráfica 2: Demanda de calefacción, semana de máxima demanda.....	36
Gráfica 3: Demanda de ACS, semana de máxima demanda.....	36
Gráfica 4: Recta de calibración de sonda de temperatura.	59
Gráfica 5: Recta de calibración del caudalímetro.	61
Gráfica 6: Caudales ACS experimentales vs teóricos.	78
Gráfica 7: Temperaturas ACS.	79
Gráfica 8: Calefacción experimental vs teórica.....	79
Gráfica 9: Funcionamiento conjunto caldera y Stirling.....	80
Gráfica 10: Funcionamiento de caldera.....	81
Gráfica 11: Condiciones carga.....	81
Gráfica 12: Condiciones descarga.	82
Gráfica 13: ppm de NOx y CO en el motor Stirling.	84
Gráfica 14: Oxígeno en humos y temperatura de gases de salida en el motor Stirling.....	84
Gráfica 15: ppm de NOx y CO en la caldera de condensación.....	85
Gráfica 16: Oxígeno en humos y temperatura de gases salida en la caldera de condensación. ...	85
Gráfica 17: Procedencia del calor generado.	86
Gráfica 18: Destino del calor generado.	86
Gráfica 19: Resumen.....	87
Gráfica 20: Curvas calibración vs experimental e inicial de temperaturas de salida caldera y Stirling. (a) Periodo de 24h. (b) Periodo de 2h.....	90

Gráfica 21: Gráficas calibración vs inicial y experimental. Caso de fuel. (a) Periodo 24h. (b) Periodo 2h.....	90
Gráfica 22: Curva de Pareto caso experimental.	97
Gráfica 23: Curva de Pareto y curva normalizada caso experimental.	97

Acrónimos

ACRÓNIMO	DESCRIPCIÓN
ACS	Agua caliente sanitaria
CAL	Calefacción
CTE	Código Técnico de la Edificación
CV(RMSE)	Coefficiente de variación del error cuadrático medio
d	Distancia entre curva normalizada y curva de Pareto
GEI	Gases de efecto invernadero
LCCE	Laboratorio de Control de Calidad en la Edificación
MBE	Error medio (Mean Bias Error)
MILP	Método de programación lineal de enteros mixtos
NMBE	Error medio normalizado
NSGA-II	Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm
OPT	Optimizado
PID	Proporcional-Integral-Derivativo
RITE	Reglamento de Instalaciones Térmicas en Edificios
RMSE	Root Mean Square Error
SCADA	Supervisory control and data acquisition
V2V	Válvula de dos vías
V3V	Válvula de tres vías
VC	Volumen de control

Nomenclatura

NOMENCLATURA	UNIDADES	DESCRIPCIÓN
Alma	[kWh]	Cantidad de calor descargado por el almacenamiento
b	[kJ/kg]	Exergía específica
b_{cble}	[kJ/kg]	Exergía del combustible
$b_{ch,i}$	[kJ/kg]	Exergía química del compuesto "i"
CAU ₁	[L/h]	Caudal de agua entrante a la caldera
CAU ₅	[L/h]	Caudal de agua entrante al volumen de control de almacenamiento
CAU ₁₃	[L/h]	Caudal de agua de descarga
CAU _{CHP}	[L/h]	Caudal de agua en el motor Stirling
c_E	[€/kWh]	Coste unitario de la electricidad
c_F	[€/kWh]	Coste unitario del fuel
C_w	[kJ/kg K]	Calor específico
E	[kWh]	Electricidad generada en el motor Stirling
$F_{Caldera_{PCI}}$	[kWh]	Consumo de gas en la caldera
$F_{CHP_{PCI}}$	[kWh]	Consumo de gas en el motor Stirling
F_{TOT}	[kWh]	Consumo de gas total
h	[kJ/kg]	Entalpía específica
h_i	[kJ/kg]	Entalpía específica del compuesto i
\dot{m}	[kg/s]	Caudal másico
PCI	[kWh/kg]	Poder calorífico inferior
Q_{ACS}	[kWh]	Calor aportado al ACS
Q_{Alma}	[kWh]	Calor descargado por el almacenamiento
$Q_{caldera\ agua}$	[kWh]	Calor aportado al agua en la caldera
$Q_{CHP\ agua}$	[kWh]	Calor aportado al agua en el Stirling
\dot{Q}_{vc}	[kW]	Pérdidas de calor por unidad de tiempo
T	[°C]	Temperatura
T _{CALDERA}	[°C]	Temperatura de salida del agua de la caldera
T _{CHP}	[°C]	Temperatura de salida del agua del motor Stirling
T _{DOWN}	[°C]	Temperatura de la corriente saliente del tanque de almacenamiento térmico inferior
T _{e_ACS}	[°C]	Temperatura de agua de alimentación
T _{e_aero}	[°C]	Temperatura de entrada al aerotermo
T _{e_C}	[°C]	Temperatura de agua entrante al intercambiador de ACS procedente de producción
T _{MED}	[°C]	Temperatura de mezcla de agua de aerotermo e intercambiador ACS
T _{ret_CHP}	[°C]	Temperatura de retorno al motor Stirling
T _{s_ACS}	[°C]	Temperatura del agua de consumo
T _{s_aero}	[°C]	Temperatura de salida al aerotermo
T _{s_C}	[°C]	Temperatura de agua caliente saliente del intercambiador de ACS
T _{TANQUE}	[°C]	Temperatura del tanque de almacenamiento térmico
T _{UP}	[°C]	Temperatura de la corriente saliente del tanque de almacenamiento térmico superior
ΔT_{carga}^{ON}	[°C]	Diferencia de temperaturas que activa la carga
ΔT_{carga}^{OFF}	[°C]	Diferencia de temperaturas que desactiva la carga

NOMENCLATURA	UNIDADES	DESCRIPCIÓN
$\Delta T_{descarga}^{ON}$	[°C]	Diferencia de temperaturas que activa la descarga
$\Delta T_{descarga}^{OFF}$	[°C]	Diferencia de temperaturas que desactiva la descarga
\dot{W}_{vc}	[kW]	Trabajo del volumen de control por unidad de tiempo
X_{REAL}	Depende variable	Valor de la variable medida
\bar{X}_{REAL}	Depende variable	Valor medio de la variable medida
X_{SIM}	Depende variable	Valor de la variable simulada
y_i	-	Fracción molar del compuesto "i"
ψ	-	Rendimiento exergético

I. MEMORIA

1 INTRODUCCIÓN

En los últimos años la demanda energética en el sector residencial ha aumentado. Este aumento, supone un incremento en las emisiones de gases de efecto invernadero debido a la quema de combustibles fósiles en calderas convencionales domésticas. Con el objetivo de generar la misma energía, pero de manera más limpia se han desarrollado nuevas tecnologías.

En este trabajo fin de máster se ha realizado un ensayo de una semana de máxima demanda de agua caliente y calefacción de una vivienda unifamiliar. El sistema de generación de esta vivienda es una instalación híbrida que cuenta con un motor de micro-cogeneración de tecnología Stirling y una caldera de condensación que funciona en momentos de demandas altas que el motor no puede suplir. Además, para dar una mayor estabilidad a la instalación y permitir la operación de la caldera el menor número de veces, se tiene un tanque de almacenamiento térmico que permite dar apoyo al motor cuando tiene una temperatura adecuada.

Con la instalación ensayada, se pretende optimizarla de manera multiobjetivo. Para ello, se cuenta con el diseño de un modelo informático que permite la simulación de la instalación. Con el objetivo de adecuar la simulación a la realidad se realiza una calibración del modelo. Así se obtiene un correcto ajuste de la simulación.

Después de tener el modelo calibrado, se puede proceder a optimizar la instalación ensayada. Por una parte, como se está en disposición de simular sin límites, se propone mejorar el aislamiento térmico de la instalación y ver cómo afecta a la instalación. Por otra parte, utilizando un software que permite realizar optimizaciones multiobjetivo se plantea modificar ciertas variables de control de la instalación y optimizar la instalación frente a coste de operación y rendimiento exergético. Esta última optimización se realiza para los 4 casos propuestos con el aislamiento mejorado además del caso experimental.

Por último, los valores de las variables en los casos optimizados se introducen en los modelos simulados y calibrados con diferentes coeficientes de pérdidas y se observan las mejoras obtenidas que permiten sacar conclusiones de lo que se obtiene del proyecto.

2 CONTEXTO

A lo largo de los años, el consumo de energía ha ido en aumento y cada vez es más necesario la reducción de éste. Entre los objetivos fijados en la cumbre contra el cambio climático en París, se establece reducir las emisiones europeas de gases de efecto invernadero en un 40% de aquí a 2030, limitar el calentamiento global en menos de 2°C y acabar con las emisiones debidas al carbón para 2050 [1]. Para cumplir dichos objetivos, se debe actuar en todos los sectores intentando ser más eficientes. El sector residencial, ubicado en tercera posición en cuanto a consumo de energía final, es uno de los cuales tiene mayor margen de mejora. Para ir acorde con los objetivos en cuestión, los edificios deberán aumentar su rendimiento energético en dos veces el actual. Esto irá encaminado a que el edificio estándar sea de consumo casi nulo.

La estrategia más efectiva para reducir tanto consumo como emisiones, es la disminución de la demanda de energía. De toda la energía consumida en España, el 17 % es debida a los consumos en el sector de la edificación [2]. Dicha reducción puede obtenerse con un mayor aprovechamiento de la luz solar o cambiando la actividad realizada por las personas, es decir, teniendo un uso racional de los equipos.

No sólo el consumo en edificios tiene margen de mejora si no que, a medida que se instale una envolvente más estanca, las pérdidas serán menores y será necesario un menor consumo para mantener el confort en el interior de las viviendas. La utilización de aislantes de última generación permite mejorar la envolvente disminuyendo las pérdidas del edificio. Se considera que el 97% de todos los edificios residenciales existentes en Europa son ineficientes debido a cerramientos de mala calidad [3]. En cambio, el uso de estos materiales de última generación en edificios de nueva construcción genera un ahorro equivalente al 5% del consumo anual de energía de la Unión Europea.

Por otra parte, la energía eléctrica generada en el mes de abril en España tiene 42,1% de origen no renovable, como se puede observar en la imagen 1 facilitada por RED ELECTRICA [4]. Esto supone que, para consumir electricidad en las viviendas, se emite CO₂ a la atmosfera. De ahí que se tenga la reducción de demanda de energía como principal objetivo para reducir emisiones.

Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.

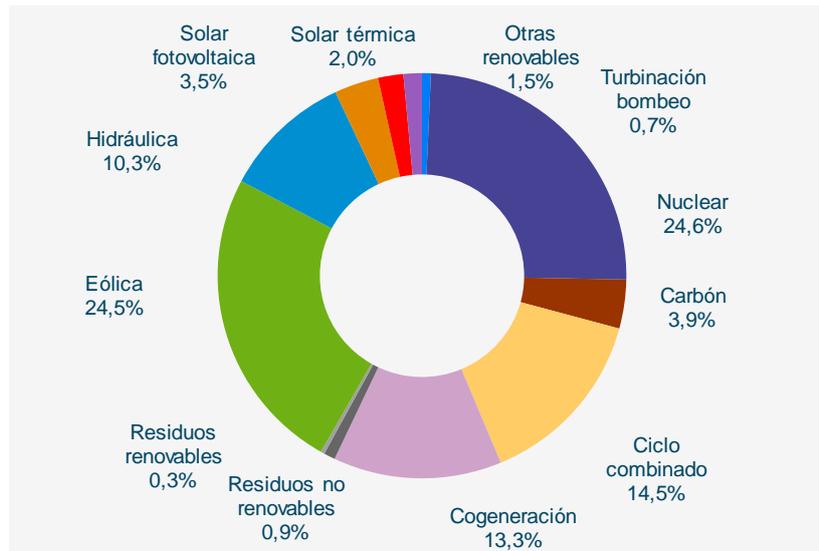


Imagen 1: Origen de la producción eléctrica en España: Abril 2019.

Por otra parte, de todos es sabido que en las viviendas es necesaria la producción de agua caliente sanitaria (ACS, de aquí en adelante) y de calefacción. Para ello, comúnmente se ha tenido un equipo de producción que quema gas natural como es la caldera. Estas instalaciones pueden optimizarse de manera que se obtenga el mayor efecto útil consumiendo lo menos posible.

En la evolución de las tecnologías de generación de energía, apareció la cogeneración como sistema que, gracias a un motor alternativo o una turbina de gas, era capaz de generar electricidad y calor a la vez. Para ello, se quema combustible y se genera electricidad teniendo dichos equipos acoplados a un generador; pero, en vez de desaprovechar los humos calientes, estos se enfrían y se aprovecha ese calor como energía térmica útil. El hecho de que el efecto sea doble, hace que este tipo de energía esté considerada de alto rendimiento.

Con estas dos técnicas de generación de calor explicadas, existe la posibilidad de combinarlas en lo que se conoce como un sistema híbrido. Estos sistemas, combinan un equipo de combustión típico como puede ser la caldera convencional con otros sistemas de generación como puede ser uno de origen renovable, por ejemplo, paneles solares; o la utilización de un motor de cogeneración. Así, para bajas demandas térmicas, puede ser suficiente la operación de la fuente no convencional y darle apoyo en los momentos de máxima demanda con la fuente convencional.

Otra técnica utilizada para un menor consumo energético es el almacenamiento térmico. La instalación de un tanque aislado de almacenamiento térmico permite utilizar el calor acumulado en él para calentar el fluido de la instalación. A partir de cierta temperatura del depósito, se

Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.

permite el aprovechamiento de dicho calor para calentar el agua destinada a ACS o calefacción generando un consumo de gas menor.

La producción de ACS y calefacción es una parte en la cual se puede entrar en busca de instalaciones más eficientes para su producción. Si se tiene un sistema de control del sistema de generación, se pueden encontrar los parámetros que hacen que el funcionamiento de la instalación sea el óptimo. Para llegar al punto óptimo de funcionamiento de una instalación, se debe ensayar bajo diferentes condiciones de operación antes de su puesta en marcha en el lugar que deba ser instalada. Resulta entendible que no se podrán realizar ensayos de elevada duración ya que el gasto sería enorme. Para ello, se realizan ensayos de periodos cortos y se obtienen resultados experimentales.

Con el objetivo de simular el comportamiento de instalaciones reales, se han desarrollado diferentes softwares que permiten simular situaciones transitorias. Este tipo de programas informáticos da la posibilidad al usuario de introducir ciertos parámetros de entrada a partir de los cuales empieza a simular. Con una configuración correcta de la simulación se puede lograr que funcione con la misma lógica de control que la instalación real.

Si bien el modelo informático desarrollado funciona del mismo modo que la instalación real, este funcionamiento debe ser ajustado mediante técnicas de calibración de manera que simulación y realidad funcionen de la manera más parecida posible. A lo largo de los años se han desarrollado diferentes técnicas, algunas de las cuales se han implementado en herramientas informáticas. Mediante simulaciones consecutivas este tipo de programas trata de reducir el valor de la función de coste que el usuario ha definido previamente. Una vez se llega a un criterio de parada se dice que el modelo está calibrado.

Cuando se tiene un modelo informático calibrado, se puede simular la instalación sin necesidad de consumos energéticos. Los cambios de ciertos parámetros permiten ver el efecto que tiene en el funcionamiento de la instalación. Cambiar parámetros aleatoriamente podría dar resultados positivos al cabo de varios intentos en el mejor de los casos, pero requiere tener cierta experiencia en ello para conseguirlo. Por ello, se han desarrollado diferentes métodos informáticos que permitan optimizar la instalación automáticamente.

Como lo que se busca es la eficiencia energética de las instalaciones de producción de ACS y calefacción, se deben buscar los parámetros que sean modificables para obtener una optimización de la instalación. Existen programas informáticos que permiten realizar una optimización de la instalación frente a parámetros que definan respecto a qué se quiere

Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.

optimizar. Con ello, se obtienen valores de estos parámetros que hacen que la instalación funcione de manera optimizada.

Por lo que, queda claro que la simulación de instalaciones reales, su calibración y optimización son necesarias en la búsqueda de reducción de emisiones de CO₂ y reducción de consumo que obviamente están ligadas, cuanto menor sea el consumo, menores serán las emisiones. Esta técnica puede llevar a la instalación a su punto óptimo de funcionamiento evitando así funcionamientos poco eficientes.

3 OBJETIVOS Y ALCANCE

En este apartado se menciona el objetivo de la realización de este proyecto y cuál va a ser el alcance del mismo.

Este proyecto parte con la intención de optimizar el funcionamiento de una instalación híbrida, formada por un motor Stirling para cogeneración doméstica y una caldera de condensación, existente en el Laboratorio de Control de Calidad en la Edificación (LCCE) del Gobierno Vasco ubicado en Vitoria-Gasteiz. El objetivo del mismo es simular demandas de calefacción y ACS para el consumo de una vivienda unifamiliar, calibrar un modelo informático que simule el funcionamiento de la instalación y optimizar la instalación de manera multiobjetivo. Esta optimización se realiza en relación a la instalación real y respecto a escenarios con diferentes niveles de aislamiento.

Para la realización de este proyecto, se parte de una configuración existente en la lógica de funcionamiento de la instalación y, con ésta, se realiza un ensayo experimental. Este ensayo tiene una duración de una semana y se elige la semana del año con mayor demanda como la más significativa para su posterior simulación.

Una vez se tienen los resultados del ensayo realizado, se configuran ciertos parámetros del modelo sin calibrar de la instalación. A continuación, mediante un software que permite la calibración de modelos informáticos y haciendo uso de un análisis de sensibilidad realizado previamente, se calibran los parámetros que tienen mayor relevancia en el modelo. Con los resultados de la calibración se modifican dichos parámetros y así, se tiene la simulación calibrada.

Después de tener el modelo calibrado, se está en disposición de poner en marcha la optimización correspondiente. Es necesario determinar respecto qué parámetros se va a optimizar la instalación y así, tras especificárselo al software que se utilizará para la optimización multiobjetivo, se podrá iniciar la mejora del modelo.

Se realizan diferentes optimizaciones, por un lado, la principal optimización es modificar los parámetros del control de la instalación existente de manera que se reduzca el coste de operación y se maximice el rendimiento exergético de la instalación. Por otro lado, debido a que no existen muchos estudios que realicen una comparación de cómo afectan las pérdidas de calor a la instalación, se plantea la posibilidad de mejorar el aislamiento de la instalación viendo cómo afecta esto al funcionamiento de la instalación. Las mejoras del nivel de aislamiento propuestas

Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.

varían desde el porcentaje de pérdidas que se tiene en la instalación, hasta llegar a un escenario ideal en el cual dichas pérdidas de calor sean nulas. Además, para cada caso mejor aislado, se optimizan las variables de control de la instalación que hagan que el coste de operación de la instalación sea mínimo y el rendimiento exergético mejore.

Con todo esto, se puede decidir implantar estas condiciones en la instalación real en función de la mejora obtenida. Los resultados obtenidos permiten comparar la instalación actual con las posibles mejoras que se podrían instalar en ella sin la necesidad de tener que ensayarla con dichas condiciones.

4 BENEFICIOS DEL TRABAJO

A continuación, se expondrán los diferentes beneficios que se obtienen con la realización de este proyecto. Con este tipo de trabajos se obtienen beneficios técnicos, económicos y ambientales.

4.1 Beneficios técnicos

- Mediante la calibración de un modelo informático y la posterior optimización, se pueden modificar ciertos parámetros que permitan instaurar unas mejoras en el funcionamiento de la planta real.
- El hecho de optimizar la instalación hará que el funcionamiento de los equipos que componen la instalación sea mejor y alarguen su vida útil.
- Los objetivos de tener instalaciones eficientes y de perseguir la mejora continua, hace necesario este tipo de técnicas.
- Una instalación híbrida permite dar servicio a demandas bajas y altas de manera eficiente. Las demandas bajas se suplen con la tecnología más limpia y eficiente mientras que en momentos de demandas altas, esta tecnología se complementa con la tecnología convencional.
- La utilización de la cogeneración en viviendas permite obtener un rendimiento exergético mayor que con el uso de tecnologías convencionales, debido a la obtención de electricidad.
- Una mejora de aislamiento de la instalación puede traer consigo reducciones en el coste de operación. El hecho de simular estos niveles hace posible valorar la implantación o la no implantación de estas mejoras a la instalación. Además, estos escenarios pueden ser configurados bajo la lógica de control óptima obteniendo mejores resultados que los escenarios no optimizados.

4.2 Beneficios económicos

- Calibrar y optimizar una instalación real permite simular el funcionamiento de ésta sin costes significativos y ver si merece la pena modificar ciertos parámetros de funcionamiento.
- Al tener un motor de cogeneración en una instalación híbrida, hace que el gasto de electricidad sea menor ya que se obtiene a la vez que el calor para agua caliente y calefacción.

Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.

- Tener una instalación funcionando en situación óptima hace que los costes de operación de ésta sean menores.
- Si bien una instalación con mejor aislamiento es más cara, el ahorro en el coste de operación de la instalación hace interesante su mejora del aislamiento.

4.3 Beneficios medioambientales

- La cogeneración permite obtener un doble efecto en forma de electricidad y calor para un consumo de gas dado. Esto significa que, para una cantidad de efecto útil deseado, se reduce el consumo de gas necesario. De este modo, se reducen, claramente, las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera.
- En cuanto a la técnica de la optimización de instalaciones consumidoras de gas natural, esta permite funcionar a los equipos de generación en el modo de funcionamiento óptimo. De esta forma, se consumirá la mínima cantidad de gas necesaria para obtener el efecto útil.
- El hecho de usar instalaciones híbridas hace posible que una caldera convencional de gas natural, se pueda combinar con otra técnica de generación de energía que puede tener su origen renovable.
- Optimizar frente a coste de operación de la planta da por resultados una disminución de consumo y, por lo tanto, una reducción de las emisiones debidas a la combustión de gas.
- Una instalación bien aislada hace que se reduzca el consumo de gas y con ello las emisiones de gases de efecto invernadero(GEI).

5 ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE

En este apartado se presenta la evolución de los diferentes sistemas de generación de agua caliente sanitaria y calefacción que se han utilizado a lo largo de la historia. Después se presentan las diferentes tecnologías desarrolladas hasta la fecha y, por último, las diferentes técnicas para calibración y optimización de modelos informáticos.

A lo largo de la historia, el ser humano siempre ha buscado la forma de calentarse. Para alcanzar el bienestar, la temperatura debe estar comprendida entre unos valores de confort. Por ello, en situaciones frías ya en la prehistoria se hacía fuego con dicho objetivo de ganar temperatura y alcanzar una sensación cómoda. Con el paso de los años, este objetivo ha derivado en la necesidad de calefactar espacios y calentar el agua que se utiliza para diferentes usos residenciales [5]. Con ello, se diseñaron diferentes sistemas que permitieran alcanzar estos objetivos.

En el caso de sistemas de calefacción, el primer sistema consistía en la existencia de fuego en un local diferente al que se quería calentar. Los humos de la combustión se transportaban a través de diferentes conductos de manera que calentaban las paredes y/o suelos haciendo que la temperatura del interior de la habitación aumentara. Otro sistema que se utilizaba para calentar espacios eran los braseros. Estos sistemas utilizaban la quema de combustibles vegetales como el carbón, aprovechando el calor desprendido de esta combustión.

Con el paso de los años, apareció la estufa. Este sistema cuenta con el hogar cerrado de manera que garantizan seguridad a los usuarios y un control de la potencia proporcionada en cada instante debido al control del aire de combustión. Es un sistema que permite calentar únicamente el lugar en el que está ubicado. Este mecanismo funcionaba con diferentes combustibles como el gas, los pellets o la electricidad. Debido a que encierran los humos de combustión, por lo general son equipos más eficientes que los sistemas de hogares abiertos.

Como se ha comentado, los sistemas anteriores servían para calentar locales individuales. En busca de encontrar un sistema que permitiera calentar diferentes locales, apareció la calefacción central como consecuencia de comenzar a trabajar con vapor después de la revolución industrial. Se empezaron a usar calderas que quemaban combustibles orgánicos que calentaban fluidos caloportadores, vapor principalmente, que trasladaban dicho calor a otras habitaciones. Para el aprovechamiento de dicho calor en forma de calefacción, eran necesarios conductos que permitieran el traslado de éste y unos radiadores que eran los encargados de ceder dicho calor al local. El vapor fue dando paso a los sistemas de agua caliente y los

Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.

combustibles orgánicos fueron evolucionando desde el carbón al gas natural, pasando por fuel-oil.

Por otra parte, con el objetivo de generar ACS, existen diferentes métodos que a continuación se detallan:

- **Por acumulación:** estos sistemas cuentan con un tanque aislado que almacena agua caliente, calentada por una caldera exterior o mediante energía solar, y que permite suplir la demanda cuando sea necesario. Dependiendo el tamaño del depósito, puede ser destinado a varios usuarios o a viviendas unifamiliares. En este último caso, el agua puede calentarse mediante la utilización de resistencias eléctricas, aunque esta opción sea poco eficiente. El agua puede calentarse a diferentes temperaturas siendo mayor el calor acumulado cuanto mayor sea la temperatura.
- **Calentamiento instantáneo:** en este caso no se acumula si no que se calienta directamente el agua en el momento necesario. El fluido pasa a través de un intercambiador donde se calienta. Este sistema únicamente puede dar servicio a un punto de consumo y hace que sea mucho menos eficiente que el sistema anterior.

Visto los diferentes sistemas que se tienen para generación de agua caliente sanitaria y calefacción se observa que es necesaria la existencia de un equipo de combustión o captador de calor que caliente ese agua.

A continuación, se presentan los diferentes métodos que existen para la generación del calor. El sistema más utilizado para la producción de agua caliente sanitaria y calefacción son las calderas, pero a parte de ellas, también existe la posibilidad de la utilización de energías renovables o el consumo de electricidad aplicado a una bomba de calor para satisfacer la demanda existente en cada momento. Juntando ambos sistemas generadores se tienen los sistemas híbridos.

5.1 Calderas

Atendiendo a las calderas, se tiene un equipo que ha sufrido grandes avances a lo largo de la historia. Estos equipos utilizan combustible para generar cierto calor en el hogar por donde circula el agua que tiene por objetivo calentarse para suplir la demanda existente. Se tienen diferentes tipos:

- **Calderas Estándar:** estos equipos no soportan efectos de condensación de humos. Si esto ocurriera, la caldera se deteriora y dejaría de funcionar. Utilizan temperaturas de retorno (entrada a la caldera) del agua de 55 °C.

Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.

- **Calderas de condensación:** este tipo están diseñadas para que se soporten las condensaciones de los humos y cuentan con un diseño que permite la evacuación de los condensados. Interesa mucho que los humos condensen ya que así, se aprovecha el calor latente que desprende el vapor al pasar a líquido. Son equipos que trabajan con temperaturas de retorno de 35-40 °C [6].

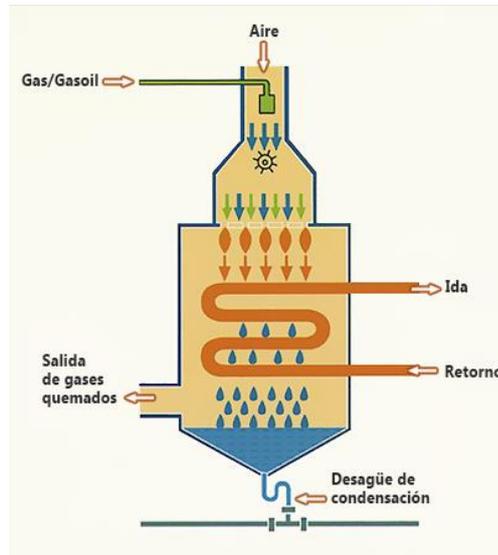


Imagen 2: Caldera de condensación.

- **Calderas de biomasa:** estos equipos queman combustibles orgánicos existentes en la naturaleza como pueden ser astillas, pellets o huesos de aceituna. Son equipos que pueden sustituir a las calderas convencionales de gas natural y fuel oil. La temperatura de retorno en estos equipos no suele ser menor que 50-55 °C [7].



Imagen 3: Caldera de biomasa doméstica.

5.2 Tecnologías de cogeneración

A parte de estos equipos típicos en viviendas, en la década de los 80 se empezaron a diseñar plantas de cogeneración. Este término, engloba a la obtención de un doble efecto generalmente calor y electricidad. El modo de operación de estas plantas consiste en quemar un combustible en un motor o en una turbina de gas y aprovechar los humos de combustión calientes como efecto útil. El hecho de que el efecto sea doble hace que esta tecnología se encuentre catalogada como energía de alta eficiencia.

De cara al uso de la cogeneración, existe un término clasificatorio de micro-cogeneración para toda instalación con una producción eléctrica menor a 50 kWe que atiende a edificios residenciales y pequeña industria. Es evidente que interesa que extienda su uso en el sector residencial ya que las emisiones de GEI serían menores que las necesarias para obtener calor y electricidad por separado [8].

Dentro de las tecnologías que pueden implantarse en las instalaciones de cogeneración se encuentran las siguientes:

- **Motores de combustión interna alternativos:** estos equipos funcionan mediante la combustión en su interior de un combustible que genera mediante la unión de dicho motor a un generador energía eléctrica. A su vez, los gases de combustión se encuentran a una temperatura elevada que permite el aprovechamiento de dicho calor para calentar, por ejemplo, agua para uso residencial. Son los equipos más avanzados y comercializados en la actualidad [9].

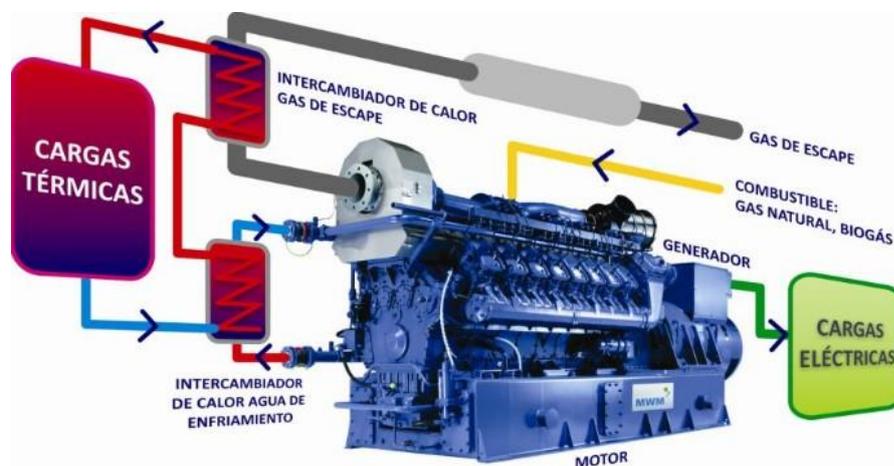


Imagen 4: Motor de combustión interna alternativo.

Motores de Combustión Externa: dentro de estos se encuentra catalogado el motor Stirling. Precisamente este modelo tiene aspecto de una caldera convencional, pero varía el fluido interior. Esta tecnología trabaja con helio que es calentado de forma que se dilata y se contrae de manera que genera el movimiento de un pistón y, con esto y la acción de un imán, generan electricidad. Esta electricidad es utilizada para el autoconsumo. Los humos de la combustión pasan a través de un intercambiador donde ceden calor al agua que se calienta para su uso a posteriori. Es la opción más reducida de micro-cogeneración y se tienen potencias de 1 kW eléctrico y 6 kW térmicos [10].



Imagen 5: Motor de combustión externa.

- **Micro-turbinas:** estos equipos utilizan la energía química del combustible para generar electricidad y del mismo modo que los motores, aprovechar su alta temperatura para otra utilización. Se utilizan en diferentes ámbitos públicos como hospitales o polideportivos.

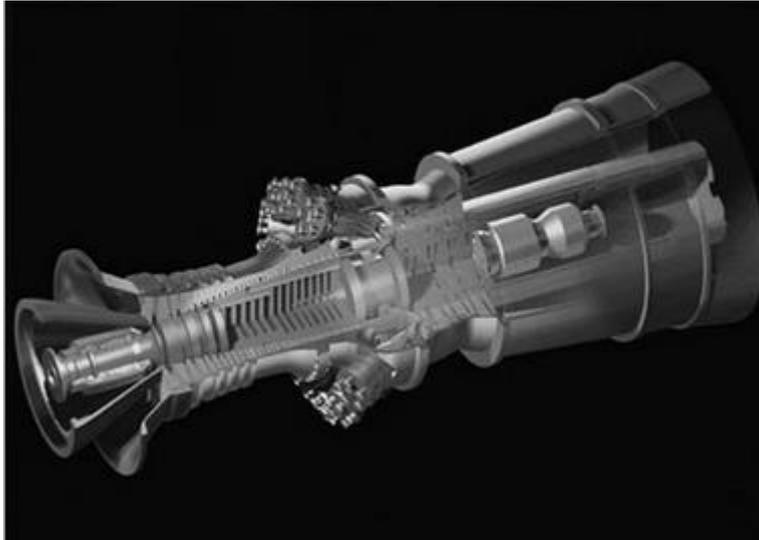


Imagen 6: Microturbina de gas.

- **Pilas de combustible:** utilizan la electrólisis inversa y obtienen a partir del gas natural energía térmica y eléctrica producto de reacciones químicas. En este tipo de tecnología, si el combustible fuese hidrógeno, no se tendrían emisiones. Los costes de inversión para esta tecnología son elevados.

Descritas las diferentes formas de generar calor mediante la combustión de un combustible fósil y la aplicación de esta quema a la generación de calor y electricidad mediante la cogeneración, se pueden explicar diferentes técnicas renovables que permiten obtener calor de manera limpia.

5.3 Energía solar térmica

La energía solar térmica se encarga de captar la energía proveniente del sol para calentar un fluido para su posterior uso de ACS o calefacción en cuanto a su uso en el sector doméstico. En este ámbito, la tecnología utilizada para ello se conoce como colectores de baja temperatura.

Estos colectores son capaces de captar la energía del sol y calentar el fluido de su interior hasta una temperatura de 65 °C. Estas temperaturas permiten el uso del agua caliente para aplicaciones como calentamiento de piscinas o calentamiento de agua doméstica, por ejemplo.

Las instalaciones correspondientes a solar térmica de baja temperatura cuentan con colectores formados por una capa de vidrio que permite el paso de la radiación del sol. Esta radiación calienta unos tubos metálicos a través de los cuales circula agua y esta es calentada hasta las temperaturas anteriormente comentadas. Los tubos son de color oscuro para permitir un mayor calentamiento. Toda la instalación va cerrada en una carcasa que permite la protección frente a ambientes corrosivos.

Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.

Estos colectores se colocan en la cubierta de la vivienda con una inclinación y una orientación que permita una mayor captación de energía solar. Estos equipos pueden funcionar gracias al fenómeno conocido como termosifón o de manera forzada. El primer tipo es debido a la diferencia de densidades de manera que el fluido entra al colector frío y a medida que se calienta asciende y sale del colector caliente. Si por el contrario funciona de manera forzada, es debido a que una bomba impulsa el fluido a través del colector [11].



Imagen 7: Colector solar.

5.4 Bomba de calor

La tecnología conocida como bomba de calor funciona como una máquina frigorífica, pero se cambia el objetivo. Si en una máquina frigorífica lo que se busca es enfriar un local, en este caso se busca calentarlo.

El principio de funcionamiento consiste en tomar calor de un espacio frío y, mediante el aporte de energía exterior al compresor, este calor es trasladado al local que se quiere calefactar. Son máquinas atractivas debido a que el efecto útil que se consigue es mayor que el aporte de energía necesario.

Dentro de esta tecnología existen diferentes tipos como los que siguen:

- **Aire-Aire:** este tipo de bombas roban calor al aire exterior y se lo cede al fluido encargado de calentar el local objeto. Son las más extendidas en el mercado debido a la sencillez de operación [12].

Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.



Imagen 8: Bomba de calor aire-aire.

- **Aire-Agua:** este tipo de bomba de calor toman el calor del aire exterior y lo ceden a una circulación de agua destinada a calefacción. Debido a las temperaturas que se alcanzan suelen ser útiles para sistemas de suelo radiante [13].



Imagen 9: Bomba de calor aire-agua.

- **Agua-Aire:** en este caso, el calor es tomado de un caudal de agua exterior y es transmitido al aire del local que se quiere calentar.
- **Agua-Agua:** toma calor de una corriente de agua y este es cedido a la corriente de agua de calefacción.

Estas últimas tienen un coeficiente de operación mayor que las correspondientes al aire debido a que la temperatura del agua del cual se toma el calor suele ser más estable que la temperatura del aire.

Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.

En caso de que el calor sea tomado del terreno, el cual a partir de cierta profundidad tiene una temperatura más o menos constante, estas bombas de calor son denominadas geotérmicas. Este calor puede ser cedido a agua destinada a calefacción o aire para calentar un local[14].



Imagen 10: Bomba geotérmica.

5.5 Almacenamiento

El almacenamiento térmico se conoce como la utilización de un tanque aislado que permite acumular calor para utilizarlo cuando se tenga una temperatura elevada en el depósito que permita aprovecharlo.

La implementación de este tipo de equipos en sistemas híbridos permite dar soporte a la fuente de mayor eficiencia y hacer que opere menos tiempo la fuente de energía convencional. En caso de tener una demanda mayor que la que puede suplir la fuente de energía no convencional, el tanque puede tener una cantidad de calor almacenado aprovechable para rellenar la falta de energía necesaria en ese instante.

5.6 Sistemas híbridos

Con las diferentes tecnologías de generación para el sector doméstico definidas, se pueden presentar los sistemas híbridos. Estos sistemas combinan una tecnología convencional como pueden ser las calderas anteriormente explicadas y una fuente renovable de energía o de alta eficiencia.

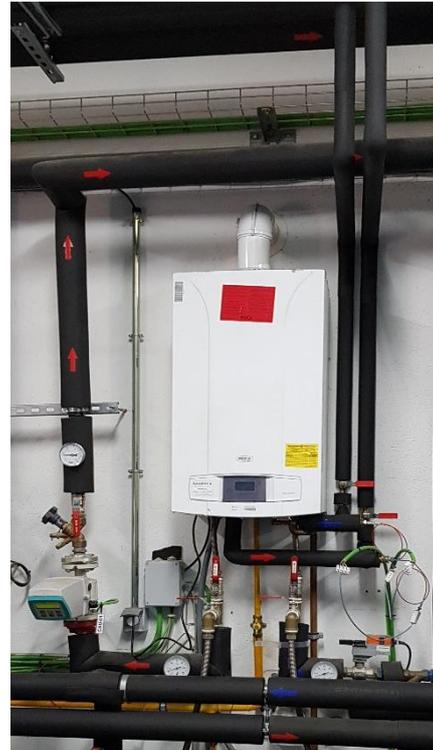
El objetivo de estas instalaciones es dar respuesta a la demanda con el motor de cogeneración o las energías renovables la mayor parte del tiempo posible. En los momentos de gran demanda, el sistema estará configurado de manera que entre en funcionamiento la caldera convencional. Así se garantiza que en todo momento estará cubierta la demanda y se minimiza el uso de la caldera.

Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.

Además, estos sistemas híbridos pueden ir acompañados de un tanque de almacenamiento térmico que permita suplir a los equipos generadores de calor cuando en su interior tenga suficiente calor acumulado. En la imagen 11 se muestra la instalación de un motor de cogeneración Stirling y una caldera de condensación.



(a)



(b)

Imagen 11: (a) Motor Stirling. (b) Caldera de condensación.

5.7 Técnicas de calibración

La calibración de modelos informáticos tiene por objetivo el ajuste de simulaciones al comportamiento real de una instalación. Para ello se cuenta con diferentes técnicas como las que se detallan a continuación:

- **Manuales:** esta técnica es realizada mediante prueba y error. Para ello, se varía el valor de ciertos parámetros de la simulación en de manera que éste ajuste cuanto mejor al funcionamiento de la instalación real. Estos métodos, pueden ser útiles siempre y cuando el modelo tenga un número reducido de variables importantes ya que, a medida que aumentan estas, hacen que el proceso sea muy poco práctico. Para llevarlo a cabo se necesita tener mucha experiencia.

- **Método probabilístico bayesiano:** este método usa la estadística bayesiana y necesita que se formulen distribuciones previas de los parámetros desconocidos para llegar a estimaciones de distribuciones y no de un único valor. Por otra parte, utiliza un emulador Gaussiano que hace menor el tiempo de computación requerido para modelos complicados. Utilizan datos reales para llegar a obtener un conjunto de valores de los parámetros de calibración que permitan tener un modelo más fiable.
- **Método determinista:** es un método de calibración automática. Para ello se realizan simulaciones consecutivas variando parámetros de calibración en cada iteración con la intención de disminuir el coste de la función objetivo. Se denomina así al coste computacional que tiene la simulación. Consiste en la comparación de los resultados reales y los que se van obteniendo en las simulaciones consecutivas.

5.8 Técnicas de optimización

A lo largo de la historia se han ido desarrollando diferentes técnicas de optimización aplicables a modelos informáticos. Dentro de los diferentes métodos existentes se pueden distinguir dos grupos: los métodos clásicos y los heurísticos. Los primeros son los más teóricos que son explicados en los libros de optimización mientras los segundos son los asociados a la inteligencia artificial [15].

Si se centra la atención en los métodos heurísticos se puede decir que son apropiados para problemas de gran tamaño o para problemas no lineales. Esta aplicación se debe a la flexibilidad que presentan a la hora de trabajar, pudiendo tratar situaciones no lineales y pudiendo aplicarlos en problemas complejos. Por otra parte, estos métodos también presentan desventajas. Para empezar, sus soluciones se aproximan a óptimos locales mientras otros métodos, como pueden ser los métodos de programación lineal de enteros mixtos, se aproximan a soluciones óptimas globales. Esto es debido a que los métodos heurísticos pueden quedar encerrados en una región de soluciones y lleguen al óptimo de este conjunto. Por otro lado, los métodos heurísticos no realizan cálculos concisos y son dependientes de las particularidades de cada problema.

A continuación, se explica el modo de funcionamiento de los principales métodos de optimización: los algoritmos genéticos y los métodos de programación lineal de enteros mixtos.

- **Algoritmos genéticos:** Estos algoritmos se han utilizado en diferentes problemas de optimización de equipos de cogeneración [16, 17]. La aplicación de los algoritmos genéticos empieza con la codificación de las variables del problema como cromosomas

representados por dígitos binarios y una selección aleatoria de la población inicial. En cada iteración, se evalúa lo apta que es la población y sólo sobreviven los más cualificados para reproducirse. Se obtiene una nueva generación mediante operadores genéticos como son la selección, el cruce y la mutación. Las iteraciones continúan hasta que se dé un criterio de parada que suele ser un máximo de iteraciones o una condición de convergencia.

