

DOCUMENTO N°1, MEMORIA

ÍNDICE GENERAL

	Pag
1.1 MEMORIA DESCRIPTIVA	4
1.2 CÁLCULOS	98
1.3 ESTUDIO ECONÓMICO	101
1.4 ANEJOS	104



1.1 MEMORIA DESCRIPTIVA



MEMORIA DESCRIPTIVA

ÍNDICE GENERAL

<i>Memoria</i>	5
<i>Capítulo 1 Introducción</i>	6
1.1.1.1 Estado del arte	6
1.1.1.2 Motivación del proyecto	7
1.1.1.3 Objetivos	8
1.1.1.4 Metodología	9
1.1.1.5 Recursos y herramientas empleadas.....	10
<i>Capítulo 2 Memoria descriptiva</i>	11
1.1.2.1 Efecto Peltier	11
1.1.2.2 El sistema térmico objeto de estudio	14
1.1.2.2.1 Diseño y construcción del prototipo.....	14
1.1.2.2.2 Montaje del módulo termoelectrico.....	16
1.1.2.2.3 Aislamiento del prototipo	18
1.1.2.2.4 Adquisición de temperaturas	19
1.1.2.2.5 Hardware de adquisición de datos.....	21
1.1.2.2.6 El amplificador	23
1.1.2.2.7 Análisis de la señal del servoamplificador	27
1.1.2.2.8 Filtrado de la señal del servoamplificador	31
1.1.2.2.9 Alimentación del circuito.....	33
1.1.2.3 Obtención de un modelo de la planta	39
1.1.2.3.1 Fundamentos teóricos.....	39
1.1.2.3.2 Modelo del sistema “caja blanca”	48
1.1.2.3.3 Identificación del modelo “caja negra”	66
1.1.2.3.4 Conclusión.....	71



1.1.2.4	Diseño de un control.....	72
1.1.2.4.1	Implantación del control	72
1.1.2.4.2	Optimización del mando.....	74
1.1.2.4.3	Ensayo para la optimización del mando.....	81
	<i>Capítulo 3 Resultados experimentales.....</i>	<i>88</i>
	<i>Capítulo 4 Conclusiones.....</i>	<i>95</i>
	<i>Capítulo 5 Futuros desarrollos</i>	<i>96</i>
	<i>Bibliografía</i>	<i>97</i>
	1.2 CÁLCULOS	98
	Cálculos	99
	1.2.1 Parámetros de la célula	100
	1.3 Estudio económico.....	101
	ESTUDIO ECONÓMICO.....	102
	1.3.1 Estudio económico.....	103
	1.4 Anejos	104
	ANEJOS	105
	1.4.1 Listado de programas	106



MEMORIA

Capítulo 1 INTRODUCCIÓN

1.1.1.1 Estado del arte

En el mercado existen bastantes compañías que comercializan módulos termoeléctricos. Sólo algunas de ellas ofrecen un controlador de temperatura [1]. Esos controladores son un hardware externo que permite integrar un control PID completo, además de visualizar y seleccionar la temperatura deseada.

Un sistema de control en lazo cerrado, es aquel en el que las acciones de control se toman en función de la salida. Estas acciones de control ponen en funcionamiento a un actuador, que en nuestro caso es el módulo termoeléctrico, con el fin de ajustar la temperatura del sistema térmico a la temperatura requerida.

Para diseñar el control se precisa un modelo lineal que se ajuste al sistema térmico. La obtención del modelo no resulta trivial, y los estudios a los que se tiene acceso simplifican tanto el modelo térmico [2], que ya no es válido para el diseño de un control.

En este proyecto se realizará un análisis de la célula termoeléctrica, su rendimiento en función de sus parámetros constructivos, y se buscará el control adecuado para mejorar el comportamiento dinámico del sistema.

1.1.1.2 Motivación del proyecto

La utilización de módulos termoelectricos como bomba de calor es una aplicación que tiene antigüedad, pero no ha tenido despegue industrial por el menor rendimiento frente a los climatizadores por compresión de gas, ya que para mantener su funcionamiento en condiciones óptimas en un entorno determinado, se necesita establecer un control en la alimentación.

La termoelectricidad se utiliza actualmente en aplicaciones de reducido tamaño, en aquellas que se requiera la robustez que los módulos termoelectricos posee o en las que el impacto estético de un aire acondicionado tradicional es inadmisibile. En esa línea se enmarca el trabajo desarrollado en la universidad con los estudios del Paramento Transparente Activo¹.

Además, la termoelectricidad carece de pesados compresores, y de fluidos refrigerantes clorofluorocarbonados (CFC), que tan nocivos resultan para el medio ambiente.

Por otra parte, los módulos termoelectricos pueden ser usados como actuador en un sistema de control de temperatura en lazo cerrado, de modo que se puede fijar la temperatura de forma precisa. Por tanto, se va a realizar un control convencional, y a analizar las posibles mejoras que permitan obtener el máximo rendimiento de la célula, atendiendo a los parámetros que determinan sus condiciones de funcionamiento.

¹ El Paramento Transparente Activo es un sistema de climatización para viviendas y edificios, que usa la termoelectricidad como bomba térmica. Tiene la peculiaridad de integrar los módulos termoelectricos, en el propio cristal de las ventanas.



1.1.1.3 Objetivos

El objetivo de este proyecto es estudiar la problemática en el control del sistema térmico objeto de estudio.

Son objeto de estudio los siguientes aspectos:

- Modelo del sistema.
- Controles de tipo PID.
- Análisis de las limitaciones en los controles PID.
- Controles más sofisticados.

1.1.1.4 Metodología

Se pondrá en correcto funcionamiento el prototipo empleado en los anteriores proyectos, con un nuevo sistema de adquisición de datos.

Se desarrollará el software que permita medir y llevar a cabo acciones de control a través del hardware de adquisición y generación de datos.

Se estudiarán de forma teórica, los efectos físicos que acontezcan en el módulo termoeléctrico, dando especial relevancia a la dinámica de los mismos.

Se creará el modelo del sistema, se simulará y se implantarán los controles adecuados.

1.1.1.5 Recursos y herramientas empleadas

Para la realización del proyecto se ha empleado un sistema térmico construido por los anteriores alumnos que trabajaron en la climatización mediante células Peltier con este prototipo, así como su módulo de alimentación y conexiones de medida, mejorados para conseguir un correcto funcionamiento.

Se empleará el nuevo hardware de adquisición y generación de señales de *National Instruments*, para tomar las medidas necesarias de nuestro sistema, sin la problemática del ruido de la fuente de alimentación.

Se usará el software de *National Instruments Labview*, sus aplicaciones de adquisición y de generación de señales, y las que permitan crear un entorno que permita el control de temperatura del sistema térmico.

También se usará Matlab y Simulink para la obtención de un modelo que se ajuste a nuestro sistema, y para simular las diferentes estrategias de control que se escojan.

Capítulo 2 MEMORIA DESCRIPTIVA

1.1.2.1 Efecto Peltier

Para una mayor comprensión del funcionamiento del módulo termoelectrico y de todo el sistema de control en general, se pasa a una pequeña introducción del funcionamiento del mismo dando referencias históricas.

La interacción entre un fenómeno eléctrico y térmico se conoce desde el siglo XIX, cuando Joule observó que la materia ofrece cierta resistencia al movimiento de los electrones, los cuales ceden energía cinética al entorno en los sucesivos choques. Esta energía proporcionada por los electrones se disipa en forma de calor. Sin embargo, no es éste el único fenómeno de interacción termoelectrica. Otros efectos son los denominados Seebeck, Peltier y Thomson.

El efecto Peltier fue descubierto en el año 1834 por el físico francés Peltier J. C. A. surgió sobre la base del descubrimiento del físico alemán Seebeck T.J. en 1821, quien observó que en un circuito formado por dos conductores distintos, cuyas uniones soldadas se encuentran en medios con temperaturas distintas, aparece entre ambos una diferencia de potencial. Esta diferencia de potencial es función de la naturaleza de los conductores y de la diferencia de temperaturas. Este dispositivo se conoce como termopar.(Figura 2-1)

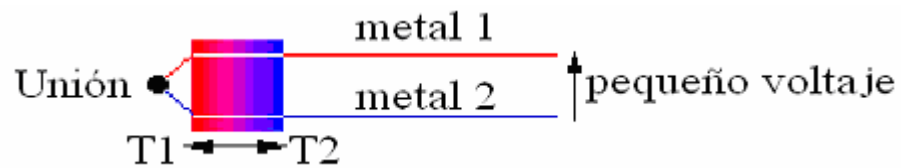


Figura 2-1 Termopar

La esencia del efecto Peltier, que básicamente es el contrario del efecto Seebeck, consiste en hacer pasar una corriente procedente de una fuente de energía eléctrica continua, a través de un circuito formado por dos conductores de distinta naturaleza, obteniéndose que una de sus uniones absorbe calor y la otra lo cede. El calor que cede el foco caliente será la suma de la energía eléctrica aportada al termoelemento y el calor que absorbe el foco frío, Figura 2-2 Módulo termoelectrico. Estos termoelementos, configurados de este modo, constituyen una máquina frigorífica.

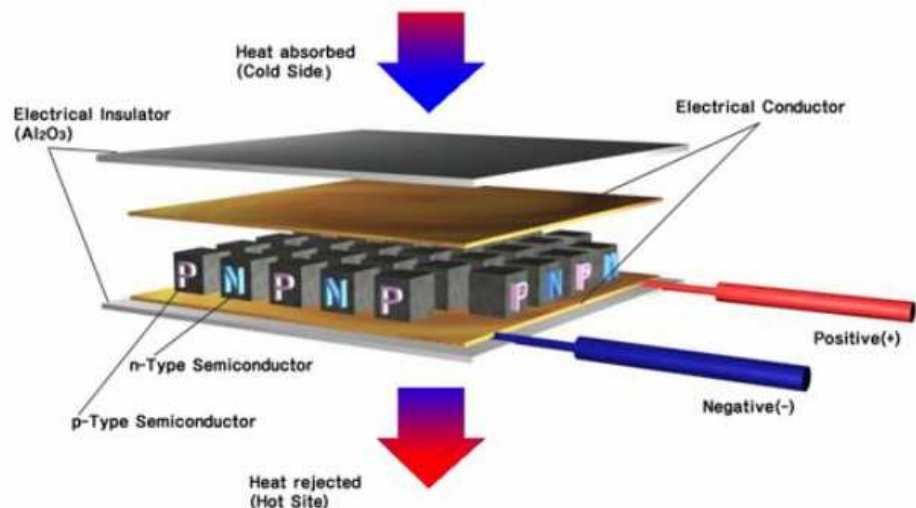


Figura 2-2 Módulo termoelectrico

El efecto Thomson, descubierto en 1857 por Thompson W., consiste en la absorción o liberación de calor por parte de un conductor eléctrico, con un gradiente de temperaturas, por el cual circula una corriente eléctrica.

Ya en 1885 el físico inglés Rayleigh J.W. planteó la posibilidad del uso de dispositivos termoeléctricos como generadores de corriente eléctrica. Sin embargo, pese a que los fenómenos termoeléctricos son bien conocidos desde hace ya más de cien años, su desarrollo, tanto como generador de corriente o como refrigeración, estuvo totalmente frenado debido a los escasos rendimientos que se obtenían. Como consecuencia, la mayor parte de las aplicaciones termoeléctricas, que han ido desarrollándose desde hace más de 30 años, han sido para el campo militar, donde es más importante la robustez y precisión que la eficiencia o el coste. En el mercado actual, la refrigeración termoeléctrica tiene un sitio en aplicaciones de medicina, aparatos científicos y en dispositivos en los cuales la potencia de refrigeración es muy pequeña y de puntual aplicación.

Tras el gran avance que supuso la incorporación de los materiales semiconductores a la termoelectricidad, en la refrigeración termoeléctrica no se ha logrado la eficiencia frigorífica que se esperaba, no se han obtenido los COP's (*Coefficient Of Performance*) que se preveían y el mercado de refrigeración sigue dominado por la máquina de compresión. Se pueden apuntar varias razones que expliquen el bajo nivel de aplicación en la actualidad. En primer lugar hay que señalar que tras el gran impulso que supuso la incorporación de los materiales semiconductores, la evolución de éstos ha sido más lenta de lo esperado. En segundo lugar, debido a que la pastilla Peltier suministra una elevada potencia calorífica en una pequeña superficie, resulta difícil disipar el calor de manera eficiente, provocando una importante disminución en el COP de la pastilla. De hecho, es importante señalar que las prestaciones de la refrigeración termoeléctrica dependen en primer lugar del desarrollo de materiales y en segundo lugar del diseño térmico. [3]

1.1.2.2 El sistema térmico objeto de estudio

1.1.2.2.1 Diseño y construcción del prototipo

En el desarrollo del proyecto original fue necesaria la construcción de un recinto en el que poder realizar ensayos. Dicho recinto fue construido en otro proyecto fin de carrera, con las siguientes dimensiones:

- 1.- Ancho: 18 cm
- 2.- Alto: 40,5 cm
- 3.- Largo: 32,5 cm

Esto se determinó así ya que la potencia frigorífica del módulo termoeléctrico seleccionado era la apropiada para volúmenes reducidos. El material con el que se realizó el prototipo es metacrilato con escuadras en aluminio para la unión de las diferentes planchas. La elección del metacrilato como base del prototipo se basó fundamentalmente por la gran resistencia de dicho material. Como el conjunto módulo termoeléctrico, disipadores y ventiladores tienen un peso elevado, es necesario que la plancha en la que está albergado dicho conjunto sea de mayor espesor al resto. Por dicho motivo se empleo una plancha de 5 mm para soportar el conjunto y siendo el resto de planchas en el prototipo de un espesor de 2 mm.

La Figura 2-3 muestra el prototipo montado. Como se observa en dicha figura el prototipo ya tiene montado el dispositivo termoeléctrico en la parte superior. También se puede observar en el interior del mismo la existencia de un conjunto formado por un disipador, un ventilador y dos resistencias. Dicho conjunto trata de simular las posibles perturbaciones del sistema introduciendo en él potencia calorífica.



Figura 2-3 Prototipo montado

Las dos resistencias colocadas bajo el disipador son de 10Ω cada una, capaces de disipar 50 W en conjunto. En el momento de la construcción surgió un problema con esa configuración. El ventilador colocado para disipar dicha potencia no era capaz de evacuarla y la temperatura del disipador era muy elevada en comparación con la del aire caliente que se obtenía de la refrigeración del mismo. Por este motivo se decidió optar por un ventilador y disipador mayores.

En la Figura 2-4 Conjunto ventilador-disipador-resistencias, se puede observar el detalle del ventilador, disipador y resistencias definitivos para la simulación de perturbaciones en el prototipo. Con esta configuración se obtiene una homogenización de la temperatura

interior, obteniendo valores de temperatura en el disipador parejas a las del aire caliente obtenidas del mismo.



Figura 2-4 Conjunto ventilador-disipador-resistencias

El siguiente paso en la construcción del prototipo fue el montaje del módulo termoeléctrico. Dicho montaje consta de varios componentes. El módulo necesita de elementos auxiliares capaces de provocar un flujo de calor entre sus caras. Para ello se emplearon un disipador y un ventilador para cada cara del módulo termoeléctrico. La aplicación se basa en el módulo termoeléctrico por efecto Peltier.

1.1.2.2 Montaje del módulo termoeléctrico

Dada una idea básica del funcionamiento del módulo termoeléctrico se pasa a detallar el montaje del mismo (Figura 2-5). Las caras de los disipadores tienen una superficie de cobre rodeada de aluminio. En la superficie de cobre es donde se colocará el módulo termoeléctrico. Dicha superficie debe estar totalmente limpia y bien

pulimentada para tener la mayor transmisión de calor entre el disipador y el propio módulo termoeléctrico. Para una mayor transmisión entre el disipador y el módulo se optó por aplicar una silicona con oro obteniendo una transmisión excelente. Este proceso se debe hacer con ambas caras del módulo y con sus respectivos disipadores.



Figura 2-5 Montaje del módulo termoeléctrico

También se debe aislar la zona del disipador que no queda ocupada por el módulo termoeléctrico para evitar de esta manera los posibles gradientes que perturben las temperaturas reales de cada cara del módulo. Para aislar la parte superior del prototipo se utilizó Poliuretano (ARMAFLEX).

Con esto se puede concluir que la temperatura en el disipador solapado con la cara fría del módulo será casi exactamente la propia de la cara fría del módulo. De la misma forma sucede con la cara caliente del módulo. La forma de medir dichas temperaturas será mediante un termopar introducido en el interior de cada uno de los disipadores lo más cercano posible a la zona central del cobre del mismo. Otro dato a destacar en el montaje del módulo es la tensión

que se aplica entre los disipadores para tener un buen contacto entre ambos y cada una de las caras del módulo. Dicha presión debe ser vigilada ya que una presión excesiva puede provocar roturas entre las uniones termoeléctricas del módulo

En la Figura 2-6 se puede observar un detalle del conjunto módulo termoeléctrico-ventiladores-disipadores montado sobre el prototipo construido para la realización del proyecto.

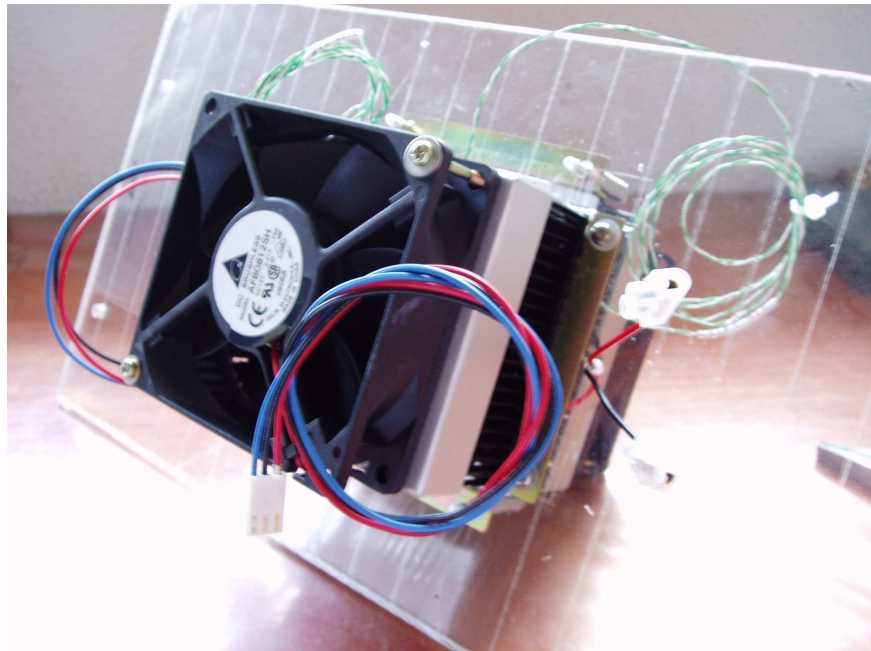


Figura 2-6 Detalle conjunto módulo termoeléctrico

1.1.2.2.3 Aislamiento del prototipo

Tras la construcción del prototipo se observó que se tenía un valor de resistencia térmica muy reducido y esto conllevaría a grandes pérdidas de potencia frigorífica con el consiguiente problema de no poder obtener en el interior del prototipo los valores de temperatura deseados. Por este motivo se decidió aislar el prototipo. La primera

opción que se planteo para el aislamiento del prototipo fueron planchas de Poliuretano. Esta opción se desestimó en su momento por razones de coste, siendo empleado el Poliestireno expandido ya que se trataba de la opción más barata y la cual cumple con creces las especificaciones de aislamiento que se necesitan.

En la Figura 2-7 se puede observar el prototipo con el aislamiento cubriendo parte de las paredes que conforman éste. Todo el prototipo se aísla con Poliestireno expandido excepto la parte superior que alberga el módulo termoelectrico. Dicha parte es aislada con planchas de Poliuretano.

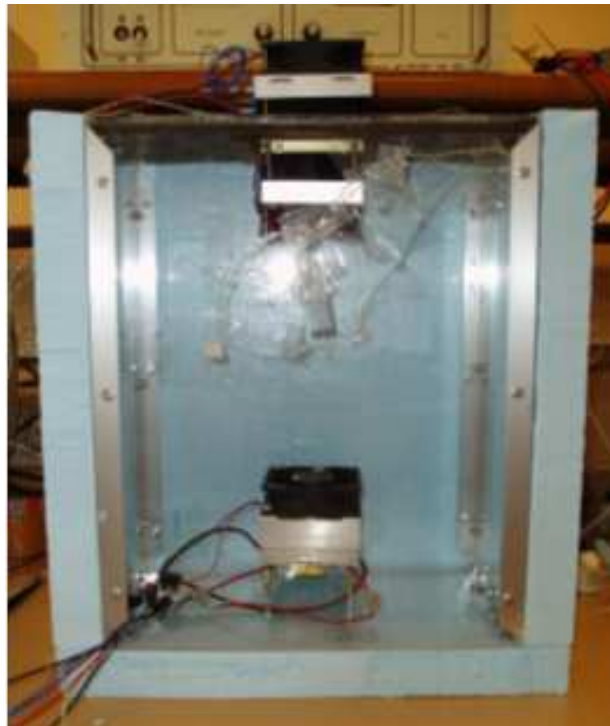


Figura 2-7 Prototipo aislado

1.1.2.2.4 Adquisición de temperaturas

Para medir las temperaturas de ambos lados del módulo termoelectrico resulta eficaz el uso de termopares. Además, éstos también se podían emplear para realizar el resto de medidas de

temperatura dentro del recinto, por lo que se utilizaron termopares tipo K para registrar todas las temperaturas del prototipo.

La distribución de los mismos queda indicada en la Figura 2-8 Situación de los termopares.

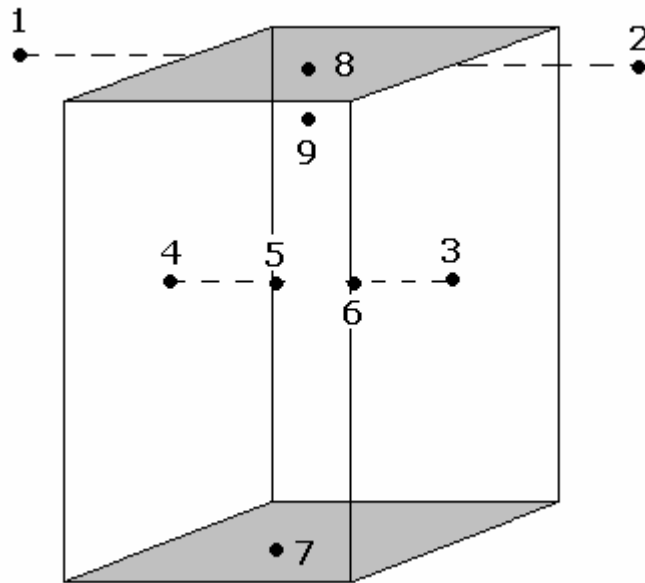


Figura 2-8 Situación de los termopares

En la siguiente tabla se detallan las medidas adquiridas por la situación del termopar.

