

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CONTROLADOR DE
TEMPERATURA PARA UN HORNO UTILIZADO EN EL PROCESO DE
CARACTERIZACIÓN Y CALCINADO DE LA CASCARILLA DE ARROZ.**

RONALD HERNAN HURTADO VELASCO

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN
INGENIERÍA FÍSICA
POPAYAN
2006

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CONTROLADOR DE
TEMPERATURA PARA UN HORNO UTILIZADO EN EL PROCESO DE
CARACTERIZACIÓN Y CALCINADO DE LA CASCARILLA DE ARROZ.**

RONALD HERNAN HURTADO VELASCO

Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero Físico

Director
M.Sc. JORGE W. CORONEL GARCIA

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN
INGENIERÍA FÍSICA
POPAYAN
2006

NOTA DE ACEPTACIÓN

Director
M.Sc. Jorge W. Coronel García

Jurado
Ing. Victor Mosquera

Jurado
Ing. Diego Bravo

Fecha de sustentación: Popayán, Junio 28 de 2006.

CONTENIDO

	Pág.
INDICE DE FIGURAS	VI
INDICE DE TABLAS	VIII
Introducción	1
1. Medición de Temperatura	4
1.1. Introducción	4
1.2. Principios Físicos de los Sensores Termoeléctricos	4
1.2.1. Fuerza Termoeléctrica	4
1.2.2. La Ley del Tercer Metal	6
1.3. Termocuplas	8
1.3.1. Propiedades de las Termocuplas más Usadas	9
1.3.2. Descripción de la Termocupla Tipo K	10
1.3.3. Juntura de Medición	10
1.3.4. Los Materiales de la Vaina	11
1.3.5. Descripción Matemática del Sensor	12
1.4. Acondicionamiento de la Señal de Salida del Sensor de Temperatura	14
1.5. Compensación Automática de la Temperatura de Referencia	15
1.6. Descripción del Horno	16
1.6.1. Temperatura Interna del Horno	16
1.6.2. Descripción Matemática del Horno	16
1.6.3. Descripción del Horno Utilizado	17
2. Sistemas de Control	19
2.1. Introducción	19
2.2. Clasificación de los Sistemas de Control.	19
2.3. Control PID	21
2.3.1. Acción de Control Proporcional	21
2.3.2. Acción de Control Integral	21
2.3.3. Acción de Control Derivativa	22
2.4. Modificación del PID	23
2.4.1. Derivador con Ganancia Limitada	23
2.4.2. Modificación de la Acción Proporcional	24

2.5.	Controlador por Modelo Interno (IMC)	25
2.5.1.	Aproximación a un PID	25
2.6.	Discretización del controlador PID	28
2.6.1.	Integrador de Tustin	29
2.6.2.	Discretización de la Acción Proporcional	31
2.6.3.	Discretización de la Acción Integral	31
2.6.4.	Discretización de la Acción Derivativa	32
2.7.	Implementación	35
3.	Controlador de Temperatura CTC-f1	36
3.1.	Introducción	36
3.2.	Componentes	36
3.2.1.	Compensador de Juntura Fría	36
3.2.2.	Microcontrolador	38
3.2.3.	Reloj de Tiempo Real	40
3.2.4.	Actuador	41
3.2.5.	Dispositivo de entrada de comandos	42
3.2.6.	Dispositivo para Despliegue de Información	42
3.3.	Empotrado del CTC-f1 en el horno	43
4.	Resultados y Análisis.	45
4.1.	Introducción	45
4.2.	Caracterización de la Termocupla	45
4.3.	Caracterización del Horno	46
4.4.	Parámetros del controlador	48
4.5.	Simulación	49
4.6.	Funcionamiento y Modo de Operación del Controlador CTC-f1	53
4.7.	Respuesta del CTC-f1	55
4.8.	Manual de usuario del CTC-f1	61
4.8.1.	Introducción	61
4.8.2.	Instalación	62
4.8.3.	Operación	65
4.8.4.	Funcionamiento	67
4.8.5.	Valores por defecto y limitaciones de parámetros	69
4.8.6.	Especificaciones	70
5.	Conclusiones	71
	Bibliografía	73

