



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Diseño y construcción de un
calibrador de termómetros
para mediciones ambientales**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Eléctrico Electrónico

P R E S E N T A

Brautrelet Godar Acuña Santiago

DIRECTOR DE TESIS

M.C. Miguel Ángel Robles Roldan



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

A Dios, por brindarme vida, conocimiento y guía, cuando me he acercado a él buscándole sinceramente. En realidad por todo.

A mis padres, por su apoyo y paciencia, por brindarme los medios y la libertad para continuar.

A mi director de Tesis: Miguel Ángel Robles Roldan por su apoyo, paciencia y confianza al tomar la decisión de apoyarme en este camino para titularme, por su esfuerzo y dedicación.

Al Centro de Ciencias de la Atmósfera:

Al laboratorio de instrumentación del CCA por el apoyo brindado en el comienzo de este proyecto, a los Ingenieros Manuel García Espinosa y Wilfrido Gutierrez López.

Al Laboratorio de Espectroscopía, en especial al Dr. Michel Grutter de la Mora, por su confianza y apoyos brindados para la conclusión del proyecto. Por la libertad brindada y el buen ambiente de trabajo que pude encontrar en el espacio brindado.

A Wolfgang Stremme, por buscar maneras de apoyar a los alumnos que están en el laboratorio.

Al equipo técnico de la Red universitaria de observatorios atmosféricos (RUOA), en especial a Omar Alejandro López Anton por sus consejos, su apoyo con material, su buena disposición.

Al taller mecánico, en especial al ingeniero Alfredo Rodríguez Manjarrez, por el trabajo y consejos para el montaje del prototipo hecho.

A mis sinodales:

M.A Miguel Eduardo González Cardenas.

Dr. Hoover Mujica Ortega.

Mtra. Gloria Correa Palacios.

M.I. Antonio Salva Calleja.

Y a cada persona que a hecho más fácil o difícil el realizar este proyecto, por que han sido parte de mi aprendizaje y experiencia.

Índice general

1. Introducción	7
1.1. Objetivo	8
1.2. Estructura del trabajo	8
2. Calor y temperatura	9
2.1. Transferencia de calor y equilibrio térmico	10
2.2. Escalas termométricas	11
3. El proceso de calibración	15
3.1. Bloques secos o pozos	16
3.2. Baños líquidos	17
3.3. Fuentes de error	17
3.4. Equipo actuales	19
4. Elementos de calentamiento y enfriamiento	23
4.1. Resistencia de calentamiento	23
4.2. Celda Peltier	25
5. Conceptos de control	27
5.1. Definiciones	27
5.2. Sistemas de control	28
5.3. Acciones básicas de control	30
5.4. Implementación de un control	31
6. Planteamiento del proyecto	35
6.1. Diseño y características propuestas	35
7. Desarrollo del proyecto	41
7.1. Construcción del equipo	41
7.2. Control del elemento de calentamiento	43
7.3. Control del elemento de enfriamiento	53
8. Pruebas de funcionamiento	61
8.1. Pruebas con el prototipo	61
8.1.1. Casos de funcionamiento	62
8.1.2. Con valores optimizados	71
9. Resultados	75
10. Conclusiones	77

11.Anexos	81
Lista de figuras	90
Lista de tablas	91
Bibliografía	94

Capítulo 1

Introducción

En el Centro de Ciencias de la Atmósfera se administra una red nacional de estaciones meteorológicas llamada RUOA y para verificar el correcto funcionamiento de los sensores de temperatura es deseable contar con un calibrador. Dado que esta red es universitaria y el alto costo del calibrador está fuera del presupuesto se propuso el proyecto de diseñar y contruir un calibrador.

Uno de los instrumentos frecuentemente empleados como sensor de temperatura es el termómetro. Este instrumento está relacionado hoy en día con una gran cantidad de procesos en muy diversas áreas.

Uno de los ámbitos en el que son muy empleados los termómetros es el de las mediciones ambientales; ya sea para tomar las precauciones necesarias ante fenómenos meteorológicos, caracterizar el clima de alguna región, o para poder tener una planeación de las actividades como: la producción de alimentos o llevar a cabo ciertas labores que podrían verse afectadas por las condiciones climatológicas como pintar o bien en planeación de actividades de recreación.

Como se puede ver, influye en muchos aspectos de la vida diaria, tanto para actividades cotidianas, como para situaciones extraordinarias, generadas por condiciones climatológicas.

Cuando se realizan mediciones con termómetros, después de un tiempo de ser empleados, o ser sometidos a condiciones extremas o incluso por un mal manejo, llegan a dejar de responder de manera adecuada, generando datos erróneos, pudiendo llegar a tener graves consecuencias. Por ello es de vital importancia mantener los sensores de temperatura en las condiciones adecuadas, y así poder tener confianza en las decisiones y acciones que se llegan a tomar, derivadas de su utilización.

Para evitar mediciones incorrectas se han desarrollado equipos llamados calibradores, que ayudan a conocer el estado de un instrumento de medición. Permitiendo realizar el ajuste necesario a los datos obtenidos a partir de su empleo, o cambiando los parámetros en los sensores para que la información generada sea correcta.

El proceso de calibración requiere que se mantenga una temperatura fija por cierto tiempo, que permita la estabilización de los sensores y así la toma de lecturas, que ayudarán a verificar el estado de los sensores, repitiendo este procedimiento para distintas temperaturas. Por lo tanto el equipo a diseñar debe ser capaz de alcanzar un valor de temperatura y mantenerlo para poder hacer las mediciones correspondientes y así hacer un barrido del rango de temperaturas de trabajo.

Los calibradores que existen son de un costo elevado, emplean algún control para ser estables y muchos son de grandes dimensiones, lo que los hace poco prácticos para transportarlos y para llevar a cabo el proceso de calibración.

1.1. Objetivo

Diseñar y construir un calibrador de termómetros, para rangos ambientales, con un control de temperatura que permita generar temperaturas controladas, de manera que se puedan caracterizar los termómetros.

1.2. Estructura del trabajo

El presente trabajo tiene la siguiente estructura:

Capítulo 1 Se presenta el objetivo y la estructura del trabajo.

Capítulo 2 En este capítulo se mencionan los conceptos básicos relacionados con la temperatura como lo son: el calor, la transferencia de calor, el equilibrio térmico, las escalas de temperatura.

Capítulo 3 Se habla del procedimiento por el que se lleva a cabo la calibración de termómetros, los pozos secos y los baños líquidos que son empleados para la calibración, y se mencionan las fuentes de error que se presentan, así como los equipos que hay actualmente.

Capítulo 4 En este capítulo se presentan los elementos de calentamiento (resistencias) y enfriamiento (celda peltier).

Capítulo 5 Aquí revisamos algunos conceptos de control.

Capítulo 6 Se definen el diseño y características propuestas del proyecto.

Capítulo 7 Se muestra el desarrollo del proyecto, así como el control de los elementos de calentamiento y enfriamiento y, lo referente a la construcción del equipo.

Capítulo 8 Aquí se encuentran las pruebas de funcionamiento del equipo.

Capítulo 9 Se presentan los resultados obtenidos de la implementación y funcionamiento del equipo.

Capítulo 10 Este capítulo da a conocer las conclusiones del desarrollo del proyecto.

Capítulo 2

Calor y temperatura

Antes de entrar con los conceptos de la calibración, se comenzará revisando algunos conceptos básicos, relacionados con los termómetros. Al hablar de calibradores para termómetros, se debe conocer lo que es la temperatura, y lo que es el calor; para poder entender mejor estos conceptos se debe empezar por entender qué es la energía interna.

Energía interna: todo cuerpo posee átomos o moléculas que se encuentran en movimiento. La energía cinética de las partículas constituyen la energía interna del cuerpo.

La energía se puede transferir de un cuerpo o sistema a otro por el movimiento de moléculas, átomos y partículas. Cuando esto ocurre y la energía se transfiere entre cuerpos a diferente temperatura se le conoce como calor.

Por lo tanto el calor es energía interna en tránsito. Cuando a un cuerpo se le suministra calor su energía interna aumenta, ya que se le está transfiriendo energía, esto provoca que su temperatura se eleve. Cuando se le extrae calor pasa lo contrario, se le extrae energía, y se produce la disminución de su temperatura. Entonces el calor es un proceso de transferencia de energía, de un cuerpo con mayor energía a otro con un nivel menor de energía, por lo que el calor no se puede almacenar. En el Sistema Internacional (SI) el calor se mide en Joules (es el trabajo realizado por una fuerza de un Newton, para desplazar un metro una masa de un kilogramo, y tiene su equivalente de trabajo mecánico en calor, por un experimento de Joule, que encuentra el trabajo necesario para aumentar la temperatura de una sustancia en 1°C), aunque también se emplea para su medida la caloría (calor necesario para aumentar 1°C a 1 atm la temperatura de un gramo de agua destilada).

Como se mencionó, el calor en el SI se mide en Joule, y su equivalencia con la unidad de medida de la caloría, es:

$$1\text{J} = 0.24 \text{ cal}, 1\text{cal}=4.184\text{J}$$

Cuando se habla de calor, la energía que se transfiere se puede diferenciar en:

Energía sensible (calor sensible), produce cambios de temperatura.

Energía latente (calor latente), no presenta un cambio de temperatura, y es la necesaria para producir un cambio de estado (o de fase) en una sustancia (energía que rompe los enlaces que le mantienen en un estado de agregación). Es diferente para cada sustancia.

Es importante tener claro que el calor no es lo mismo que la temperatura, la temperatura es la medida de la energía cinética promedio de las partículas (en ciertos límites puede sentirse por medio del tacto). Mientras que el calor es la energía total del movimiento molecular, la temperatura es la medida de dicha energía. Si tenemos dos cantidades diferentes de una misma sustancia a una misma temperatura,

en donde tengamos mayor cantidad de sustancia se poseerá una mayor energía en forma de calor (figura 2.1).

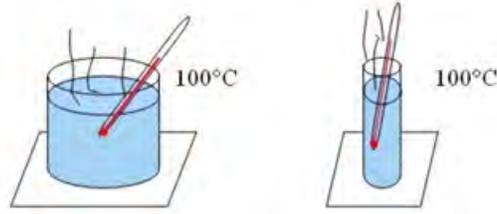


Figura 2.1. Diferencia entre calor y temperatura

Las moléculas de un cuerpo se mueven (vibran, giran, se desplazan), debido a ello tienen cierto nivel de energía cinética, como parte de su energía interna, y la velocidad promedio de las moléculas es proporcional a la temperatura, que es lo que podemos sentir.

2.1. Transferencia de calor y equilibrio térmico

Transferencia de calor.

El calor se transfiere entre dos cuerpos o sistemas si tienen diferente temperatura, la temperatura indica la dirección del flujo de energía interna, desde el de mayor temperatura al de menor temperatura independientemente de su energía interna individual. Por lo que si se vierte una sustancia caliente en un recipiente frío, la sustancia se enfría y el recipiente se calienta.

La transferencia de calor puede ocurrir de las siguientes maneras:

- Conducción (depende de un equilibrio térmico) ocurre por contacto directo y se da en sólidos (figura 2.2).
- Convección (depende del equilibrio térmico y del transporte mecánico de masa) es la transferencia de energía por movimiento molecular, es decir, por conducción y transferencia de energía por movimiento de las partes del fluido, ya que al calentarse se hace menos densa la parte más caliente, y toma su lugar una parte más densa, que es más fría.
- Radiación (depende de un equilibrio térmico) todos los cuerpos emiten radiación electromagnética, cuya intensidad depende de su temperatura y de la longitud de onda. Todos los cuerpos absorben radiación y reflejan parte de ella.

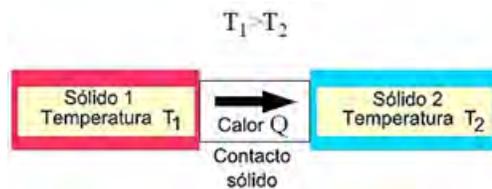


Figura 2.2. Transferencia de calor por conducción

El calor es una magnitud con dirección, por lo que se le asigna un signo, si se cede se considera negativo, si es absorbido se considera positivo.

Equilibrio térmico.

Otro concepto importante en cuestión de calor y temperatura es el denominado equilibrio térmico, cuando dos cuerpos con temperaturas diferentes se ponen en contacto, el cuerpo más caliente cede

calor al más frío, este proceso continúa hasta que ambos cuerpos tienen la misma temperatura, lo que cesa la transferencia de energía (calor). Cuando ocurre esto se dice que se tiene el equilibrio térmico.

La termodinámica por medio de su primera ley (ley de la conservación de la energía), permite conocer el calor transferido entre el estado antes del equilibrio térmico hasta una vez alcanzado, si la única variación se ha debido a la diferencia de temperatura.

Ya que dice que la energía interna en un sistema es igual a la suma de la energía transferida en forma de calor y la energía transferida en forma de trabajo.

$$\Delta E = Q + W$$

Si hay una variación en su energía, y no hay trabajo realizado que provoque esa variación, y es solo por energía en forma de calor, entonces.

$$\Delta E = Q$$

La variación de su energía interna, se verá reflejada en un cambio de su temperatura (en caso de ser calor latente), y con la variación de la temperatura se puede conocer este cambio de energía interna. Esto es posible mediante la expresión.

$$Q = mC_e\Delta t$$

dónde Q: es el calor, m: la masa de la sustancia, C_e : es la capacidad térmica específica de la sustancia y Δt es el cambio en la temperatura.

2.2. Escalas termométricas

La transferencia de calor produce efectos, que se aprovechan para poder medir la temperatura, el instrumento que se emplea para medirla se llama termómetro, muchos de estos basan su funcionamiento, en que la materia generalmente se dilata cuando se calienta, y se contrae cuando se enfría; la cantidad relativa de cambio es diferente para sustancias distintas.

Ya que para saber que tan frío o caliente está algo, no basta con la sensación térmica. Para tener una mejor apreciación, se le asigna un valor numérico asociado a esa condición térmica, de ahí el uso de las escalas de temperatura o escalas termométricas.

Las escalas de temperatura (termométricas): sirven para expresar numéricamente la temperatura de un cuerpo. Las escalas para medir la temperatura son: Celsius, Kelvin, Fahrenheit.

En la escala Celsius (centígrada) se asigna el cero a la congelación del agua (punto de fusión), y el 100 a la ebullición del agua, el intervalo se divide en 100 partes iguales, cada una es un grado (1°C). Esta escala fue establecida por Ander Celsius en 1742.

En la escala Kelvin se asigna el cero a la temperatura a la que las partículas ya no se mueven, (la más baja posible son -273.15°C , que predice la termodinámica, por lo que se le denomina absoluta). Esta fue establecida en 1848 basándose en el grado Celsius. El punto de fusión del agua toma el valor de 273 y el de ebullición el de 373, dividiendo el intervalo en 100 partes, la unidad es Kelvin (K).

La escala Fahrenheit (anglosajona), asigna el 32 al punto de fusión del agua y el 212 para su ebullición, el intervalo se divide en 180 partes. Fue propuesta por Gabriel Daniel Fahrenheit en 1724. El punto mínimo de su escala, es la temperatura de una mezcla de cloruro de amonio, agua y hielo asignándole el 0°F , otro punto lo obtuvo con la mezcla de agua y hielo a 32°F , y un tercer punto fue la temperatura de su cuerpo a 96°F . En la figura 2.3 se muestra una comparación de las escalas. Existieron otras

escalas como la escala Romer (propuesta por el astrónomo Danes Ole Christensen Romer), la escala Rankine (creada por William Rankine en 1859), escala del grado Réaumur (en honor a René Antoine Ferchault de Reaumur).

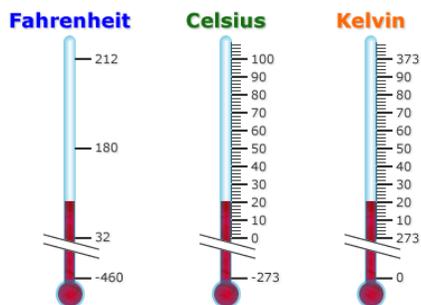


Figura 2.3. Principales escalas termométricas usadas actualmente.

Al enfocarse este trabajo en la calibración de termómetros de mediciones ambientales, en la tabla: 2.1 se reúnen algunas características de los termómetros para mediciones ambientales. Los datos fueron tomados de las hojas de especificaciones de los modelos, o de las páginas de los proveedores de estos termómetros.

En la tabla 2.1 se observa que los rangos de temperatura van desde los -80°C hasta los 180°C , pero la mayoría están entre los -40°C y los 60°C . La precisión que manejan es de $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ o $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$, hasta los $\pm 0.4^{\circ}\text{C}$ o $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ en la mayoría de los casos. La salida que presentan es una tensión o una corriente, y en algunos casos tienen una salida digital. La mayoría son RTD's.

Tabla 2.1. Termómetros para mediciones ambientales, de Campbell, Vaisala y Metone

Modelo	Tipo	Salida	Diámetro [cm]	Largo [cm]	Rango [$^{\circ}\text{C}$]	Precisión
107 (Betatherm 100K6A11A) 	Termistor	•	0.762	10.4	-35 a 50	± 0.2
108 (Betatherm 100K6A11A)	Termistor	•	0.762	10.4	-5 a 95	± 0.2
109 (Betatherm 10K3A1iA)	Termistor	0 a 2.2 [V]	0.762	10.4	-50 a 70	•
43347 (PT1000) 	RTD	•	0.478	6.12	-50 a 50	± 0.3
EE181 (PT1000) 	RTD	0a 1[V]	2.1	16	-40 a 60	± 0.2

CS215-L (SHT75) 	Digital	SDI-12	1.2	18	-40 a 70	± 0.3 a 25 ± 0.4 (5 a 40) ± 0.9 (-40 a 70)
HMP60 	RTD PT1000	•	1.2	7.1	-40 a 60	± 0.6
HMP155a 	RTD PT100	•	1.2	•	-80 a 60	$\pm(0.226-0.0028 \times \text{temp})$ (-80 a 20) $\pm(0.055+0.0057 \times \text{temp})$ (20 a 60)
HC2S3 	•	± 3 [mV]	1.5	8.5	-40 a 100	± 0.1
CS230 	•	SDI-12	2.13	45	-55 a 85	± 0.2 (-40 a 85)
105E-L 	Termopar	60 micro V/°C	0.8	•	-55 a 125	•
CS225 	Digital	SDI-12	2.22	•	-55 a 85	± 0.2 (-40 a 85)
108-LC 	Termistor	•	0.762	10.4	-5 a 95	± 0.2 (0 a 70)
HMP4 	•	RS-485	1.2, 2.5	4.1	-70 a 180	± 0.1
HMP5	•	RS-485	1.2, 1.35, 2.5	4.1	-70 a 180	± 0.1
HMP7	•	RS-485	1.2	3.75	-70 a 180	± 0.1
HMP8	•	RS-485	1.2, 1.35, 2.5	4.1	-70 a 180	± 0.1
HMP110 	RTD PT1000	•	1.2	7.1	-40 a 80	± 0.2 , ± 0.4
HMP113 	RTD PT1000	•	1.2	2.45	-40 a 60	± 0.2 , ± 0.4
083E 	Termistor	•	1.905	19.05	-50 a 50	± 0.1

Capítulo 3

El proceso de calibración

Como se mencionó en la introducción, la calibración es un proceso importante para verificar el correcto funcionamiento de los termómetros, por lo que ahora hablaremos acerca de la calibración.



Figura 3.1. Procesos de calibración de termómetros, en (a) se tiene una calibración con un fenómeno físico como referencia y en (b) una calibración por medio de un equipo para calibración

Calibración es el procedimiento que bajo condiciones controladas, establece la relación entre los valores de un instrumento con los valores de otro instrumento patrón.

El procedimiento de calibrar se realiza para poder tener confianza en el instrumento que se emplea y del trabajo elaborado a partir de los datos obtenidos. Aporta fiabilidad y seguridad a los procesos en que se emplea el instrumento, verificando así que las mediciones tengan validez y este en buen estado.

Para llevar a cabo una calibración se emplean un instrumento de referencia (instrumento patrón), el instrumento a calibrar, indicadores para ambos instrumentos, y una fuente que genera la magnitud a medir (en este caso una fuente de temperatura). El uso del instrumento patrón, podría omitirse, si se tiene alguna fuente que proporcione una referencia fija conocida (como el punto de congelación).

En el caso de una calibración de termómetros, se debe considerar el rango de temperatura del instrumento a calibrar, y el volumen de calibración requerido por el instrumento. El instrumento a calibrar y el instrumento patrón son termómetros, los cuales pueden ser de diferente tipo, normalmente se emplea un PTR o RTD de platino (PT100) como instrumento patrón, que es un termómetro basado en la variación de la resistencia, como respuesta a la variación de la temperatura.

Los indicadores varían de acuerdo al tipo de termómetro empleado, éstos pueden ser puentes termométricos que miden la resistencia o el voltaje, cuyos valores dependerán de la temperatura.

Para las fuentes de la magnitud a medir (en nuestro caso la temperatura), suele ser una resistencia (como elemento de calentamiento), y una celda Peltier (como elemento de enfriamiento). Estos elementos

se encargaran de proveer un ambiente de temperatura estable y uniforme.

Los equipos de calibración que emplean el procedimiento de comparación (comparan las medidas de un termómetro patrón con las del termómetro a calibrar) son los baños líquidos, los bloques secos, las células de punto fijo y la cámara de congelación, los últimos dos proveen una referencia que servirá para verificar el funcionamiento de los termómetros.

Al momento de realizar la calibración, se deben tomar varias lecturas a una misma temperatura, tanto del termómetro patrón como del instrumento a calibrar. Esto con la finalidad de poder disminuir los errores que se puedan cometer, al momento de realizar las mediciones. Se hace esto en varias temperaturas, previamente establecidas y con una separación, que se recomienda sea equidistante entre temperatura y temperatura, cubriendo el intervalo en el que se desea calibrar. Al completar todas las lecturas, se calculan las funciones de la relación lineal de ajuste.

Se deben calcular las incertidumbres para saber si el instrumento está dentro de las especificaciones del fabricante. Esto se puede hacer mediante un método estadístico que se basa en el cálculo de la desviación estándar.

Cualquier laboratorio que realiza calibraciones, debe tener y aplicar un procedimiento para estimar la incertidumbre de medición.

- Se debe elaborar un modelo de medición.
- Identificar las fuentes de incertidumbre.
- Evaluar la incertidumbre estándar.
- Determinar la incertidumbre estándar combinada.
- Determinar la incertidumbre expandida (conociendo la incertidumbre de cada uno de los elementos involucrados, incluyendo el valor de incertidumbre del instrumento patrón).
- Y expresar los resultados de manera correcta (la medición con la misma cantidad de decimales que la incertidumbre).

3.1. Bloques secos o pozos

Entre los equipos para llevar a acabo las calibraciones, los del tipo de bloque seco (figura 3.2) son unos de los más comunes, sus características generales son:

Tienen una exactitud moderada, cuentan con huecos para introducir los termómetros, tienen una profundidad de inmersión fija, son secos, limpios y cuentan con un sensor de referencia interno, además de servir en un intervalo amplio de temperatura.



Figura 3.2. Calibradores de bloque

Los hay de tres tipos:

Bloque calentado o enfriado mediante módulos Peltier (en los módulos Peltier al hacer pasar una corriente directa en un sentido, el calor fluye de un lado al otro del módulo).

Bomba de calor absorben el calor del aire exterior y lo lleva al interior, funcionan mediante un refrigerante, ya que se basan en un ciclo de refrigeración reversible.

Bloque metálico, calentados eléctricamente, funcionan para temperaturas superiores a la ambiente. Son hornos pequeños, en que las paredes son de cerámica, en el centro del horno va un bloque metálico, el cual es calentado con un elemento eléctrico, tienen un control preciso de temperatura y un termómetro patrón interno. Pueden llegar a contar con una funda intercambiable para adaptar los termómetros. En su diseño emplean como volumen de calibración tubos o esferas concéntricas.

3.2. Baños líquidos

Estos se emplean para calibraciones de alta exactitud, se pueden adaptar a distintos diámetros de termómetros y emplearse para termómetros diseñados con formas pocos comunes.

Contienen un líquido dentro de un recipiente aislado térmicamente, en cuya pared tiene un termómetro de referencia para el control. El líquido seleccionado da un intervalo de temperatura en el que se podrá calibrar, ya que el líquido puede llegar a cambiar de fase o quemarse. Su principal ventaja es que tienen mayor exactitud.

En la tabla 3.1 se muestran los calibradores tipo baño.



Figura 3.3. Calibrador de baño

3.3. Fuentes de error

Al realizar la calibración, como todo proceso, no está exento de que se puedan presentar errores.

Aun que existen recomendaciones específicas de acuerdo al tipo de termómetro a calibrar, hay cuidados a tener de manera general como: que ambos termómetros (patrón y el que se calibrará), estén lo más cerca uno del otro y considerar si el instrumento presenta histéresis. Estos cuidados y recomendaciones, son para realizar la calibración de manera adecuada. Aun así existen otras razones por las que se pueden tener errores, como en todo proceso de medición.

Las fuentes de error que pueden existir son las que se muestran en la tabla 3.2

Tipo	Imagen
<p>Baño de líquido en movimiento: es un recipiente con líquido en agitación, que por su diseño puede ser de tubos concéntricos o de tubos paralelos.</p>	
<p>Baño de sales: es una mezcla de nitratos de sodio y potasio.</p>	
<p>Combinación de los baños líquidos y los pozos secos: cuentan con bloques desmontables para funcionar como uno u otro tipo de calibrador</p>	

Tabla 3.1. Calibradores tipo baño

La incertidumbre.

Hay que tener en cuenta que además de fuentes de error como las mencionadas, existe también la incertidumbre que a diferencia del error no se corrige, pero especifica un rango, es decir, que tanta variación puedo tener y aun considerar mi lectura como válida.

La incertidumbre puede deberse a varias fuentes como: la incertidumbre propia del termómetro, la presión, la carga hidrostática, entre otras. El procedimiento para obtener la incertidumbre total, es identificar las fuentes y sus valores.

Las fuentes de incertidumbre en el caso de un bloque seco son: las variaciones de temperatura en el bloque, las asociadas al elemento patrón que se emplea, las propias del instrumento a calibrar.

Existe la European Asociation of National Metrology Institutes (EURAMET) como comité técnico de termometría, que ha desarrollado una guía de calibración para calibradores de bloque. Esta es la EURAMET cg-13 que establece procedimientos para el cálculo de la incertidumbre de un bloque seco.

Algunas cosas útiles que se pueden hacer para reducir las incertidumbres son: dar tiempo para estabilización, usar más de un estándar, tomar suficientes lecturas, intercambiar las posiciones del estándar con el termómetro de trabajo y tomar el promedio de los valores, darles la misma profundidad de inmersión. Después de una rutina de calibración repetir las medidas el día siguiente. Cuantas más lecturas se tengan más se reduce la incertidumbre de los datos.

Un aspecto importante que siempre se debe tener presente es que, las buenas mediciones dependen de: como las realice el personal, las características propias del equipo, las condiciones del medio ambiente en que se realizan y el procedimiento que se siga al llevarlas a cabo. Por lo que es importante que tanto la parte que sea propia del instrumento, como la que corresponda al personal y de las condiciones en que sea empleado, sean las adecuadas para el buen funcionamiento del instrumento.

Fuente	Motivo
Pérdidas de calor en el vástago	No se tiene una inmersión suficiente del termómetro, ésto se puede eliminar cuando al aumentar la inmersión ya no hay variación en la temperatura. Esto es para los calibradores que son de tipo baño.
Por la fuente de fuerza electromotriz	Debido a presentarse un gradiente de temperatura en las uniones, se da con instrumentos que utilizan CD. Se puede eliminar empleando instrumentos de AC o de CD conmutada como corriente de medición.
Error por constante de tiempo	Cada termómetro responde a diferente velocidad, habrá que dar el tiempo necesario para que el termómetro se haya estabilizado.
Error por la resistencia del cable	La resistencia de los cables de conexión llegan a introducir errores, ya que todo el circuito llega a ser parte del termómetro. En caso de ser el tipo de termómetro que requiera estas conexiones, se recomienda una conexión de 4 hilos, que emplea un generador de corriente constante, lo que hace la resistencia de los cables irrelevante. El circuito de medida de voltaje tiene una impedancia de entrada que se considera infinita (con lo que no hay flujo de corriente ni caída de voltaje).
Error por autocalentamiento	La corriente que pasa por un termómetro de resistencia produce una disipación de potencia. Una forma de hacer un ajuste es reduciendo la corriente a la mitad y con ello calcular el ajuste.
Error por capacidad térmica	La masa del sensor debe ser pequeña comparada con la del baño de calibración.
Errores debidos al gradiente de temperatura a lo largo del bloque	Axial y radial para baños, vertical y horizontal para bloques. Esta ultima se puede corregir intercambiado los sensores (el patrón y el que se va a calibrar).

Tabla 3.2. Fuentes de error

3.4. Equipo actuales

Actualmente hay diversidad de equipos que pueden realizar la calibración de termómetros, hay equipos que trabajan en ciertos rangos de temperaturas, o que están diseñados para cierto tipos de termómetros.

Hay equipos que incluso tienen la posibilidad de contar con módulos intercambiables, que les permiten funcionar como un tipo de bloque seco o como baño líquido, hay otros equipos llamados de célula de punto fijo, o para calibrar termómetros infrarrojos. El desarrollo en calibradores es diverso, pero siendo en principios y funcionamiento muy similares.

Algunos de los equipos son:

Cámaras de punto de congelación

Produce un valor de 0°C muy preciso y estable. Puede ser utilizada para la calibración de sondas de temperatura, pero también se utilizan comúnmente en la simulación de una señal de termopar, para calibración y verificación de instrumentos que leen termopares (figura 3.4).

Bloque seco



Figura 3.4. Cámara de punto de Congelación Omega

Es un bloque metálico que es calentado o enfriado, cuenta con orificios en los que se introducen los termómetros, con ello se mide la temperatura a la que se tiene el bloque (figura 3.5). El de tipo hornos de calibración, son calentados eléctricamente, algunos en su diseño emplean tubos o esferas concéntricas como volumen de calibración.



Figura 3.5. Calibradores de bloque seco

Baño líquido

Tiene un líquido que es calentado, y los termómetros se encuentran inmersos en el líquido, midiendo la temperatura (figura 3.6).