- **Métodos de programación lineal de enteros mixtos (MILP):** este método de optimización presenta una mayor complejidad en cuanto a su formulación se refiere. Comparado con los anteriores, aportan una solución cercana al óptimo global, permiten optimizar la estructura del problema y el procedimiento de cálculo que siguen es independiente a lo particular del problema. Su uso se ha potenciado en los últimos años y se basan en fundamentos matemáticos empleando códigos eficientes que permiten tratar variables continuas y binarias. Se utilizan para la optimización de la operación el diseño y síntesis de sistemas de cogeneración y trigeneración [18, 19]. Esto es debido a la capacidad de resolver problemas de gran tamaño y con gran cantidad de variables.

6 ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS

Una vez se ha visto la evolución de las tecnologías, se procede a analizar las alternativas existentes para el desarrollo del proyecto. Dentro de éste, existen tres partes en las cuales pueden existir diferentes alternativas. Si bien en la fase experimental es evidente que se va a hacer uso de la instalación existente, en las fases correspondientes a la simulación, calibración y optimización se pueden elegir diferentes softwares. A continuación, se presentan dos softwares existentes para cada procedimiento.

6.1.1 Simulación

Dentro de la fase de simulación se necesita un software que permita simular situaciones transitorias. Para ello se estudian dos posibilidades existentes en el mercado y que son Trnsys [20] y ANSYS [21].

6.1.2 Trnsys

Este programa informático permite realizar simulaciones de sistemas energéticos durante grandes espacios de tiempo permitiendo estudiar así el comportamiento de la instalación.

Para ello, este programa cuenta con bibliotecas que simulan equipos energéticos y que permite al usuario ajustar ciertos parámetros de manera que se ajuste el comportamiento de la simulación al de la instalación. Es un software que se utiliza en diferentes aplicaciones que van desde simulación energética de edificios hasta la calibración de sistemas.

6.1.3 ANSYS

Este programa se utiliza con la intención de predecir cómo funcionará un producto en un entorno real. Cuenta con diferentes módulos que permiten simular diferentes situaciones como por ejemplo transferencia de calor o análisis estructural.

Cuenta con tres módulos los cuales son el pre-proceso, proceso y post-proceso. En el primero de ellos se establece el modelo y se construye la composición del problema. En el proceso se introducen las cargas a las cuales está sometido el problema y se obtienen resultados para obtener posteriormente los resultados de manera gráfica.

Cuentan con el problema de que los resultados que se obtienen son aproximaciones que dependen del número de elementos utilizados. El hecho de que ciertos elementos deban ser introducidos por el usuario hace que se cometan errores de tipo humano.

6.2 Calibración

Como se ha observado en el análisis del estado del arte, en los procesos de calibración se cuenta con tres tipos: manuales, método probabilístico bayesiano y el método determinista.

La principal diferencia entre ellos está en la facilidad de aplicación. Como se sabe, el hecho de intentar calibrar un sistema de muchas variables de manera manual hace necesaria la experiencia del usuario para que el proceso no dure en exceso. Por otro lado, el método bayesiano necesita un proceso laborioso y para el cual es necesaria la experiencia del usuario; además, el tiempo de computación necesario es elevado.

Por último, el método determinista permite realizar simulaciones consecutivas de bajo tiempo de computación. Este método puede trabajar con programas de simulación en paralelo de manera que realiza variaciones de los parámetros con el objetivo de minimizar el coste de operación de la simulación con el único inconveniente de que minimiza este coste sin tener en cuenta el significado físico de estos parámetros.

6.3 Optimización

Dentro de las opciones para optimizar simulaciones que existen se encuentran los algoritmos genéticos y los MILP.

Entre estos métodos, la diferencia existe en la complejidad donde los MILP son los complejos. En cuanto a la solución aportada, si bien los algoritmos genéticos aportan una solución óptima local, los MILP se acercan al óptimo global del problema.

En la actualidad, se utilizan ambos métodos para las optimizaciones de instalaciones de cogeneración.

7 DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN PROPUESTA

Una vez se han expuesto las alternativas existentes se presenta la solución propuesta que ha sido desarrollada en este proyecto.

En este trabajo se presenta una instalación híbrida formada por una caldera con tecnología Stirling que permite generar 5 kW térmicos y un 1 kW eléctrico, acompañada por una caldera de condensación de 24 kW térmicos. Esta instalación está enfocada a la generación de ACS y calefacción para una vivienda unifamiliar. Además, todo el sistema de generación está acompañado de un tanque de almacenamiento térmico que permite ayudar al motor Stirling a generar el calor necesario para suplir la demanda haciendo que la caldera opere menos tiempo.

Con el objetivo de simular dicha instalación, se desarrolla un modelo informático en la herramienta de simulación Trnsys. Se ha elegido este software debido a su facilidad para complementarse con herramientas de calibración que permitan ajustar la simulación a la instalación desarrollada. Además, Trnsys es un software que permite la simulación correcta de instalaciones térmicas como la ensayada y de manera más sencilla que ANSYS.

Para la calibración del modelo informático se utiliza la herramienta Genopt [22] que permite realizar ajustes bajo la utilización de un método determinista. Este software varía los parámetros críticos obtenidos de un análisis de sensibilidad realizado a la simulación, de manera que se reduce el coste de operación de la función de coste definida por el usuario. Se ha decidido utilizar un método determinista por el hecho que Genopt puede trabajar en paralelo con Trnsys realizando simulaciones consecutivas cada vez que se varían los valores de los parámetros.

Por último, de cara a la optimización de las variables de la lógica de control se utiliza un algoritmo genético. Para este procedimiento se utiliza la herramienta JEPlus+EA [23] que permite optimizar el modelo buscando las poblaciones que sobrevivan a las iteraciones ya que estas serán las mejores soluciones.

II. METODOLOGÍA SEGUIDA EN EL DESARROLLO DEL TRABAJO

1 DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS Y PROCEDIMIENTOS

La instalación que se va a ensayar, calibrar y optimizar está ubicada en el LCCE que el Gobierno Vasco tiene en Vitoria-Gasteiz. Ahí se cuenta con una instalación de para ensayar equipos de generación de energía térmica y eléctrica que se instalarán en las viviendas en un futuro. Permite la prueba de diferentes equipos y combinaciones de estos para generar energía y comparar unas tecnologías con otras.

1.1 Descripción de la instalación

La instalación del LCCE que se ha ensayado cuenta con varios equipos que se pueden repartir en seis módulos: producción, almacenamiento térmico, almacenamiento eléctrico, distribución, consumo y control de la instalación.

El módulo de producción cuenta con dos equipos que trabajan complementarios. Por una parte, se tiene un equipo de cogeneración con tecnología Stirling. El motor es una unidad eVita de Remeha que consiste en un motor monocilíndrico con la capacidad de dar 1 kWe y 5 kWt. El motor cuenta con Helio como fluido de trabajo y su temperatura de funcionamiento nominal es de 85 °C. Este Stirling, cuenta en su interior con una caldera auxiliar capaz de dar 20 kW en caso de demandas elevadas. No obstante, esta caldera no se utiliza en este ensayo ya que, en caso de exceso de demanda térmica, será la caldera de condensación de la instalación la encargada de entrar en funcionamiento. En caso de existir demanda térmica, el motor se enciende y comienza a quemar gas natural para obtener calor y electricidad.



Imagen 12: Motor Stirling Remeha eVita.

Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.

Por otra parte, se tiene la ya mencionada caldera de condensación. Este tipo de calderas operan mediante la combustión de gas natural o gas propano y funcionan con temperaturas de retorno del agua a la caldera menores de 40 °C y temperaturas de impulsión de 50 - 55 °C. Esta caldera cuenta con una potencia de 24 kW térmicos y la tecnología de condensación permite la obtención de rendimientos elevados debido al aprovechamiento del calor latente de los humos al condensar.



Imagen 13: Caldera de condensación Baxi-Roca.

El módulo de consumo cuenta con los equipos típicos para el consumo de energía térmica que se utilizan en una vivienda. Así, para la simulación de ACS se cuenta con un intercambiador de calor de placas, el cual es el responsable de calentar el agua y llevarla a temperatura de consumo. Para regular el caudal correspondiente a las demandas de ACS se cuenta con una válvula automática y un controlador PID el cual proporciona el caudal necesario en cada demanda.

Para la simulación de calefacción, en cambio, se tiene un equipo disipativo. Este equipo es un fan-coil de la marca Sedical-Rhoss del modelo Yardhi HP que cuenta con una potencia disipativa máxima de 24.9 kW con agua de alimentación a 50 °C y que asciende a 42.8 kW si esta agua llega a 70 °C. Cabe destacar que tiene posibilidad de trabajar a tres velocidades.



Imagen 14: Fan-Coil Sedical Ross.

Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.

En cuanto al módulo de almacenamiento, se cuenta con un tanque inercial de la marca Vaillant VPS R 200/1 B con una capacidad de 202 L. Este tanque se conecta al circuito después del módulo de consumo de manera que almacena calor, y da apoyo a la generación cuando la temperatura es mayor a un valor programado.



Imagen 15: Tanque de almacenamiento térmico Vaillant.

El módulo de control cuenta con un control SCADA que recibe más de 120 señales de control y el registro de datos de temperaturas y caudales se realiza cada diez segundos en el ensayo, de manera que se cuenta con una gran cantidad de datos que permiten conocer el funcionamiento de la instalación.

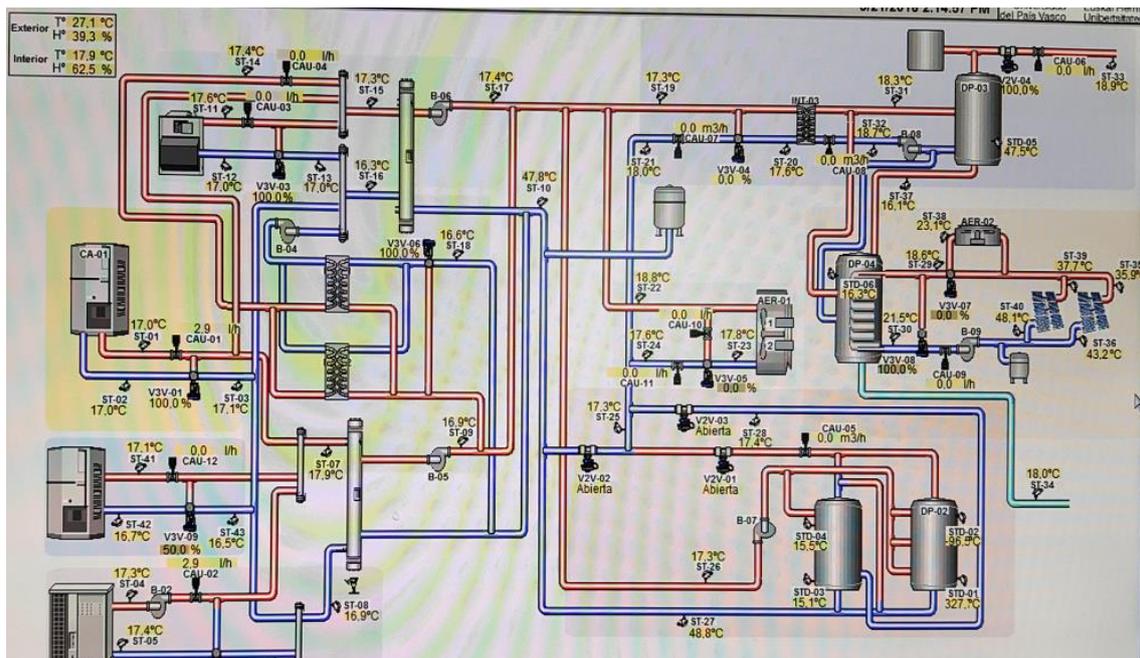


Imagen 16: Control SCADA de la instalación.

Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.

De cara al almacenamiento eléctrico, se tienen unas baterías de la marca Zigor con 12 V y 134 Ah.

Tabla 1: Resumen equipos instalación.

Módulo	Equipo	Marca	Modelo	Potencia	Características
Generación Alta Temperatura	Caldera de Condensación	BaxiRoca	BIOS 24/28 F	24 kW	Eficiencia 97%
	Motor Stirling	Remeha	Evita	5 kWt 1 kWe	Caldera de 20 kWt auxiliar no utilizada
Distribución	Bomba hidráulica	Grundfos	UPS 40 – 180 F	**	**
Almacenamiento térmico	Tanque inercial	Vaillant	VPS R 200/1 B	**	202 litros
Consumo	Intercambiador de placas	Sedical	UPFB-40/40 HB-PN25	70 kW	**
	Fan coil	Sedical-Rhoss	Yardi HP 5R 250	24,9 kW - 50°C 42,8 kW - 70 °C	**
Almacenamiento eléctrico	Baterías	Zigor	12LDA134	**	12 V 134 Ah

En definitiva, el esquema de la instalación, asociado al ensayo que se ha realizado, se representa en la siguiente imagen. En el ANEXO III se puede observar el esquema de la instalación global.

Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.

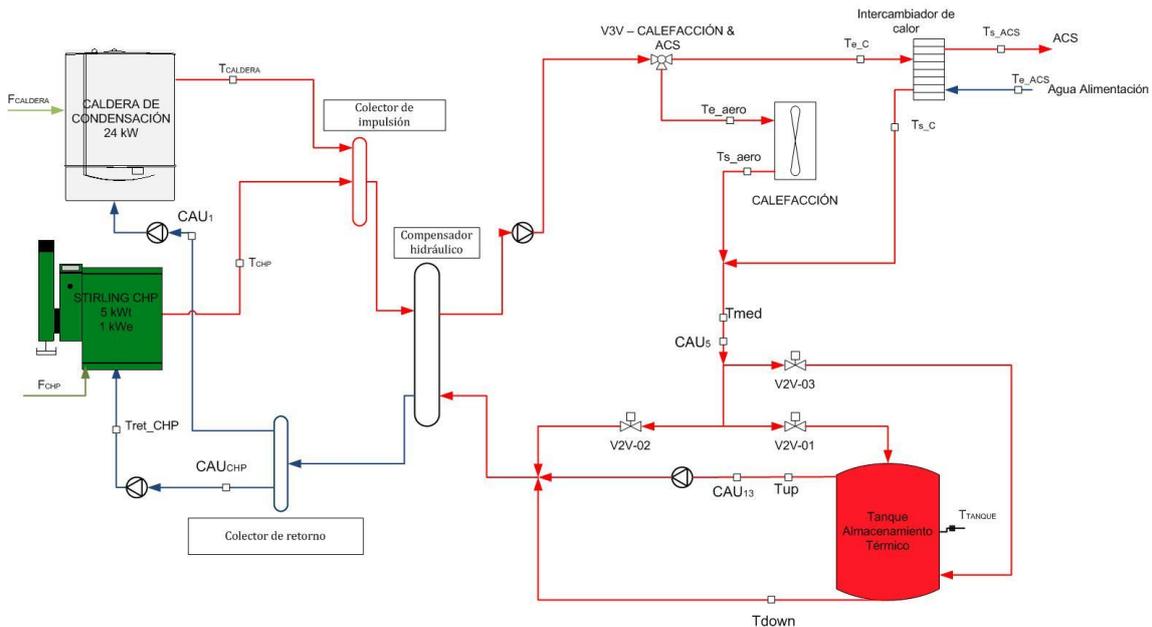


Imagen 17: Esquema resumen de la instalación ensayada.

Donde:

- $F_{CALDERA}$ es el consumo de gas natural en la caldera.
- F_{CHP} es el consumo de gas natural en el motor Stirling.
- $T_{CALDERA}$ es la temperatura de salida del agua de la caldera.
- T_{CHP} es la temperatura de salida del motor Stirling.
- T_{ret_CHP} es la temperatura de retorno al motor Stirling.
- T_{e_aero} y T_{s_aero} son las temperaturas de entrada y salida del agua en el aerotermo, respectivamente.
- T_{e_ACS} y T_{s_ACS} son las temperaturas del agua de alimentación y el agua de consumo de ACS, respectivamente.
- T_{e_C} y T_{s_C} son las temperaturas del agua entrante y saliente al intercambiador de ACS procedentes del módulo de producción.
- T_{MED} es la temperatura media de la mezcla del agua procedente del intercambiador de calor de ACS y del agua del aerotermo.
- T_{TANQUE} es la temperatura del depósito.
- $V2V$ y $V3V$ son las iniciales de las válvulas de dos vías y tres vías existentes en la instalación.
- CAU_{CHP} es el caudal de agua en el motor Stirling.
- CAU_1 caudal de agua entrante a la caldera.
- CAU_5 caudal de agua entrante al volumen de control de almacenamiento.
- CAU_{13} caudal del agua saliente de almacenamiento en descarga.

Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.

- T_{UP} es la temperatura de la corriente saliente del tanque de almacenamiento térmico superior.
- T_{DOWN} es la temperatura de la corriente saliente del tanque de almacenamiento térmico inferior.

En ella se puede observar que las partes de control SCADA que no se utilizan para este ensayo han sido eliminadas de tal manera que se puedan ver de forma más clara los equipos utilizados.

Se pueden observar los dos equipos de combustión en el módulo de producción. Después, los fluidos salientes de estos equipos se juntan en el compensador hidráulico y de ahí se manda el agua caliente mediante una bomba de alimentación a la zona de consumo, es decir, para suplir la calefacción y agua caliente demandada. La válvula de 3 vías existente es la encargada en permitir el paso del agua al intercambiador de ACS o al aerotermo que simula la demanda de calefacción dependiendo la demanda existente.

El agua que atraviesa el aerotermo y la procedente del intercambiador de calor de ACS se juntan antes del tanque de almacenamiento y dependiendo de la temperatura de esta corriente, se iniciará un proceso de carga o descarga del depósito. Las válvulas V2V-01 y V2V-02 están conmutadas y cuando una abre la otra cierra y viceversa. Así, si la temperatura T_{MED} es suficiente para cargar el depósito, la V2V-01 se abre, si no, el agua es devuelta al compensador hidráulico.

Por último, si la temperatura del depósito es suficiente como para ayudar al motor Stirling a suplir la demanda, la V2V-03 se abre y se activa la bomba que permite la descarga del calor almacenado en el depósito.

1.2 Lógica de funcionamiento de la instalación

La instalación sigue una lógica determinada según empieza el funcionamiento de la misma. Para el ensayo de la instalación se definen varios modos de funcionamiento, los cuales se nombran a continuación:

- **Modo 0:** Todo apagado
- **Modo 1:** Motor Stirling + Bomba de impulsión + Demanda de calefacción
- **Modo 2:** Motor Stirling + Bomba de impulsión + Demanda de ACS
- **Modo 3:** Motor Stirling + Bomba de impulsión + Demanda de calefacción + Demanda de ACS
- **Modo 4:** Motor Stirling + Bomba de impulsión + Carga + Demanda de Calefacción
- **Modo 5:** Motor Stirling + Bomba de impulsión + Carga + Demanda de ACS

Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.

- **Modo 6:** Motor Stirling + Bomba de impulsión + Carga + Demanda de Calefacción + Demanda de ACS
- **Modo 7:** Motor Stirling + Caldera + Bomba de impulsión + Demanda de Calefacción
- **Modo 8:** Motor Stirling + Caldera + Bomba de impulsión + Demanda de ACS
- **Modo 9:** Motor Stirling + Caldera + Bomba de impulsión + Demanda de Calefacción + Demanda de ACS
- **Modo 10:** Motor Stirling + Bomba de impulsión + Descarga + Demanda de Calefacción
- **Modo 11:** Motor Stirling + Bomba de impulsión + Descarga + Demanda de ACS
- **Modo 12:** Motor Stirling + Bomba de impulsión + Descarga + Demanda de Calefacción + Demanda de ACS
- **Modo 13:** Motor Stirling + Bomba de impulsión + Carga

Partiendo de la situación en la cual todos los equipos están parados, la instalación comenzará a funcionar en caso de que T_{TANQUE} sea menor que $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ y lo hará con el arranque del motor Stirling. Una vez que éste alcance una temperatura, la bomba de impulsión arrancará también e inmediatamente, la válvula que permite la carga del depósito se abrirá.

En caso de detectar demanda de calefacción, el aerotermo encargado de simular la demanda de calefacción arrancará y una válvula se abrirá permitiendo el paso del agua hacia el equipo disipativo. A su vez, puede existir demanda de ACS y que el sistema tenga que repartir el agua hacia el intercambiador de ACS y el aerotermo. En ese caso, otra válvula que detecte demanda de ACS se abrirá permitiendo el paso del agua hacia el intercambiador. En dicho intercambiador, se produce el calentamiento del agua que será enviada a consumo. El agua dirigida al intercambiador y al aerotermo se juntan posteriormente.

El agua procedente del aerotermo, intercambiador o de ambos, tendrá una temperatura que se comparará con T_{TANQUE} . Si esta temperatura difiere de la del depósito en dos o más grados, una válvula se abrirá permitiendo la carga del depósito. Además, si durante ese modo de funcionamiento, el sistema detecta que la T_{TANQUE} es mayor que $46\text{ }^{\circ}\text{C}$, el control manda una señal de encendido a la bomba hidráulica de descarga y empieza a utilizar el calor almacenado en el depósito devolviendo el agua mediante esa bomba al compensador hidráulico. Este compensador hidráulico es el encargado de juntar el agua que viene del motor Stirling y de la caldera de condensación y alimentar a la bomba de impulsión.

Si, por el contrario, el agua procedente de la zona de consumo es menor que la temperatura del depósito, la válvula que carga el depósito se mantiene cerrada y se abre otra válvula que envía

Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.

el agua al compensador hidráulico directamente. Estas válvulas están conmutadas de manera que si una se abre la otra se cierra y viceversa.

En cuanto al conjunto de producción formado por la caldera y Stirling, este funciona en función de T_{ret_CHP} . En caso de que dicha temperatura sea menor que 40 °C, el sistema manda una orden de encendido a la caldera de condensación y se mantiene encendida hasta que la temperatura de retorno es mayor que 42 °C.

Existe un control interno del motor Stirling que en el caso que la temperatura de retorno del Stirling sea elevada, este deja de consumir gas. Esta temperatura está fijada en 57 °C. En ese momento, el Stirling tiene un calor residual que tiene que eliminar. A medida que va disminuyendo la temperatura interior del motor, éste sigue la secuencia correspondiente a dejar de producir electricidad primero para, finalmente, dejar de circular caudal de agua por su interior. En caso de detectar la falta de caudal de agua en el Stirling (CAU_{CHP}), la instalación se apaga completamente.

A continuación, se puede observar la lógica de funcionamiento descrita de manera esquemática. En ella se muestran las variables previamente nombradas que ordenan el cambio de modo de funcionamiento.

Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.

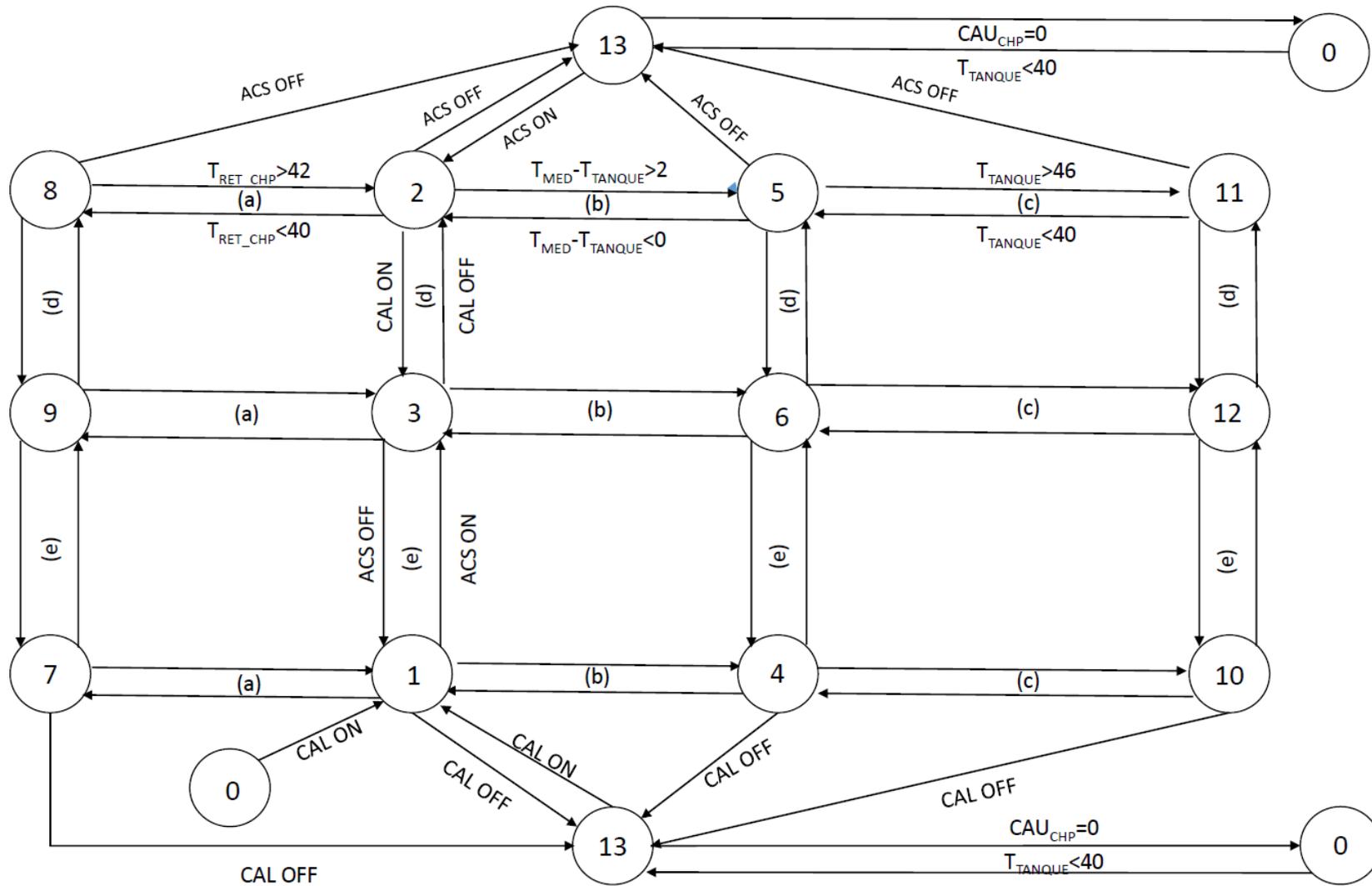


Imagen 18: Lógica de control de la instalación.

1.3 Ensayos

La instalación que se va a ensayar pretende dar servicio a una casa unifamiliar de dos plantas que está cercana a Vitoria-Gasteiz. La clasificación de la capital vasca según su zona climática es D1, según la clasificación del Código Técnico de la Edificación (CTE)[24] la cual se caracteriza por tener veranos calurosos e inviernos fríos.

De cara a la realización del ensayo experimental el control de la instalación tiene que leer la demanda existente en cada momento y se deben configurar las variables que permiten el cambio de modo de funcionamiento. Para ello, el SCADA de la instalación cuenta con la siguiente pantalla que permite la configuración de dichas condiciones. Dicha pantalla se puede observar en la imagen 19.

Nombre Ensayo			Manual	Temporizado	Automatico									
stirling+CA01+acum.200l+aer01+			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>									
Transicion	Nº estado	Modo de funcionamiento	Modo a operar	Instante de inic	M prev.	Sensor 1	Sensor 2	Dif.	V. min	V. max	Tiempo min de lec	Tiempo min de lec Cont.	Tiempo min de op	Tiempo min de op Cont.
0	0	Ninguna isla activa	<input type="checkbox"/>	0	1	CAU-12 CA	VACÍO	397,86	+0,00	+0,00	30	0	0	0
1	13	stiri+B05+carga	<input type="checkbox"/>	0	0	STD-08 TEM	VACÍO	42,42	+0,00	+40,00	30	0	0	0
2	0	Ninguna isla activa	<input type="checkbox"/>	0	13	CAU-12 CA	VACÍO	397,86	+0,00	+0,00	30	0	0	0
3	1	stirling+ B05+ AER-01	<input type="checkbox"/>	0	13	DEMANDA	VACÍO	3,89	+0,10	+100,00	0	0	0	0
4	13	stiri+B05+carga	<input type="checkbox"/>	0	1	DEMANDA	VACÍO	3,89	+0,00	+0,00	0	0	0	0
5	1	stirling+ B05+ AER-01	<input type="checkbox"/>	0	0	DEMANDA	VACÍO	3,89	+0,10	+100,00	0	0	0	0
6	4	Stiri+B05+carga+AER01	<input type="checkbox"/>	0	1	ST-25 TEM	STD-08 TE	0,58	+2,00	-100,00	30	0	0	0
7	1	stirling+ B05+ AER-01	<input type="checkbox"/>	0	4	ST-25 TEM	STD-08 TE	0,58	-100,00	+0,00	30	0	0	6430
8	3	stirling+ B-05+ AER-01+ ACS	<input type="checkbox"/>	0	1	DEMANDA	VACÍO	0,00	+1,00	+1000,00	0	0	0	0
9	1	stirling+ B05+ AER-01	<input type="checkbox"/>	0	3	DEMANDA	VACÍO	0,00	+0,00	+1,00	0	0	0	0
10	13	stiri+B05+carga	<input type="checkbox"/>	0	4	DEMANDA	VACÍO	3,89	+0,00	+0,00	0	0	0	0
11	10	stiri+ B05+ desc (+B07)+AER01	<input type="checkbox"/>	0	4	STD-08 TEM	VACÍO	42,30	+46,00	+100,00	30	0	0	0
12	4	Stiri+B05+carga+AER01	<input type="checkbox"/>	0	10	STD-08 TEM	VACÍO	42,30	+0,00	+40,00	30	0	0	0
13	13	stiri+B05+carga	<input type="checkbox"/>	0	10	DEMANDA	VACÍO	3,89	+0,00	+0,00	0	0	0	0
14	7	stiri+CA01+B05+AER01	<input type="checkbox"/>	0	1	ST-42 TEM	VACÍO	43,95	+0,00	+40,00	30	0	0	0
15	1	stirling+ B05+ AER-01	<input type="checkbox"/>	0	7	ST-42 TEM	VACÍO	43,95	+42,00	+100,00	30	0	0	0
16	13	stiri+B05+carga	<input type="checkbox"/>	0	7	DEMANDA	VACÍO	3,89	+0,00	+0,00	0	0	0	0
17	9	stiri+CA01+B05+AER01+ACS	<input type="checkbox"/>	0	7	DEMANDA	VACÍO	0,00	+1,00	+1000,00	0	0	0	0
18	7	stiri+CA01+B05+AER01	<input type="checkbox"/>	0	9	DEMANDA	VACÍO	0,00	+0,00	+0,10	0	0	0	0
19	3	stirling+ B-05+ AER-01+ ACS	<input type="checkbox"/>	0	9	ST-42 TEM	VACÍO	43,95	+42,00	+100,00	30	0	0	0
20	9	stiri+CA01+B05+AER01+ACS	<input type="checkbox"/>	0	3	ST-42 TEM	VACÍO	43,95	+0,00	+40,00	30	0	0	0

Imagen 19: Pantalla de configuración de lógica de control en SCADA.

En ella, se configuran cuáles son las condiciones que se deben cumplir para las transiciones correspondientes de un modo de funcionamiento a otro. Para ello, se eligen las variables que marcan la transición según la lógica de control establecida al inicio del ensayo. Estas variables se eligen en las casillas con los nombres “Sensor 1” y “Sensor 2”. Si la condición que marca el cambio es una diferencia entre dos variables, éstas irán en ambas casillas por separado. Si, en cambio, la condición es debida a una única variable se incluye en la casilla “Sensor 1”.

Por otra parte, para garantizar unas transiciones estables, las condiciones de transición deben darse durante un tiempo concreto de manera que se haya estabilizado dicha orden de cambio. Para casos de demanda de calefacción y de ACS, estas condiciones son instantáneas y según se

Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.

detecta demanda se lanza orden de transición de un estado a otro. En el caso de encendidos y apagados de la caldera y del motor Stirling, así como el paso a modos de funcionamiento de carga y descarga, este tiempo se establece en 30 segundos.

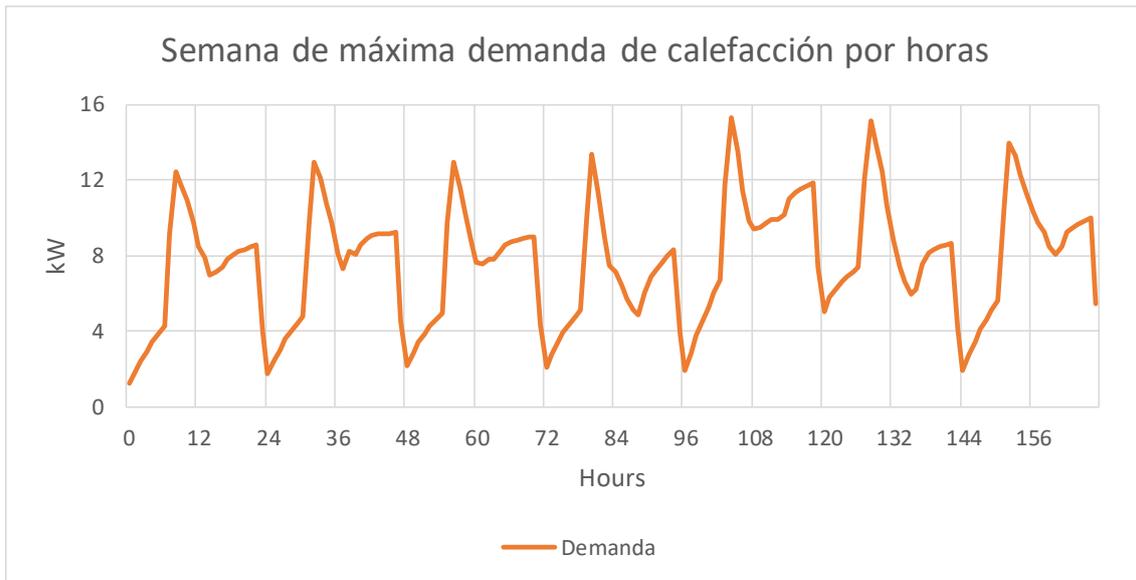
Como se ha comentado, el ensayo se realiza en relación con la semana de máxima demanda térmica. Por ello, lo primero de todo será encontrar en una demanda unifamiliar anual, cuál ha sido dicha semana. Estas curvas pueden obtenerse basándose en normas, reglamentos, bibliografía y recomendaciones existentes. Para la curva de demanda de calefacción existente, se realiza una simulación por hora en el software Trnsys basándose en la información de la construcción y teniendo en cuenta las ganancias internas de la vivienda. Con todo ello, se tiene la siguiente distribución de la demanda de calefacción por meses.



Gráfica 1: Demanda mensual de calefacción.

Se puede concluir con que la demanda de calefacción al cabo de un año, asciende hasta 25.750 kWh y se puede observar que no existe demanda de calefacción desde Junio hasta Septiembre. Con esto, se sabe que la semana de mayor demanda térmica será en enero. El perfil de la demanda de calefacción en términos de potencia se presenta en la siguiente gráfica.

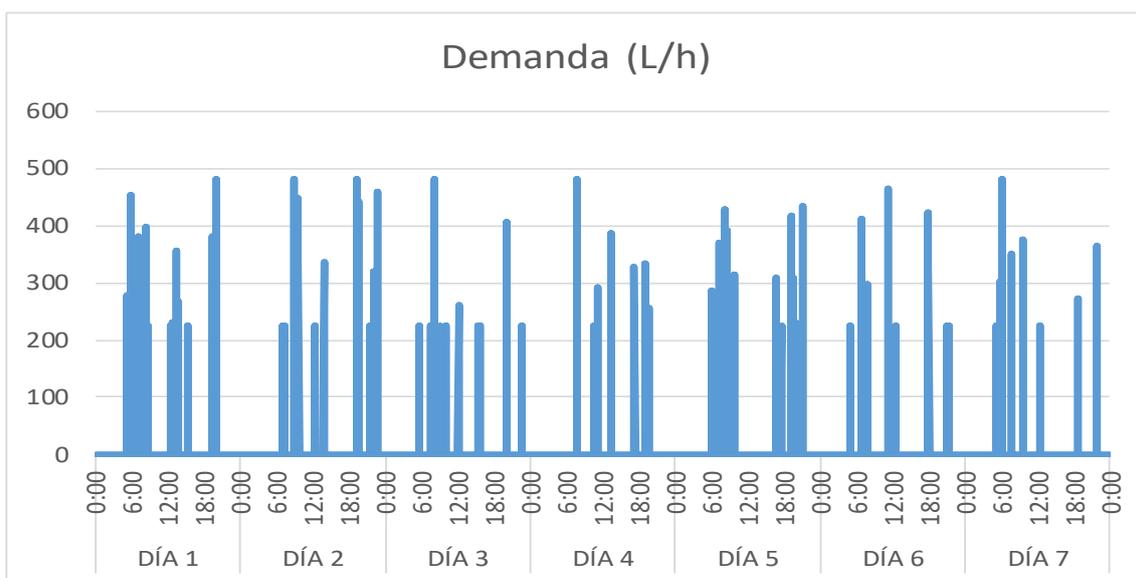
Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.



Gráfica 2: Demanda de calefacción, semana de máxima demanda.

En cuanto a la curva de demanda de ACS, esta se obtiene de lo que establece el CTE [25]. Debido a la naturaleza instantánea del agua caliente, estas demandas son calculadas en demandas minutas. Para ello, se hace uso de la herramienta de cálculo DHW Tool [26] la cual en base a ciertos parámetros como pueden ser caudales, aplica principios estadísticos y probabilísticos para sacar dichas curvas de demanda. En términos energéticos, la demanda de ACS al cabo de un año asciende a 1.737 kWh.

Para la semana de invierno que se va a ensayar, la gráfica que representa el caudal necesario en cada momento del día, es la que sigue.



Gráfica 3: Demanda de ACS, semana de máxima demanda.

1.4 Modelo Trnsys

Con el objetivo de optimizar la instalación, se realiza un modelo informático que sea capaz de simular el modo de operación de la instalación. Esta herramienta permite realizar cambios en el modo de operación de la instalación sin necesidad de puesta en marcha de la instalación. Para esta parte del proyecto se utiliza el programa informático Trnsys. Este programa, es capaz de simular situaciones transitorias. Si bien la mayoría de las simulaciones realizadas con este software están enfocadas a la simulación de sistemas térmicos y energéticos, puede ser utilizado para simular otro tipo de sistemas dinámicos.

Trnsys está dividido en dos partes, en la primera el programa lee y ejecuta el archivo de entrada de manera iterativa, buscando la convergencia del sistema y graficando la solución. La segunda parte cuenta con una extensa librería de módulos que simula el comportamiento de cada equipo existente en la instalación real. Estos módulos reciben el nombre de Types. Estos módulos están diseñados de forma que el usuario puede modificar ciertos parámetros y valores de entrada que modifican la simulación.

De cara al trabajo que se realiza en este proyecto, el diseño de este modelo se escapa de su alcance. Por ello, se partirá de un modelo no calibrado que simule el comportamiento de la instalación real para después aplicarle las correspondientes técnicas de calibración y optimización.

La simulación del modelo correspondiente se lleva a cabo durante el periodo de una semana de acuerdo con los ensayos experimentales realizados. El timestep utilizado para el registro de datos simulados será de 10 segundos, ya que es tiempo suficiente para que el sistema tenga en cuenta los procesos transitorios de calefacción de la unidad del motor Stirling y el comportamiento transitorio del agua caliente del tanque de almacenamiento térmico.

Este modelo cuenta con todos los Types que permiten configurar el modo de funcionamiento de la simulación de manera que se asemeje al comportamiento real de la instalación. Los Types utilizados para simular los diferentes equipos de la instalación son los siguientes:

- **Caldera de condensación:** el comportamiento de la caldera se simula con el Type 700 de las bibliotecas TESS que tiene Trnsys. Este Type pide al usuario que especifique la capacidad de la caldera, esto es, la cantidad de calor aportada al fluido. Esta capacidad es calculada con el calor específico del fluido y la señal de control. En este módulo, el usuario es el encargado de introducir la eficiencia del

equipo y de la combustión que se produce en él. La corriente de entrada a la caldera debe estar especificada.

- **Motor Stirling:** para este modelo se utiliza el Type 159 desarrollado primeramente por el ANNEX-42 [27] que posteriormente ha sido modificado. Este modelo genérico es adaptable a la gran mayoría de tecnologías Stirling para la cogeneración doméstica que están presentes en el mercado. Está contemplado como una caja gris y tiene en cuenta todas las situaciones transitorias que forman parte de su modo de operación. Estos modos de funcionamiento han sido contrastados y validados frente a la unidad Remeha eVita instalada en el laboratorio de Vitoria-Gasteiz. Para su utilización, es necesario especificar el flujo másico de entrada y la temperatura de entrada que quedan definidos cuando el Type es conectado al resto de elementos de la simulación.
- **Tanque de almacenamiento térmico:** para este equipo, se utiliza el Type 4e que considera que el tanque consiste en un número menor que 100 de segmentos de igual volumen. La estratificación se controla en función de este número de volúmenes. Si se trabaja sin estratificación, este número será 1. Para el correcto funcionamiento del módulo, las corrientes de entrada deben de estar especificadas.
- **Compensador hidráulico:** el Type utilizado para simular el comportamiento de este equipo es el Type 534. Este módulo es un tanque vertical que cuenta con intercambiadores interiores en los cuales el fluido interactúa absorbiendo y cediendo calor. Cuenta con dos focos isotérmicos para modelar la estratificación existente en los tanques de almacenamiento térmico. Esta estratificación es controlable en función del número de nodos especificado.
- **Bombas hidráulicas:** este equipo se modela con el Type 3b que trabaja con una variable de control entre 0 y 1. Es necesario especificar el caudal máximo que puede dar el equipo que puede ser definido directamente o con una relación entre caudal y consumo de potencia.
- **Válvulas:** en el modelo existen diferentes válvulas que pueden ser mezcladoras o separadoras. Para ello se hacen uso de los Types 647 y 649 de las bibliotecas TESS. Estos módulos son capaces de trabajar con 100 corrientes entrantes si es válvula mezcladora o salientes si es separadora.
- **Intercambiador de calor:** este equipo modelado con el Type 91 se trata de un equipo con una efectividad constante que debe ser definida por el usuario. Con ello

y las corrientes de entrada definidas por caudal, temperatura y calor específico del fluido queda modelado el intercambiador correspondiente a ACS.