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
1.1. Circuito termoelectrico cerrado.	5
1.2. Un tercer metal en el circuito.	6
1.3. Circuito con un tercer metal insertado entre el metal B.	7
1.4. Circuito con temperaturas diferentes entre el tercer metal y el metal B. . .	7
1.5. Esquema de una termocupla	8
1.6. fem de las termocuplas más usadas.	9
1.7. Termocupla tipo K utilizada para adquirir la señal de temperatura para el controlador.	10
1.8. Formas de hacer las juntas de las termocuplas.	11
1.9. Termocuplas comunes en laboratorios.	12
1.10. Sistema de primer orden.	14
1.11. Compensación automática de la junta de referencia (a) análoga, (b) digital	15
1.12. Medida y control de temperatura en un horno eléctrico.	16
1.13. Horno utilizado para el trabajo.	17
1.14. Resistencias de calentamiento.	18
1.15. Sistema electrónico del horno.	18
2.1. Esquema general de un sistema de control.	21
2.2. Respuesta en frecuencia de un derivador puro	23
2.3. Respuesta en frecuencia de un derivador con ganancia limitada.	24
2.4. Lazo de control de tiempo continuo (a) y su equivalente de tiempo discreto (b).	28
2.5. Diagrama de bloques para la ecuación (2.32)	29
2.6. Valor mas aproximado de la integral (a) por “arriba”, (b) por “abajo” y (c) trapezoidal.	29
2.7. Diagrama de bloques de un controlador con un integrador de Tustin.	31
2.8. Ley de control proporcional.	31
2.9. Ley de control integral.	31
2.10. Derivador de tiempo continuo.	33
2.11. Derivador de tiempo discreto.	33
3.1. AD595	37
3.2. Conexión del AD595	37
3.3. Microcontrolador PIC18f452	38

3.4. Diagrama de Conexiones del Microcontrolador	39
3.5. Esquema del <i>AD586</i>	40
3.6. Reloj de tiempo real <i>DS1302</i>	40
3.7. Conexión entre el reloj de tiempo real <i>DS1302</i> y el microcontrolador.	41
3.8. Relay <i>TSS16G48S</i> TOSHIBA.	41
3.9. Teclado matricial para entrada de comandos.	42
3.10. Pantalla LCD.	42
3.11. Controlador CTC-f1	43
3.12. Empotrado del CTC-f1	44
4.1. Respuesta de la termocupla ante una entrada escalón	46
4.2. Respuesta del horno en un rango de operación.	47
4.3. Forma de calcular los valores de τ y L	48
4.4. Diagrama de bloques para la simulación	49
4.5. Diagrama de bloques del controlador	49
4.6. Relación entrada salida	50
4.7. Ley de control	50
4.8. Señal de Error	51
4.9. Inicio de la rampa	51
4.10. Transición rampa – escalón	52
4.11. Transición escalón – rampa	52
4.12. Señal PWM aplicada al Relay	53
4.13. Respuesta del sistema para un proceso de control de 2 rampas de 3°C/min.	55
4.14. Respuesta del sistema para un proceso de control de 3 rampas de 5°C/min.	56
4.15. Proceso de control de 2 rampas de 5°C/min, con corrección en la transición rampas – escalón.	57
4.16. Proceso de control de 3 rampas de 10°C/min con corrección en la transición rampas – escalón.	57
4.17. Proceso de control de 3 rampas de 10°C/min, con corrección en una constante del controlador.	58
4.18. Proceso de control de 2 rampas de 5°C/min, con corrección en una constante del controlador.	59
4.19. Proceso de Tratamiento térmico funcional	60
4.20. Proceso de Tratamiento térmico para validación del controlador, horno con carga	60
4.21. Variación de la temperatura en el escalón.	61
4.22. Controlador de temperatura CTC-f1	62
4.23. Dimensiones del controlador	63
4.24. Montaje y sujeción del controlador	64
4.25. Esquema básico de cableado del CTC-f1	65
4.26. Panel frontal del CTC-f1	66
4.27. Variación de la pendiente de calentamiento en el menú de parámetros	67
4.28. Numero de rampas con una variación ya escogida	68
4.29. Ingreso del valor de temperatura	68
4.30. Ingreso del valor de tiempo para un valor de temperatura	68
4.31. Información durante el proceso de control	69

INDICE DE TABLAS

	Pág.
1. Técnicas de análisis térmico.	2
1.1. Tipos de Termocuplas más Comunes	9
4.1. Caracterización del horno	47
4.2. Parametros del controlador	48
4.3. Especificaciones del CTC-f1	70

Introducción

La investigación en ciencias básicas hace necesario que se cuente con equipos y técnicas apropiadas para diferentes tipos de análisis (térmico, infrarrojo, dispersión de rayos X , resonancia magnética, entre otros). El grupo de investigación CYTEMAC (Ciencia y Tecnología de Materiales Cerámicos) de la Universidad del Cauca utiliza el análisis térmico, para establecer propiedades físicas y químicas de las muestras que a diario son preparadas, estas propiedades son manifestadas bajo condiciones y valores específicos de temperatura. Conocer estos valores de temperatura y sobre ellos tratar las muestras, da al investigador una visión mas amplia, profundizando en su trabajo y la oportunidad de nuevas conclusiones.

El análisis térmico se refiere a cualquier técnica para el estudio de materiales que involucre control de temperatura. Las medidas son hechas con incrementos de temperatura (rampas), pero medidas isotermales o medidas con decremento de temperatura también son posibles. Las técnicas de análisis miden una propiedad física de una sustancia o muestra en función de la temperatura. Algunas de las técnicas de análisis térmico se ilustran en la tabla 1 [6], [7].