Figura 3.6. Calibrador de baño líquido

Célula de punto fijo.

Emplea celdas que en su interior contienen metales con alta pureza. El metal que contienen se funde a una temperatura mayor a 30°C en hornos especiales, después este metal se solidifica poco a poco, durante el cambio de fase mantiene su temperatura, la cual depende de su pureza y del tipo de metal, esta es la referencia de temperatura que deberán leer los termómetros a calibrar (figura 3.7).



Figura 3.7. Células de punto fijo

Calibradores de temperatura portátiles

Representan una combinación de los baños líquidos y los pozos secos, ya que cuentan con bloques

desmontables para funcionar como uno u otro tipo de calibrador, algunos cuentan con dispositivos para calibrar por medio de células de punto fijo.

Simuladores

Simulan el efecto de la temperatura, por medio de un valor eléctrico (figura 3.8).



Figura 3.8. Simuladores

Se presentan algunos de los equipos que existen en la tabla 3.3.

Equipo	Temperatura de referencia	Precisión	Estabilidad	Tiempo de estabilidad	Precio MXN
Cámara de punto de congelación TRCIII-A 	0°C	±0,1°C	±0,03°C	Dos hrs. tras el encendido	58,300
Bloque seco caliente/frío CL1500 	-5 a 125 °C	±0,8°C	±0,25°C	5min	59,725
Bloque seco CL-780A-230 		±0,05°C	±0,4°C	10min	93,850
Simulador analizador CL 310 	-200 a 2500°C para termopar -200 a 1300 para RTD	varia según tipo termopar o RTD			89,585

Tabla 3.3. Algunos calibradores actuales

En la tabla 3.3 se pueden observar los precios, que en el caso de los calibradores de bloque seco cuestan

alrededor de los \$53,000 a los \$93,850, como una referencia, pero los hay mucho más caros. Cabe notar que las características de estabilidad para el más caro, están en el orden de las centésimas de grado, mientras que en el más barato son del orden de un cuarto de °C, y en la precisión entre el 0.3 y el 0.8 de °C. y trabaja en un rango de los -5°C a los 125°C. Mientras que su tiempo de estabilidad esta entre los 5 y 10 min.

Capítulo 4

Elementos de calentamiento y enfriamiento

Para llevar a cabo su funcionamiento, el calibrador, tiene que contar con alguna manera de aumentar la temperatura o disminuirla, lo que se encarga de realizar esta tarea es un elemento de calentamiento, para aumentar la temperatura, y un elemento de enfriamiento para hacer disminuir la temperatura.

Normalmente se emplean una resistencia para el calentamiento y una celda peltier para el enfriamiento.

Hay una variedad de resistencias y diseños de acuerdo a las necesidades, lo mismo ocurre para las celdas peltier.

Se comenzara por hablar de las resistencias y en seguida se procederá a hablar de las celdas peltier.

4.1. Resistencia de calentamiento

Son elementos de calentamiento, que funcionan a base de electricidad, son formadas por materiales conductores de electricidad, que presentan una cierta resistencia eléctrica (oposición al flujo de corriente eléctrica), esta oposición genera calentamiento del elemento resistivo (efecto conocido como efecto Joule).

El efecto joule se puede conocer mediante

$$Q = RI^2$$

Esta expresión nos permite saber el calor Q producido en la resistencia R , al hacer circular una corriente I .

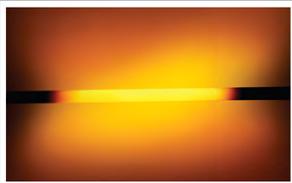
Así al hacer circular una corriente por el elemento resistivo se calienta y puede ser empleado como un elemento de transmisión de calor.

De estos elementos de calentamiento, hay de los que pueden usarse en inmersión; es decir, en contacto directo con fluidos como: agua, aceite, materiales viscosos, disoluciones ácidas o básicas; y aquellos que no son diseñados para el contacto con los fluidos.

Son fabricados de acuerdo a las necesidades, provocando que el material, la forma, el voltaje de alimentación y la potencia cambien por la temperatura que se desea alcanzar, y el tiempo en que se desea alcanzar dicha temperatura, así como el tipo de conexión.

Algunos tipos de resistencias son los mostrados en la tabla 4.1:

Tabla 4.1. Tabla de resistencias de calentamiento

<p>Tipo mufla: tienen un mínimo consumo eléctrico, pueden alcanzar temperaturas de hasta 1700 °C.</p>	
<p>Tubulares: son las más utilizadas, por ser elaboradas con acero inoxidable, tienen gran resistencia mecánica y a la corrosión. Pueden tener formas variadas y diámetros.</p>	
<p>De carburo de silicio: elaboradas con elementos no metálicos, pueden generar de 600 a 1600 °C.</p> <p>- Varillas alfa de tres piezas: tienen extremos fríos, lo que concentra el calor en el medio, y alcanza hasta 1550 °C.</p> <p>- De espiral: son tubos con paredes delgadas de carburo de silicio.</p>	  
<p>De silicon: son resistentes a la humedad y a productos químicos, pueden ser unidas fácilmente a otras partes del sistema en donde se usen.</p>	
<p>Infrarrojas: producen longitudes de onda larga, con infrarrojos cerámicos, permitiendo alcanzar temperaturas de 250 y 750 °C. Los emisores de infrarrojo se fabrican con diferentes longitudes de onda, la frecuencia depende de la absorción del material, velocidad de proceso, tipo de aplicación y otras necesidades específicas.</p>	
<p>De cuarzo: son tubos de cuarzo infrarrojos, pueden tener una respuesta muy rápida (algunos elementos de solo 30 segundos), alcanzando temperaturas de 500 a 1000 °C.</p>	

<p>Tipo tira mica: elaboradas en acero inoxidable, permiten calentar uniformemente superficies planas.</p> <p>- De banda mica: para superficies cilíndricas</p>	
<p>De banda cerámica: formadas por un elemento cerámico, pueden alcanzar hasta 700 °C.</p>	
<p>Resistencias autorregulante PTC: estas están formadas por cerámicos, que son fabricados con una aleación de un hilo resistivo eléctrico, el cual se funde al cuerpo cerámico. Produce emisiones en una longitud de 3 a 7 micrones, esta es de radiación.</p>	
<p>Tipo cartucho: son elaboradas en tubos de acero inoxidable, con hilos de níquel-cromo.</p>	

4.2. Celda Peltier

Como elemento de enfriamiento se emplea la celda Peltier para hacer bajar la temperatura del bloque. Este dispositivo basa su funcionamiento en lo que se conoce como efecto termoeléctrico, que es la conversión directa de una diferencia de temperatura en un voltaje o lo inverso. Un dispositivo termoeléctrico genera un voltaje debido a una diferencia de temperatura, o crea una diferencia de temperatura al aplicar un voltaje.

El efecto termoeléctrico de funcionamiento de las celdas Peltier, fue descubierto por el físico francés Peltier Jean Charles. A., este efecto se refiere a que al hacer pasar una corriente de CD a través de un circuito de dos conductores diferentes, una de las uniones absorbe calor mientras que la otra cede calor. Esto se debe a que cuando los electrones fluyen de una región de alta densidad a una de baja densidad, se expanden y se enfría la región, y los conductores tratan de retornar al equilibrio de electrones que existía antes de aplicar la corriente, absorbiendo energía a una de las uniones. Así la circulación de corriente en un sentido produce calentamiento y en el sentido contrario produce enfriamiento, en una misma región. Para las celdas Peltier, esas regiones de que se habla, serían las caras de la celda (figura 4.1).

La celda Peltier está formada por dos semiconductores, principalmente de telurio de bismuto, el cual es dopado para crear materiales tipo N y tipo P, estos se unen por medio de un conductor de cobre; para hacerla funcionar se aplica un voltaje positivo a la terminal N, y un voltaje negativo es aplicado a la terminal P. Con esto se genera un calentamiento en una cara y un enfriamiento en la otra.

Algo poco deseable de las celdas es que tienen un alto consumo eléctrico, además pueden llegar a producir condensación y hielo en ciertas condiciones.

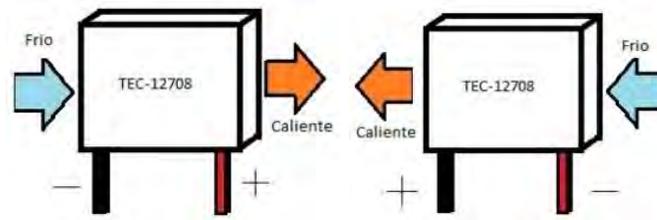


Figura 4.1. Polarización de la celda Peltier

Se emplean para su construcción el telurio de bismuto y el seleniuro de antimonio, por ser buenos conductores eléctricos y malos conductores del calor. Permitiendo que los efectos termoelectricos sean más evidentes.

Las características principales de las celdas es la potencia que son capaces de disipar, que tanta corriente demandan y el voltaje al que trabajan.

En cuanto a forma y diseño, todas son muy similares, tienen una forma cuadrada y de un espesor delgado, físicamente son de dimensiones pequeñas (de 1.5 a 6.2 [cm] de lado), aunque para necesidades particulares existen de dimensiones mayores o menores.



Figura 4.2. Celdas Peltier

Además existen otras celdas cuya apariencia física puede ser circular, e incluso tener perforaciones para poder fijar la o para evitar algún contacto como la mostrada en la figura 4.2.

Capítulo 5

Conceptos de control

Para conseguir que nuestro equipo, genere las condiciones para llevar a cabo la calibración, por medio de los elementos de enfriamiento y calentamiento, se requiere de un controlador, que lleve al equipo a la temperatura deseada y la mantenga, para poder realizar las mediciones.

Para ello es importante el conocer un poco acerca de los conceptos de control, comenzando por algunas definiciones importantes, para entender un poco mejor el control y lo que realiza.

5.1. Definiciones

El control puede ser entendido, como hacer que algo siga un comportamiento deseado por ejemplo: mantener un valor, o siguiendo los cambios que tenga dicho valor, siguiendo alguna ruta, seguir cierto comportamiento en las variables físicas de algún aparato o máquina.

Ejemplos de control los vemos constantemente, como en los semáforos para mantener la circulación de los vehículos, o en los mismos vehículos con controles de temperatura y controles de velocidad.

Para cumplir con estas tareas, los controles se valen de sensores, que permiten conocer el estado actual de aquello que deseamos controlar, estos son parte de los sistemas de control.

Pero, ¿qué es un sistema?, un sistema es un conjunto de elementos que interactúan para llevar a cabo un fin, éste puede ser un sistema formado por elementos mecánicos y componentes electrónicos, o puede ser otro tipo de sistemas como: político, biológico, entre otros.

Para saber en qué condiciones se encuentra el sistema se determinan cuáles son los valores de sus características que nos interesan, para ello se emplean sensores.

El sensor o elemento de medición, es un dispositivo que convierte la variable de salida (la característica que se mide del sistema) en otra variable manejable, tal como un desplazamiento, una presión, o una tensión eléctrica, que pueda usarse para comparar la salida con la señal de entrada, que es la señal de referencia que indica a que deseo que llegue el sistema.

La característica a medir se conoce como variable; esta puede ser una variable controlada, la cual se vera afectada al variar alguna otra variable, que se conoce como variable manipulada, ya que al producir cambios en esta (manipularla), se consigue que la variable controlada tome el valor deseado, manteniendo este valor, o siga el comportamiento que se desea al seguir los cambios que tenga una variable, siguiendo el mismo comportamiento que esta tenga.

La serie de cambios progresivos, que conducen al resultado o propósito determinado, se conoce como proceso.

Para lograr estos cambios lleven al comportamiento deseado, se hace que un actuador provoque los cambios en el sistema, al hacer cambiar la variable manipulada, llevando la variable controlada al valor deseado.

Generalmente durante los procesos, se presentan señales que afectan de manera negativa el resultado, estas se conocen como perturbaciones. Estas pueden generarse dentro o fuera del sistema.

5.2. Sistemas de control

Al aplicar un control para lograr que el sistema siga el comportamiento deseado, se dice que se tiene un sistema de control, que puede ser abierto o cerrado.

El sistema de control abierto (o de lazo abierto figura 5.1), es en el que la salida del sistema, no afecta la acción de control que se aplica sobre el mismo, por lo que la salida que se obtiene depende de condiciones operativas fijas, como la diferencia entre el valor deseado, que se quiere que tenga la variable controlada y su valor actual, y el que no se presenten perturbaciones que afecten considerablemente los valores del sistema.

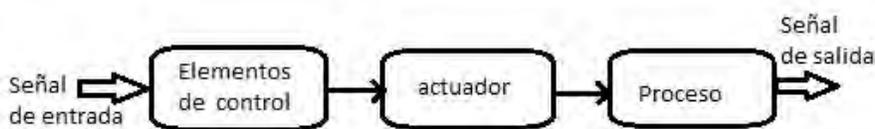


Figura 5.1. Sistema de control de Lazo abierto

El sistema de control de lazo cerrado (figura 5.2), compara la señal de salida con el valor deseado, permitiendo hacer ajustes, afectando el comportamiento del control, este tipo de control puede responder, ante perturbaciones que se presenten en el sistema. Volviéndolo relativamente insensible a las perturbaciones externas, y a las variaciones internas en los parámetros. Esto permite el uso de componentes, relativamente precisos y baratos, para obtener un control adecuado.

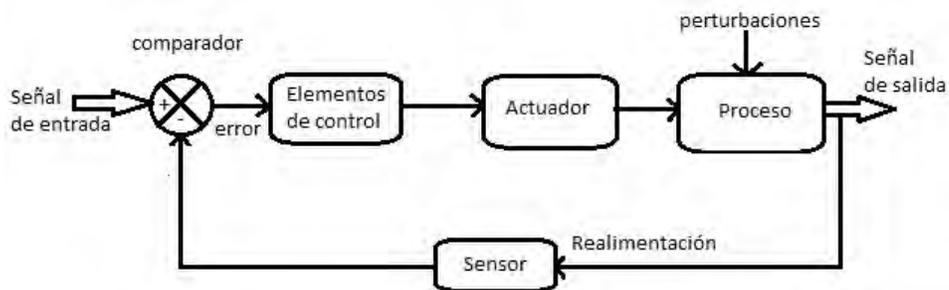


Figura 5.2. Sistema de control de Lazo cerrado

Para sistemas en los que se conoce de ante mano las entradas, y en los cuales no hay perturbaciones, se aconseja el uso de un control de lazo abierto. En un sistema de lazo cerrado, la cantidad de componentes empleados, es mayor que los empleados en un sistema de lazo abierto. La literatura menciona que por lo general, una combinación adecuada de controles en lazo abierto y en lazo cerrado, es menos costosa y ofrecerá un desempeño satisfactorio.

Diseño de los sistemas de control Para poder diseñar el control de un sistema, se emplean modelos matemáticos, que representan el comportamiento de los sistemas reales, ya que la mayoría de los sistemas son no lineales, se emplean métodos de linealización para facilitar el trabajo.

Los tipos de sistemas que hay pueden ser clasificados por su comportamiento y pueden ser estables o inestables, variantes o invariantes en el tiempo; por la cantidad de entradas y salidas que se manejan, de una entrada una salida, una entrada múltiples salidas, múltiples entradas y múltiples salidas; por el modelo que representa al sistema, siendo lineal o no lineal.

La característica de estabilidad, se refiere a que si se aplica una entrada acotada al sistema, la salida también lo es, en el caso de un sistema inestable, la respuesta sería que la salida podría seguir creciendo de manera indefinida, a pesar de recibir una entrada acotada. Cabe mencionar que al aplicar un control, se puede cambiar la estabilidad de un sistema estable en inestable o lo contrario. Ejemplos de sistema estable e inestable se muestran en la figura 5.3.



Figura 5.3. Representación de sistema estable y sistema inestable. (a) Un trompo que permanece girando tiene el comportamiento de un sistema estable, (b) Un borracho es un ejemplo de un sistema inestable.

Un sistema invariante en el tiempo está relacionado con que no importa el momento de tiempo en que se aplique la entrada al sistema, la respuesta de éste no dependerá de ello, y así se aplique en este momento o un mes después, la respuesta que presentara el sistema será la misma. Un comportamiento contrario a este, es lo que refleja un sistema que varía con el tiempo. Ejemplos de sistema invariante y variante se muestran en la figura 5.4.

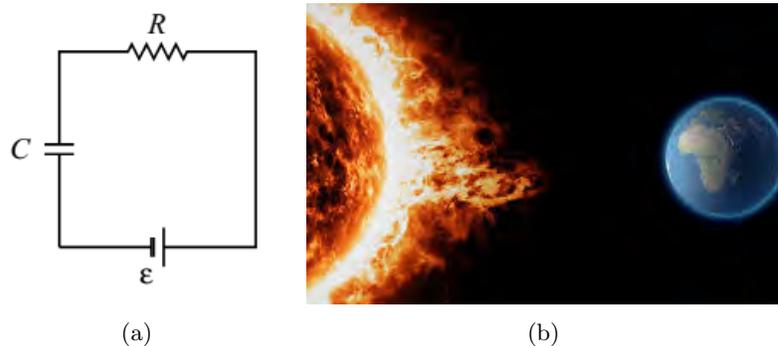


Figura 5.4. Representación de un sistema invariante en el tiempo y de un sistema variante en el tiempo. (a) Un sistema rc responderá de la misma forma a una misma entrada de V . (b) La radiación solar es variante en el tiempo, ya que cambia constantemente.

En el caso de sistemas lineales o no lineales es la representación matemática que sirve para emular el comportamiento del sistema. Si son de primer grado se dice es lineal, si la ecuación o modelo matemático

es de grado superior a uno, entonces se trata de un sistema no lineal. Además la respuesta de este tipo de sistemas a una entrada, se puede obtener como la suma de pequeñas entradas. Ejemplos de sistema lineal y no lineal se muestran en la figura 5.5.

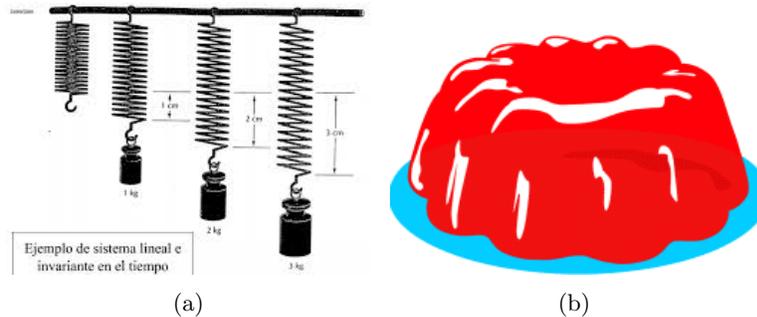


Figura 5.5. Representación de sistema lineal y de sistema no lineal. (a) Un sistema de masas y resorte se comporta como un sistema lineal. (b) Una gelatina es un ejemplo de sistema no lineal

Las aplicaciones matemáticas siempre son más fáciles, si se trata de sistemas lineales e invariantes en el tiempo aun que existen herramientas para sistemas que no son lineales, las cuales permiten obtener modelos equivalentes, para trabajarlo como un sistema lineal.

5.3. Acciones básicas de control

Una acción de control es el modo en que el controlador calcula la salida sobre el sistema para producir cambios en su funcionamiento.

Las acciones de control o controles más comunes son: control de dos posiciones, P (proporcional), PI(proporcional integral) y PID(proporcional integral derivativo), debido a que hay metodologías para aplicar los controles sin necesidad de conocer el modelo matemático, del sistema o planta que se desea controlar.

Acción de control de dos posiciones o de encendido y apagado (on/off).

Son los controles on-off conocidos como todo-nada o abierto-cerrado, con esto se refiere a que se deja actuar por completo o se quita la acción. Un ejemplo de esto pueden ser el encender o apagar un switch o interruptor.

Acción de control proporcional.

El control proporcional actúa proporcional al error. El error es la diferencia que se tendrá entre el valor deseado que se desea tenga el sistema con el valor actual que se tiene. Al valor deseado se le conoce como referencia o como set point.

Al existir un error grande la acción del control proporcional es grande, tendiendo a llevar el sistema hacia el valor deseado, si el error es pequeño la acción del control proporcional es pequeña. Este control tiene la característica de no asegurar que se alcance el valor deseado, aun que lo acerca a él.

Acción de control proporcional integral.

Agrega un efecto integrador que actúa sobre el error, este efecto ayuda a asegurar que se alcance el valor deseado del sistema, pero aumenta el grado del sistema, haciéndolo un poco más complejo. El inverso del tiempo integral T_i (la ganancia integral) se denomina velocidad de reajuste. La velocidad de reajuste es la cantidad de veces por minuto que se duplica la parte proporcional de la acción de control, se mide en términos de las repeticiones por minuto.

Acción de control proporcional-integral-derivativa.

Esta acción combina las ventajas de cada una de las tres acciones de control individuales. Agrega un efecto que depende del cambio en el error que se presenta, este efecto suaviza la respuesta del sistema. Aunque la acción de control derivativa tiene la ventaja de ser de previsión, tiene las desventajas de que amplifica las señales de ruido y puede provocar un efecto de saturación en el actuador. El actuador es el elemento que mediante la señal de control, actúa sobre el sistema, para producir los cambios que lo llevarán a tener el comportamiento deseado.

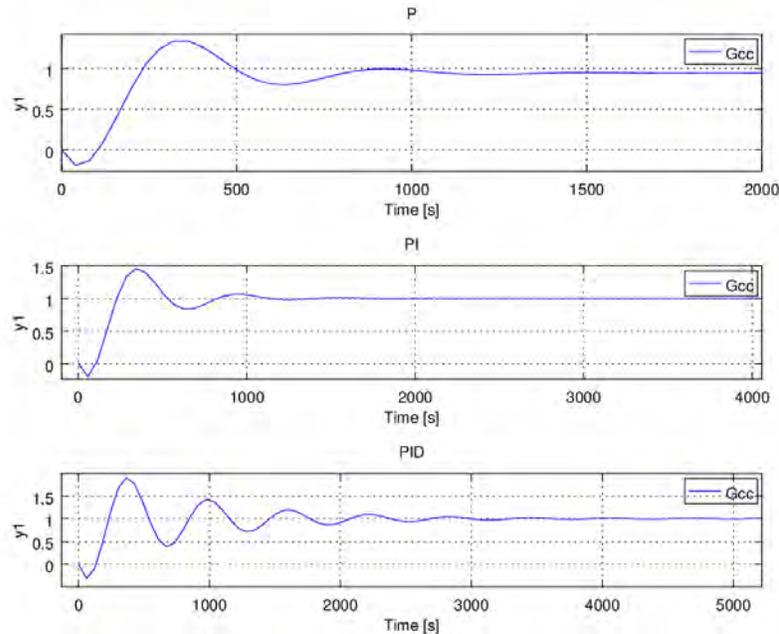


Figura 5.6. Representación de las diferentes acciones de control

Efectos de las acciones de control proporcional, integral y derivativo sobre el desempeño de un sistema

En la figura 5.6 se observan los efectos de aplicar controles: P, PI y PID. La acción de control proporcional tiende a estabilizar el sistema.

La acción de control integral tiende a eliminar o reducir el error en estado estable en respuesta a diversas entradas.

La acción de control derivativa aporta un medio de obtener un controlador con alta sensibilidad. Una ventaja es que responde a la velocidad del cambio del error y produce una corrección significativa antes de que la magnitud del error se vuelva demasiado grande.

5.4. Implementación de un control

Para implementar un control, puede ser mediante componentes físicos, como son los amplificadores operacionales, y con diferentes configuraciones, implementar la operación matemática que representa cada uno de estos controles, otra manera de hacerlo es por medio de un código (por software), en la cual todo el trabajo matemático representado por estos controles, se realiza mediante un código de programación, las operaciones son programadas mediante algún lenguaje.

Las ventajas y desventajas entre ellos son: el implementarlo de manera física (figura 5.7a), requiere de componentes que para ciertos valores de implementación de control, puede no haber componentes

para tener esos valores, además de que al tener más componentes se tienen un mayor costo, y puede ser implementado más fácil de la parte teórica a la práctica, al trabajar con señales analógicas, que siguen el comportamiento real del sistema.

Al implementarlo de una manera digital (figura 5.7b), se trabaja con señales digitales que son una aproximación de las señales analógicas por medio de un muestreo donde en los instantes en que no se muestrea no se sabe que es lo que ocurre con el sistema, y el llevar las representaciones matemáticas a una implementación para un sistema digital puede ser más complejo y requiere transformar el modelo del sistema, que es un modelo en funciones que dependen del tiempo, a un modelo discreto; a pesar de esto tiene la ventaja, de que en caso de querer hacer una actualización o cambio en el control, puede hacerse por medio de un código, sin tener que cambiar los componentes del control.

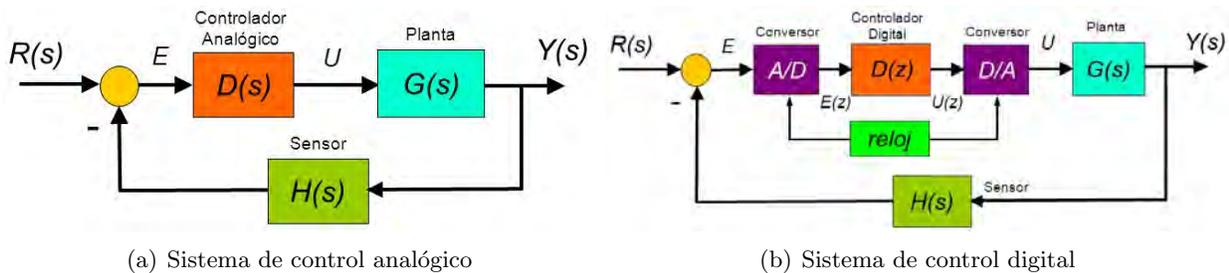


Figura 5.7. Sistema de control analógico vs sistema de control digital

Para ser empleados los controles P, PI, PID, ya sea de manera analógica o digital, existen metodologías que permiten su implementación, aun sin conocer el modelo del sistema que se desea controlar, esto claro tiene ciertas limitantes para poder ser aplicado, y están relacionadas con el tipo de sistema que se desea controlar.

Estos métodos se conocen como de reacción, ya que dependen de la respuesta que tenga el sistema, a que se le aplique una determinada entrada, y si el sistema presenta cierto comportamiento (figura 5.8), entonces estas metodologías se pueden aplicar, para encontrar unos valores para el control, o una aproximación a ellos, de donde a partir de ellos, se pueden encontrar valores más adecuados.

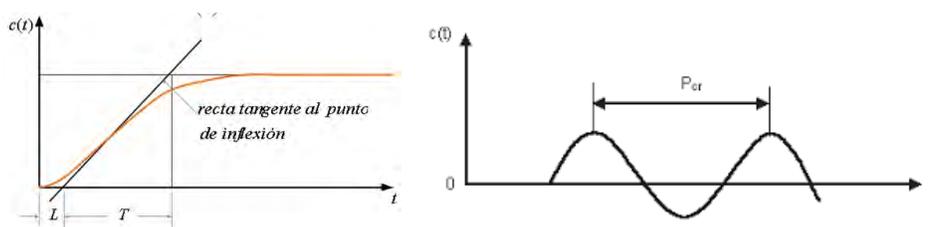


Figura 5.8. Gráficas para la obtención de los parámetros de control

En el caso de algoritmos de control se tienen:

- Técnicas de compensación (agregan polos y ceros al sistema) esos polos y ceros están relacionados con el comportamiento que muestra el sistema.
- PID (suma de tres términos, relacionados con el error).
- Deadbeat (en el dominio de Z , se emplea cuando se desea una respuesta rápida).
- Modelos en el espacio de estados: describen matricialmente el modelo del sistema, se emplea cuando hay muchas variables a controlar.

- Control óptimo: Cuando se desea minimizar un parámetro del sistema (como el tiempo de establecimiento).
- Control adaptativo: Se utiliza en sistemas que sus parámetros cambian con el tiempo, haciendo inestable el control. Rediseña el controlador siguiendo los cambios de la planta.

El diseño del control del sistema, se puede realizar sin conocer el modelo del que lo representa, mediante la respuesta del sistema a una entrada escalón, si la respuesta del sistema tiene la forma de una "S" (figura 5.9), esto significa que puede ser sintonizado un control del tipo: P, PI, o PID mediante estos métodos (métodos de reacción).

Entre estos métodos se encuentran el método conocido como Ziegler-Nichols, o el método Cohen-Coon, aun que hay otros métodos como el Lambda, la elección del método dependerá del tipo de sistema y del tipo de control que se este implementando.

Hay otras opciones a seguir en caso de conocer el modelo del sistema que se desea controlar, que se conocen como técnicas de compensación, que agrega polos y ceros de acuerdo a lo que se desee del sistema. Ya que los polos y ceros son los que nos dicen si el sistema será estable o inestable, o el valor de éstos nos permitirá saber cuáles tienen un efecto dominante sobre su comportamiento al agregar polos o ceros por medio del controlador se consigue modificar el comportamiento de nuestro sistema.

Tanto el método de Ziegler-Nichols como el Cohen-Coon, consisten en aplicar una entrada escalón de un porcentaje pequeño (10 a 20 %, o lo necesario para que la salida del sistema, tenga una magnitud de al menos 5 veces el valor que produciría, debido solo al efecto del ruido). Se obtiene una ganancia estática del sistema, que es el cociente de la salida entre la entrada, se obtiene el tiempo en el que alcanza el 0.63 %, del valor final de su respuesta, se traza una línea de la máxima pendiente, que se presenta en el punto de inflexión de su gráfica de salida (figura 5.9). Y se registran los tiempos en que corta con el valor inicial, de la variable de salida, antes de que se le aplicara el escalón.

Con estos valores se calculan las ganancias del controlador, como indica la tabla 5.1 para Ziegler-Nichols, para el método Cohen-Coon se usa la tabla 5.2, La diferencia entre el método Ziegler-Nichols y el Cohen-Coon, se debe a que el segundo es menos sensible a posibles errores en la obtención de los valores, mientras que el primero puede presentar más variaciones en su respuesta, con pequeñas variaciones en los valores obtenidos.