Posición	Tª medida
1	Tª ambiente cara B
2	Tª ambiente cara A
3	Tª sobre la cara A
4	Tª sobre la cara B
5	Tª interna
6	Tª interna
7	Tª interna en la base
8	Tª cara caliente Peltier
9	Tª cara fría Peltier

1.1.2.2.5 Hardware de adquisición de datos

Para la adquisición de las temperaturas que se dan en el prototipo, se empleó un Hardware de adquisición de datos de National Instruments, que se adquirió con el fin de realizar medidas con precisión y fiabilidad de termopares.

El hardware se compone de varios módulos:

- Un chasis que forma la estructura donde se acoplan el resto de módulos.
- Un módulo de adquisición de datos, con un módulo de conexión
- Un módulo de generación de señales, con un módulo de conexión

El módulo de conexión, cuya vista se presenta en la Figura 2-9, es un bloque de terminales de fácil acople, con una construcción isoterma que minimiza el error producido por gradientes térmicos. Tiene compensación por unión fría interna, construcción isotérmica para medidas de gran precisión de termopares, anulación del offset de puente, y otras características que lo hacen idóneo para este fin.



Figura 2-9 Módulo de conexión

Este módulo de conexión se ubica en un chasis específico con un alto rechazo al ruido, que comunica señales analógicas y digitales que tienen lugar en los diferentes módulos situados en él. Conviene destacar que en este chasis, como se puede observar en la Figura 2-10, se pueden intercambiar con relativa facilidad los módulos con diferentes propósitos, como adquisición de datos, adquisición de imágenes, control de movimiento, acondicionamiento de señales y otros, compatibles con él.

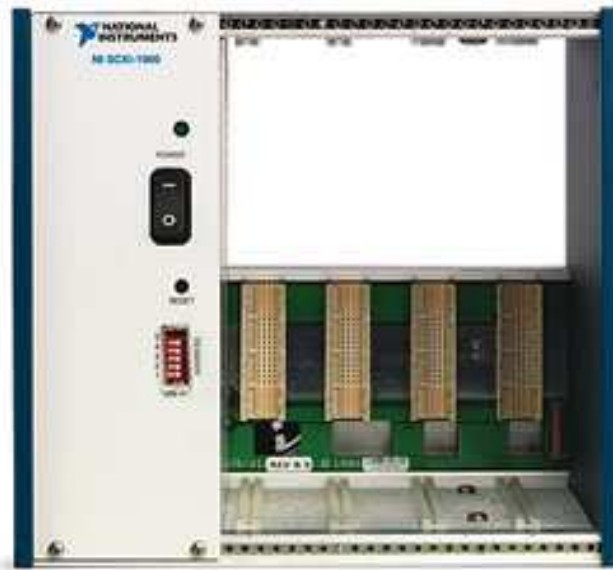


Figura 2-10 Chasis del hardware de adquisición

El Hardware se comunica con el ordenador a través de una conexión USB, y es necesario comentar que este hardware es específico para su funcionamiento con Labview (software del mismo fabricante, National Instruments). Desde ese software, se puede crear un entorno donde se visualicen diferentes señales, tanto adquiridas como generadas.

1.1.2.2.6 El amplificador

El amplificador es el encargado de suministrar al módulo termoelectrico la energía suficiente para que éste sea capaz a su vez, de actuar sobre la temperatura en el interior del prototipo.

El módulo termoelectrico utilizado para el desarrollo del proyecto es el modelo DT12-6 de la casa Marlow y sus características principales son:

Temperatura del lado caliente(°C)	27	50
Incremento de temperatura máximo entre caras(°C)	66	74
Potencia frigorífica máxima(W)	54	60
I _{max} (A)	5.6	5.6
V _{max} (V)	14.7	16.4
AC resistance(Ω)	2.2	

Características del módulo termoelectrico DT12-6

En primer lugar se decidió optar por un amplificador controlado en corriente, ya que para el control del módulo termoelectrico facilita la labor el conocimiento de la corriente consumida por el mismo. Optar por un amplificador controlado en tensión no tendría grandes desventajas frente a la fuente controlada por corriente. La gran ventaja de optar por un amplificador controlado en corriente es el conocimiento del comportamiento del módulo termoelectrico en función de la corriente. Las gráficas que describen el comportamiento del módulo lo hacen relacionando la corriente y no la tensión con la potencia del módulo termoelectrico.

El servoamplificador que se eligió en el anterior proyecto fin de carrera debía cumplir con las especificaciones dadas para el diseño y construcción del amplificador controlado. Con dichas especificaciones se decidió buscar servoamplificadores comerciales teniendo como referencia el utilizado en el laboratorio de Programación y Control de Robots de la Escuela. Dicho servoamplificador es el 12A8 de la firma

ADVANCED CONTROL MOTIONS y cumple con las especificaciones fijadas. En la Figura 2-11 se muestran las características técnicas más destacadas del servoamplificador.

POWER STAGE SPECIFICATIONS	MODELS			
	12A8	25A8	20A14	20A20
DC SUPPLY VOLTAGE	20 - 80 V	20 - 80 V	40 - 140 V	40 - 190 V
PEAK CURRENT (2 sec. Max., internally limited)	± 12 A	± 25 A	± 20 A	± 20 A
MAXIMUM CONTINUOUS CURRENT (internally limited)	± 6 A	± 12.5 A	± 10 A	± 10 A
MINIMUM LOAD INDUCTANCE*	200 µH	200 µH	250 µH	250 µH
SWITCHING FREQUENCY	36 kHz	22 kHz ± 15%		
HEATSINK (BASE) TEMPERATURE RANGE	0 ° to + 65°C, disables if > 65°C			
POWER DISSIPATION AT CONTINUOUS CURRENT	24 W	50 W	70 W	100 W
OVER-VOLTAGE SHUT-DOWN (self-reset)	86 V	86 V	142 V	195 V
BANDWIDTH (load dependent)	2.5 kHz			

Figura 2-11 Características de los diferentes modelos de servoamplificadores de A.D.M.

El aspecto externo del amplificador se aprecia en la Figura 2-12, las dimensiones aproximadas son de 12X6 cm.



Figura 2-12 Servoamplificador 12A8 de la casa Advanced Control Motions

A continuación se pasa a hacer una breve descripción de dicho equipo, comenzando por mostrar en la Figura 2-13 el esquema interno, sin entrar en detalles como el bucle de control de corriente ni los disparos de los mosfet en la etapa de potencia.

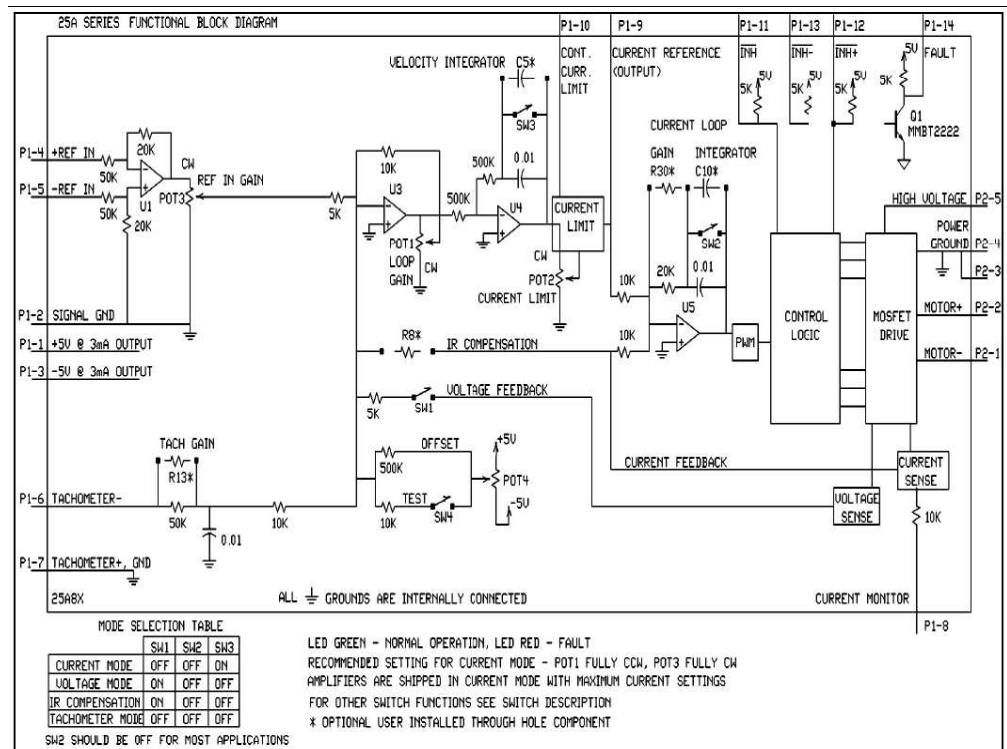


Figura 2-13 Circuitería interna del 12A8

La tensión registrada en los pines P1-4 y P1-5 es amplificada y convertida en una corriente. Existe un bucle interno de realimentación el cual garantiza que la corriente de salida sea fiel a la tensión registrada.

Es posible anular la corriente de salida por medio de los pines P1-12 y P1-13.

En caso de fallo en el sistema el LED de error (LED rojo) quedará encendido para indicarlo. El LED quedará en color verde mientras el funcionamiento sea correcto.

La ganancia del circuito puede ser ajustada por medio del potenciómetro n° 3.

Por medio de dicho potenciómetro es posible ajustar la relación entre el voltaje de entrada y la corriente de salida.

Es posible limitar la corriente de pico así como el límite de corriente continua para el servoamplificador por medio del potenciómetro número 2. La mecánica para llevar a cabo dicho ajuste es sencilla. Sólo hay que tener en cuenta que el potenciómetro tiene doce vueltas activas, así como una vuelta inactiva en cada extremo y tiene una resistencia aproximadamente lineal. Para llevar a cabo el ajuste, se recomienda girar el potenciómetro en sentido antihorario hasta el final del recorrido y a continuación girar el potenciómetro en sentido horario hasta llegar al valor deseado.

También es posible limitar la corriente sin afectar a la corriente de pico por medio de una resistencia externa en el pin P1.10. Esta resistencia fue eliminada del circuito.

Es posible monitorizar la corriente suministrada por el circuito como una tensión en el pin P1-8. Esto es útil para evitar añadir etapas intermedias que muestren la corriente suministrada (para asegurar que la corriente inyectada es la deseada).

1.1.2.2.7 Análisis de la señal del servoamplificador

Cuando se empezó la toma de contacto con el sistema, se observó que el resultado del sistema térmico no era el esperado. El recinto elevaba su temperatura en vez de disminuirla, y la cara caliente alcanzaba una temperatura exageradamente alta. Por el contraste con los ensayos realizados en los anteriores proyectos, se consultó con el alumno que había construido el hardware del entorno del servoamplificador. El resultado de las consultas fue que se había

estado utilizando una fuente de alimentación convencional para alimentar al módulo termoelectrico. Por tanto, el servoamplificador habia tenido un uso muy escaso, y las medidas que se tomaron con el funcionamiento del servo se vieron afectadas por un ruido desmesurado, producido por las conmutaciones del mismo.

Se comienza el analisis de la alimentacion del modulo termoelectrico, y en efecto, con la fuente de alimentacion convencional, el sistema termico tenia una respuesta termica que coincidia con la esperada, la disminucion de la temperatura en el interior del recinto.

Se procede entonces a visualizar en un osciloscopio las formas de onda de la tension en las bornas de la celula Peltier con la fuente de alimentacion.

La Figura 2-14 muestra la tension para una corriente de 4 amperios:

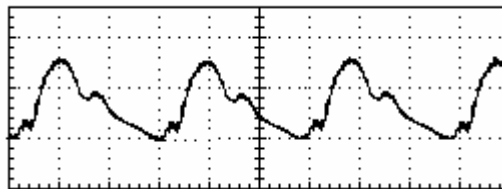


Figura 2-14 Rizado de la tensión con Fuente de Alimentación convencional

La tensión tiene un valor medio de 12 V, un rizado pico a pico de 0.5 V y una frecuencia de 235 Hz.

A continuación se analizó la tensión cuando se alimenta con el servoamplificador, Figura 2-15:

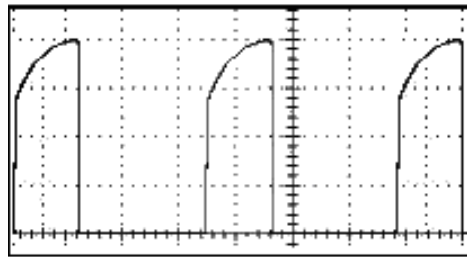


Figura 2-15 Rizado de la tensión con alimentación por servo

La tensión medida tiene un valor medio de 12.8 V, rizado pico a pico de 48 V y una frecuencia 42KHz. La relación del rizado y valor medio se corresponde con un factor de servicio de 0.25.

Por lo estudiado en la literatura concerniente a los elementos termoeléctricos, se pensó en la célula Peltier como una carga resistiva. Por tanto la corriente que circularía por el módulo tendría un rizado pico a pico muy elevado.

También se obtuvo de la literatura la información que alertaba acerca del rizado de la corriente que fluye por los módulos termoeléctricos.

Respecto a la frecuencia del rizado, se considera peligroso para la célula que sea inferior a 2KHz. En tal caso, se producen fuerzas de contracción y expansión que pueden provocar la rotura del soporte cerámico donde se alojan los semiconductores.

Y respecto a la amplitud del rizado, se obtiene una pérdida de rendimiento asociada a la amplitud del rizado. Por tanto, se intentará reducir en la medida de lo posible el rizado, para obtener un rendimiento aceptable.

Pasamos al análisis de la corriente del módulo, cuando lo alimentamos con el servoamplificador. Este análisis lo llevamos a cabo con una pinza amperimétrica.

El funcionamiento de la pinza se basa en la medida indirecta de la corriente circulante por un conductor a partir del campo magnético o de los campos que dicha circulación de corriente genera. Recibe el nombre de pinza porque consta de un sensor, en forma de pinza, que se abre y abraza el cable cuya corriente queremos medir. Este método evita abrir el circuito para efectuar la medida, así como las caídas de tensión que podría producir un instrumento clásico. Por otra parte, es sumamente seguro para el operario que realiza la medición, ya que no es necesario un contacto eléctrico con el circuito.

Se observa en la Figura 2-16 la corriente que circula por la célula:

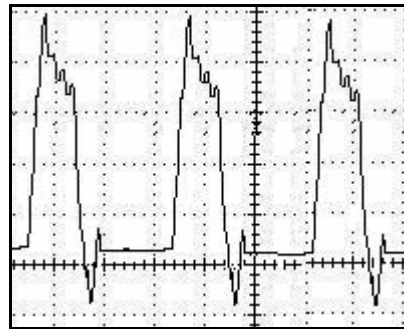


Figura 2-16 Corriente del servo

La corriente medida tiene un valor medio de 3.7 A, un rizado pico a pico de 17.2 A y una frecuencia de 42 KHz. En esas condiciones, la tensión media que tiene la célula Peltier es de 11.2 V.

Las conclusiones que se obtuvieron de éste análisis fueron diversas. El rizado pico a pico tan desmesurado de corriente era lo que provocaba el calentamiento de la célula. Esto se explica porque la célula Peltier se compone de diferentes partes que contribuyen al enfriamiento y calentamiento de las caras del módulo. Grosso modo, al enfriamiento contribuye de forma positiva el efecto Peltier, y negativamente el efecto Joule y el de transmisión térmica entre elementos con diferentes temperaturas. La corriente se relaciona linealmente con la potencia Peltier y se relaciona al cuadrado, con las

pérdidas por Joule. Por tanto, la corriente que fluía entonces por la célula, provocaba paso a paso: enfriamiento mínimo cuando está estable, calentamiento elevado cuando ocurre el pico de corriente, y calentamiento cuando la corriente es negativa. De esta forma se entiende que se produjese calentamiento en el interior del prototipo.

Otra conclusión que se sacó fue que el servoamplificador está destinado al control en modo corriente de motores, y éstos no se ven sometidos a picos de corriente porque la inductancia de magnetización de los motores eléctricos, es habitualmente elevada, del orden de miliHenrios.

1.1.2.2.8 Filtrado de la señal del servoamplificador

Para obtener un rendimiento aceptable del módulo termoelectrico se procede a reducir al máximo el rizado de corriente en el mismo.

Se consulta a Raúl Velasco [1], profesor de la Escuela de electrónica de potencia, y recomienda el empleo de filtrado por condensador. De este modo se dejaría pasar la corriente continua, y se reducirían los armónicos de alta frecuencia. Se barajan dos tipos que se muestran en la Figura 2-17:

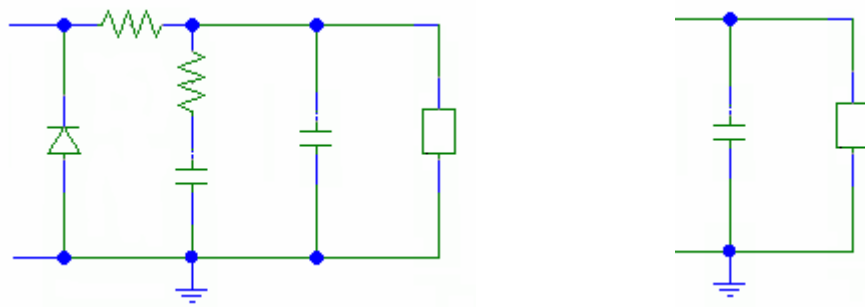


Figura 2-17 Filtrado por condensador

Con ambos filtros, el servo encendía el led rojo de fallo. En la documentación del servo, no se pudo ver qué componentes tenían en la etapa de salida, y analizar qué error podía estar sucediendo.

Así que surge la idea de filtrar mediante inductancias, para que se asemeje a la carga que vería el servo si se le conectase a un motor. De este modo, se procede con el montaje del filtro que se muestra en la Figura 2-18:

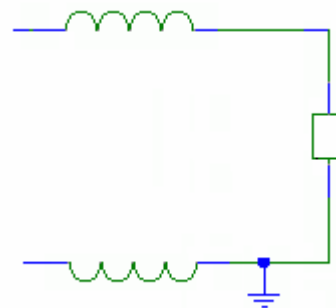


Figura 2-18 Filtrado por bobinas

Se observan unas formas de onda de corriente que se muestran en la Figura 2-19:

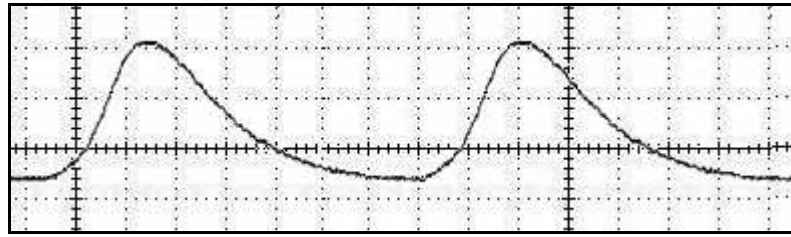


Figura 2-19 Corriente con bobina

La corriente medida tiene un valor medio 3.5 A, tiene un rizado pico a pico de 5 A y tiene lugar a una frecuencia de 42KHz.

Debido a que el rizado aún era considerable, se decidió poner en serie otra bobina, de un valor similar. De este modo, se consiguió una forma de onda más suave, y con un rizado pico a pico que no excedía del 10% del valor medio, como se ve en la Figura 2-20.

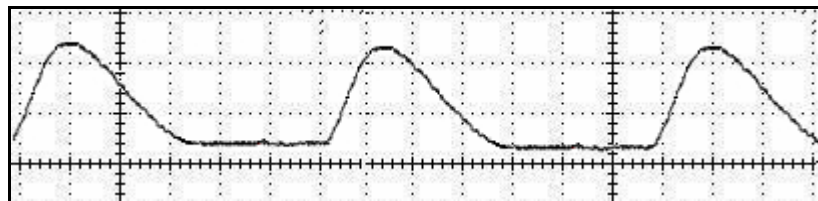


Figura 2-20 Rizado de la corriente con dos bobinas

Corriente con valor medio 4 A, rizado pico a pico de 0.4 A y frecuencia 42KHz.

Una vez conseguida la reducción del rizado de la corriente, se realizó un ensayo en lazo abierto del sistema, y se pudo comprobar que las caras fría y caliente tomaban valores de temperatura razonables para la potencia eléctrica que se le estaba suministrando.

1.1.2.2.9 Alimentación del circuito

El circuito de alimentación para todo el hardware se basa en los circuitos empleados en los robots del Laboratorio de Control de la Escuela para proporcionar alimentación al hardware.

A continuación se muestra un esquema de dicho circuito, Figura 2-21 .

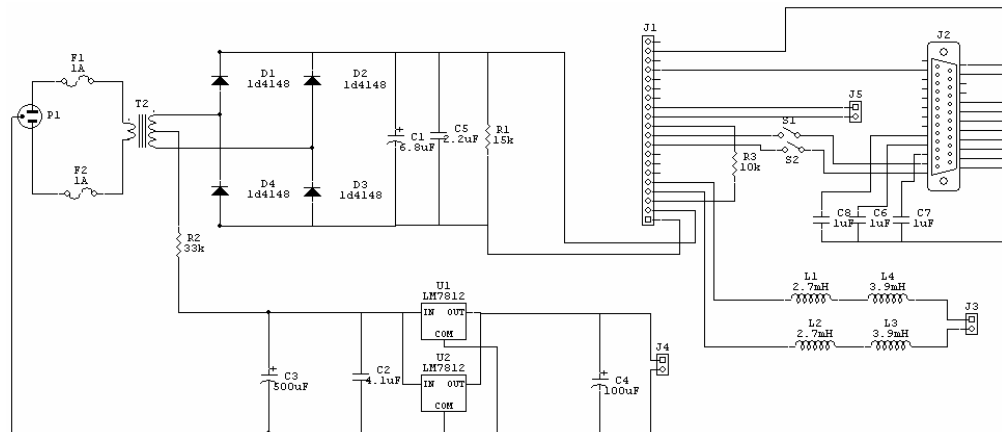


Figura 2-21 Circuito de alimentación completo

Este circuito proporciona las diversas tensiones empleadas en el prototipo.

Por un lado proporciona en torno a 55V de tensión continua empleados para alimentar el servoamplificador. Por otra parte proporciona 12V.

La tensión alterna es reducida en el trafo hasta dos tensiones flotantes de 20V. De esta forma se obtiene una tensión de 40V en alterna con una toma intermedia a 20V.

Los 40V de alterna son rectificadas por medio de un filtro por condensador tal y como se muestra en la Figura 2-22 obteniendo una tensión de salida continua rectificada en torno a los 55V.