- **Radiador:** mediante el Type 682b se simula la demanda de calefacción. A este módulo se le introduce una demanda de calefacción mediante un archivo de texto y el programa opera de manera que la demanda quede suplida.

Con todos los modelos de los equipos de la instalación definidos, existen otros Types encargados de controlar el funcionamiento de la instalación. Estos módulos son los siguientes:

- **Controlador diferencial:** el Type encargado de este control es el 2d y permite activar los diferentes modos de funcionamiento. Este módulo compara la diferencia entre dos temperaturas especificadas por el usuario y las compara con dos valores, uno superior y otro inferior. Si esta diferencia es mayor que el valor superior, manda una señal de ON al control definido. Si, en cambio, la temperatura es menor que el valor inferior definido, la señal de control será un OFF.
- **Dispositivo de salida retardada:** este Type es el encargado de marcar el número de timesteps que debe darse una condición para que la señal de control sea válida. El Type encargado de ello es el 661 de las bibliotecas TESS de Trnsys.
- **Calculadora de tiempo de ejecución:** este Type definido como 980 es el encargado de contar los timesteps consecutivos que se da una señal de ON o de OFF. Cuando se registren un número de timesteps mayor al definido en el Type 661 la señal de control será válida y cambiará el modo de funcionamiento.
- **Integrador periódico:** este Type 55 realiza la suma de ciertas variables que puedan tener cierto interés al cabo de la simulación.
- **Integrador:** por último, este Type 24 es el encargado de integrar ciertas cantidades en un rango de tiempo.

Todos los Types definidos anteriormente van acompañados de diferentes módulos que permiten graficar soluciones o realizar cálculos entre las diferentes variables de las simulaciones. Los Types explicados anteriormente, se muestran resumidos en la siguiente tabla.

Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.

Tabla 2: Relación de Types utilizados en el modelo informático.

Equipo	Modelo computacional	Fuente
Caldera condensación	Type 700	TESS
Motor Stirling	Type 159	Annex42 (modificado)
Tanque de almacenamiento agua caliente	Type 4e	Standard
Compensador hidráulico	Type 4e	Standard
Bombas hidráulicas	Type 3b	Standard
Separador de flujo	Type 647	Standard
Mezclador de flujo	Type 649	Standard
Controlador diferencial	Type 2d	Standard
Dispositivo de salida retardada	Type 661	TESS
Calculadora de tiempo de ejecución	Type 980	TESS
Intercambiador de calor	Type 91	Standard
Radiador	Type 682b	TESS
Integrador	Type 24	Standard
Integrador periódico	Type 55	Standard

Con todos los Types anteriormente definidos, se tiene un modelo en Trnsys que permitirá la simulación de la instalación. Para que la simulación esté lista para ser calibrada es necesario introducir unos módulos que tengan definidas las funciones de error correspondientes a los parámetros que se quieran calibrar. De este modo, se podrá dar paso a la calibración del modelo. El modelo utilizado en este proyecto se muestra en el Anexo II.

1.5 Calibración

Como se ha explicado con anterioridad, si bien el modelo de Trnsys puede funcionar como la instalación, este no se parece todavía al funcionamiento real. Por ello, es necesario realizar cambios en parámetros de la simulación que permitan aproximar el funcionamiento de la simulación a la realidad. De todos los parámetros de simulación existentes, existen algunos que son más influyentes que otros. Mediante un análisis de sensibilidad realizado entre las diferentes variables que afectan al modelo, se eligen cuales son aquellas más significativas a los cambios. El análisis de sensibilidad se escapa de los objetivos de este trabajo por lo que se va a hacer uso de unos resultados obtenidos en ensayos anteriores de la instalación.

Una vez se conocen dichos parámetros críticos, se procede a calibrar la instalación, es decir, se intenta ajustar el funcionamiento de la simulación al de los ensayos reales. Para ello, se realizan

Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.

simulaciones consecutivas en función de los parámetros definidos como críticos en el análisis de sensibilidad.

Como se ha explicado en la selección de la solución, se elige utilizar un método determinista que permita calibrar automáticamente el modelo informático.

1.5.1 Método determinista

Como se ha explicado, este método consiste en variar ciertos parámetros obteniendo una disminución en el coste de la función objetivo. Esta disminución viene dada por el error entre valores reales y predicciones de simulación.

El método determinista destaca por la posibilidad de aplicarlo a diferentes proyectos y porque el algoritmo de optimización se encuentra implementado en la herramienta. Como el software está diseñado para simulaciones paramétricas no es necesario muestrear los parámetros por separado. Como inconveniente se tiene que el algoritmo minimiza la función de coste sin tener en cuenta la realidad física de los parámetros.

Para el cálculo de dicho coste de la función objetivo se pueden utilizar cualquiera de las fórmulas siguientes:

- Error medio:
$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (X_{SIM} - X_{REAL})}{n} \quad (1)$$

- Error medio normalizado:
$$NMBE = \frac{MBE}{\bar{X}_{REAL}} \quad (2)$$

- Error cuadrático medio:
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{SIM} - X_{REAL})^2}{n}} \quad (3)$$

- Coeficiente de variación del error cuadrático medio:
$$CV (RMSE) = \frac{RMSE}{\bar{X}_{REAL}} \quad (4)$$

Donde:

- MBE es el Mean Bias Error o error medio que compara los valores absolutos de la simulación con la realidad para cada dato existente y realiza la media de la suma de estas diferencias.
- $NMBE$ es el error medio normalizado y es el error anterior dividiéndolo por el valor real medio.

Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.

- $RMSE$ de sus siglas inglesas “Root Mean Square Error” que indica las desviaciones existentes entre los valores reales y la simulación para cada dato existente.
- $CV (RMSE)$ es el coeficiente de variación del error cuadrático medio y se calcula dividiendo el resultado total de error cuadrático por el valor medio de la variable que se esté comparando.
- n es el número de timesteps o casos medidos que se tienen.
- X_{SIM} y X_{REAL} son los valores simulados y reales de la variable que se esté midiendo, respectivamente.
- \bar{X}_{REAL} es el valor medio de las medidas reales.

De cara al proceso de calibración que se ha realizado en este proyecto, la función de coste vendrá dada por el coeficiente de variación del error cuadrático medio previamente definido. Para ello, se tomarán las variables frente a las cuales se quiere calibrar la instalación y se definirán los errores cuadrático medios individuales para luego englobarlos en la función de coste total.

Para la realización de esta calibración, se ha utilizado el software Genopt que permite la reducción de la función de coste de un software independiente de simulación, por ejemplo, Trnsys. Esto es posible gracias a que Trnsys lee archivos de texto, los cuales también pueden ser leídos por Genopt.

1.5.2 Genopt

Genopt es un programa informático utilizado para minimizar la función de coste de una simulación externa que transcurre en otro programa. Este software fue desarrollado para problemas de optimización en los cuales la función de coste tiene un elevado coste computacional o sus derivados no existen o no se encuentran disponibles.

Para la realización de la calibración, se deben de configurar una serie de archivos de texto independientes en los cuales se definen diferentes aspectos de la calibración.

Primeramente, se debe definir la ruta en la cual se puede encontrar el archivo de Trnsys que se va a calibrar donde se define la función de coste frente a la cual se quiere calibrar la simulación. Por otra parte, se debe definir el tiempo de cada iteración de la calibración y finalmente los parámetros de calibración que serán los obtenidos del análisis de sensibilidad. Para que la calibración no sea infinita, estos parámetros deben ir acotados entre un valor máximo y mínimo

Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.

y se debe definir de cuanto en cuanto se quieren variar los diferentes parámetros. Por último, se debe especificar el algoritmo que se quiere utilizar en la calibración.

1.5.3 Procedimiento genérico de calibración

Una vez se tienen definidos los correspondientes archivos necesarios para la calibración, comienza el proceso. Para ello, Genopt realiza un proceso iterativo de manera que en cada iteración va variando los diferentes parámetros y ejecutando simulaciones sucesivas. Los resultados de cada iteración son comparados con los valores reales a los cuales se quiere aproximar la simulación y el programa varía los parámetros con el objetivo de minimizar la función de coste. Esta función de coste irá disminuyendo hasta que se obtenga el mismo valor en 5 ocasiones o se llegue al máximo de iteraciones fijadas en la configuración de la calibración.

Genopt trabaja con variables que pueden ser discretas, continuas o combinación de ambas. El algoritmo elegido en cada caso depende del tipo de variables con las que trabaje el sistema, es por eso que, el software cuenta con una amplia variedad de algoritmos. De cara a este caso, el algoritmo de calibración utilizado será la implementación de Hooke-Jeeves del algoritmo de búsqueda generalizada de patrones. Este algoritmo busca direcciones para reducir la función de coste con exploraciones a través de las direcciones coordenadas. Esto es llevado a cabo mediante la realización de dos tipos de búsquedas: una exploratoria y otra búsqueda de patrones. La búsqueda exploratoria permite conocer la función en cuestión, proporcionando un patrón y dando idea de la dirección probable del camino exitoso. En la segunda búsqueda, se sigue la dirección marcada por el patrón para encontrar una minimización de la función de coste.

El modo de operación del algoritmo es el que sigue, si se tiene un valor de partida " x_1 " se iguala a " z_1 ". La primera búsqueda exploratoria produce un nuevo punto " x_2 " y la búsqueda de patrones a lo largo de $x_2 - x_1$ dará lugar a un nuevo punto " z_2 ". Seguidamente se produciría una nueva búsqueda exploratoria partiendo de " z_2 " que producirá un nuevo x_3 . Como antes, la búsqueda de patrones en la dirección $x_3 - x_2$ generará otro punto z_3 . Así, el proceso continuará sucesivamente hasta que llegue a converger.

De este modo, la calibración irá tomando valores comprendidos entre los límites máximos y mínimos de los parámetros de calibración y, a su vez, la función de coste irá disminuyendo hasta llegar a un mínimo que se considerará aceptable al ver el comportamiento de dicha simulación comparada con el ensayo experimental realizado.

1.5.4 Proceso de calibración del proyecto

Con el procedimiento genérico de calibración explicado, es hora de centrar la atención en lo que se ha realizado en este proyecto. Como se ha explicado, el objetivo prioritario es ajustar el funcionamiento de la simulación a la instalación real. Para obtener una simulación ajustada a la realidad, en este proyecto se ha llevado a cabo una calibración de dos pasos, técnica seguida en otros estudios [28, 29]. Para ello, primero se realiza una calibración para ajustar el perfil de temperaturas y consumos del motor Stirling y la caldera de condensación correspondiente. En segundo lugar, se calibra la simulación para reducir las diferencias existentes entre el consumo de gas en la caldera y la cantidad de calor descargada del tanque de almacenamiento térmico. Estas calibraciones se realizan para un periodo de 48 horas y con los resultados obtenidos, el modelo es validado para toda la semana que se ha ensayado.

1.6 Optimización

Una vez se tiene la instalación calibrada al ensayo experimental, se puede empezar con el proceso de optimización. Por una parte, se deben presentar los escenarios con las mejoras en aislamiento correspondientes. Para ello, los valores de los coeficientes de pérdidas, del caso experimental, son reducidos de manera proporcional para obtener un 15%, 10%, 5% y 0% de pérdidas de calor respecto PCI (Poder Calorífico Inferior). Así, se tienen los 5 diferentes escenarios a los cuales se les optimiza las condiciones de funcionamiento.

El tipo de optimización que se realiza en este trabajo es una optimización multiobjetivo, de manera que se consideran todas las funciones objeto simultáneamente. A continuación, se explica el procedimiento para dicha optimización.

1.6.1 Optimización multiobjetivo con un algoritmo genético

Para la realización de la optimización multiobjetivo que se ha desarrollado en este proyecto se ha utilizado un algoritmo genético. Este tipo de algoritmos, como se ha mencionado anteriormente, utiliza poblaciones en cada iteración y evalúa lo apta que es cada una de ellas. De esta forma, solo sobreviven las mejores soluciones.

El algoritmo que se utiliza para la optimización multiobjetivo es el NSGA-II por sus iniciales del inglés “Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm”. Este algoritmo busca el elitismo dentro de la población. Para la aplicación de este algoritmo se utiliza la herramienta JEplus+EA que se conoce como una herramienta válida para solucionar problemas de optimización junto con un software de simulación [30]. Este programa está preparado para definir ejecuciones sucesivas de manera que se pueden ejecutar en paralelo, diferentes casos de Trnsys y de manera

Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.

automática. Los resultados obtenidos en cada simulación se recogen y se les aplica el algoritmo en cuestión de manera que se generan las poblaciones del proceso de optimización.

El modo de operación del software es el siguiente. Primeramente, se configura la optimización multiobjetivo definiendo los parámetros y los valores mínimos y máximos de estos. Esas variables son aplicadas al modelo de Trnsys y se ejecuta la simulación correspondiente. En base a los resultados obtenidos de las funciones objetivo, va variando las variables de optimización con la intención de minimizar estas. La optimización para cuando se llega a un máximo de iteraciones fijadas por el usuario. En la siguiente imagen se puede observar cómo opera la optimización.

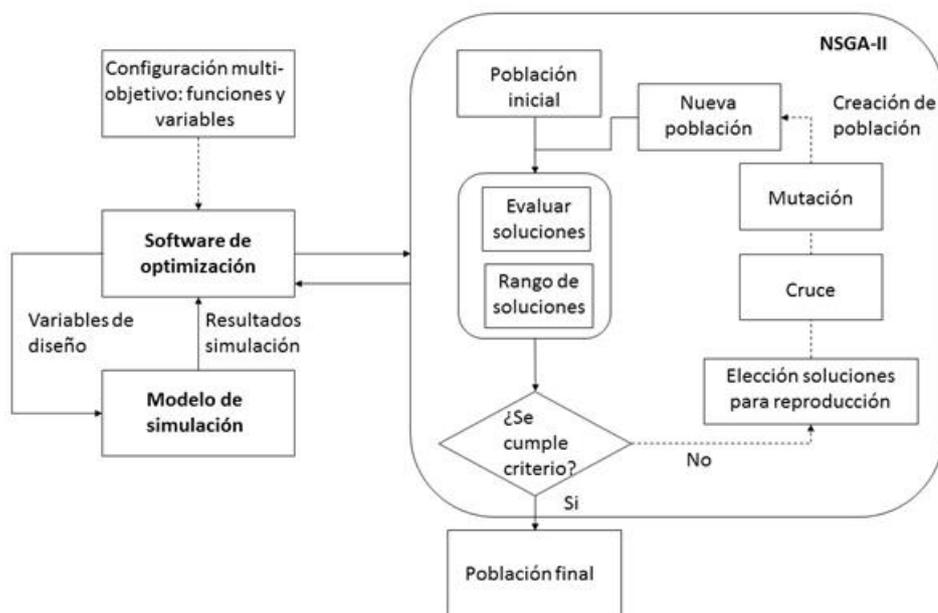


Imagen 20: Funcionamiento optimización.

Para el inicio de la optimización se deben definir ciertos parámetros que se presentan a continuación. Por un lado, el tamaño de la población se selecciona siguiendo la recomendación de que sea entre 2 y 4 veces el número de variables de optimización [31]. Aunque el número de generaciones recomendado es 90, en este estudio se realizarán 100 para garantizar que se alcanzan las soluciones óptimas. Por otra parte, los ratios de cruce y mutación deben ser definidos y estos se establecen basándose en análisis estadísticos de 68 artículos de investigación relacionados con la optimización [32]. En la siguiente tabla se presentan los parámetros definidos para la optimización.

Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.

Tabla 3: *Parámetros de optimización.*

Parámetro NSGA-II	Valor	Descripción
Tamaño de población	20	Número de soluciones evaluadas en cada iteración.
Número máximo de generaciones	100	Número de iteraciones a realizar en la optimización.
Ratio de cruce	0.9	Frecuencia de unión entre las soluciones existentes.
Probabilidad de mutación	0.355	Frecuencia de cambios aleatorios.
Soluciones comparadas	2	Número de soluciones seleccionadas de manera aleatoria para comparar según su grado de aptitud

En un problema de optimización no existe una solución óptima única pero sí una serie de soluciones que mejoran los objetivos. Esta serie de soluciones se conoce como frontera de Pareto e incluye las soluciones dominantes respecto a otras. Las soluciones que forman parte de la curva de Pareto son aquellas que si mejoran un objetivo empeoran otro. Al acabar el proceso de optimización, el software facilitará las mejores soluciones que darán lugar a la curva de Pareto y a una curva normalizada que permita obtener el punto más cercano a la curva de Pareto que será conocido como el punto óptimo.

Este punto tendrá asociados unos valores de las variables de optimización que si se introducen en la simulación permitirá ver como mejora el funcionamiento de la instalación en cuanto a rendimiento exergético y coste de operación. Este procedimiento se realiza para los casos con distintos niveles de aislamiento.

2 DESCRIPCIÓN DE TAREAS

En el apartado que se describe a continuación se muestran las tareas principales llevadas a cabo para la realización de este proyecto. Aquí se detallan los recursos necesarios para cada actividad, así como la fecha de comienzo, duración y finalización de las actividades. El proyecto comenzó el 16 de Julio.

T.1 Modificaciones en la instalación.

Descripción: Realización de las diferentes modificaciones para puesta a punto de la instalación.

Responsables: Ingeniero Junior.

Recursos técnicos: Instalación térmica experimental del laboratorio.

Carga de trabajo: 7 horas diarias

Duración: 40 días.

Fin de tarea: la instalación está lista para el comienzo de ensayos.

T.2 Conocimiento de la instalación

Descripción: Desplazamiento de los participantes en el proyecto al Laboratorio de Control de Calidad en la edificación en Vitoria-Gasteiz.

Responsables: Codirector de Proyecto, Ingeniera Doctora e Ingeniero Junior.

Recursos técnicos: Instalación térmica experimental del laboratorio.

Carga de trabajo: el director de proyecto dedica 6 horas a la visita, mientras el resto de equipo 7 horas.

Duración: 3 días.

Fin de tarea: la Ingeniera Doctora y el Ingeniero Junior deben de estar familiarizados con el propósito del proyecto.

T.3 Programación PID

Descripción: Para cubrir la demanda de agua caliente de manera correcta es necesario un control rápido y es por ello que se sintoniza un controlador PID

Responsable: Ingeniero Junior.

Recursos técnicos: Instalación térmica experimental del laboratorio.

Carga de trabajo: 7 horas diarias

Duración: 5 días.

Fin de tarea: se debe comprobar que la válvula controlada por el PID aporta el caudal necesario en cada demanda.

T.4 Ensayo de invierno

Descripción: En esta tarea se generan las curvas de demanda y se configuran los diferentes modos de funcionamiento de la instalación.

Responsable: Codirectora del proyecto e Ingeniero Junior

Recursos técnicos: Instalación térmica experimental del laboratorio y ordenador portátil

Carga de trabajo: 7 horas diarias

Duración: 5 días.

Fin de tarea: la tarea concluye con la puesta en marcha del ensayo de la semana correspondiente a la máxima demanda.

T.5 Comprobación de resultados

Descripción: Una vez en marcha el ensayo, se deben comprobar que los resultados del ensayo son correctos por lo que se genera una hoja de cálculo que permite realizar un seguimiento del ensayo.

Responsable: Ingeniero Junior.

Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.

Recursos técnicos: Instalación térmica experimental del laboratorio y ordenador portátil con paquete de Microsoft Office.

Carga de trabajo: 7 horas diarias

Duración: 7 días.

Fin de tarea: comprobar que se satisface la demanda semanal.

T.6 Diseño modelo

Descripción: una vez se ha estudiado el comportamiento de la instalación se debe reproducir su funcionamiento en un modelo informático.

Responsable: Ingeniera Doctora.

Recursos técnicos: Ordenador portátil con licencia del software Trnsys.

Carga de trabajo: 7 horas diarias

Duración: 15 días.

Fin de tarea: el modelo conseguido reproduce el funcionamiento de la instalación de manera desajustada.

T.7 Análisis de sensibilidad

Descripción: para la posterior calibración del modelo se identifican mediante un análisis de sensibilidad los parámetros más influyentes

Responsable: Ingeniera Doctora.

Recursos técnicos: Ordenador portátil con el software necesario para el análisis de sensibilidad.

Carga de trabajo: 7 horas diarias

Duración: 6 días.

Fin de tarea: como resultado se obtienen los parámetros que se calibrarán a posteriori.

T.8 Programar calibración

Descripción: Se definen la función de coste que se utilizará para calibrar el modelo y se comienza la calibración.

Responsable: Ingeniero Junior.

Recursos técnicos: Ordenador portátil con el software gratuito Genopt.

Carga de trabajo: 7 horas diarias

Duración: 7 días.

Fin de tarea: consecución los valores de los parámetros calibrados.

T.9 Simulación calibrada

Descripción: Los valores de los parámetros de la calibración son introducidos en la simulación para ver su comportamiento.

Responsable: Ingeniero Junior.

Recursos técnicos: Ordenador portátil con licencia Trnsys.

Carga de trabajo: 7 horas diarias

Duración: 3 días.

Fin de tarea: comprobación del correcto ajuste de la simulación frente a los resultados del ensayo realizado.

T.10 Segunda calibración

Descripción: se realiza una nueva calibración con una nueva función de coste que permita ajustar los valores de calor descargado desde el almacenamiento y de consumo de gas en la caldera.

Responsable: Ingeniero Junior.

Recursos técnicos: ordenador portátil con licencia gratuita de Genopt.

Carga de trabajo: 7 horas diarias

Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.

Duración: 4 días.

Fin de tarea: obtención de unos resultados muy próximos a la realidad.

T.11 Optimizaciones de aislamiento

Descripción: puesta en marcha de simulaciones con diferentes niveles de aislamiento.

Responsable: Ingeniero Junior.

Recursos técnicos: ordenador portátil con licencia Trnsys.

Carga de trabajo: 7 horas diarias

Duración: 3 días.

Fin de tarea: resultados de simulaciones de la instalación con diferentes niveles de aislamiento.

T.12 Optimización de variables de control

Descripción: Para cada caso de diferente aislamiento planteado previamente se optimizan ciertas variables de control que permitan reducir el coste de operación de la instalación y aumenten su rendimiento exergético.

Responsable: Ingeniero Junior.

Recursos técnicos: Ordenador portátil con licencia de JEplus+EA.

Carga de trabajo: 7 horas diarias

Duración: 10 días.

Fin de tarea: obtención de valores de las variables de control optimizadas.

T.13 Simulaciones optimizadas

Descripción: se simulan los casos de diferente aislamiento planteados con la correspondiente optimización de variables de control realizada.

Responsable: Ingeniero Junior.

Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.

Recursos técnicos: Ordenador con licencia Trnsys.

Carga de trabajo: 7 horas diarias

Duración: 6 días.

Fin de tarea: se obtienen los resultados de las optimizaciones que permiten contrastar los escenarios experimental, no optimizado y optimizado.

T.14 Artículo de investigación

Descripción: todo este proyecto se engloba en un artículo de investigación

Responsable: Ingeniera Doctora e Ingeniero Junior.

Recursos técnicos: Ordenador portátil con licencia de paquete Microsoft Office.

Carga de trabajo: 4 horas diarias

Duración: 50 días.

Fin de tarea: el artículo es enviado a la revista Energy Conversion & Management.

T.15 Memoria

Descripción: redacción de la correspondiente memoria del Trabajo Fin de Máster.

Responsable: Ingeniero Junior.

Recursos técnicos: Ordenador portátil con licencia de paquete de Microsoft Office.

Carga de trabajo: 2 horas diarias

Duración: 50 días.

Fin de tarea: así concluye el proyecto.

En la siguiente imagen se observa el correspondiente diagrama de Gantt donde se refleja el trabajo desarrollado a lo largo del proyecto con fin de proyecto el 3 de Junio de 2019.

Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.

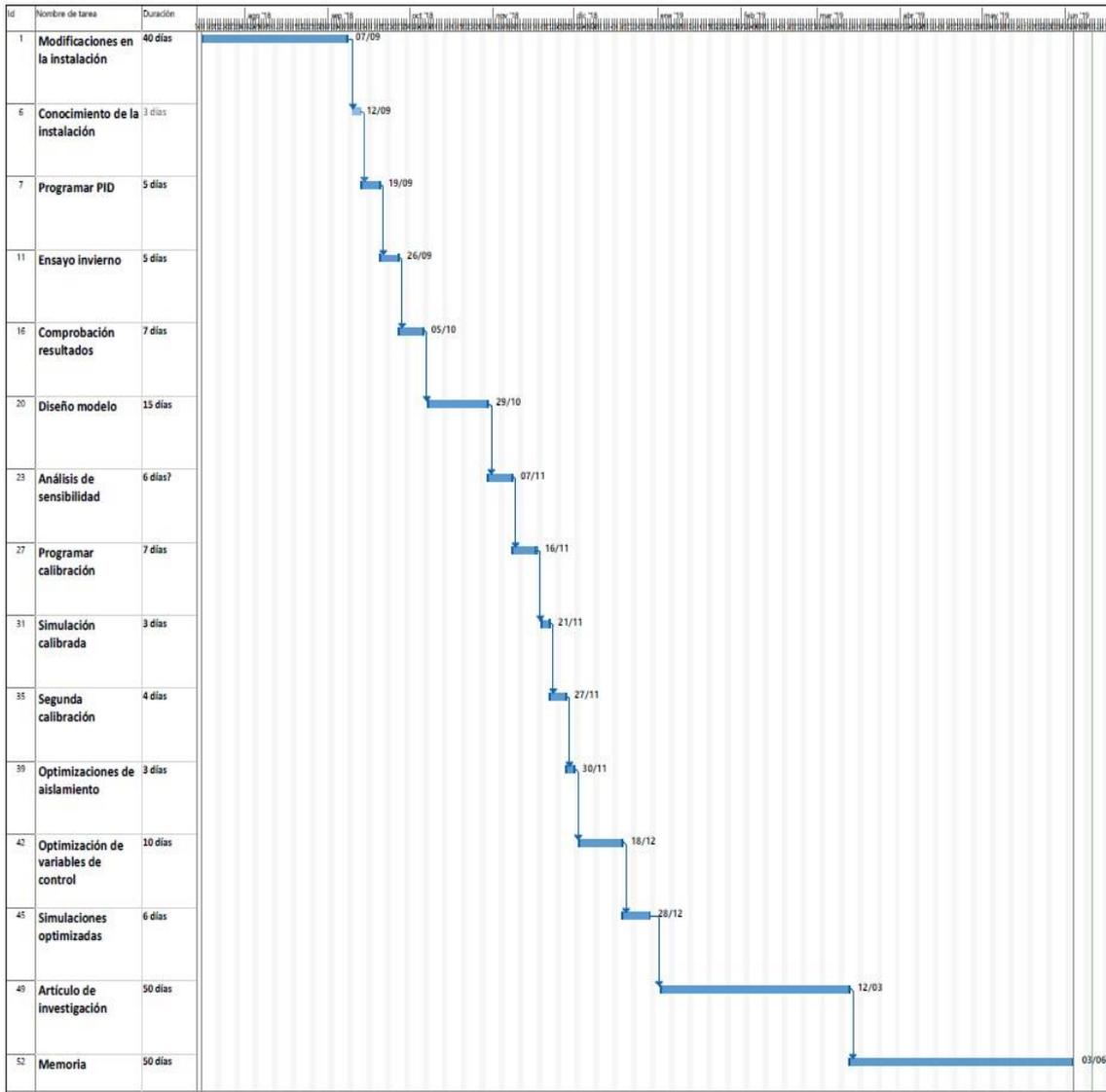


Imagen 21: Diagrama de Gantt del proyecto.

3 MEJORAS REALIZADAS

Para la puesta a punto de la instalación se realizaron ciertas mejoras físicas, de control y se tuvieron que calibrar todas las sondas y caudalímetros existentes que permitieran la toma de datos de manera correcta y fiable. A continuación, se detalla cuales fueron éstas.

3.1 Mejoras físicas

Con el objetivo de preparar la instalación para simular el comportamiento de una instalación híbrida compuesta por un motor Stirling de cogeneración, una caldera de condensación y con la posibilidad de almacenar energía térmica para una vivienda unifamiliar, son necesarias las siguientes modificaciones en la instalación.

En el Anexo III se pueden observar los esquemas de cada modificación.

3.1.1 1ª Modificación

Para comenzar con la preparación de la instalación para este proyecto, lo primero que se realizó fue integrar de manera intermedio los depósitos de inercia e integrar la descarga de éstos en retorno.

De este modo se consiguió que los depósitos de generación estuvieran conectados a los depósitos de inercia y que el depósito estuviera directamente conectado a la demanda.

3.1.2 2ª Modificación

En esta modificación se instalaron las tuberías necesarias que permiten la producción de ACS de manera instantánea, esto es, sin almacenamiento, ya que la instalación anterior mandaba el agua caliente a un depósito y de ahí se enviaba a consumo. Para ello se conectaron dos tuberías. La primera de ellas permite que el agua de alimentación llegue al intercambiador y la segunda de ellas conecta directamente la salida del intercambiador al consumo de ACS.

3.1.3 3ª Modificación

Este tercer cambio en la instalación existente se realizó con el objetivo de cerrar circuitos en caso de la no existencia de demanda de ACS o calefacción.

Para ello se introducen unas válvulas automáticas que permiten el cierre en caso de no haber demanda y la apertura en caso de existir demanda. Las válvulas instaladas son de dos vías.

Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.

3.1.4 4ª Modificación

Como el propósito de los ensayos realizados en este proyecto es ensayar la instalación para demandas unifamiliares de ACS y calefacción fue necesaria la instalación de un caudalímetro de ACS diferente al existente.

Este caudalímetro permite la lectura de las demandas de manera correcta y se solventa el problema existente con el caudalímetro anterior, el cual era incapaz de leer demandas bajas de ACS.

3.1.5 5ª Modificación

El objetivo de esta modificación es tener la posibilidad de medir el caudal que se descarga desde el depósito de almacenamiento. Con los caudales que se deben medir tenidos en cuenta se observó que los rangos de medida del caudalímetro retirado en la modificación 4 se ajustaban de manera adecuada. Por ello, se instala este caudalímetro en la salida del depósito.

3.1.6 6ª Modificación

Si bien en este ensayo no se ha utilizado esta modificación conviene mencionarla de manera que se tenga constancia de ella en futuros ensayos. Aquí se instaló una nueva bomba de calor de 5kW térmicos de potencia, es decir, de la misma potencia que el motor de cogeneración de tecnología Stirling existente. De este modo, se pueden comparar la generación de energía térmica con dos tecnologías diferentes.

Esta bomba de calor se conectó al analizador de redes y se conecta junto a una bomba de calor antigua existente mediante tubos flexibles aislados.

3.1.7 7ª Modificación

Con el objetivo de introducir otra combinación posible en la instalación se introdujeron tuberías nuevas que conectaban el depósito solar al consumo de ACS de manera que este depósito se pudiera utilizar como depósito de ACS.

3.1.8 8ª Modificación

Para configurar la instalación híbrida con almacenamiento para una vivienda unifamiliar se instaló un nuevo depósito de inercia de menor tamaño ya que para una vivienda unifamiliar un depósito de inercia de 200 L se ajusta mejor.

Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.

En esta modificación se instaló el depósito mencionado conectado con tubos flexibles aislados en paralelo con los tanques inerciales existentes de 1.000 L. Para medir de manera adecuada la temperatura del depósito, se instalaron dos sondas de temperatura, una superior y una inferior.

3.1.9 9ª Modificación

Con el objetivo de producir ACS de manera instantánea de otra forma diferente a la modificación 2, se instalan tuberías que conectan la caldera y el motor Stirling directamente al consumo de ACS.

Las tuberías que se deben instalar son de gran longitud por lo que, con la intención de reducir las pérdidas estas tuberías serán de un material aislante y los tramos de conexión a caldera y Stirling, serán tubos flexibles aislados.

Para dejar constancia de las modificaciones realizadas, en el Anexo II se muestran los planos de la instalación con cada modificación en rojo por separado. Por último, todas estas modificaciones se muestran, también en rojo, en un plano general.

3.2 Mejoras de control

Con las modificaciones físicas realizadas se decidió introducir una mejora en el sistema de control de la instalación de manera que esta modificación permitiera la recogida de una cantidad mayor de datos.

Para ello se compró una tarjeta nueva que permitiera registrar más variables de control y esta fue instalada y configurado con el PLC como se observa en el Anexo IV.

3.3 Calibrado

Para la puesta en marcha de los ensayos correspondientes a este proyecto fue necesario calibrar todos los dispositivos de medida existentes en el laboratorio e incluso instalar nuevas señales de medida. De este modo, teniendo calibradas las sondas de temperatura y los caudalímetros se pueden realizar los cálculos que se vean oportunos.

Para calibrar las sondas fue necesario contar con un horno de calibración y una sonda de referencia. Con ello se introdujeron en el horno la sonda a calibrar y la de referencia y se conectó el horno al ordenador de manera que se permitió así la transferencia de datos.

Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.

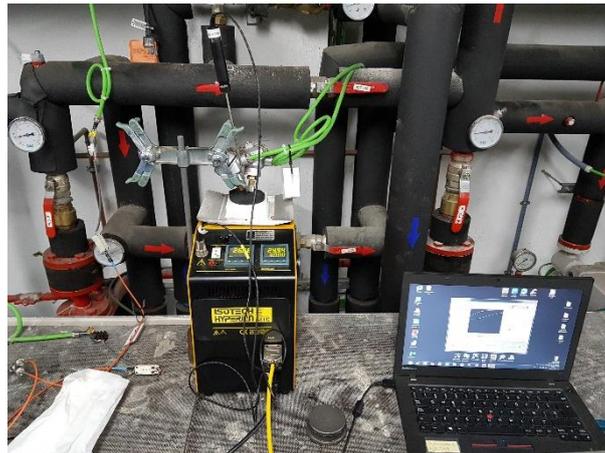


Imagen 22: Horno de calibración.

Para llevar a cabo este proceso se utilizaron los programas “BenchLink data logger” y “CalNotepad”; el primero para la sonda a calibrar y el segundo para la de referencia. Con estos programas se configuraron la sonda a calibrar primero y la de referencia después y así se empezaron las calibraciones.

Estas calibraciones se realizaron para tres temperaturas diferentes 30, 50 y 70 °C y el tiempo de toma de datos para cada temperatura fue de 50 minutos.

A continuación, se presentan los resultados de una calibración de la sonda de temperatura número 1. Primeramente, se presentan los resultados obtenidos durante el periodo de calibración de la sonda de referencia y la sonda a calibrar para las temperaturas indicadas (30, 50 y 70°C).

Tabla 4: Valores de de temperatura para referencia 30°C.

MEDIDA	REF PT100	PT100 SUPF-1	MEDIDA	REF PT100	PT100 SUPF-1
	°C	°C		°C	°C
1	29,70	29,62	9	29,46	29,39
2	29,59	29,52	10	29,40	29,34
3	29,59	29,52	11	29,43	29,33
4	29,57	29,49	12	29,42	29,33
5	29,54	29,44	13	29,39	29,32
6	29,53	29,45	14	29,35	29,26
7	29,56	29,46	15	29,35	29,27
8	29,52	29,43			

Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.

Tabla 5: Valores de temperatura para referencia 50°C.

MEDIDA	REF PT100	PT100 SUPF-1	MEDIDA	REF PT100	PT100 SUPF-1
	°C	°C		°C	°C
1	48,73	48,60	9	49,02	48,90
2	48,75	48,63	10	49,03	48,92
3	48,75	48,63	11	49,05	48,94
4	48,77	48,65	12	49,07	48,95
5	48,76	48,66	13	49,07	48,96
6	48,83	48,77	14	49,07	48,95
7	48,92	48,80	15	49,08	48,96
8	48,95	48,89			

Tabla 6: Valores de temperatura para referencia 70°C.

MEDIDA	REF PT100	PT100 SUPF-1	MEDIDA	REF PT100	PT100 SUPF-1
	°C	°C		°C	°C
1	68,78	68,70	9	68,74	68,67
2	68,79	68,70	10	68,76	68,68
3	68,79	68,67	11	68,78	68,67
4	68,76	68,69	12	68,76	68,67
5	68,76	68,67	13	68,78	68,65
6	68,75	68,68	14	68,74	68,59
7	68,78	68,69	15	68,69	68,65
8	68,77	68,64			

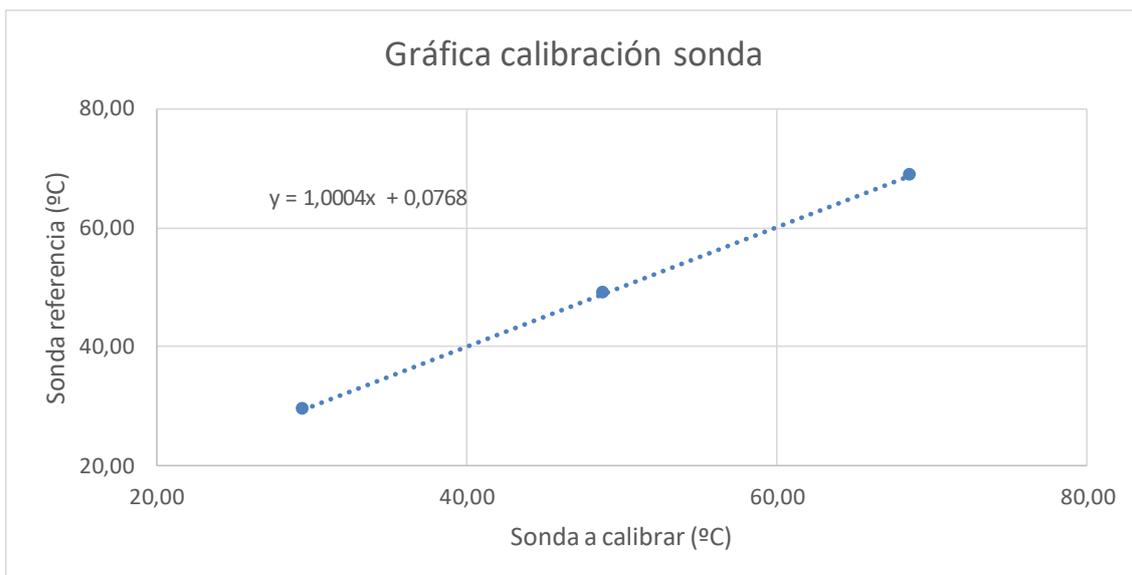
Cuando se tienen estas medidas, se realizan las medias de los valores de las tres consignas con los datos de la sonda de calibración y la sonda a calibrar. Con ello se tienen los siguientes valores medios:

Tabla 7: Valores medios para calibración de sonda de temperatura.

CONSIGNA	REF PT100	PT100 SUPF-1
	°C	°C
30°C	29,49	29,41
50°C	48,92	48,81
70°C	68,76	68,67

Una vez se tienen estos valores calculados, se gráfica la recta que se genera con ese conjunto de valores y calculando la ecuación de la recta se obtienen los coeficientes de calibración.

Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.



Gráfica 4: Recta de calibración de sonda de temperatura.

Donde los coeficientes que se introducen en el control de la instalación son $A=1,0004$ y $B=0,0768$. Para el resto de sondas existentes en la instalación se presentan los coeficientes correspondientes en la tabla 1 del anexo IV.

Para la calibración de los caudalímetros el procedimiento es parecido. Contando con un caudalímetro calibrado se hace circular un caudal de referencia por él y se lee la medida del caudalímetro a calibrar. Este procedimiento se realiza con tres caudales diferentes. Para el caudalímetro 5 se utilizan como caudales de referencia 1530, 2470 y 3250 L/h y los resultados obtenidos son los siguientes:

Tabla 8: Valores de caudales para referencia 1530 L/h.

MEDIDA	REF	CAU-05	MEDIDA	REF	CAU-05
	L/h	L/h		L/h	L/h
1	1531,75	1572,86	9	1533,06	1574,88
2	1533,67	1574,71	10	1533,55	1573,38
3	1532,77	1573,67	11	1532,19	1573,61
4	1531,46	1573,09	12	1532,84	1573,15
5	1533,13	1574,19	13	1531,42	1570,95
6	1533,09	1571,99	14	1533,42	1575,29
7	1532,67	1573,15	15	1531,80	1574,13
8	1531,37	1571,88			

Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.

Tabla 9: Valores de caudales para referencia 2470 L/h.

MEDIDA	REF	CAU-05	MEDIDA	REF	CAU-05
	L/h	L/h		L/h	L/h
1	2467,19	2523,32	9	2466,55	2520,60
2	2465,78	2521,93	10	2463,06	2519,39
3	2471,60	2527,60	11	2462,21	2517,71
4	2468,49	2521,99	12	2463,40	2519,79
5	2465,85	2519,50	13	2465,56	2518,98
6	2470,43	2528,82	14	2463,18	2516,26
7	2464,95	2518,52	15	2464,11	2518,69
8	2465,20	2519,79			

Tabla 10: Valores de caudales para referencia 3250 L/h.