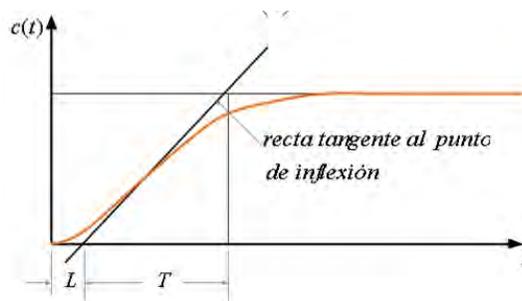


Figura 5.9. Curva para la obtención de los parámetros Ziegler-Nichols

Al llevarse a cabo se recomienda repetir el método 2 o tres veces, y si los valores obtenidos varían mucho, repetirlo muchas más veces para poder obtener un promedio de los valores.

(a)				(b)			
	K_p	T_i	T_d		K_p	T_i	T_d
P	T/L	Inf	0	P	T_p/t_0		
PI	$0,9(T/L)$	$L/0,3$	0	PI	$0,9(T_p/t_0)$	$T_0/0,3$	
PID	$1,2(T/L)$	$2L$	$0,5L$	PID	$1,2(T_p/t_0)$	2^*T_p	$0,5^*T_p$

Tabla 5.1. Tablas para la obtención de los parámetros por Ziegler-Nichols

	K_p	T_r	T_d
P	$\frac{\gamma_0}{K_0 \tau_0} \left(1 + \frac{\tau_0}{3\gamma_0}\right)$		
PI	$\frac{\gamma_0}{K_0 \tau_0} \left(0,9 + \frac{\tau_0}{12\gamma_0}\right)$	$\frac{\tau_0(30\gamma_0 + 3\tau_0)}{9\gamma_0 + 20\tau_0}$	
PID	$\frac{\gamma_0}{K_0 \tau_0} \left(\frac{4}{3} + \frac{\tau_0}{4\gamma_0}\right)$	$\frac{\tau_0(32\gamma_0 + 6\tau_0)}{13\gamma_0 + 8\tau_0}$	$\frac{4\tau_0\gamma_0}{11\gamma_0 + 2\tau_0}$

Tabla 5.2. Tabla para obtención de parámetros Cohen-Coon

Capítulo 6

Planteamiento del proyecto

Apoyándose en la información previa se propuso que el equipo a desarrollar debería cumplir con las siguientes características:

- Debe ser un equipo de dimensiones reducidas (portátil), para que sea portátil.
- Que sea del tipo de bloque seco, para no tener que lidiar con sellado para contener un líquido, o que el líquido incremente el peso del equipo, además se elimina la necesidad de aislar los sensores a calibrar.
- Para mejorar la estabilidad e la temperatura debe mantener de la mejor manera posible el calor en su interior.
- Permitirá la introducción de los sensores a calibrar, manteniendo el aislamiento térmico con el exterior para permitir una calibración con bajo ruido.
- De ser posible se realizará un barrido de la temperatura de manera automática con con el objeto de liberar al usuario de mantenerse todo el tiempo al pendiente del calibrador.
- Implementarlo de manera digital para poder hacer las modificaciones y ajustes de forma digital y no estar cambiando componentes.

6.1. Diseño y características propuestas

Para lograr llegar al prototipo de calibrador se trabajó con los siguientes prototipos:

Modelo 1 : de PVC que se muestra en la figura 6.1 ,su cuerpo de PVC funciona como aislante. Sus dimensiones fueron relativamente pequeñas (15cm aprox de diámetro).

Se empleó para ver el comportamiento y distribución del calor. Calentando solamente el aire en su interior y empleando una resistencia de 400W, en su interior se pusieron sensores de temperatura, el sensor empleado es el lm35 por su facilidad de manejo y linealidad.

La resistencia de calentamiento se ubicó cercana a una de las tapas del contenedor, de manera vertical y paralelo a las caras del contenedor.

Los sensores detectaron los cambios de temperatura en la región interna, con todos los sensores comenzando en la misma temperatura, y comenzando a variar con el tiempo que se tuvo encendida la



Figura 6.1. Modelo 1

resistencia de calentamiento, detectándose los aumentos de temperatura primeramente en los sensores más cercanos a la resistencia de calentamiento, e incrementándose gradualmente los otros sensores, hasta que alcanzaron temperatura final. Se mantuvo cerrado durante el calentamiento.

Pruebas con el modelo 1 (fig 6.1)

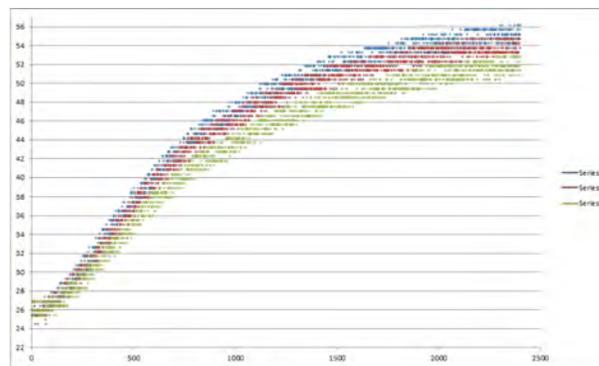


Figura 6.2. Comportamiento de los sensores LM35 dentro del modelo 1

En la figura 6.2, se puede ver el incremento de la temperatura y el mismo comportamiento en cada sensor, pero con valores ligeramente distintos de temperatura. Esto llevó a decidir agregar un ventilador al interior del sistema para homogeneizar la temperatura.

Modelo 2 : de PVC espumado y unicel que se observa en la figura 6.3, dando mejor aislamiento. Este se construyó de 20x20x15 [cm] en el interior, formando una caja de PVC espumado y se cubrió con unicel de un centímetro de espesor, para conseguir un mejor aislamiento del interior del sistema con el medio ambiente, disminuyendo la transferencia de calor que se pudiera presentar.

Con el modelo 2 se decidió utilizar una celda peltier como elemento de enfriamiento y calentamiento, aprovechando que su principio de funcionamiento lo permite.

La celda peltier empleada fue la TEC-12708 y los sensores LM35. En cada cara de la celda se montó un disipador, adicional a esto entre el disipador de la cara caliente y la cara fría de la celda, se colocó unicel como aislante entre los disipadores, ya que se observó que se presenta transferencia de calor entre ambos lados de la celda, lo que afectaba su funcionamiento.

Pruebas con el modelo 2 (fig 6.3)

La figura 6.4 muestra el comportamiento que siguió la temperatura al calentarlo y después enfriarlo, logrando alcanzar temperaturas de 70°C sin dificultad.

Se realizaron pruebas, pero enfriando con la celda y luego calentando.

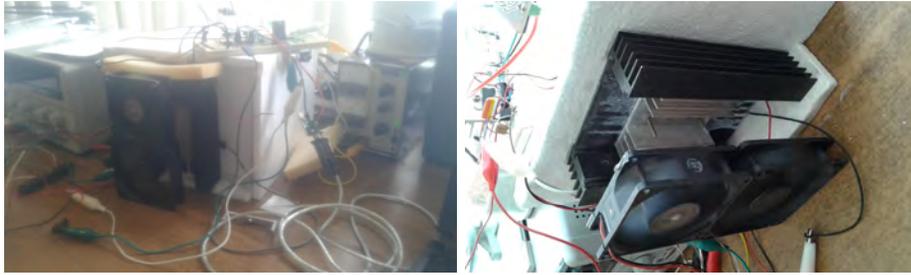


Figura 6.3. Modelo 2

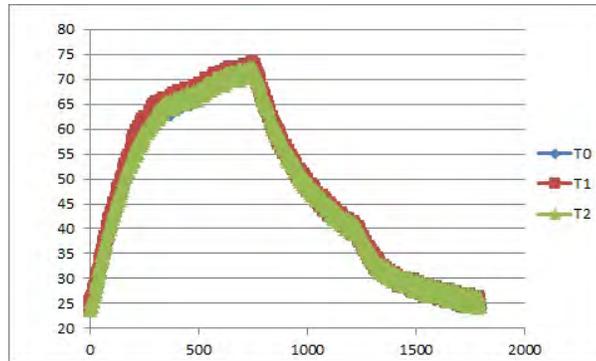


Figura 6.4. Se mantuvo el ventilador del interior encendido, las lecturas de los sensores son más parecidas entre ellas que las de la prueba que se muestra en la figura 6.2

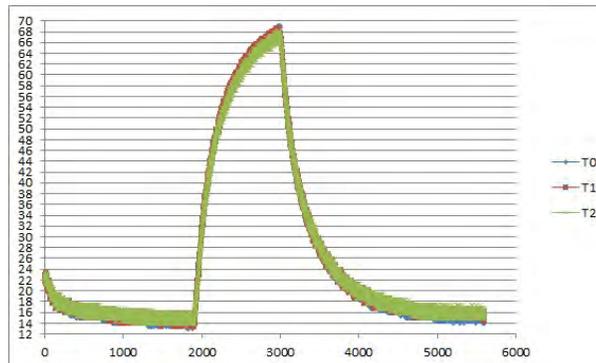


Figura 6.5. Se enfría, luego se calienta y se vuelve a enfriar, los sensores en el interior del modelo 2 siguen el mismo comportamiento, el ventilador ayudo a homogeneizar la temperatura

En la figura 6.5, se ve que la temperatura del sistema baja a los 14°C.

Se procedió a realizar pruebas en las que se mide la temperatura en el modelo 2, y en cada disipador montado a cada lado de las caras de la celda.

En la primera etapa de esta prueba se mantiene el ventilador apagado y después se enciende, figura 6.6.

Se observa que la temperatura del interior del modelo 2, disminuye al encender el ventilador, pero al mismo tiempo la temperatura del disipador de la cara fría aumenta. Lo mismo se puede observar en la gráfica de la figura 6.7.

Se probaron diferentes valores de voltaje para pruebas de enfriamiento y, se observó la temperatura que alcanza para cada valor de alimentación, notando que para alimentaciones mayores a 9 volts, la

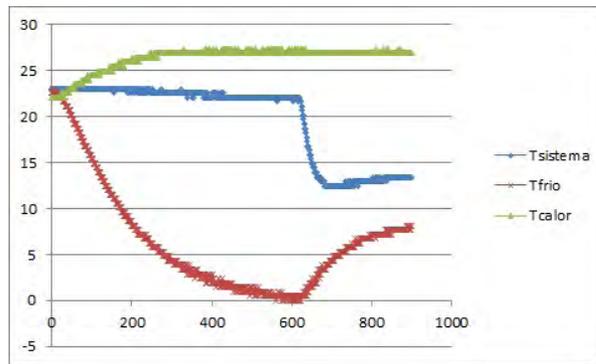


Figura 6.6. Se mide la temperatura en la cara fría de la celda -línea roja- la temperatura en el interior del modelo 2 -línea azul- y la temperatura en el disipador en el interior del modelo 2 -línea verde-

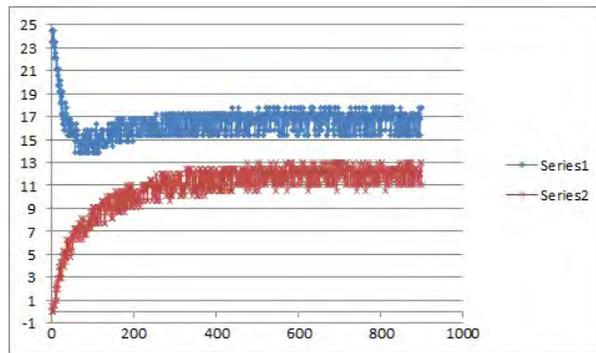


Figura 6.7. Los sensores LM35 dentro del modelo 2 al estar enfriando la celda y encender el ventilador, la temperatura de la cara fría de la celda - línea roja- sube, y la del interior del modelo 2 -línea azul- baja

disminución que se consigue de temperatura prácticamente ya no es notoria.

Se implementó un PWM para controlar la celda, y se realizaron pruebas para 9 volts de alimentación, aumentando en cada prueba un 10 % el valor del ciclo de trabajo.

En la figura 6.8, se observa el comportamiento que siguió la temperatura y la menor alcanzada fue de 12°C.

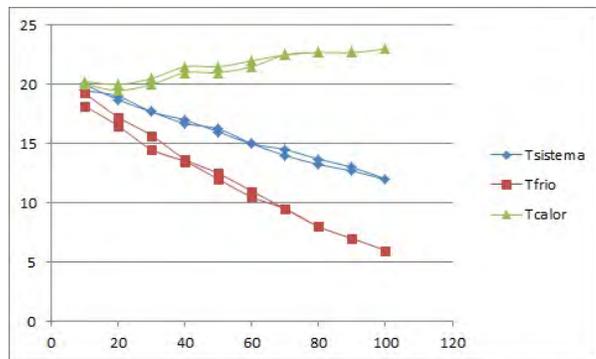


Figura 6.8. Temperaturas en el interior del modelo 2 (T sistema) y en los disipadores montados en cada cara de la celda (Tfrio y Tcalor)

Se presenta la tabla 6.1 con los datos registrados para cada valor de PWM dado.

PWM	Corriente [A]	Potencia [W]	Tsistema [°C]	T lado frío [°C]	T lado caliente [°C]
10	0.22	1.98	19.5	18.1	20.0
20	0.43	3.87	19.0	16.5	19.5
30	0.63	5.67	17.7	14.5	20.0
40	0.83	7.47	17.0	13.5	21.0
50	1.03	9.27	16.0	12.0	21.0
60	1.22	10.98	15.0	10.5	21.5
70	1.40	12.60	14.5	9.5	22.5
80	1.57	14.13	13.7	8.0	22.7
90	1.74	15.66	13.0	7.0	22.7
100	1.91	17.19	12.0	6.0	23.0
90	1.72	15.48	12.7	7.0	22.7
80	1.54	13.86	13.2	8.0	22.7
70	1.37	12.33	14.0	9.5	22.5
60	1.21	10.89	15.0	11.0	22.0
50	1.01	9.09	16.2	12.5	21.5
40	0.82	7.38	16.7	13.7	21.5
30	0.62	5.58	17.7	15.7	20.5
20	0.42	3.78	18.7	17.2	20.0
10	0.21	1.89	20.0	19.2	20.2

Tabla 6.1. Respuesta de la celda para valores de PWM

Modelo 3 : Se muestra en la figura 6.9, en este modelo se empleó una celda peltier como elemento de enfriamiento y calentamiento. Se construyó de placas de aluminio (cuatro) de 11.8 x 8.5 [cm] y con un espesor de 2.54 [cm] cada una y unidas con tornillos y tuercas. Se cubrió con unicel de 2[cm] de espesor. Las placas se perforaron para poder contener el sensor a calibrar y el sensor patrón. Los orificios para insertar los sensores se hicieron con una broca de 2.22[cm] (7/8”), se rectifican las placas para mejorar que queden parejas las caras del equipo. Para unir las placas se usaron tornillos de 2.54[cm] (1/4”), siendo sujetos por tuercas, aprovechando los tornillos como patas del equipo. Se montó la celda en la cara lateral del bloque que se formó.

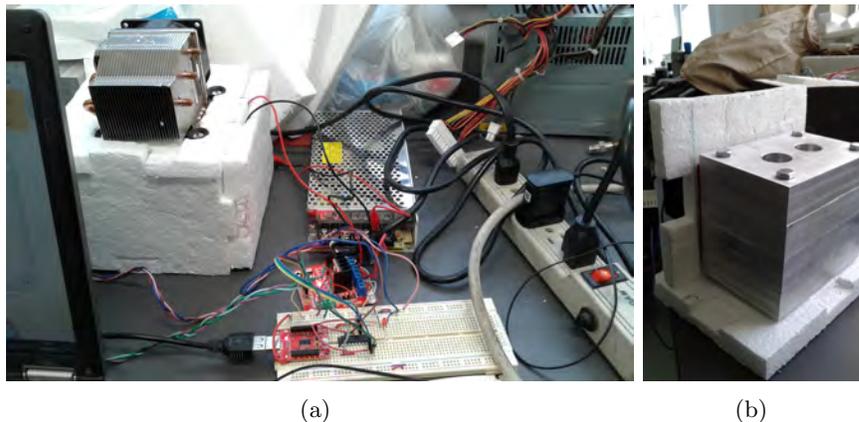


Figura 6.9. Modelo 3. (a) Equipo cerrado, (b) equipo de placas de aluminio con la base y una de las paredes de la caja de unicel

Se distribuyeron las dimensiones de manera que los orificios quedaran con suficiente espacio entre ellos, a partir de un análisis de los sensores que son empleados en la red RUOA (red universitaria de

observatorios atmosféricos), y habiendo consultado las páginas de algunos principales proveedores de sensores de temperatura ambiental, como son Campbell, Vaisala y Met one; Se obtuvieron las gráficas 6.10 y 6.11, en se presentan los valores de diámetro y longitud de los sensores. Con esto se concluyó que con tres placas de aluminio el elemento sensor puede quedar completamente inmerso en el bloque, pero al requerir un disipador mayor a las dimensiones de las tres placas, y tendría que fijarse de alguna manera a las placas, lo que llevó a tener que trabajar con 4 placas. Cubriendo de esta manera la mayor cantidad de modelos de termómetros de tipo ambientales.

Se decidió que los diámetros de los orificios en las placas fueran elaborados con una broca de 2.22 [cm] (7/8"), y con una profundidad de 8.62[cm].

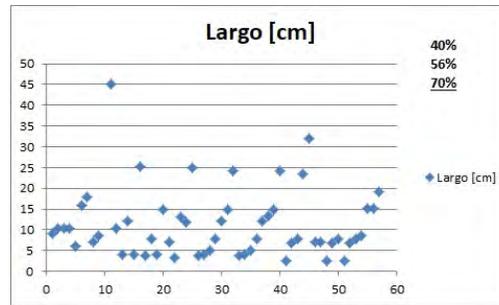


Figura 6.10. Gráfica de la profundidad de los diversos sensores de temperatura atmosféricos, llegando a cubrir el 70 %

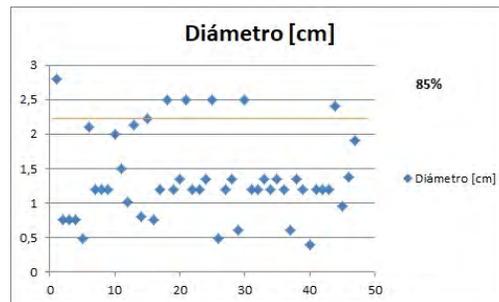


Figura 6.11. Gráfica del diámetro de los diversos sensores de temperatura atmosféricos, llegando a cubrir el 85 %

Los tornillos que se emplearon para unir las placas sirven también como patas para sostener el modelo 3. Para poder aislarlo del medio ambiente se cubrió con unicel.

Se eligió el modelo 3 para prototipo del calibrador, ya que estaba más aislado, cuenta con un material que ayudará a mantener la temperatura permitiendo presentar una mejor respuesta.

Capítulo 7

Desarrollo del proyecto

Para llevar a cabo el proyecto y después de las pruebas realizadas, se eligió trabajar con el modelo 3 figura 6.9.

Para el armado del equipo con el que se realizaron las pruebas se realizó lo siguiente.

7.1. Construcción del equipo

Se utilizó una placa de aluminio de una pulgada de espesor (figura 7.1), las dimensiones se establecieron de tal manera que hubiera espacio para los orificios, donde se introducirán los sensores y los tornillos de unión.



Figura 7.1. Placa para el modelo con sus perforaciones

Entre cada placa se aplicó una capa de pasta térmica para ayudar a transmitir el calor entre las placas.

La celda para funcionar correctamente necesita hacer un contacto franco de la cara de la celda con la superficie a calentar o enfriar, algo que no era fácil de asegurar dejando la celda en contacto directo con las placas del cuerpo del equipo, por lo que se colocó una placa delgada de aluminio entre la celda Peltier y el cuerpo del equipo para mejorar la transmisión de calor, también a esta se aplicó pasta térmica.

A la otra cara de la celda Peltier se le montó un disipador aplicando también pasta térmica.

En la cara que va la celda Peltier, se puso una capa de neopreno (figura 7.2) de aproximadamente 4[mm] de espesor para ayudar a aislar, la celda Peltier y su disipador del cuerpo de las 4 placas. En el

centro de ésta se hace un hueco de las dimensiones de la celda Peltier, permitiendo que funcione como separador entre ambos lados de la celda ayudando a aislar y disminuir la transferencia de calor que se pudiera presentar entre las caras de la celda Peltier.

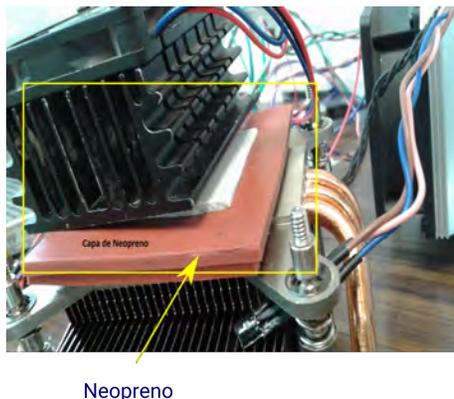


Figura 7.2. Capa de neopreno como aislante entre caras

En el disipador se montó un ventilador para ayudar a enfriarlo. El bloque fue cubierto con unicel de 2 [cm] de espesor, armando una caja que contenía al equipo para aislarlo del medio ambiente. En la parte superior por donde ingresarían los sensores se hicieron orificios.

En caras paralelas del equipo se montaron sensores para poder medir la temperatura (LM35) en la superficie del equipo y, otros se pusieron en el interior, en los orificios donde se introducirían los instrumentos a calibrar. Quedando como se observa en la figura 7.3:

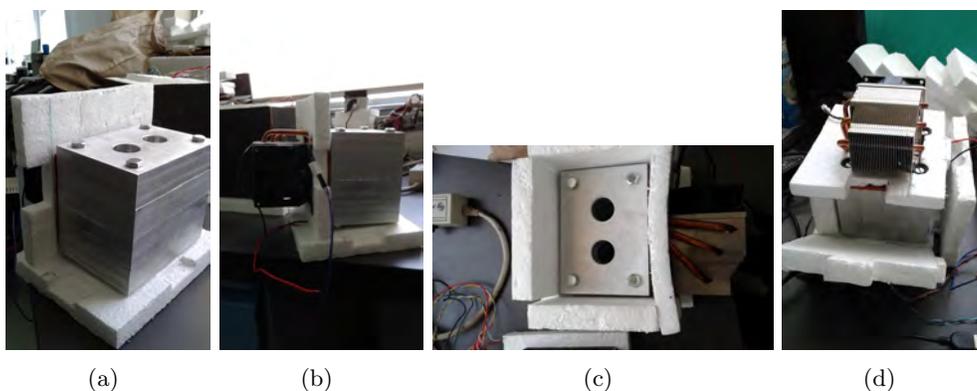


Figura 7.3. Prototipo de Calibrador de cuatro placas de aluminio Modelo 3. (a) Placas de aluminio que componen el equipo. (b) Disipador con su ventilador montado. (c) Orificios donde se introducen los sensores, y se ven los tornillos de unión. (d) Equipo con su caja de unicel

La parte electrónica se basa en un micro controlador de 8bits (PIC16f88), y el diagrama esquemático de conexiones del equipo es el mostrado en la figura 7.4, se generó empleando Proteus. La parte de la celda en este caso se representó con un motor.

Se trabajó con la celda TEC1-12706 (figura 7.5), cuyas dimensiones son 40x40x3.8[mm], el voltaje nominal es de 12VDC, pudiendo llegar a demandar 6A y generar un delta de temperatura entre sus caras de 65°C podrían alcanzarse 70°C en el lado caliente y hasta -30°C en la cara fría.

Se empleó el puente H L298N (figura 7.6) para controlar la alimentación que llega a la celda, éste permite invertir el flujo de la corriente hacia la celda, permitiendo cambiar entre enfriar o calentar, además es fácil de conseguir. cumple con el consumo de corriente que demanda la celda.

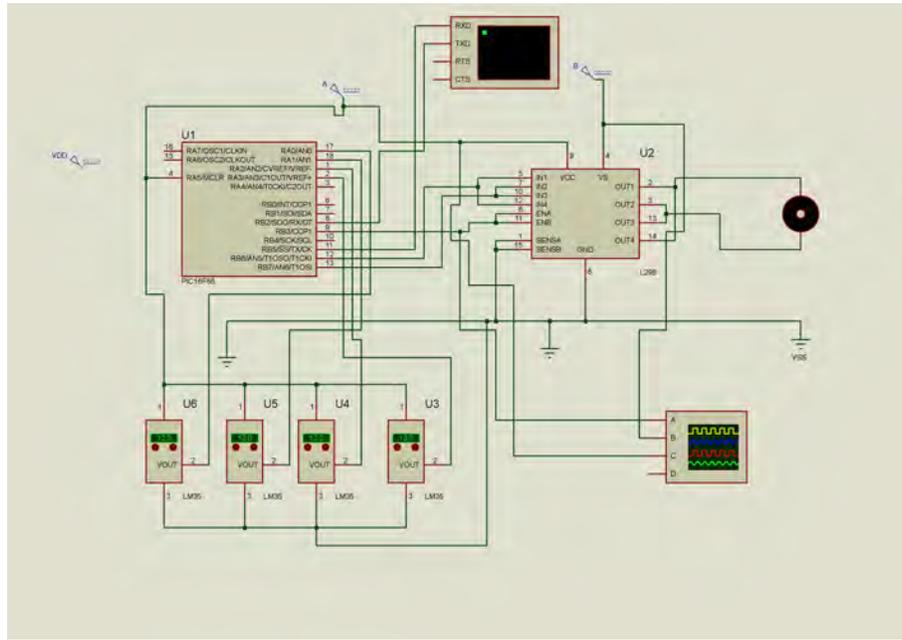


Figura 7.4. Simulación en Proteus



Figura 7.5. Tec1-12706

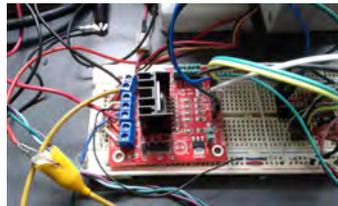


Figura 7.6. Puente L298N

Se emplearon cuatro sensores LM35 para las mediciones, por ser lineal, entregando $10\text{mV}/^{\circ}\text{C}$, trabaja en un rango de -55 a 150 $^{\circ}\text{C}$, y es de bajo costo y fácil adquisición. Se utilizará este sensor como primera prueba, planeando cambiarlo a futuro por uno mejor.

Para comunicación se emplea un convertidor usb-serie (figura 7.7), para poder almacenar los datos en la PC.

Para alimentar todo el equipo, se hizo uso de una fuente de 12VDC , figura 7.8.

7.2. Control del elemento de calentamiento

Siguiendo los métodos de reacción (Ziegler-Nichols y Cohen-Coon) se trabajó de la siguiente manera.

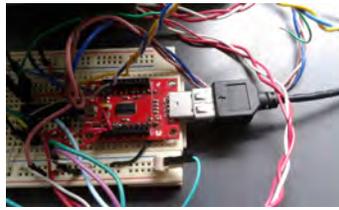


Figura 7.7. Convertidor USB Serie



Figura 7.8. Fuente de 12V y 8.3A

Para aplicar el método de reacción, se deben aplicar entradas de tipo escalón, por lo que se realizaron pruebas iniciales (de 13000 segundos) con el sistema, para ver en qué tiempo el sistema se estabilizaba y se observó que para un valor de 9000 segundos el cambio en el sistema era muy pequeño, por lo que se eligió este valor para realizar las pruebas.

Se aplicaron entradas escalón durante 9000 segundos (150 minutos=2.5hrs), comenzando con un valor inicial de pwm de 77, se fue incrementando en 77 el valor del pwm entre prueba y prueba, teniendo un escalón de 77 (escalón 1), otro de 154 (escalón 2) y un tercero de 231 (escalón 3).

Al aplicar la entrada escalón al sistema, se obtuvieron las gráficas mostradas en la figura 7.9.

En cada prueba realizada para la obtención de los parámetros se tenían 4 sensores, y una vez realizada la prueba, los valores obtenidos de cada sensor se normalizaron y promediaron, ésto se realizó para cada escalón aplicado (figura 7.10).

Después los valores por escalón que se obtuvieron se promediaron, para obtenerse una sola columna de datos de la que se obtendrían los valores finales (tabla 7.1).

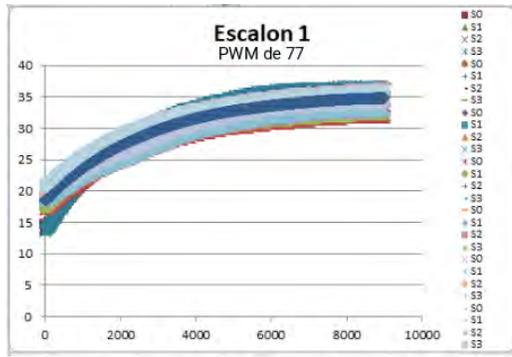
Se obtuvieron en el proceso los valores de los parámetros por escalón y por prueba, para poder compararlos con los finales y verificar que se tuvieran valores coherentes.

Los parámetros que se encuentran en las tablas son:

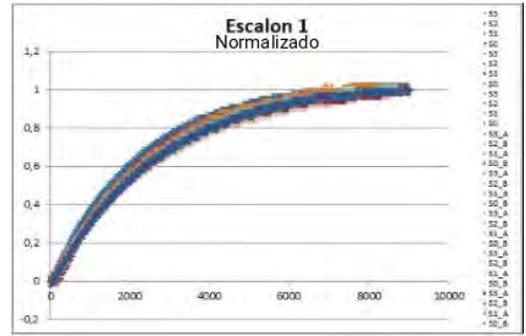
- t_0 : es el retardo puro.
- t_1 : tiempo en que se tiene el 10 % del valor final de la respuesta.
- t_2 : tiempo en que se tiene el 95 % del valor final de la respuesta.
- t_r : tiempo de subida entre el 10 y el 90 % del valor de respuesta.
- K_0 : ganancia estática del sistema.
- t_{ao} : tiempo en que llega al 63.2 % de la respuesta.

En las que los valores obtenidos fueron los de las tablas 7.1 y 7.2.