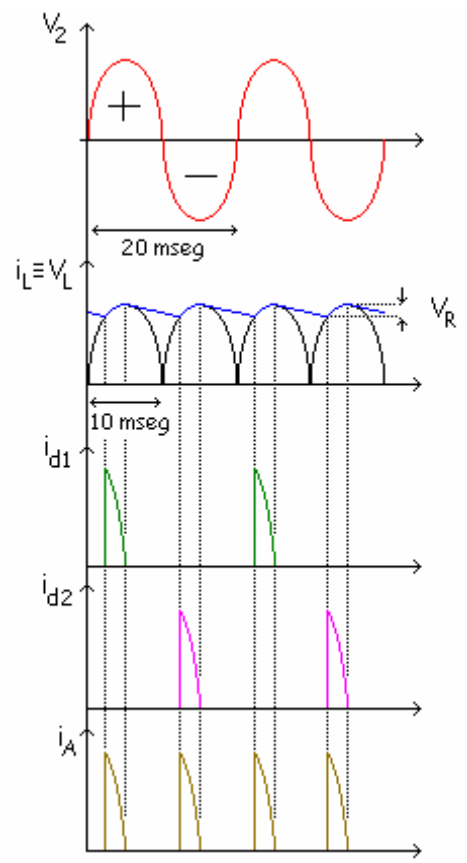


Figura 2-22 Funciones del filtro por condensador

La segunda parte del circuito es la encargada de proporcionar 12V a la salida. Para ello se toman 20V de tensión rectificadora del transformador conectándolo a la entrada de los dos MC7812C, que garantizan 12V en su tensión de salida. Esta tensión se empleará para alimentar los ventiladores y resistencia de perturbación. Véase la Figura 2-23:

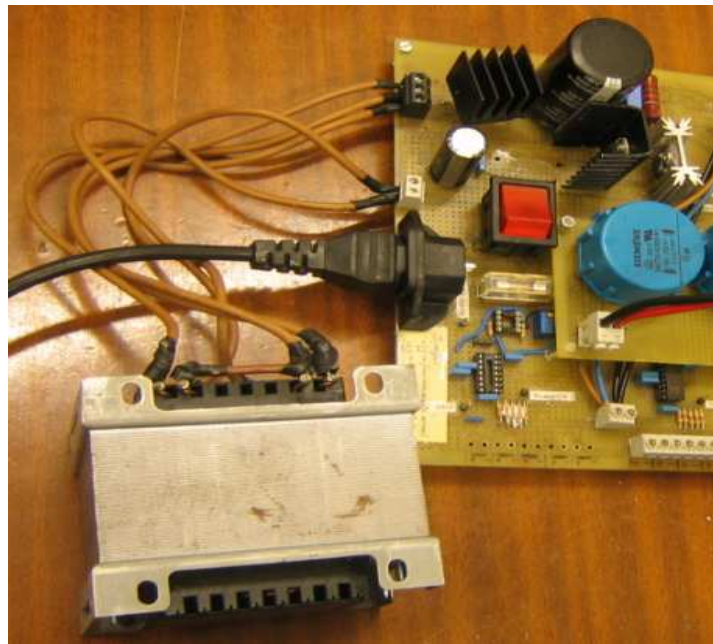


Figura 2-23 Fuente de alimentación

Y la placa entera queda de la siguiente forma, Figura 2-24:

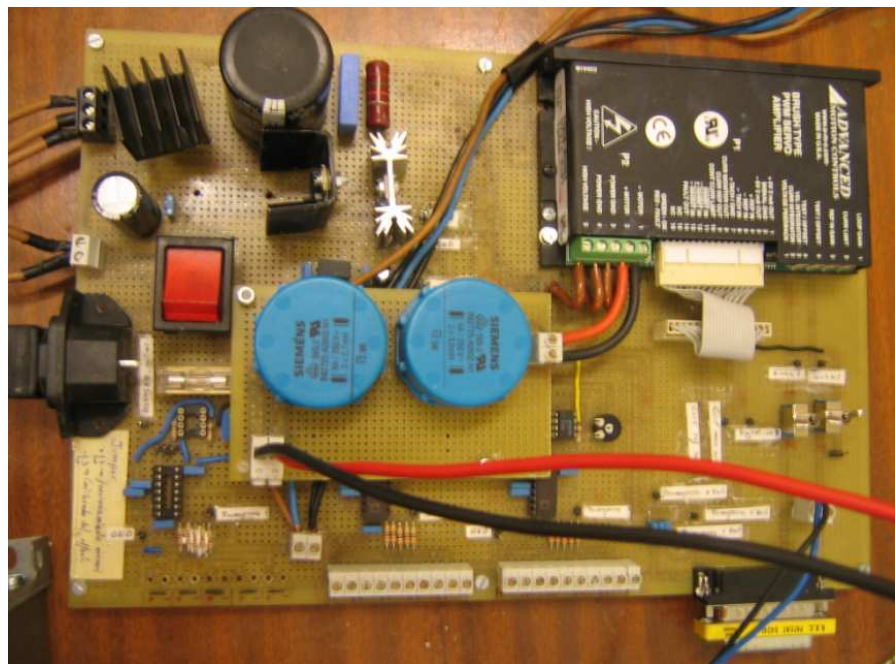


Figura 2-24 Placa completa

Y el envés de la misma se muestra en la Figura 2-25:

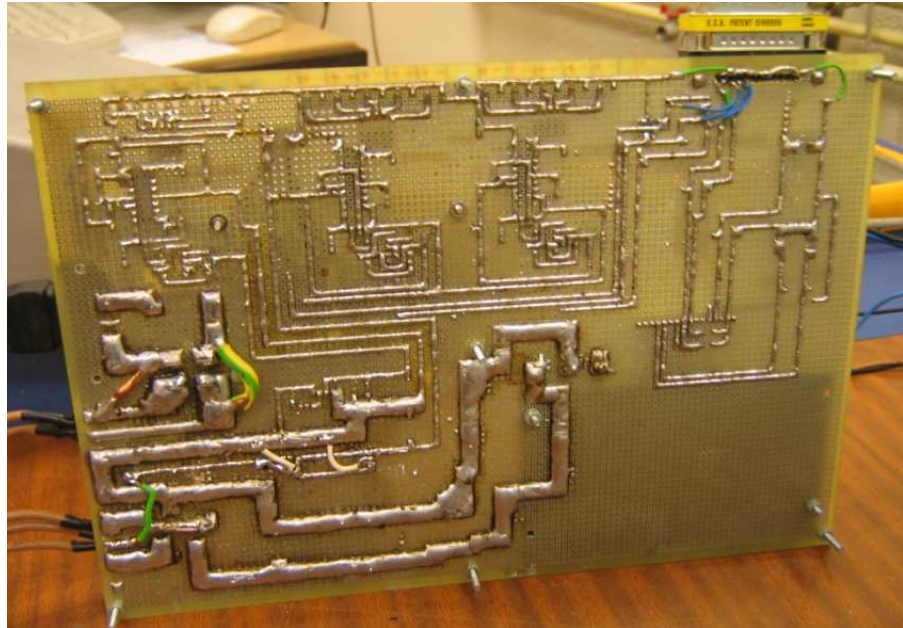


Figura 2-25 Envés de la placa completa

Se puede apreciar el mayor grosor de las pistas encargadas de proporcionar mayores potencias.

A causa de un defecto en el interruptor el mismo está puentado dejando como medio para la conmutación del circuito la conexión y desconexión del mismo a la red eléctrica.

Se tienen accesibles dos interruptores que permiten inhibir la corriente de salida del servo. Esto es de utilidad en caso de ensayos o como un medio rápido de cortar la corriente en el módulo termoelectrico en caso de error.

La unión con el módulo termoelectrico se realiza directamente uniendo los cables de alimentación del mismo con las uniones atornilladas del propio servo.

El montaje final del conjunto del prototipo es el que se presenta en la Figura 2-26.

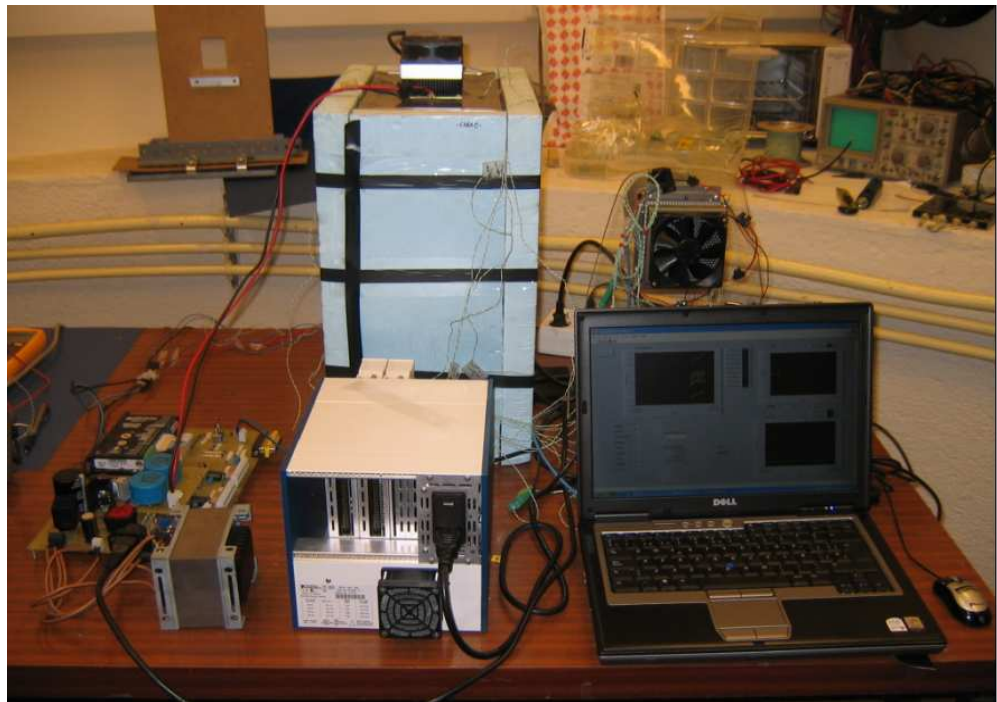


Figura 2-26 Montaje completo

1.1.2.3 Obtención de un modelo de la planta

Para un buen diseño de los controles para el sistema es imprescindible tener buenos modelos sobre los que trabajar, teniendo la seguridad de que se ajustan a la realidad. Por tanto, el correcto modelado del sistema es de vital importancia para el éxito en el diseño del sistema de control.

Para la obtención del modelo llevaremos a cabo dos metodologías distintas, en pos de conseguir una mayor precisión en los parámetros del modelo que se ha de ajustar a nuestro sistema térmico. Primeramente realizaremos una aproximación mediante modelo de conocimientos, y después afianzaremos los resultados conseguidos con la identificación del modelo “caja negra”.

1.1.2.3.1 Fundamentos teóricos

Para el correcto entendimiento de una bomba de calor hace falta conocer los fundamentos teóricos de los fenómenos termoeléctricos y físicos que concurren en un termoelemento.

Veremos en este apartado los fenómenos que tienen lugar cuando se hace circular una corriente a través de un termoelemento. Los efectos de los fenómenos están relacionados entre sí, lo cual muestra la complejidad de los hechos que van a tener lugar en la célula termoeléctrica que constituye nuestro actuador.

Para el análisis exhaustivo del actuador analizaremos por separado los efectos que en él ocurren:

EFEECTO PELTIER: Consiste en la cesión o absorción de calor en la unión de dos materiales distintos cuando hacemos pasar una corriente a través de ellos. Se trata de un calor reversible que es cedido

o absorbido dependiendo del sentido en el que circule la corriente. La cantidad de calor transferido en la unión se puede expresar en función de la intensidad como:

$$Q = \pi I$$

Siendo π el coeficiente Peltier de la unión en cuestión que puede definirse como el calor transferido cuando una unidad de carga atraviesa la unión.

El fenómeno se puede explicar de la siguiente manera: la energía interna asociada a los electrones de un material es una propiedad inherente al material, y por tanto es distinta en diferentes materiales. Cuando hacemos circular una corriente a través de la unión entre dos materiales, la energía interna U de cada electrón cambia en una cantidad $U_1 - U_2$ al pasar el material 1 al material 2. Si la energía interna asociada a los elementos del material 1 es mayor que la asociada al material 2, el electrón reducirá su energía y la diferencia de calor que se genera en la unión.

Si, por el contrario, la energía interna asociada a los elementos del material 1 es inferior que la asociada al material 2, el electrón necesitará aumentar su energía interna a costa de absorber calor en la unión.

Como se deduce de la fórmula escrita anteriormente, el calor transferido depende de la temperatura de la unión, ya que la energía interna varía con ella.

El efecto Peltier está muy ligado al efecto Seebeck, existiendo una relación entre ambos coeficientes de la forma:

$$\Pi = \sigma \cdot T \quad E 1$$

Donde T es la temperatura de la unión. Una diferencia de temperatura produce una f.e.m. que se traduce en una corriente

eléctrica en un circuito termoeléctrico cerrado (efecto Seebeck) mientras que una intensidad a través de dicho circuito genera una diferencia de temperaturas.

Esta relación tan estrecha explica que, igual que antes, nos interesen los materiales semiconductores por su alto valor de σ , por lo tanto, alto Π . De esta forma el calor de Peltier también se puede escribir como:

$$Q = \sigma \cdot T \cdot I \quad E 2$$

EFECTO THOMSON:

El efecto Thomson se manifiesta cuando circula una corriente eléctrica entre los extremos de un conductor que se encuentra a diferentes temperaturas (T_1 y T_2), y consiste en la generación o absorción de calor que tiene lugar a lo largo de un conductor por el que circula una corriente eléctrica debido a la presencia de un gradiente de temperaturas a lo largo de su longitud. Se expresa de la siguiente forma:

$$Q = T \cdot I \cdot \Delta T \quad E 3$$

Donde T se denomina coeficiente de Thomson y es función del material de la temperatura.

Se trata de un calor reversible ya que pasa de ser cedido a ser absorbido cuando se cambia el sentido en que la corriente circula respecto al gradiente de temperaturas a lo largo del conductor.

Los efectos Seebeck, Peltier y Thomson están íntimamente relacionados, esta dependencia se deduce a partir de la 2ª Ley de la Termodinámica, puesto que se trata de tres procesos reversibles. La relación que se obtiene es la siguiente:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{\partial \pi_{1-2}}{\partial T} + \tau_2 - \tau_1 \quad E 4$$

Para un circuito termoeléctrico formado por la unión de 2 materiales (1 y 2).

Los flujos de calor Peltier y Thomson quedan representados en el gráfico T-S que se muestra a continuación en la Figura 2-27 Flujos de calor Peltier y Thomson en un gráfico T-S. En él podemos observar como los calores Peltier son consecuencia de la diferencia de entropía de los materiales 1 y 2, la cual se pone de manifiesto en las uniones.

Así por ejemplo, en la unión que se encuentra a T1 la intensidad recorre la unión desde un material que tiene una determinada entropía a otro con menos entropía, produciéndose como resultado un desprendimiento de calor.

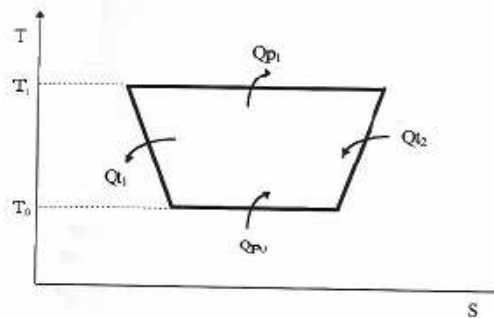


Figura 2-27 Flujos de calor Peltier y Thomson en un gráfico T-S

Los calores Thomson se producen a lo largo de cada material debido a la diferencia de entropía existente entre sus puntos como consecuencia de que todos ellos no están a la misma temperatura (existencia de un gradiente).

EFEECTO JOULE

Cuando se circula a través de una corriente a través de un conductor aplicándole una tensión en sus extremos, se produce un calentamiento del mismo. Este calentamiento no es más que disipación de energía en forma de calor en una cantidad:

$$Q = I^2 \cdot R \quad E 5$$

Que depende de la resistencia del material. A esta disipación de calor se la conoce como disipación de calos por efecto Joule. Se trata de un calor irreversible ya que siempre es cedido independientemente del sentido de la corriente.

EFEECTO FOURIER

Se trata del fenómeno de conducción de calor a través de un medio sólido que tiene una determinada conductividad térmica como consecuencia de someter a sus extremos a un gradiente de temperaturas. Su expresión será de la forma:

$$Q = K \cdot \Delta T \quad E 6$$

En nuestro caso, consideraríamos la conductividad del material semiconductor (termoelementos) y el ΔT entre uniones. Se trata también de un fenómeno irreversible.

ECUACIONES BÁSICAS.

Para facilitar el estudio y la comprensión de los efectos termoeléctricos en nuestra unidad básica plantearemos de una forma clara las ecuaciones que gobiernan dicho proceso.

BALANCE ENERGÉTICO

Para explicar todos los intercambios energéticos que tienen lugar, consideraremos la siguiente representación, Figura 2-28, de una unidad básica de la bomba de calor que es objeto de estudio.

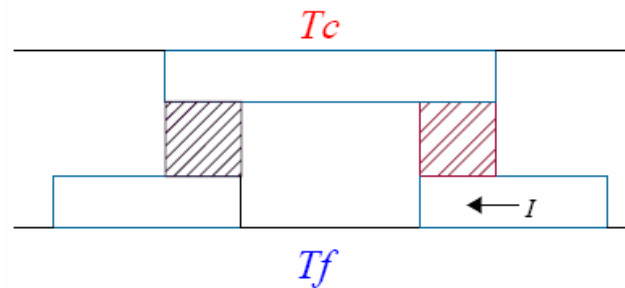


Figura 2-28 Intensidad que pasa por los puentes de cobre y los termoelementos tipo p y n

Se considera que el coeficiente Seebeck es constante y por tanto el efecto Thomson es nulo ya que $t = Td\sigma/dT$ donde $d\sigma/dT$ es nulo.

También supondremos que la resistencia térmica y eléctrica de los materiales se mantendrá constante en este rango de temperaturas.

Una vez realizadas estas suposiciones plantearemos las aportaciones de los distintos flujos de calor que tienen lugar:

Potencia térmica debido al efecto Peltier: Potencias térmicas absorbidas o disipadas en los extremos de las uniones fría y caliente.

$$\left. \begin{aligned} Q_c &= \sigma \cdot T_c \cdot I \\ Q_f &= \sigma \cdot T_f \cdot I \end{aligned} \right\} \text{siendo } \sigma = \sigma_1 - \sigma_2 \quad E 7$$

Potencia térmica debido al efecto Fourier: Transferida desde la unión caliente a la fría a través de los termoelementos. Su valor será:

$$Q = \frac{T_c - T_f}{R} \quad E 8$$

Donde R es la resistencia térmica de los termoelementos, también expresada como: $R=L/A\lambda$, siendo λ la conductividad térmica. Llamando esbeltez a E: L/A en la Figura 2-29 nos queda:

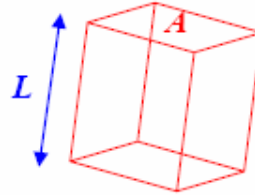


Figura 2-29 Geometría de un termoelemento

La potencia queda relacionada con estos parámetros mediante:

$$Q = \frac{\lambda}{E}(T_c - T_f) \quad E 9$$

Potencia térmica debido al efecto Joule: la potencia térmica generada por el efecto Joule cuando las propiedades se consideran constantes y se reparten por igual a ambos lados del termoelemento:

$$Q = \frac{1}{2}I^2 \cdot R = \frac{1}{2}I^2 \cdot E\rho \quad E 10$$

siendo E la esbeltez del material termoeléctrico y ρ la resistividad eléctrica.

Los calores generados y absorbidos en las uniones caliente y fría quedan como:

$$\begin{aligned} Q_c &= \sigma \cdot T_c \cdot I + \frac{1}{2}I^2 \cdot E\rho - \frac{\lambda}{E}(T_c - T_f) \\ -Q_f &= \sigma \cdot T_f \cdot I - \frac{1}{2}I^2 \cdot E\rho - \frac{\lambda}{E}(T_c - T_f) \end{aligned} \quad E 11$$

Si se analizan los calores absorbidos y generados en cada unión se puede observar que tanto el efecto Joule como el efecto Peltier reducen la eficiencia de los materiales termoeléctricos. El calor

generado por efecto Joule y que se cede al foco caliente aumenta la potencia a disipar en el lado caliente. El calor transferido por efecto Fourier es un efecto indeseable en ambas caras ya que produce un flujo de calor contrario al deseado.

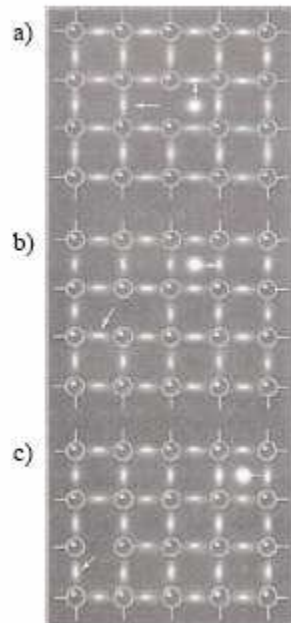
SEMICONDUCTORES:

Los semiconductores son materiales que tienen una conductividad eléctrica intermedia entre los conductores y los aislantes. Este rango corresponde a las separaciones entre bandas de energía.

En un semiconductor simple, tanto los electrones de conducción como los huecos electrónicos son portadores de carga. La conducción de los huecos electrónicos en la banda de valencia es un concepto relativo. De hecho, los huecos electrónicos sólo existen en relación con los electrones de valencia; es decir, un hueco electrónico es un electrón de valencia que falta. El movimiento de un hueco electrónico en una determinada dirección es sólo una representación de los electrones de valencia que se han desplazado en la dirección opuesta. El movimiento cooperativo de los electrones de valencia es un proceso inherentemente más lento que el movimiento del electrón de conducción. Este es el caso de los semiconductores intrínsecos, propiedad de los materiales puros.

Por otro lado la semiconducción extrínseca resulta de la adición de impurezas conocidas como dopantes. Estas impurezas no se refieren a la impureza química, puesto que el añadido de estas sustancias se realiza de forma muy específica y cuidada, al proceso añadido de estos componentes se le denomina dopado. Hay dos tipos de semiconducción extrínseca: de tipo n, en el cual predominan los

portadores de carga negativa y de tipo p, en el cual predominan los portadores de carga positiva.



Creación y movimiento de un electrón de conducción y un hueco electrónico en un semiconductor. (a) un electrón sale del enlace covalente, dejando una vacante o hueco. El electrón es ahora libre para moverse en el campo eléctrico. En términos del modelo de bandas de energía, el electrón ha pasado de la banda de valencia a la de conducción, dejando un hueco en la banda de valencia. Se representa el electrón moviéndose hacia arriba y el hueco hacia la izquierda. (b) El electrón de conducción se moverá ahora a la derecha y el hueco abajo a la izquierda. (c) los movimientos de (b) han terminado; el hueco y el electrón continúan moviéndose hacia fuera.

1.1.2.3.2 Modelo del sistema “caja blanca”

Esta metodología, también llamada obtención del modelo de conocimientos, es usualmente complicada, pues implica un conocimiento profundo del proceso y de las leyes físicas y matemáticas que lo describen, así como una muy buena caracterización de los materiales que lo componen. Esto lleva a la realización de estudios normalmente largos y costosos.

El resultado así obtenido es complejo, consistiendo en un modelo matemático de orden elevado.

Con el fin de utilizarlo, es necesario simplificarlo y linealizarlo. Esta labor no es trivial, y usualmente las hipótesis que deben hacerse llevan a resultados de un margen de aplicabilidad limitado alrededor del punto de trabajo.

Una vez conocidas las ecuaciones que rigen el funcionamiento del módulo termoeléctrico, se procede a la obtención de un modelo que refleje la dinámica del sistema. Para ello, modelaremos las características de los diversos elementos a partir de funciones de transferencia.