MEDIDA	REF	CAU-05	MEDIDA	REF	CAU-05
	L/h	L/h		L/h	L/h
1	3245,03	3326,85	9	3241,73	3323,32
2	3243,62	3325,58	10	3226,28	3307,18
3	3243,38	3323,78	11	3239,90	3323,21
4	3238,62	3319,62	12	3233,93	3317,88
5	3244,59	3324,88	13	3228,66	3311,00
6	3242,92	3325,58	14	3222,66	3307,93
7	3239,49	3318,98	15	3229,44	3315,39
8	3247,12	3328,24			

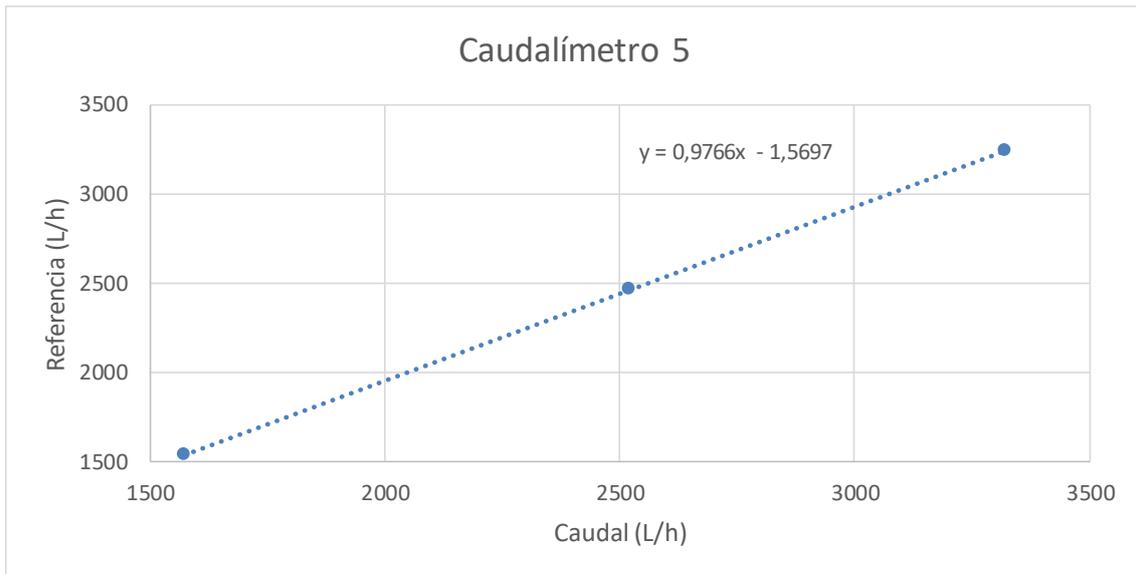
De este modo se obtienen los siguientes valores promedio para cada caso.

Tabla 11: Valores medios para calibración de caudalímetro.

CONSIGNA	REF	CAU-05
	L/h	L/h
1530 L/h	1532,55	1573,40
2470 L/h	2465,84	2520,86
3250 L/h	3237,82	3319,96

Con ello, se genera la gráfica que contrasta dichos valores y, la ecuación lineal que aproxima este conjunto de valores, da el valor de los coeficientes de calibración del caudalímetro.

Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.



Gráfica 5: Recta de calibración del caudalímetro.

Para este caso se tiene que $A = 0,9766$ y $B = -1,5697$. Para el resto de caudalímetros de la instalación, se muestran los valores de los coeficientes en la tabla 2 del Anexo IV.

Con este procedimiento se llega al final de las calibraciones a realizar para tener la instalación lista para comenzar los ensayos necesarios.

4 CÁLCULOS

En este apartado se explica cuál ha sido el procedimiento de cálculo de los diferentes casos para contrastar resultados experimentales con resultados de la simulación calibrada y la simulación calibrada-optimizada.

Para ello, el procedimiento comienza en el laboratorio experimental donde se deben definir los volúmenes de control a los cuales, posteriormente, se les aplicarán balances de masa y energía.

4.1 Simplificaciones e hipótesis de cálculo

De cara a la realización de los cálculos energéticos de la planta correspondientes se van a tomar ciertas simplificaciones que faciliten estas operaciones.

- La planta de operación se va a dividir en diferentes volúmenes de control con entradas y salidas que permitan aplicar la conservación de la energía.
- Se supone que no hay pérdidas de presión en los equipos.
- Se despreciarán los efectos de energía cinética y potencial en el cálculo de balances de energía.
- Debido a que las temperaturas del agua son bajas y a presión atmosférica, esta sustancia se tratará como incompresible.
- La composición del gas natural se ha calculado con datos reales de la semana de ensayo proporcionados por ENAGAS [33] y, conociendo el poder calorífico inferior y porcentaje de la composición de nitrógeno y dióxido de carbono en el gas, se ha sacado la siguiente composición:

Tabla 12: Composición Gas Natural.

Elemento	Porcentaje
Metano	94,27%
Etano	5,00%
Propano	0,42%
Butano	0,10%
Nitrógeno	0,16%
Dióxido de Carbono	0,05%

4.2 Volúmenes de control

Como se ha descrito en la explicación de la instalación, ésta cuenta con: un módulo de producción donde se calienta el agua que circula por ella, formado por una caldera y un motor Stirling; un módulo de distribución el cual traslada el agua a la zona de consumo, el aerotermo

Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.

que simula la demanda de calefacción, un módulo donde se produce ACS para consumo y el módulo final que se corresponde con el tanque de almacenamiento.

Con esto, se van a definir en total seis volúmenes de control que serán los siguientes:

- **VC1 – Caldera de condensación:** se consideran como entradas el agua procedente del compensador hidráulico y el aire y el gas natural que son los encargados de generar la combustión y calentar el agua. Como salidas se establecen los humos de la combustión y la salida de agua caliente.

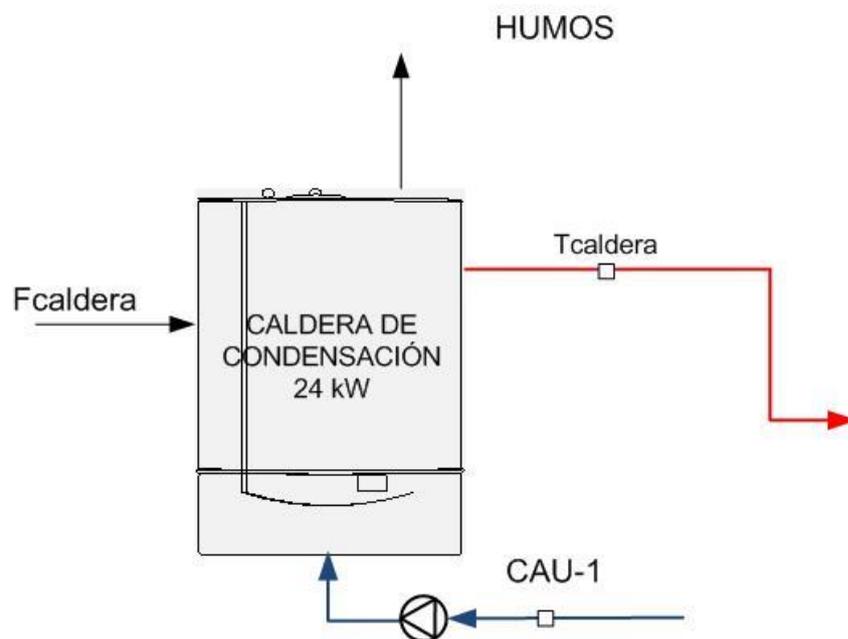


Imagen 23: Volumen de control de la caldera.

- **VC2 - Stirling:** siguiendo el mismo esquema de entradas y salidas de la caldera, el volumen de control correspondiente al motor de cogeneración tendrá entradas de agua, aire y gas natural. En cuanto a salidas, éstas serán de gases de combustión y la salida de agua caliente.

Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.

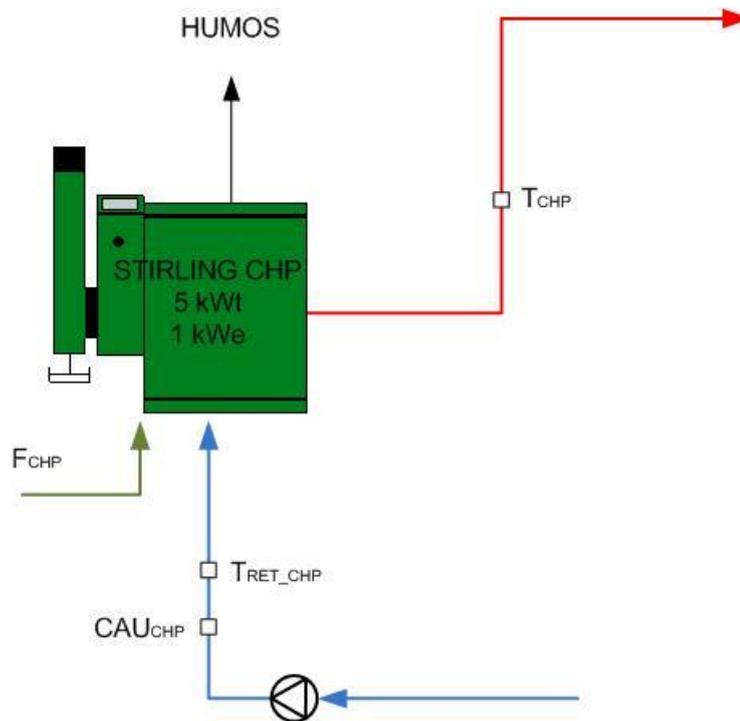


Imagen 24: Volumen de control del Stirling.

- **VC3 - Aerotermo:** aquí se tendrá únicamente la entrada y salida de agua al fancoil.

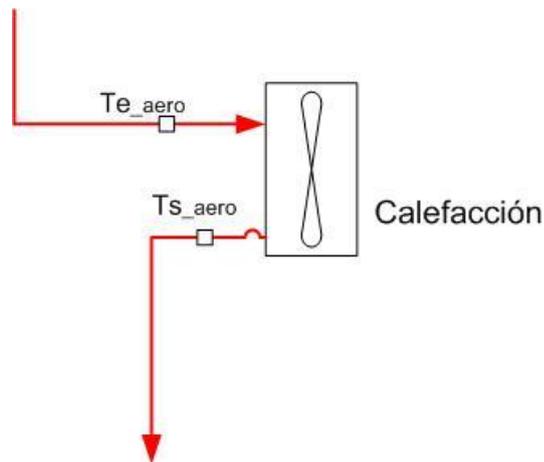


Imagen 25: Volumen de control del aerotermo.

- **VC4 - ACS:** para la generación de agua caliente, se tiene un intercambiador de calor a contracorriente al cual llega agua caliente para calentar el agua de alimentación. Por ello, se tendrán entrada y salida de agua caliente al intercambiador y, por otra parte, entrada de agua de alimentación y salida de ACS.

Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.

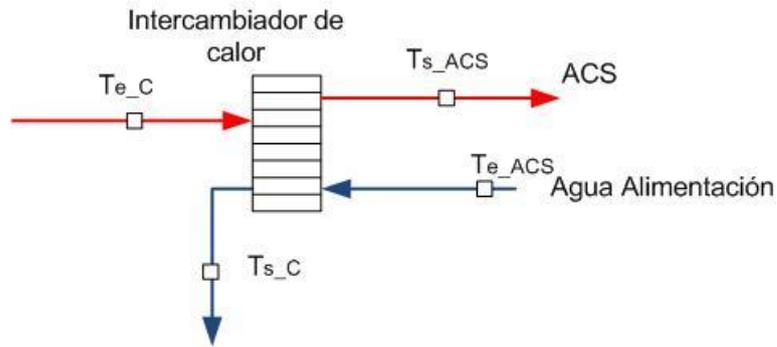


Imagen 26: Volumen de control ACS.

- VC5 - Almacenamiento:** debido a la lógica de funcionamiento del sistema y dependiendo de ciertos parámetros el modo de operación es distinto. Por ello, se contemplan diferentes entradas y salidas. Por un lado, si la carga se realiza por la parte superior del tanque, esta será contemplada como entrada y el agua saldrá por el orificio inferior del tanque y por rebose. Por otro lado, si la carga se realiza por la parte inferior del tanque todo el agua sale, gracias a la acción de la bomba de descarga, por la parte superior del tanque y habrá que contemplar dicha salida.

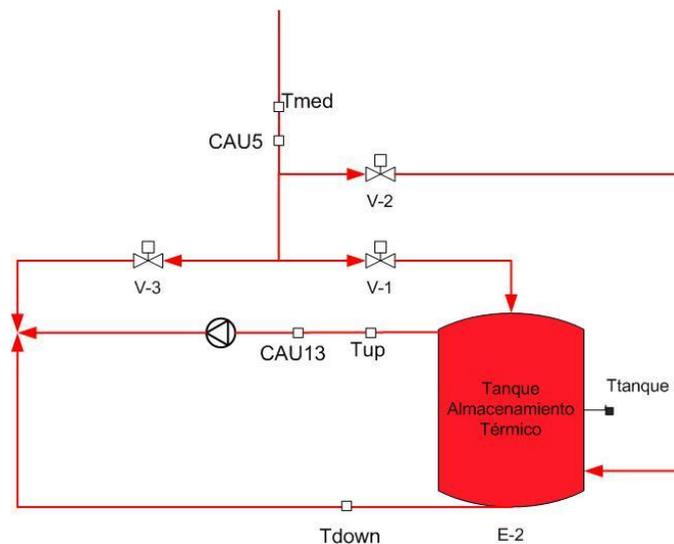


Imagen 27: Volumen de control del tanque de almacenamiento.

- VC6 - General:** por último, se estudia la planta de manera general para sacar valores de generación, consumo, pérdidas totales. Para ello, las entradas que se contemplan son el aire y el gas natural para caldera y Stirling y agua de alimentación. En cuanto a las salidas se refiere, se tienen los gases de combustión, el agua de ACS, generada por el motor de cogeneración.

Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.

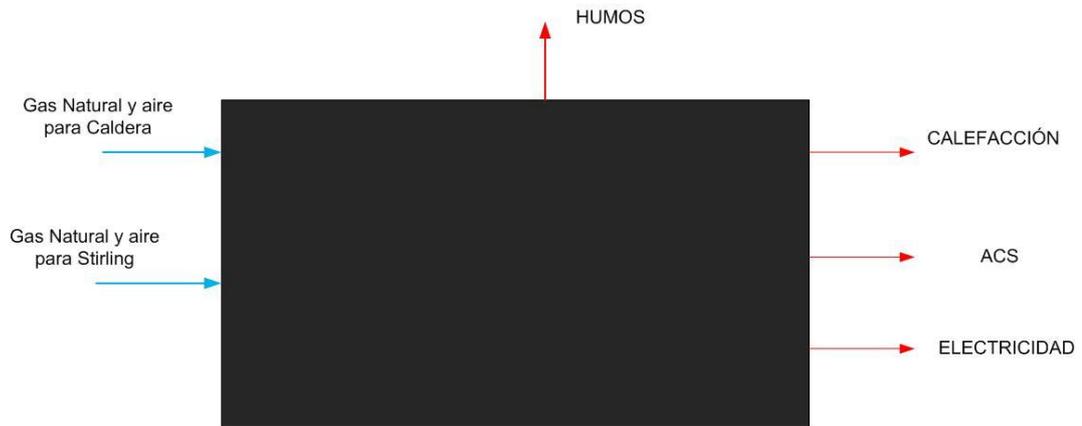


Imagen 28: Volumen de control general.

En la siguiente tabla se observa de manera resumida lo anteriormente comentado.

Tabla 13: Relación entradas/salidas volúmenes de control.

VOLUMEN DE CONTROL	ENTRADA	SALIDA
VC1: Caldera de condensación	Agua retorno, Gas natural, Aire	Gases de combustión, agua caliente
VC2: Motor Stirling	Agua retorno, Gas natural, Aire	Gases de combustión, agua caliente
VC3: ACS	Agua de compensador hidráulico y agua de alimentación	Agua para consumo
VC4: Aerotermo	Agua de compensador hidráulico	Agua a menor temperatura
VC5: Almacenamiento	Agua por orificio superior de entrada o agua por orificio inferior de entrada	Agua por orificio inferior y superior o agua orificio superior
VC6: General	Gas natural, aire y agua de alimentación	Gases de combustión, agua caliente

4.3 Balances de masa

Una vez se han definido los volúmenes de control, se les aplica el balance de masa correspondiente comprobando que ésta se conserva. Para todos los volúmenes de control son situaciones estacionarias.

Por ello, la ecuación general del balance de masa será la siguiente:

Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.

$$\frac{dm_{vc}}{dt} = \sum_e \dot{m}_e - \sum_s \dot{m}_s \quad \left[\frac{kg}{s} \right] \quad (5)$$

Para una situación estacionaria, el término dependiente del tiempo es constante y por lo tanto su derivada es nula. El resultado es que el sumatorio de caudales entrantes será igual al de salida.

$$0 = \sum_e \dot{m}_e - \sum_s \dot{m}_s \quad \sum_e \dot{m}_e = \sum_s \dot{m}_s \quad \left[\frac{kg}{s} \right] \quad (6)$$

Para el caso de los equipos de combustión cabe recordar que el balance de masa se realiza, por una parte, con el agua y, por otra parte, la mezcla gas natural y aire de entrada que a la salida serán gases de combustión. En este último caso, al ocurrir una combustión, el balance de materia se realiza de manera elemental. Por ejemplo, la cantidad que entre de carbono en forma de gas natural saldrá en forma de inquemados y como dióxido de carbono.

4.4 Balance de energía

Una vez se tienen los balances de masa definidos, se realizan los balances de energía a los diferentes volúmenes de control.

La fórmula general del balance de energía por unidad de tiempo, antes de aplicar cualquier simplificación, es la siguiente:

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \sum_e \dot{m}_e \left(h_e + \frac{C_e^2}{2} + gz_e \right) - \sum_s \dot{m}_s \left(h_s + \frac{C_s^2}{2} + gz_s \right) \quad [kW] \quad (7)$$

Donde

- \dot{Q}_{vc} es el término correspondiente a pérdidas de calor.
- \dot{W}_{vc} es el término correspondiente a trabajo por unidad de tiempo
- h_e es la entalpía específica de la corriente entrante al volumen de control.
- $\frac{C_e^2}{2}$ es el término de la energía cinética de la corriente entrante al volumen de control.
- gz_e es el término de la energía potencial de la corriente entrante al volumen de control
- h_s es la entalpía específica de la corriente saliente del volumen de control.

Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.

- $\frac{C_s^2}{2}$ es el término de la energía cinética de la corriente saliente del volumen de control.
- gz_s es el término de la energía potencial de la corriente saliente del volumen de control

Como en el caso de estudio, se supone despreciable la influencia de la energía cinética y la energía potencial, esta se puede simplificar del siguiente modo:

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \sum_e \dot{m}_e(h_e) - \sum_s \dot{m}_s(h_s) \quad [kW] \quad (8)$$

En el caso de los balances de energía, existen dos situaciones: para el almacenamiento se supone una situación transitoria y para el resto de volúmenes de control una situación estacionaria. Así, las expresiones correspondientes son las siguientes:

- Transitoria: se corresponde con la ecuación (8).
- Estacionaria:

$$0 = \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \sum_e \dot{m}_e(h_e) - \sum_s \dot{m}_s(h_s) \quad [kW] \quad (9)$$

De cara al cálculo de entalpías específicas de cada corriente se calcularán de diferente forma en función de la sustancia en cuestión. Para el caso del agua, como se ha dicho en las hipótesis, se trata como una sustancia incompresible. Por ello, las entalpías correspondientes al agua se podrán calcular con la ecuación (10),

$$h = C_w T \quad \left[\frac{kJ}{kg} \right] \quad (10)$$

Donde C_w es el calor específico del agua y T la temperatura de la corriente correspondiente. Con ello, y suponiendo el calor específico constante la diferencia de entalpías se calcula de la siguiente forma

$$h_e - h_s = C_w(T_e - T_s) \quad \left[\frac{kJ}{kg} \right] \quad (11)$$

La otra sustancia existente en el sistema es la mezcla de gas natural y aire a la entrada que ya en la salida son gases de escape. Para las entalpías de cada corriente de este tipo, se deben de tener en cuenta las entalpías de formación, representadas por h_f^0 , de cada compuesto ya que las entalpías se calculan con la siguiente ecuación:

$$h_i = h_f^0 + \left(h(T) - h(T_{ref}) \right) \left[\frac{kJ}{kg} \right] \quad (12)$$

Donde $h(T)$ es la entalpía del compuesto en cuestión a la temperatura T de la corriente y $h(T_{ref})$ es la entalpía a la temperatura de referencia definida como 25°C.

Como lo que se tiene en las diferentes corrientes son mezclas de compuestos, la entalpía de la mezcla será función de todas las entalpías y se calculará para una mezcla de “n” compuestos como se indica en la ecuación (13). Esta ecuación indica que la entalpía de una mezcla es función de la entalpía de cada compuesto y su fracción molar.

$$h = \sum_i^n y_i h_i \left[\frac{kJ}{kg} \right] \quad (13)$$

En cuanto al bloque de almacenamiento térmico se refiere, es interesante plantear la cantidad de energía que se lleva a la carga del depósito y la cantidad de éste que se descarga. Es por ello, que estas cantidades de energía se calculan de diferente forma en función del modo de funcionamiento que esté ocurriendo.

- Si el modo de funcionamiento es de carga:

$$m_{TANQUE} C_w (T_{TANQUE_i} - T_{TANQUE_{i-1}}) = C_p [CAU_5 T_{MED} - (CAU_5 - CAU_{13}) T_{DOWN} - CAU_{13} T_{UP}] + Q_{loss} \quad (14)$$

Donde el primer término indica la energía almacenada en el tanque, el segundo es la cantidad de energía llevada a almacenamiento y por último el término de pérdidas. En cuanto a nomenclatura se refiere,

- m_{TANQUE} masa del tanque de almacenamiento.
- C_w calor específico.
- T_{TANQUE_i} y $T_{TANQUE_{i-1}}$ son las temperaturas del tanque en dichos instantes.

- El CAU_5 hace referencia a la cantidad de agua que entra en el tanque por la parte superior y la temperatura de dicha corriente es T_{MED} .
- El CAU_{13} hace referencia a la cantidad de agua que sale del tanque por la parte superior y la temperatura de dicha corriente es T_{UP} .
- El término que contempla la diferencia entre CAU_5 y CAU_{13} es la fracción de caudal que sale por la parte inferior. T_{DOWN} es la temperatura de esta corriente inferior.
- Si, por el contrario, el modo de funcionamiento de la instalación es de descarga, la cantidad de energía cedida desde el tanque de almacenamiento térmico se calcula de la siguiente manera.

$$m_{TANQUE}C_w(T_{TANQUE_i} - T_{TANQUE_{i-1}}) = C_wCAU_{13}(T_{MED} - T_{UP}) + Q_{loss} \quad (15)$$

Donde la nomenclatura del primer término es la misma que la anterior pero la del segundo término es diferente.

- El CAU_{13} es igual para la corriente entrante y la saliente. El modo de descarga activa una bomba que succiona todo el caudal y solo permite una salida. La T_{UP} es la temperatura correspondiente a esa corriente de salida y T_{MED} a la de entrada.
- Si no hay carga o descarga, este balance de energía es nulo.

Así, se obtienen todos los valores necesarios para realizar el balance de energía correspondiente que permiten calcular las pérdidas que se generan en todos los equipos de la instalación. Una vez se tiene el balance de energía realizado, se procede a calcular los rendimientos de cada equipo de la instalación con las siguientes expresiones.

Tabla 14: Rendimientos de volúmenes de control.

Equipo	Rendimiento energético
Caldera	$\frac{Q_{caldera\ agua}}{F_{Caldera_{PCI}}}$
Stirling	$\frac{Q_{CHP\ agua} + E}{F_{CHP_{PCI}}}$
Intercambiador	$\frac{Q_{ACS}}{\text{Calor aportado}}$
General	$\frac{Q_{ACS} + Q_{CAL} + E + Q_{Atma}}{F_{TOT}}$

Donde

- $Q_{caldera\ agua}$ es el calor aportado al agua en la caldera.
- $F_{caldera_{PCI}}$ es la energía procedente del combustible en la caldera.
- $Q_{CHP\ agua}$ es el calor aportado al agua en el motor Stirling.
- $F_{CHP_{PCI}}$ es la energía del combustible en el motor Stirling.
- Q_{ACS} es el calor aportado al ACS.
- Q_{CAL} es el calor aportado a calefacción.
- Q_{Atma} es el calor descargado desde el almacenamiento.
- F_{TOT} es la energía aportada por el combustible total.
- E es la electricidad generada en el motor Stirling.

Los datos utilizados en cada fórmula de la tabla anterior, hacen referencia a los kWh obtenidos al cabo de una semana. En el rendimiento general de la instalación se incluye el almacenamiento pero este es muy pequeño en una semana. En esta tabla no están englobados todos los equipos de la instalación ya que incluir el aerotermo en la tabla de cálculo de rendimientos no tiene sentido por ser un equipo disipativo.

Por último, si bien no se va a realizar un análisis exergético total de la instalación; sí que se va a realizar el cálculo del rendimiento exergético de ésta. Para ello, se toman las mismas hipótesis de cálculo previamente descritas y se engloba el análisis a toda la instalación como una caja negra.

Si se trata el agua como sustancia incompresible, el cálculo de la exergía de las corrientes de agua se puede calcular como se indica en la ecuación (16). Cabe destacar que se toma como referencia la temperatura del agua de alimentación como T_{amb} y en ella todas las temperaturas se introducen en Kelvin.

$$b = C_w(T - T_{amb}) - C_w T_{amb} \ln\left(\frac{T}{T_{amb}}\right) \quad \left[\frac{kJ}{kg} \right] \quad (16)$$

Por otra parte, en lo que a combustible se refiere, la exergía se aproxima a la exergía química de la mezcla ya que la exergía termomécanica es despreciable frente a ésta. Con ello, la exergía química se calcula utilizando las exergías químicas estándar ($b_{ch,i}$) teniendo en cuenta la fracción molar de cada compuesto en la mezcla. Así, la exergía específica del combustible se calcula tal que,

Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.

$$b_{cble} = \sum_i^n y_i b_{ch,i} \left[\frac{kJ}{kg \text{ cble}} \right] \quad (17)$$

Con ello, para el cálculo del rendimiento exergético, será necesario conocer la exergía correspondiente a los efectos útiles de agua caliente sanitaria y calefacción. Por otra parte, como la electricidad es un efecto útil se considera también en este rendimiento. Así se tiene,

$$\psi = \frac{B_{ACS} + B_{CAL} + E + B_{Alma}}{\dot{m}_{cble} b_{cble}} \quad (18)$$

Donde las exergías correspondientes a ACS, calefacción y almacenamiento son las siguientes:

$$B_{ACS} = \dot{m}_{ACS} (b_{ACS} - b_{\text{Agua Alimentación}}) [kW] \quad (19)$$

$$B_{CAL} = \dot{m}_{aero} (b_{\text{sale aero}} - b_{\text{entra aero}}) [kW] \quad (20)$$

$$B_{alma} = CAU_{13} (b_{\text{entra alma}} - b_{\text{sale alma}}) [kW] \quad (21)$$

Por otro lado, debido a que existe un consumo de gas en la instalación, es importante saber qué niveles de emisiones estamos produciendo. Por ello, se hace uso de un factor de conversión que facilita el Ministerio hacia la transición energética y que se ha supuesto 0,182 kg CO₂/kWh Gas Natural [34].

Con todo lo anterior se realizarán los cálculos correspondientes a la fase experimental.

4.5 Calibración

Como se ha comentado con anterioridad, después de la fase experimental es el momento de calibrar el modelo informático diseñado para simular la instalación. Para este proceso se decide realizar una calibración de dos pasos y es por ello por lo que se van a necesitar dos funciones de coste.

Para el primer paso de la calibración el coeficiente de variación del error cuadrático medio (CV(RMSE)) de las diferentes variables a calibrar viene definido en la ecuación (22) y establece las diferencias entre los resultados de la simulación y los del ensayo. Los resultados comparados para verificar el ajuste de la simulación son, por una parte, las temperaturas de salida del motor Stirling y de la caldera, y los consumos de fuel en estos dos equipos por otra. La función de coste para este primer paso de la calibración viene definida por la ecuación (23).

Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.

$$CV(RMSE) = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_{sim} - X_{real})^2} / n}{\bar{X}_{real}} \quad (22)$$

$$CV(RMSE) = \frac{CV(RMSE)_{T_{CHP}} + CV(RMSE)_{T_{CALDERA}} + CV(RMSE)_{F_{CHP}} + CV(RMSE)_{F_{CALDERA}}}{4} \quad (23)$$

En cuanto a la nomenclatura se refiere,

- X_{sim} es el valor de la variable simulada en el instante i correspondiente.
- X_{real} es el valor medido de la variable real en el instante i correspondiente.
- n es el número de instantes de tiempo total que estén siendo simulados.
- \bar{X}_{real} es el promedio de la variable de la cual se esté calculando el error.
- T_{CHP} temperatura de impulsión del motor Stirling
- $T_{CALDERA}$ temperatura de impulsión de la caldera.
- F_{CHP} consumo de gas en el motor Stirling.
- $F_{CALDERA}$ consumo de gas en la caldera.

Los promedios utilizados para la calibración aparecen detallados en la tabla 15.

Tabla 15: Valores promedio de variables del primer paso de calibración.

Variable	Unidades	\bar{X}_{real}
T_{CHP}	°C	51,55
$T_{CALDERA}$	°C	49,54
F_{CHP}	KWh (según PCI)	7,47
$F_{CALDERA}$	KWh (según PCI)	27,74

Para el segundo paso de la calibración, los valores simulados y reales correspondientes al calor descargado y consumo de caldera que se comparan no son los correspondientes a cada timestep si no que se evalúan los valores al cabo de 48 horas. Por ello, varía la fórmula que compara los valores reales y simulados y en este caso se utiliza la ecuación (24). Por otra parte, la función de coste para este paso de la calibración se muestra en la ecuación (25). En ella se mantienen los errores individuales de las variables del primer paso de calibración y se introducen los correspondientes a calor descargado desde el almacenamiento y consumo de gas total.

Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.

$$CV(RMSE) = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\sum_{i=1}^n X_{sim} - \sum_{i=1}^n X_{real})^2}}{\bar{X}_{real}} \quad (24)$$

$$CV(RMSE) = \frac{(CV(RMSE)_{T_{CHP}} + CV(RMSE)_{T_{CALDERA}} + CV(RMSE)_{F_{CHP}})}{6} + \frac{CV(RMSE)_{F_{CALDERA}} + CV(RMSE)_{F_{Caldera_{tot}}} + CV(RMSE)_{Alma}}{6} \quad (25)$$

Donde,

- $F_{Caldera_{tot}}$: suma de consumo instantáneo de gas en la caldera.
- $Alma$: suma de calor descargado del tanque de almacenamiento.

Con ello, hay que definir los valores reales de las variables correspondientes a este paso de la calibración. En la siguiente tabla se definen los valores del experimento real que se han obtenido respecto al consumo de gas en la caldera y la energía cedida del almacenamiento tras 48 horas de ensayo. Los valores promedio del resto de variables son los mismos que los usados en la primera calibración.

Tabla 16: Valores promedio de las variables del segundo paso de calibración tras 48 horas.

Variable	Unidades	\bar{X}_{real}
$F_{caldera_{tot}}$	kWh (según PCI)	303,20
Alma	kWh	2,43

Con los resultados de este paso de la calibración se da por finalizado el procedimiento de calibración.

4.6 Optimización

Una vez se tiene el modelo calibrado lo posterior será definir el procedimiento de optimización. Como se ha mencionado, se va a realizar una optimización multiobjetivo con la intención de reducir el coste de operación de la instalación y maximizar el rendimiento exergético. Para ello, se deben definir las ecuaciones que hagan referencia a esos objetivos y las variables que van a ser modificadas para obtener dicha mejora.

4.6.1 Funciones objetivo y variables de optimización

La optimización multiobjetivo de la instalación híbrida se realiza con la intención de maximizar el rendimiento económico y exergético de los equipos. Desde el punto de vista económico, el objetivo viene determinado por la ecuación (26), de tal forma que se minimiza el coste operacional de la instalación en el periodo de una semana. De este modo, el software que realiza la optimización irá modificando las variables de optimización con el objetivo de disminuir el valor de esta función.

$$\min Coste = \sum_{t=0}^{10.080} (F_{CHP} + F_{CALDERA}) \cdot c_F - E \cdot c_E \quad [€] \quad (26)$$

Donde F_{CHP} y $F_{CALDERA}$ es el consumo de fuel en kWh en el motor Stirling y en la caldera respectivamente, E son kWh de electricidad generada en el motor de cogeneración y, por último, c_F y c_E es el coste del fuel y de la electricidad en €/kWh.

En el caso del segundo objetivo, se busca maximizar el rendimiento exergético de la instalación. Este rendimiento viene expresado en la ecuación (27).

$$\max(\psi) = \frac{\sum_{t=0}^{10.080} (E + B_{cal} + B_{ACS} + B_{Alma})}{\sum_{t=0}^{10.080} ((F_{CHP} + F_{CALDERA}) \cdot X_{ex-e})} \quad (27)$$

Si bien la ecuación anterior busca maximizar el rendimiento exergético de la instalación, de cara a implementar esta función objetivo en el software utilizado para las optimizaciones se debe realizar un cambio. El software modifica las variables de optimización tratando de minimizar las funciones objetivo, por lo tanto, si se quiere maximizar la función anterior, habrá que plantearla como mínima. Por lo que la función objetivo para este caso será la siguiente.

$$\max(\psi) = \min(1 - \psi) \quad (28)$$

Las exergías correspondientes a la calefacción y al agua caliente en cuestión se calculan con la ecuación correspondiente a las exergías de sustancias incompresibles indicada en la ecuación (14) definida previamente que aquí se recuerda.

$$B = \dot{m} \left[C_w (T - T_{amb}) - C_w T_{amb} \ln \left(\frac{T}{T_{amb}} \right) \right] \quad [kW]$$

Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.

Por último, en la ecuación del rendimiento exergético aparece el término X_{ex-e} que es el factor de conversión de energía a exergía del gas natural. Este valor ronda el valor de 1,04 kWh exergía química/kWh PCI calculado para la composición de gas natural facilitada por ENAGAS [33] para la semana de ensayo experimental.

Por otra parte, el criterio medioambiental que busca reducir las emisiones de gases de efecto invernadero no se especifica como tal. El hecho propuesto para reducir el coste de operación de la instalación, implica una reducción del gas consumido y, por lo tanto, una menor cantidad de emisiones de CO₂.

Con las funciones objetivo definidas para el proceso de optimización, sólo queda especificar las variables de control que se quieren optimizar. Estas variables tienen gran importancia en el funcionamiento de la instalación en aspectos tanto termodinámicos como económicos. Es por ello, que la optimización se aborda en busca de los valores de estas variables que optimicen el funcionamiento de la instalación. Las variables de optimización que se contemplan son: la temperatura de retorno al motor Stirling (T_{ret_CHP}), la diferencia de temperaturas entre la corriente de mezcla (T_{MED}) y la temperatura del depósito (T_{TANQUE}) que autoriza la carga y que detiene la carga y, por último, la diferencia de temperaturas entre la temperatura del depósito y 40°C que arranca y para la descarga. Entre paréntesis se muestran las abreviaciones con las que están definidas dichas temperaturas en la imagen 17. En la tabla 17 se presentan las variables que van a ser optimizadas, así como, su rango de variación.

Tabla 17: Variables de optimización y rango de variación de estas.

Variable	Unidades	Valor mínimo	Valor máximo
T_{ret_CHP}	°C	30	50
ΔT_{carga}^{ON}	°C	0	20
ΔT_{carga}^{OFF}	°C	0	10
$\Delta T_{descarga}^{ON}$	°C	0	20
$\Delta T_{descarga}^{OFF}$	°C	0	10

Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.

Como se ha mencionado, para este caso, la instalación se va a optimizar con el objetivo de minimizar el coste de operación y maximizar el rendimiento exergético de la instalación. Debido a que el algoritmo utilizado busca minimizar las funciones objetivo, éstas serán las siguientes:

$$\text{minimizar} = \begin{cases} f_1(x) = \text{Coste} \\ f_2(x) = (1 - \Psi) \end{cases} \quad (29)$$

Con la intención de obtener la mejor solución que optimice ambos objetivos, como se ha mencionado anteriormente, se busca la curva de Pareto.

Existen diferentes criterios para seleccionar los puntos que formen parte de la frontera de Pareto, basados en la experiencia a la hora de elegir las mejores soluciones para sus propios requerimientos, teniendo en cuenta los diferentes objetivos, de acuerdo la importancia de algunos indicadores o identificando la mínima distancia al punto ideal. Esta última es la que se ha elegido para la optimización en cuestión.

Para facilitar la comparación entre los diferentes objetivos, estos son normalizados. Los objetivos que se estudian en este proyecto han sido normalizados con la ecuación (30):

$$x^* = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (30)$$

Donde

- x es el valor de objetivo a normalizar.
- x_{min} es el resultado de la optimización mínimo del objetivo a normalizar.
- x_{max} es el resultado de la optimización máximo del objetivo a normalizar.

Como en el proyecto se han definido dos objetivos, la fórmula anterior dará por resultados x^* e y^* como valores normalizados de los objetivos.

Con todo ello, el punto ideal que minimiza las dos funciones objetivo será aquel conjunto de valores de las variables de optimización que tengan asociados los valores normalizados de los objetivos y minimicen la ecuación (31).

$$d = \sqrt{x^{*2} + y^{*2}} \quad (31)$$

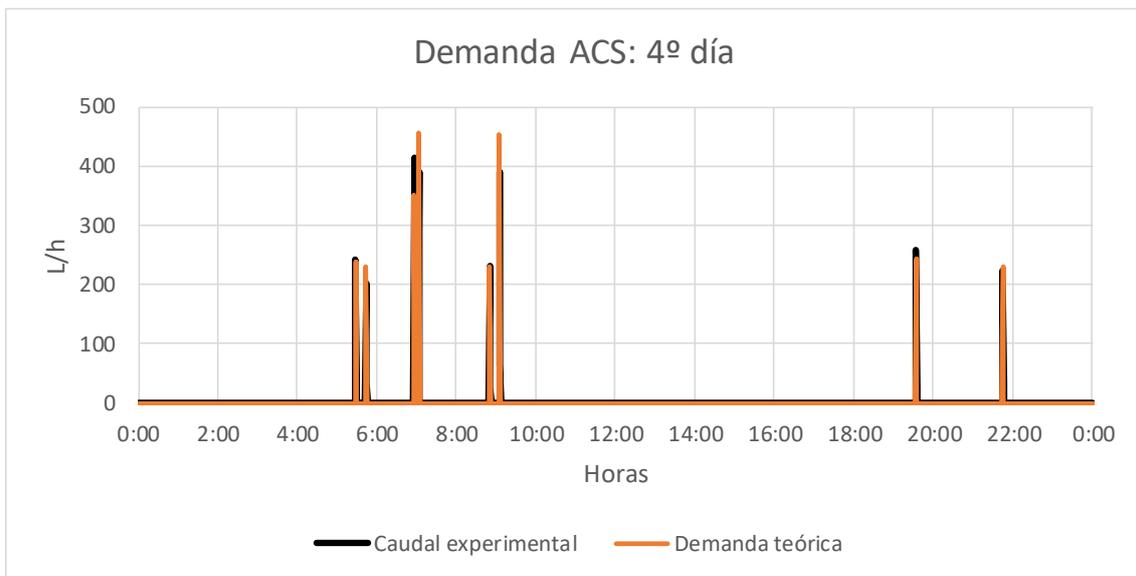
5 DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS

En el apartado que sigue se presentan los resultados obtenidos en las diferentes fases del proyecto. Primeramente, se presentan los resultados obtenidos en el ensayo de la semana de máxima demanda. A continuación, se presentan las calibraciones y las optimizaciones correspondientes de la instalación.

5.1 Ensayo experimental

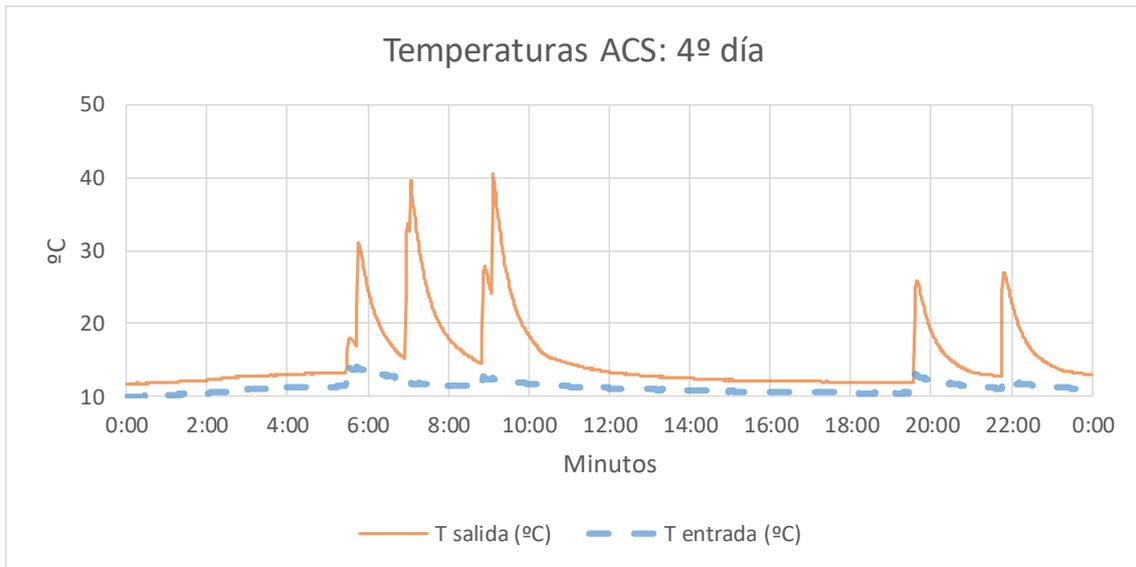
En lo que sigue se van a mostrar los resultados obtenidos en el ensayo de máxima demanda. Como se ha mencionado en la definición de los ensayos, la demanda de ACS se ha definido cada minuto y la demanda de calefacción, hora a hora.

Con el objetivo de mostrar que la instalación da el caudal necesario a cada hora, se va a mostrar un día de la semana de manera que se observe la tendencia teórica y la real. Además, también se facilita la gráfica 7 donde se observa cómo se calienta el agua.



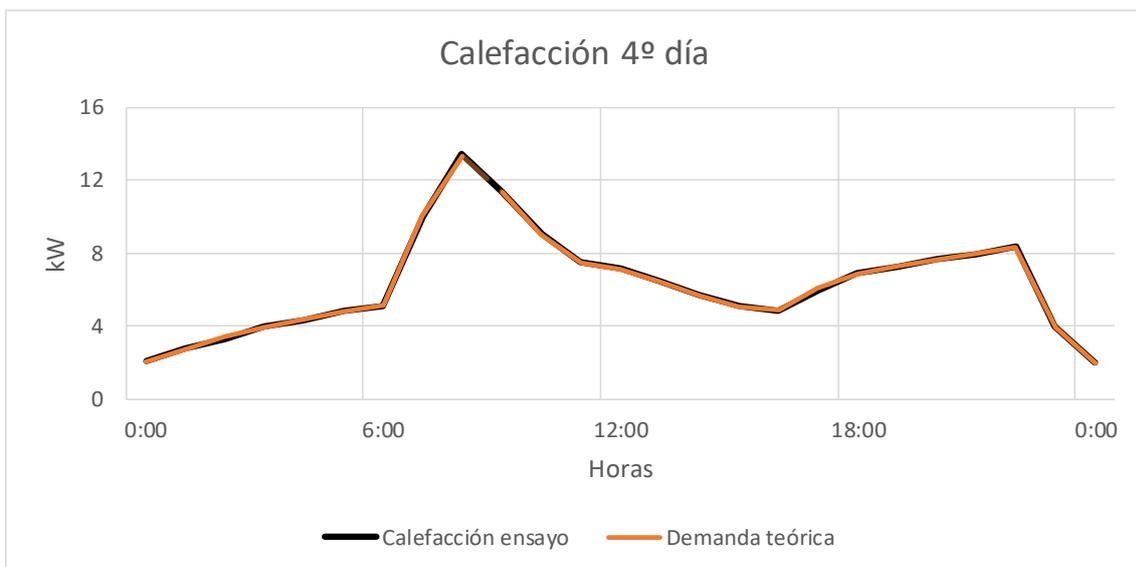
Gráfica 6: Caudales ACS experimentales vs teóricos.

Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.



Gráfica 7: Temperaturas ACS.

En el caso de la calefacción, se ha decidido mostrar la siguiente gráfica que permite ver cómo la instalación disipa en el fan-coil la demanda existente a cada hora.



Gráfica 8: Calefacción experimental vs teórica.

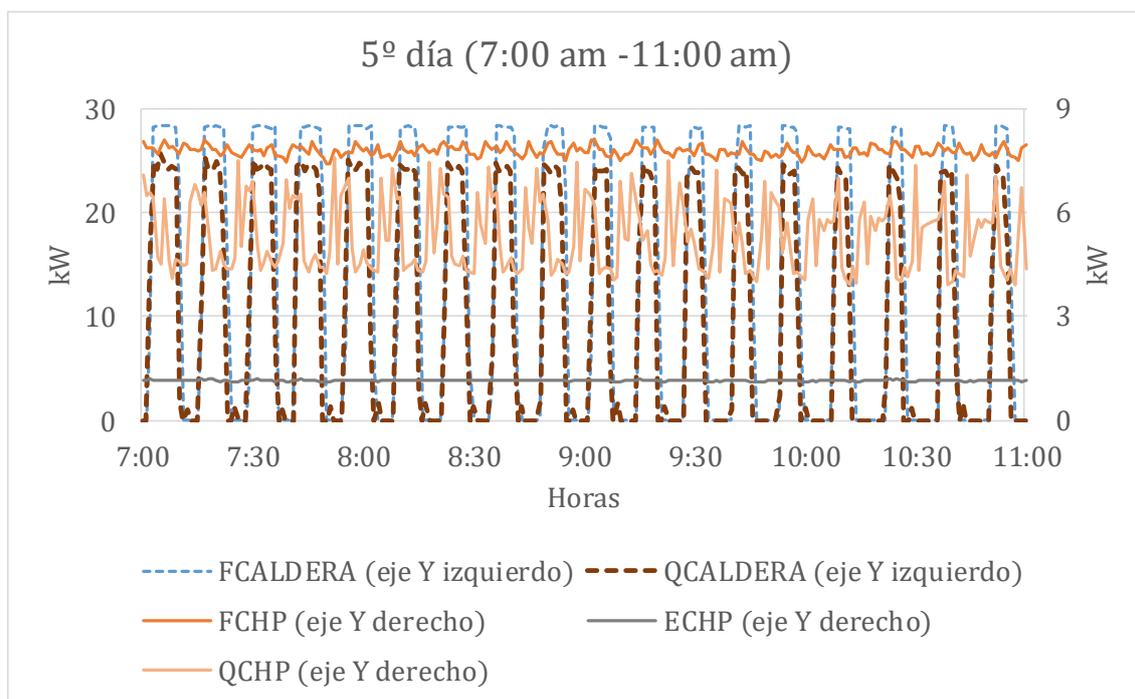
Con todo ello, se puede observar que ambas demandas son suplidas por la instalación de manera adecuada.

Después de terminar el ensayo de una semana, se observó que el caudal teórico de ACS total era de 820,7 L y la instalación había dado un total de 859,4 L/h, es decir, se produjo un error de 4,72 % respecto al teórico. Así se concluye que la instalación es capaz de dar el caudal adecuado en el momento preciso.

Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.

En cuanto a la demanda de calefacción se refiere, la demanda total al cabo de la semana era de 1288,3 kWh y la energía disipada en el fan-coil fue de 1291,2 kWh. Esto supone un error de 0,23% y por lo tanto permite manifestar con seguridad que el sistema es capaz de suplir las demandas que se presenten en cada momento.

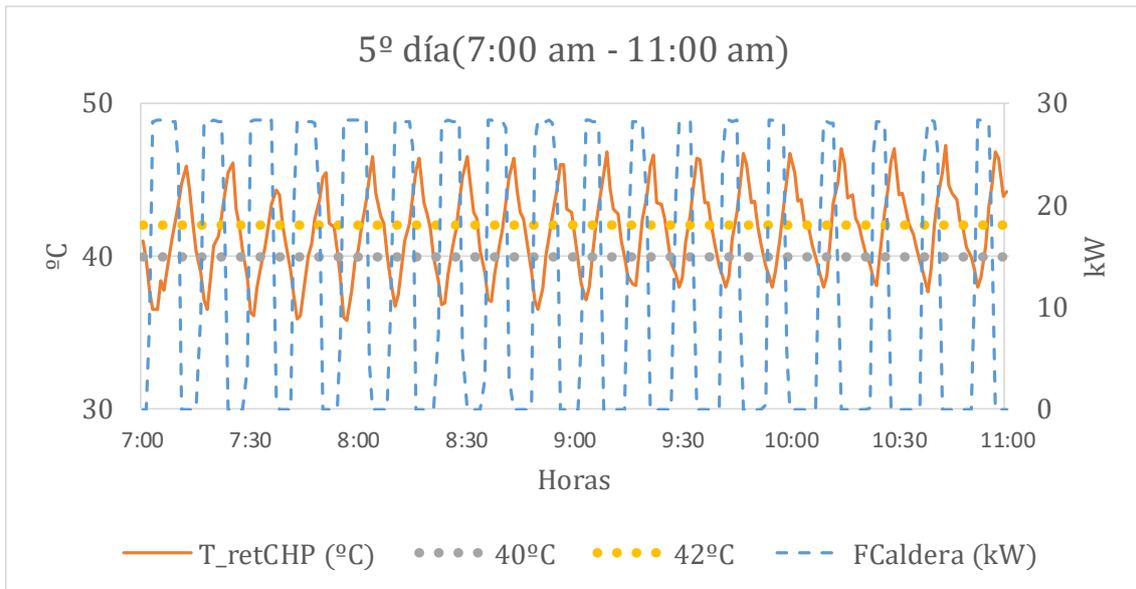
Una vez que queda explicado el correcto funcionamiento de la instalación frente a las demandas de calefacción y ACS correspondientes, es necesario mostrar que la lógica de funcionamiento del ensayo se cumple también en el modo de operación de la caldera de condensación. Como se ha definido en la lógica de funcionamiento, la caldera entra en funcionamiento en función de la temperatura de retorno al motor Stirling (T_{RET_CHP}). Si esta temperatura es inferior a 40 °C, la caldera entra en operación y acompaña la producción térmica del motor. Este equipo funciona hasta que dicha temperatura de entrada al motor es superior a 42 °C, es entonces cuando se detiene. En la gráfica 9 que se muestra a continuación, se observa el funcionamiento de la caldera y el motor Stirling de manera conjunta.



Gráfica 9: Funcionamiento conjunto caldera y Stirling.

Para ver el correcto funcionamiento de la caldera se tiene la gráfica 10. En ella se marcan los límites de temperaturas y se muestra la temperatura de retorno al Stirling y el consumo de gas en la caldera, ya que es evidente que en el momento que empieza a quemar gas, esta comienza a funcionar. Debido al número de encendidos y apagados de la caldera tan grande, con el objetivo de mostrar que la operación de la caldera es correcto se ha decidido mostrar un intervalo de cuatro horas.

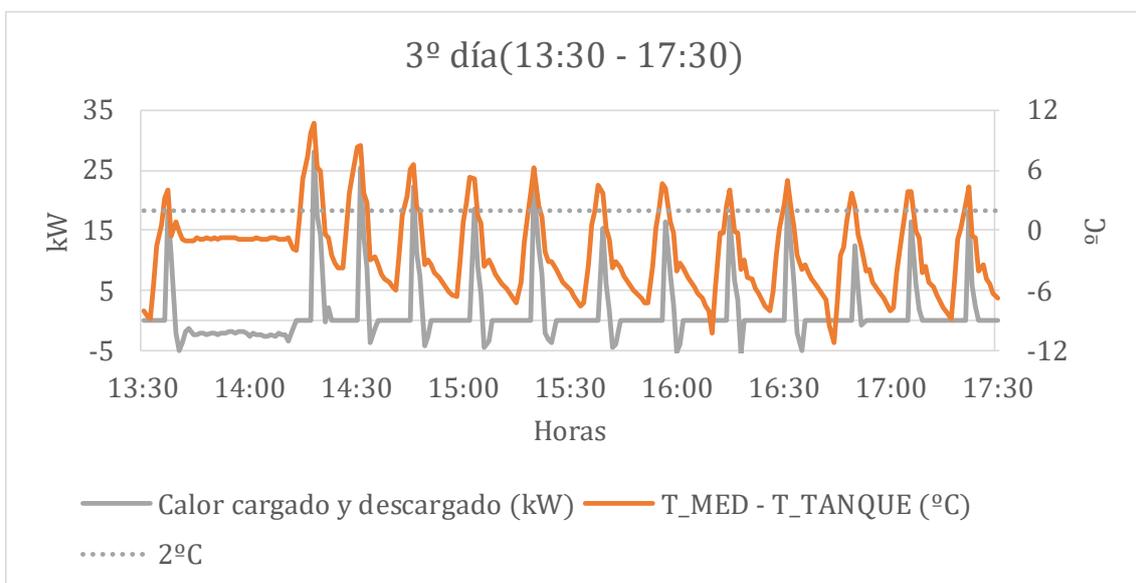
Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.



Gráfica 10: Funcionamiento de caldera.

Una vez descritos los modos de funcionamiento de la instalación en cuanto a producción y cumplimiento de la demanda de cada instante, falta por comprobar que el funcionamiento de la carga y descarga del almacenamiento térmico funciona correctamente. Para ello, primeramente, se va a mostrar el funcionamiento de la carga.

Como se ha definido previamente, el proceso de carga se produce en caso de que la diferencia de temperaturas de la mezcla procedente del intercambiador de ACS y el aerotermo (T_{MED}) y la temperatura del depósito (T_{TANQUE}) sea mayor que 2 °C. Este proceso continúa hasta que dicha diferencia de temperaturas es inferior a 0 °C.

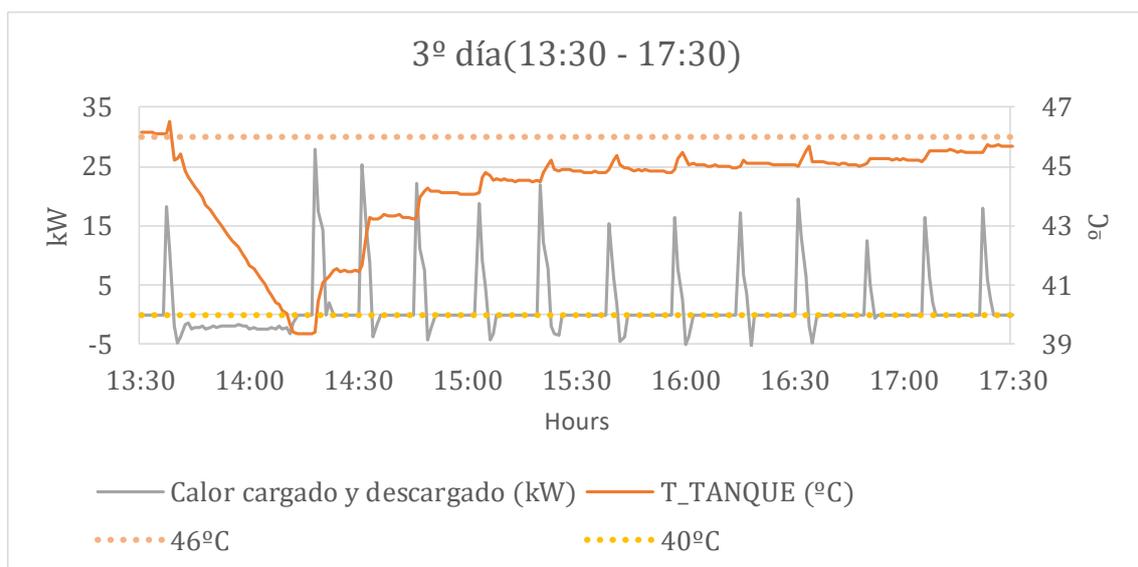


Gráfica 11: Condiciones carga.

Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.

El proceso de carga ocurre cuando el calor enviado a almacenamiento es positivo. Cabe destacar la situación que ocurre siempre que finaliza el proceso de carga. Se puede observar que existe un breve lapso de tiempo en el cual existe una cantidad de calor negativa. Esto es debido a que las válvulas que operan permitiendo la carga y la descarga son de apertura y cierre lentos por lo que, desde que se manda la señal de fin de proceso de carga hasta que se cierra la válvula existe una cantidad de calor negativa. Este signo negativo es debido a que cuando teóricamente acaba la carga, la temperatura de entrada al depósito es menor que la del depósito y por tanto es negativa.

Por otra parte, la descarga del calor almacenado se produce siempre que la temperatura en el depósito sea mayor que 46 °C. En ese momento se activa la bomba de descarga y comienza a ceder calor el almacenamiento. Así pues, en la siguiente gráfica, se puede observar un periodo de descarga en el cual el calor de almacenamiento es negativo.



Gráfica 12: Condiciones descarga.

Se observa que el proceso de descarga continúa hasta que la temperatura del depósito baja de los 40 °C. En ese momento deja de existir descarga y por lógica de funcionamiento se pasa a carga.

De este modo se concluye que la lógica de funcionamiento se ha cumplido a lo largo del ensayo de manera correcta.

Con todo ello, los resultados del ensayo experimental son los siguientes:

Tabla 18: Resultados ensayo experimental.

Descripción	Ensayo
Fuel consumido en Stirling según PCI (kWh)	1.285,9
Fuel consumido en Caldera según PCI (kWh)	1.108,5
Fuel total según PCI (kWh)	2.394,4
Producción calorífica en Stirling (kWh)	880,9
Producción eléctrica en Stirling (kWh)	191,6
Eficiencia térmica del Stirling	68,50%
Eficiencia eléctrica del Stirling	14,90%
Producción térmica de la Caldera (kWh)	849,0
Eficiencia de la caldera	76,59%
Eficiencia global	63,36%
Horas en operación del Stirling	168
Ciclos ON/OFF de caldera	486
Calor para ACS (kWh)	20,7
Calor para calefacción (kWh)	1291,2
Pérdidas (kWh)	890,9
Eficiencia exergetica	13,30%
Emisiones CO2 (kg)	435,8
Energía cedida por el almacenamiento (kWh)	13,7

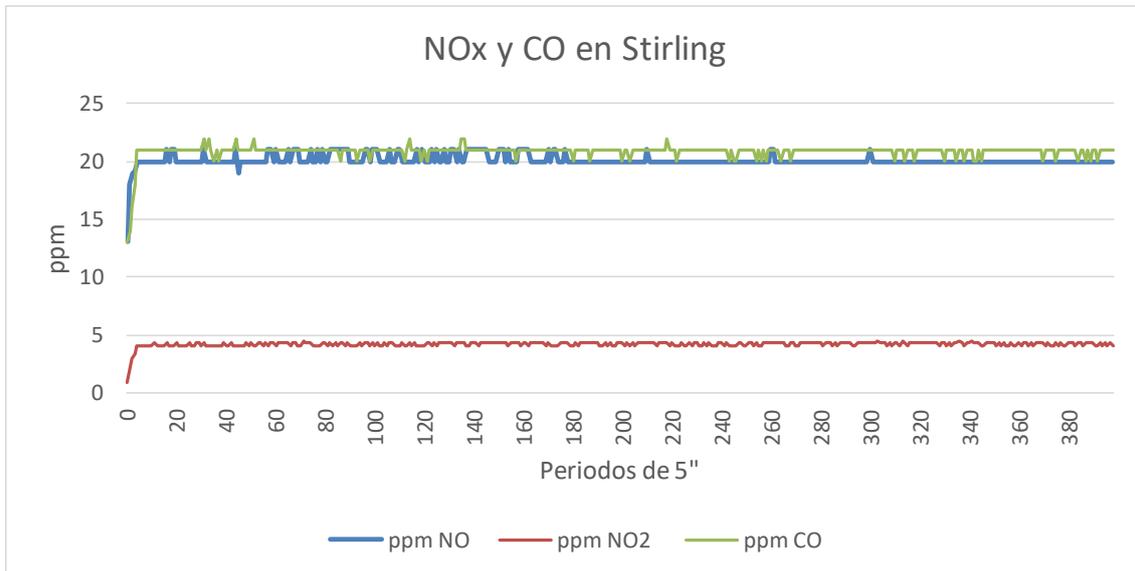
En la tabla 18 se observan los consumos de gas y las producciones de la caldera y el motor Stirling. Con el objetivo de ver la eficiencia energética de estos equipos se calculan éstas teniendo en cuenta la producción y el consumo de cada equipo. Estas eficiencias por equipos se han calculado en base a los datos de producción y consumo totales de la semana, pero si bien el motor Stirling funciona en toda la semana y lo hace de manera estacionaria; la caldera, cuenta con 486 ciclos de encendidos y apagados lo cual supone situaciones transitorias y el rendimiento no se adecua al rendimiento de situaciones estacionarias.

Para calcular el rendimiento de la caldera en situaciones estacionarias, se estudian momentos puntuales del ensayo cuando la caldera lleva dos minutos funcionando, donde se supone que está operando de manera estacionaria. En estas situaciones los valores registrados por el SCADA de la instalación son aproximadamente de 27 kW de potencia según PCI aportados por el combustible y 24 kW de potencia absorbida por el agua. Esto supone un rendimiento en estas situaciones de 88,89%.

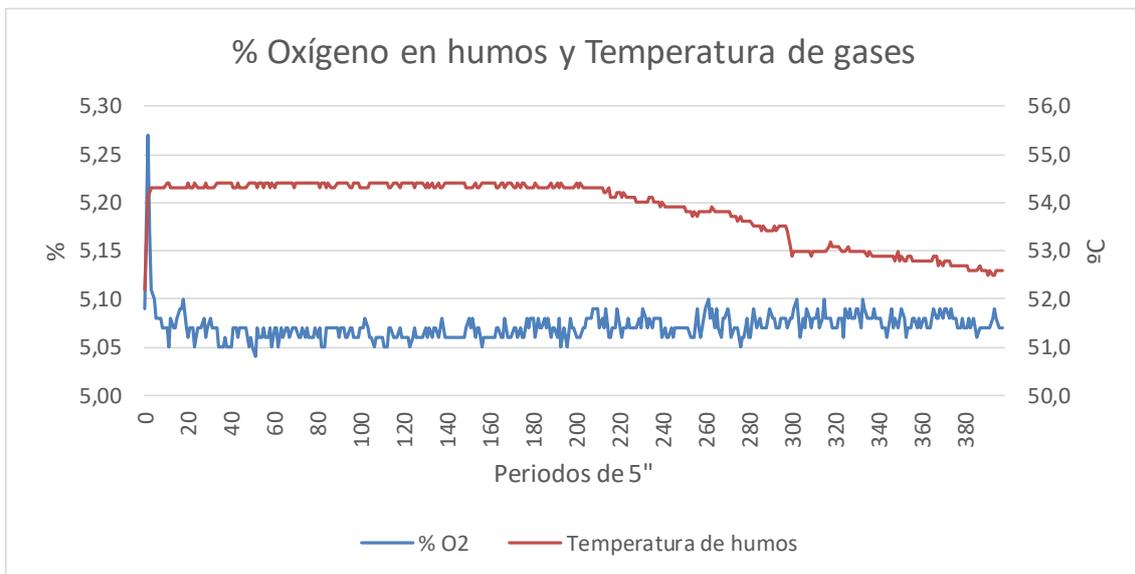
Para contrastar estos resultados se realizaron medidas en la chimenea con un análisis de humos que permitieran conocer la composición de los gases de escape y la temperatura de salida de éstos. Con las composiciones del gas natural en la tabla 12, el porcentaje de oxígeno en humos obtenido del análisis de humos, el caudal de gas consumido y la temperatura de los gases de

Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.

escape se calculó el rendimiento de la caldera de este modo y se obtuvo una correcta correspondencia entre valores. A continuación, se muestran los valores de emisiones en el motor Stirling y el oxígeno en humos y temperatura de los gases de salida.



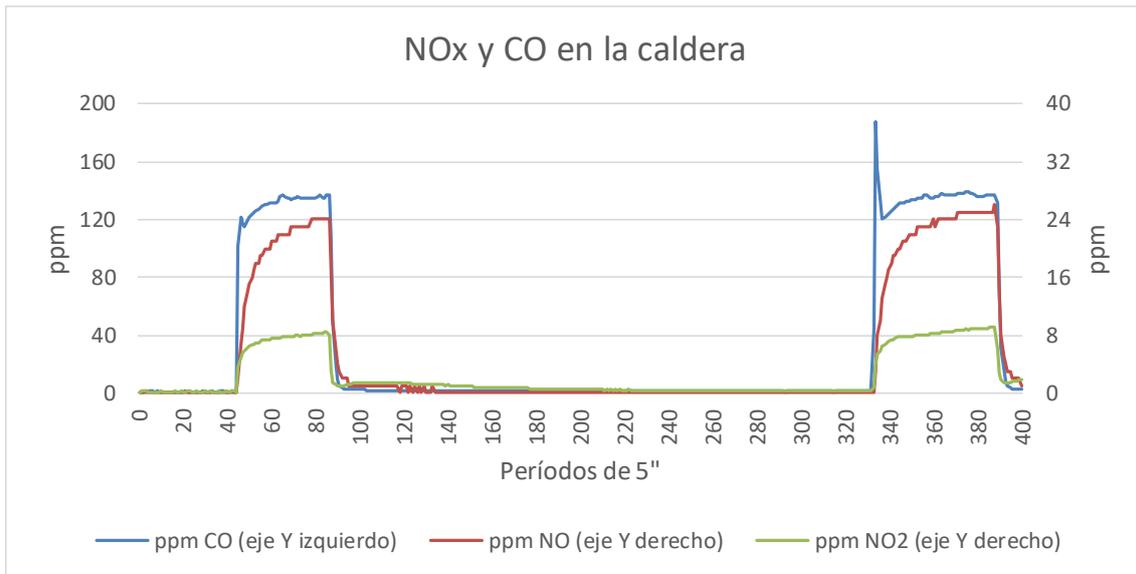
Gráfica 13: ppm de NOx y CO en el motor Stirling.



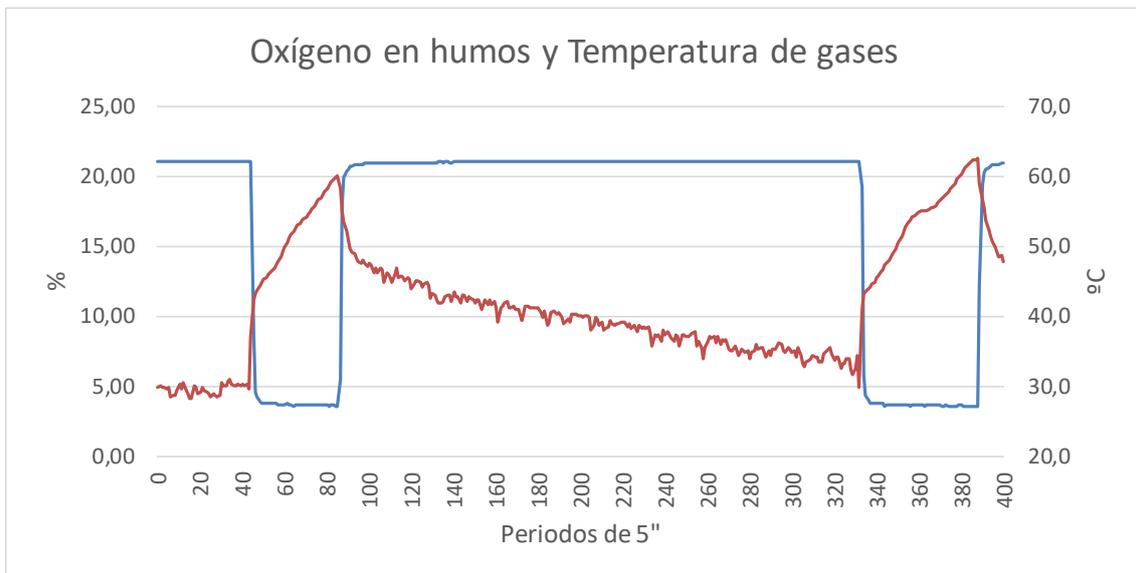
Gráfica 14: Oxígeno en humos y temperatura de gases de salida en el motor Stirling.

En el caso de la caldera se tiene lo siguiente:

Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.



Gráfica 15: ppm de NOx y CO en la caldera de condensación.



Gráfica 16: Oxígeno en humos y temperatura de gases salida en la caldera de condensación.

Como último apunte del análisis de humos, hay que destacar que el motor Stirling funciona con una combustión donde se utiliza un 32% de exceso de aire y en la caldera de condensación, este exceso es de 19%.

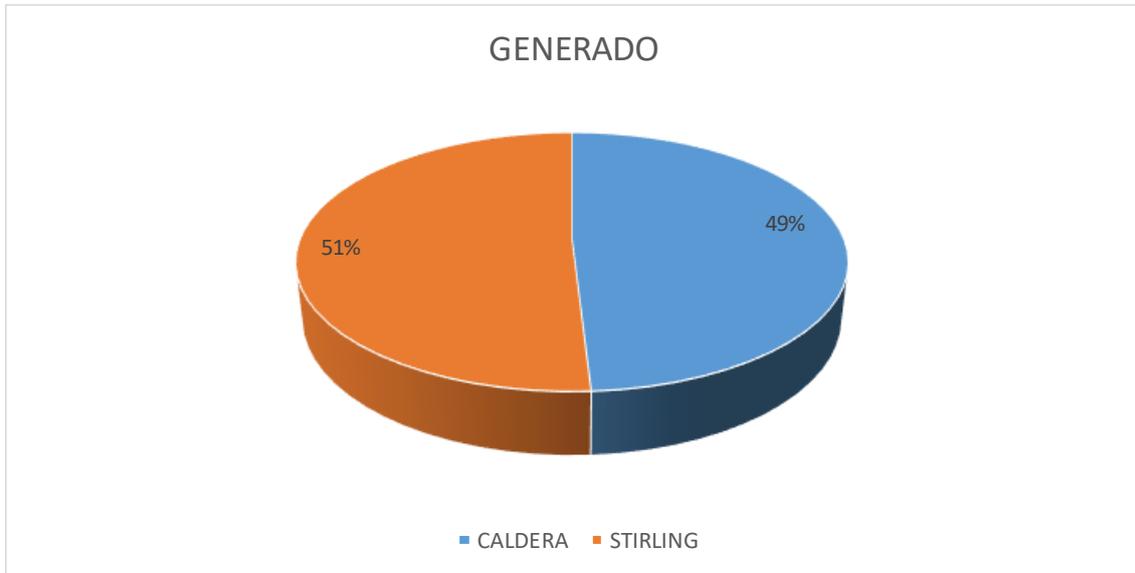
En las siguientes gráficas se presentan la procedencia del calor generado en la instalación y el destino de este calor distribuido en ACS y calefacción.

En el caso de la producción se puede apreciar que el motor Stirling estuvo durante las 168 horas de ensayo trabajando y consumiendo gas y su generación supuso un 51% de todo el calor producido en la semana. En el apartado de consumo, se observa que casi el total del calor

Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.

producido se destina a la calefacción ya que la demanda de esta es mucho mayor que la demanda de ACS.

En cuanto al almacenamiento se refiere, se puede observar que la cantidad de calor descargado es pequeña. Esto se debe a que las pérdidas de la instalación son grandes y, por ello, no se alcanzan las condiciones de descarga fijadas en la lógica de control en muchas ocasiones.



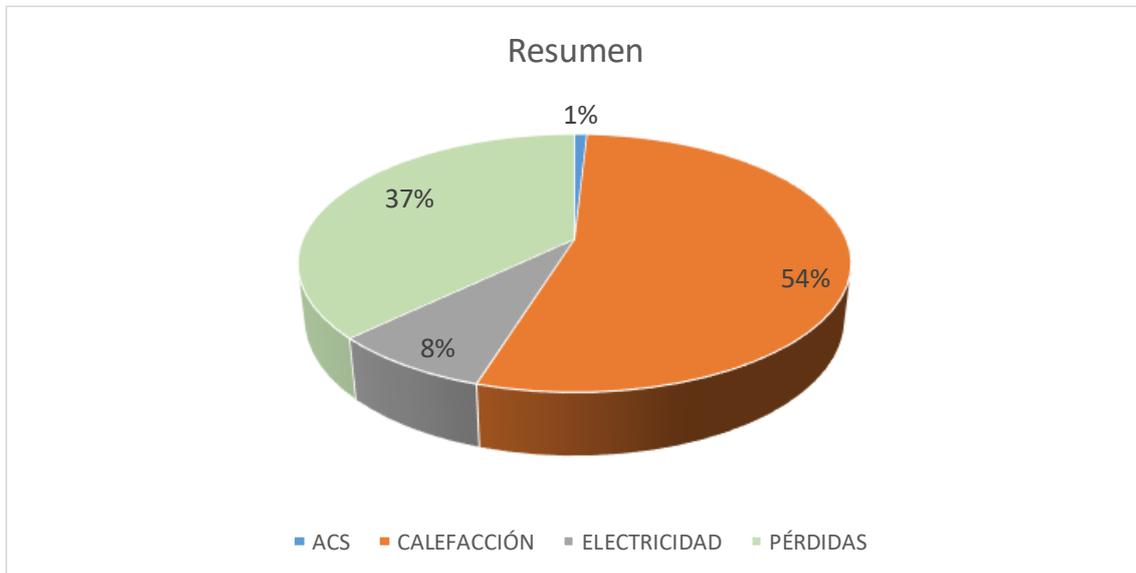
Gráfica 17: Procedencia del calor generado.



Gráfica 18: Destino del calor generado.

Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.

Por último, a modo de resumen de las cantidades útiles de energía y pérdidas en la instalación se muestra la gráfica 19. En ella se puede observar que existe un 37% de pérdidas en la instalación.



Gráfica 19: Resumen

5.2 Calibración

Una vez se tiene el ensayo finalizado es hora de diseñar el modelo Trnsys que permita simular la instalación real de manera correcta. Este diseño se realiza utilizando los diferentes Types señalados en la tabla 2 y se consigue que opere con la misma lógica de funcionamiento que la instalación real.

Para que esta simulación funcione de manera correcta y acompañada con la realidad, se realiza un proceso de calibración por etapas. Primeramente, se realiza una calibración que permita ajustar el funcionamiento de la simulación a la realidad y para ello se calibrará el consumo instantáneo de gas de los equipos de combustión y las temperaturas de salida de estos. Posteriormente, con el objetivo de ajustar las cantidades de consumo de gas total de la caldera y la cantidad de calor cedida desde el tanque de almacenamiento térmico se realiza otra calibración.

En la siguiente tabla se muestran los parámetros que se utilizan para realizar la primera calibración. Estos parámetros son el resultado de un análisis de sensibilidad desarrollado previamente que da por resultados los parámetros más influyentes. Por otra parte, aparecen detallados los coeficientes de pérdidas térmicas del compensador hidráulico y el tanque de almacenamiento térmico.

Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.

Tabla 19: *Parámetros de calibración.*

1^{er} PASO DE CALIBRACIÓN	UNIDADES
Capacidad de la caldera	W
Caudal de la bomba de la caldera	kg/s
Volumen del compensador hidráulico	m ³
Volumen del tanque de almacenamiento térmico	m ³
PCI del gas natural en motor Stirling	kWh/kg
Caudal másico de gas en motor Stirling	kg/s
Caudal de agua en el motor Stirling	kg/s
2^o PASO DE CALIBRACIÓN	UNIDADES
Coefficiente pérdidas de calor en Compensador Hidráulico	W/K
Coefficiente pérdidas de calor en tanque de almacenamiento térmico	W/K

Una vez que se han definido los parámetros que van a tomar parte en los diferentes pasos de la calibración se procede a indicar cuales han sido los resultados de la calibración.

Tabla 20: *Valores límites inferior, superior, inicial y calibrado.*

Nombre	Unidades	Límite Inf.	Límite Sup.	Valor inicial	Valor calibrado
Capacidad de la caldera	kW	25,35	28,02	26,70	26,70
Caudal de la bomba de la caldera	kg/s	0,28	0,31	0,29	0,30
Volumen del compensador hidráulico	m ³	0,02	0,50	0,05	0,12
Volumen del tanque de almacenamiento térmico	m ³	0,10	1,00	0,20	0,20
PCI del gas natural en motor Stirling	kWh/kg	10,48	15,71	13,10	13,09
Caudal másico de gas en motor Stirling	kg/s	1,04E-04	1,57E-04	1,31E-04	1,31E-04
Caudal de agua en el motor Stirling	kg/s	0,09	0,21	0,14	0,12

Con ello, en la tabla 21 se presentan los errores que se obtienen de cada variable que se quiere calibrar y el CV(RMSE) total. Se muestran los errores inicial, calibrado y el porcentaje de reducción de cada error.

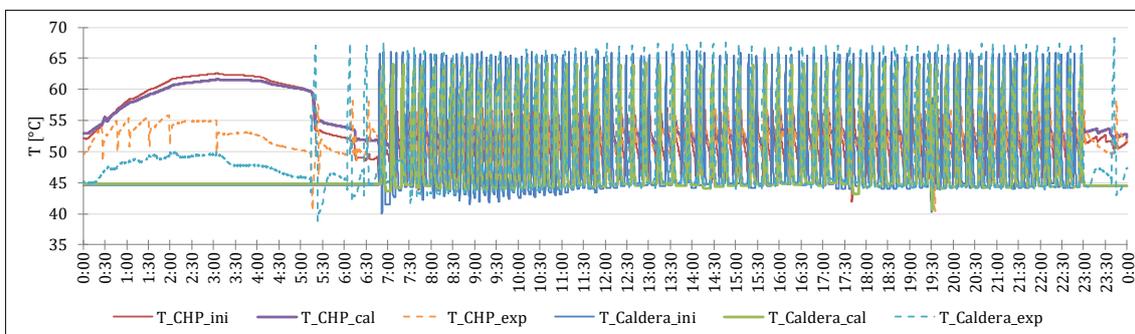
Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.

Tabla 21: Reducciones obtenidas en errores individuales y totales.

	RMSE				CV(RMSE)
	T_CHP	T_Caldera	F_CHP	F_Caldera	Total
Ini.	1,91E-02	2,32E-02	1,41E-03	6,87E-02	8,76E-04
Cali.	1,43E-02	2,02E-02	1,43E-03	6,10E-02	7,69E-04
Red.	25,13%	12,93%	-1,42%	11,21%	12,21%

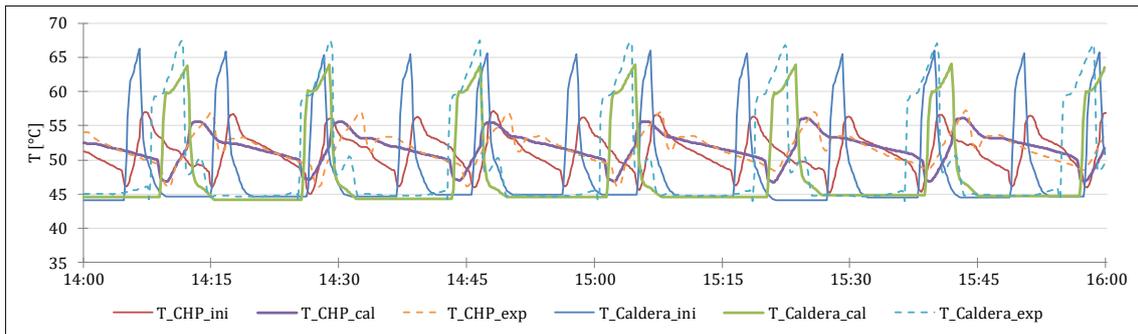
Se puede observar que el error existente entre las diferentes variables se disminuye bastante salvo en el fuel del Stirling donde aumenta un poco. Lo importante es el error que contempla todos los errores individuales y que está englobado en el CV (RMSE) y éste, se reduce en un 12,21%. Debido a que el error que se produce es muy pequeño se puede concluir con que la simulación representa la realidad de manera correcta.

Para mostrar el correcto funcionamiento de esta simulación se presentan en las siguientes gráficas las comparaciones entre simulación inicial y calibrada junto con resultados experimentales. Para presentar el funcionamiento de manera que se pueda apreciar el ajuste entre calibrado y experimental, se muestran los resultados de 24 horas y un periodo de 2 horas. En las gráficas 20(a) y (b) se observa la comparación de temperaturas de salida de caldera y motor Stirling. Por último, se muestra la comparación de consumo de fuel en las gráficas 21(a) y (b).



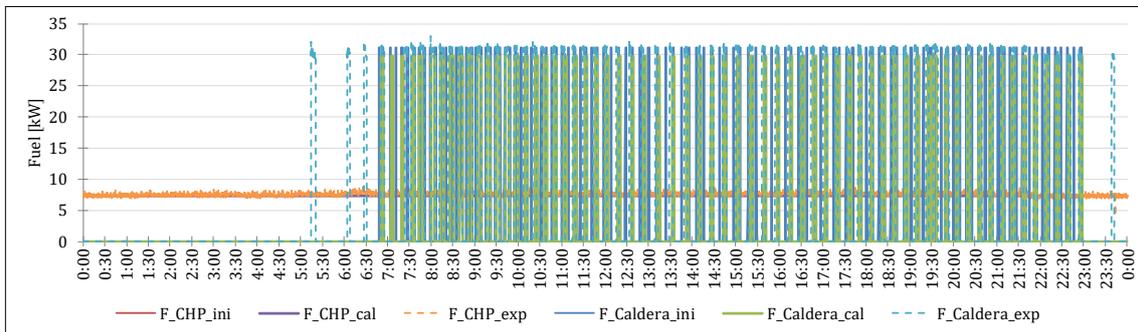
(a)

Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.

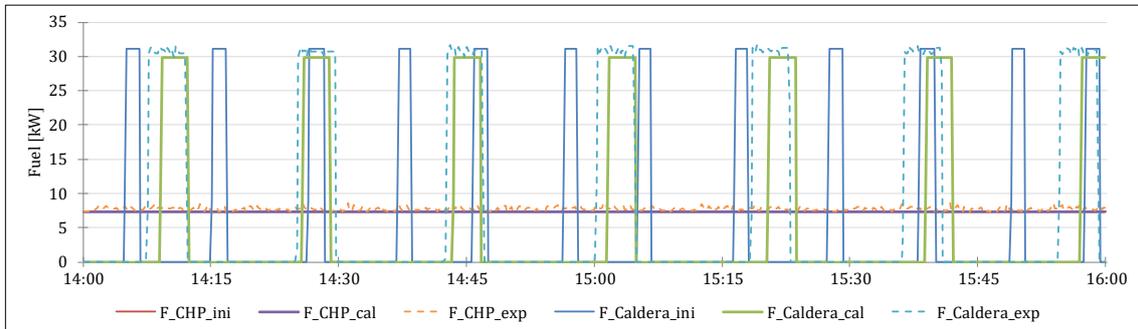


(b)

Gráfica 20: Curvas calibración vs experimental e inicial de temperaturas de salida caldera y Stirling. (a) Periodo de 24h. (b) Periodo de 2h.



(a)



(b)

Gráfica 21: Gráficas calibración vs inicial y experimental. Caso de fueles. (a) Periodo 24h. (b) Periodo 2h.

Se observa que los resultados son muy aproximados a la realidad por lo que se da por válida la calibración.

Con los resultados de los 7 parámetros calibrados, se simula y se calculan los diferentes valores energéticos calculados en el ensayo experimental para contrastar simulación y realidad. En la tabla 22 se muestran estos resultados.

Tabla 22: Resultados test experimental vs primera calibración.

DESCRIPCIÓN	TEST EXPERIMENTAL	SIMULACIÓN
		1ª Calibración
Fuel consumido en Stirling según PCI (kWh)	1.285,9	1.229,4
Fuel consumido en Caldera según PCI (kWh)	1.108,5	870,2
Fuel total según PCI (kWh)	2.394,4	2.099,6
Producción calorífica en Stirling(kWh)	880,9	810,6
Producción eléctrica en Stirling(kWh)	191,6	187,7
Eficiencia térmica del Stirling	68,50%	65,9%
Eficiencia eléctrica del Stirling	14,90%	15,27%
Producción térmica de la Caldera (kWh)	849,0	665,0
Eficiencia de la caldera	76,59%	76,41%
Eficiencia global	63,36%	71,65%
Horas en operación del Stirling	168	168
Ciclos ON/OFF de caldera	486	470
Calor para ACS (kWh)	20,7	20,8
Calor para calefacción (kWh)	1291,2	1287,9
Pérdidas (kWh)	890,9	790,8
Eficiencia exergética	13,30%	15,00%
Emisiones CO2 (kg)	435,8	382,1
Energía cedida por el almacenamiento (kWh)	13,7	7,9

En ella se observa que el ajuste es bastante bueno contrastándolo con lo experimental, pero existen diferencias en la partida de energía descargada del almacenamiento y el fuel consumido en la caldera. Por ello, como se ha mencionado antes se decide realizar una segunda calibración.

Si se presta atención a la eficiencia energética de la instalación, se observa que en la simulación esta es mayor que en la realidad. Esto significa que las pérdidas térmicas utilizadas en la simulación son menores que en la realidad. Por lo tanto, se decide calibrar las pérdidas existentes en el tanque de almacenamiento térmico y compensador hidráulico. Por ello, la segunda calibración se configura con el objetivo de calibrar los coeficientes de pérdidas de estos equipos.