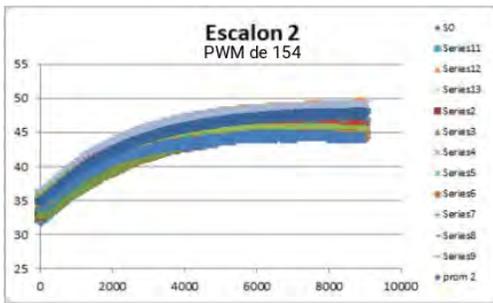
Además parte de estos valores se emplearon para obtener el modelo matemático que represente al sistema. El tipo de respuesta que se obtiene del sistema al aplicar una entrada escalón, indica que se



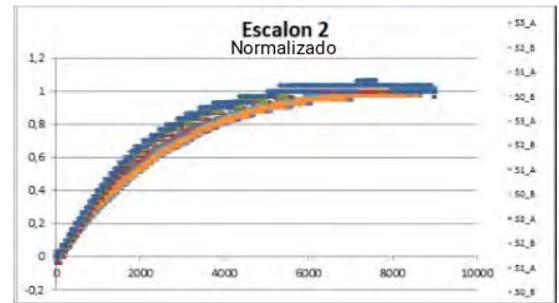
(a)



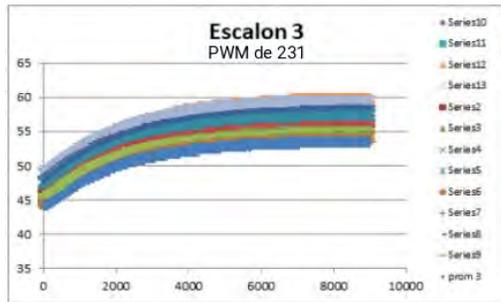
(b)



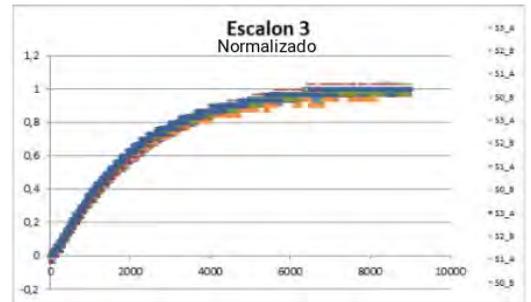
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 7.9. Respuesta a las entradas escalón: En las gráficas se encuentra la respuesta del sistema, en valores de temperatura en a, c y e y se encuentran normalizadas en b, d y f.

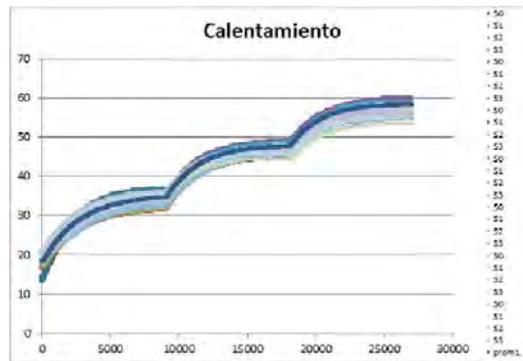


Figura 7.10. Respuesta del sistema a los escalones aplicados y el promedio de estos

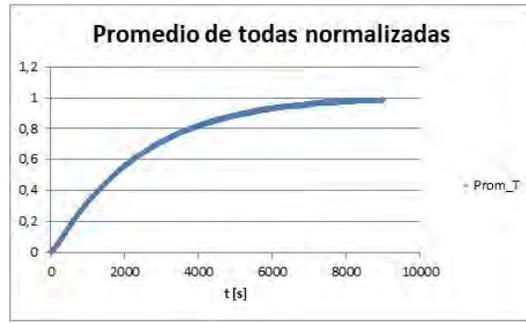


Figura 7.11. Respuesta normalizada para todos los escalones con la celda calentando

Parámetro	Calentamiento
t0	172
t1	313
t2	6144
Ti	4710
K0	0,54
T0	141
Y0	5831
Tao	2360

Tabla 7.1. Parámetros de calentamiento

	Z-N	C-C
Kp	15,05	12,72
	13,54	11,45
	18,06	15,27
Ti	1043,33	573,33
	626	4376
Td	156,5	1094

P
PI
PID

Tabla 7.2. Parámetros para el controlador por Ziegler-Nichols y Cohen-Coon

puede representar con un modelo de sistema de primer orden, o con un sistema de primer orden con un retado puro:

$$e^{ST_d} \frac{K}{1 + ST}$$

Se puede hacer la aproximación de:

$$e^{ST_d} \cong \frac{1 - S \frac{T_d}{2}}{1 + S \frac{T_d}{2}}$$

Donde T_d es el retardo puro del sistema que es t_0 en los parámetros, K es la ganancia estática, que es K0 en los parámetros y T que es tao en los parámetros.

Sustituyendo los valores de los parámetros se tiene:

$$e^{ST_d} \frac{K}{1 + ST} = \frac{1 - S \frac{172}{2}}{1 + S \frac{172}{2}} \frac{0,54}{1 + S2360}$$

Estos valores y los de la tabla se emplearon para realizar simulaciones, empleando el software Octave con su paqueteria de control para simular el comportamiento de los sistemas mediante las funciones

de transferencia del sistema y el controlador ante una entrada escalón.

Implementación del control

Para la implementación del control se realizó lo siguiente:

$$U(t) = k_p(e(t) + \frac{1}{t_i} \int_0^t e(t) dt + t_d \frac{d(e(t))}{dt})$$

Dónde $e(t)$ es el error, que se define como el Set point que llamaré r menos el valor de la señal de salida del sistema que será $y(t)$ quedando $e(t) = r - y(t)$

Para implementar el control, se requiere la integral y la diferencial del error, la parte diferencial se define de la siguiente manera.

$$\frac{d(e(t))}{dt} = \frac{e(t_1) - e(t_0)}{t_1 - t_0} = \frac{r - y(t_1) - (r - y(t_0))}{t_1 - t_0} = \frac{y(t_0) - y(t_1)}{t_1 - t_0}$$

Para la integral se manejó una aproximación, partiendo de la gráfica del error de la figura 7.12. Comenzando con un error grande que se hará cada vez más pequeño, conforme se vaya alcanzando el valor del set point.

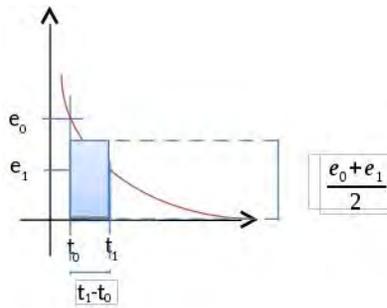


Figura 7.12. Curva del error

Quedando la aproximación para la integral de la siguiente manera:

$$\int_0^t e(t) dt = (t_1 - t_0) \frac{e(t_0) + e(t_1)}{2}$$

Con esto la ecuación del control queda de la siguiente manera:

$$U = k_p e + \frac{k_p}{t_i} (t_1 - t_0) \frac{e(t_0) + e(t_1)}{2} + k_p t_d \frac{y(t_0) - y(t_1)}{t_1 - t_0}$$

Esta es la ecuación que se implementa para el control.

Con el objetivo de reducir el tiempo necesario para pruebas, se realizó la simulación en Octave. Sistema obtenido figura 7.13:

$$\frac{-46.44 s + 0.54}{2.03e+05 s^2 + 2446 s + 1}$$

Figura 7.13. Ecuación del sistema obtenida con Octave para calentamiento

Simulación de control Proporcional Se realizó la simulación del control Proporcional, de los valores obtenidos a partir del método de reacción mostrándose el resultado en la figura 7.14, luego se ajustó el valor para tener mejor respuesta, figura 7.15.

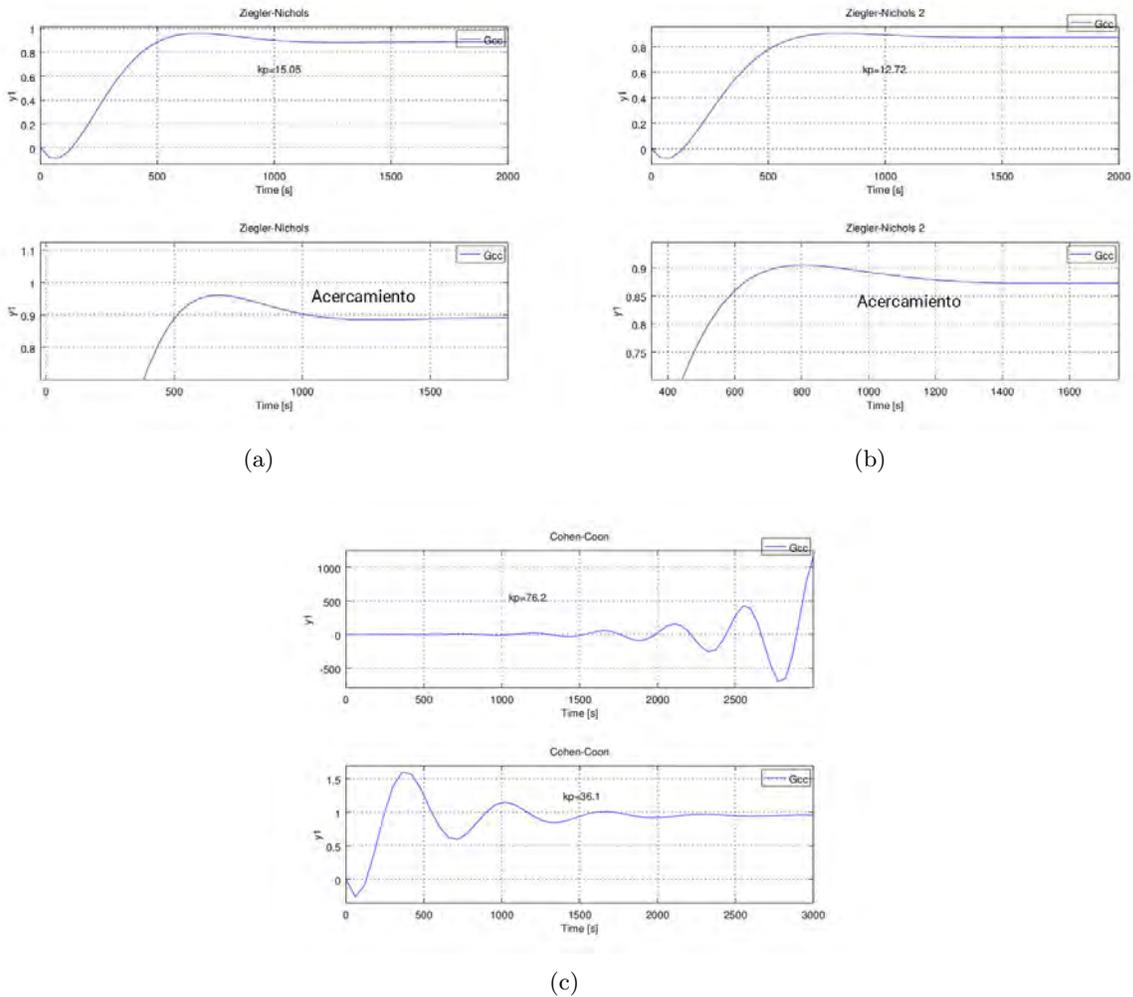


Figura 7.14. Simulación de los valores obtenidos por los métodos de reacción para calentamiento. (a) Ziegler-Nichols de la tabla 7.2 con $k_p = 15.05$, (b) Ziegler-Nichols de la tabla 7.2 con $k_p = 12.72$, (c) Cohen-Coon con $k_p = 76.2$ y $k_p = 36.1$

Primero se simularon los valores obtenidos por los métodos de reacción. En el caso de los valores del método de Cohen-Coon, se recomendaba dividir la ganancia a la mitad figura 7.14c.

Simulación para obtener una mejor respuesta, En la figura 7.15, Se muestra que con una ganancia proporcional de 17.14 se acerca al valor deseado figura 7.15, con un ligero sobrepaso y estabilizándose en 0.9 del valor final, siendo el de mejor respuesta de los probados.

Simulación del control Proporcional Integral Se realizó la simulación del control Proporcional Integral, de los valores obtenidos a partir del método de reacción mostrándose el resultado en la figura 7.16, luego se ajusto figura 7.17.

Ajuste de la parte proporcional En las simulaciones de la figura 7.17 con el valor de $k_p = 17.14$, se observa que al disminuir el valor de t_i , tiene un mayor sobre paso.

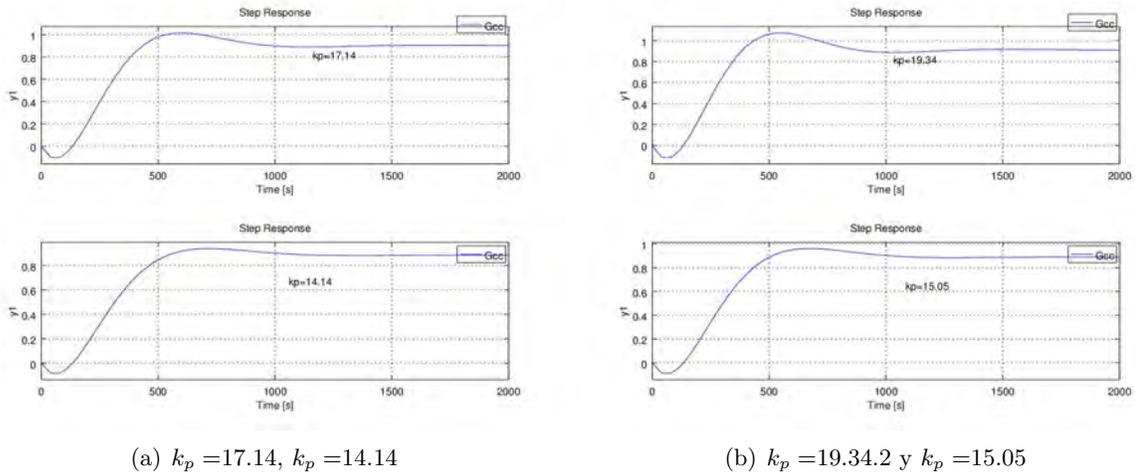


Figura 7.15. Simulación de control proporcional para calentamiento.

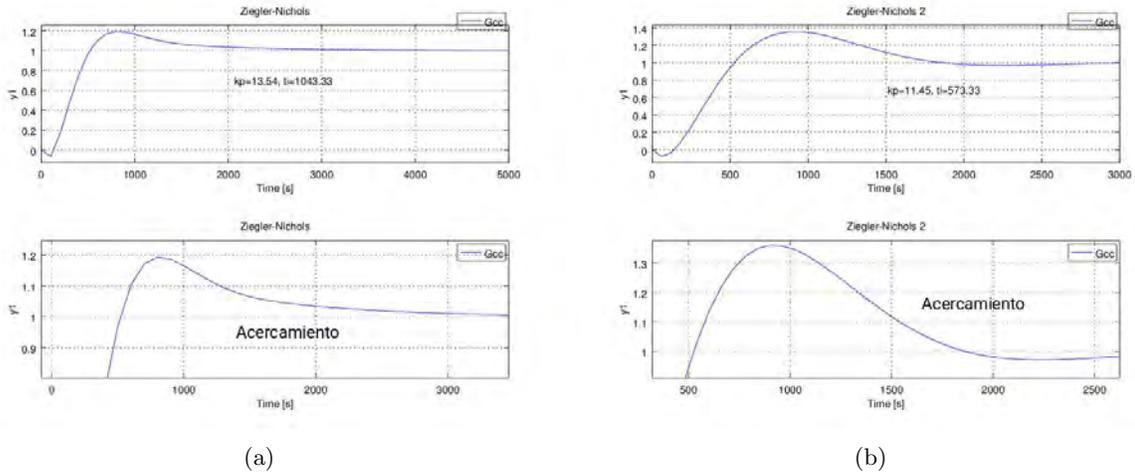
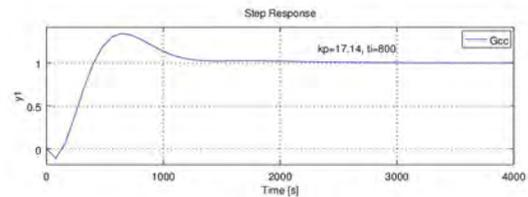
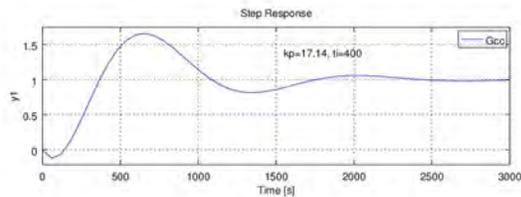
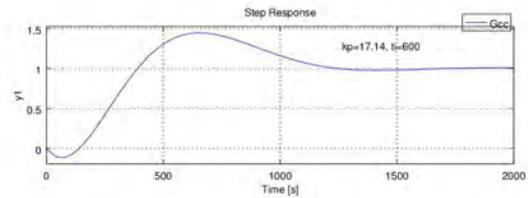
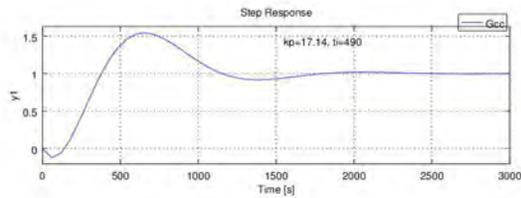
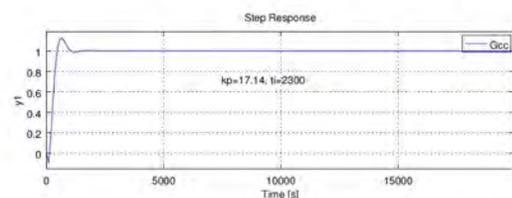
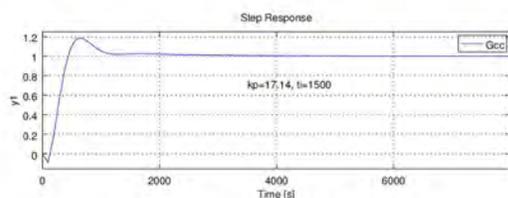
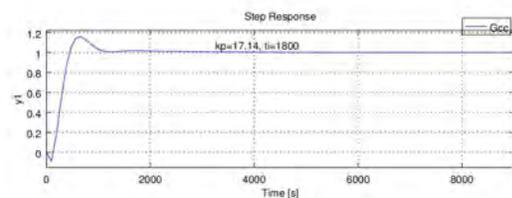
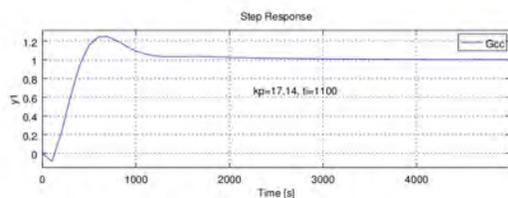
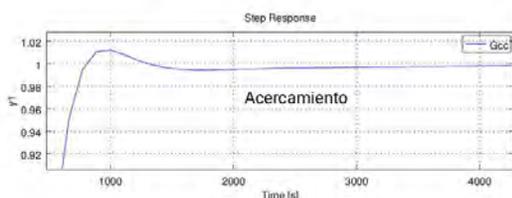
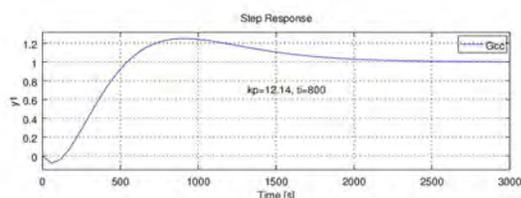
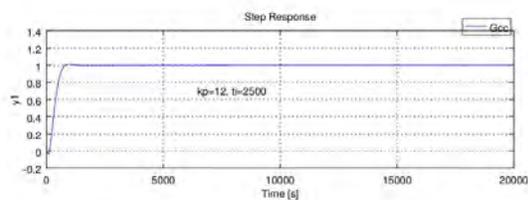
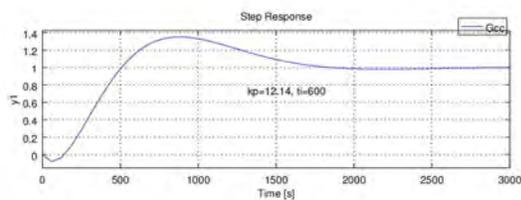


Figura 7.16. Simulación de control Proporcional Integral de los valores obtenidos por el método de reacción para calentamiento. (a) $k_p = 13.54$ $t_i = 1043.33$, valores de la tabla 7.2, (b) $k_p = 11.45$ $t_i = 573.33$, valores de la tabla 7.2

En las siguientes se incrementó el valor de t_i pero aún tiene un gran sobre paso, y se está haciendo crecer mucho el valor de t_i , se consideró el disminuir el valor de la k_p , ya que se observa que conforme se esta haciendo aumentar el valor de t_i , se hace disminuir el sobrepaso pero también se va incrementando el tiempo en que se estabiliza figura 7.17c y 7.17d.

Se disminuye el valor de k_p a 12 y se prueban valores de t_i figura 7.17e, se nota que cuando se aumenta el valor de t_i , le toma más tiempo en estabilizarse, pero si es suficiente mente grande el valor, el sobre paso es muy pequeño, pudiendo llegar a ser menor al 2% para un t_i de 2500 figura 7.17f. Con estos valores se pasa a la simulación de la parte PID.

Simulación de control Proporcional Integral Derivativo. de los valores obtenidos a partir del método de reacción mostrándose el resultado en la figura 7.18, se compara el la respuesta entre un PI y un PID figure 7.19, luego se ajusto la respuesta como se ve en la figura 7.20.

(a) $k_p = 17.14$ con $t_i = 490$, $t_i = 400$ (b) $t_i = 600$, $t_i = 800$ (c) $t_i = 1100$, $t_i = 1500$ (d) $t_i = 1800$, $t_i = 2300$ (e) $k_p = 12.14$ $t_i = 600$ y 800 (f) $k_p = 12$ $t_i = 2500$ **Figura 7.17.** Simulación de control Proporcional Integral para calentamiento

Se observa que al meter la parte diferencial, la respuesta se suaviza, y entre más grande sea el valor de la parte derivativa, es un poco más lenta la respuesta figura 7.19, aunque se note muy poco el cambio con grandes cambios en el valor de t_d .

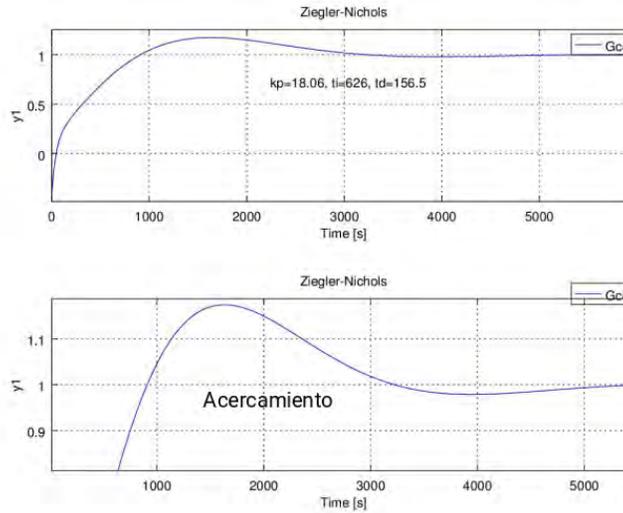


Figura 7.18. Simulación del control PID para calentamiento. Con $k_p = 18.06$ $t_i = 626$ $t_d = 156.5$, valores de la tabla 7.2

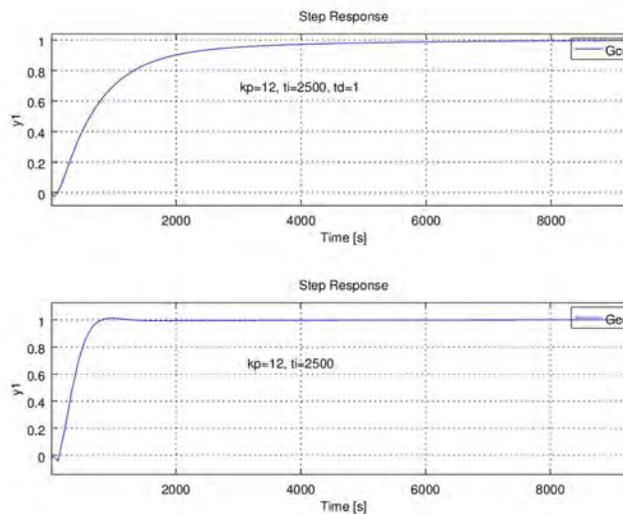


Figura 7.19. Comparación del comportamiento entre el PI y el PID para calentamiento con $k_p = 12$ $t_i = 2500$ y $t_d = 1$.

El agregar la parte diferencial permite aumentar la ganancia de k_p figura 7.20a y disminuir el valor de t_i figura 7.20b, y en la figura 7.20d, se reduce el valor de t_d , el cual entre más pequeño, el sistema es un poco más rápido en llegar al valor del set point. Con éstos se llega a valores de $k_p = 23$, $t_i = 1800$, $t_d = 0.1$ en los cuales responde mejor el sistema.

Se obtuvo una respuesta mucho más estable y suave del sistema, pudiendo observarse en las simulaciones con un sobre paso menor al 2%. Como se mencionó en el capítulo 5, cuando se habló de las acciones de control, se puede ver que si se tiene sólo la parte proporcional no se llega al valor del set point, y al agregar la parte integral, se observa que esto si se logra, pero se tenía un sobrepaso que se pudo disminuir al agregar la parte diferencial. Con estos valores se implementó el control digital PID.

La implementación fue la siguiente:

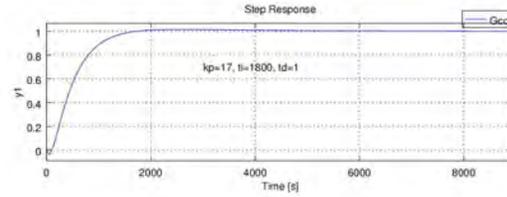
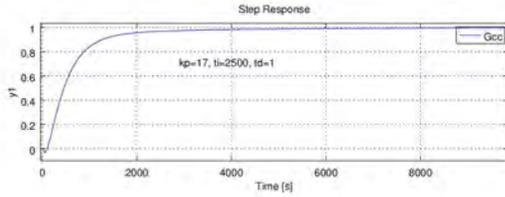
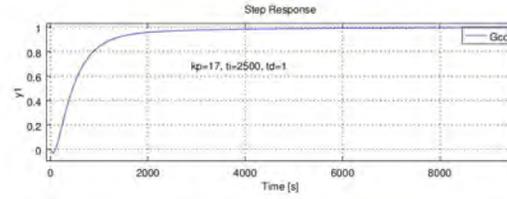
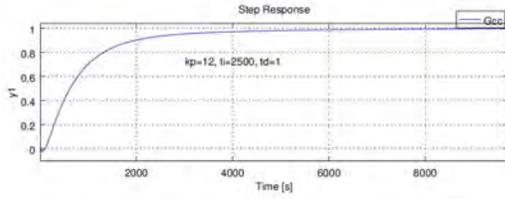
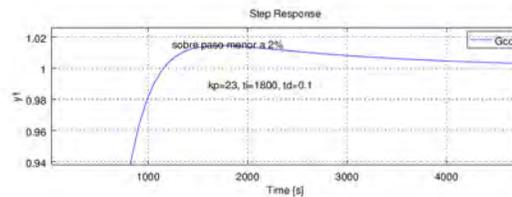
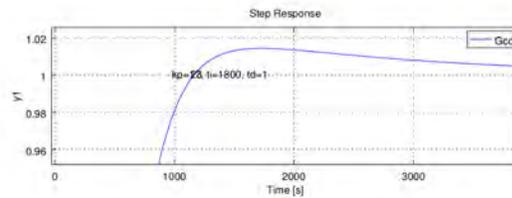
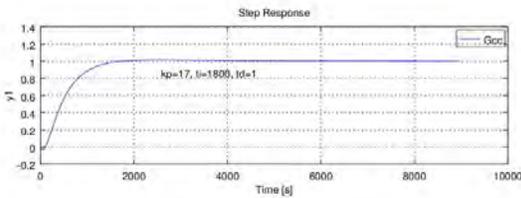
(a) $k_p = 17$ (b) $t_i = 1800$ (c) $k_p = 17$ $t_i = 1800$ $t_d = 1$ (d) $k_p = 23$ $t_i = 1800$ se reduce t_d de 1 a 0.1

Figura 7.20. Simulación del control PID para el calentamiento. (a) Se aumenta la ganancia proporcional $k_p = 17$, (b) Se reduce el tiempo integral a $t_i = 1800$, (c) Con $k_p = 17$ $t_i = 1800$ $t_d = 1$, (d) Se reduce con $k_p = 23$ $t_i = 1800$ t_d de 1 a 0.1

Algoritmo

Configuración e inicialización.

Inicia con el puente H desactivado.

1.-Mide la temperatura del sistema.

2.-Despliega la temperatura y solicita el set point.

3.-Calcula el error.

- $e_1 = r - y_0$; donde y_0 es la medida de la temperatura y r el set point deseado.

4.-Solicita las constantes para el controlador (K_p, t_i, t_d).

5.-Segun el signo del error calculado, determina si calienta o enfría.

if error > 0

- activa las salidas del puente h que calientan.

else

- activa las salidas del puente h que enfría.

6.-Calcula las ganancias con las constantes de control ingresadas (k_i, k_d).

- $k_d = \frac{(k_p * t_d)}{0,001}$; cálculo de las ganancias derivativa e integral.

- $k_i = \left(\frac{k_p}{t_i}\right) * 0,001$;

- 7.-Asigna el valor de error como error anterior.
 - $e_0 = e_1$;
- 8.-Mide la temperatura actual.
 - y_1
- 9.-Calcula error actual.
 - $e_1 = r - y_1$; error actual.
- 10.-Cálculo la diferencia de lecturas (anterior y actual, para obtener la diferencia de errores, para la diferencial). 'e'
 - $e = y_0 - y_1$;
- 11.-Cálculo la suma de los errores (para la parte integral). 'ae'
 - $ae = e_1 + e_0$;
- 12.-Se calculan la parte integral, derivativa y proporcional del control.
 Se limita el calculo de I.
 - Se calcula si la señal de control, en valor absoluto es menor a 255 (maximo de salida de pwm)
 O si la suma de los errores > 0 y se esta enfriando
 O si la suma de los errores es < 0 y se esta calentando
 - $I = I + ki(\frac{ae}{2})$
 - $d = kp * e$
 - $P = kp * e_1$
- 13.-Se calcula el valor de la señal de control.
 - $U = P + I + d$
- 14.-Si ha transcurrido un segundo.
 - imprime los valores de U,P,I,D, error actual, pwm y temperatura (cada uno de los sensores, 4 en total).
- 15.-Calienta o enfría de acuerdo al valor de U.
 if $U > 0$
 - entonces calienta activando las salidas del puente h
 else
 - entonces enfría activando las salidas del puente h
- 17.- Determinar el valor de U que pasara al pwm.
 if $U \geq 255$
 $U = 255$
- 19.- Se carga el valor de U como el valor del pwm.
- 20.- Se actualiza el valor de la lectura anterior con el valor de la lectura actual que se leyo.
 - $y_0 = y_1$;
- 21.- 1ms para volver a calcular los valores de las variables.
- 22.- Regresa a asignar el valor del error (Paso 7).