Sabiendo que los sistemas térmicos cumplen en régimen estático:

$$Potencia = \frac{T_1 - T_0}{R_{10}} \quad E12$$

y para el régimen transitorio:

$$Potencia \cdot \frac{R_{10}}{R_{10} \cdot C \cdot S + 1} = T_1 - T_0 \quad E 13$$

Donde R_{xx} es la resistencia térmica entre dos entornos, y C la capacidad de cada entorno.

Podemos comenzar a relacionar todos los elementos del sistema, comenzando por las caras de la célula Peltier:

A partir de E 13 :

$$Q_{cal} \cdot \frac{R_{cal}}{R_{cal} \cdot C_{cal} \cdot S + 1} = T_{cal} - T_{amb} \quad E 14$$

$$Q_{fria} \cdot \frac{R_{fria}}{R_{fria} \cdot C_{fria} \cdot S + 1} = T_{amb} - T_{fria} \quad E 15$$

Donde

- Q_{cal} es la potencia calorífica y Q_{fria} la frigorífica.
- R_{cal} es la resistencia térmica del lado caliente y R_{fria} del lado frío.
- C_{cal} es la capacidad térmica del lado caliente, y C_{fria} del lado frío.
- T_{amb} , T_{cal} y T_{fria} son las temperaturas ambiente, caliente y fría respectivamente.

A partir de E12:

$$\frac{T_{amb} - T_{fria}}{R_{fria}} = Q_{caja} \quad E 16$$

$$Q_{caja} \cdot \frac{R_{caja}}{R_{caja} \cdot C_{caja} \cdot S + 1} = T_{amb} - T_{interna} \quad E 17$$

Donde Q_{caja} es la potencia frigorífica que entra en el prototipo, R_{caja} es su resistencia térmica y C_{caja} su capacidad térmica.

$$Q_c = \sigma \cdot T_c \cdot I + \frac{1}{2} I^2 \cdot E\rho - \frac{\lambda}{E} (T_c - T_f)$$

Y de las ecuaciones

$$-Q_f = \sigma \cdot T_f \cdot I - \frac{1}{2} I^2 \cdot E\rho - \frac{\lambda}{E} (T_c - T_f)$$
E 11

$$Q_{fria} = \alpha \cdot I \cdot T_{fria} - \beta \cdot I^2 - \gamma \cdot (T_{amb} - T_{fria})$$
E 18

$$Q_{cal} = \alpha \cdot I \cdot T_{cal} + \beta \cdot I^2 - \gamma \cdot (T_{cal} - T_{amb})$$
E 19

Además, se tienen otras potencias como son las de perturbación, y las de los ventiladores. Estas últimas, tras contrastarlo con el profesor Antonio Arenas [1], se decidió incluirlas como potencias caloríficas, con valor igual al de la potencia eléctrica consumida. La explicación es que toda la energía eléctrica que se introduce al ventilador se transforma en calentamiento del motor eléctrico, y en una corriente de aire que al moverse, provoca un calentamiento en su entorno.

Por tanto, las ecuaciones E 14 y E 15 quedarían de la siguiente forma:

$$(Q_{cal} + Q_{vent_cal}) \cdot \frac{R_{cal}}{R_{cal} \cdot C_{cal} \cdot S + 1} = T_{cal} - T_{amb}$$
E 20

$$(Q_{fria} - Q_{vent_frio}) \cdot \frac{R_{fria}}{R_{fria} \cdot C_{fria} \cdot S + 1} = T_{amb} - T_{fria}$$
E 21

y E 17 de esta manera:

$$(Q_{caja} - Q_{resis}) \cdot \frac{R_{caja}}{R_{caja} \cdot C_{caja} \cdot S + 1} = T_{amb} - T_{interna}$$

E 22

A partir de las ecuaciones anteriores se puede formar un diagrama de bloques como el que sigue en la Figura 2-30 Diagrama de

bloques

de

Simulink:

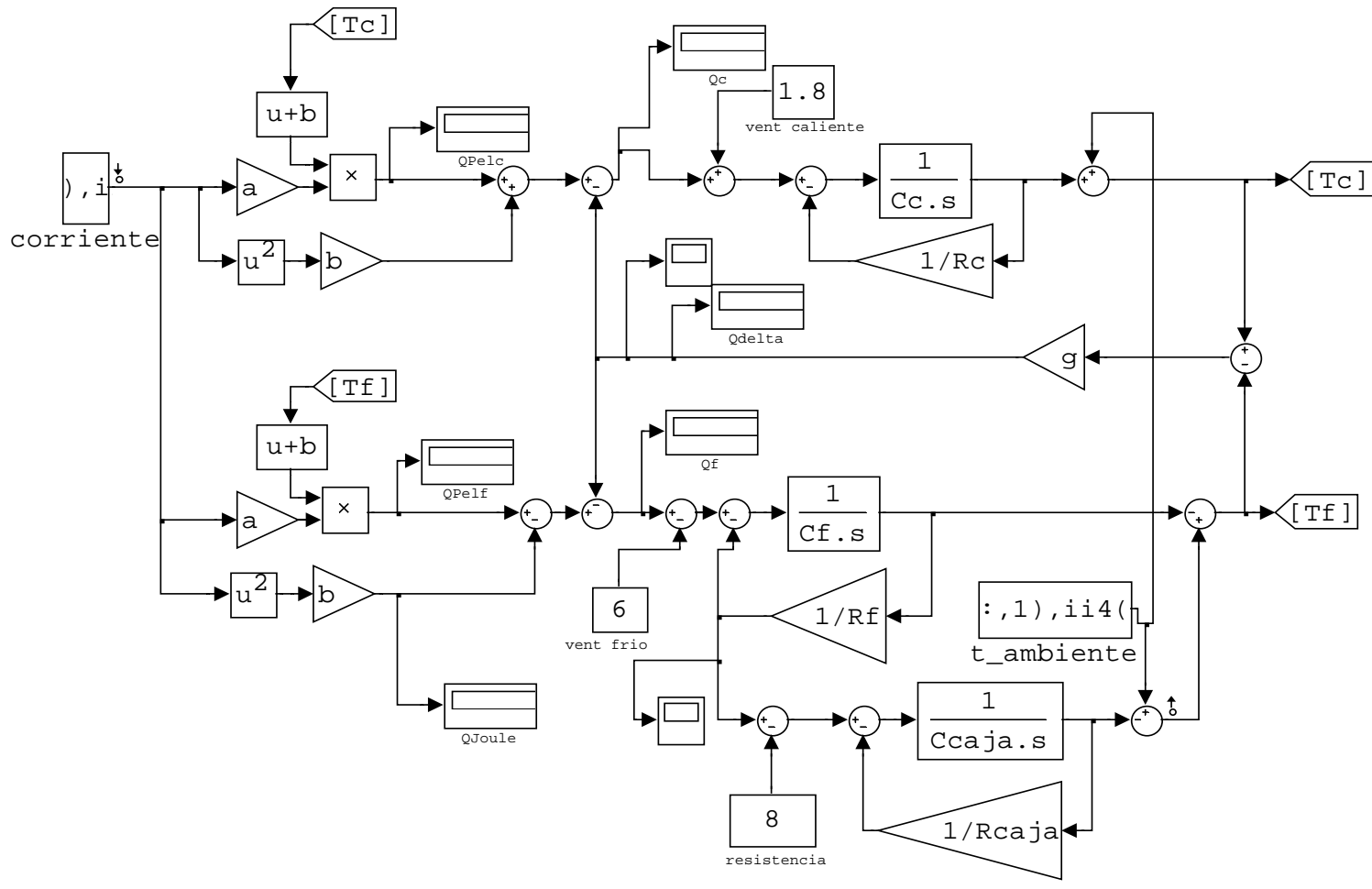


Figura 2-30 Diagrama de bloques de Simulink

Con este simulador se pretende obtener el valor de la potencia frigorífica a partir de diferentes variables, y así llevar a cabo acciones que nos permitan optimizarla.

Los valores de los diferentes parámetros son constantes, ya que dependen de la forma constructiva. Es decir, la resistencia térmica se ve afectada por el disipador y el ventilador acoplado a él. Análogamente, las capacidades térmicas, etc...

Los valores de los diferentes parámetros se calculan a partir de ensayos reales. Y se separan estos parámetros en dos grupos:

- a, b, g que conciernen al funcionamiento del módulo termoeléctrico.
- Capacidades térmicas de: caja C_{caja} , cara caliente C_c , cara fría C_f , y Resistencias térmicas de caja R_{caja} , cara caliente R_c , cara fría R_f .

3.2.1 Obtención de los parámetros del módulo termoeléctrico

Los valores del primer grupo se obtienen de las ecuaciones y curvas que relacionan la potencia frigorífica, corriente, e incremento de temperatura, con una temperatura determinada del lado caliente.

Como ya se indicó en E 18:

$$Q_{\text{fría}} = a \cdot I \cdot T_{\text{fría}} - b \cdot I^2 - g \cdot (T_{\text{amb}} - T_{\text{fría}})$$

Despejaremos de tres puntos para diferentes corrientes ensayadas, los valores de a, b, g, siendo dato $T_{\text{fría}}$, I, y T_{amb} , y pudiendo obtener de las curvas en la Figura 2-31, la potencia frigorífica suministrada.

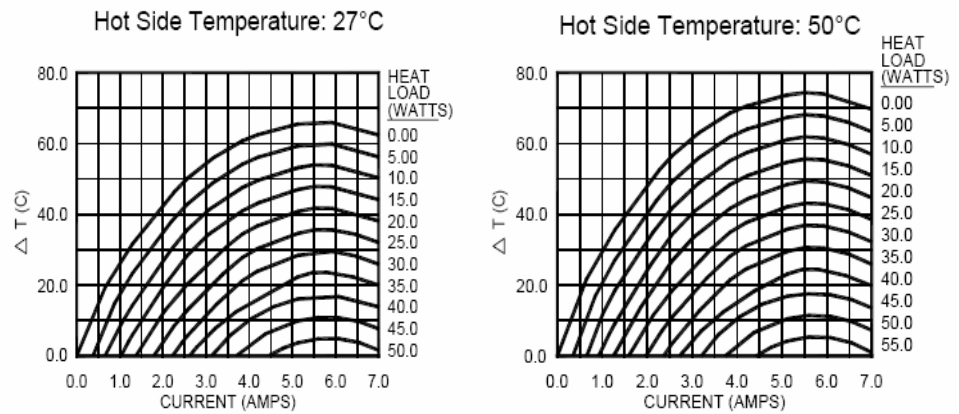


Figura 2-31 Curvas de funcionamiento del módulo termoelectrico

Estos datos se extraen de los ensayos en lazo abierto que se presentan a continuación:

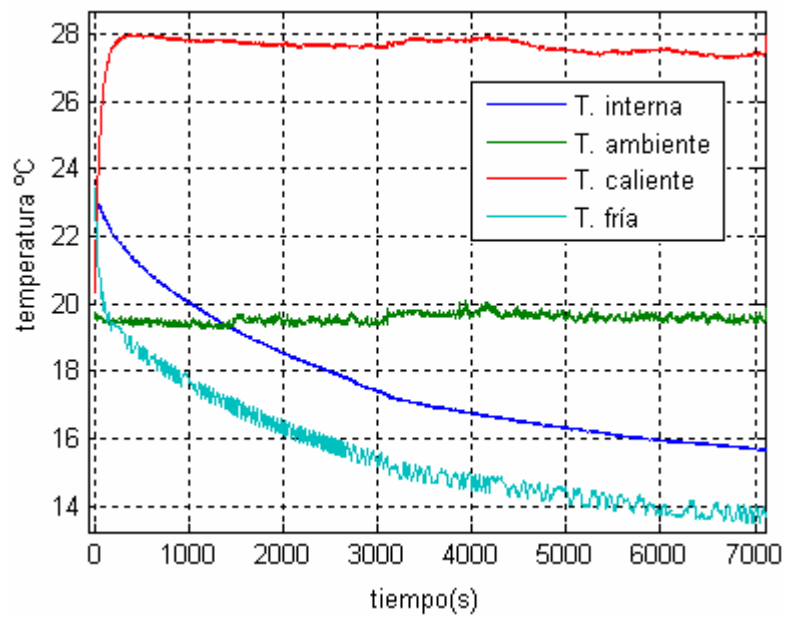


Figura 2-32 Ensayo para una corriente de 2 A.

A continuación se procede al ensayo, con una alimentación de 3 amperios:

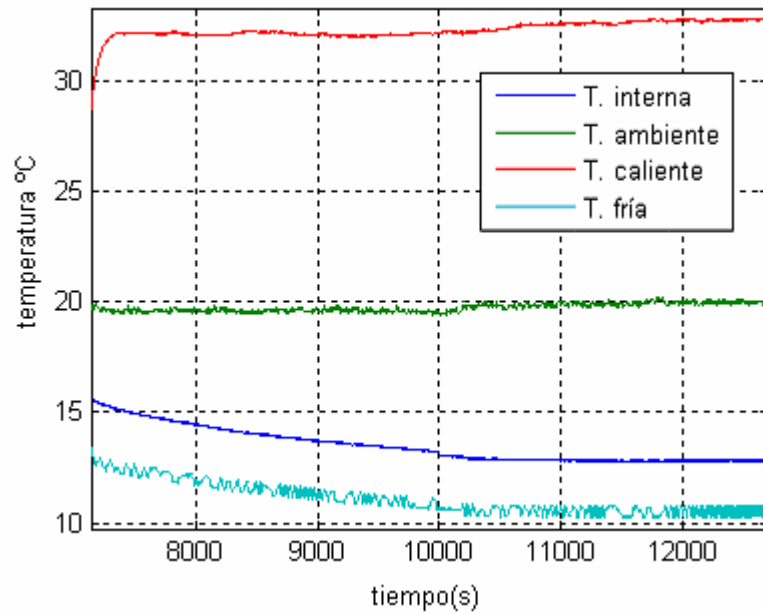


Figura 2-33 Ensayo con una corriente de 3A.

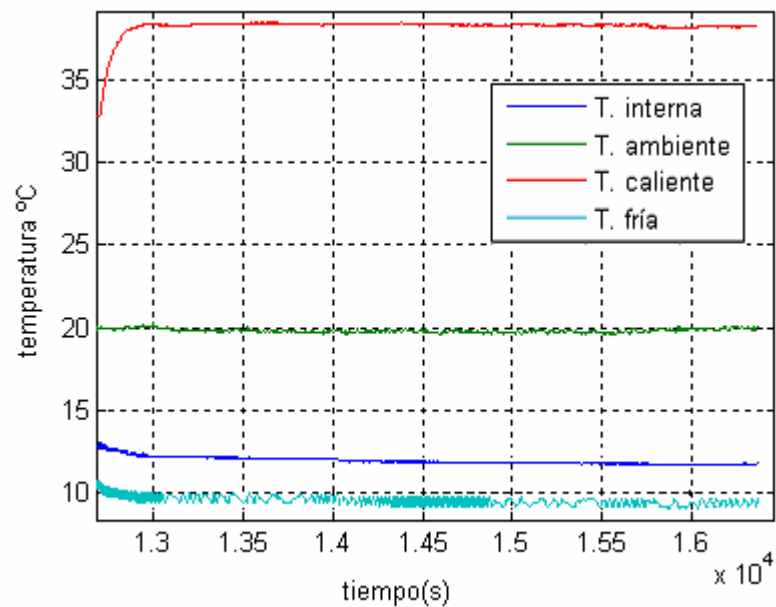


Figura 2-34 Ensayo con una corriente de 4 A.

A continuación se muestra una tabla donde se relacionan los datos, y se obtiene la potencia frigorífica introducida al sistema.

Corriente	Potencia	T. fria	T. ambiente
2	18	13.9	19.6
3	23.4	10.6	20
4	27.5	9.6	20

A partir de los valores de la tabla, se completa el sistema de ecuaciones basado en la ecuación *E 18* (detallado en los anexos), de cuya solución se extraen los valores:

$$[a = 0.05; b = 0.95; g = 0.5]$$

Ahora bien, cabe matizar que el rizado de la corriente que circula por la célula incrementa el efecto Joule, aumentando su peso en las ecuaciones. Este efecto se puede entender como un aumento del valor de *b*, que disminuirá el rendimiento del módulo, disminuyendo el aporte de energía frigorífica e incrementando el de energía calorífica.

A partir de la ecuación del balance de energías siguiente se cuantizará el efecto del rizado:

$$Q_{cal} - Q_{fria} = Q_{electrica} \quad E 23$$

Sabiendo para los diferentes casos la potencia eléctrica entregada, y los valores de las aportaciones de los efectos Peltier y Fourier, podemos concluir en un valor de *b*, que es:

$$b=1.2.$$

El cual satisface las ecuaciones *E 18* , *E 19* y *E 23*.

3.2.2 Obtención de los parámetros constructivos

Los valores del segundo grupo de parámetros: C_{caja} , C_c , C_f , R_{caja} , R_c , R_f , se obtendrán mediante el programa *ajuste.m*, tras realizar diferentes ensayos orientados a valorar cada uno de ellos.

El programa *ajuste.m* ajusta por mínimos cuadrados (método de Gauss-Newton) un modelo paramétrico a una salida dada. Tiene una biblioteca de modelos, que se pueden equiparar al sistema, pero en nuestro caso, nos será de más utilidad dejar el sistema que usamos como simulador, y plantearle como parámetros las capacidades y resistencias térmicas.

En primer lugar hay que indicarle cuáles son las entradas y cuál es la salida. Se le da unos registros con los valores de esas entradas y de la salida. Con esos datos el programa tratará de aproximar, con el menor error posible, la salida antes indicada y la que obtiene por simulación. Para minimizar ese error, modifica el valor de los parámetros a ajustar (capacidades y resistencias térmicas).

En la Figura 2-35 se aprecia el hecho comentado anteriormente:

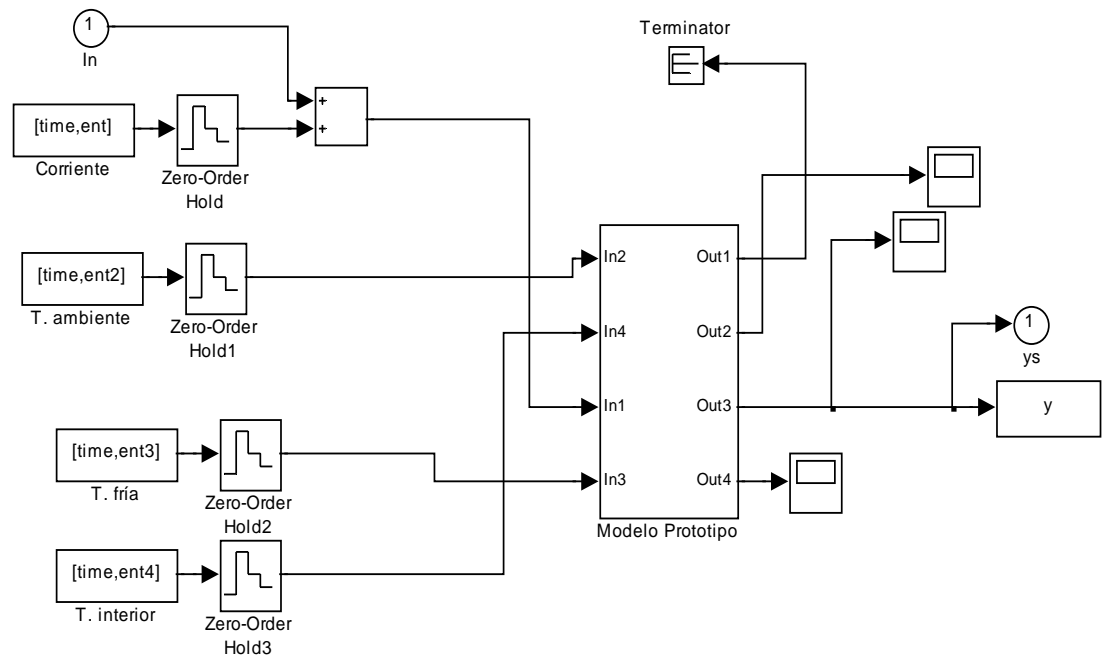


Figura 2-35 Ajuste de parámetros

En la Figura 2-36, se ve el interior del subsistema 'Modelo Prototipo':

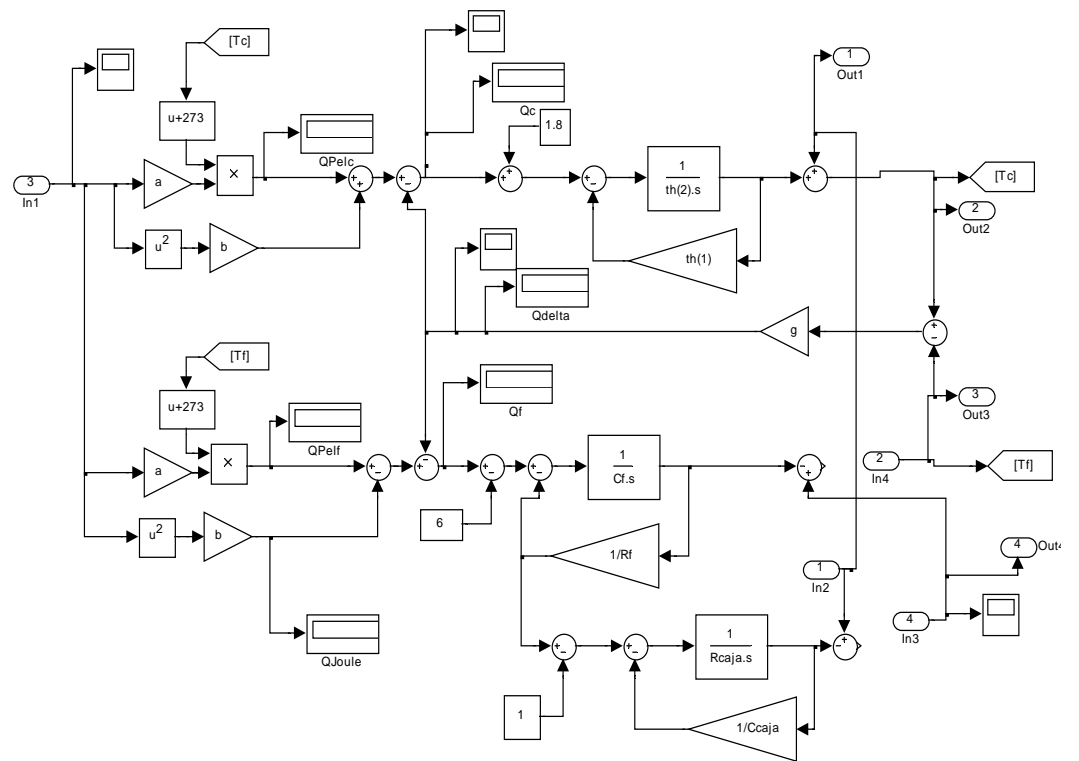


Figura 2-36 Modelo del prototipo

Como se observa; la entrada de corriente, temperatura ambiente, temperatura interna, y la temperatura de la cara fría, proceden del registro de datos obtenidos del ensayo, o de los diferentes ensayos con los que trataremos de estimar, en este caso, la resistencia térmica y capacidad térmica del lado caliente $th(1)$ y $th(2)$ respectivamente.