Tras calibrar estos parámetros, los resultados son los que se muestran tabla 23. Estos valores calibrados se aproximan a los coeficientes de pérdidas experimentales para los equipos correspondientes. Estos coeficientes son 2,1 W/K para el compensador hidráulico y 68,3 W/K para el tanque de almacenamiento térmico.

Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.

Tabla 23: Valores inferior, superior, inicial y calibrado de parámetros 2ª calibración.

Nombre	Unidades	Límite Inf.	Límite Sup.	Valor inicial	Valor calibrado
Coefficiente de pérdidas Compensador Hidráulico	W/K	0,24	4,75	0,43	1,52
Coefficiente de pérdidas Tanque Almacenamiento Térmico	W/K	25,84	120,57	31,00	74,96

Estos valores de pérdidas hacen que se genere cierto desacople respecto de la calibración previa, pero se obtiene un ajuste mejor en los valores de calor cedido del almacenamiento y consumo total de fuel en la caldera. Con ello, los errores individuales y totales que se obtienen con estos valores calibrados, junto con los de la primera calibración, se muestran en la tabla 24.

Tabla 24: Reducciones obtenidas en errores individuales y totales en la segunda calibración.

	RMSE						CV(RMSE)
	T_CHP	T_Caldera	F_CHP	F_Caldera	F_Caldera TOT	Alma	Tot.
Ini.	1,91E-02	2,32E-02	1,41E-03	6,87E-02	5,15E+00	2,53E+02	1,59E-01
Cali.	1,48E-02	2,61E-02	1,43E-03	7,16E-02	1,88E-01	3,64E+01	6,76E-02
Red.	22,51%	-12,50%	-1,42%	-4,22%	96,35%	85,61%	57,48%

En esta tabla, se observan los errores individuales de cada variable que se quería calibrar: inicial, calibrado y el porcentaje de reducción de cada error. Se han mantenido las variables de la primera calibración para que la segunda también lo tuviera en cuenta. Como se ha comentado antes, existe cierto desacople en algunas variables de la primera calibración, pero los valores totales son cercanos a los de la realidad. En la tabla anterior, en el apartado de reducción, aparece algún signo negativo debido a que estos errores aumentan respecto el valor inicial.

Si bien algunos valores aumentan, se observa que los valores de errores individuales que se querían ajustar de consumo de fuel en la caldera y calor descargado del almacenamiento se reducen considerablemente.

Por último, se obtiene una reducción del error total del 57,48% por lo que se produce un ajuste correcto de la simulación con la realidad. Para apreciar dicho ajuste, se introducen los valores correspondientes a los coeficientes de pérdidas correspondientes en la simulación y con los resultados de la simulación se realizan los mismos cálculos que antes. En la tabla 25 se aprecia la variación que existe de la primera calibración a la segunda calibración contrastando sus resultados con la realidad.

Tabla 25: Comparación resultados experimental, 1ª Calibración y 2ª Calibración.

DESCRIPCIÓN	EXPERIMENTAL	SIMULACIÓN	
		1ª Calibración	2ª Calibración
Fuel consumido en Stirling según PCI (kWh)	1.285,9	1.229,4	1.234,5
Fuel consumido en Caldera según PCI (kWh)	1.108,5	870,2	1.144,9
Fuel total según PCI (kWh)	2.394,4	2.099,6	2.379,4
Producción calorífica en Stirling(kWh)	880,9	810,6	817,5
Producción eléctrica en Stirling(kWh)	191,6	187,7	188,9
Eficiencia térmica del Stirling	68,50%	65,9%	66,2%
Eficiencia eléctrica del Stirling	14,90%	15,27%	15,30%
Producción térmica de la Caldera (kWh)	849,0	665,0	875,0
Eficiencia de la caldera	76,59%	76,41%	76,43%
Eficiencia global	63,36%	71,65%	63,51%
Horas en operación del Stirling	168	168	168
Ciclos ON/OFF de caldera	486	470	610
Calor para ACS (kWh)	20,7	20,8	21,5
Calor para calefacción (kWh)	1291,2	1287,9	1287,3
Pérdidas (kWh)	890,9	790,8	881,8
Eficiencia exergética	13,33%	15,00%	13,29%
Emisiones CO2 (kg)	435,8	382,1	433,1
Energía cedida por el almacenamiento (kWh)	13,7	7,9	13,5

De manera que tras la segunda calibración los datos obtenidos de la simulación y los datos experimentales son muy parecidos. Con ello, se concluye la etapa de calibración del modelo de Trnsys permitiendo realizar optimizaciones de la instalación real.

5.3 Optimización multiobjetivo

En este apartado se muestran los resultados de las optimizaciones correspondientes de la instalación. Por una parte, se plantea la optimización de las variables de control de la instalación que permitan un menor consumo y un rendimiento exergético de la instalación como se ha definido previamente. Por otra parte, se han calculado que las pérdidas de calor que tiene la instalación son de un 17% por lo que se propone mejorar el aislamiento de la instalación y ver cómo afecta este aspecto a su funcionamiento posibles optimizaciones. Para ello, se han propuesto casos de reducción de pérdidas a niveles de 15%, 10%, 5% y 0%. Además, para cada caso se realiza una optimización de variables de control que permitan reducir el consumo de gas y aumentar el rendimiento exergético de la instalación, igual que lo definido para el caso inicial.

Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.

Con ello, se realiza la mejora de aislamiento térmico de la instalación modificando los parámetros de pérdidas previamente calibrados a valores proporcionales que den los niveles de pérdidas mencionados. En la siguiente tabla se muestran dichos valores para cada caso.

Tabla 26: Coeficientes de pérdidas para diferentes niveles de aislamiento térmico.

% Pérdidas de calor respecto PCI	Coefficiente de pérdidas Compensador Hidráulico [W/K]	Coefficiente de pérdidas tanque de almacenamiento térmico [W/K]
CASO 17%	1,52	74,96
CASO 15%	1,34	66,14
CASO 10%	0,89	44,09
CASO 5%	0,45	22,05
CASO 0%	0	0

Una vez se tienen los nuevos coeficientes de pérdidas calculados, se simulan dichos casos y se obtienen los resultados correspondientes. A continuación, se muestra la tabla 27 con los diferentes casos.

Tabla 27: Resultados de simulaciones con diferente nivel de aislamiento térmico. 17, 15 y 10%, 5%, 0%.

DESCRIPCIÓN	CASO 17%	CASO 15%	CASO 10%	CASO 5%	CASO 0%
Fuel consumido en Stirling según PCI(kWh)	1.234,5	1.234,5	1.229,4	1.219,2	1.183,1
Fuel consumido en Caldera según PCI(kWh)	1.144,9	1.088,9	951,6	821,0	700,0
Fuel total según PCI (kWh)	2.379,4	2.323,4	2.181,0	2.040,2	1.883,1
Producción calorífica en Stirling(kWh)	817,5	817,2	813,0	802,5	776,2
Producción eléctrica en Stirling(kWh)	188,9	188,9	187,9	185,8	179,2
Eficiencia térmica del Stirling	66,22%	66,19%	66,13%	65,82%	65,61%
Eficiencia eléctrica del Stirling	15,3%	15,30%	15,28%	15,24%	15,14%
Producción térmica de la Caldera (kWh)	875,0	832,2	727,2	627,4	534,8
Eficiencia de la caldera	76,43%	76,42%	76,42%	76,42%	76,41%
Eficiencia global	63,51%	64,87%	68,93%	73,90%	81,96%
Horas en operación del Stirling	168	168	168	168	168
Ciclos ON/OFF de caldera	610	587	512	449	387
Calor para ACS (kWh)	21,5	20,8	21,0	20,9	21,8
Calor para calefacción (kWh)	1287,3	1287,5	1287,8	1288,0	1287,8
Pérdidas (kWh)	881,8	826,3	684,4	545,6	394,3
Eficiencia exergética	13,29%	13,59%	14,42%	15,38%	16,38%
Emisiones CO2 (kg)	433,1	422,9	396,9	371,3	342,7
Energía cedida del almacenamiento (kWh)	13,5	10,0	6,7	13,0	54,6

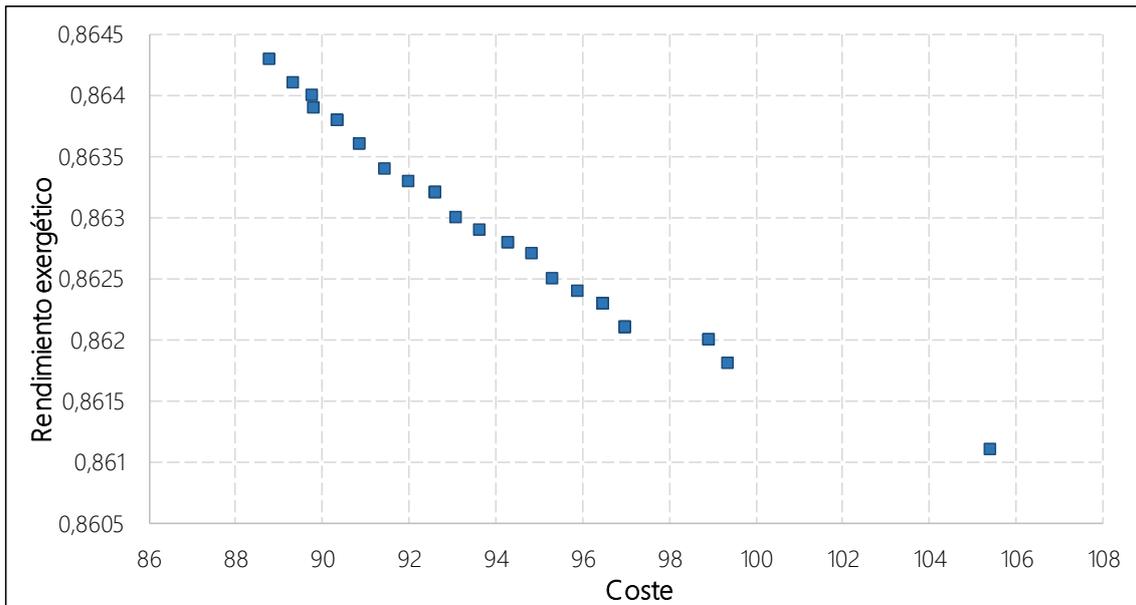
En esta tabla se observa la evolución de la instalación en función del nivel de aislamiento térmico. Si este aislamiento se mejorase, se podrían obtener ahorros significativos en consumo de fuel, si se presenta este ahorro en porcentaje de reducción, se tiene que, si se incrementa el aislamiento térmico de manera que las pérdidas de calor bajen al 5%, se obtiene una reducción en el consumo del 14,26% calculado respecto al caso de 17%. Si se hiciera una instalación ideal sin pérdidas de calor, esta disminución de consumo sería del 20,85%. Se puede observar en el caso de pérdidas de calor nulas existen pérdidas, lo cual es debido a la energía que se va en los humos.

Una vez se han obtenido los resultados para las diferentes configuraciones en función del nivel de aislamiento, se plantean optimizaciones multiobjetivo de cada uno de ellos en busca de reducir el consumo y mejorar el rendimiento exergético de la instalación. Las variables que se van a optimizar son las ya mencionadas en la tabla 17.

Una vez se ejecuta el algoritmo NSGA-II para la optimización multiobjetivo de la instalación, se representa la frontera de Pareto obtenida en la gráfica 22. Como se ha explicado anteriormente, esta curva indica los puntos que optimizan todos los objetivos de la optimización. Cualquier punto más allá de esta curva no será capaz de mejorar un objetivo sin empeorar otro.

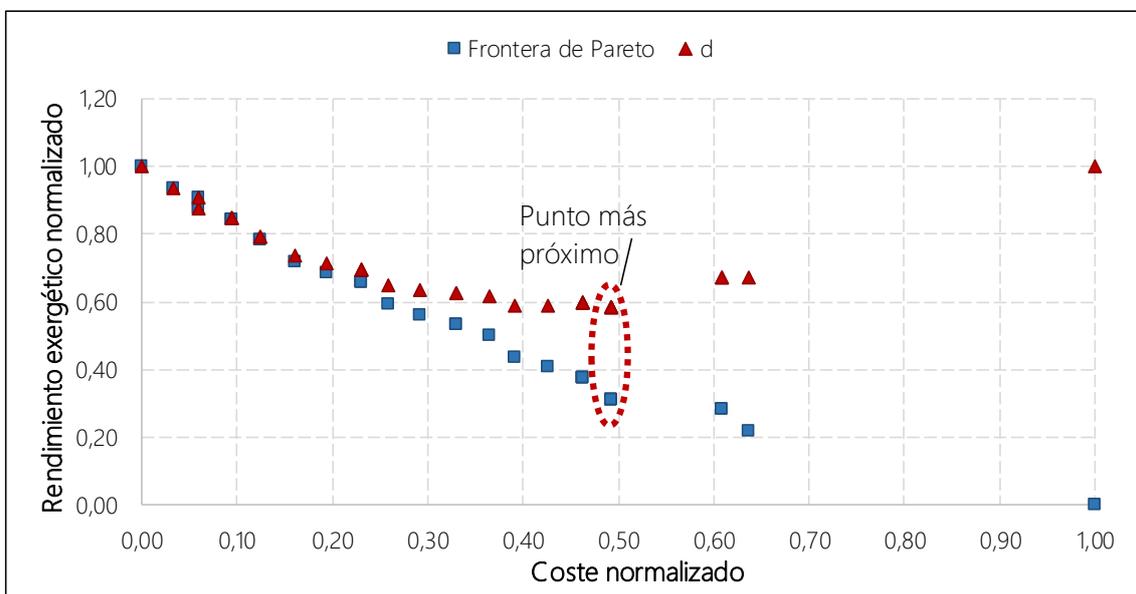
Aquí, es necesario remarcar que el objetivo que se grafica en el eje de ordenadas es la representada en la ecuación (28) de máximos de rendimiento exergético que transforma el maximizar el rendimiento exergético en una función de minimización ya que el algoritmo funciona minimizando los objetivos.

Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.



Gráfica 22: Curva de Pareto caso experimental.

Con el objetivo de obtener el conjunto de valores de las variables de control a optimizar se normalizan con la ecuación (30) los objetivos y se obtiene una nueva curva que se representa junto con la curva de Pareto en la gráfica 23. La distancia al punto ideal se calcula con la ecuación (31) y está representada en esta gráfica.



Gráfica 23: Curva de Pareto y curva normalizada caso experimental.

Este procedimiento se sigue para los diferentes casos de optimización. En el Anexo V, se muestran las gráficas correspondientes para los casos con las mejoras en el nivel de aislamiento.

Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.

A continuación, se muestran las tablas correspondientes a las mejoras obtenidas con las distintas optimizaciones realizada para cada caso. En dichas tablas aparecen los resultados de las funciones de optimización utilizadas y la correspondiente reducción obtenida a partir del caso no optimizado. En el caso del rendimiento exergético, se dan valores de rendimientos en vez de los valores obtenidos en la optimización los cuales vienen dados por la ecuación (27). Primeramente, se da conocimiento de la mejora obtenida en el modelo de la instalación experimental. En ella, se puede observar que simplemente modificando las condiciones de control se puede obtener una reducción del coste del 7,01% y una reducción, que para el objetivo de maximizar el rendimiento exergético sería un aumento, del 3,92%.

Tabla 28: Mejora obtenida en optimización del caso experimental.

Objetivo	No-Optimizado 17%	Optimizado 17%
COSTE (€)	104,31	96,99
reducción	--	7,01 %
RENDIMIENTO EXERGÉTICO	13,29 %	13,81 %
aumento	--	3,91 %

Para el resto de casos los resultados se presentan del mismo modo, es decir, contrastando escenario no-optimizado y optimizado. Así pues, se puede observar las diferentes mejoras que se obtienen.

Tabla 29: Mejoras obtenidas en optimizaciones del resto de casos. (a) 15% y 10% de pérdidas. (b) 5% y 0% de pérdidas.

Objetivo	No-optimizado 15%	Optimizado 15%	No-optimizado 10%	Optimizado 10%
COSTE (€)	102,92	92,48	93,77	88,81
reducción	--	10,14 %	--	5,29 %
RENDIMIENTO EXERGÉTICO	13,59 %	13,95 %	14,42%	14,66 %
aumento	--	2,65 %	--	1,66 %

(a)

Objetivo	No-optimizado 5%	Optimizado 5%	No-optimizado 0%	Optimizado 0%
COSTE (€)	86,47	83,25	78,86	78,84
reducción	--	3,72 %	--	0,03 %
RENDIMIENTO EXERGÉTICO	15,38 %	15,41 %	16,38 %	16,85 %
aumento	--	0,19 %	--	2,87%

(b)

Una vez que se ha visto que se puede optimizar la instalación modificando los parámetros de la lógica de control falta decir cuáles son los valores que permiten obtener estas mejoras. Para ello, en la tabla 30 se muestran dichos valores.

Tabla 30: Valores de variables de optimización.

Variable	Experimental	Optimizado 17%	Optimizado 15%	Optimizado 10%	Optimizado 5%	Optimizado 0%
T_{ret_CHP}	40	37,5	35	36,5	36	47,5
ΔT_{carga}^{ON}	2	20	20	20	18,6	12
ΔT_{carga}^{OFF}	0	10	10	10	10	9,2
$\Delta T_{descarga}^{ON}$	6	1,8	1,8	0,8	0,4	0,8
$\Delta T_{descarga}^{OFF}$	0	1,2	1	0,6	0,2	0

Donde las variables son las definidas anteriormente: temperatura de retorno al motor Stirling; diferencia de temperaturas que debe existir para iniciar la carga entre la temperatura de la mezcla procedente del intercambiador de ACS y del aerotermo y la temperatura del depósito, así como la diferencia de temperaturas que para la carga y, por último, a partir de cuantos grados superados los 40°C se inicia la descarga y a partir de cuanto se para.

Se puede observar que la temperatura de retorno al Stirling que marca el encendido de la caldera se eleva bastante en el caso de pérdidas nulas. Esto es debido a que cuanto menores son las pérdidas la instalación tarda más en enfriarse y el Stirling será capaz de suplir las demandas existentes con ayuda del almacenamiento. Sin embargo, para demandas elevadas será necesario el accionamiento de la caldera.

Por lo demás, el hecho de reducir la magnitud de la diferencia de temperaturas que activa la descarga desde el almacenamiento hace que este modo de funcionamiento tenga mayor facilidad para comenzar su función. El hecho de que la carga se active para una diferencia de temperaturas elevada, hace que sea más difícil la entrada de este modo de operación.

Con ello se concluye el proceso de optimizaciones y a continuación se evalúan las mejoras obtenidas en términos generales comparando escenarios no-optimizados y optimizados.

5.4 Resultados optimizaciones

En este apartado se representan los resultados obtenidos en los casos optimizados de la instalación. Como se ha comentado, una vez modificado el nivel de aislamiento térmico de la instalación, se modifican los parámetros de control del sistema con los objetivos de reducir el consumo de gas y el rendimiento exergético de la instalación. Para tener la capacidad de contrastar escenarios no-optimizados y optimizados, en las sucesivas tablas se muestran los resultados correspondientes a ambos casos. En los casos no optimizados se mantiene constante un 20% de pérdidas debido a los humos y los porcentajes mostrados de cada caso son debidos a pérdidas de calor en la instalación.

Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.

Tabla 31: Resultados del caso experimental, simulación no optimizada y optimizada.

DESCRIPCIÓN	EXPERIMENTAL	CASO 17%	
		No-OPT.	OPT.
Fuel consumido en Stirling según PCI(kWh)	1.285,9	1.234,5	1.234,5
Fuel consumido en Caldera según PCI (kWh)	1.108,5	1.144,9	1.009,6
Fuel total según PCI (kWh)	2.394,4	2.379,4	2.244,0
Producción calorífica en Stirling(kWh)	880,9	817,5	820,6
Producción eléctrica en Stirling(kWh)	191,6	188,9	189,2
Eficiencia térmica del Stirling	68,50%	66,22%	66,47%
Eficiencia eléctrica del Stirling	14,90%	15,30%	15,33%
Producción térmica de la Caldera (kWh)	849,0	875,0	771,6
Eficiencia de la caldera	76,59%	76,43%	76,43%
Eficiencia global	63,36%	63,51%	66,77%
Horas en operación del Stirling	168	168	168
Ciclos ON/OFF de caldera	486	610	594
Calor para ACS (kWh)	20,7	21,5	19,9
Calor para calefacción (kWh)	1.291,2	1287,3	1288,8
Pérdidas (kWh)	890,9	881,8	746,1
Eficiencia exergética	13,33%	13,29%	13,81%
Emisiones CO2 (kg)	435,8	433,1	408,4
Energía cedida por el almacenamiento (kWh)	13,7	13,5	0,4

Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.

Tabla 32: Resultados no-optimizados y optimizados de los diferentes casos en función del nivel de aislamiento térmico.

DESCRIPCIÓN	CASO 15%		CASO 10%		CASO 5%		CASO 0%	
	No-OPT.	OPT.	No-OPT.	OPT.	No-OPT.	OPT.	No-OPT.	OPT.
Fuel consumido en Stirling según PCI(kWh)	1.234,5	1.234,5	1.229,4	1.234,5	1.219,2	1.229,4	1.183,1	1.188,2
Fuel consumido en Caldera según PCI(kWh)	1.089,0	927,2	951,6	857,5	821,0	757,0	700,0	695,4
Fuel total según PCI (kWh)	2.323,5	2.161,7	2.181,0	2.092,0	2.040,2	1.986,4	1.883,1	1.883,6
Producción calorífica en Stirling (kWh)	817,2	828,0	813,0	821,8	802,5	818,4	776,2	773,2
Producción eléctrica en Stirling (kWh)	188,9	189,9	187,9	189,3	185,8	188,4	179,2	179,5
Eficiencia térmica del Stirling	66,19%	67,07%	66,13%	66,57%	65,82%	66,57%	65,60%	65,07%
Eficiencia eléctrica del Stirling	15,30%	15,38%	15,28%	15,33%	15,24%	15,32%	15,15%	15,11%
Producción térmica de la Caldera (kWh)	832,2	708,6	727,2	655,3	627,4	578,5	534,8	532,7
Eficiencia de la caldera	76,42%	76,42%	76,42%	76,42%	76,42%	76,42%	76,40%	76,60%
Eficiencia global	64,87%	69,30%	68,93%	71,74%	73,90%	75,90%	81,96%	90,70%
Horas en operación del Stirling	168	168	168	168	168	168	168	167
Ciclos ON/OFF de caldera	587	538	512	490	449	426	387	274
Calor para ACS (kWh)	20,8	18,4	21,0	19,5	20,9	19,7	21,8	23,4
Calor para calefacción (kWh)	1.287,5	1.289,0	1.287,8	1.288,6	1.288,0	1.288,2	1.287,8	1.286,1
Pérdidas (kWh)	826,3	664,3	684,4	594,5	545,6	490,0	394,3	394,6
Eficiencia exergética	13,59%	13,95%	14,42%	14,66%	15,38%	15,41%	16,38%	16,85%
Emisiones CO2 (kg)	422,9	393,4	396,9	380,7	371,3	361,5	342,7	342,8
Energía cedida del almacenamiento (kWh)	10,0	0,7	6,7	3,4	13,0	11,3	54,6	219,4

Si se examinan los resultados obtenidos del escenario real y la simulación, destaca el hecho de que modificar los parámetros de control de la instalación real permite reducir el consumo de kWh de gas total en un 5,69% que en términos de coste de operación de la instalación es un 7,01% más barato. Por otra parte, la eficiencia exergética de la instalación se incrementa en un 3,91%. Es llamativo como el modo de funcionamiento establecido previamente utiliza con origen del tanque de almacenamiento para aportar 13,5 kWh y el escenario optimizado no aporta prácticamente nada. Esto se puede interpretar como que debido a las pérdidas tan grandes existentes en la instalación no es interesante almacenar calor.

Atendiendo a valores de consumo de gas y comparando el escenario inicial sin con el caso 5%, ambos sin optimizar, se puede llegar a obtener una reducción de 14,25% respecto del valor del caso inicial. Esta disminución del consumo debido a la mejora del aislamiento, combinado con la optimización de las variables de control, llega a ser del 16,52% respecto el caso inicial no optimizado. Es interesante observar que la cantidad de gas que se reduce es debido principalmente a la reducción de este consumo en la caldera de condensación, es decir, en la tecnología convencional de la instalación.

La eficiencia energética global de la instalación, se ve muy influenciada por el nivel de aislamiento de la instalación. Si se observan los escenarios no optimizados en los cuales se ha variado el aislamiento térmico, se tiene por resultado que si se mejorara el aislamiento disminuyendo las pérdidas de un 17% a un 5% se podría mejorar la eficiencia de la instalación un 16,36%. Por lo que resulta interesante mejorar la instalación con un aislamiento más eficiente.

Si, por otra parte, se presta atención a la variación que se obtiene en esta misma variable únicamente modificando las variables de control del sistema, se tiene por resultado que la modificación de estos parámetros a valores óptimos, trae por resultado una mejora del 5% comparado con el caso no optimizado de 17%. Combinando ambos efectos y comparando resultados de rendimiento energético se tiene que la optimización de variables de control para el caso de 5% de pérdidas, trae consigo una mejora de rendimiento de 19,51% respecto el caso no optimizado de 17%, llegando a 75,90%. Por lo tanto, la mejora que obtendría mejorando el aislamiento y las condiciones de control sería muy interesante. Se puede observar que para un caso ideal, sin pérdidas, con las variables de control optimizadas, la cantidad de calor descargada por el almacenamiento se dispara y esto hace que el rendimiento alcance un 90,70%.

En cuanto a términos exergéticos se refiere, el hecho de que la caldera encienda menos veces a medida que se mejora el aislamiento térmico de la instalación hace que se produzcan menos

combustiones. El carácter irreversible que tiene este tipo de procesos hace que la destrucción de exergía sea grande. Por ello, cuantas menos veces encienda este equipo, la eficiencia exergética mejorará. Es lo que ocurre en los casos no optimizados y optimizados planteados anteriormente. A medida que se mejora el aislamiento y se optimizan las variables de control la caldera reduce sus ciclos ON/OFF y se aprecia el efecto en la eficiencia exergética. Este valor se ve incrementado con una mejora de 15,95% comparando el caso real con el caso 5% ambos casos no optimizados. Comparando estos mismos escenarios optimizados, la mejora obtenida sería de 11,59%. En el caso 5% se puede llegar al 15,41% de eficiencia exergética.

A medida que se mejora el aislamiento de la instalación, con las condiciones iniciales de control, la caldera enciende y apaga menos veces y, por tanto, el agua recibe menos calor y no es suficiente para alcanzar las condiciones de descarga establecidas. Esto ocurre hasta un nivel de pérdidas de calor a partir del cual, a pesar de que la caldera encienda menos veces, el aislamiento de la instalación permite un calentamiento adecuado del fluido y permite que se alcancen condiciones de descarga. A partir de ahí, cualquier mejora del aislamiento trae consigo un aumento del calor cedido desde el almacenamiento.

Si se examinan los escenarios optimizados, como se ha comentado antes, para el caso experimental, la optimización da como resultado que no es interesante almacenar con tales pérdidas de calor. A medida que aumenta la eficiencia de nivel de aislamiento y se optimizan los parámetros de control de la instalación, el calor cedido aumenta llegando un punto comprendido entre el 5% y el 0% de pérdidas de calor, en el cual este calor cedido se dispara y se podría llegar a un 90% de eficiencia energética en la instalación.

III. ASPECTOS ECONÓMICOS

1 PRESUPUESTO EJECUTADO

En este apartado se detalla el desglose del coste del proyecto. Este coste asciende a sesenta y dos mil ciento sesenta y seis euros con tres céntimos.

Tabla 33: Desglose del presupuesto del proyecto.

HORAS INTERNAS			40.000,00 €		
	Nº horas	Coste unitario(€/h)	Coste		
Ingeniero Junior	1050	20	21.000,00 €		
Ingeniera doctora	400	40	16.000,00 €		
Codirectores	50	60	3.000,00 €		
AMORTIZACIONES			1.499,06 €		
	Nº horas	Vida útil (años)	Horas útiles por año	Coste unitario(€/h)	Coste
1 Licencia Trnsys	500	1	8000	2.250,00 €	140,63 €
2 Ordenadores	1050	10	8000	3.500,00 €	45,94 €
Instalaciones	1050	25	8000	250.000,00 €	1.312,50 €
GASTOS			8.870,43 €		
			Coste		
Gas Natural			400,00 €		
Electricidad			500,00 €		
Tarjeta Siemens			611,82€		
Acondicionado de cuadro eléctrico			1440,00€		
Depósito 200 L			356,40€		
Instalación caudalímetros			2702,00€		
Accesorios sondas Temperatura			700,21€		
SUBTOTAL 1			50.369,49 €		
IMPREVISTOS			2%	1007,39 €	
SUBTOTAL 2			51.376,88 €		
IVA			21%	10.789,15 €	
PRESUPUESTO TOTAL			62.166,03 €		

IV. CONCLUSIONES

En este proyecto se ha realizado un ensayo de generación de calefacción y agua caliente para una vivienda unifamiliar en el Laboratorio de Control de Calidad en la Edificación ubicado en Vitoria-Gasteiz que pertenece al Gobierno Vasco. Los resultados que se han obtenido permiten configurar un modelo informático capaz de simular el comportamiento de la instalación. Para ello, se calibra un modelo que funcione según la misma lógica de funcionamiento que la instalación real. De este modo, mediante diferentes simulaciones se puede observar cómo afectan los diferentes cambios que se podrían realizar en la instalación.

Con el objetivo de mejorar el funcionamiento de la instalación y llevarla al modo de operación óptimo, la simulación calibrada es optimizada de diferentes maneras. La primera de ellas consiste en modificar los coeficientes de pérdidas calibrados para observar cómo mejora la instalación al utilizar un aislamiento más eficiente. Esta optimización se realiza para diferentes niveles de pérdidas partiendo desde el coeficiente de pérdidas reales y llegando hasta un coeficiente ideal nulo de pérdidas. La segunda optimización de la instalación se realiza en cada uno de los escenarios planteados de diferente nivel de aislamiento. Para estos casos, se busca cambiar las variables de configuración que mejoren la instalación respecto rendimiento exergético y coste de operación de la instalación.

Finalmente se presentan los resultados de los escenarios optimizados contrastados con los resultados del ensayo experimental y se sacan conclusiones referentes a los cambios realizados para llegar a la optimización de la instalación.

Con todo ello, tras realizar este proyecto se concluye lo siguiente:

- La utilización de un sistema híbrido formado por un motor Stirling, una caldera de condensación y un tanque de almacenamiento térmico es interesante para una vivienda unifamiliar.
- El hecho de contar con un tanque de almacenamiento térmico y tenerlo configurado en función de su temperatura con el resto de la instalación, hace que se pueda utilizar el calor almacenado en su interior. Esto hace que haya momentos en los cuales no sea necesario el encendido de la caldera y se pueda suplir la demanda existente con el calor almacenado y el motor Stirling.
- La simulación de instalaciones reales permite obtener información de cómo puede afectar al funcionamiento ciertos cambios en las variables de operación sin necesidad

de poner en marcha la instalación. Para ello es necesario utilizar técnicas de calibración como la utilizada en este proyecto. En este trabajo se ha utilizado un método determinista que permite ajustar el funcionamiento de la simulación a la instalación en la primera calibración obteniendo un coeficiente de variación del error cuadrático medio reducido de $7,69E-04$ como se ha observado en el apartado de calibración.

- Para completar la calibración del modelo a la instalación experimental se realiza una segunda calibración que permite ajustar los coeficientes de pérdidas del tanque de almacenamiento térmico y del compensador hidráulico.
- Para la optimización multiobjetivo de la instalación se ha utilizado el algoritmo genético NGS-II que da por resultado una curva de Pareto con las mejores soluciones del problema. Con el criterio de elegir la solución normalizada más próxima a la curva de Pareto se concluye la optimización. Con los resultados obtenidos se da por válido el método de optimización utilizado ya que se consiguen mejorar los objetivos establecidos.
- A la vista de los resultados de las optimizaciones, se observa que la mejora del aislamiento de la instalación permite reducir el coste de operación y aumentar el rendimiento exergético. Si se comparan el caso inicial en el cual se tiene un 17% de pérdidas de calor sin optimizar lógica de control y el caso en el cual se tendría un 5% de pérdidas sin optimizar lógica de control, el coste de operación se ve reducido en un 17,10% y el rendimiento exergético aumenta en un 15,73% ambos valores calculados en función de los valores iniciales.
- Prestando atención a los resultados de las optimizaciones de cada escenario mediante el cambio de variables de control, se observa que el coste de operación en el caso de 17% de pérdidas de calor se reduce un 7,01% y el rendimiento exergético aumenta un 3,91%. En cambio, para situaciones de mejor aislamiento térmico, el cambio de las variables de control no tiene mucha influencia en la optimización salvo para el caso 0% donde el hecho de aumentar tanto el calor descargado desde el almacenamiento hace que el rendimiento llegue hasta el rendimiento energético llegue a 90,70%.

Por lo tanto, se concluye que una instalación híbrida puede ser calibrada utilizando un método determinista y la optimización de estas instalaciones con un algoritmo genético permite la obtención de resultados interesantes. Por último, mejorar el aislamiento de la instalación tiene mayor impacto que mejorar las variables de la lógica de control de la instalación, pero la combinación de ambas optimizaciones para casos con pérdidas nulas, puede llevar a la

Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.

instalación a operar con un 90% de rendimiento energético. Es por esto que se concluye que siempre y cuando se tengan recursos como para modificar el aislamiento de la instalación, primeramente, se debería mejorar el aislamiento primero y luego optimizar las variables de control de la instalación.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. Fernández-Reyes. El Acuerdo de París y el cambio transformacional. Papeles de relaciones ecosociales y cambio global, 132, 101-114. (2016).
- [2] P. Sech-Spahousec. Análisis del consumo energético del sector residencial en España. <http://www.idae.es>, 2011.
- [3] ProfesionalesHoy. Los edificios son responsables del 30% del consumo energético global y del 28% de las emisiones de CO2. <https://profesionaleshoy.es>, 2018.
- [4] www.ree.es. Estadísticas del sistema eléctrico español. Boletines mensuales. 2019.
- [5] Vercelas. Calefacción. www.wikipedia.org, 2019.
- [6] Climahorro. Calderas de condensación. La guía definitiva., www.climahorro.es.
- [7] Ferroli. Manual de instalación, uso y mantenimiento de caldera Naturfire 30-35-39 HR.
- [8] P. Serrano Yuste. Micro-cogeneración en viviendas para generar agua caliente y electricidad para autoconsumo., www.certificadosenergeticos.com, 2014.
- [9] www.electriz.com.mx. Cómo se logra la cogeneración. 2012.
- [10] www.ovacen.com. Ahorro energético con instalaciones de microcogeneración. 2017.
- [11] SeroBot. Colectores solares. www.wikipedia.org, 2018.
- [12] Bomba de calor Aire-Aire., <http://enrplanet.es/>, 2019.
- [13] www.vaillant.es. Bomba de calor aire agua. 2019.
- [14] www.vaillant.es. Bomba de calor geotérmica. 2019.
- [15] A. Ramos, P. Sanchez, J.M. Ferrer, J. Barquín, P. Linares. Modelos Matemáticos de Optimización. Universidad Pontificia de Comillas Madrid. (2010).
- [16] D.A. Manolas, C.A. Frangopoulos, T.P. Gialamas, D.T. Tsahalis. Operation optimization of an industrial cogeneration system by a genetic algorithm. Energy Conversion and Management. 38 (1997) 1625-36.
- [17] D. Manolas, T. Gialamas, C.A. Frangopoulos, D. Tsahalis. A genetic algorithm for operation optimization of an industrial cogeneration system. Computers & chemical engineering. 20 (1996) S1107-S12.
- [18] A. Bischi, L. Taccari, E. Martelli, E. Amaldi, G. Manzolini, P. Silva, et al. A detailed MILP optimization model for combined cooling, heat and power system operation planning. Energy. 74 (2014) 12-26.
- [19] A. Bischi, E. Pérez Iribarren, S. Campanari, G. Manzolini, E. Martelli, P. Silva, et al. Distributed Cogeneration System Optimization: Multi-Step and Mixed Integer Linear Programming Approaches. 5th International Conference on Applied Energy (ICAE 2013)2013. pp. 1-10.
- [20] W.A. Beckman, L. Broman, A. Fiksel, S.A. Klein, E. Lindberg, M. Schuler, et al. TRNSYS The most complete solar energy system modeling and simulation software. Renewable energy. 5 (1994) 486-8.
- [21] T. Stolarski, Y. Nakasone, S. Yoshimoto. Engineering analysis with ANSYS software. Butterworth-Heinemann2018.
- [22] M. Wetter. GenOpt-A generic optimization program. Seventh International IBPSA Conference, Rio de Janeiro2001. pp. 601-8.
- [23] jEPlus+EA. 2019.

- [24] CTE, 2013a. Código Técnico en la Edificación, Documento Básico HE Ahorro de Energía, Sección HE1: Limitación de la demanda energética. Ministerio de Fomento, Gobierno de España.
- [25] CTE, 2013b. Código Técnico en la Edificación, Documento Básico HE Ahorro de Energía, Sección HE4: Contribución solar mínima de agua caliente sanitaria. Ministerio de Fomento, Gobierno de España.
- [26] U. Jordan, K. Vajen. . DHWcalc: Program to generate domestic hot water profiles with statistical means for user defined conditions, In: ISES Solar World Congress, Anonymous pp. 1-6. (2005).
- [27] I. Beausoleil-Morrison, N. Kelly. Specifications for modelling fuel cell and combustion-based residential cogeneration device within whole-building simulation programs. International Energy Agency 2007.
- [28] A. González-Gil, J. López-González, M. Fernández, P. Eguía, A. Erkoreka, E. Granada. Thermal energy demand and potential energy savings in a Spanish surgical suite through calibrated simulations. *Energy and Buildings*. 174 (2018) 513-26.
- [29] A. Cacabelos, P. Eguía, L. Febrero, E. Granada. Development of a new multi-stage building energy model calibration methodology and validation in a public library. *Energy and Buildings*. 146 (2017) 182-99.
- [30] Y. Zhang. "Parallel" energyplus and the development of a parametric analysis tool. IBPSA 2009 - International Building Performance Simulation Association 2009. pp. 1382-8.
- [31] X. Chen, H. Yang, K. Sun. A holistic passive design approach to optimize indoor environmental quality of a typical residential building in Hong Kong. *Energy*. 113 (2016) 267-81.
- [32] S. Carlucci, G. Cattarin, F. Causone, L. Pagliano. Multi-objective optimization of a nearly zero-energy building based on thermal and visual discomfort minimization using a non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II). *Energy and Buildings*. 104 (2015) 378-94.
- [33] ENAGAS. Calidad de gas por municipio. www.enagas.es, 2019.
- [34] Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación y Medio Ambiente. Gobierno de España. Factores de emisión. Registro de huella de carbono, compensación y proyectos de absorción de dióxido de carbono. (2018).
- [35] CTE, 2013. Código Técnico en la Edificación. Ministerio de Fomento Gobierno de España.
- [36] RITE. Reglamento de Instalaciones Térmicas de los Edificios. Ministerio de Industria. 2013.

ANEXOS

ANEXO I: Pliego de condiciones

La normativa aplicable a este trabajo consiste en el Código Técnico en la Edificación (CTE) [35] y el Reglamento de Instalaciones Térmicas de los Edificios (RITE)[36].

En cuanto al CTE, éste tiene por objetivo en su Documento Básico HE de Ahorro de Energía conseguir un uso racional de la energía necesaria en la utilización de los edificios reduciendo el consumo y conseguir la participación de las energías renovables en el origen de este consumo. Este documento está dividido en seis apartados y sus exigencias básicas son las siguientes.