La salida de control se limita al valor del pwm, siendo el máximo de 255, y el mínimo de 0. * Para cada lectura de temperatura se hacen 128 mediciones.

7.3. Control del elemento de enfriamiento

Similar al trabajo realizado para el control de calentamiento, se siguió el procedimiento para la obtención de los parámetros del controlador, por el método de Ziegler-Nichols y Cohen-Coon, y con el tiempo establecido para las pruebas se trabajo para la obtención del control de enfriamiento.

Las entradas escalón fueron de las mismas magnitudes que en el caso de la obtención del control de calentamiento. Teniendo un escalón de 77 (escalón 1), otro de 154 (escalón 2) y un tercero de 231

(escalón 3). Y al aplicar las entradas escalón al sistema, se obtuvieron las gráficas mostradas en la figura 7.21.

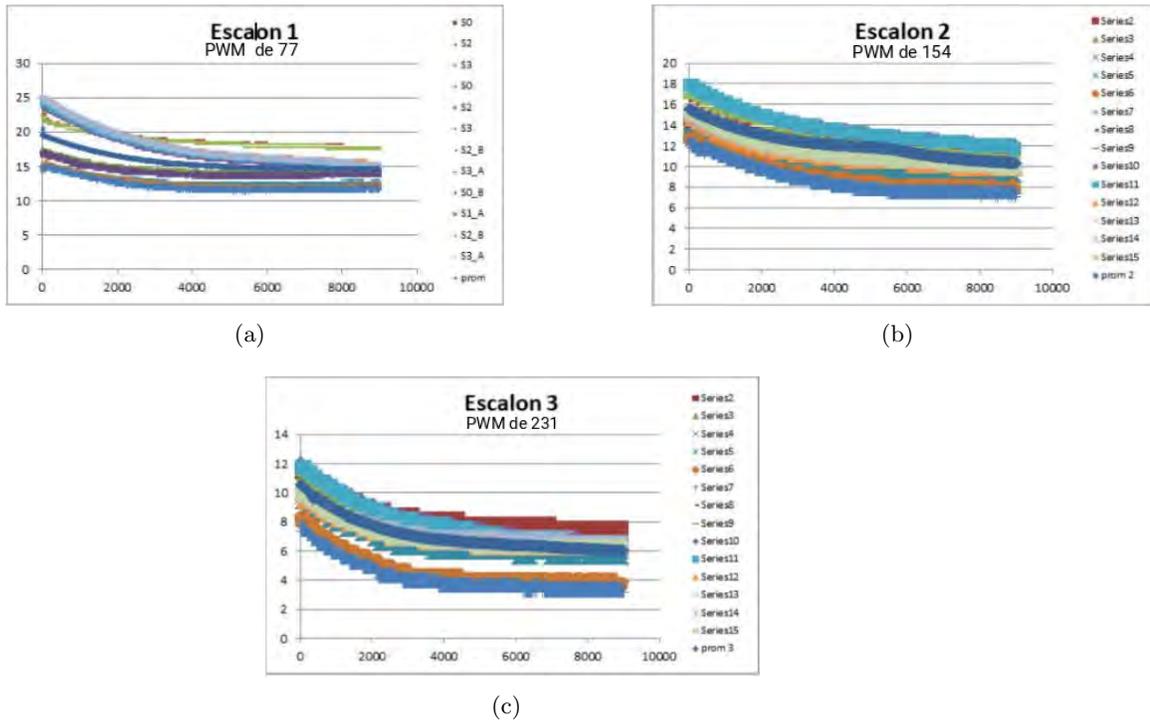


Figura 7.21. Respuesta del sistema a los escalones, mientras la celda enfría. (a) pwm de 77, (b) pwm de 154, (c) pwm de 231

Se puede ver que conforme se quiere llegar a menor temperatura, es menor el cambio de temperatura que se logra con la celda, al aumentar el escalón. Lo que muestra que cuesta cada vez más trabajo el llegar a temperaturas más bajas figura 7.22.

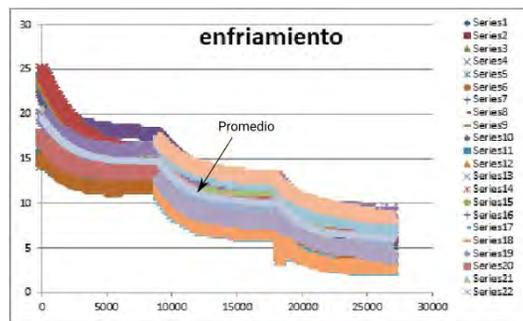


Figura 7.22. Gráfica de los tres escalones de enfriamiento y el promedio de ellos

En la Gráfica de la figura 7.23, se observa ya los valores promediados de todos los escalones normalizados, a partir de esta se obtuvo la información para generar la tabla 7.3.

Así como también la obtención de un modelo matemático que representa al sistema, obteniéndose:

$$e^{ST_d} \frac{K}{1 + ST} = \frac{1 - S \frac{135}{2}}{1 + S \frac{135}{2}} \frac{0,21}{1 + S2044}$$

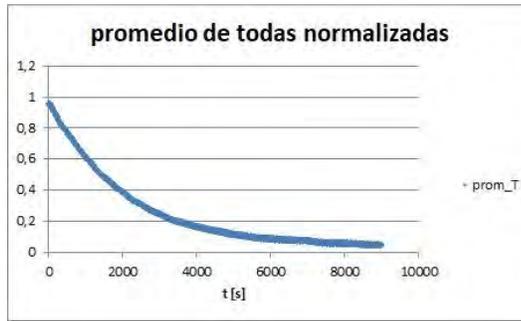


Figura 7.23. Promedio de la respuesta normalizada para todos los escalones para el enfriamiento

Parámetro	Enfriamiento
t0	135
t1	229
t2	6087
Tr	4430
K0	0,21
T0	94
Y0	5858
Tao	2044

Tabla 7.3. Parámetros de enfriamiento

	Z-N	C-C
Kp	19,34	14,14
	17,41	12,73
	23,21	16,97
Ti	763,33	450
	458	3818
Td	114,5	954,5

P
PI
PID

Tabla 7.4. Parámetros para el controlador por Ziegler-Nichols y Cohen-Coon para el enfriamiento

Con el modelo matemático y con la tabla 7.4 se simuló en Octave generando la ecuación para el sistema (figura 7.24).

$$\frac{-14,17 s + 0,21}{1,38e+05 s^2 + 2112 s + 1}$$

Figura 7.24. Ecuación del sistema obtenida con Octave para el enfriamiento

Simulación de control Proporcional. En la figura 7.25, se muestra la respuesta de la simulación de los valores obtenidos por el método de reacción, que se encuentran en la tabla 7.4.

Simulación para ajustar la respuesta de la parte proporcional del control. En la figura 7.26, se ajustaron los valores de respuesta, obteniéndose el valor de $k_p = 45$, con el que se obtuvo una mejor respuesta, presentando un menor sobrepaso, figura 7.26b.

Simulación de control Proporcional Integral. En la figura 7.27, se muestra la respuesta de la simulación de los valores obtenidos por el método de reacción, que se encuentran en la tabla 7.4.

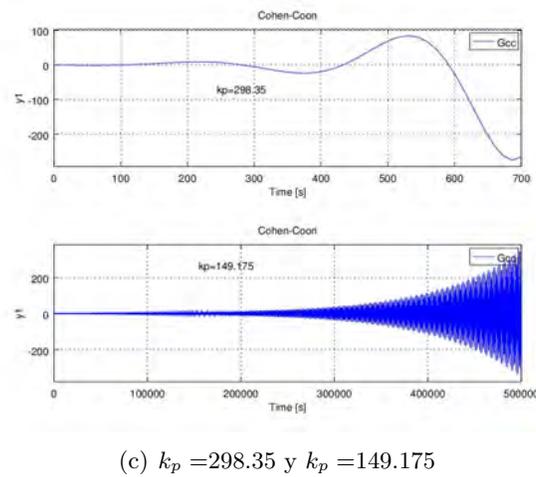
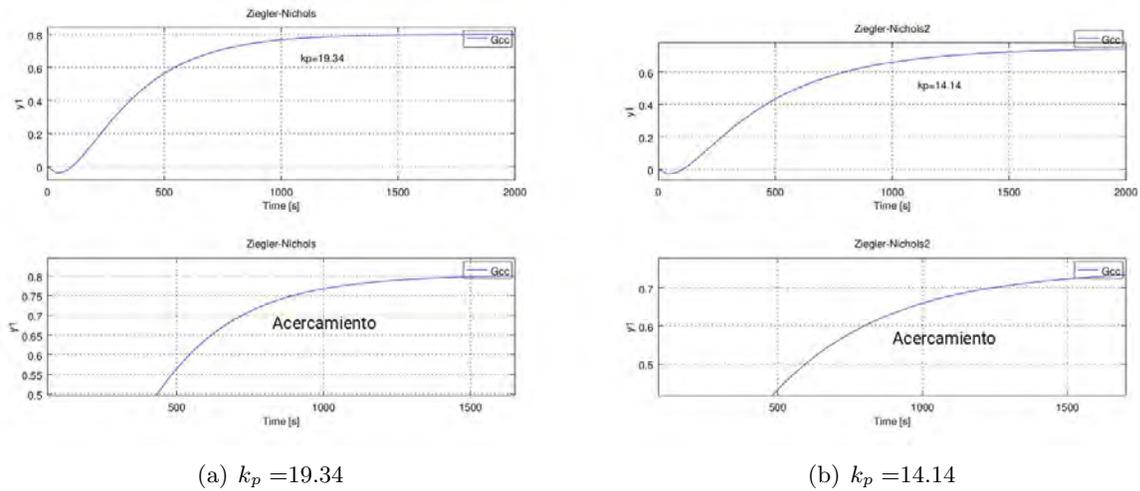


Figura 7.25. Simulación de los valores obtenidos por los métodos de reacción para el enfriamiento. (a) Ziegler-Nichols con $k_p = 19.34$, (b) Ziegler-Nichols con $k_p = 14.14$, (c) Cohen-Coon con $k_p = 298.35$ y $k_p = 149.175$

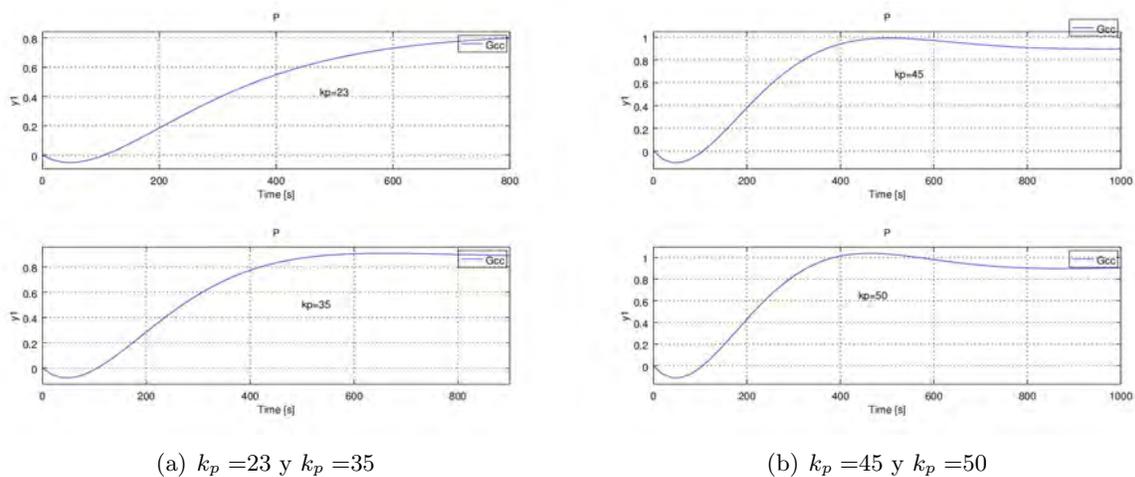


Figura 7.26. Simulación de control proporcional para el enfriamiento

Y en la figura 7.28, se muestran los ajustes para mejorar la respuesta del PI.

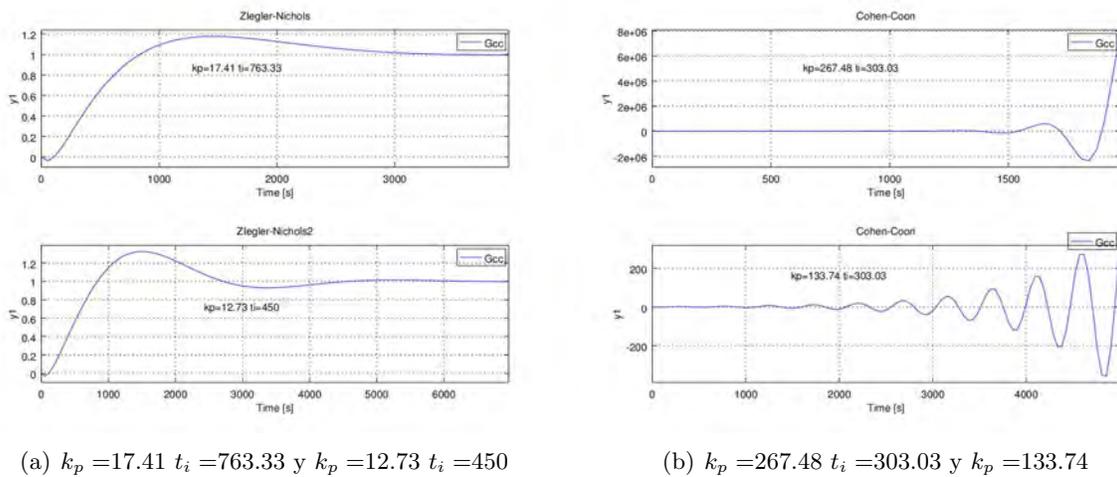


Figura 7.27. Simulación de los valores obtenidos por el método de reacción para el enfriamiento. (a) Ziegler-Nichols $k_p = 17.41$ $t_i = 763.33$ y $k_p = 12.73$ $t_i = 450$, (b) Cohen-Coon $k_p = 267.48$ $t_i = 303.03$ y $k_p = 133.74$

Simulaciones PI para ajustar.

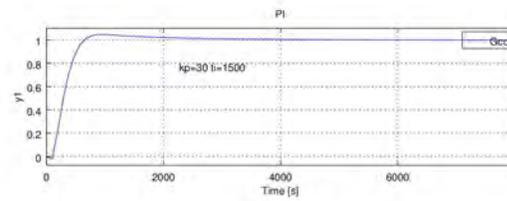
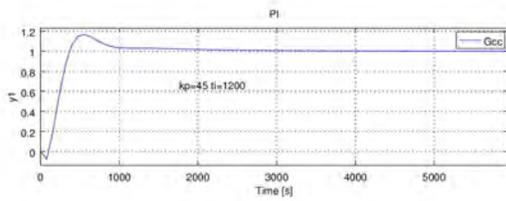
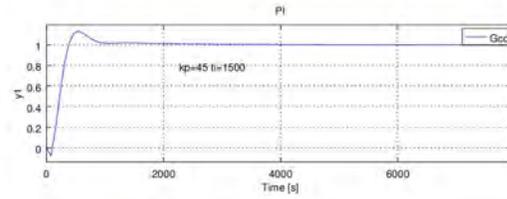
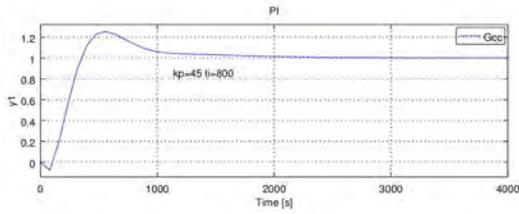
En la figura 7.28 ajusto la respuesta, partiendo del valor de $k_p = 45$, que se obtuvo en el ajuste de la parte proporcional.

Se observa que la ganancia proporcional parece no requerirse tan grande, pero si el valor integral. Al realizar ajustes se llegó a los valores de $k_p = 28$ y $t_i = 1800$ figura 7.28e.

Simulación de control Proporcional Integral Derivativo. En la figura 7.29, se presenta la respuesta obtenida, con los valores de la tabla 7.4, y se procede a ajustar para mejorar la respuesta del PID.

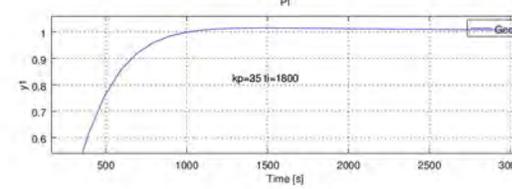
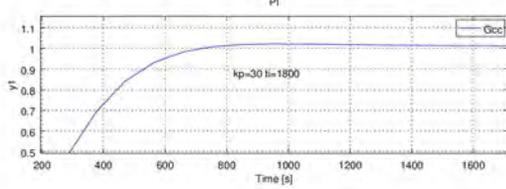
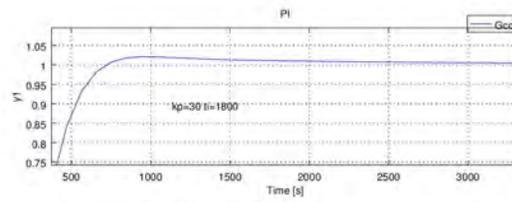
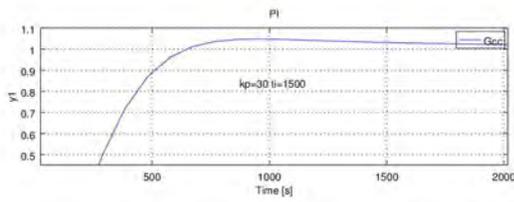
Ajuste de la respuesta PID.

En la figura 7.30, después de pruebas se llegó a estos valores $k_p = 28$ $t_i = 2000$, $t_d = 0.1$ que son los que presentaron una mejor respuesta. teniendo una respuesta con un sobrepaso menor al 2%.



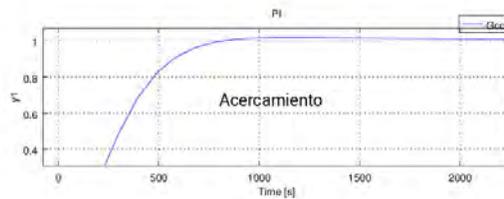
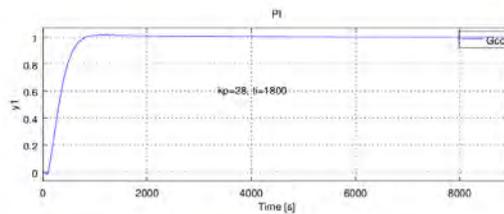
(a) $k_p = 45$ $t_i = 800$ y $t_i = 1200$

(b) $k_p = 45$ $t_i = 1500$ y $k_p = 30$ $t_i = 1500$



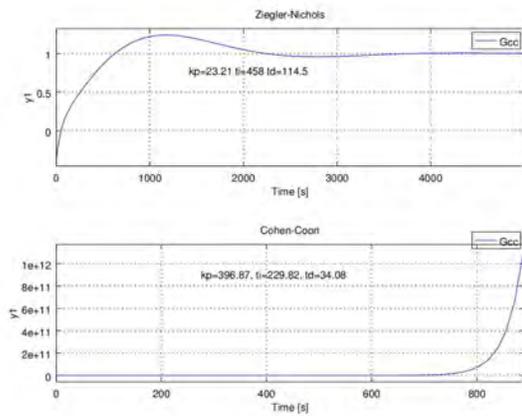
(c) $k_p = 30$ $t_i = 1500$ y $t_i = 1800$

(d) k_p de 30 a 35 y $t_i = 1800$

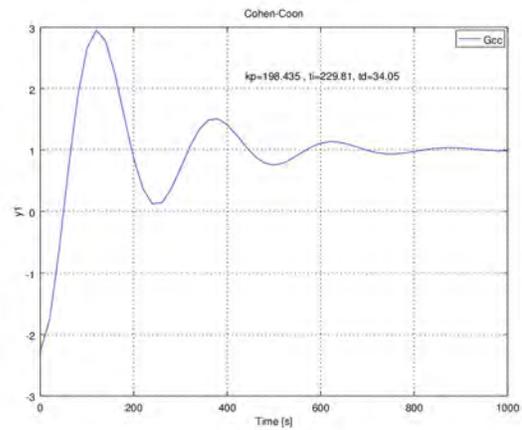


(e) $k_p = 28$ $t_i = 1800$

Figura 7.28. Simulaciones del control PI para el enfriamiento

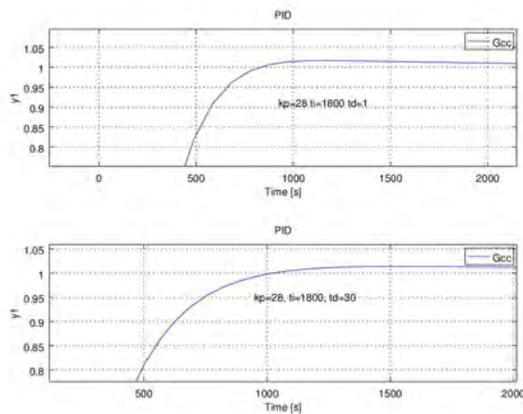


(a)

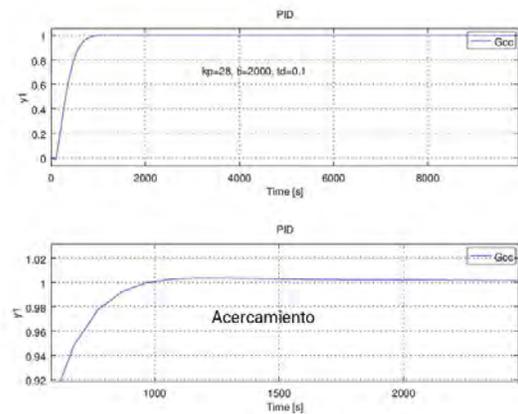


(b) $k_p = 198.435$

Figura 7.29. Simulaciones del control PID para el enfriamiento. (a) PID de los valores obtenidos del método de reacción, (b) Cohen-Coon con $k_p = 198.435$



(a) $k_p = 28$ $t_i = 1800$ $t_d = 1$ y $t_d = 30$



(b) $k_p = 28$ $t_i = 2000$ $t_d = 0.1$

Figura 7.30. Simulación del control PID para el enfriamiento

Capítulo 8

Pruebas de funcionamiento

Prueba de funcionamiento de la celda peltier.

Se realizó una prueba en la que se montó un sensor LM35, en la cara de la celda peltier que enfriaría, otro sensor LM35 se dejó midiendo la temperatura del medio ambiente, para servir de referencia de que tanto bajaba su temperatura con respecto a la ambiente, figura 8.1.

Con esta prueba se verificó que la celda pudiera bajar suficiente su temperatura, logrando que la cara fría de la celda alcanzara cero grados centígrados. Con ésto se ve que puede bajar su temperatura lo suficiente para servir como elemento de enfriamiento del prototipo del calibrador.

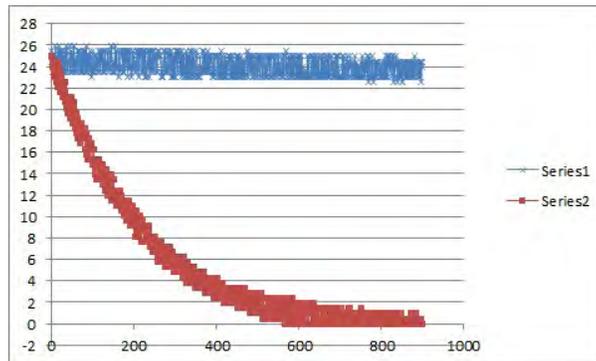


Figura 8.1. Se observa en la línea de color rojo, el comportamiento de la temperatura en la cara que enfría de la celda peltier, solo alimentandola para ver que tan bajo podía llegar, en color azul esta la temperatura del medio ambiente

En el desarrollo para llegar al modelo 3 (figura 6.9), se realizaron pruebas con la celda peltier (figura 8.1). Con los modelos 1 y 2 (figuras de la 6.2 a la 6.8), en estos se hicieron pruebas calentando el aire en el interior.

8.1. Pruebas con el prototipo

Se realizaron pruebas con el modelo 3 para ver el comportamiento del sistema bajo el control (mostradas a partir de la figura 8.3), a partir de la figura 8.19 esta el comportamiento que muestra con los valores optimizados.

Antes de mostrar las pruebas con los valores optimizados, se presentan pruebas que permiten ver el comportamiento del sistema con la variación de los parámetros del control.

En las pruebas se utilizaron cuatro sensores LM35 (S0,S1, S2 y S3), se ubicaron dos de ellos en las caras laterales del equipo, y otros dos dentro de los orificios para calibración figura 8.2.

S0_CB y S1_CA sensores localizados sobre las caras laterales.

S2_B y S3_A sensores que se encuentran en los orificios de calibración.

S_0 fue el sensor empleado como referencia para el controlador.

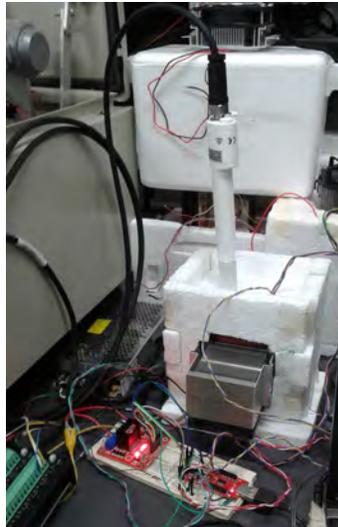


Figura 8.2. Modelo 3 en pruebas

Se consideraron dos casos de funcionamiento.

8.1.1. Casos de funcionamiento

Primer caso

Se aprovecha la capacidad de la celda para enfriar y para calentar, al pasar el set point se invertía el signo de la función de control, debido al cambio de signo en el error. Con esto si el sistema se encontraba calentando, al cambiar de signo (lo que implicaba excedió el valor de set point), se comienza a enfriar para llevar el sistema al set point, y si estuviera enfriando hacia la acción contraria (calentar). La mayoría de las pruebas se realizaron bajo este funcionamiento lo que se observa en las figuras de la 8.3 a la 8.16 y las 8.19 y 8.20.

Se realizaron pruebas con los valores obtenidos por el método de reacción (Ziegler-Nicholes y Cohen-Coon)

La prueba de la figura 8.3, es de calentamiento, duró 50000 [s] (13.8hrs), se inició con una temperatura de 19°C aproximadamente, se asignó un set point de 29.76°C, alcanzando una temperatura máxima de 33°C y demostrando estabilidad figura 8.3b.

Se ve que llega al valor de temperatura que se solicitó de 29.76°C figura 8.3a y 8.3b, su comportamiento ya no varía y se mantuvo el error en ± 1 figura 8.3c.

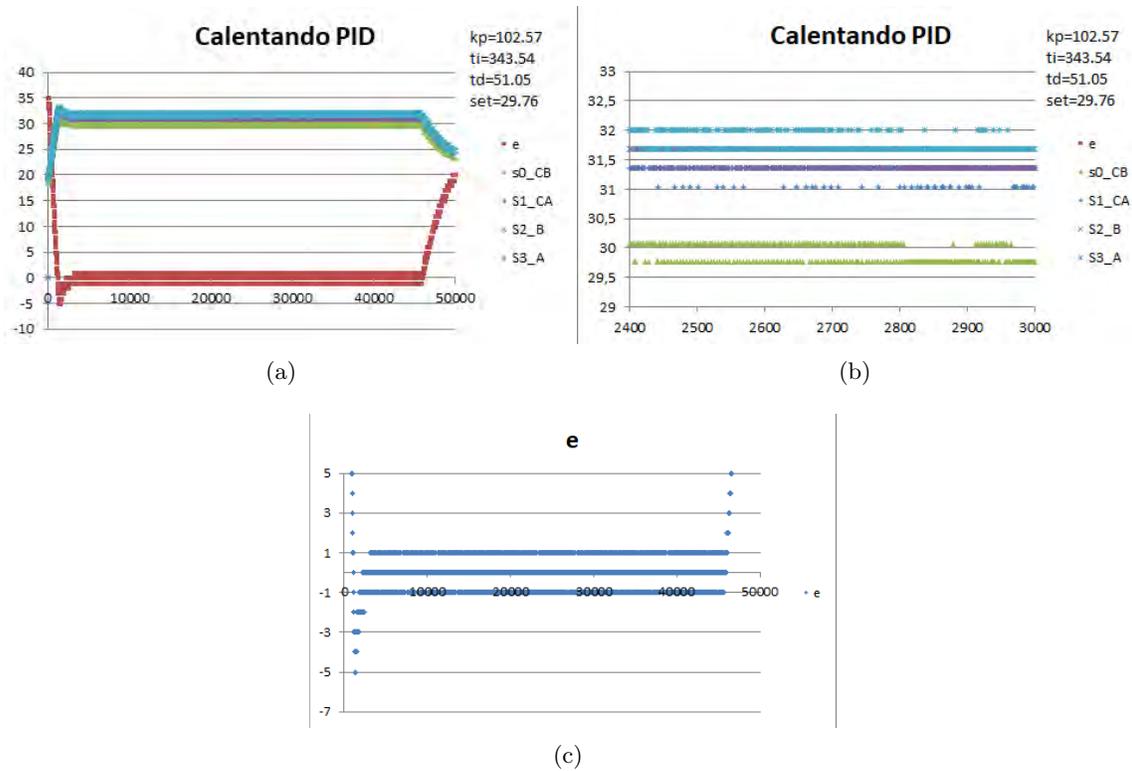


Figura 8.3. Prueba con los valores del método de reacción, el cálculo del error esta en términos del valor de CAD, S0_CB,S1_CA,S2_B,S3_A son los sensores, y el error. **La prueba duró 13hrs con 53 min.** (a) Con $k_p = 102.57$, $t_i = 343.54$ y $t_d = 51.05$ set point = 29.76°C , (b) en este acercamiento se observa que solo oscila entre 30.08 y 29.44°C , (c) el error se mantuvo entre ± 1 .