Procedemos a la obtención de los valores del lado caliente R_c y C_c a través de un ensayo en lazo cerrado. En la Figura 2-37 se muestra la salida real, la salida que se obtendría con los parámetros que calcula, y el error que se comete entre ambas señales:

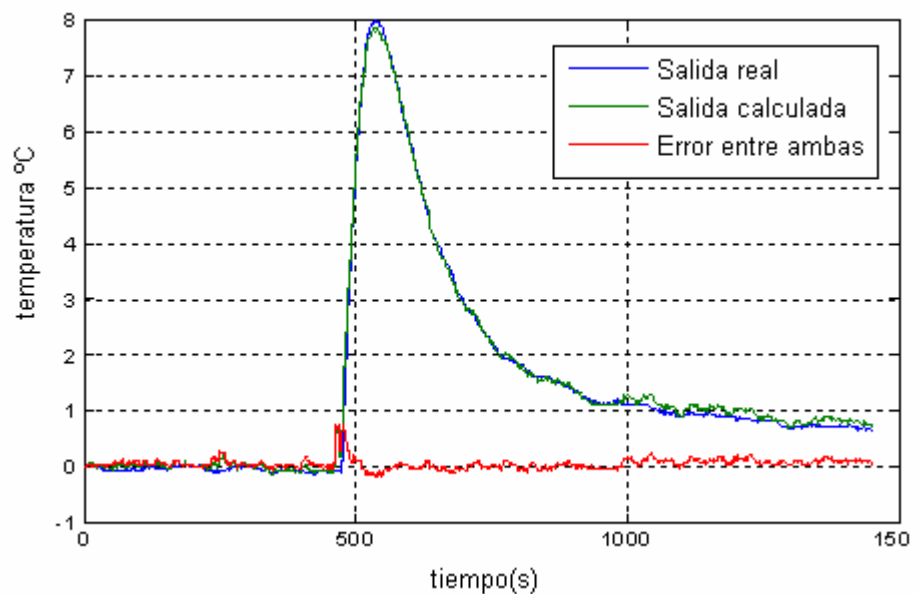


Figura 2-37 Ajuste de parámetros lado caliente

Se obtienen un valor de $0.27 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ de resistencia térmica y de $234 \text{ J}/\text{Kg} \cdot \text{K}$ de capacidad térmica.

De forma análoga, se van a ajustar los valores del lado frío, Figura 2-38, comentar que la cara fría tiene unas oscilaciones en la medida, de $0.4 \text{ }^\circ\text{C}$ de amplitud, de las cuales se desconoce su origen, bien por acople de ruido en el termopar, o mala fijación a la cara fría.

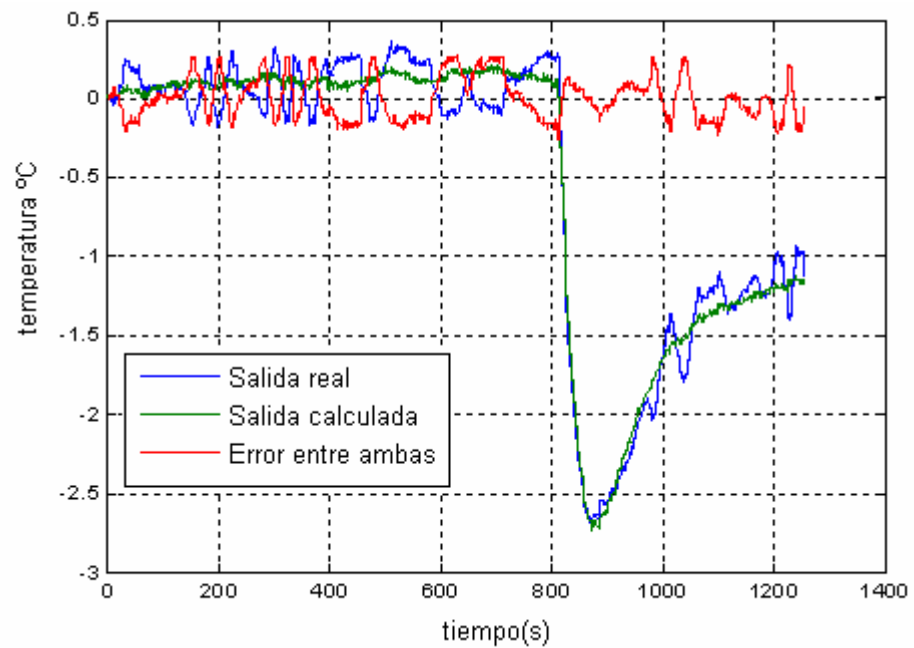


Figura 2-38 Ajuste de parámetros del lado frío

El programa nos calculó un valor de $0.12 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ de resistencia térmica y de $380 \text{ J}/\text{Kg} \cdot \text{K}$ de capacidad térmica.

Y para finalizar se ajustan los parámetros del prototipo. A continuación en la Figura 2-39, las señales de temperatura interna real y estimada por los parámetros:

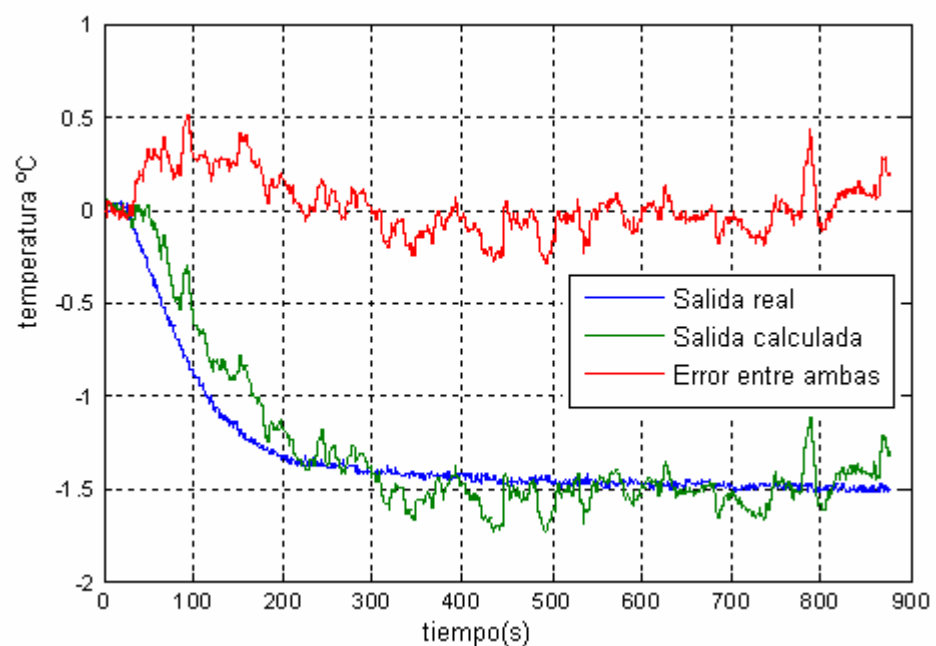


Figura 2-39 Ajuste de parámetros de la caja

Los valores que mostró el programa fueron: 1780 J/Kg·K la capacidad térmica de la caja y 0.46 m²·K/W de resistencia térmica.

El problema surge cuando, para contrastar los datos, se procede al ajuste de los mismos parámetros con otros ensayos, tanto de lazo abierto como de lazo cerrado.

Los parámetros del lado caliente se mantienen similares para diferentes ensayos véase la Figura 2-40:

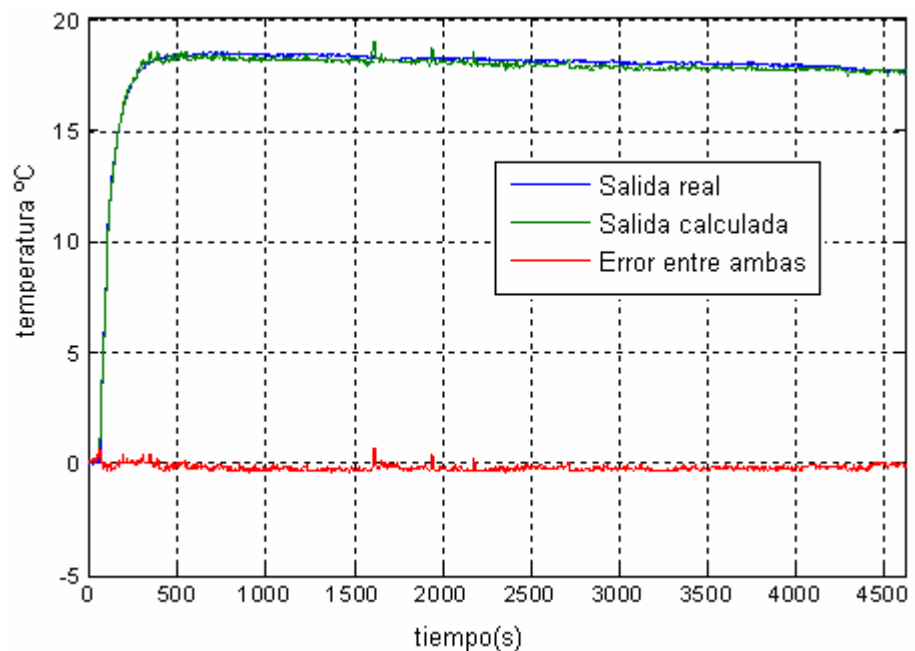


Figura 2-40 Ensayo contraste lado caliente

Los valores obtenidos fueron: C_c y R_c 267 J/Kg·K y 0.25 m²·K/W respectivamente, que no difieren demasiado de R_c 0.27 m²·K/W y de C_c 234 J/Kg·K que tenemos del cálculo anterior.

Pero al contrastar los parámetros del lado frío, como se ve en la Figura 2-41 :

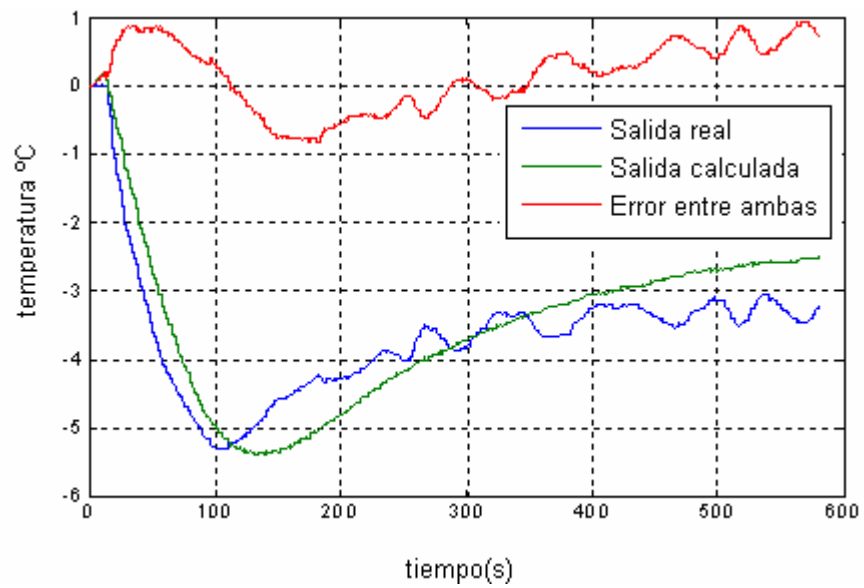


Figura 2-41 Contraste de parámetros del lado frío

Se obtienen unos valores de C_f y R_f de $360 \text{ J/Kg}\cdot\text{K}$ y $0.27 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$ respectivamente.

Y para otro ensayo otros valores de C_f y R_f $232 \text{ J/Kg}\cdot\text{K}$ y $0.17 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$, que difieren de los R_f de $0.12 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$, y C_f de $280 \text{ J/Kg}\cdot\text{K}$.

Y en el contraste de los parámetros de la caja, se halló el mismo problema, en la Figura 2-42 se ve el ajuste:

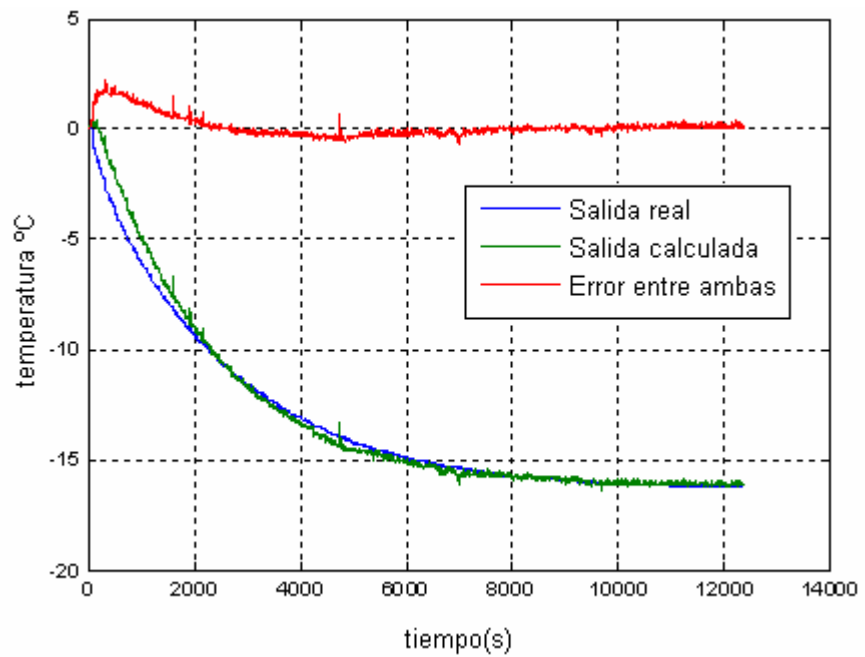


Figura 2-42 Contraste de parámetros de la caja

Ajuste de valores: C_{caja} y R_{caja} de $1930 \text{ J/Kg}\cdot\text{K}$ y $2.18 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$, también diferentes de los obtenidos en el ensayo anterior.

Se procede entonces a ver el resultado de la superposición de los valores más significativos del sistema, de un ensayo real, y una simulación con un grupo de parámetros de los obtenidos, véase la Figura 2-43.

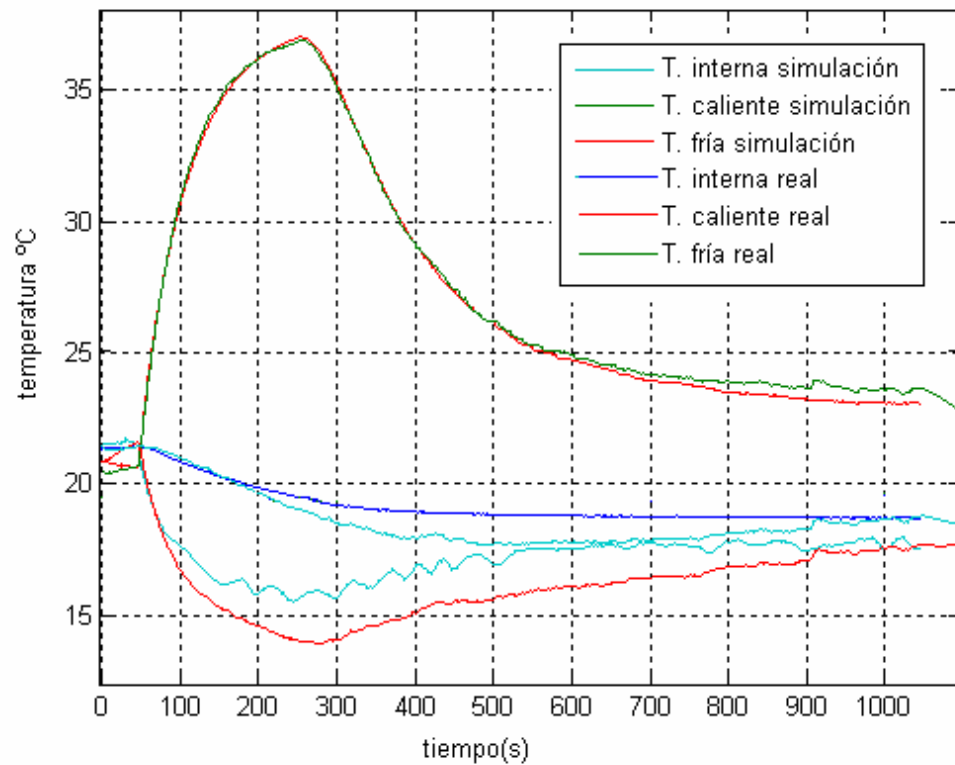


Figura 2-43 Comparación simulación y ensayo

Los valores con los que se hizo la simulación fueron los siguientes:

$$a=0.05; b=1.1; g=0.5;$$

$$R_c=0.23 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}; R_f=0.17 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W};$$

$$C_c=257 \text{ J}/\text{Kg} \cdot \text{K}; C_f=232 \text{ J}/\text{Kg} \cdot \text{K};$$

$$R_{\text{caja}}=0.46 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}; C_{\text{caja}}=1780 \text{ J}/\text{Kg} \cdot \text{K};$$

En la comparación se ven ciertas diferencias especialmente en lado frío y temperatura interna.

Otro ensayo para valorar estas diferencias se muestra en la Figura 2-44:

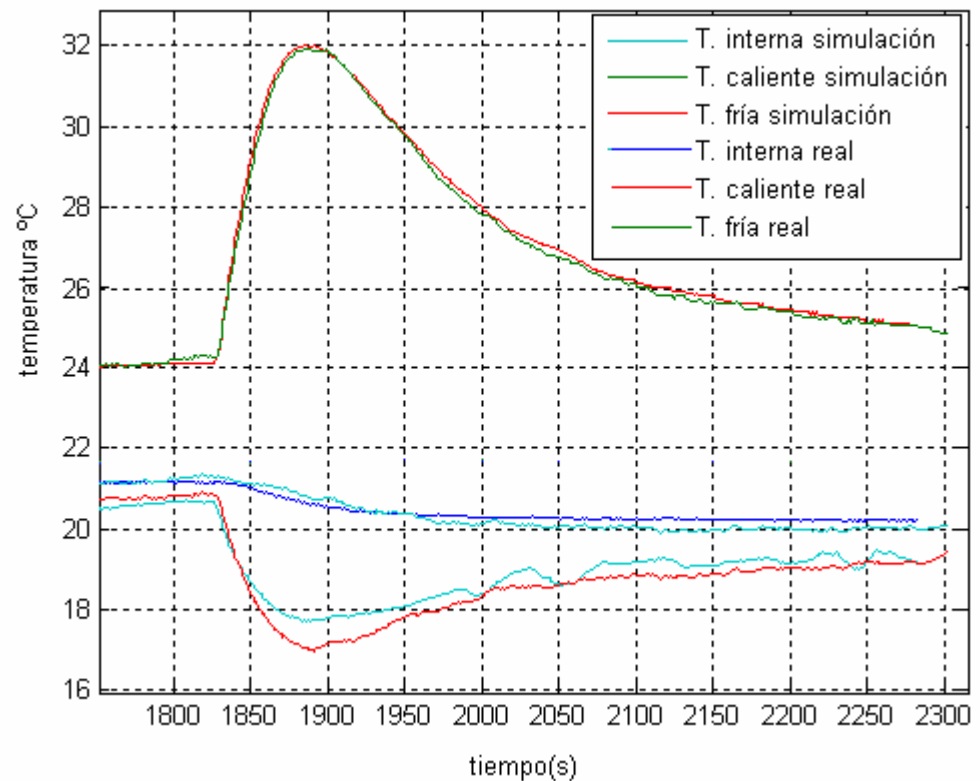


Figura 2-44 Superposición de ensayo y simulación

Se confirman estas diferencias en cara fría y temperatura interna.

Pese a estos desajustes en lo referente a temperatura interna y fría, vamos a linealizar en torno al punto de operación de los ensayos, el sistema que hay entre la corriente y la temperatura interna.

Esta acción la realizamos con el 'linmod' que tiene el Simulink. En este caso, sólo tendremos como no linealidades el cuadrado de la corriente, y el producto de temperatura fría y caliente. El resto de elementos son lineales, de modo que el 'linmod' realizará una simplificación de las funciones entre corriente y temperatura interna.

El resultado de la linealización fue el que sigue:

$$\frac{5 \cdot 10^{-5}(s - 0.0051)}{(s + 0.028)(s + 0.017)(s + 0.0015)} \quad E 24$$

Como se ha comentado anteriormente, estos resultados los afianzaremos llevando a cabo una identificación “caja negra”.

1.1.2.3.3 Identificación del modelo “caja negra”

El segundo camino es el de la caja negra, el cual parte del desconocimiento total del proceso. Este es visto como una caja negra, con entradas y salidas. Al proceso se le aplica a las entradas una señal adecuada, realizándose una adquisición de dichas entradas y de las salidas resultantes.

Con esta información, y utilizando métodos matemáticos basados en optimización, se comienza a probar con diferentes modelos.

Para cada modelo propuesto, se encuentran sus coeficientes, los cuales se suponen inicialmente desconocidos. Dicha labor se realiza comparando la salida que se obtendría por simulación del modelo propuesto y la salida del proceso real, aplicándoles la misma señal de entrada.

En nuestro caso no se parte del desconocimiento de la estructura que tenemos en el sistema, hemos hecho una linealización con el modelo de conocimiento, que cualitativamente nos da una visión del modelo que representa nuestro sistema. Sabemos por la ecuación

$$\frac{5 \cdot 10^{-5}(s - 0.0051)}{(s + 0.028)(s + 0.017)(s + 0.0015)} \quad E 24 \quad \text{que se}$$

trata de un sistema de tercer orden. Pese a todo, vamos a hacer el ajuste de parámetros de otros modelos como el de segundo orden para ver si se alcanza mejoría con el tercer orden.

La señal que utilizaremos para excitar al sistema será una onda cuadrada de pulsación 600 segundos, que es menor que la pulsación natural de sistema, así se excitan frecuencias mayores, y podemos obtener esa información, que será útil para conocer mejor la planta en el rango de frecuencias que nos interesa.

Por tanto probamos a realizar la identificación del sistema como un segundo orden, entre la corriente y temperatura interna, el resultado se muestra en la Figura 2-45:

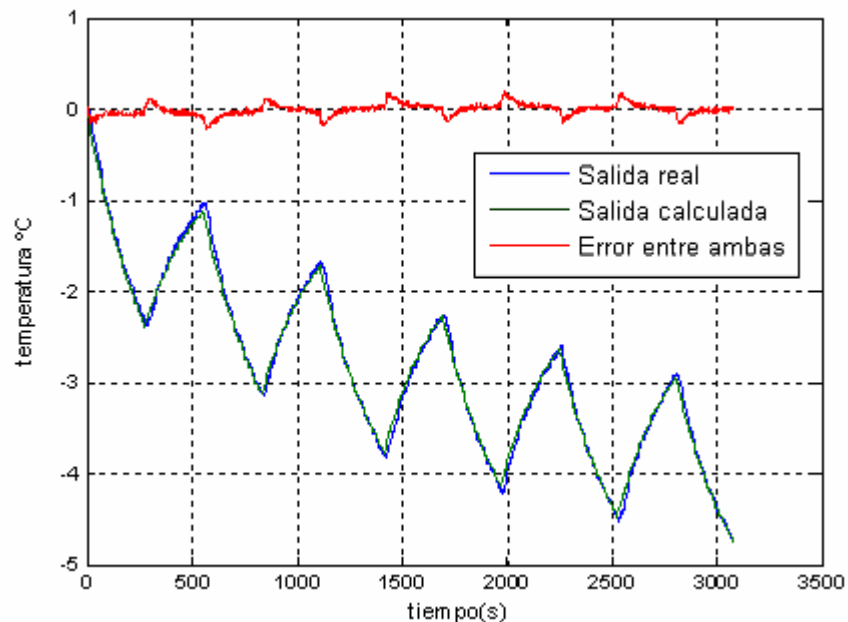


Figura 2-45 Ajuste por un sistema de segundo orden

Que se corresponde con una función de transferencia como la que sigue:

$$P(s) = \frac{-0.0033177(s+0.001203)}{(s+0.004536)(s+0.0003275)} \quad E 25$$

Para aproximarlo como un tercer orden con un cero, se deben ajustar cinco parámetros, tres polos, el cero, y la ganancia estática. Se creyó oportuno realizar ensayos de lazo abierto, con diferentes corrientes (que en esta identificación son la entrada), para conocer la

ganancia estática. De esta forma se evita que el programa 'ajuste' encuentre una combinación de valores que satisfagan el problema de mínimos cuadrados, pero que no tengan sentido físico. Con la condición de la ganancia estática, este problema se elimina.