- **DB HE 0: Limitación del consumo energético.** Este consumo se refiere a la demanda energética de los servicios de climatización y ACS. Lo que se establece en este documento es una limitación de este consumo en función de la zona climática de la ubicación del edificio.
- **DB HE 1: Limitación de la demanda energética.** Aquí se indica que la envolvente del edificio debe tener las características que limiten la demanda energética necesaria para alcanzar el bienestar térmico en función del clima. Se debe de reducir el riesgo de aparición de humedades de condensación superficiales e intersticiales que puedan perjudicar sus características y tratando adecuadamente los puentes térmicos para limitar las pérdidas o ganancias de calor y evitar problemas higrotérmicos en los mismos.
- **DB HE 2: Rendimiento de las instalaciones térmicas.** Los edificios deben tener instalaciones térmicas apropiadas destinadas a proporcionar el bienestar térmico de sus ocupantes.
- **DB HE 3: Eficiencia energética de las instalaciones de iluminación.** Los edificios dispondrán de instalaciones de iluminación adecuadas a las necesidades de sus usuarios y a la vez eficaces energéticamente disponiendo de un sistema de control que permita ajustar el encendido a la ocupación real de la zona, así como de un sistema de regulación que optimice el aprovechamiento de la luz natural, en las zonas que reúnan unas determinadas condiciones.
- **DB HE4: Contribución solar mínima de agua caliente sanitaria.** En los edificios, con previsión de demanda de ACS o climatización de piscina cubierta, en los que así se establezca en el CTE, una parte de las necesidades energéticas de esta demanda se cubrirá mediante la incorporación en los mismos de sistemas de captación, almacenamiento y utilización de energía solar de baja temperatura, adecuada a la

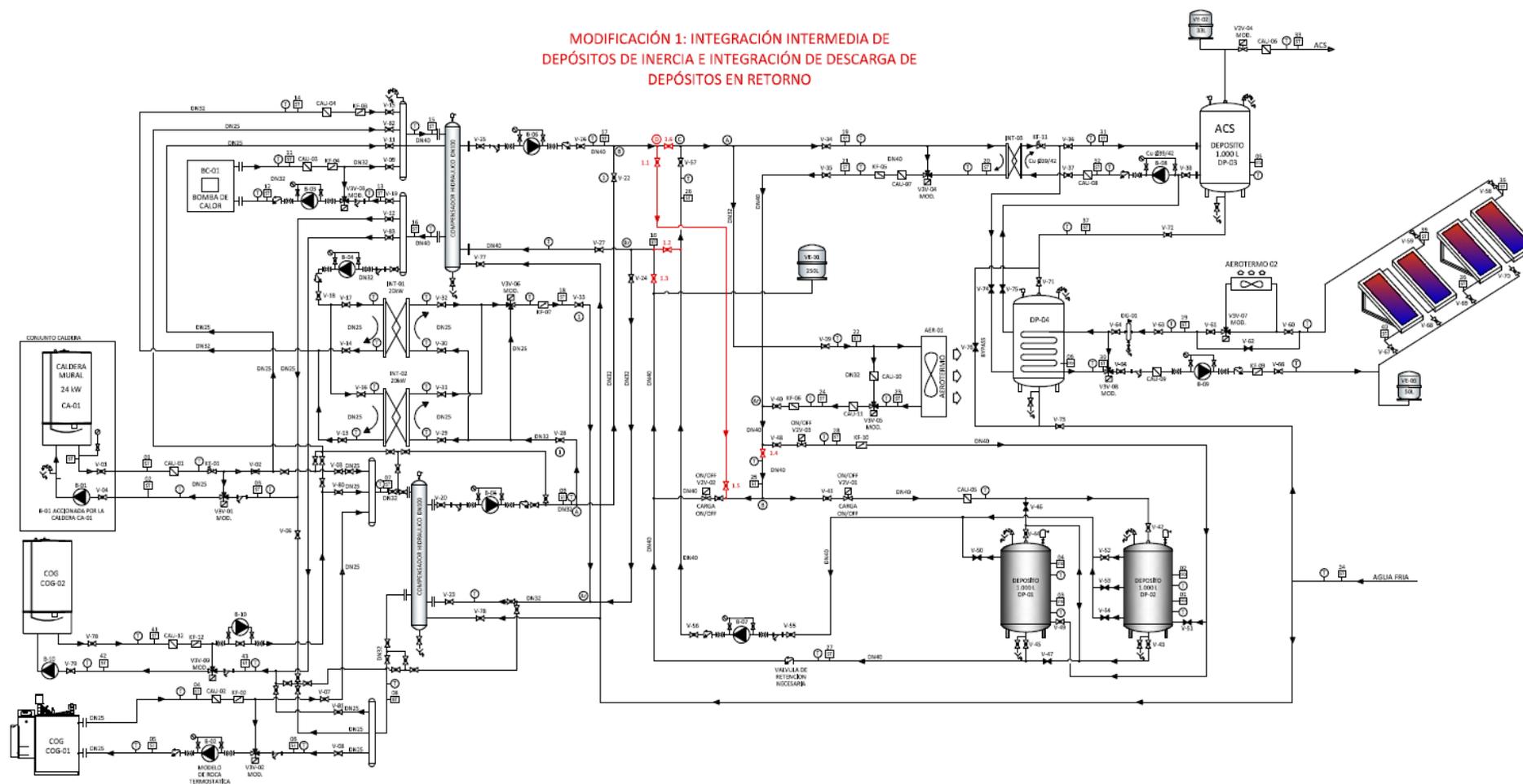
radiación solar global de su emplazamiento y a la demanda de agua caliente del edificio o de la piscina. Estos valores de exigencia tienen consideración de mínimos.

- **DB HE5: Contribución fotovoltaica mínima de energía eléctrica.** En los edificios establecidos por el CTE se incorporarán sistemas de captación y transformación de energía solar en energía eléctrica por procedimientos fotovoltaicos para uso propio o suministro a la red. Los valores derivados de esta exigencia tienen consideración de mínimos, sin perjuicio de valores más estrictos que puedan ser establecidos por las administraciones competentes y que contribuyan a la sostenibilidad, atendiendo a las características propias de su localización y ámbito territorial.

En cuanto al Reglamento de Instalaciones Térmicas de los Edificios(RITE) establece en su artículo 12 exigencias de eficiencia energética como las siguientes:

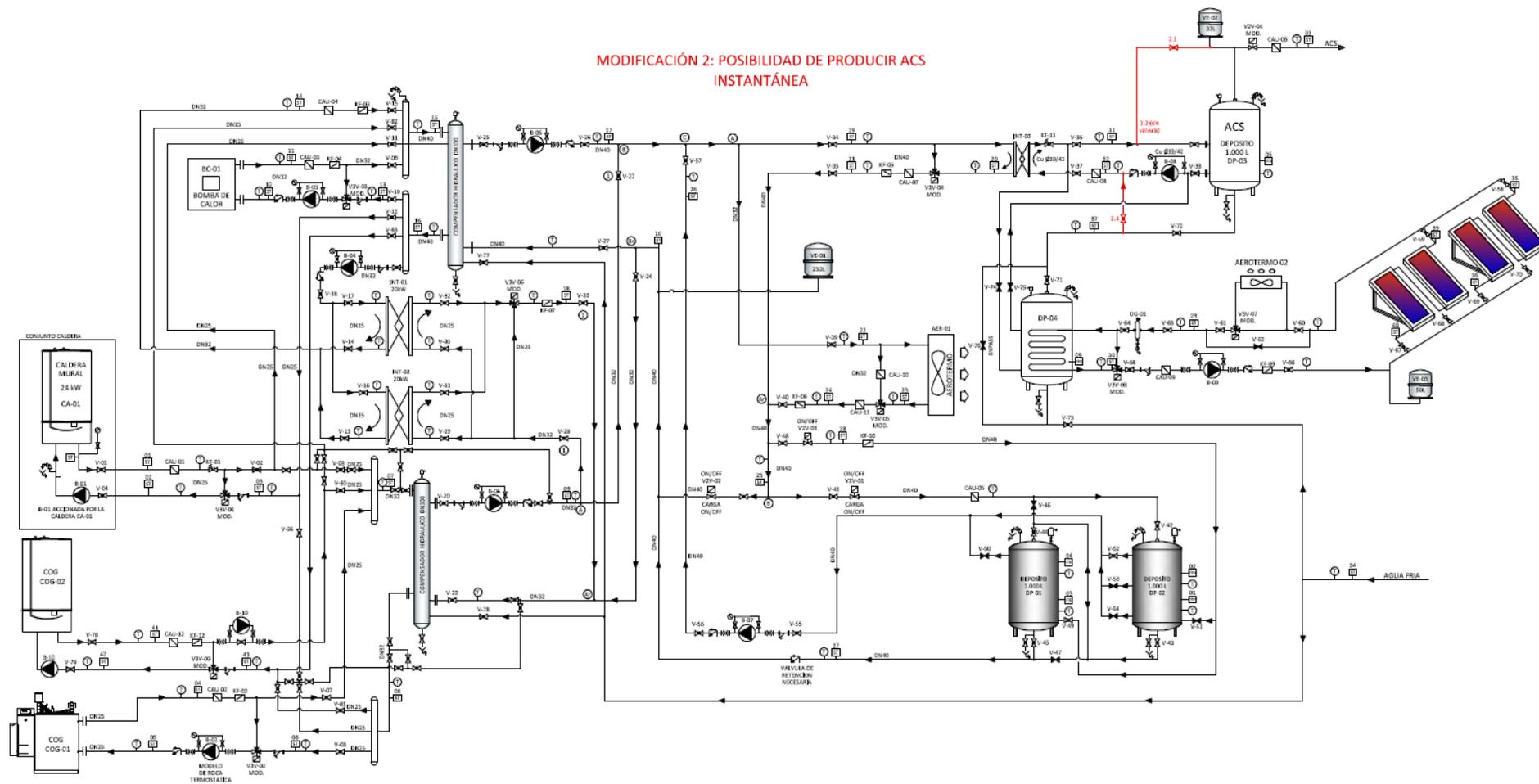
- **Rendimiento energético:** los equipos de generación de calor y frío, así como los destinados al movimiento y transporte de fluidos, se seleccionarán en orden a conseguir que sus prestaciones, en cualquier condición de funcionamiento, estén lo más cercanas posibles a su régimen de rendimiento máximo.
- **Distribución de calor y frío:** los equipos y las conducciones de las instalaciones térmicas deben quedar aislados térmicamente, para conseguir que los fluidos portadores lleguen a las unidades terminales con temperaturas próximas a las de salida de los equipos de generación.
- **Regulación y control:** las instalaciones estarán dotadas de los sistemas de regulación y control necesarios para que se puedan mantener las condiciones de diseño previstas en los locales climatizados, ajustando, al mismo tiempo, los consumos de energía a las variaciones de la demanda térmica, así como interrumpir el servicio.
- **Contabilización de consumos:** las instalaciones térmicas deben estar equipadas con sistemas de contabilización para que el usuario conozca su consumo de energía, y para permitir el reparto de los gastos de explotación en función del consumo, entre distintos usuarios, cuando la instalación satisfaga la demanda de múltiples consumidores.
- **Recuperación de energía:** las instalaciones térmicas incorporarán subsistemas que permitan el ahorro, la recuperación de energía y el aprovechamiento de energías residuales.
- **Utilización de energías renovables:** las instalaciones térmicas aprovecharán las energías renovables disponibles, con el objetivo de cubrir con estas energías una parte de las necesidades del edificio.

ANEXO III: Modificaciones físicas y plano de la instalación



Anexo III Plano 1: Modificación 1 de la instalación.

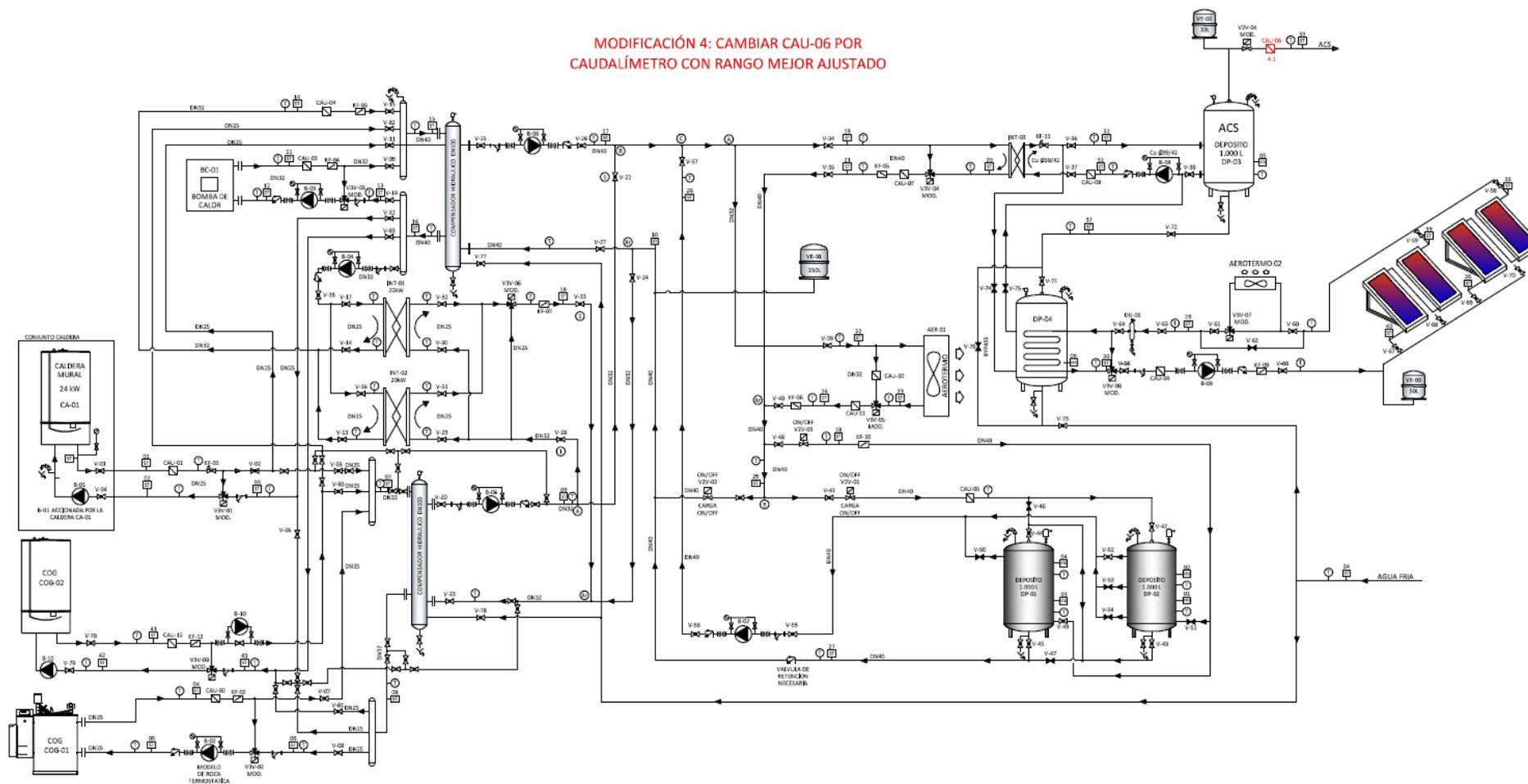
Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.



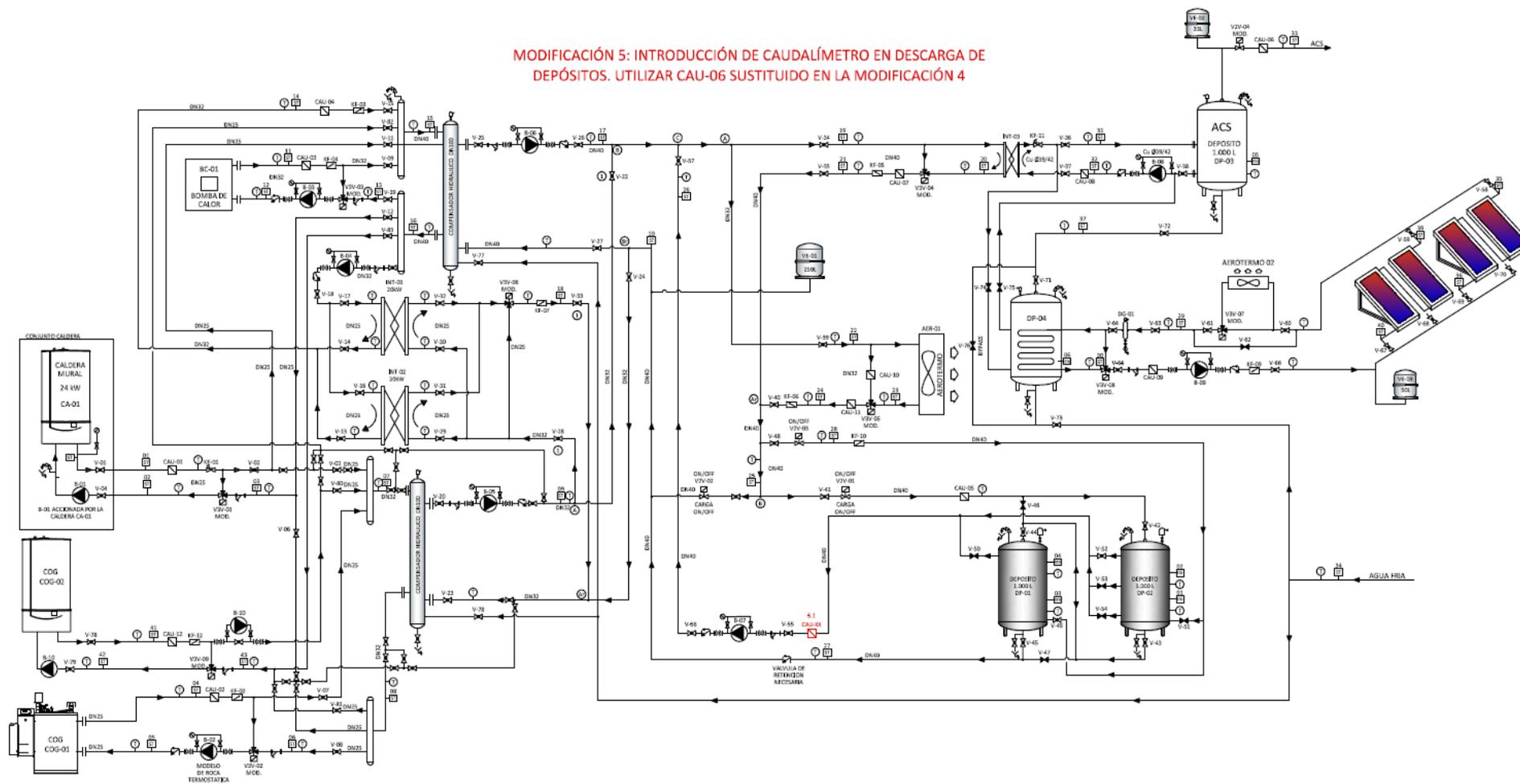
MODIFICACIÓN 2: POSIBILIDAD DE PRODUCIR ACS INSTANTÁNEA

Anexo III Plano 2: Modificación 2 de la instalación.

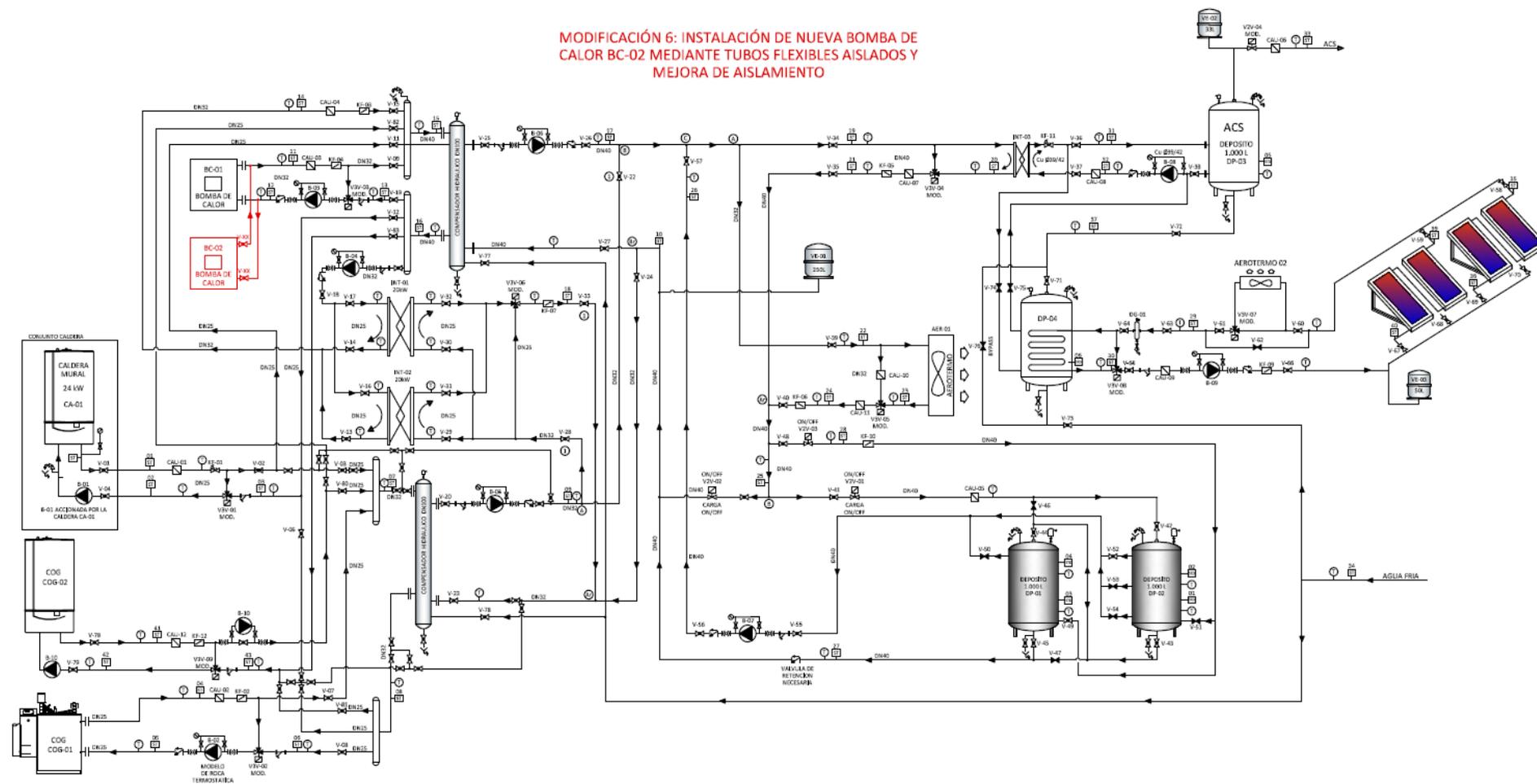
Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.



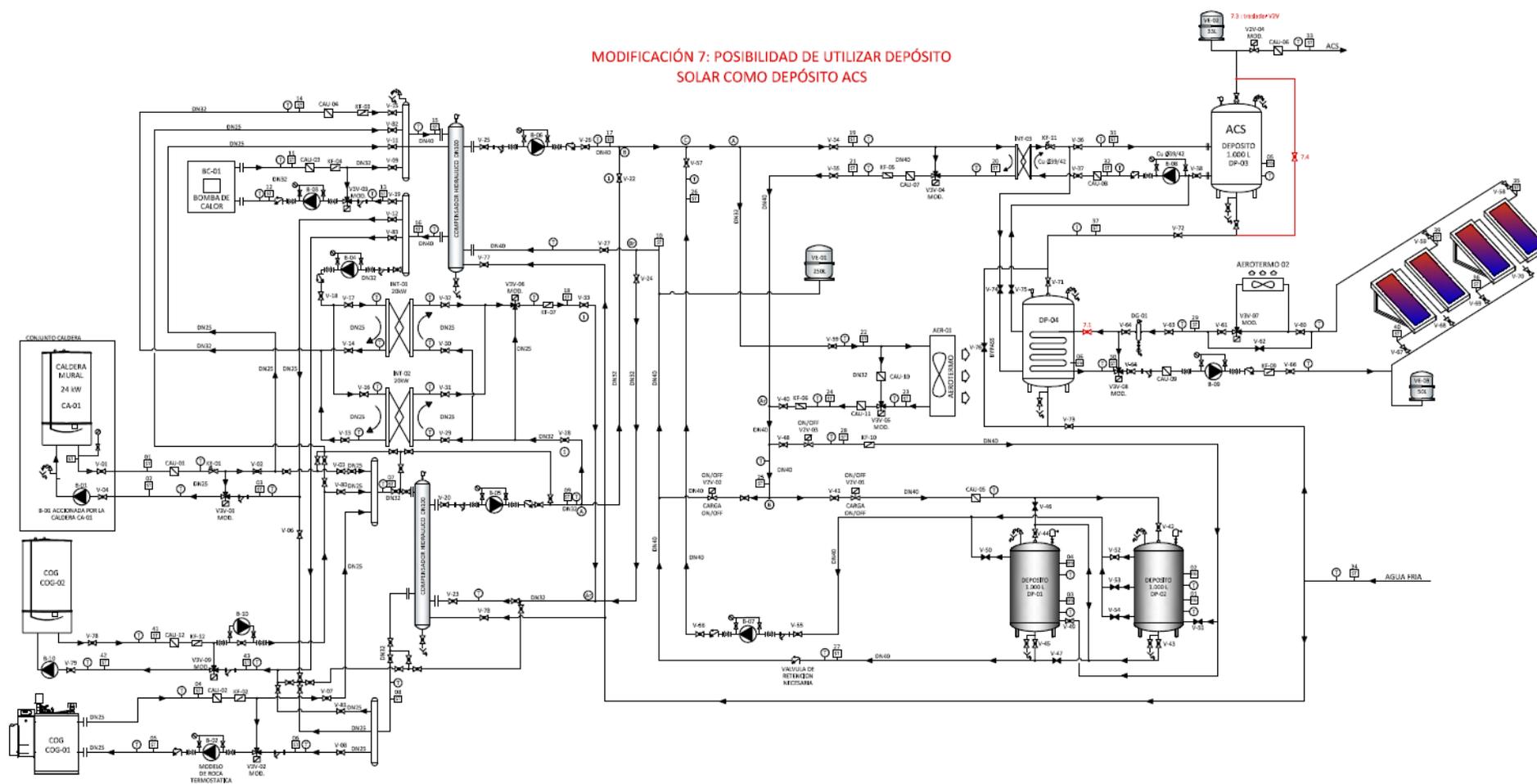
Anexo III Plano 4: Modificación 4 de la instalación.



Anexo III Plano 5: Modificación 5 de la instalación.



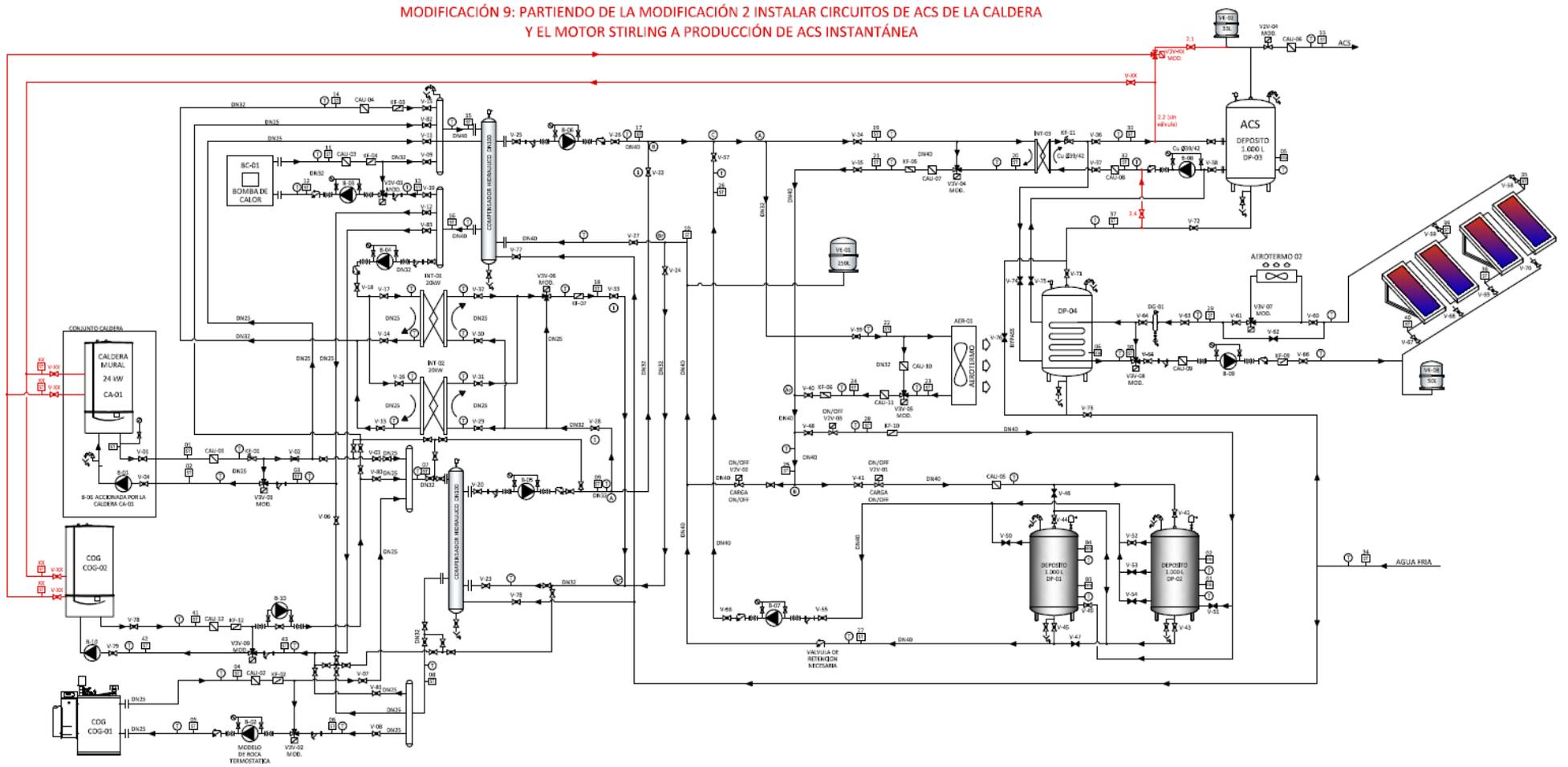
Anexo III Plano 6: Modificación 6 de la instalación.



Anexo III Plano 7: Modificación 7 de la instalación.

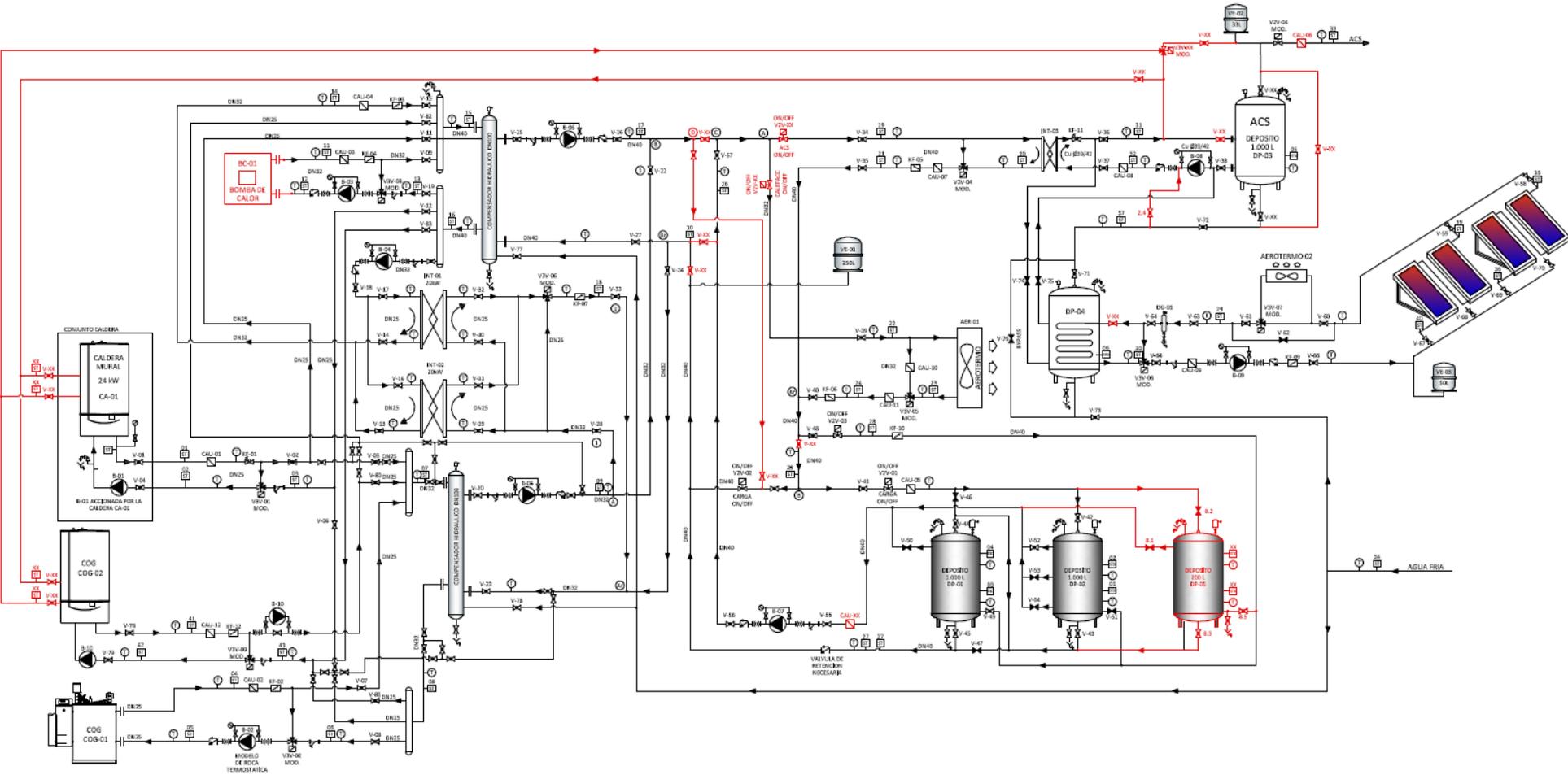
Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.

MODIFICACIÓN 9: PARTIENDO DE LA MODIFICACIÓN 2 INSTALAR CIRCUITOS DE ACS DE LA CALDERA Y EL MOTOR STIRLING A PRODUCCIÓN DE ACS INSTANTÁNEA



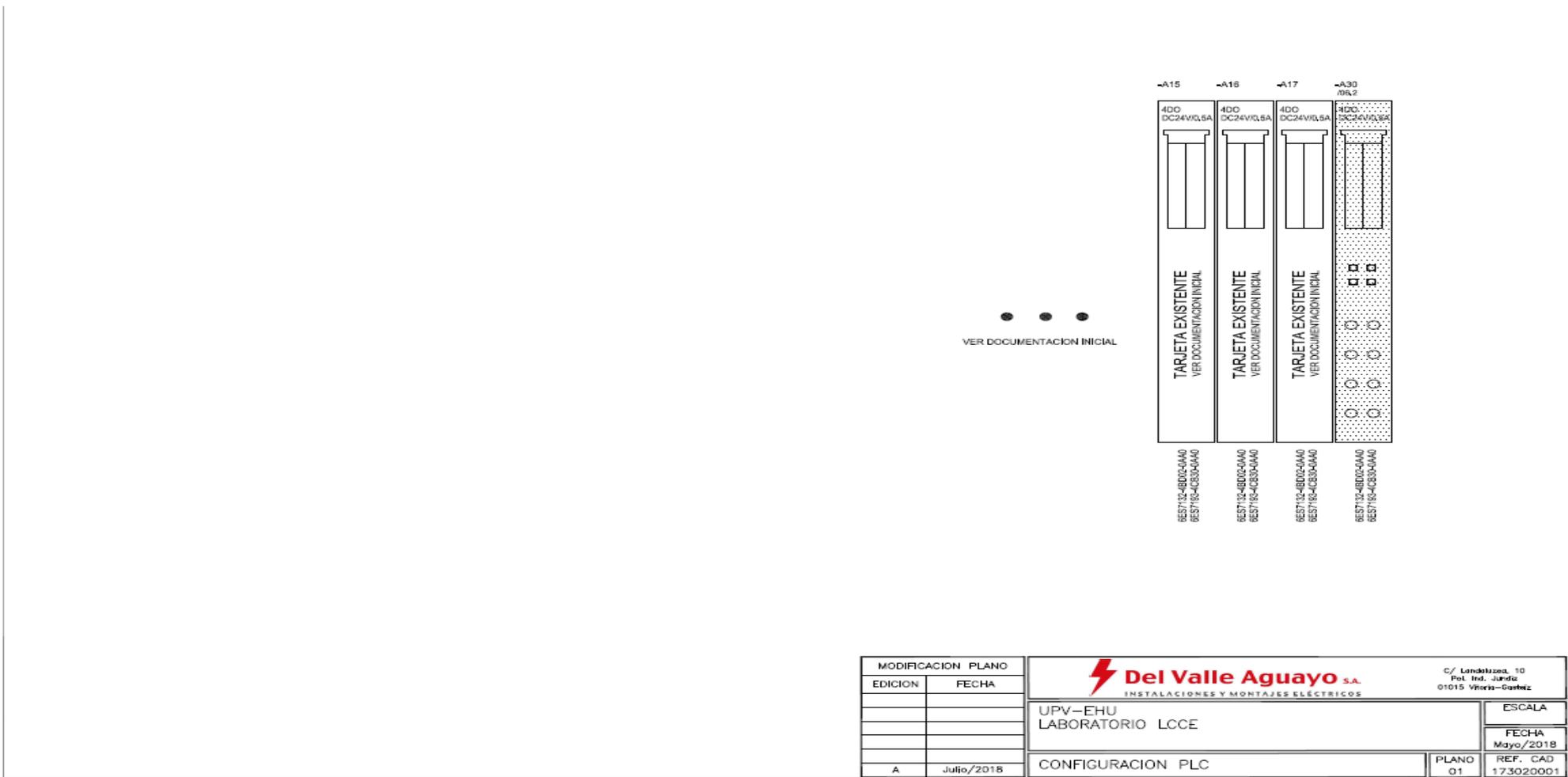
Anexo III Plano 9: Modificación 9 de la instalación.

Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.

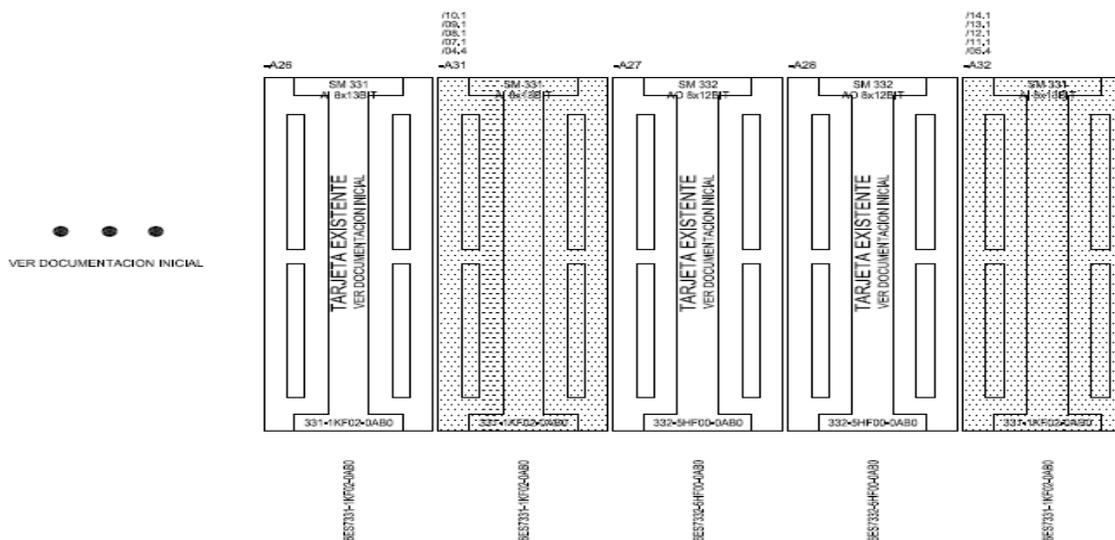


Anexo III Plano 10: Plano general de la instalación.

ANEXO IV: Mejoras de control y calibrado



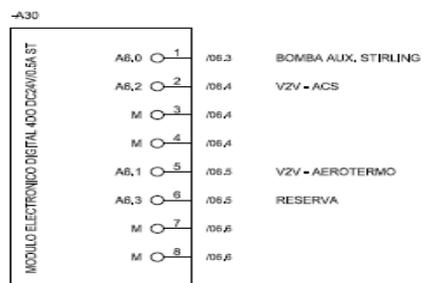
Anexo IV Imagen 1: Plano tarjeta de control (1/15).



MODIFICACION PLANO		 C/ Landeluzoa, 10 Pol. Ind. Jurdia 01015 Vitoria-Gasteiz	
EDICION	FECHA		
		UPV-EHU LABORATORIO LOCE	
		CONFIGURACION PLC	
A	Julio/2018	PLANO 02	ESCALA FECHA Mayo/2018 REF. CAD 173020001

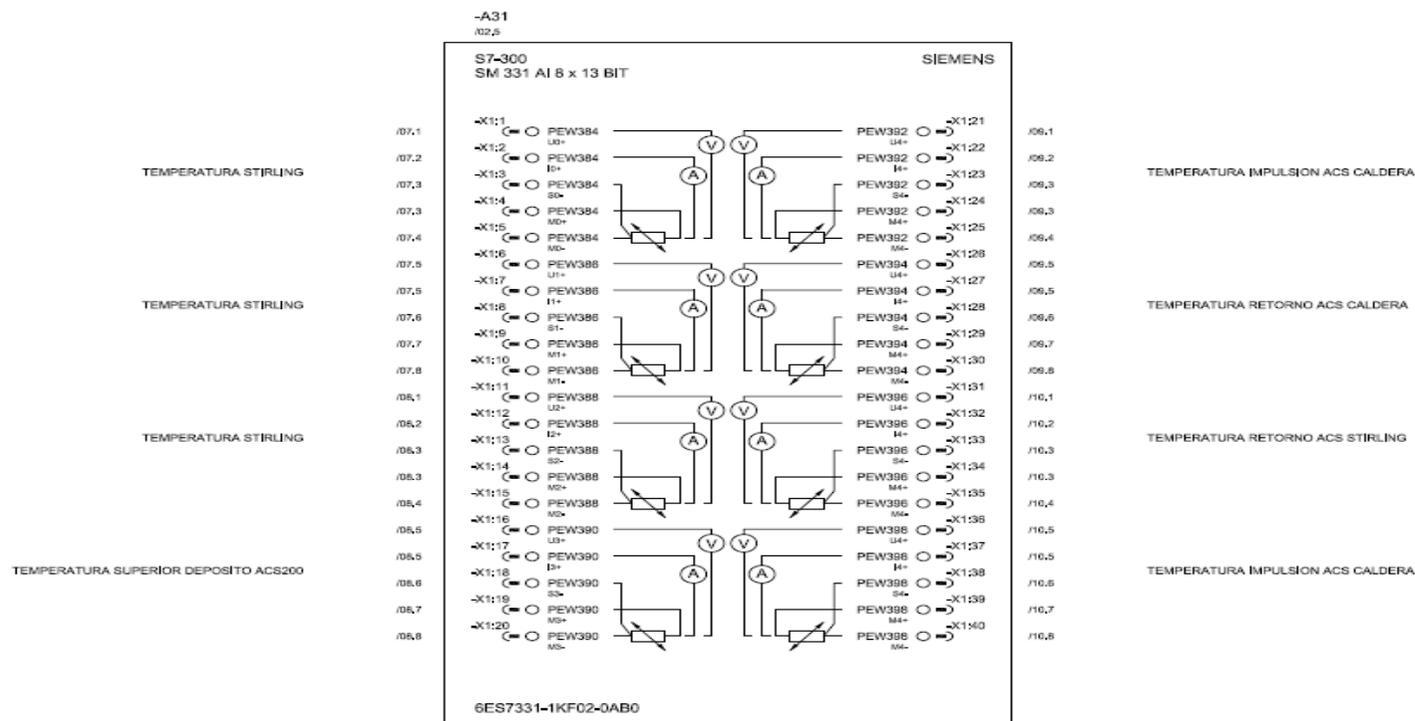
Anexo IV Imagen 2: Plano tarjeta de control (2/15).

Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.