Se realizaron pruebas para verificar la estabilidad del sistema, suponiendo que el set point era muy cercano al valor actual (figura 8.4). Esto es cuando el error inicial no es muy grande ya que supone condiciones diferentes al comportamiento con un error inicial grande. El set point de la prueba fue de 24°C , mientras el valor inicial fue de 23.3°C aproximadamente.

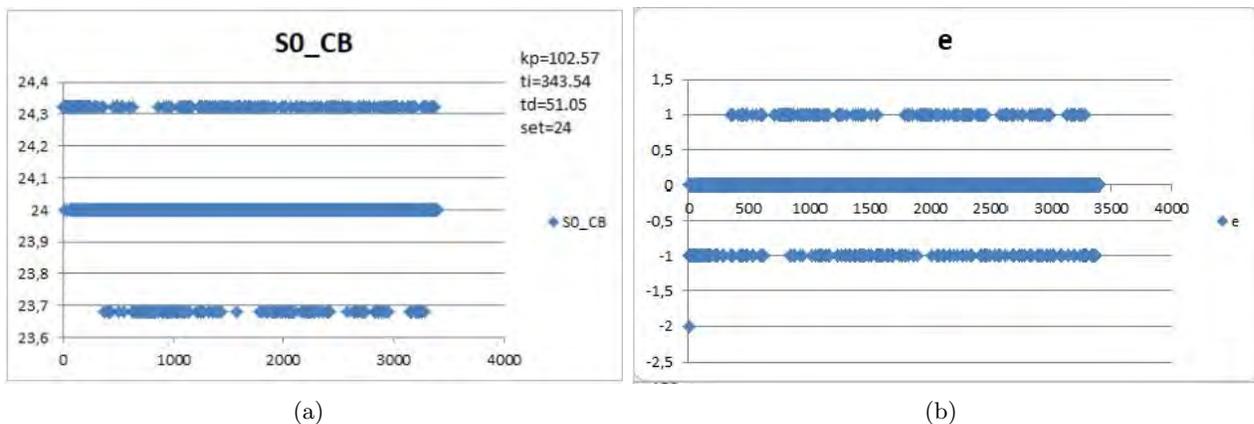


Figura 8.4. Prueba para un valor cercano al valor de temperatura actual, iniciando en 23.3°C y un set point de 24°C . (a) Con $k_p = 102.57$, $t_i = 343.54$ y $t_d = 51.05$, se mantiene entre 23.68 y 24.32°C , (b) el error se mantuvo entre ± 1 .

El error siempre se mantuvo entre ± 1 , ya que en esta implementación el error se calcula como la diferencia entre valores del CAD, siendo el error mínimo que arroja de ± 1 .

Los valores obtenidos por los métodos de reacción son una aproximación, por lo que generalmente requieren ser ajustados para brindar un mejor desempeño. Por ello se realizaron otras pruebas variando los valores obtenidos.

+Prueba de calentamiento.

La prueba de calentamiento duró 6000[s] (1.66 hr), el equipo se calentó con la celda peltier. En las gráficas de la figura 8.5, se dio un set point de 31.68°C , se usaron los valores de $k_p = 42$, $t_i = 490$ y $t_d = 35$, el error se volvió a quedar entre ± 1 , por más de mil lecturas mantuvo su comportamiento.

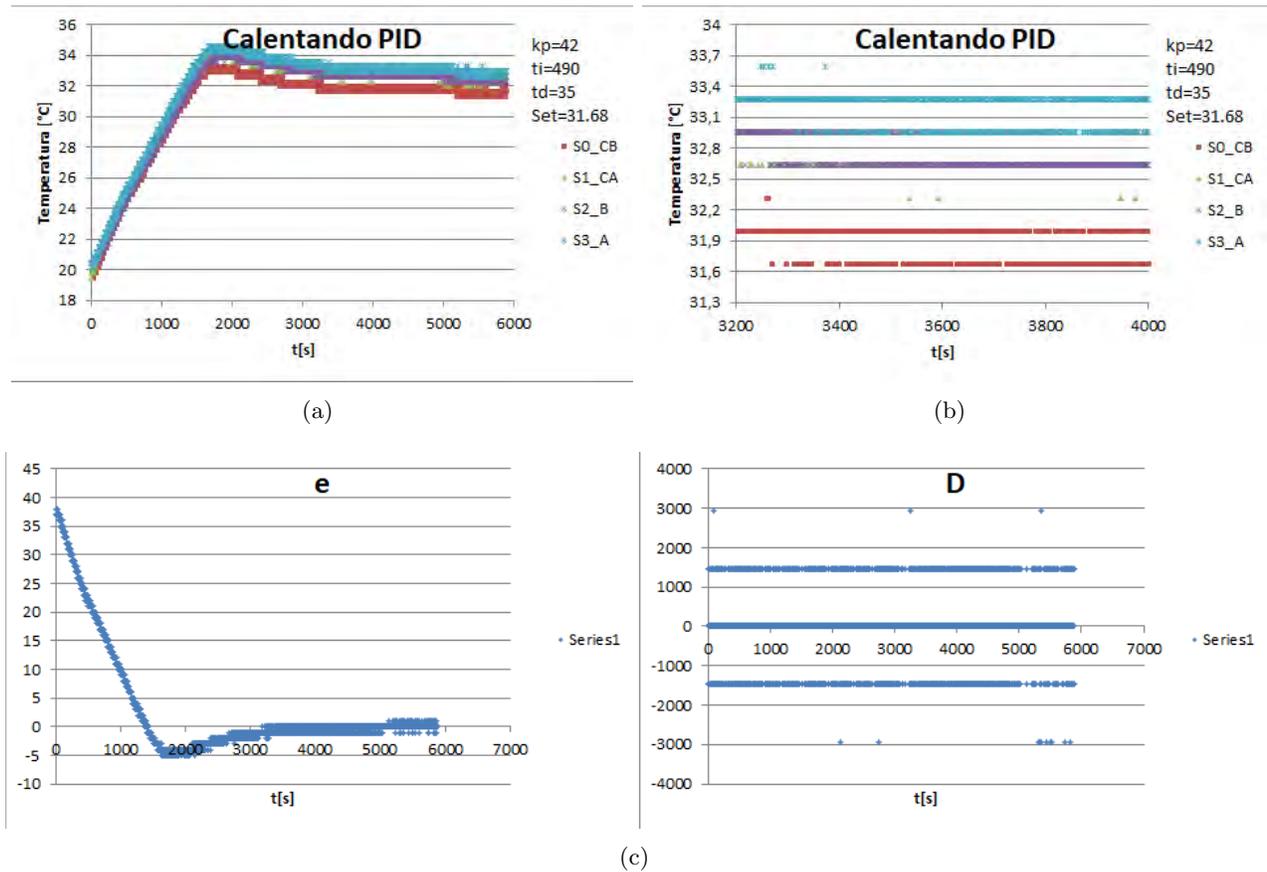


Figura 8.5. Prueba de calentamiento con un PID, el error, y la parte derivativa del control. (a) Con $k_p = 42$, $t_i = 490$, $t_d = 35$, set point= 31.68°C , (b) este acercamiento muestra que se mantiene entre 31.68 y 32°C , (c) se observa el comportamiento del error y de la parte derivativa del control, la cual supera el valor de 255 del pwm.

+Prueba de enfriamiento.

La prueba de enfriamiento duró 6500[s] (1.8hr), el equipo se enfrió con la celda peltier, se emplearon $k_p = 72$, $t_i = 430$ y $t_d = 42$, el set point fue de 19.84°C . Lo que se muestra en las gráficas de la figura 8.6.

Observándose un comportamiento similar a los anteriores, pero le toma más tiempo el estabilizar el comportamiento, llegando a 4000[s] figura 8.6.

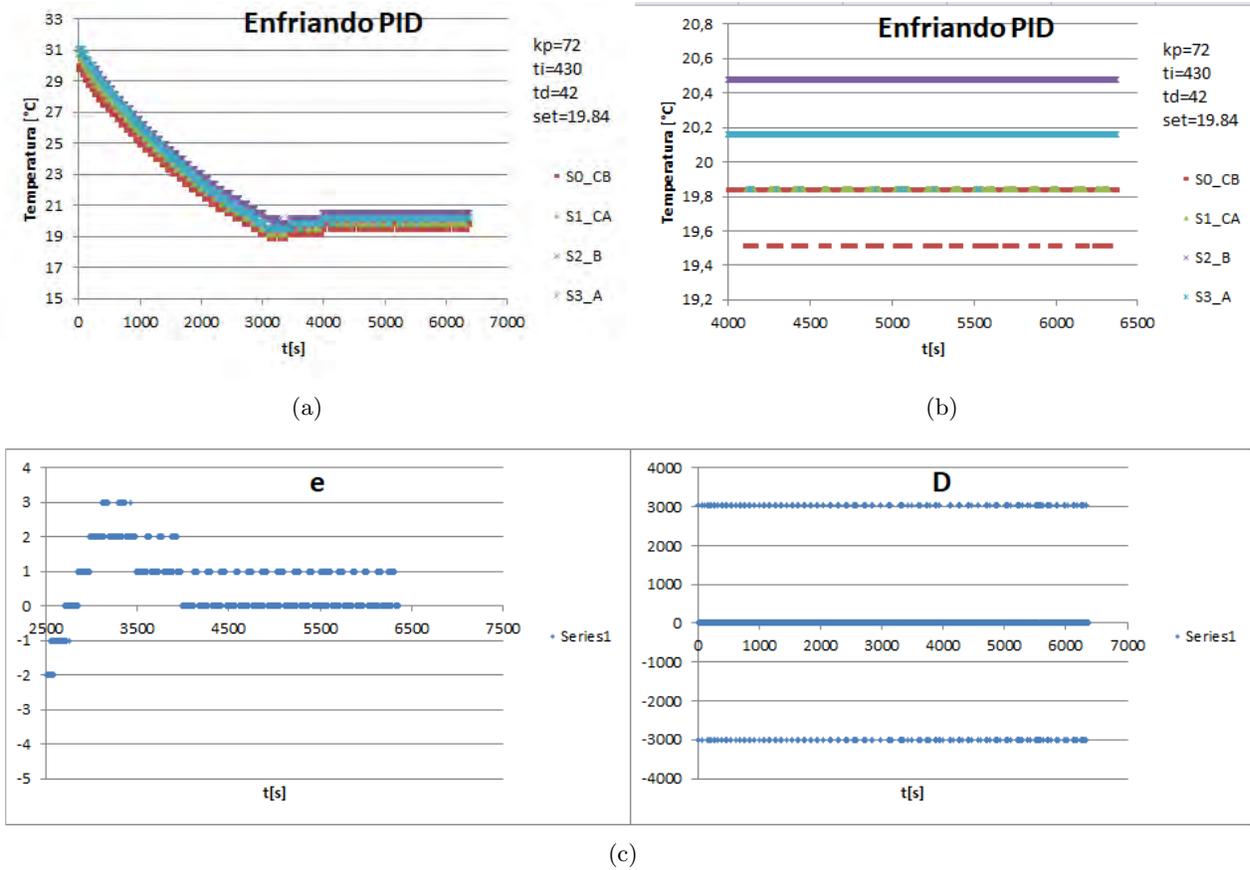


Figura 8.6. Prueba de enfriamiento de PID, el error y la parte derivativa del control. (a) Con $k_p = 72$, $t_i = 430$, $t_d = 42$ set point = 19.84°C, (b) en este acercamiento vemos que se mantiene entre 20.16 y 19.84°C, (c) se observa el comportamiento del error y de la parte derivativa del control, que provoca se sature el pwm.

En las gráficas de la figura 8.7, se observa que el comportamiento sigue siendo estable (figura 8.7a y 8.7b), con los valores $k_p = 102.57$, $t_i = 343.54$, $t_d = 5.05$ y un set point de 17.92°C. Esta prueba duró 7600[s] (2.1hr).

De la misma prueba, en la figura 8.8 se observa que el pwm se encuentra saturado (figura 8.8b).

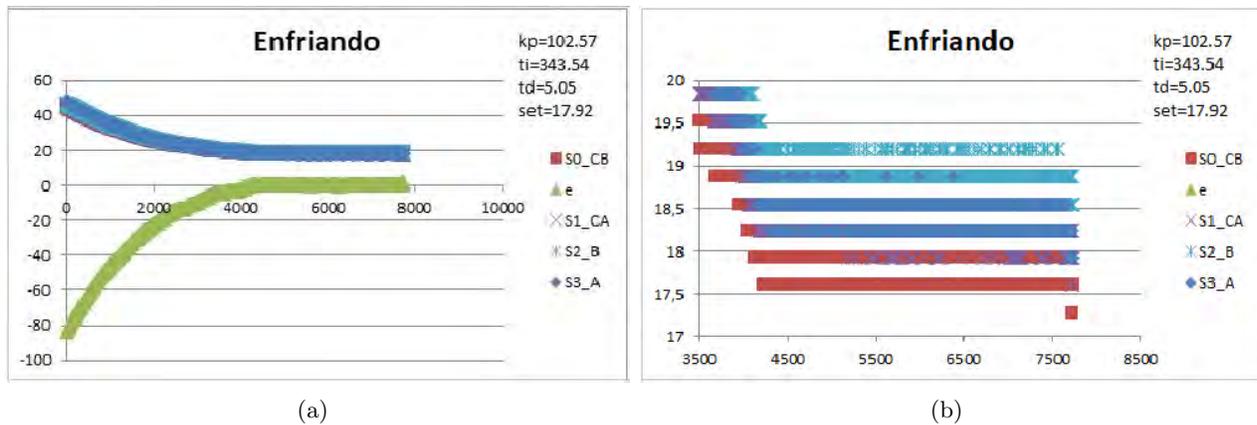


Figura 8.7. Respuesta del sistema enfriando y saturado por la parte derivativa del PID. (a) Comportamiento del sistema y del error 'e', (b) el acercamiento muestra que mantiene entre 17.92 y 17.6°C

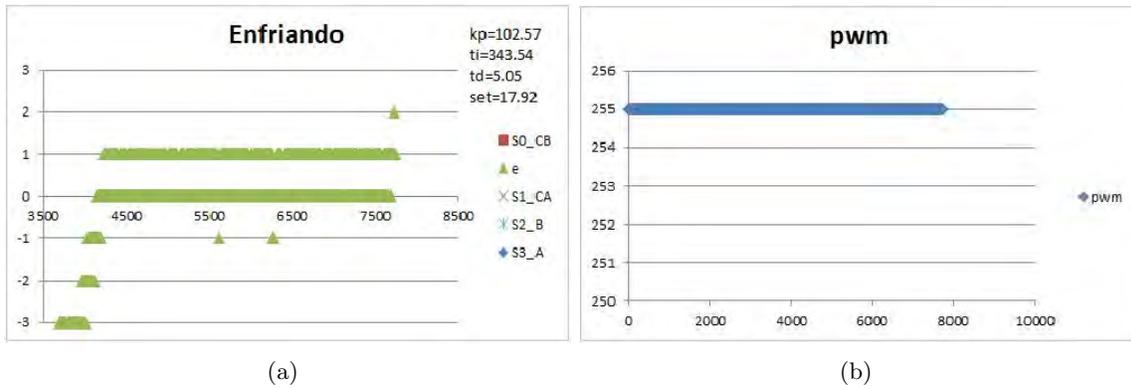


Figura 8.8. El error del sistema y el pwm mientras el sistema enfría. (a) Mantiene un error de ± 1 , (b) el pwm se mantiene saturado por la parte derivativa del PID.

En general en las pruebas realizadas, el sistema tiene una buena respuesta en cuanto a estabilidad, variando en un $\pm 0,32^\circ\text{C}$ como se observa en las figuras: 8.3b, 8.4a, 8.5b, 8.6b y 8.7b.

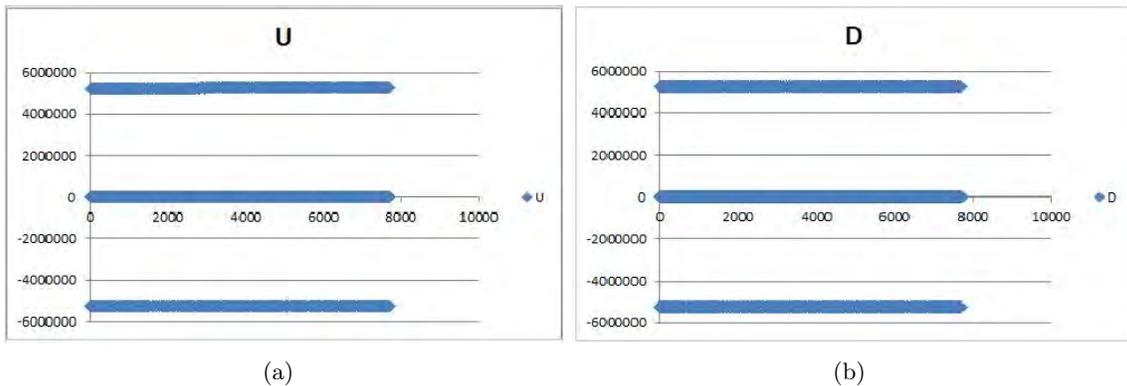


Figura 8.9. Señal de control U y la parte derivativa D del controlador del sistema aplicando un PID mientras el sistema enfría. (a) El valor de la señal de control es muy grande, (b) la señal de la parte derivativa esta saturando el actuador.

Al revisar las gráficas, se ve que la salida de control oscila entre valores muy grandes, ésto debido a la parte derivativa del sistema que está saturando el actuador (figura 8.9a y 8.9b).

Esto provocó un comportamiento de switcheo de la celda Peltier. Al ser esto algo que puede acortar la vida útil de la celda Peltier se trabajó en ajustar los valores de las constantes para tener un valor más pequeño de la parte derivativa, ya que en valores en los que el sistema estaba “estable”, el valor que producía los cambios en su funcionamiento era el valor derivativo.

Esto llevó a tomar la decisión de calcular el error en términos de las temperaturas, para hacer posible que este tomara un valor menor a 1, con esto fue posible reducir el valor del error, y se procedió a ajustar el valor de t_d .

Para ajustar el valor de t_d , se realizaron pruebas para mejorar la respuesta (figura 8.10). Al analizar los valores que tomaba cada parte del control PID, el valor de D era muy grande (figura 8.10c) por lo que se redujo el valor de t_d .

Lo observado en las respuestas de las pruebas (figura 8.10) llevó a ajustar t_d , disminuyendo su valor hasta 0.001 (figura 8.11).

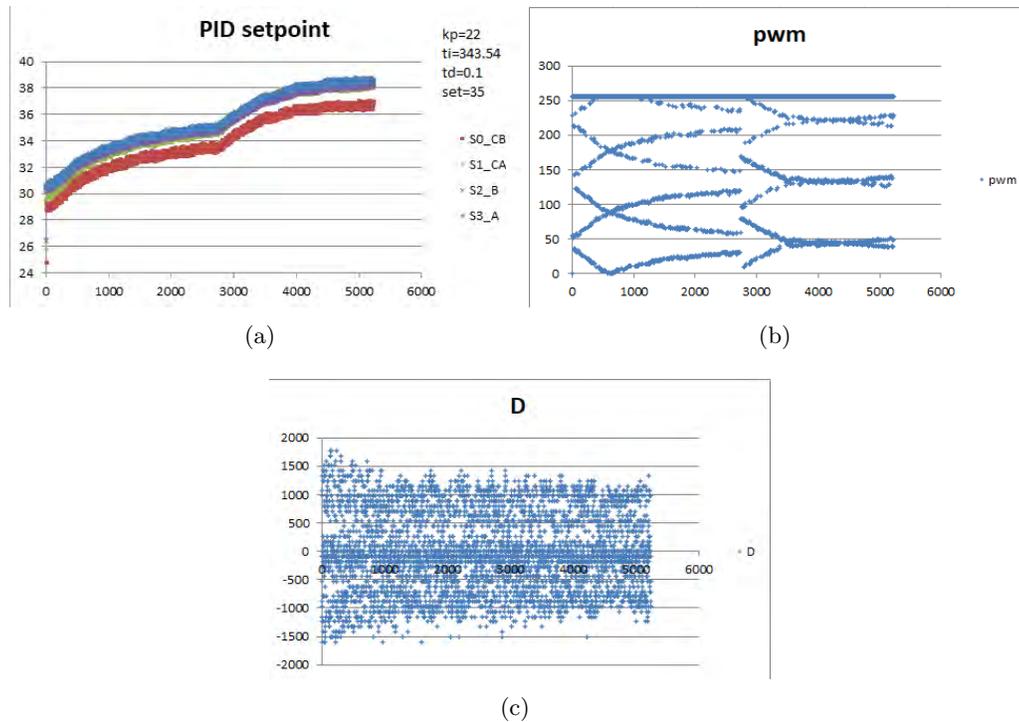


Figura 8.10. Salida del sistema, el pwm y la parte derivativa D que provoca la saturación del pwm. (a) Con $k_p = 22$, $t_i = 343.54$, $t_d = 0.1$ y set point = 35°C , (b) el pwm se satura por el efecto de D, (c) el valor de D es muy grande

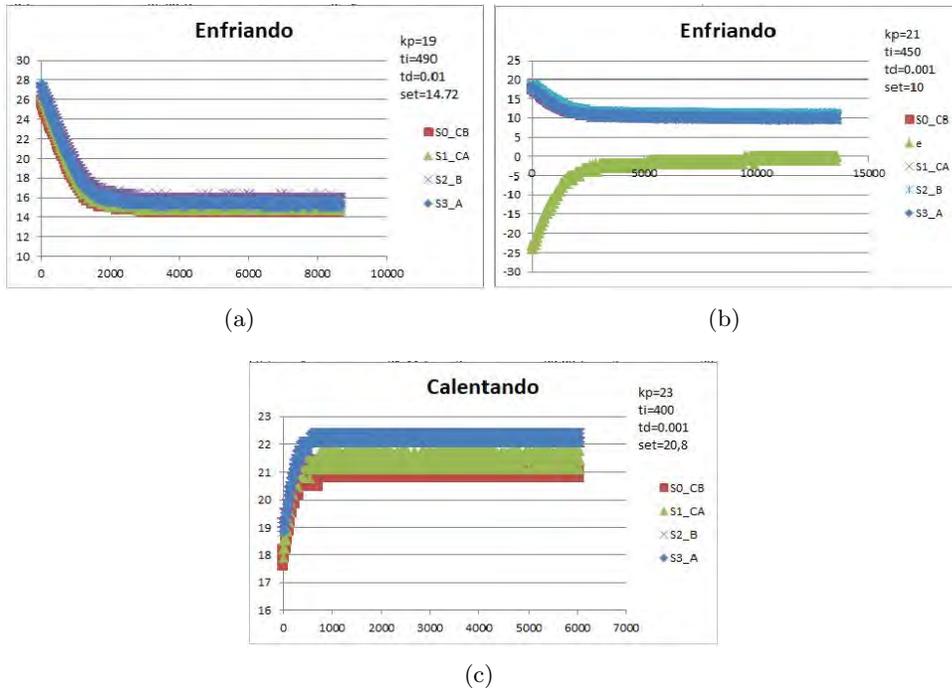


Figura 8.11. Cambio del valor t_d de 0.1 a 0.001 en pruebas de enfriamiento y calentamiento. (a) Con $k_p = 19$, $t_i = 490$, $t_d = 0.01$ y set point de 14.72°C , (b) $k_p = 21$, $t_i = 450$, $t_d = 0.001$ y set point de 10°C , (c) $k_p = 23$, $t_i = 400$, $t_d = 0.001$ y set point de 20.8°C

Se agrego otro sensor a las pruebas, para poder comparar los valores que se obtienen en el sistema con los que da el sensor calibrado, y poder verificar la estabilidad del sistema.

Se hicieron pruebas introduciendo en los orificios de calibración un sensor modelo HMP155 marca VAISALA nuevo (figura 8.12), este sensor se encontraba calibrado, funciona en el rango de -80 a 60°C , de acuerdo a la información de VAISALA trabaja arriba de $20^{\circ}\text{C} \pm (0.055 + 0.0057 \times \text{temp})^{\circ}\text{C}$, y abajo de $20^{\circ}\text{C} \pm (0.226 - 0.0028 \times \text{temp})^{\circ}\text{C}$.

En el rango en el que se trabajó esta alrededor de los $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$. Siendo más preciso que el Lm35.



Figura 8.12. HMP155 de VAISALA

Las gráficas de las pruebas que incluyeron el uso del sensor HMP155, son las de las figuras 8.13 a la figura 8.17.

Las pruebas de las figuras 8.13 y 8.14, duraron 11000[s] (3.05hr) cada una.

La de calentamiento (figura 8.13) con $k_p = 22$, $t_i = 343.54$, $t_d = 0.005$ y un set point de 24°C .

La de enfriamiento (figura 8.14) con $k_p = 37$, $t_i = 400$, $t_d = 0.005$ y dando un set point de 12°C .

En las pruebas se observa que la respuesta del sistema con el sensor LM35 y la que detecta el sensor HMP155, en cuanto a la estabilidad es muy similar tanto para enfriamiento (figura 8.14) como para calentamiento (figura 8.15), siendo un poco más estable la que detecta el HMP155. En el acercamiento (lado derecho) de la figura 8.15a se observa una variación en los sensores de $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$.

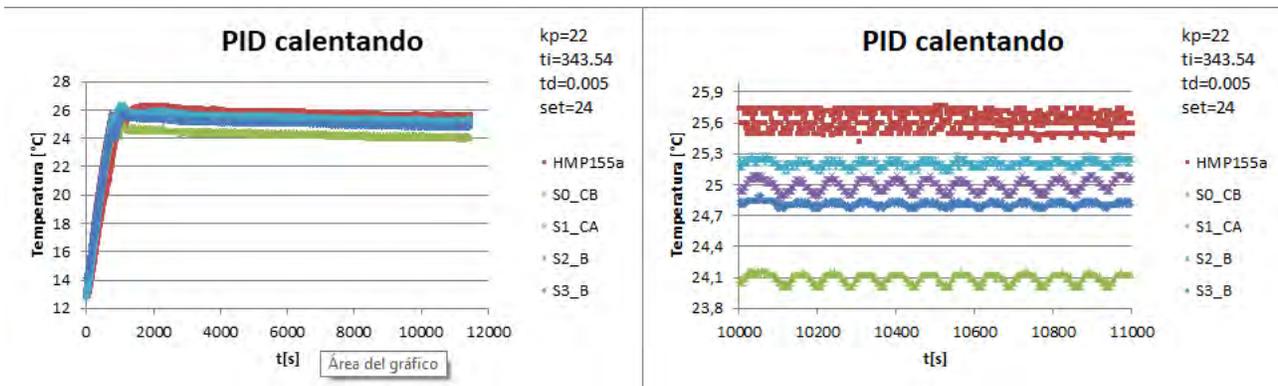


Figura 8.13. PID con HMP155 en el sistema en prueba de calentamiento, la prueba duró 3.05 hr, la gráfica del lado derecho muestra un acercamiento. Con $k_p = 22$, $t_i = 343.54$, $t_d = 0.005$ set point= 24°C .

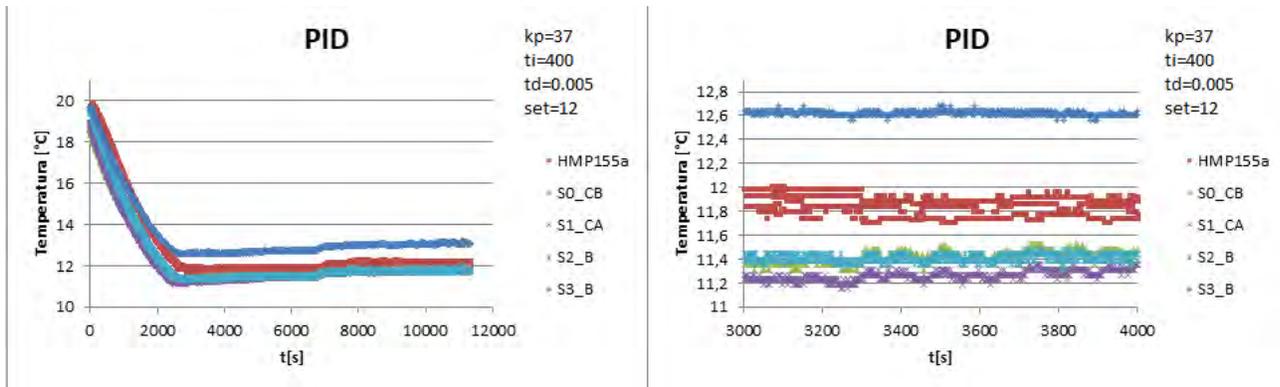
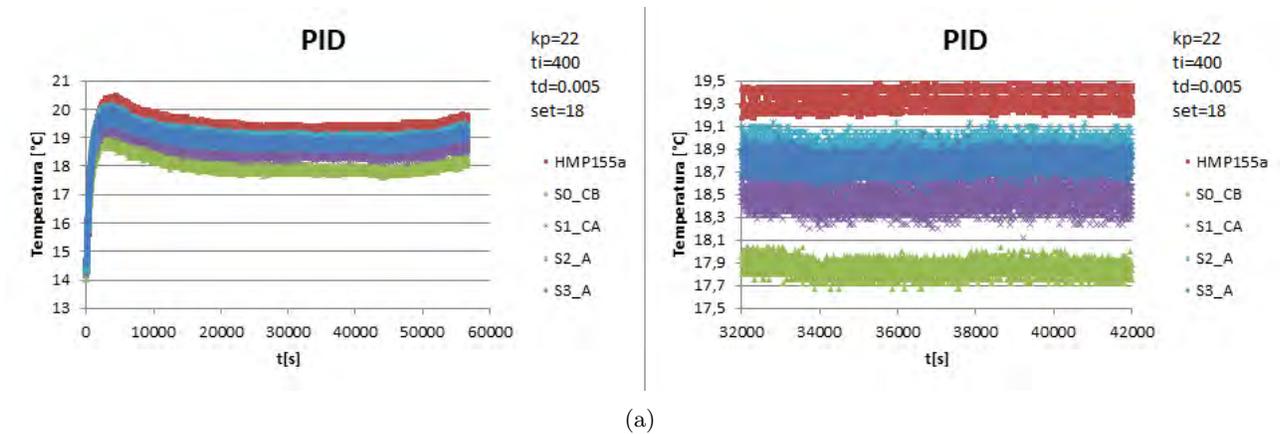
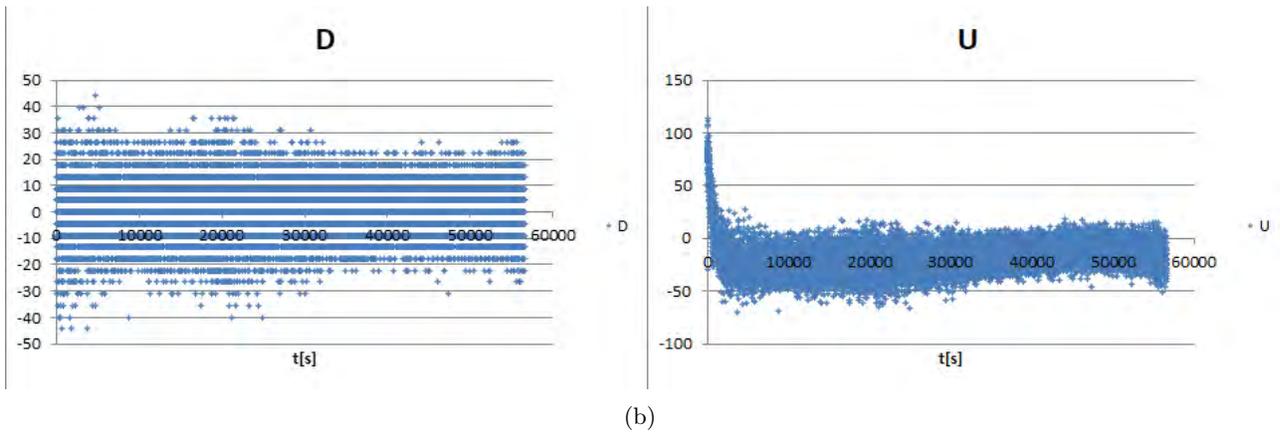


Figura 8.14. PID con HMP155 en el sistema en prueba de enfriamiento, la prueba duró 3.05 hr, la gráfica del lado derecho muestra un acercamiento. Con $k_p = 37$, $t_i = 400$, $t_d = 0.005$ set point = 12°C.