Tras la realización de varios ensayos, se aproxima la ganancia estática a un valor de 3, y se procede al ajuste de los polos y ceros, como vemos en la Figura 2-46. Es conveniente recordar que en esta búsqueda, para hallar unos valores fiables, es fundamental la introducción de unos valores iniciales que se aproximen a los verdaderos, para evitar que el programa entre en mínimos locales, y dé una solución poco fiable.

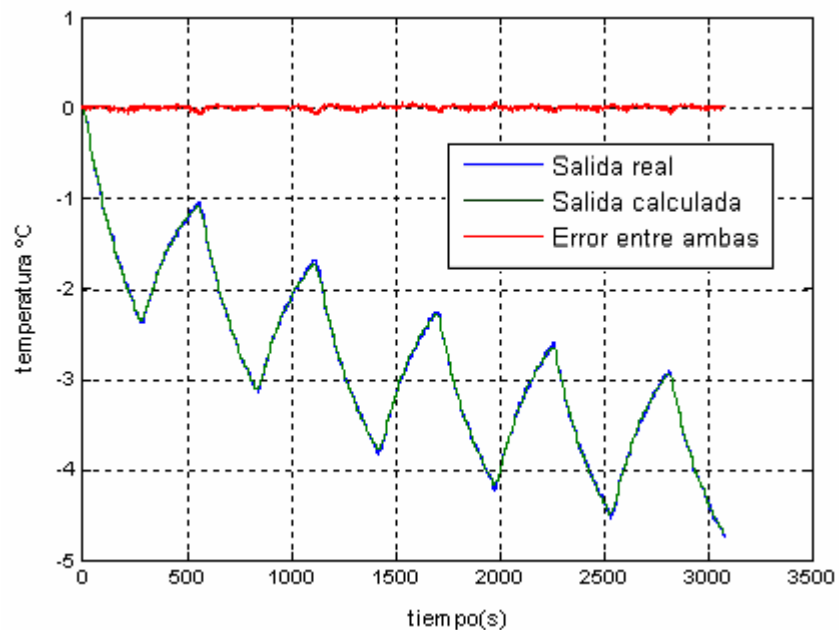


Figura 2-46 Ajuste por un sistema de tercer orden

Que se corresponde con una función de transferencia como la que sigue:

$$P(s) = \frac{-0.00038(s + 0.00109)}{(s + 0.106)(s + 0.0049)(s + 0.00026)} \quad E 26$$

El sistema tiene un polo mucho más lento que los otros, tal polo corresponde al recinto térmico, los otros se refieren, seguramente, al enfriamiento de la propia célula.

El diagrama de Black de este sistema, es como el que sigue en la Figura 2-47:

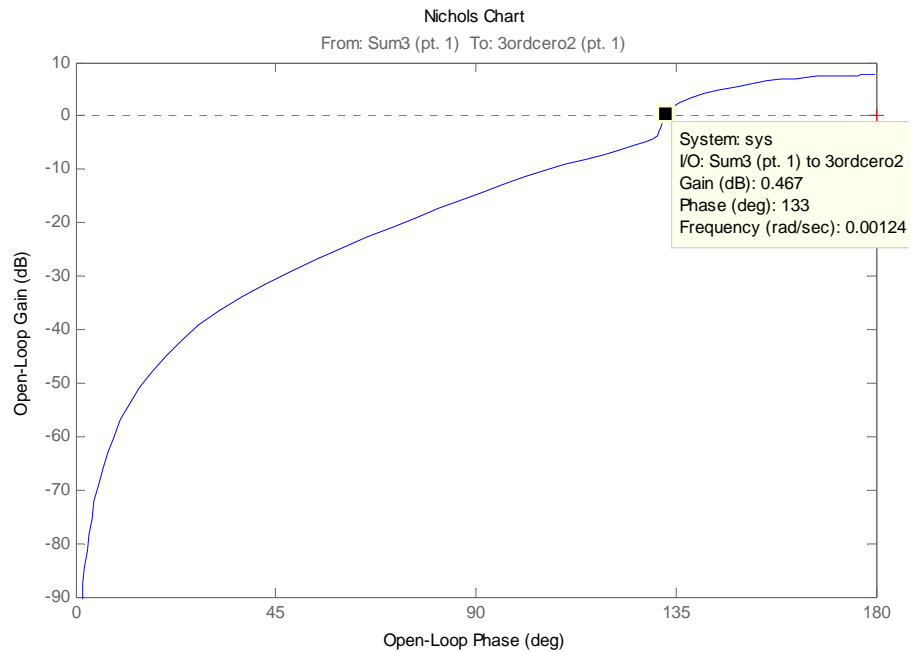


Figura 2-47 Diagrama de Black del sistema

Se hace necesario comentar que como el sistema tiene ganancia negativa, está desplazado 180° a la izquierda.

Se procede a realizar identificación de la función que aproxima el sistema desde la corriente hasta la cara fría, de forma análoga a la interna.

El resultado obtenido se ve en la Figura 2-48:

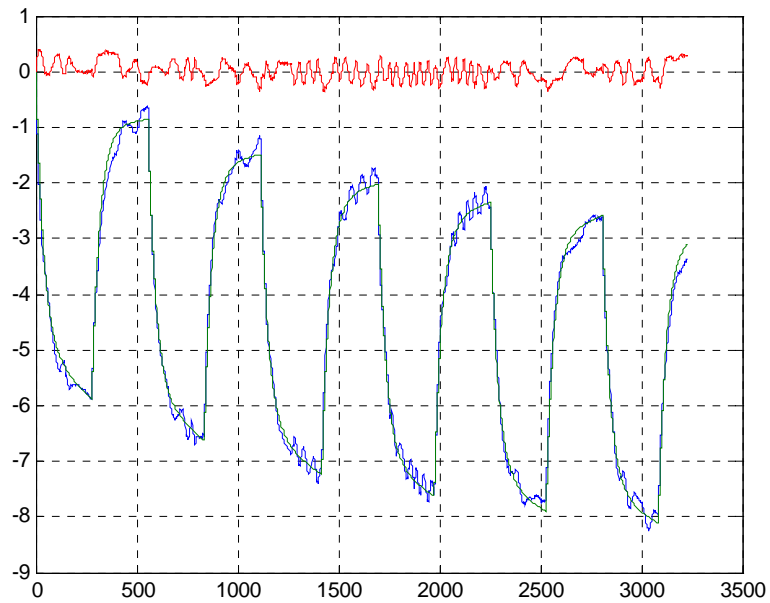


Figura 2-48 Ajuste cara fría

Que se corresponde con una función de transferencia como la que sigue:

$$P(s) = \frac{-0.032877 (s + 0.001297)}{(s + 0.02612) (s + 0.0005456)} \quad E 27$$

El sistema que aproxima la función entre corriente y cara caliente se creyó suficientemente buena con el ajuste obtenido en la Figura 2-37.

1.1.2.3.4 Conclusión

Se cree posible dar como válido el modelo probado, un tercer orden con un cero. Con este sistema se pueden diseñar controles, ya que se tienen en la respuesta en frecuencia, frecuencias útiles para el diseño.

Por tanto, se da por concluido el estudio, ya que los modelos obtenidos aportan valores fijos para los parámetros de la función de transferencia, aunque existe una pequeña desviación respecto al comportamiento real.

Es por ello que los modelos conseguidos deben ser tomados como referencias orientativas de carácter cualitativo.

Podemos determinar entonces que la tarea del modelado queda suficientemente cubierta con lo desarrollado hasta el momento, y conviene comenzar con el diseño de un control para el sistema.

De esta forma, el modelo que aproxima el funcionamiento del prototipo es el que tiene como función de transferencia la $E 26$:

$$P(s) = \frac{-0.00038 (s + 0.00109)}{(s + 0.106) (s + 0.0049) (s + 0.00026)}$$

Con ganancia estática de valor: $-3 \text{ }^\circ\text{C/A}$

Sus constantes de tiempo son: 3846, 204 y 9.5 segundos.

1.1.2.4 Diseño de un control

Una vez obtenido un modelo válido, al menos para darnos una idea de los valores de los parámetros del controlador, se procede al diseño de un control para el sistema analizado.

El control que se va a introducir será del tipo PI, al ser un sistema con ruido en las señales de medida, prescindiremos de la acción diferencial.

A raíz de la limitación de la saturación del mando, no fue tan trivial como el diseño exacto del control a partir del margen de fase o de ganancia. Así que a partir del modelo se obtuvieron unos parámetros, que se fueron modificando para un correcto funcionamiento dentro de los límites de trabajo.

1.1.2.4.1 Implantación del control

Se procede al diseño del control mediante las fórmulas del control clásico, en donde se fija la fase que introduce la parte integral, se indica la pulsación de cruce y el margen de fase que quedará. El margen de fase con el que se pretende trabajar no será menor de 50° .

Tras la realización del diseño analítico, se obtienen unos valores para la acción proporcional P de 5.6 e integral I de 190 segundos, que tras comprobar en simulación que queda demasiado enérgico en cuanto a valores de sobrepaso y oscilaciones, se procede a un compromiso entre velocidad y amortiguamiento, de modo que los valores finales para nuestro control quedan:

$$P=5.6 \text{ e } I=300.$$

Por supuesto hay que aclarar que la acción integral se va a proteger de acumular error mientras el mando se encuentra en saturación, mediante un antiwindup.

Diagrama de Black, en la Figura 2-49, de la planta con el control:

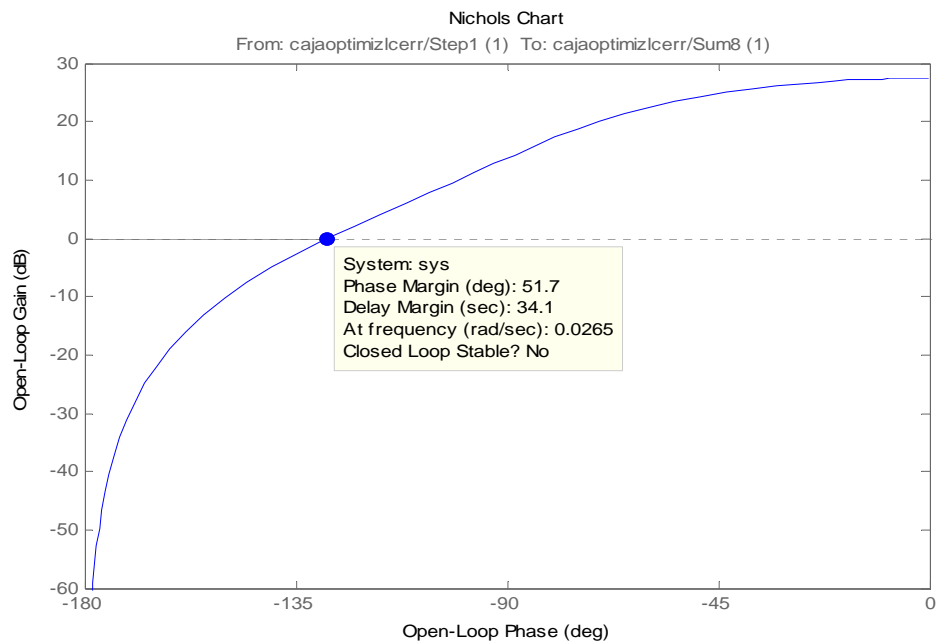


Figura 2-49 Diagrama de Black de la planta

Y se obtiene una respuesta a sendos escalones en referencia a 18 y 16 °C como se ve en la Figura 2-50, razonable para todo el rango de temperaturas que abarca:

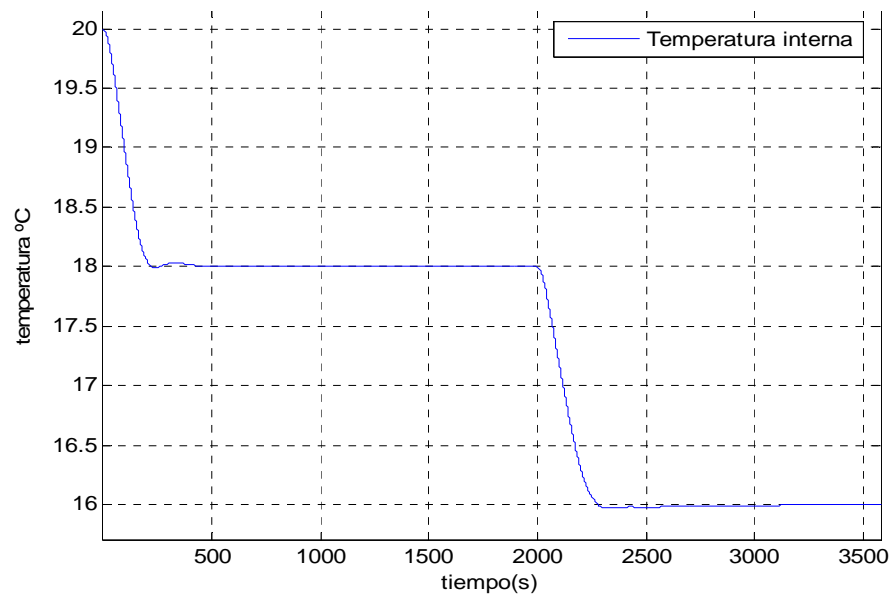


Figura 2-50 Respuesta a escalón en referencia

1.1.2.4.2 Optimización del mando

Además del diseño de un control, y conociendo la no linealidad del mando, que en nuestro caso es el módulo termoelectrico como bomba de calor, se procede a estudiar si se puede alcanzar un modo de alimentación que optimice la potencia producida por el módulo termoelectrico.

La idea surge del análisis de las curvas de potencia de la célula, (Figura 2-31). Se ve claramente que a partir de una determinada frontera de corriente, la aplicación de más mando, (más corriente) no consigue incrementar la potencia frigorífica.

El hecho se materializa en nuestro sistema entre unos valores de corriente de 4.5 hasta 5 amperios, véase en la Figura 2-51 el incremento de temperatura interna que acontece al incrementar hasta 5 amperios desde un valor de mando de 4.5 amperios:

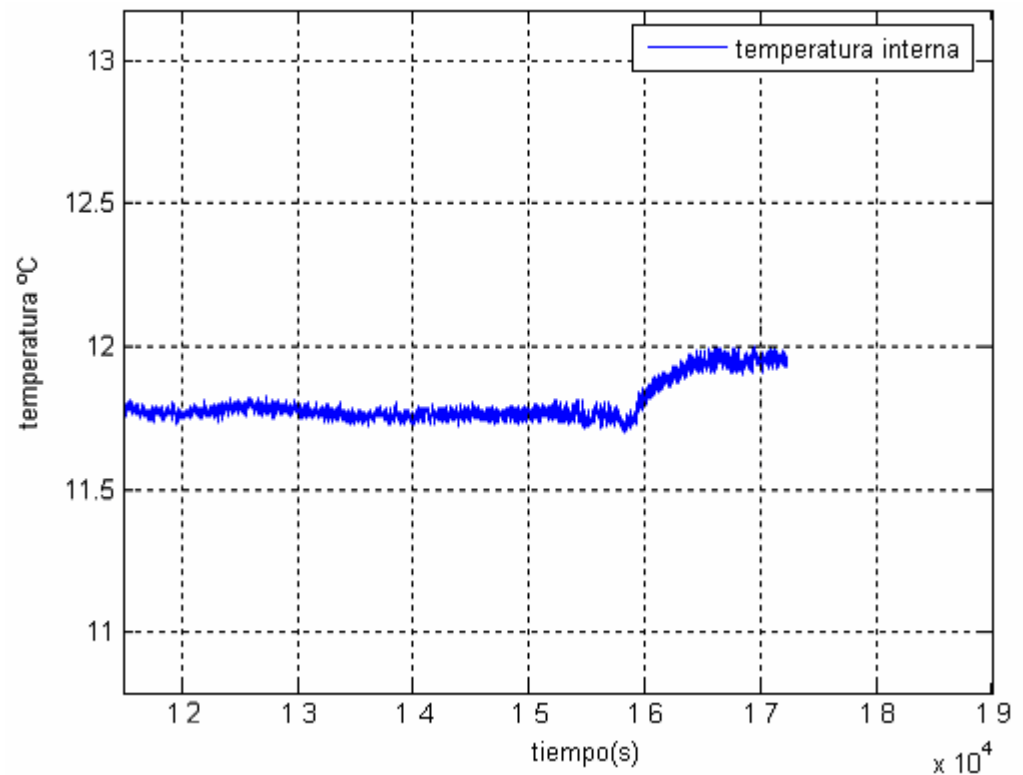


Figura 2-51 Transición de corriente de 4.5 hasta 5 amperios

Por tanto queda comprobado que en régimen permanente, el óptimo se encuentra en torno a una corriente de 4.5 amperios.

De este dato se deduce que, para trabajar en lazo abierto y aprovechar al máximo las posibilidades de la célula, la corriente que se ha de aplicar será de 4.5 amperios.

Ya que en nuestro estudio se da importancia a la dinámica del sistema, se lleva a cabo el análisis de potencias que se obtienen al aplicar diferentes corrientes en la célula.

Este análisis responde a la pregunta que intuitivamente surge al ver las entregas de potencia frigorífica que muestran las curvas de funcionamiento de la bomba de calor. A partir de nuestro simulador se puede ver la cantidad de potencia instantánea transferida al recinto. Este marcador nos ayudará a conocer los puntos en los que conviene aplicar más mando, o conviene reducirlo.

En la Figura 2-52 se muestra la comparación de potencia transferida, para un mando limitado a 5 amperios y otro limitado a 4.5 A, en lazo abierto, estando las dos caras a temperatura ambiente:

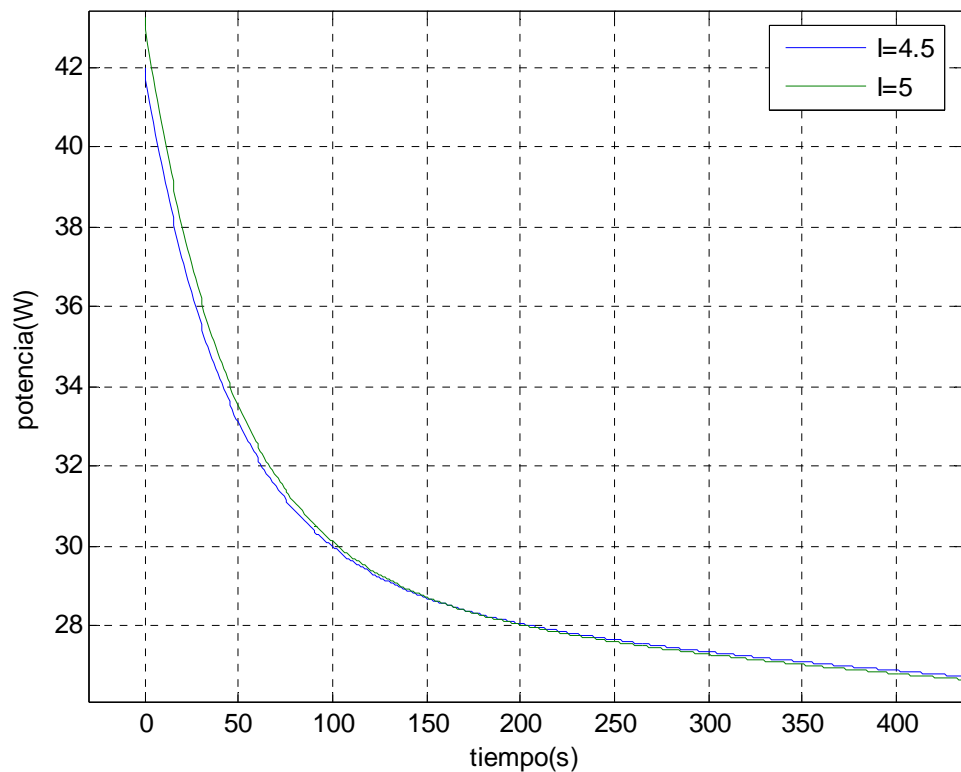


Figura 2-52 Potencias instantáneas entregadas

Se ve que, en la primera parte, la potencia que se suministra a 5 amperios es superior, pero hacia el segundo 160 éstas se igualan, y poco después, el óptimo está en 4.5 amperios. La situación se explica por el incremento de temperaturas entre caras, que se alcanza al aplicar un mayor mando.

Para asimilarlo con más claridad, en la Figura 2-53 se puede observar el incremento de temperatura entre caras para ambos mandos de corriente.

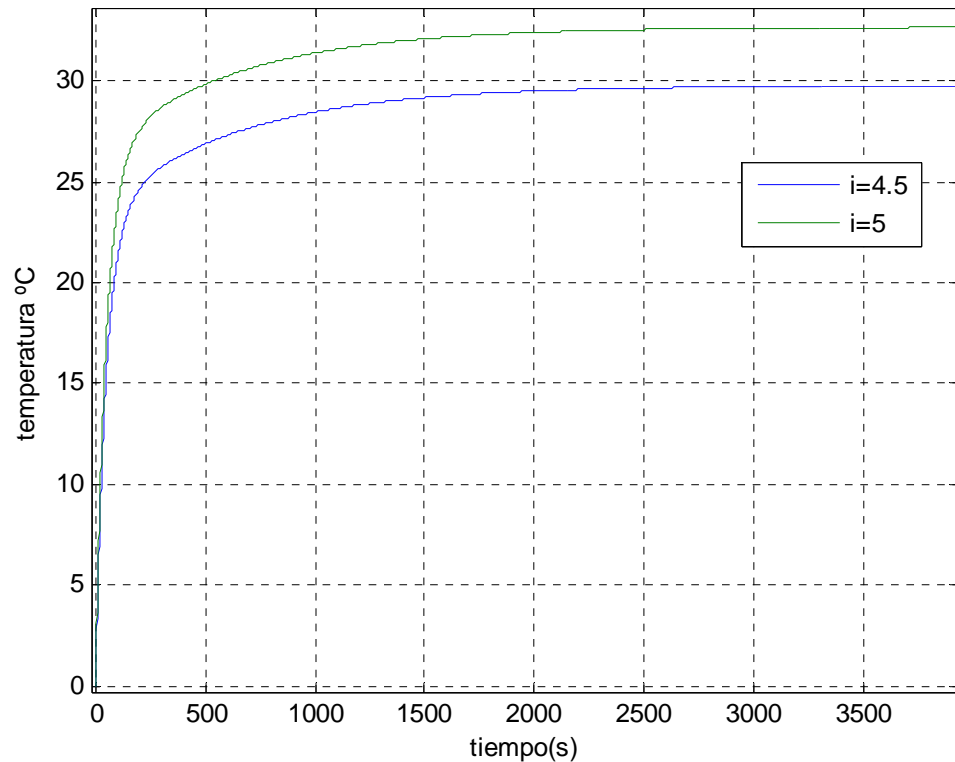


Figura 2-53 Incremento de temperaturas entre lados del módulo

Se aprecia que el mando de 5 amperios, cuando deja de ser eficiente, tiene además la tendencia a seguir subiendo. Por tanto, la idea está en hacer un método de regulación del mando, que tenga en cuenta el incremento de temperatura, o quizá la pendiente con la que este incremento se produce.