MODIFICACION PLANO		 Del Valle Aguayo S.A. <small>INSTALACIONES Y MONTAJES ELÉCTRICOS</small>	<small>C/ Landáizosa, 10 Pol. Ind. Jandiz 01015 Vitoria-Gasteiz</small>	
EDICION	FECHA		ESCALA	
		UPV-EHU LABORATORIO LCCE		FECHA Mayo/2018
A	Julio/2018	RESUMEN E/S PLC	PLANO 03	REF. CAD 173020001

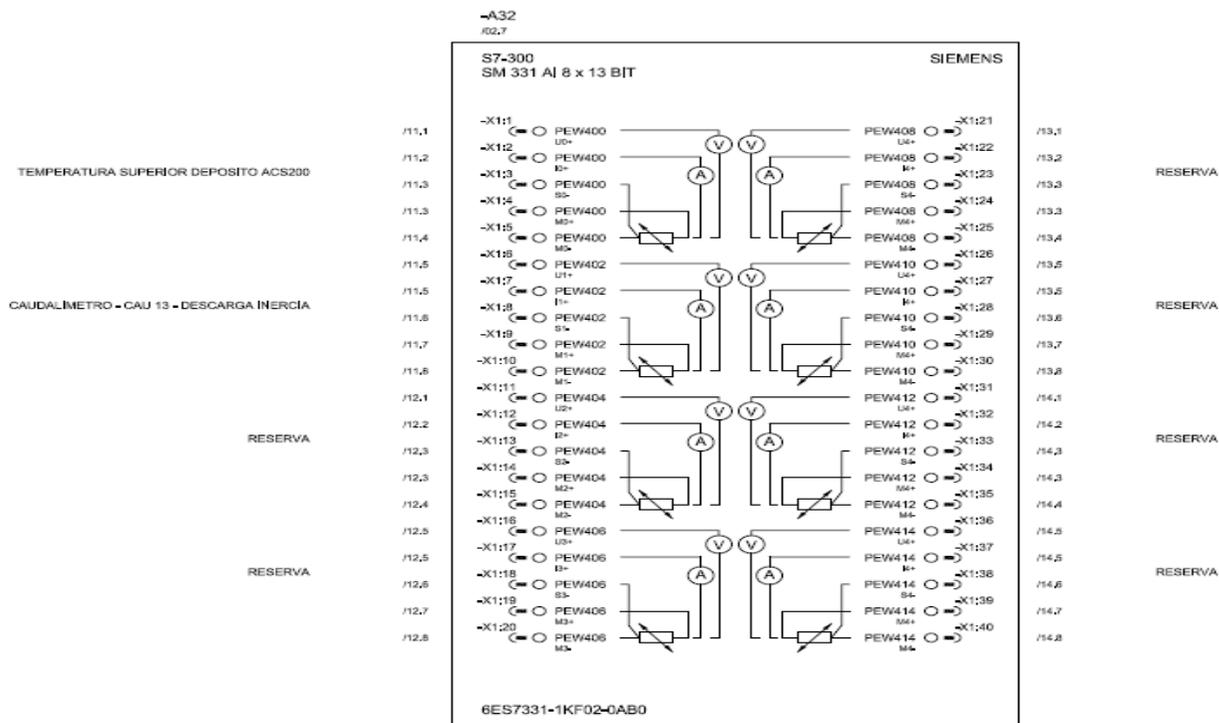
Anexo IV Imagen 3: Plano tarjeta de control (3/15).



MODIFICACION PLANO		C/ Lardakua, 10 Pol. Ind. Jundiz 01015 Villarreal-Garbiz	
EDICION	FECHA	UPV-EHU LABORATORIO LCCE	ESCALA
			FECHA Mayo/2018
		RESUMEN E/S PLC	PLANO
A	Julio/2018		04
			REF. CAD 173020001

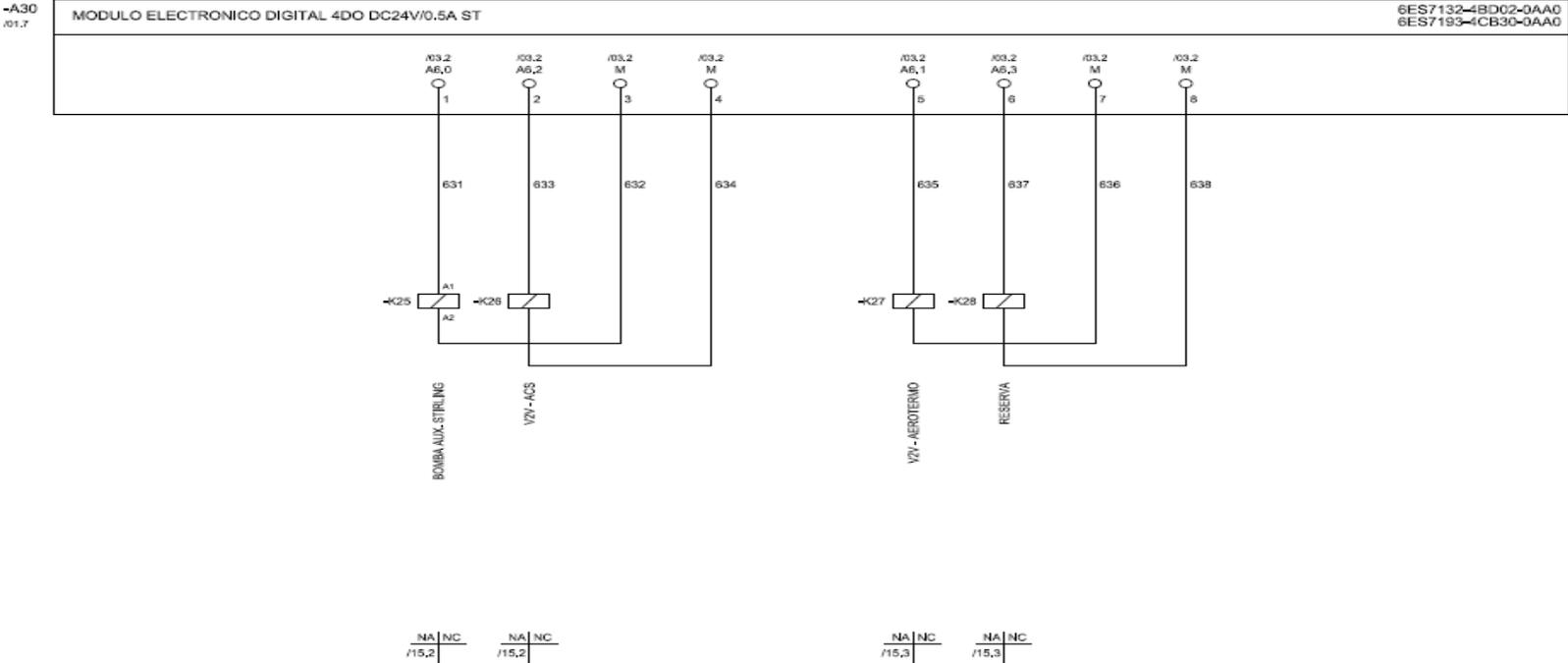
Anexo IV Imagen 4: Plano tarjeta de control (4/15).

Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.



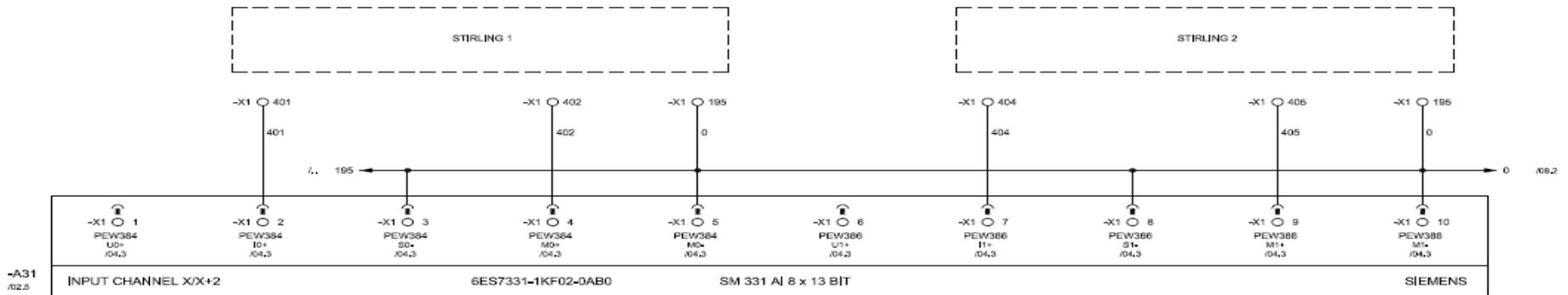
MODIFICACION PLANO		Del Valle Aguayo S.A. <small>INSTALACIONES Y MONTAJES ELECTRICOS</small>		<small>C/ Lendakoa, 10 Pol. Ind. Jandiz 01015 Vitoria-Gasteiz</small>
EDICION	FECHA	UPV-EHU LABORATORIO LCCE		ESCALA
				FECHA Mayo/2018
A	Julio/2018	RESUMEN E/S PLC		PLANO 05
				REF. CAD 173020001

Anexo IV Imagen 5: Plano tarjeta de control (5/15).



MODIFICACION PLANO		 C/ Landakoz, 10 Pol. Ind. Jandiz 01015 Vitoria-Gasteiz	
EDICION	FECHA		
		UPV-EHU LABORATORIO LCCE	ESCALA
			FECHA Mayo/2018
A	Julio/2018	ESQUEMA DE MANDO PLC – DO	PLANO 06 REF. CAD 173020001

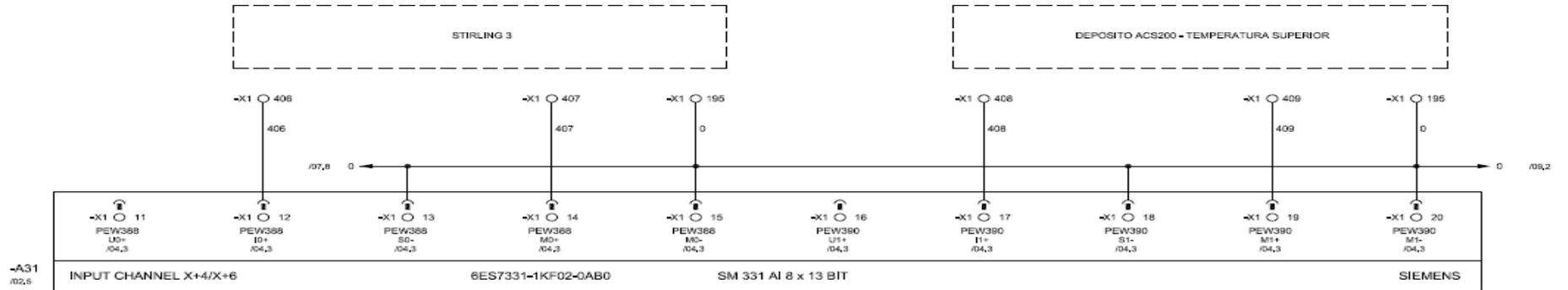
Anexo IV Imagen 6: Plano tarjeta de control (6/15).



MODIFICACION PLANO		 C/ Landeluzoa, 10 Pol. Ind. Jandiz 01015 Vitoria-Gasteiz	ESCALA
EDICION	FECHA		FECHA
		UPV-EHU LABORATORIO LCCE	Mayo/2018
A	Julio/2018		ESQUEMA DE MANDO PLC — AI
		PLANO 07	

Anexo IV Imagen 7: Plano tarjeta de control (7/15).

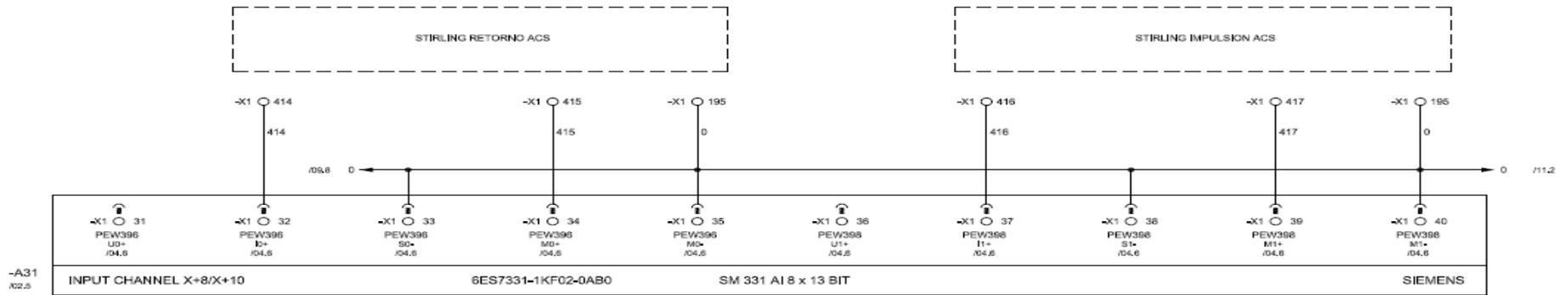
Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.



MODIFICACION PLANO		 C/ Landakozoa, 10 Pol. Ind. Jandia 01015 Vitoria-Gasteiz	ESCALA
EDICION	FECHA		FECHA
		UPV-EHU LABORATORIO LCCE	Mayo/2018
A	Julio/2018	ESQUEMA DE MANDO PLC - AI	REF. CAD 173020001
		PLANO 08	

Anexo IV Imagen 8: Plano tarjeta de control (8/15).

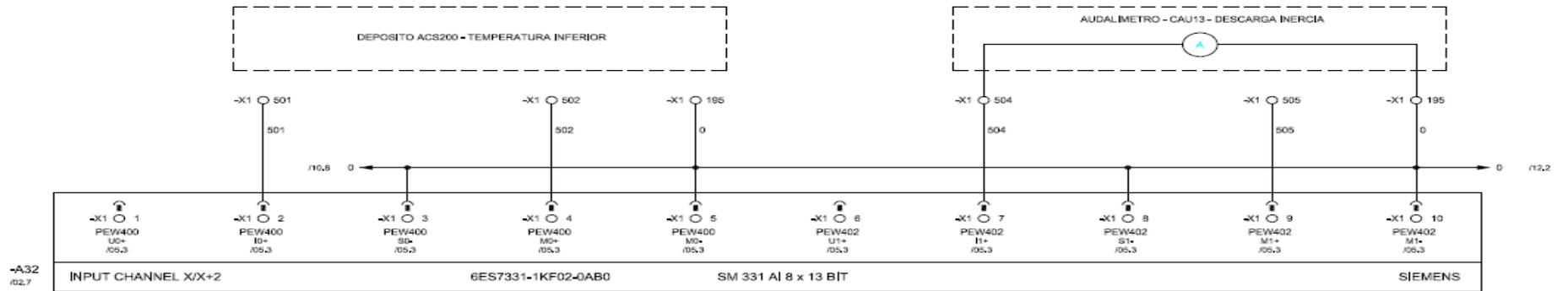
Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.



MODIFICACION PLANO		 C/ Landoluzoa, 10 Pol. Ind. Jandiz 01015 Villarreal-Garbizu
EDICION	FECHA	
		UPV-EHU LABORATORIO LCCE
		ESCALA
		FECHA
		Mayo/2018
		REF. CAD
A	Julio/2018	ESQUEMA DE MANDO PLC — AI
		PLANO
		1.0
		17.3020001

Anexo IV Imagen 10: Plano tarjeta de control (10/15).

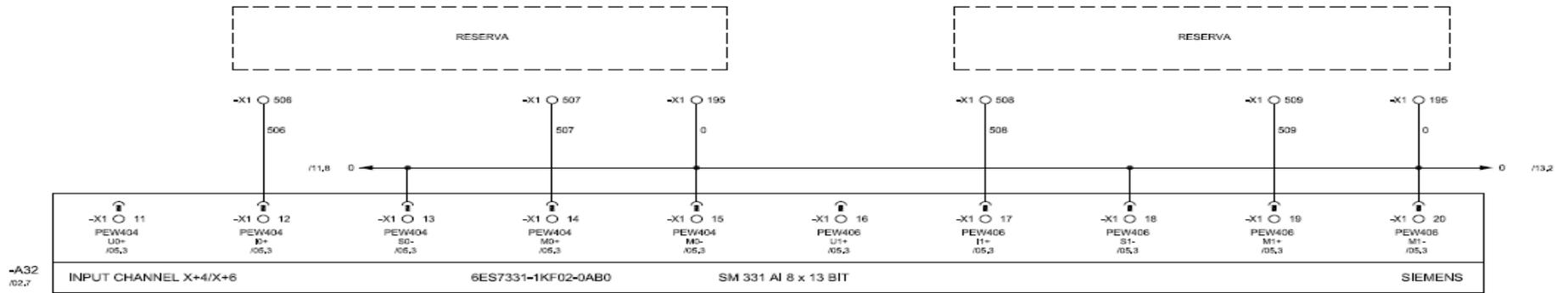
Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.



MODIFICACION PLANO		 C/ Lumbaluzoa, 10 Pol. Ind. Jandiz 01015 Vitoria-Gasteiz	
EDICION	FECHA	UPV-EHU LABORATORIO LCCE	ESCALA
			FECHA Mayo/2018
A	Julio/2018	ESQUEMA DE MANDO PLC - AI	PLANO 11
			REF. CAD 173020001

Anexo IV Imagen 11: Plano tarjeta de control (11/15).

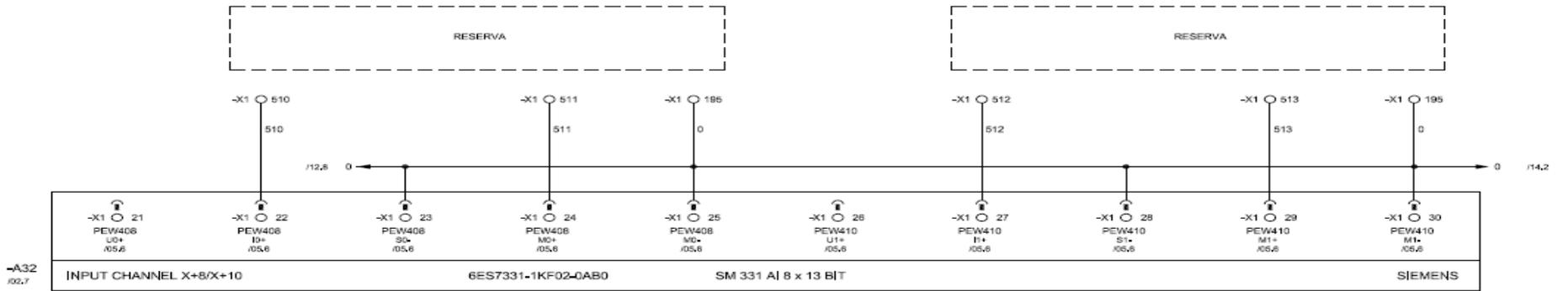
Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.



MODIFICACION PLANO		 C/ Landatuzea, 10 Pol. Ind. Jandiz 01015 Vitoria-Gasteiz	ESCALA
EDICION	FECHA		
		UPV-EHU LABORATORIO LCEE	FECHA
			Mayo/2018
A	Julio/2018	ESQUEMA DE MANDO PLC - AI	PLANO 12 REF. CAD 173020001

Anexo IV Imagen 12: Plano tarjeta de control (12/15).

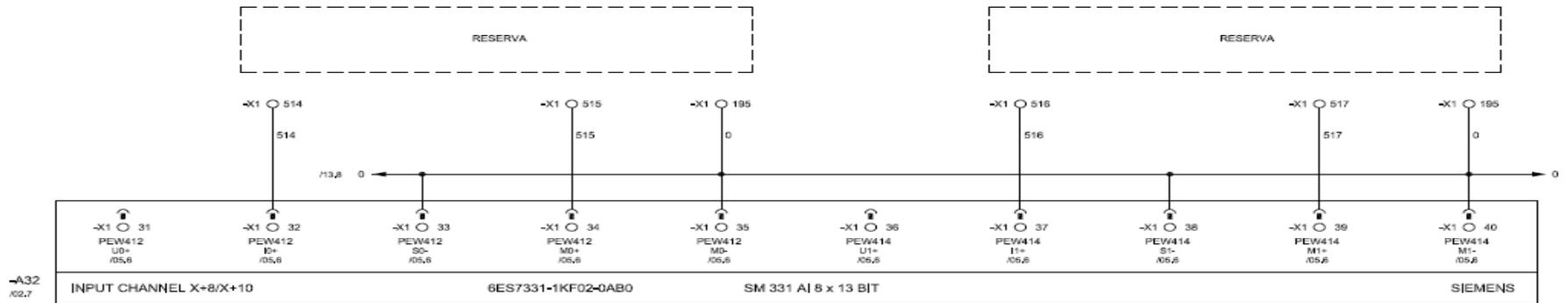
Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.



MODIFICACION PLANO		 C/ Landeluzeta, 10 Pol. Ind. Janda 01015 Vitoria-Gasteiz	ESCALA
EDICION	FECHA		FECHA
		UPV-EHU LABORATORIO LCCE	Mayo/2018
A	Julio/2018	ESQUEMA DE MANDO PLC — AI	REF. CAD 17.3020001
		PLANO 1.3	

Anexo IV Imagen 13: Plano tarjeta de control (13/15).

Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.

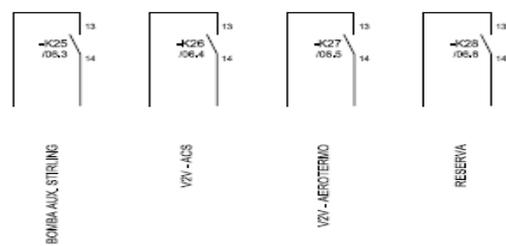


-A32
/02.7

MODIFICACION PLANO		 C/ Lerdokazea, 10 Pol. Ind. Jandía 01015 Vitoria-Gasteiz	ESCALA
EDICION	FECHA		
		UPV-EHU LABORATORIO LCCE	FECHA
			Mayo/2018
A	Julio/2018	ESQUEMA DE MANDO PLC – AI	REF. CAD
		PLANO	17.3020001
		14	

Anexo IV Imagen 14: Plano tarjeta de control (14/15).

Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.



MODIFICACION PLANO		 <small>C/ Landoluzoa, 10 Pol. Ind. Janda 01015 Vitoria-Gasteiz</small>	ESCALA
EDICION	FECHA		
		UPV-EHU LABORATORIO LCCE	FECHA
			Mayo/2018
A	Julio/2018	ESQUEMA DE CONTROL	PLANO 1.5 REF. CAD 17.302.000.1

Anexo IV Imagen 15: Plano tarjeta de control (15/15).

Calibración y optimización de un sistema híbrido para generación de calefacción y agua caliente sanitaria para una vivienda unifamiliar.

Anexo IV Tabla 1: Coeficientes de calibraciones de sondas de temperatura.

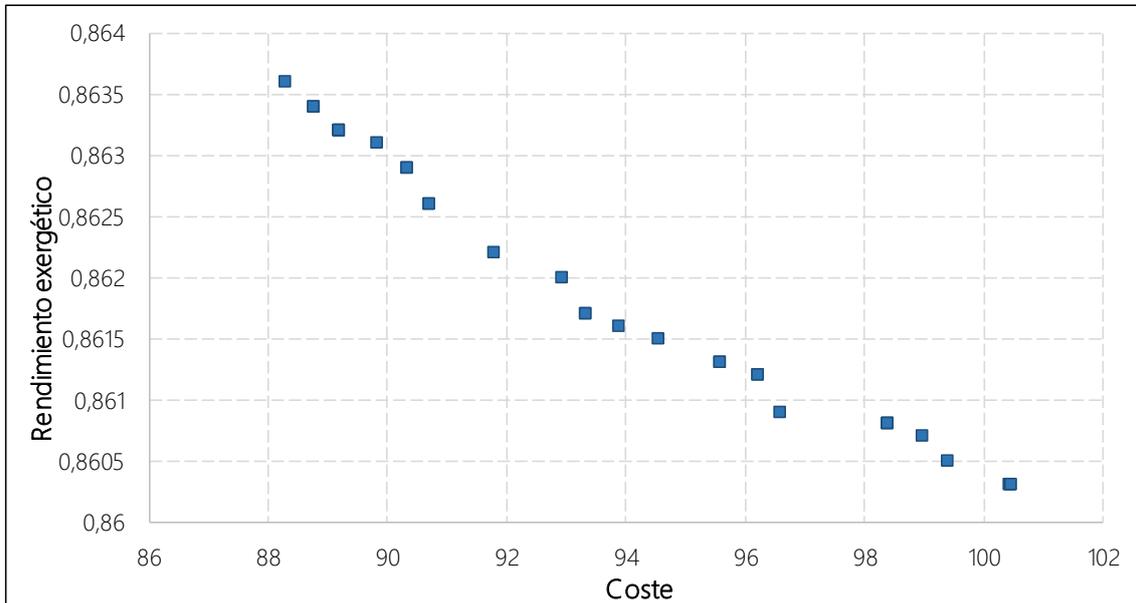
Sonda	A	B	Sonda	A	B
1	1,0004	0,0768	25	1,0030	-0,3197
2	0,9993	-0,2381	26	0,9855	0,64657
3	1,0022	-0,2931	27	0,9934	-1,1391
4	1,0064	-0,1769	28	0,9951	0,1795
5	0,9925	0,2121	29	1,0082	-0,5351
6	0,9922	0,0221	30	1,0145	-0,7415
7	1,0276	-2,2048	31	0,9920	0,1748
8	0,9898	0,5932	32	0,9961	-0,1771
9	1,0161	-0,1062	33	0,9887	0,4890
10	0,99428	0,1525	34	1,0000	0,1628
11	0,9890	0,5156	37	1,0068	-0,0851
12	0,9857	0,2141	41	1,0026	-0,0972
13	0,9792	0,8524	42	1,0043	-0,0316
14	0,9910	0,3429	43	1,0015	-0,0173
15	1,0009	0,1121	44	0,9963	0,3907
16	0,9760	1,1034	45	1,0069	3,8241
17	0,9929	-0,1761	46	1,0051	0,2149
18	1,0038	0,6019	47	1,0070	0,0536
19	0,9937	1,6331	D3	0,9983	0,1521
20	0,9965	0,1139	D4	0,9978	0,3855
21	0,9816	0,3042	D5	1,0087	-0,0279
22	0,9859	0,1758	D6	1,0066	0,4390
23	1,0022	-0,3339	D7	0,9991	0,0245
24	0,9967	0,2624	D8	0,9992	-0,2413

Anexo IV Tabla 2: Coeficientes de calibraciones de caudalímetros.

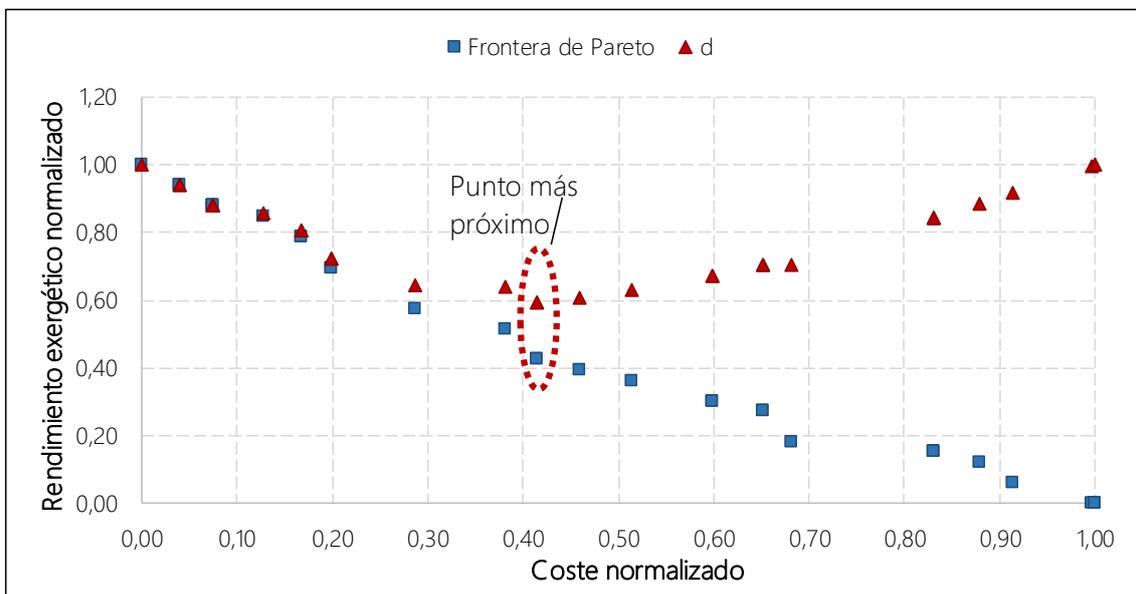
	A	B
CAU 5	0,9766	-1,5697
CAU 7	1,0409	220,1549
CAU 10	1,1582	8,5511
CAU 11	1,0053	-5,1063
CAU 13	0,9873	-5,6808

ANEXO V: Resto de casos de optimizaciones

15% de pérdidas de calor

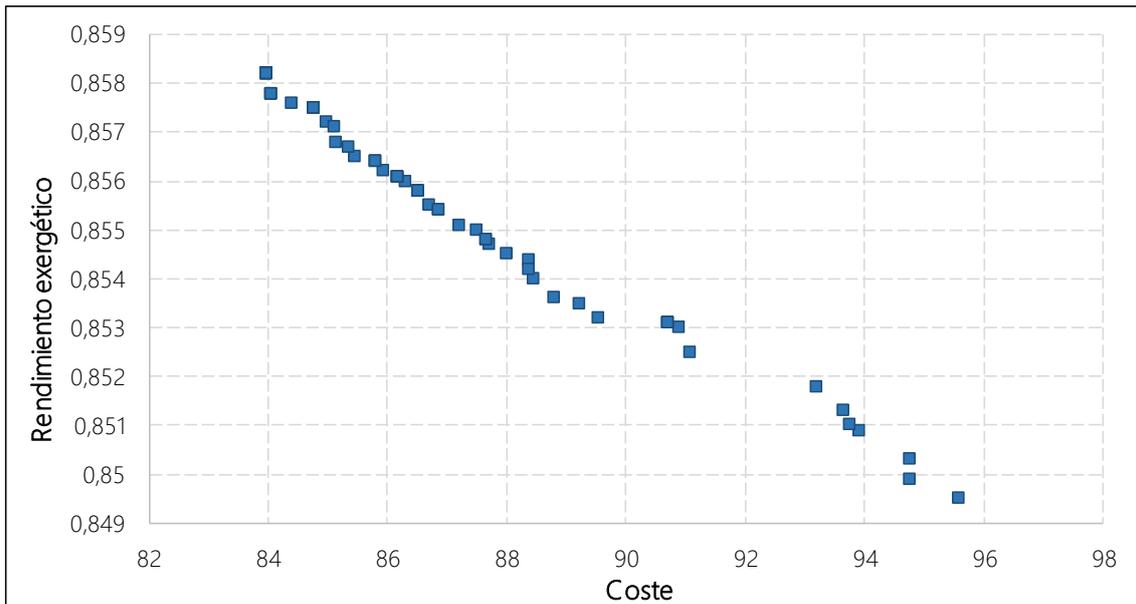


Anexo V Gráfica 1: Curva de Pareto caso 15%.

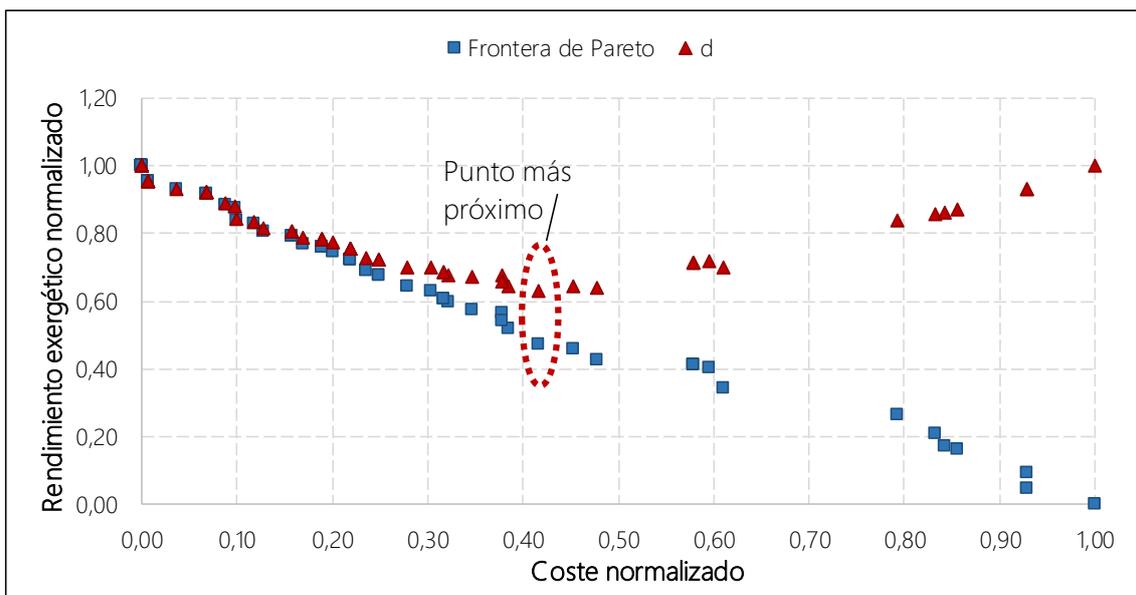


Anexo V Gráfica 2: Curva de Pareto y curva normalizada caso 15%.

10% de pérdidas de calor

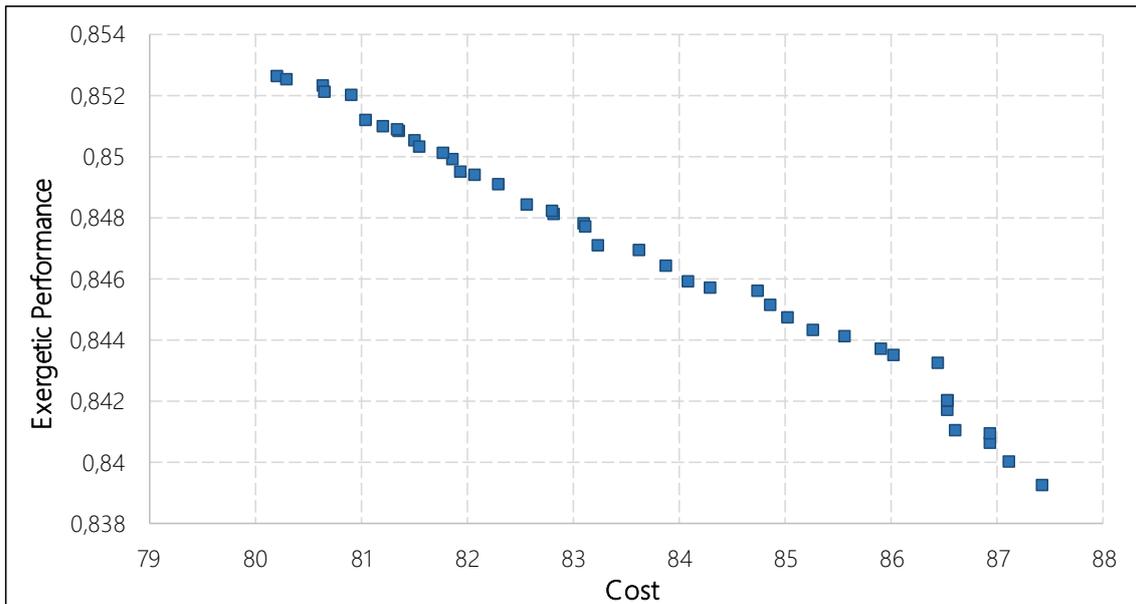


Anexo V Gráfica 3: Curva de Pareto caso 10%.

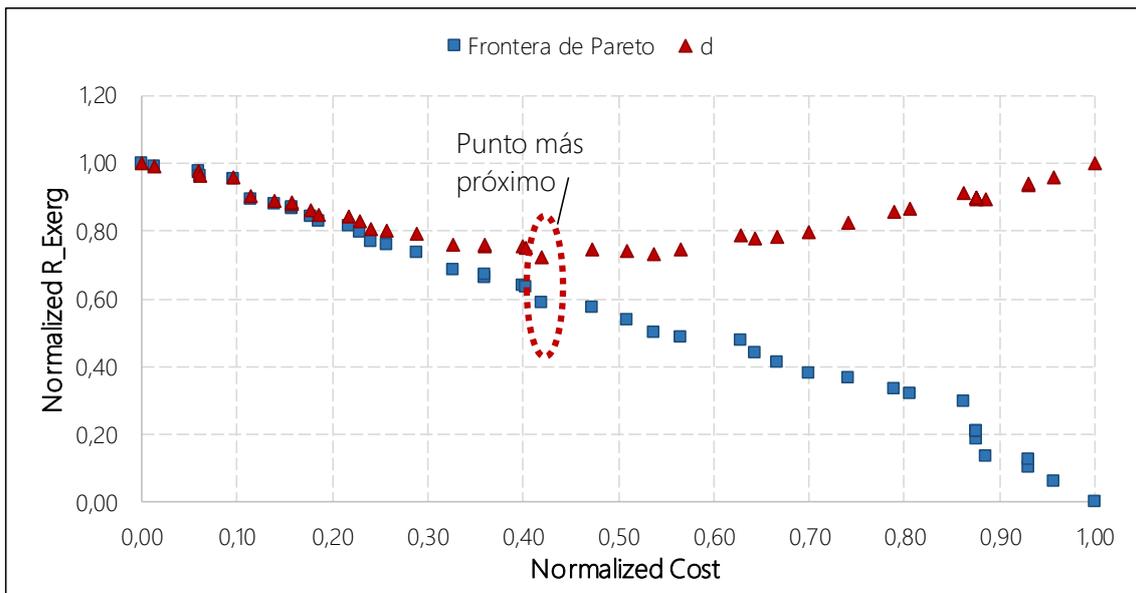


Anexo V Gráfica 4: Curva de Pareto y curva normalizada caso 10%.

5% de pérdidas de calor

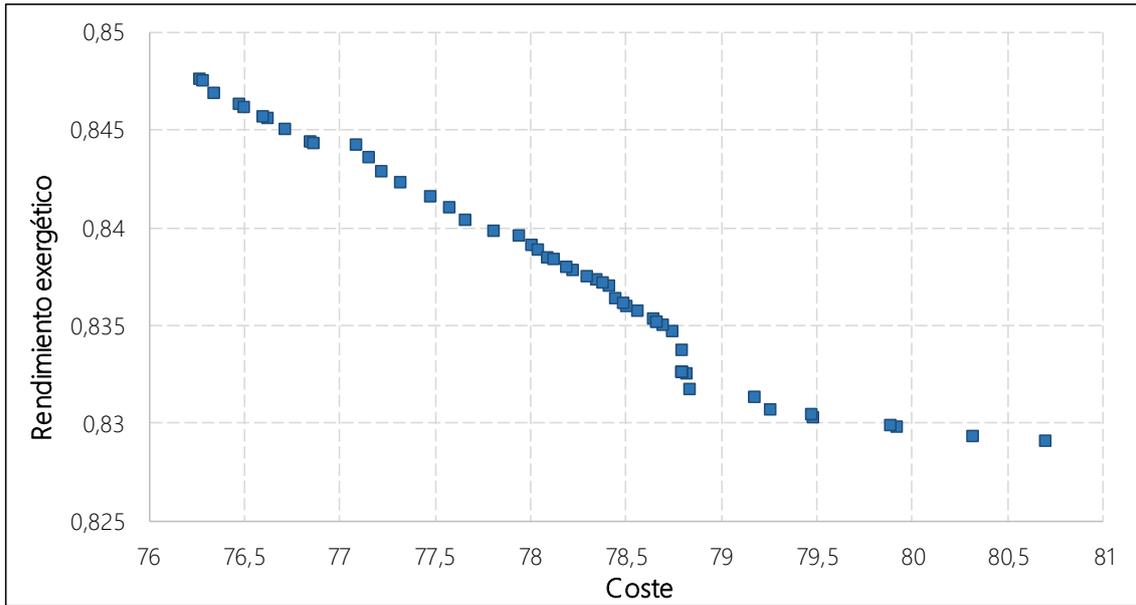


Anexo V Gráfica 5: Curva de Pareto caso 5%.

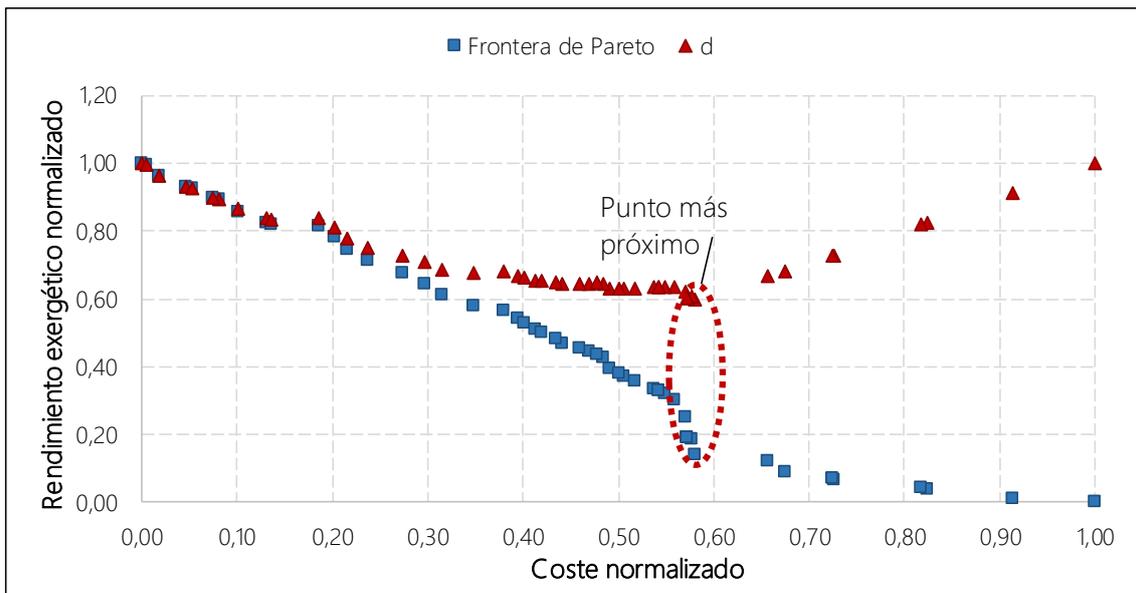


Anexo V Gráfica 6: Curva de Pareto y curva normalizada caso 5%.

0% de pérdidas de calor



Anexo V Gráfica 7: Curva de Pareto caso 0%.



Anexo V Gráfica 8: Curva de Pareto y curva normalizada caso 0%.