(a)



(b)

Figura 8.15. PID con HMP155 en el sistema calentando, el comportamiento de la parte derivativa D y la señal de control U. (a) Con $k_p = 22$, $t_i = 400$, $t_d = 0.005$ set point = 18°C, **esta prueba duro 15.27 hr**, la imagen del lado derecho muestra un acercamiento, (b) comportamiento de la parte derivativa más reducido, ya no satura el actuador

Se decidió comparar el comportamiento de un PI, se observa que el PI tarda más en tratar de alcanzar el valor deseado en comparación con el PID. Se verificó que el comportamiento del PID es mejor (figura 8.14) que el del PI (figura 8.16), dejando el PID como el control para el funcionamiento del prototipo.

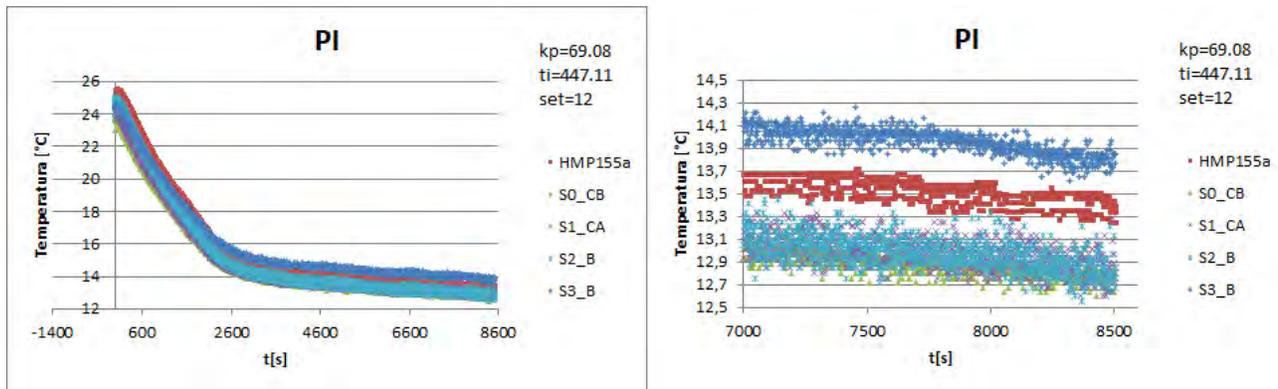


Figura 8.16. Prueba de un PI para controlar el sistema

Segundo caso

En este caso únicamente se enfrió o calentó y al pasar el set point no realizó la acción contraria. En el caso de estar calentando cuando la temperatura superó el valor del set point, se le dio el valor de cero a la salida de control, y volvió a calcularse un valor al regresar la temperatura por debajo del set point.

En el caso de estar enfriando cuando la temperatura llegó a un valor por debajo del set point, se le dio el valor de cero a la salida de control, y volvió a calcularse un valor cuando la temperatura superó el valor del set point. De esto se obtuvo el comportamiento observado en las figuras 8.17 y 8.18.

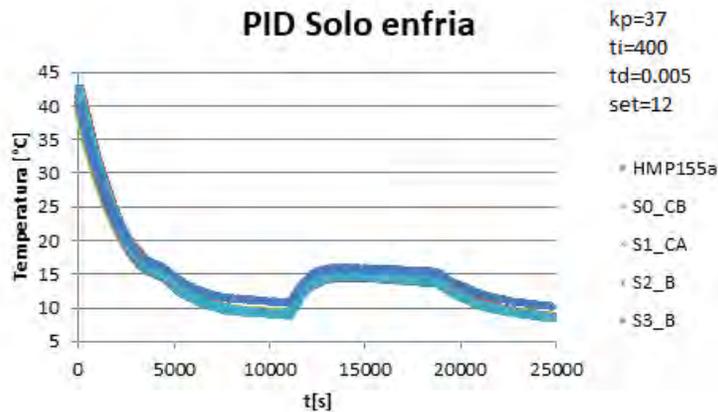


Figura 8.17. Prueba del caso dos enfriando, con $k_p = 37$, $t_i = 400$, $t_d = 0.005$ y set point de 12°C, esta prueba duro 6 hr 56 min.

En la prueba de enfriamiento de la figura 8.17 se observa que si solo enfría es más inestable figura 8.17.

En la prueba de calentamiento de la figura 8.18 se ve que si solo calienta tiene una respuesta más lenta que la que presenta para su funcionamiento para el caso uno.

En ambas pruebas la respuesta del sistema resultó más inestable o más lenta, con esto se ve que el mejor control para el comportamiento deseado es bajo el funcionamiento del primer caso.

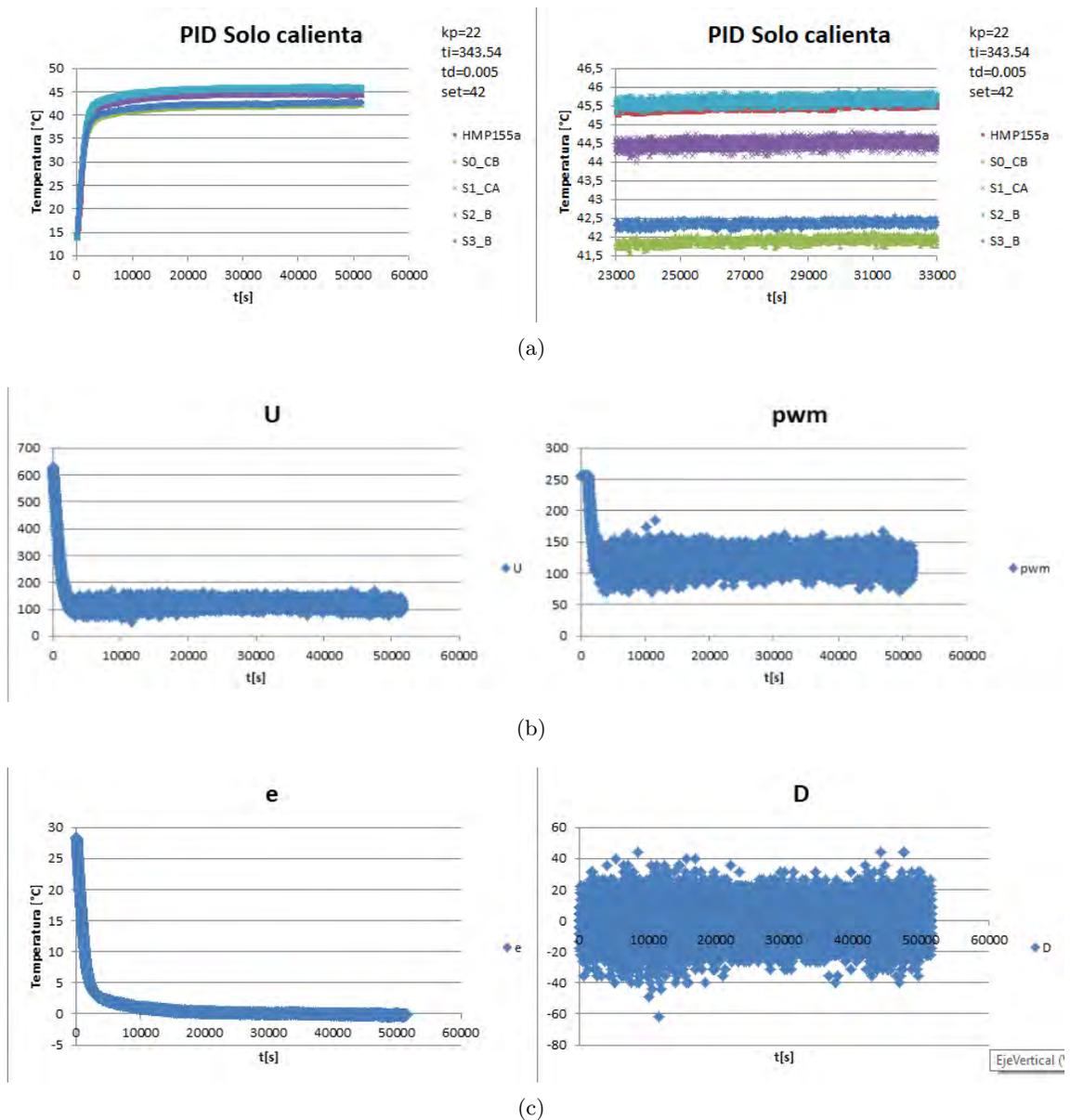


Figura 8.18. Prueba del caso dos calentando. (a) Con $k_p = 22$, $t_i = 343.54$, $t_d = 0.005$ y set point de 42°C , esta prueba duro alrededor de 13hr 53 min., (b) comportamiento de U y el pwm, (c) Comportamiento de e y D

8.1.2. Con valores optimizados

Pruebas con los valores optimizados

Las pruebas realizadas con los valores que se obtuvieron del proceso de sintonización bajo el funcionamiento del primer caso, trabajando en forma automática haciendo que se incremente el set point en 5°C después de 6000[s] (1.66hr) de funcionamiento, con los valores:

- Para el calentamiento $k_p = 23$, $t_i = 1800$, $t_d = 0.005$
- Para el enfriamiento $k_p = 28$, $t_i = 2000$, $t_d = 0.001$

Se realizan pruebas de calentamiento, figuras 8.19 y 8.20 y , realizando un barrido del intervalo de

funcionamiento (figura 8.20). En las pruebas se puede observar, el comportamiento estable del sistema. Aunque en la figura 8.20 la ultima parte, muestra a los sensores en valores distintos, la estabilidad del sistema se mantiene, como se puede apreciar en el acercamiento de los 64500 a los 65000 [s].

En la prueba de la figura 8.19, primero se solicita que baje la temperatura, a 22°C, siendo el set point asignado en 8.19, una vez hecho esto, se incrementa el set point de manera automática, en 5°C, cada cambio de valor del set point, se mantiene durante 6000[s]. Esta prueba se dejo por 8000[s].

En la prueba de la figura 8.20, se pide un set point inicial de 10°C, se deja por 6000[s], y después de eso se incrementa en 5°C el set point. Dejándose durante 19 hrs y 26 min aproximadamente.

En estas ultimas pruebas el comportamiento que se logra es aun mejor que con los primeros valores, mostrando que con estos valores de sintonización el comportamiento del control es mejor.

Se consigue un delta de 0.16°C, en la respuesta del sistema con respecto al valor en que se estabiliza, el comportamiento de U y de D es mucho mejor, ya que el valor de D oscila en valores más pequeños, provocando menos oscilación en el valor de U, en las primeras pruebas el valor de D alcanza valores de ± 40 figura 8.15b, para t_d de 0.005 mientras que en las ultimas esta en ± 10 figura 8.20b, para t_d de 0.001.

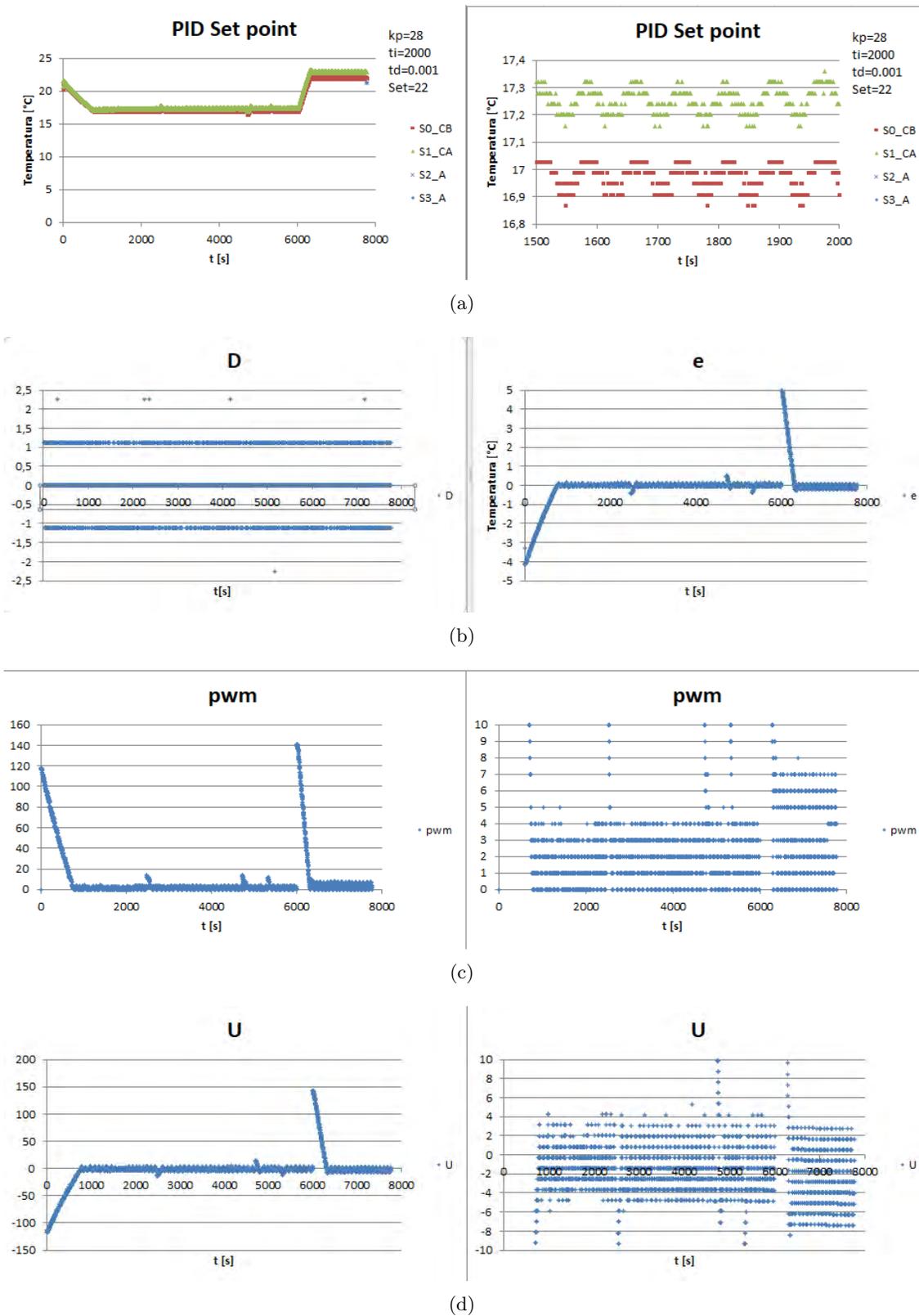


Figura 8.19. Pruebas con valores optimizados primero enfría y después calienta. (a) Con $k_p = 28$, $t_i = 2000$, $t_d = 0.001$ y set point de 22°C, (b) comportamiento de D y el error, (c) comportamiento del pwm, (d) comportamiento de U

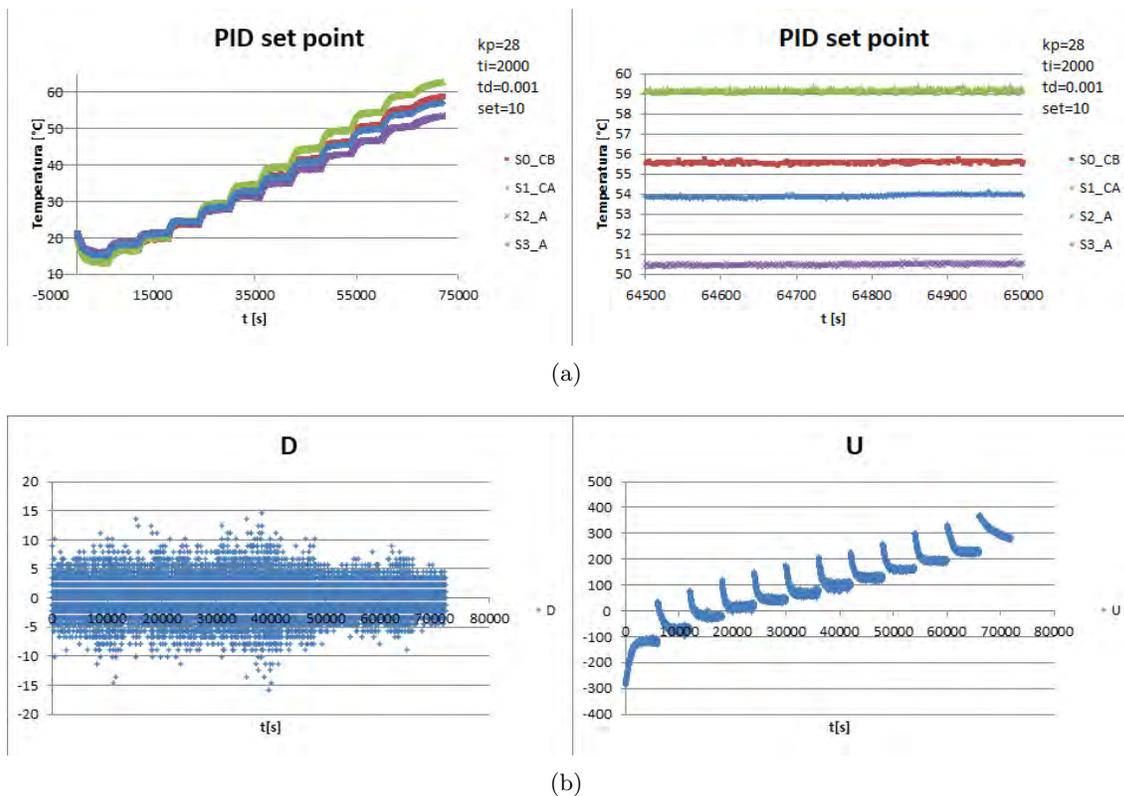


Figura 8.20. Pruebas con valores optimizados de varios escalones con el sistema calentando. (a) Con $k_p = 28$, $t_i = 2000$, $t_d = 0.001$ y set point de 10°C , **esta prueba duro 19.44hrs .**, (b) se ve el comportamiento de la parte derivativa del control que tiene valores que ya no saturan el pwm, y los valores de la salida del control U, para cada cambio de set point.

Capítulo 9

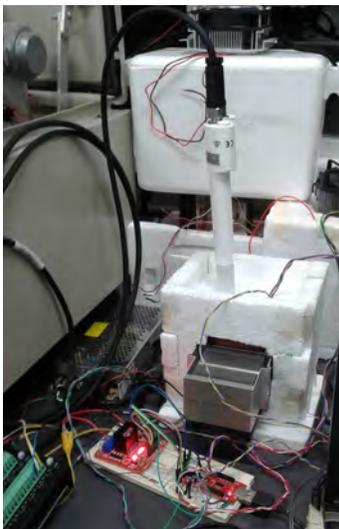
Resultados

Con el desarrollo del presente trabajo se obtuvo un prototipo basado en una celda peltier Tec1-12706, capaz de generar temperaturas en un intervalo de 9°C a 60 °C, y mantenerse en alguna temperatura dentro de este intervalo, con una variación máxima de $\pm 0.2^\circ\text{C}$.

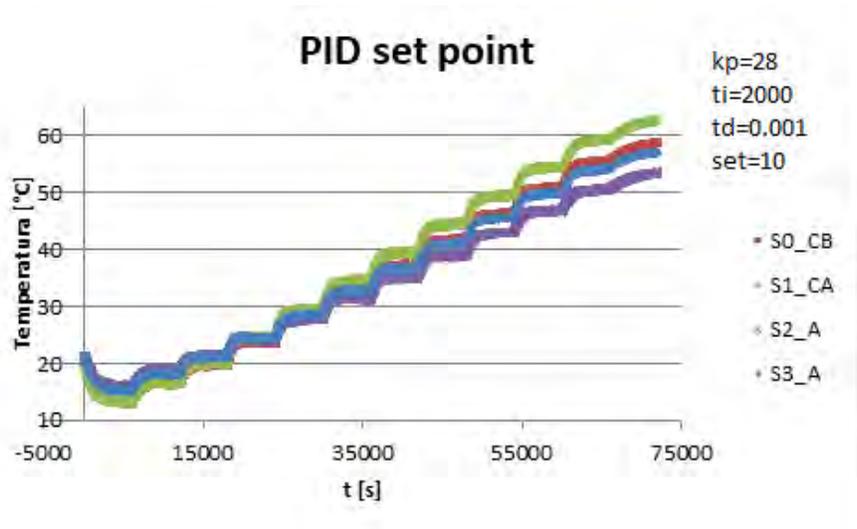
Se optimizó la respuesta del control obtenido por el método de reacción (Ziegler-Nichols y Cohen-Coon), realizando pruebas de simulación y validando con pruebas reales, llegando a variar solo en 0.16°C del set point. El tiempo de respuesta del sistema que se obtuvo fue de 35[min] para calentamiento, y el de enfriamiento de 45[min] para valores en los que el sistema ya esté estable.

Utilizando un sensor modelo HMP155 colocado en los orificios de calibración se obtuvo una diferencia de temperatura de 1°C , conservando el comportamiento de estabilidad.

Se pudo implementar un modo automático de funcionamiento en el que se incrementa el set point en un incremento determinado y realizando un barrido del intervalo de funcionamiento.



(a)



(b)

Figura 9.1. Prototipo desarrollado y su funcionamiento. (a) Prototipo, (b) prueba de funcionamiento

Capítulo 10

Conclusiones

Para implementar un calibrador de termómetros es importante considerar el montaje de cada una de las partes que lo conformarán, de acuerdo a los requerimientos de funcionalidad de cada una de ellas, eso ayudará a no tener que hacer demasiadas modificaciones, como resultado de las pruebas que lleven a lograr un mejor diseño.

Al emplear los métodos de reacción para encontrar los valores para el controlador PID, es útil realizar varias pruebas y normalizarlas, esto ayuda a obtener de todas las pruebas unos valores, y reducir tiempo en tener que estar obteniendo valores de cada prueba y después promediar estos valores.

El obtener una primera aproximación de los parámetros del controlador con el método de Ziegler-Nichols, empleando la tabla 5.1 (a), proporcionó un mejor resultado, en el caso del Cohen-Coon es más complejo para su cálculo, y no presentó mejores valores, aunque si fue más estable en conservar los valores que da para los parámetros, ya que se hicieron algunos ajustes en el proceso y sus valores del método de Cohen-Coon permanecieron casi igual. Con esto veo que es mejor el Ziegler-Nichols, por lo menos para los resultados de este trabajo.

Al realizar cualquier trabajo, hay que tratar de hacerlo de manera sistemática, y comenzar bajo las condiciones más similares posibles, o tener en cuenta los cambios, ya que en el sistema en que se trabajó, la temperatura en que se realizan las pruebas afecta su funcionamiento. La temperatura más baja que se puede alcanzar depende de la temperatura ambiente o del buen sistema de disipación de calor en la cara caliente de la celda Peltier.

El funcionamiento del prototipo es mejor si la temperatura ambiente no está muy lejana del set point.

Otra característica que se observó es que aunque se trabajó con sensores LM35 que son económicos y varían de acuerdo a sus especificaciones en ± 0.5 °C, se consiguió que los datos obtenidos de su utilización tuvieran una mejor respuesta, gracias al trabajo que se hizo con las mediciones. Esto se pudo ver cuando se agregó el sensor Hmp155, que de acuerdo a la información de Vaisala es más preciso, el cual está alrededor de los ± 0.2 °C, y presentó un comportamiento muy similar al que se conseguía con los LM35.

Se observa que hay aproximadamente 1°C de diferencia entre la lectura de las caras paralelas del prototipo y la de adentro del sistema. Valor a tomar en cuenta al momento de elegir una temperatura o rango de temperatura a calibrar. Pero la diferencia importante es entre los orificios donde se introducen los sensores (el patrón y el que se calibraría), la cual se puede corregir, como se mencionó en la sección fuentes de error, con el intercambio de los instrumentos en el proceso de la calibración.

Como trabajo futuro o mejoras posibles:

- Implementar un sistema de enfriamiento para la celda por agua, puede ayudar a alcanzar temperaturas mucho menores, lo cual permite trabajar un rango más amplio de temperatura.
- Realizar ajustes al controlador, ya que al realizar pruebas adicionales, aún se puede llegar a ajustar un poco más los valores para mejorar la respuesta, esto se sabe ya que se hicieron pruebas adicionales, pero que por tiempo ya no se incluyeron.
- Generar prototipos adicionales, los cuales se espera puedan responder mucho mejor, al ser menor la cantidad de material a calentar o enfriar en estos nuevos modelos.
- Calentar o enfriar aire, en las pruebas con los primeros modelos, se ve que calentando o enfriando el aire, se tienen respuestas más rápidas.
- Sujetar los sensores, con un asa con roscado en la que se fijen.

Imágenes de los modelos propuestos a futuro:

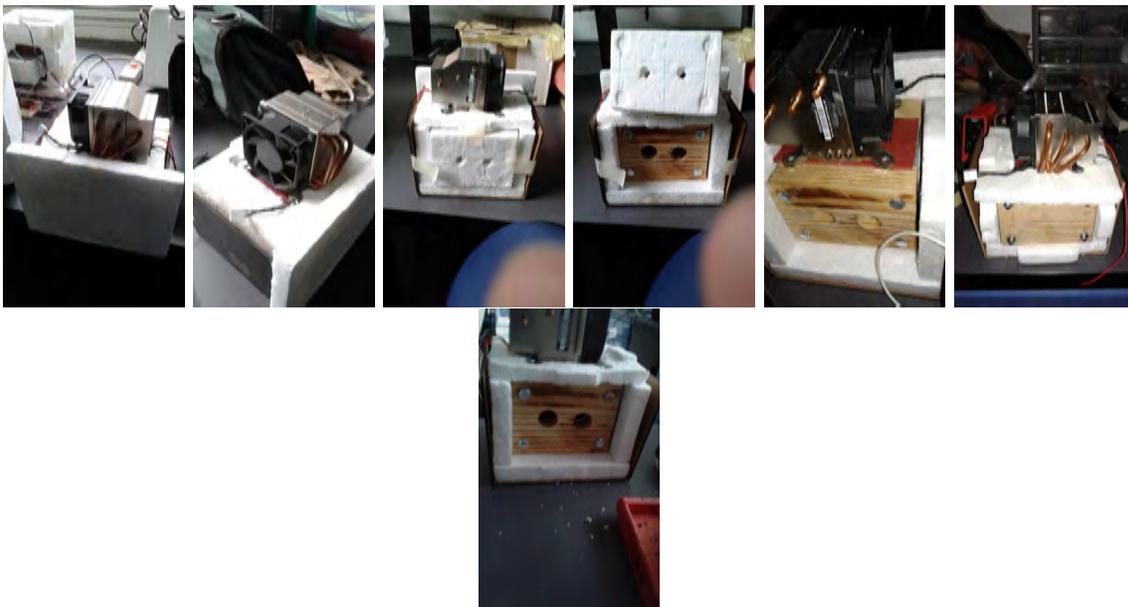


Figura 10.1. Modelo de dos placas de aluminio

Este modelo de la figura 10.1 es similar al Modelo 3 con el que se trabajó, formado también con cuatro placas, la diferencia es que solo tiene dos placas de aluminio, las otras dos son de madera.



Figura 10.2. Modelo de caja metálica

Este modelo de la figura 10.2 está pensado para que se caliente o enfríe el aire en su interior, su estructura es una caja metálica, metida dentro de una caja de unicel, cuenta con un disipador en la

parte interna y ventilador.



Figura 10.3. Modelo de hielera

Este es una hielera de unicel, lleva montado en la tapa el conjunto de disipadores, ventiladores y celda Peltier. También esta pensado para calentar y enfriar el aire en su interior.

Capítulo 11

Anexos



Hebei I.T. (Shanghai) Co., Ltd.