Veamos en la Figura 2-54 el efecto que tiene en la temperatura interna, estas diferencias de potencia:

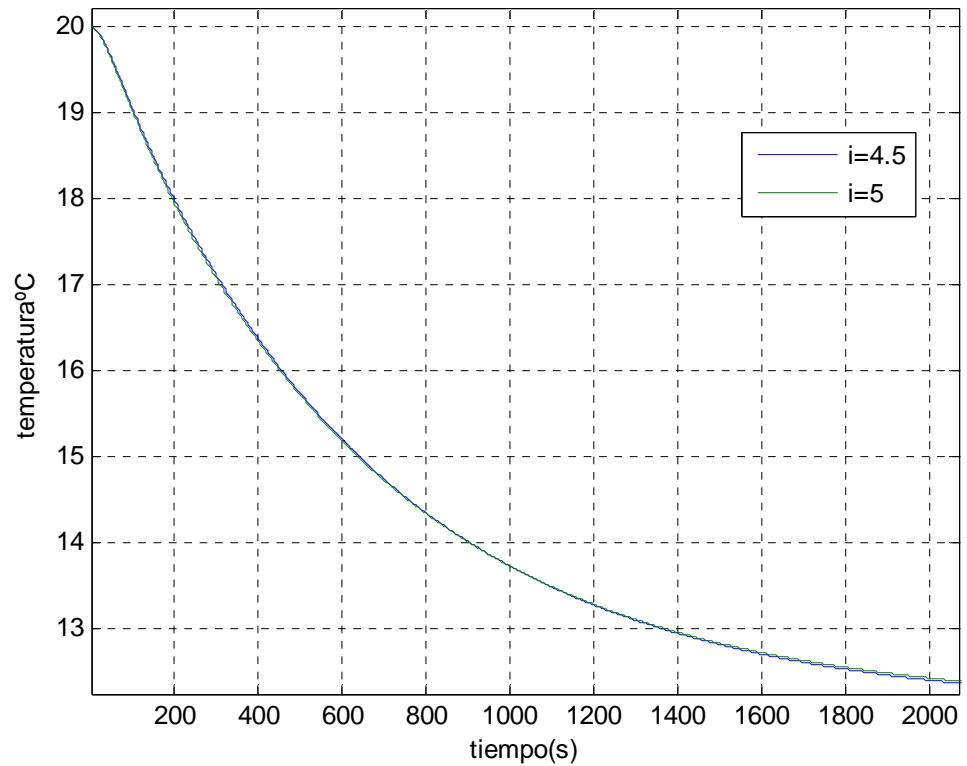


Figura 2-54 Temperaturas internas

Las diferencias entre temperaturas internas son pequeñas, así que en la Figura 2-55 veremos la resta de temperaturas internas para apreciar cuál es más rápido, y cuál llega a un mejor valor:

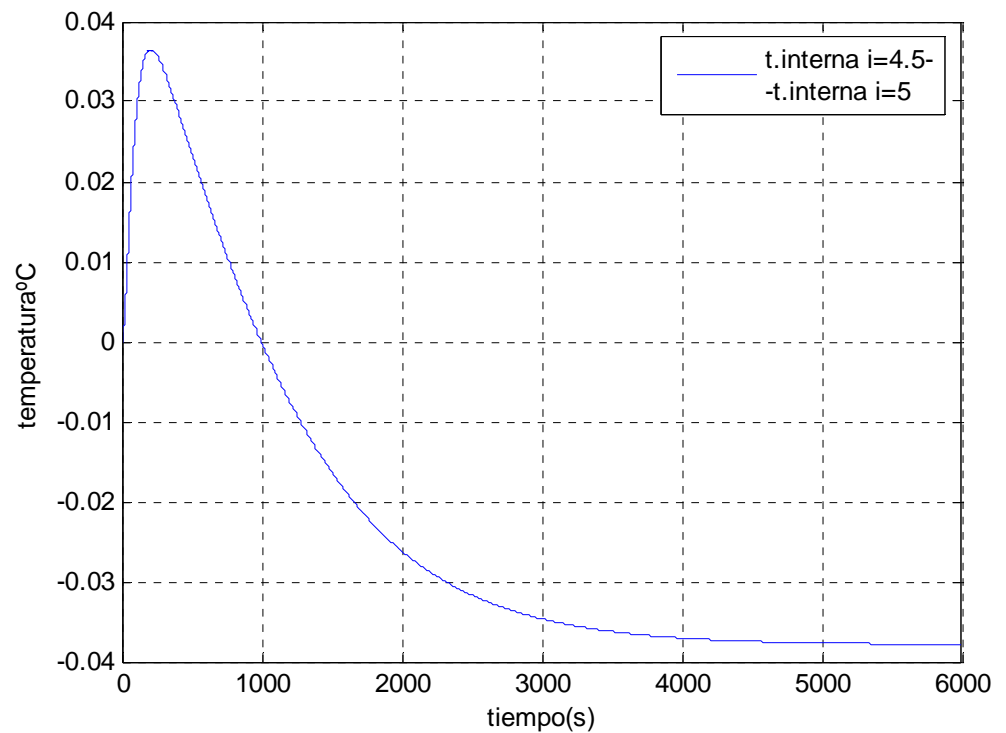


Figura 2-55 Diferencia entre temperaturas internas

Se aprecia que hasta 1000 segundos, son mejores los valores que se obtienen al aplicar el mando máximo, tras ese punto, es más conveniente aplicar 4.5 amperios.

Como primera prueba a realizar, cambiaremos los límites de saturación del mando de 5 a 4.5 primero desde el instante inicial, y después variaremos el momento en que tal cambio en la limitación de mando acontece.

En la Figura 2-56 vemos la respuesta del sistema a un escalón en lazo cerrado, ante una referencia de 15°C, desde temperatura ambiente:

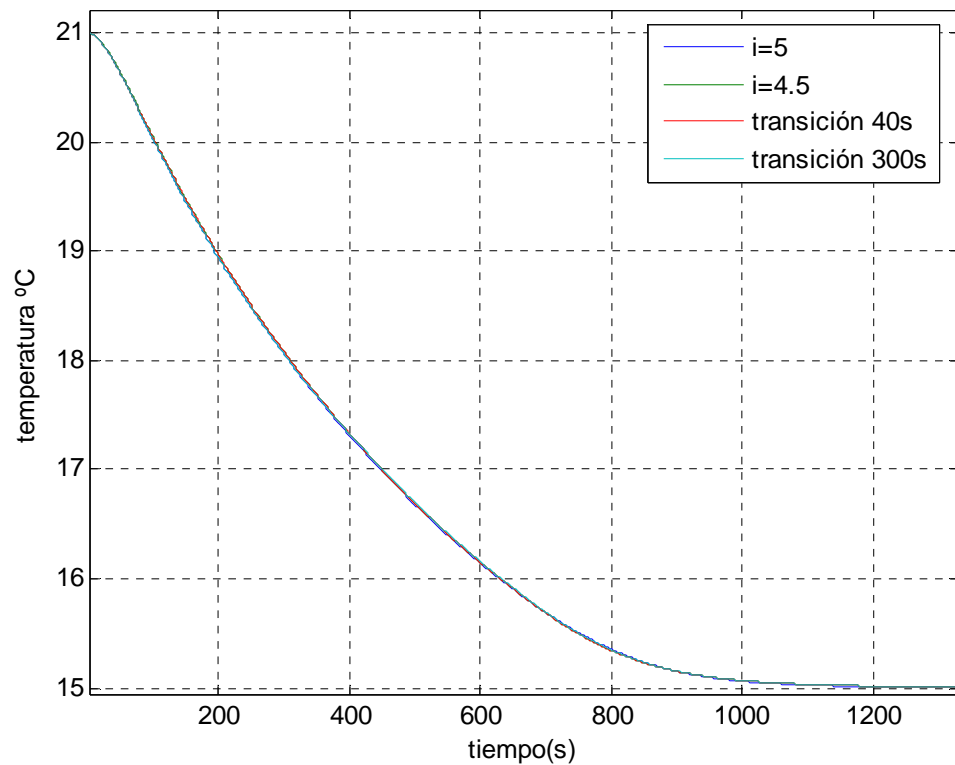


Figura 2-56 Temperaturas internas

La figura apenas nos deja ver las mejoras que se pueden obtener. Eso nos ayuda a prever que las mejoras que se puede alcanzar en este prototipo, con esos parámetros constructivos, son escasas. Lo cual nos da una idea del buen hacer de los compañeros que construyeron el prototipo, que acoplaron unos disipadores y ventiladores adecuados para la corriente máxima que aporta el servoamplificador. Por tanto el servoamplificador está bien dimensionado para la célula Peltier, y la potencia frigorífica es suficiente para un rango de temperaturas aceptable dentro del recinto. Realmente la potencia frigorífica es suficiente, pero no generosa, y no

permite un juego de controles demasiado vistoso, comportándose como un sistema sobreamortiguado.

En conclusión, para este sistema, y dado que la posibilidad de mejora es tan escasa, parece lógico limitar la corriente del servo a 4.5 amperios. Así no se alcanzará el punto en el que, al dar más mando, se obtenga menos potencia frigorífica.

Pero, como se trata de obtener ideas para extrapolarlas a otros sistemas y configuraciones, vamos a cambiar los valores de las resistencias térmicas del módulo, para que las temperaturas en ambas caras tengan más ganancia, y se alejen de la temperatura ambiente. De este modo, se producirá más incremento de temperatura entre caras, se penalizará el mayor uso de mayor mando, y tendremos un margen de mejora no como en el caso anterior de 0.5 amperios, sino una franja mayor.

Merece la pena comentar que el incremento de valor de las resistencias térmicas se puede implementar en el sistema físico como una disminución del flujo de aire de los ventiladores, que se logra alimentando con una menor tensión.

1.1.2.4.3 Ensayo para la optimización del mando

Ya hemos comentado que se deben incrementar las resistencias térmicas, para que tengan más ganancia, y el incremento de temperatura sea notablemente mayor. Por tanto, se ensancha el rango de corrientes para lograr mejora en transitorio y en régimen permanente.

Se procede de la siguiente manera: bajamos la tensión de alimentación de los ventiladores a 7.9 voltios, suministrando así una corriente de 0.222A.

La potencia actual de ventiladores se obtendría como producto de tensión y corriente, cuyo resultado es de 1.75W, mientras que con la configuración anterior, se alimentaba con una potencia de 7.8W.

Se realizan, por tanto, los ensayos que permitan ver la evolución de la temperatura interna hasta el régimen permanente. Estos ensayos se realizan el lazo abierto, y tienen como objetivo encontrar, de modo aproximado, la corriente que haga menor la temperatura interna en el prototipo.

El primer ensayo, Figura 2-57, consta de tres fases bien diferenciadas, (cambios notables en la temperatura del lado caliente) donde se ha aplicado una alimentación de 4 amperios, a continuación de 3.5A, y finalmente 4.5A.

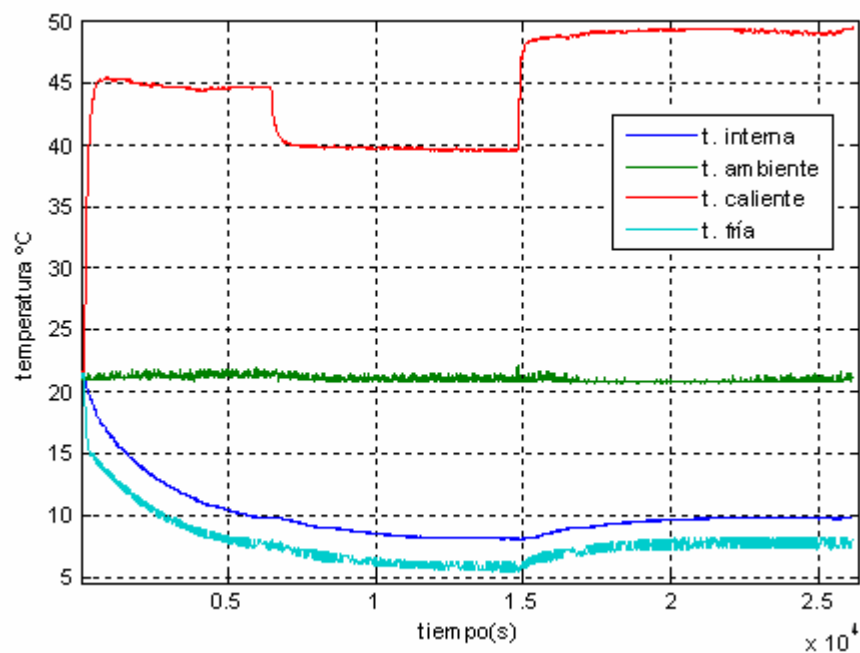


Figura 2-57 Ensayo corriente óptima

Se aprecia claramente un empeoramiento en la temperatura del prototipo, al aplicar una corriente de 4.5A (tramo final).

Llevamos a cabo una comparación más precisa, Figura 2-58, de las temperaturas internas alcanzadas cuando la alimentación sea de 4 o 3.5 amperios.

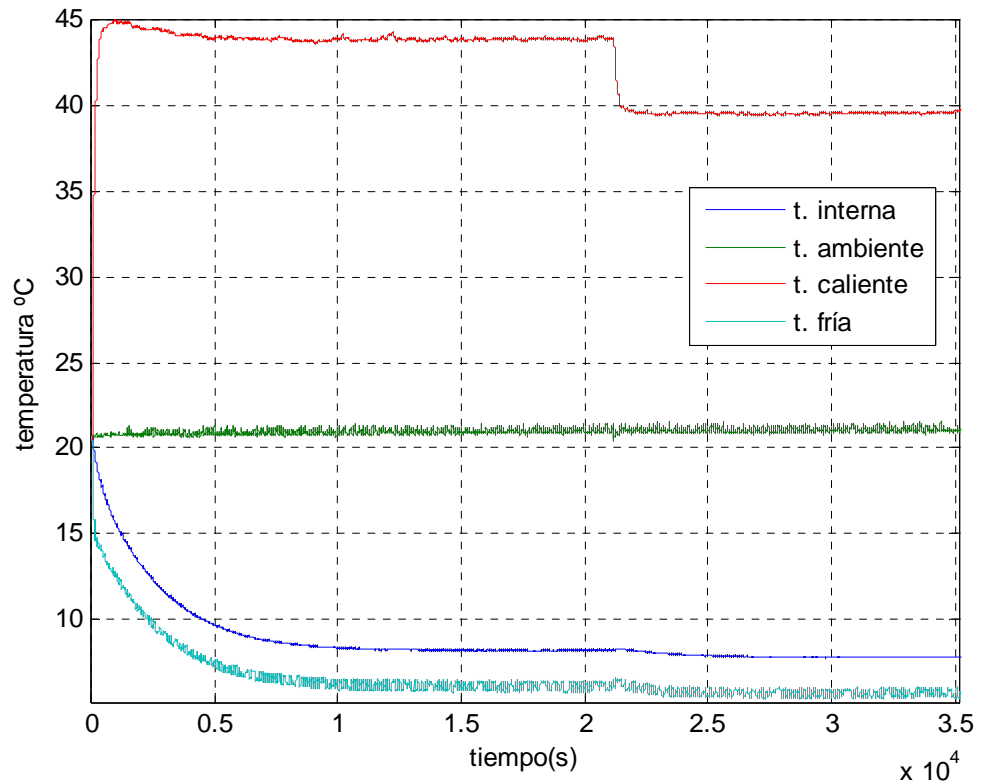


Figura 2-58 Ensayo obtención corriente óptima

Se alimenta con una corriente de 4A hasta un tiempo de 22000 segundos, y posteriormente se cambia a 3.5A.

Como comprobación experimental de los resultados obtenidos en simulación, comentar que en la Figura 2-57, en detalle se ve que al alimentar a 4.5A, baja durante un corto espacio de tiempo la temperatura interna. Pero en cuanto se incrementa la temperatura del lado caliente, la potencia transferida disminuye por el efecto Fourier, y la temperatura interna empeora.

En la Figura 2-58 ocurre un fenómeno similar. Cuando cambia la alimentación de 4A hasta 3.5A, la temperatura interna empeora, pero

al disminuir la temperatura de la cara caliente, la temperatura interna transfiere mayor potencia, y se mejora el resultado obtenido con 4A.

Se reajustan ahora los valores de los coeficientes de resistencias térmicas que tenemos en el programa de simulación, ateniéndonos a los resultados obtenidos experimentalmente.

Los cambios que se producen son los siguientes: Rcal crece al doble prácticamente, y Rfría crece un 50%. Este desajuste se explica con el nuevo reparto de corrientes que circulan por cada ventilador.

Valor prototipo original	Valor nuevo
Res. caliente-> 0.23	0.4
Res. fría-> 0.17	0.25

A continuación realizamos los ensayos. Éstos son en lazo cerrado con el control PI antes diseñado, con referencia en 18°C, desde la temperatura ambiente. Uno con saturación en 4.5A, otro con 3.5 y otro, llamado 'iopt', que realiza una transición de 4.5 a 3.5 a los 120 segundos de comenzar el ensayo.

En la Figura 2-59 se muestran los diferentes ensayos:

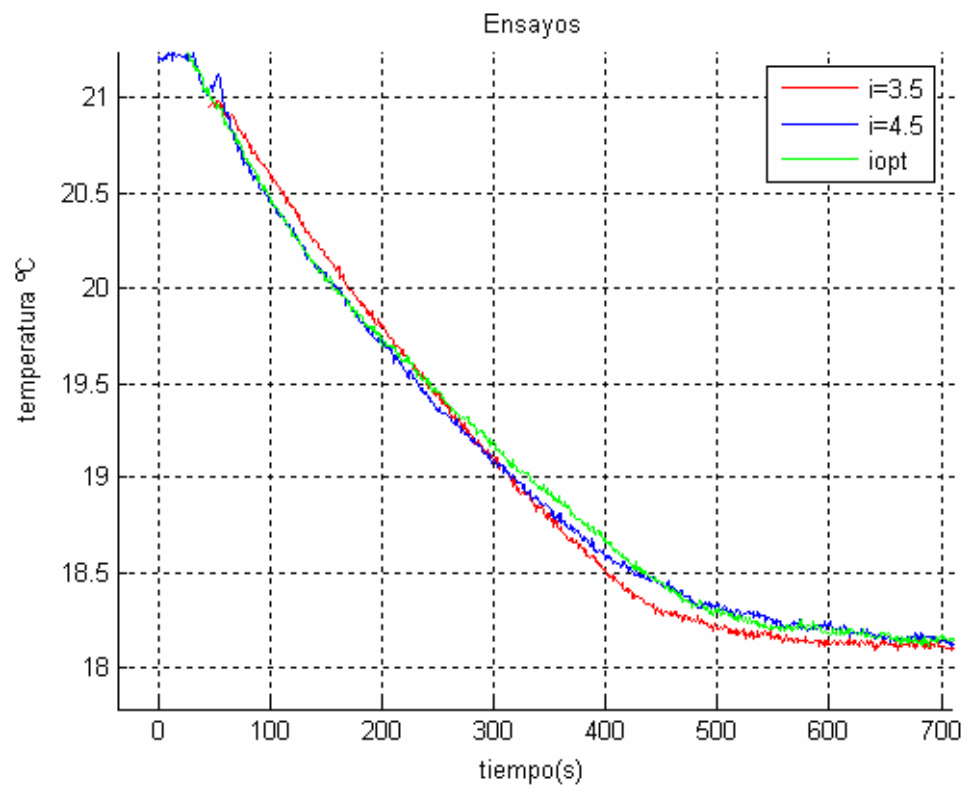


Figura 2-59 Ensayo lazo cerrado

Se obtienen los resultados esperados: en la primera parte del transitorio, la mejor respuesta nos la da el ensayo de saturación 4.5A. Poco después el llamado 'iopt' sale del límite de 4.5 y rápidamente empeora, pero posteriormente, mejora la temperatura del ensayo de 4.5A. A partir de un instante, el limitado a 3.5A mejora la respuesta de los otros dos.

Es interesante apuntar que los tres dejan de saturar hacia los 370 segundos.

Se analiza su respuesta equivalente mediante simulación en la Figura 2-60:

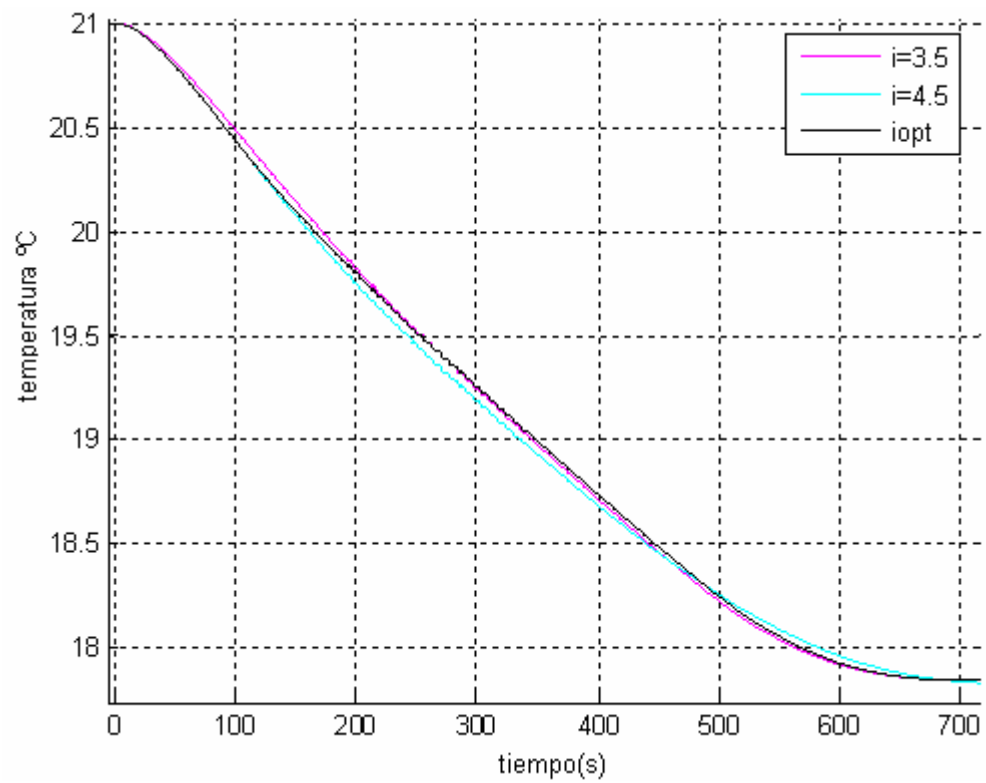


Figura 2-60 Simulación lazo cerrado

La simulación estima una evolución similar a la acontecida en los ensayos.