**Thermoelectric
Cooler**

TEC1-12706

Performance Specifications

Hot Side Temperature (°C)	25°C	50°C
Qmax (Watts)	50	57
Delta Tmax (°C)	66	75
I _{max} (Amps)	6.4	6.4
V _{max} (Volts)	14.4	16.4
Module Resistance (Ohms)	1.98	2.30





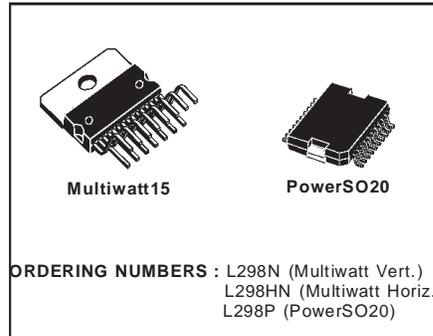
L298

DUAL FULL-BRIDGE DRIVER

- OPERATING SUPPLY VOLTAGE UP TO 46 V
- TOTAL DC CURRENT UP TO 4 A
- LOW SATURATION VOLTAGE
- OVERTEMPERATURE PROTECTION
- LOGICAL "0" INPUT VOLTAGE UP TO 1.5 V (HIGH NOISE IMMUNITY)

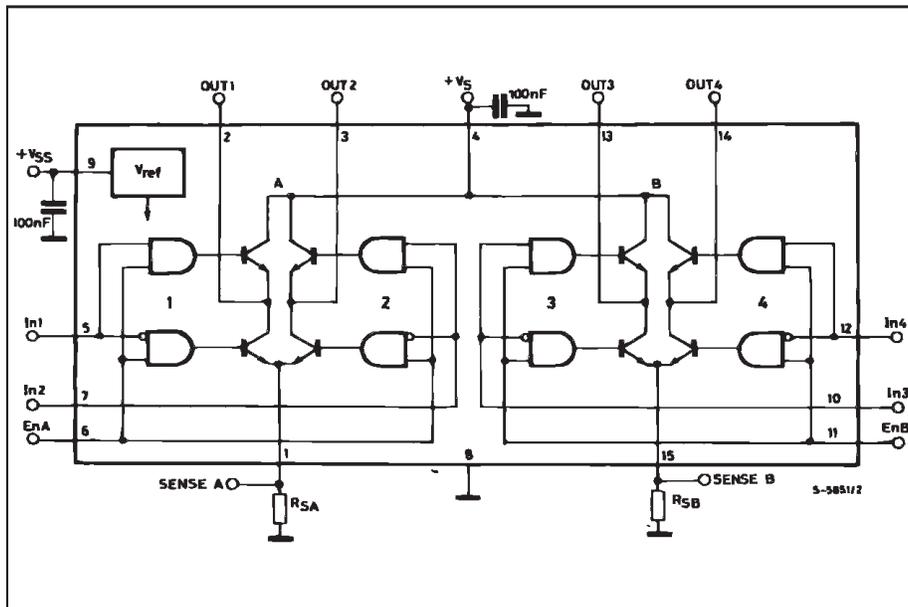
DESCRIPTION

The L298 is an integrated monolithic circuit in a 15-lead Multiwatt and PowerSO20 packages. It is a high voltage, high current dual full-bridge driver designed to accept standard TTL logic levels and drive inductive loads such as relays, solenoids, DC and stepping motors. Two enable inputs are provided to enable or disable the device independently of the input signals. The emitters of the lower transistors of each bridge are connected together and the corresponding external terminal can be used for the con-



nection of an external sensing resistor. An additional supply input is provided so that the logic works at a lower voltage.

BLOCK DIAGRAM

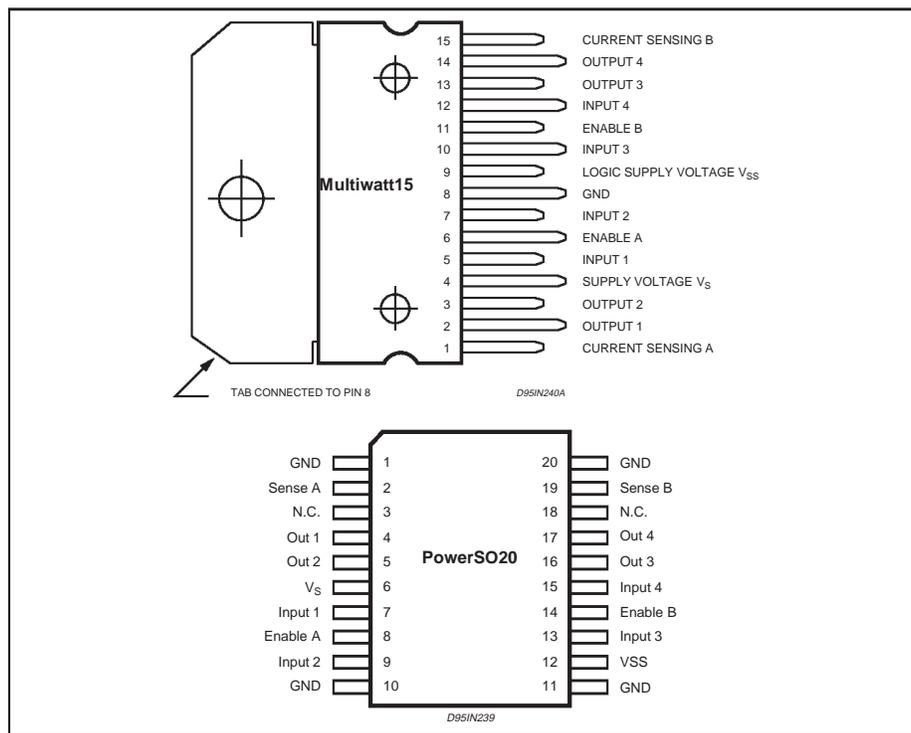


L298

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Symbol	Parameter	Value	Unit
V_S	Power Supply	50	V
V_{SS}	Logic Supply Voltage	7	V
V_I, V_{en}	Input and Enable Voltage	-0.3 to 7	V
I_O	Peak Output Current (each Channel)		
	- Non Repetitive ($t = 100\mu s$)	3	A
	- Repetitive (80% on -20% off; $t_{on} = 10ms$)	2.5	A
	-DC Operation	2	A
V_{sens}	Sensing Voltage	-1 to 2.3	V
P_{tot}	Total Power Dissipation ($T_{case} = 75^\circ C$)	25	W
T_{op}	Junction Operating Temperature	-25 to 130	$^\circ C$
T_{stg}, T_J	Storage and Junction Temperature	-40 to 150	$^\circ C$

PIN CONNECTIONS (top view)



THERMAL DATA

Symbol	Parameter	PowerSO20	Multiwatt15	Unit
$R_{th j-case}$	Thermal Resistance Junction-case	Max. -	3	$^\circ C/W$
$R_{th j-amb}$	Thermal Resistance Junction-ambient	Max. 13 (*)	35	$^\circ C/W$

(*) Mounted on aluminum substrate





PIC16F87/88

18/20/28-Pin Enhanced Flash MCUs with nanoWatt Technology

Low-Power Features:

- Power-Managed modes:
 - Primary Run: RC oscillator, 76 μ A, 1 MHz, 2V
 - RC_RUN: 7 μ A, 31.25 kHz, 2V
 - SEC_RUN: 9 μ A, 32 kHz, 2V
 - Sleep: 0.1 μ A, 2V
- Timer1 Oscillator: 1.8 μ A, 32 kHz, 2V
- Watchdog Timer: 2.2 μ A, 2V
- Two-Speed Oscillator Start-up

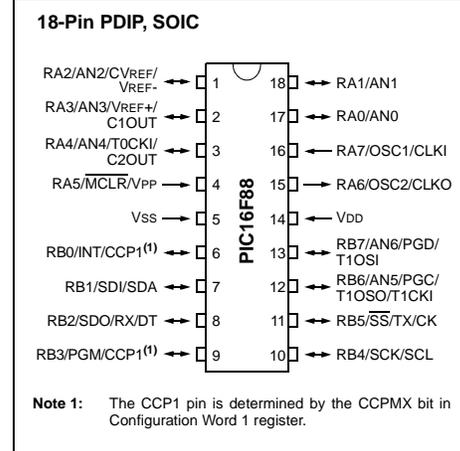
Oscillators:

- Three Crystal modes:
 - LP, XT, HS: up to 20 MHz
- Two External RC modes
- One External Clock mode:
 - ECIO: up to 20 MHz
- Internal oscillator block:
 - 8 user selectable frequencies: 31 kHz, 125 kHz, 250 kHz, 500 kHz, 1 MHz, 2 MHz, 4 MHz, 8 MHz

Peripheral Features:

- Capture, Compare, PWM (CCP) module:
 - Capture is 16-bit, max. resolution is 12.5 ns
 - Compare is 16-bit, max. resolution is 200 ns
 - PWM max. resolution is 10-bit
- 10-bit, 7-channel Analog-to-Digital Converter
- Synchronous Serial Port (SSP) with SPI™ (Master/Slave) and I²C™ (Slave)
- Addressable Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter (AUSART/SCI) with 9-bit address detection:
 - RS-232 operation using internal oscillator (no external crystal required)
- Dual Analog Comparator module:
 - Programmable on-chip voltage reference
 - Programmable input multiplexing from device inputs and internal voltage reference
 - Comparator outputs are externally accessible

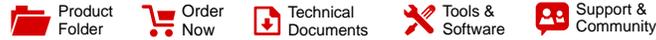
Pin Diagram



Special Microcontroller Features:

- 100,000 erase/write cycles Enhanced Flash program memory typical
- 1,000,000 typical erase/write cycles EEPROM data memory typical
- EEPROM Data Retention: > 40 years
- In-Circuit Serial Programming™ (ICSP™) via two pins
- Processor read/write access to program memory
- Low-Voltage Programming
- In-Circuit Debugging via two pins
- Extended Watchdog Timer (WDT):
 - Programmable period from 1 ms to 268s
- Wide operating voltage range: 2.0V to 5.5V

Device	Program Memory		Data Memory		I/O Pins	10-bit A/D (ch)	CCP (PWM)	AUSART	Comparators	SSP	Timers 8/16-bit
	Flash (bytes)	# Single-Word Instructions	SRAM (bytes)	EEPROM (bytes)							
PIC16F87	7168	4096	368	256	16	N/A	1	Y	2	Y	2/1
PIC16F88	7168	4096	368	256	16	1	1	Y	2	Y	2/1



LM35

SNIS159H – AUGUST 1999 – REVISED DECEMBER 2017

LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors

1 Features

- Calibrated Directly in Celsius (Centigrade)
- Linear + 10-mV/°C Scale Factor
- 0.5°C Ensured Accuracy (at 25°C)
- Rated for Full –55°C to 150°C Range
- Suitable for Remote Applications
- Low-Cost Due to Wafer-Level Trimming
- Operates From 4 V to 30 V
- Less Than 60-μA Current Drain
- Low Self-Heating, 0.08°C in Still Air
- Non-Linearity Only ±¼°C Typical
- Low-Impedance Output, 0.1 Ω for 1-mA Load

2 Applications

- Power Supplies
- Battery Management
- HVAC
- Appliances

3 Description

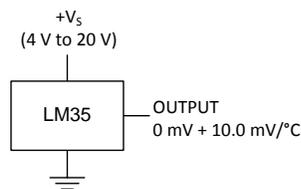
The LM35 series are precision integrated-circuit temperature devices with an output voltage linearly-proportional to the Centigrade temperature. The LM35 device has an advantage over linear temperature sensors calibrated in Kelvin, as the user is not required to subtract a large constant voltage from the output to obtain convenient Centigrade scaling. The LM35 device does not require any external calibration or trimming to provide typical accuracies of ±¼°C at room temperature and ±¼°C over a full –55°C to 150°C temperature range. Lower cost is assured by trimming and calibration at the wafer level. The low-output impedance, linear output, and precise inherent calibration of the LM35 device makes interfacing to readout or control circuitry especially easy. The device is used with single power supplies, or with plus and minus supplies. As the LM35 device draws only 60 μA from the supply, it has very low self-heating of less than 0.1°C in still air. The LM35 device is rated to operate over a –55°C to 150°C temperature range, while the LM35C device is rated for a –40°C to 110°C range (–10° with improved accuracy). The LM35-series devices are available packaged in hermetic TO transistor packages, while the LM35C, LM35CA, and LM35D devices are available in the plastic TO-92 transistor package. The LM35D device is available in an 8-lead surface-mount small-outline package and a plastic TO-220 package.

Device Information⁽¹⁾

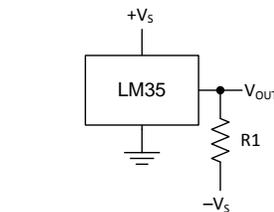
PART NUMBER	PACKAGE	BODY SIZE (NOM)
LM35	TO-CAN (3)	4.699 mm x 4.699 mm
	TO-92 (3)	4.30 mm x 4.30 mm
	SOIC (8)	4.90 mm x 3.91 mm
	TO-220 (3)	14.986 mm x 10.16 mm

(1) For all available packages, see the orderable addendum at the end of the datasheet.

Basic Centigrade Temperature Sensor (2°C to 150°C)



Full-Range Centigrade Temperature Sensor



Choose $R_1 = -V_S / 50 \mu\text{A}$
 $V_{\text{OUT}} = 1500 \text{ mV}$ at 150°C
 $V_{\text{OUT}} = 250 \text{ mV}$ at 25°C
 $V_{\text{OUT}} = -550 \text{ mV}$ at –55°C



An IMPORTANT NOTICE at the end of this data sheet addresses availability, warranty, changes, use in safety-critical applications, intellectual property matters and other important disclaimers. PRODUCTION DATA.

Índice de figuras

2.1.	Diferencia entre calor y temperatura	10
2.2.	Transferencia de calor por conducción	10
2.3.	Principales escalas termométricas usadas actualmente.	12
3.1.	Procesos de calibración de termómetros, en (a) se tiene una calibración con un fenómeno físico como referencia y en (b) una calibración por medio de un equipo para calibración	15
3.2.	Calibradores de bloque	16
3.3.	Calibrador de baño	17
3.4.	Cámara de punto de Congelación Ohmega	20
3.5.	Calibradores de bloque seco	20
3.6.	Calibrador de baño líquido	20
3.7.	Células de punto fijo	20
3.8.	Simuladores	21
4.1.	Polarización de la celda Peltier	26
4.2.	Celdas Peltier	26
5.1.	Sistema de control de Lazo abierto	28
5.2.	Sistema de control de Lazo cerrado	28
5.3.	Representación de sistema estable y sistema inestable. (a) Un trompo que permanece girando tiene el comportamiento de un sistema estable, (b) Un borracho es un ejemplo de un sistema inestable.	29
5.4.	Representación de un sistema invariante en el tiempo y de un sistema variante en el tiempo. (a) Un sistema rc responderá de la misma forma a una misma entrada de V. (b) La radiación solar es variante en el tiempo, ya que cambia constantemente.	29
5.5.	Representación de sistema lineal y de sistema no lineal. (a) Un sistema de masas y resorte se comporta como un sistema lineal. (b) Una gelatina es un ejemplo de sistema no lineal	30
5.6.	Representación de las diferentes acciones de control	31
5.7.	Sistema de control analógico vs sistema de control digital	32
5.8.	Gráficas para la obtención de los parámetros de control	32
5.9.	Curva para la obtención de los parámetros Ziegler-Nichols	33
6.1.	Modelo 1	36
6.2.	Comportamiento de los sensores LM35 dentro del modelo 1	36
6.3.	Modelo 2	37
6.4.	Se mantuvo el ventilador del interior encendido, las lecturas de los sensores son más parecidas entre ellas que las de la prueba que se muestra en la figura 6.2	37
6.5.	Se enfría, luego se calienta y se vuelve a enfriar, los sensores en el interior del modelo 2 siguen el mismo comportamiento, el ventilador ayudo a homogeneizar la temperatura	37

6.6. Se mide la temperatura en la cara fría de la celda -línea roja- la temperatura en el interior del modelo 2 -línea azul- y la temperatura en el disipador en el interior del modelo 2 -línea verde-	38
6.7. Los sensores LM35 dentro del modelo 2 al estar enfriando la celda y encender el ventilador, la temperatura de la cara fría de la celda - línea roja- sube, y la del interior del modelo 2 -línea azul- baja	38
6.8. Temperaturas en el interior del modelo 2 (T sistema) y en los disipadores montados en cada cara de la celda (Tfrio y Tcalor	38
6.9. Modelo 3. (a) Equipo cerrado, (b) equipo de placas de aluminio con la base y una de las paredes de la caja de unicel	39
6.10. Gráfica de la profundidad de los diversos sensores de temperatura atmosféricos, llegando a cubrir el 70 %	40
6.11. Gráfica del diámetro de los diversos sensores de temperatura atmosféricos, llegando a cubrir el 85 %	40
7.1. Placa para el modelo con sus perforaciones	41
7.2. Capa de neopreno como aislante entre caras	42
7.3. Prototipo de Calibrador de cuatro placas de aluminio Modelo 3. (a) Placas de aluminio que componen el equipo. (b) Disipador con su ventilador montado. (c) Orificios donde se introducen los sensores, y se ven los tornillos de unión. (d) Equipo con su caja de unicel	42
7.4. Simulación en Proteus	43
7.5. Tec1-12706	43
7.6. Puente L298N	43
7.7. Convertidor USB Serie	44
7.8. Fuente de 12V y 8.3A	44
7.9. Respuesta a las entradas escalón: En las gráficas se encuentra la respuesta del sistema, en valores de temperatura en a, c y e y se encuentran normalizadas en b, d y f.	45
7.10. Respuesta del sistema a los escalones aplicados y el promedio de estos	45
7.11. Respuesta normalizada para todos los escalones con la celda calentando	46
7.12. Curva del error	47
7.13. Ecuación del sistema obtenida con Octave para calentamiento	47
7.14. Simulación de los valores obtenidos por los métodos de reacción para calentamiento. (a) Ziegler-Nichols de la tabla 7.2 con $k_p = 15.05$, (b) Ziegler-Nichols de la tabla 7.2 con $k_p = 12.72$, (c) Cohen-Coon con $k_p = 76.2$ y $k_p = 36.1$	48
7.15. Simulación de control proporcional para calentamiento.	49
7.16. Simulación de control Proporcional Integral de los valores obtenidos por el método de reacción para calentamiento. (a) $k_p = 13.54$ $t_i = 1043.33$, valores de la tabla 7.2, (b) $k_p = 11.45$ $t_i = 573.33$, valores de la tabla 7.2	49
7.17. Simulación de control Proporcional Integral para calentamiento	50
7.18. Simulación del control PID para calentamiento. Con $k_p = 18.06$ $t_i = 626$ $t_d = 156.5$, valores de la tabla 7.2	51
7.19. Comparación del comportamiento entre el PI y el PID para calentamiento con $k_p = 12$ $t_i = 2500$ y $t_d = 1$	51
7.20. Simulación del control PID para el calentamiento. (a) Se aumenta la ganancia proporcional $k_p = 17$, (b) Se reduce el tiempo integral a $t_i = 1800$, (c) Con $k_p = 17$ $t_i = 1800$ $t_d = 1$, (d) Se reduce con $k_p = 23$ $t_i = 1800$ t_d de 1 a 0.1	52
7.21. Respuesta del sistema a los escalones, mientras la celda enfría. (a) pwm de 77, (b) pwm de 154, (c) pwm de 231	54
7.22. Gráfica de los tres escalones de enfriamiento y el promedio de ellos	54
7.23. Promedio de la respuesta normalizada para todos los escalones para el enfriamiento	55

7.24. Ecuación del sistema obtenida con Octave para el enfriamiento	55
7.25. Simulación de los valores obtenidos por los métodos de reacción para el enfriamiento. (a) Ziegler-Nichols con $k_p = 19.34$, (b) Ziegler-Nichols con $k_p = 14.14$, (c) Cohen-Coon con $k_p = 298.35$ y $k_p = 149.175$	56
7.26. Simulación de control proporcional para el enfriamiento	56
7.27. Simulación de los valores obtenidos por el método de reacción para el enfriamiento. (a) Ziegler-Nichols $k_p = 17.41$ $t_i = 763.33$ y $k_p = 12.73$ $t_i = 450$, (b) Cohen-Coon $k_p = 267.48$ $t_i = 303.03$ y $k_p = 133.74$	57
7.28. Simulaciones del control PI para el enfriamiento	58
7.29. Simulaciones del control PID para el enfriamiento. (a) PID de los valores obtenidos del método de reacción, (b) Cohen-Coon con $k_p = 198.435$	59
7.30. Simulación del control PID para el enfriamiento	59
8.1. Se observa en la línea de color rojo, el comportamiento de la temperatura en la cara que enfría de la celda peltier, solo alimentandola para ver que tan bajo podía llegar, en color azul esta la temperatura del medio ambiente	61
8.2. Modelo 3 en pruebas	62
8.3. Prueba con los valores del método de reacción, el calculo del error esta en términos del valor de CAD, S0_CB,S1_CA,S2_B,S3_A son los sensores, y el error. La prueba duró 13hrs con 53 min. (a) Con $k_p = 102.57$, $t_i = 343.54$ y $t_d = 51.05$ set point= 29.76°C , (b) en este acercamiento se observa que solo oscila entre 30.08 y 29.44 °C, (c) el error se mantuvo entre ± 1	63
8.4. Prueba para un valor cercano al valor de temperatura actual, iniciando en 23.3°C y un set point de 24°C . (a) Con $k_p = 102.57$, $t_i = 343.54$ y $t_d = 51.05$, se mantiene entre 23.68 y 24.32°C , (b) el error se mantuvo entre ± 1	63
8.5. Prueba de calentamiento con un PID, el error, y la parte derivativa del control. (a) Con $k_p = 42$, $t_i = 490$, $t_d = 35$, set point= 31.68°C , (b) este acercamiento muestra que se mantiene entre 31.68 y 32°C , (c) se observa el comportamiento del error y de la parte derivativa del control, la cual supera el valor de 255 del pwm.	64
8.6. Prueba de enfriamiento de PID, el error y la parte derivativa del control. (a) Con $k_p = 72$, $t_i = 430$, $t_d = 42$ set point= 19.84°C , (b) en este acercamiento vemos que se mantiene entre 20.16 y 19.84°C , (c) se observa el comportamiento del error y de la parte derivativa del control, que provoca se sature el pwm.	65
8.7. Respuesta del sistema enfriando y saturado por la parte derivativa del PID. (a) Com- portamiento del sistema y del error 'e', (b) el acercamiento muestra que mantiene entre 17.92 y 17.6°C	65
8.8. El error del sistema y el pwm mientras el sistema enfría. (a) Mantiene un error de ± 1 , (b) el pwm se mantiene saturado por la parte derivativa del PID.	66
8.9. Señal de control U y la parte derivativa D del controlador del sistema aplicando un PID mientras el sistema enfría. (a) El valor de la señal de control es muy grande, (b) la señal de la parte derivativa esta saturando el actuador.	66
8.10. Salida del sistema, el pwm y la parte derivativa D que provoca la saturación del pwm. (a) Con $k_p = 22$, $t_i = 343.54$, $t_d = 0.1$ y set point= 35°C , (b) el pwm se satura por el efecto de D, (c) el valor de D es muy grande	67
8.11. Cambio del valor t_d de 0.1 a 0.001 en pruebas de enfriamiento y calentamiento. (a) Con $k_p = 19$, $t_i = 490$, $t_d = 0.01$ y set point de 14.72°C , (b) $k_p = 21$, $t_i = 450$, $t_d = 0.001$ y set point de 10°C , (c) $k_p = 23$, $t_i = 400$, $t_d = 0.001$ y set point de 20.8°C	67
8.12. HMP155 de VAISALA	68

8.13. PID con HMP155 en el sistema en prueba de calentamiento, la prueba duró 3.05 hr, la gráfica del lado derecho muestra un acercamiento. Con $k_p = 22$, $t_i = 343.54$, $t_d = 0.005$ set point= 24°C	68
8.14. PID con HMP155 en el sistema en prueba de enfriamiento, la prueba duró 3.05 hr, la gráfica del lado derecho muestra un acercamiento. Con $k_p = 37$, $t_i = 400$, $t_d = 0.005$ set point= 12°C	69
8.15. PID con HMP155 en el sistema calentando, el comportamiento de la parte derivativa D y la señal de control U. (a) Con $k_p = 22$, $t_i = 400$, $t_d = 0.005$ set point= 18°C , esta prueba duro 15.27 hr , la imagen del lado derecho muestra un acercamiento, (b) comportamiento de la parte derivativa más reducido, ya no satura el actuador	69
8.16. Prueba de un PI para controlar el sistema	70
8.17. Prueba del caso dos enfriando, con $k_p = 37$, $t_i = 400$, $t_d = 0.005$ y set point de 12°C , esta prueba duro 6 hr 56 min.	70
8.18. Prueba del caso dos calentando. (a) Con $k_p = 22$, $t_i = 343.54$, $t_d = 0.005$ y set point de 42°C , esta prueba duro alrededor de 13hr 53 min. , (b) comportamiento de U y el pwm, (c) Comportamiento de e y D	71
8.19. Pruebas con valores optimizados primero enfría y después calienta. (a) Con $k_p = 28$, $t_i = 2000$, $t_d = 0.001$ y set point de 22°C , (b) comportamiento de D y el error, (c) comportamiento del pwm, (d) comportamiento de U	73
8.20. Pruebas con valores optimizados de varios escalones con el sistema calentando. (a) Con $k_p = 28$, $t_i = 2000$, $t_d = 0.001$ y set point de 10°C , esta prueba duro 19.44hrs . , (b) se ve el comportamiento de la parte derivativa del control que tiene valores que ya no saturan el pwm, y los valores de la salida del control U, para cada cambio de set point.	74
9.1. Prototipo desarrollado y su funcionamiento. (a) Prototipo, (b) prueba de funcionamiento	75
10.1. Modelo de dos placas de aluminio	78
10.2. Modelo de caja metálica	78
10.3. Modelo de hielera	79

Índice de tablas

2.1. Termómetros para mediciones ambientales.	12
3.1. Calibradores tipo baño	18
3.2. Fuentes de error	19
3.3. Algunos calibradores actuales	21
4.1. Resistencias de calentamiento	24
5.1. Tablas para la obtención de los parámetros por Ziegler-Nichols	34
5.2. Tabla para obtención de parámetros Cohen-Coon	34
6.1. Respuesta de la celda para valores de PWM	39
7.1. Parámetros de calentamiento	46
7.2. Parámetros para el controlador por Ziegler-Nichols y Cohen-Coon	46
7.3. Parámetros de enfriamiento	55
7.4. Parámetros para el controlador por Ziegler-Nichols y Cohen-Coon para el enfriamiento	55

Bibliografía

- [1] *Ingeniería de control moderna*, tercera edición, Pearson Prentice Hall, KATSUHIKO OGATA, 1997.
- [2] *Sistemas automáticos de control Fundamentos básicos de análisis y modelado*, segunda edición, Fondo Editorial UNERMB, ALÍ JOSÉ CARRILLO PAZ, 2011.
- [3] Tesis: *Climatización mediante células peltier*, ROCÍO HERRANZ PINADO, Universidad Pontificia Comillas, Escuela técnica superior de ingeniería (ICAI), Madrid Septiembre 2008.
- [4] Tesis: *Implementación de un circuito de control de temperatura con el PIC16f84*, VÍCTOR MESSINA LÓPEZ y MANUEL ANTONIO NAVARRO VITE, Escuela nacional de estudios profesionales campus Aragon, Universidad Nacional Autónoma de México, 2002.
- [5] *Prácticas de regulación automática práctica 4 control de una célula peltier*, departamento de electrónica e informática industrial, Escuela universitaria de ingeniería técnica industrial de Madrid.
- [6] http://calref.it/clrf_esp/temperature/
- [7] <http://simca.com.mx/productos-de-calibracion/calibradores-de-temperatura-ametek/#>
- [8] <http://www.elicrom.com/ba-o-seco-lr-cal-quartz-35-ambiente-50-c-hasta-150-c/>
- [9] <https://www.campbellsci.es/107>
- [10] <https://www.campbellsci.es/air-temperature>
- [11] <http://www.fluke.com/fluke/mxes/calibradores-de-procesos/calibradores-de-temperatura/fluke-724.htm?pid=56116>
- [12] https://la.flukecal.com/products/process-calibration-tools/temperature-calibrators/dry-block-calibrators-and-micro-baths/cal?quicktabs_product_details=1
- [13] <http://www.femto-calibracion.es/banos-hornos-de-temperatura-lp-3-50-familia-42/>
- [14] http://suconel.com.co/home2/suconelc/public_html/index.php?option=com_virtuemart&view=productdetails&virtuemart_product_id=8001758&virtuemart_category_id=209&Itemid=541
- [15] https://www.wika.com.mx/ctd9300_es_es.WIKA
- [16] https://la.flukecal.com/products/process-calibration-tools/temperature-calibrators/dry-block-calibrators-and-micro-baths/c-1?quicktabs_product_details=2

- [17] https://la.flukecal.com/products/temperature-calibration/industrial-calibrators/field-metrology-wells/pozos-de-metrolog%C3%AD-en-?quicktabs_product_details=2
- [18] <https://www.beamex.com/es/calibradores/calibrador-de-bloque-seco-de-temperatura/>
- [19] <https://es.slideshare.net/AndresChunga1/calibracin-de-termmetros-34192904>
- [20] <http://www.fluke.com/fluke/eses/Calibradores-de-Procesos/Calibradores-de-temperatura/FCal-1523-1524-Handheld-Thermometer-Readout.htm?PID=54426>
- [21] <http://html.rincondelvago.com/tipos-de-termometros.html>
- [22] <https://prezi.com/fy5eowgbuj6k/propiedades-termicas-de-los-materiales/>
- [23] <http://www.materialesde.com/propiedades-termicas-de-los-materiales/>
- [24] <https://pedrojhernandez.com/2014/04/09/caracteristicas-termicas-de-los-materiales/>
- [25] <http://programarpicenc.com/articulos/control-pwm-de-un-motor-dc-con-microcontroladores-pic/>
- [26] http://www.academia.edu/7611435/MEDIDOR_DE_TEMPERATURA_CON_LM335
- [27] <http://controldprocesos.blogspot.com/2010/05/metodos-de-sintonizacion-de.html>
- [28] <http://instrumentacionycontrol.net/sintonizacion-de-controladores-a-lazo-cerrado-metodo-ultima>
- [29] <http://blog.opticontrols.com/archives/383>
- [30] https://sites.google.com/site/picuino/digital_pid
- [31] <http://www.elicrom.com/ba-o-seco-lr-cal-quartz-35-ambiente-50-c-hasta-150-c/>
- [32] <https://hipertextual.com/archivo/2013/12/aplicar-pasta-termica/>
- [33] <http://simca.com.mx/productos-de-calibracion/calibradores-de-temperatura-ametek/>
- [34] <https://totech.com/peltier-thermoelectric-cooler-modules/?gclid=CPzX7fKDptQCFQYPaQodYggCWQ>