A continuación en la Figura 2-61, se muestra la superposición de todos los resultados obtenidos:

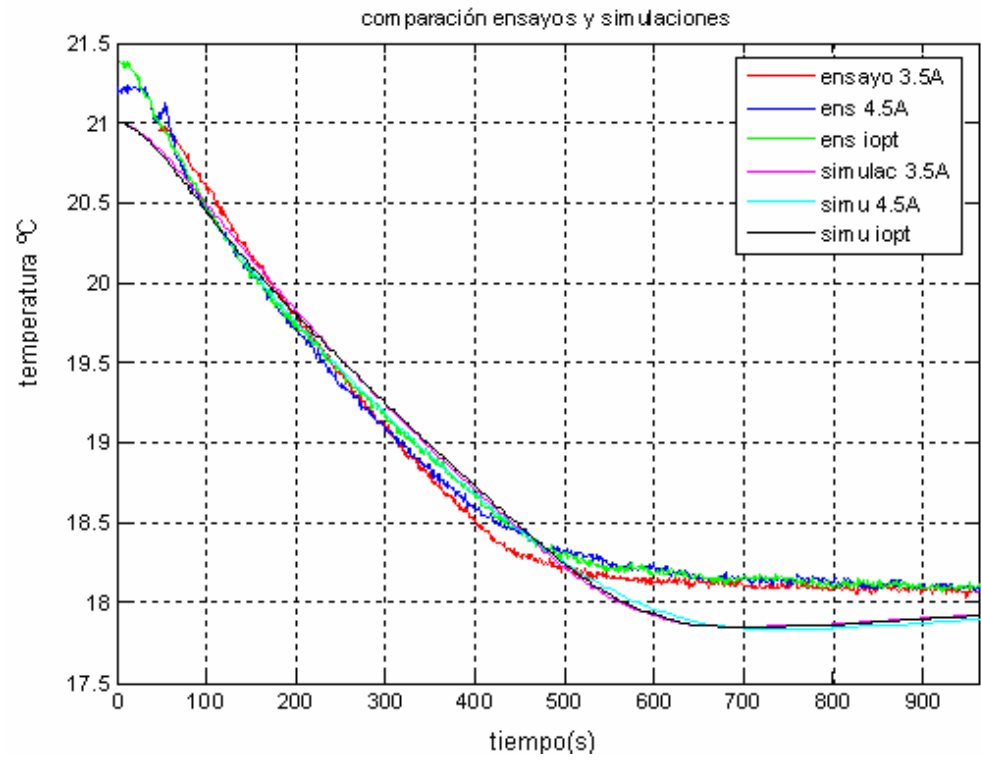


Figura 2-61 Superposición de temperaturas, simuladas y experimentales

Capítulo 3 RESULTADOS EXPERIMENTALES

Hemos obtenido un modelo que simula lo que acontece en nuestro sistema térmico. Éste modelo se concreta a partir de las ecuaciones que rigen el funcionamiento de nuestro actuador,

$$Q_{fria} = \alpha \cdot I \cdot T_{fria} - \beta \cdot I^2 - \gamma \cdot (T_{amb} - T_{fria}) \quad E 18)$$

y

$$Q_{cal} = \alpha \cdot I \cdot T_{cal} + \beta \cdot I^2 - \gamma \cdot (T_{cal} - T_{amb}) \quad E 19)$$

Calculando a partir de ensayos con un mando constante los coeficientes α, β, γ , que matizan estas ecuaciones.

Sus valores se muestran en la siguiente tabla:

Coeficiente α	0.05
Coeficiente β	1.2
Coeficiente γ	0.5

Para completar el modelo se utilizó un programa que ajustase los valores de unos parámetros, de modo que el resultado obtenido con esos valores, se aproximase con mínimo error al ensayo real. Estos parámetros son los que cuantifican las resistencias y capacidades térmicas que existen en el prototipo. Se incluyen en las ecuaciones:

E 20, E 21 y E 22.

Los valores obtenidos fueron los que siguen:

Rcal	0.23	Cc	257
Rf	0.17	Cf	232
Rcaja	0.46	Ccaja	1780

Este modelo se aproxima al sistema térmico real como se muestra en la Figura 3-1:

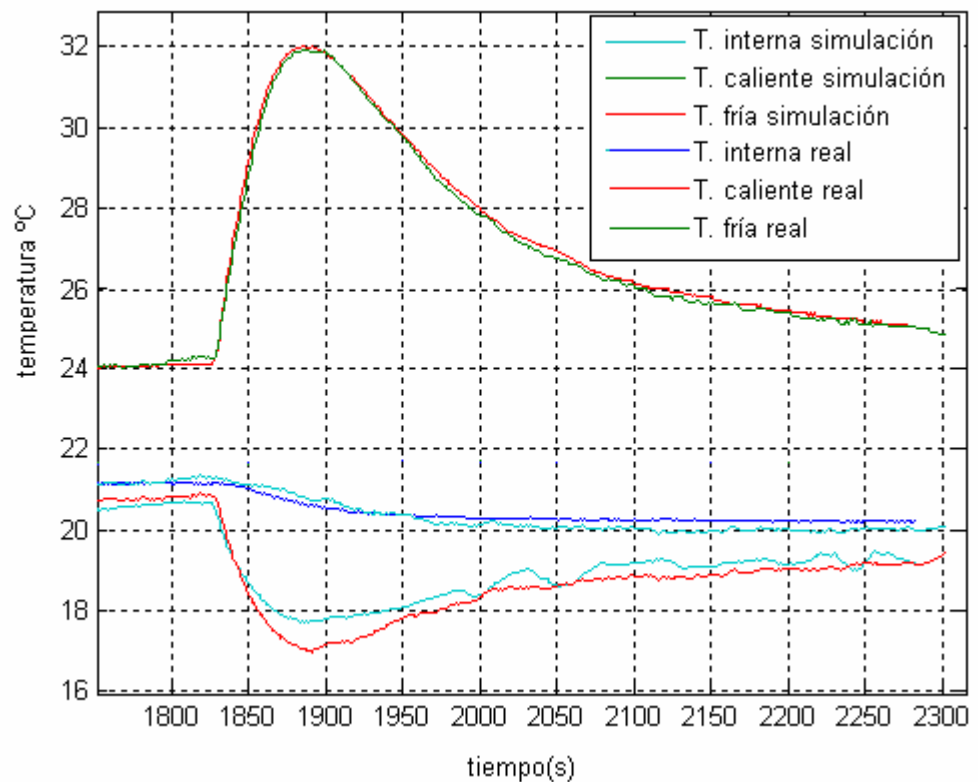


Figura 3-1 Resultado del modelo

El valor que representa la temperatura caliente del módulo, reproduce con fidelidad la temperatura que en la realidad se da.

En lo referente a temperatura interna y fría, el simulador reproduce cualitativamente lo que los ensayos reflejan, aunque los

valores obtenidos dejan ver una cierta dispersión entre simulación y ensayo.

Mención análoga a los resultados obtenidos con anterioridad merece la Figura 3-2:

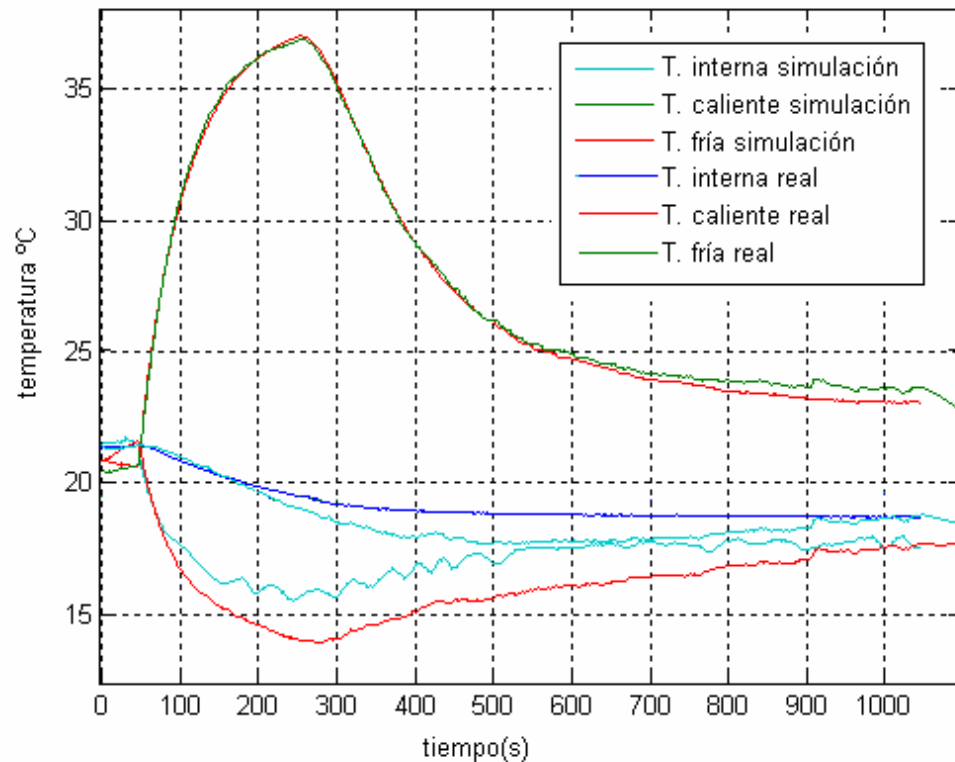


Figura 3-2 Resultado del modelo para otras condiciones

La temperatura caliente se ajusta a la ensayada. Las temperaturas interna y fría pierden fidelidad cuantitativamente, pero siguen reproduciendo cualitativamente lo acontecido en el prototipo de estudio.

También se obtuvo un modelo lineal mediante su ajuste como un modelo 'caja negra'. El orden del sistema se podía conocer por la linealización en un punto de trabajo, del simulador antes mencionado. No obstante se ratificó este modelo, con el ajuste de sus coeficientes a

partir de ensayos que excitaran las frecuencias de interés para nuestro control.

El modelo obtenido se expresa mediante la función de transferencia E 26:

$$P(s) = \frac{-0.00038(s+0.00109)}{(s+0.106)(s+0.0049)(s+0.00026)}$$

Con ganancia estática de valor: $-3 \text{ } ^\circ\text{C/A}$

Sus constantes de tiempo son: 3846, 204 y 9.5 segundos.

Este modelo tiene interés para poder diseñar un control PID clásico, para un rango de funcionamiento en donde el sistema tienda a comportarse de forma lineal. No se espera que sea fiable en las zonas de funcionamiento críticas, donde se tiene una fuerte no linealidad.

A continuación en la Figura 3-3 se muestra la comparación del modelo obtenido y ensayo, frente a un escalón en referencia, en lazo cerrado, con control proporcional.

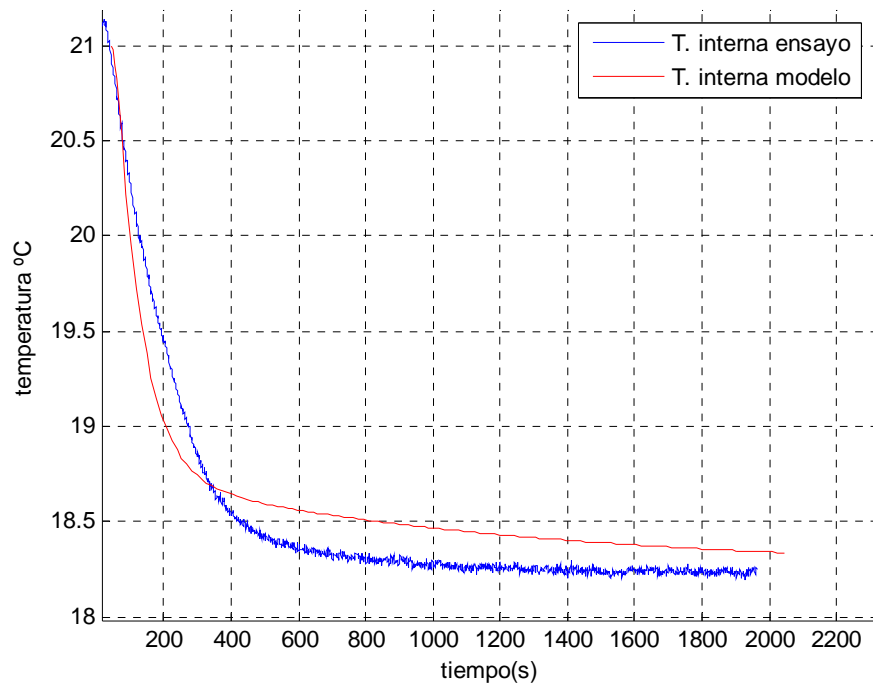


Figura 3-3 Comparación modelo y ensayo

La diferencia entre ambos resultados queda patente.

Se diseñó un control PI a partir del modelo anterior, que tuviese un buen funcionamiento en el rango de temperaturas que el sistema puede alcanzar.

Véase en la Figura 3-4 las temperaturas más relevantes, y la corriente del mando.

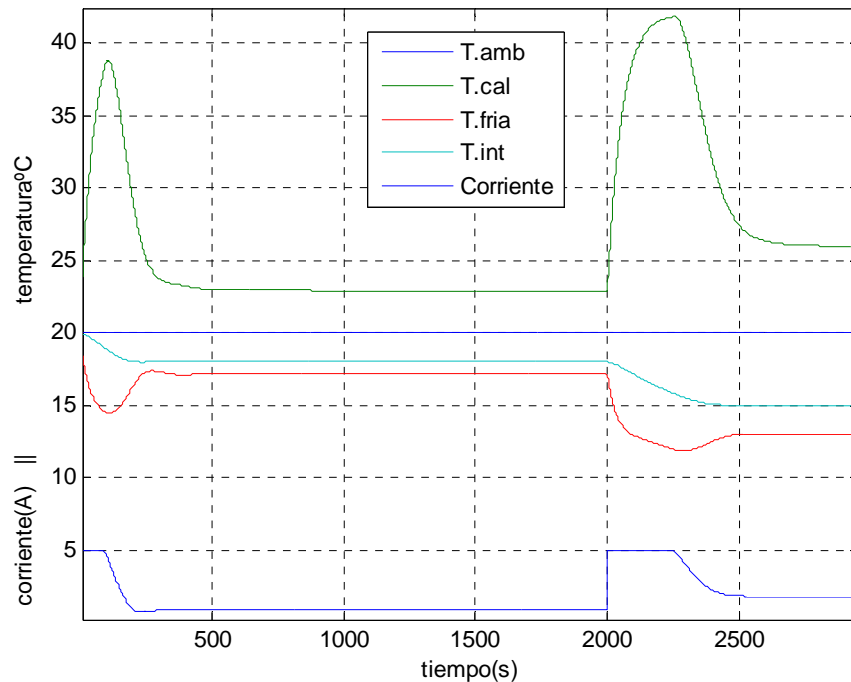


Figura 3-4 Simulación prueba de control

Una vez diseñado el control, se observan las limitaciones que éste posee al aparecen la fuerte no linealidad del mando. Este hecho es patente en la zona próxima al mando máximo, de este modo, se analizan las mejoras que se puedan obtener con una correcta manipulación del mando.

Se realiza el análisis del sistema, atendiendo especialmente a las mejoras posibles que se pueden hallar en el régimen transitorio.

Se obtiene el resultado por simulación, y se comprueba experimentalmente, que la mejora alcanzable con un algoritmo de optimización de la potencia frigorífica transferida es irrelevante.

En la Figura 3-5 se puede ver la escasa mejora que se obtiene al aplicar mando máximo frente a la aplicación del mando que optimice en régimen permanente la cantidad de potencia transferida.

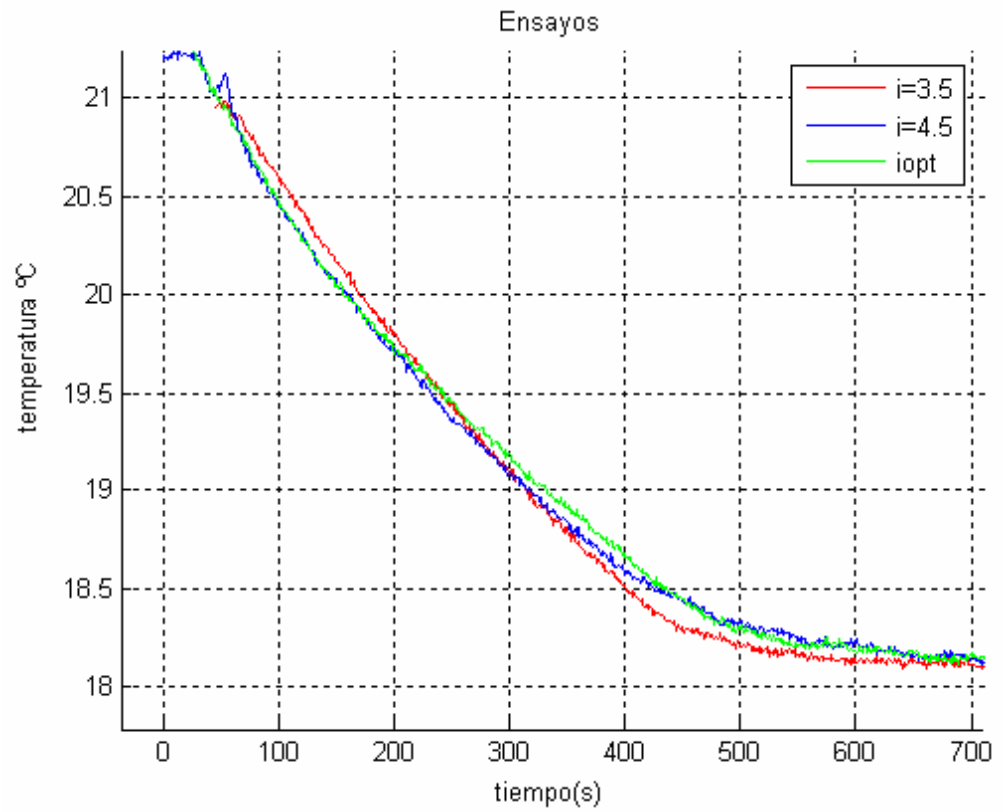


Figura 3-5 Ensayo diferentes mandos

Capítulo 4 CONCLUSIONES

En el desarrollo del presente proyecto se han estudiado las limitaciones que presenta el control convencional PID, sobre el sistema térmico construido.

Una de las ideas a las que se ha llegado con este estudio, es que el punto de trabajo óptimo (corriente con que ha de alimentarse a la célula) cambiará según las características físicas que rodeen el módulo termoeléctrico.

De las distintas formas planteadas en este proyecto, la acción de control que mejora la dinámica del sistema consiste en encontrar la corriente que maximice la potencia frigorífica en régimen permanente, y limitar el mando a ese valor.

Con esa limitación en el mando, el sistema acepta el control PID convencional, sin riesgo de entrar en la zona en la que un mayor mando produce un decremento de la potencia frigorífica que se aporta al sistema.

Se cumple así el objetivo marcado al inicio de este proyecto, comentado en el punto 1.1.3.

Capítulo 5 FUTUROS DESARROLLOS

Se propone la modificación del prototipo de ensayo, o de las características constructivas del módulo termoeléctrico, para obtener una idea de la relación que tiene la corriente óptima que se debe dar al sistema, y los parámetros constructivos (disipadores, ventiladores, etc) que componen el sistema físico en sí.

Se plantea la aplicación de las conclusiones obtenidas en este proyecto, en diferentes prototipos que integren células Peltier.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Watronix Inc. Disponible en internet :
<<http://www.inbthermoelectric.com/temperaturecontrollers.html>>
- [2] Aleixandre Herrero, Manuel. Control de temperatura mediante un dispositivo Peltier para sensor de gases basado en dispositivo SAW. Instituto física aplicada CSIC. Disponible en internet:
<<http://www.ceafiac.es/actividades/jornadas/XXIV/documentos/incon/104.pdf>>
- [3] Grupo de investigación de ingeniería térmica de la Universidad de Navarra. Disponible en internet:
<[http://www.unavarra.es/ets02/Introduccion%20a%20TE\(c\).html](http://www.unavarra.es/ets02/Introduccion%20a%20TE(c).html)>
- [4] Charla personal con Raúl Velasco
- [5] Charla personal con Antonio Arenas
- [6] Vázquez Arias, Jorge. Propuesta tesis. “Estudio de sistemas termoeléctricos mediante el método de los elementos de contorno y técnicas experimentales”. Directores: Linares Hurtado, Jose Ignacio. UPCO.



1.2 CÁLCULOS



CÁLCULOS

ÍNDICE

<i>Cálculos</i>	99
1.2.1 Parámetros de la célula.....	100

1.2.1 PARÁMETROS DE LA CÉLULA

Resueltos en el programa derive:

$$t = \frac{a \cdot i \cdot f - b \cdot i^2 - q}{g}$$

$$5.7 = \frac{a \cdot 4 \cdot (273 + 9.6) - b \cdot 4^2 - 27.5}{g},$$

$$9.4 = \frac{a \cdot 3 \cdot (273 + 10.9) - b \cdot 3^2 - 23.4}{g},$$

$$10.4 = \frac{a \cdot 2 \cdot (273 + 13.9) - b \cdot 2^2 - 18}{g}.$$

$$[a = 0.0486; b = 0.9481; g = 0.481]$$



1.3 ESTUDIO ECONÓMICO



ESTUDIO ECONÓMICO

ÍNDICE

<i>ESTUDIO ECONÓMICO</i>	101
1.3.1 Estudio económico.....	103

1.3.1 ESTUDIO ECONÓMICO

El fin de este proyecto consiste en alcanzar el mayor rendimiento posible del módulo termoeléctrico.

Los controladores del mercado limitan la corriente que fluye por la célula Peltier, en función de las curvas de funcionamiento estándar. Pero en este proyecto hemos estudiado, y comprobado experimentalmente, que el máximo de potencia frigorífica, no está necesariamente regido por esas curvas de funcionamiento. El resultado de no tener este dato en cuenta confluye en dos casos, uno es la limitación de corriente por debajo del máximo de potencia que la célula puede aportar, por tanto, el mal aprovechamiento de la misma. En el otro caso se daría más mando que el necesario para obtener la mayor potencia frigorífica, que, además del desperdicio eléctrico, incrementaría el peso de los efectos negativos Joule y Fourier, y se obtendría menor potencia.

Este resultado se puede extrapolar a las aplicaciones que empleen el efecto Peltier para climatizar entornos, como podría ser el uso del Paramento Transparente Activo, patente de nuestra Universidad. De esta forma se puede asegurar el incremento de rendimiento de la bomba de calor al máximo de su capacidad, en cuanto a alimentación se refiere.



1.4 ANEJOS



ANEJOS

ÍNDICE

Listado de programas 107



1.4.1 LISTADO DE PROGRAMAS

Matlab 7.0.4 (R14)

Labview 7.1 Datalogging & Supervisory