La base del análisis térmico (equilibrio termodinámico, irreversibilidad termodinámica y cinética) esta bien desarrollada, pero no ha sido aplicada a los experimentos tanto como es posible.

Algunas aplicaciones modernas son [19]:

- Control de calidad.
- Análisis composicional.
- Estabilidad.
- Reacciones químicas.
- Propiedades dinámicas.

Luego que la muestra ha sido preparada y sometida a un análisis térmico por alguna de las técnicas mencionadas en la tabla 1, el resultado obtenido lo juzga el experimentador que es quien decide si la muestra se encuentra dentro de lo esperado. Si por alguna razón es pertinente preparar otra muestra se considera un tratamiento térmico antes del análisis

Tabla 1. Técnicas de análisis térmico.

Técnica	Medida (Además de la temperatura)
Termometría	tiempo
Análisis térmico diferencial	Diferencia de temperatura
Calorimetría	Calor
Dilatometría	Longitud o volumen
Análisis termomecánico	stress, strain
Termogravimetría	masa
Análisis mecánico dinámico	stress strain, tiempo
Análisis térmico electrate	corriente de descarga eléctrica
Análisis de conductividad eléctrica	Resistencia eléctrica
Análisis térmico de emanación	desprendimiento de material radioactivo
Análisis de evolución de gas	Análisis de pirolisis con gas
Análisis de conductividad térmica	Conductividad térmica
Análisis de difusividad térmica	Difusividad térmica
Termoacustimetría	Efectos de sonido
Análisis de termoluminiscencia	Emisión de luz
Análisis termomagnético	Susceptibilidad magnética

térmico, por ejemplo si el resultado muestra una transición de interés en un valor de temperatura, se suele tratar térmicamente a la muestra en este valor de temperatura. Este tratamiento se hace normalmente con rampas de temperatura y/o con tratamientos isotermales (escalones de temperatura).

Las rampas y los escalones para el tratamiento térmico no tienen una teoría establecida en cuanto a la pendiente de la rampa y el tiempo de duración de los escalones, esto se hace de forma empírica, basándose en el criterio y la experiencia del experimentador. Pero lo que se busca es manipular la energía interna y poder inducir reacciones, fenómenos de transporte, crecimiento, secado, etc.

El procedimiento para un tratamiento térmico se inicia normalmente con una rampa hasta un valor por debajo del deseado y luego se incrementa la temperatura hasta el valor de temperatura de interés. El número de rampas así como la duración de los escalones varía de una muestra a otra y de lo que el experimentador concluya del resultado del análisis térmico u otro tipo de análisis.

El proceso de calentamiento se lleva a cabo en hornos que cuentan con un sistema de control para lograr manipular los valores de temperatura. El tipo de control que se utiliza en estos equipos es variado, desde el tipo On – Off (encendido –apagado) hasta técnicas de control inteligente. En cuanto a la variación de calentamiento o tasa de calentamiento lo convencional es manejar rampas de $2 - 10^{\circ}\text{C}/\text{min}$, en cuanto al número de rampas son típicas 3 rampas, esto depende de las posibilidades del horno, dentro de las que se incluye los rangos de temperaturas en los que puede trabajar.

En este documento se reporta el diseño y la construcción de un controlador de temperatura tipo PID (Proporcional – Integral – Derivativo) denominado **CTC-f1**, para un horno utilizado en el tratamiento de las diferentes muestras de materiales desarrollados en el laboratorio del grupo CYTEMAC. El controlador da al usuario la posibilidad de escoger una tasa de calentamiento que puede ser 3, 5 o 10°C/min, al igual que los tiempos de duración de las escalones. Este controlador se construyó con el objeto de agilizar los procesos de investigación del grupo CYTEMAC.

La estructura de este documento se presenta de acuerdo al modo como se desarrolló el trabajo. De esta manera en el Capítulo 1 **Medición de Temperatura** se presentan los principios físicos de los sensores termoelectrónicos, cómo el sensor empleado y al forma como se logra una mejor medida de temperatura, también se presenta el horno utilizado para el desarrollo del proyecto.

En el Capítulo 2 **Sistemas de Control**, se describe el tipo de control empleado (PID) para el dispositivo, algunas de sus optimizaciones y la forma como debe ser discretizado para su final implementación en un sistema digital, tipo microcontrolador.

El Capítulo 3 **Controlador de Temperatura CTC-f1** se dedica a las partes que conforman el controlador **CTC-f1**, que es el dispositivo de control de temperatura obtenido con la realización de este trabajo.

Los resultados obtenidos y su respectivo análisis se incluyen en el Capítulo 4 **Resultados y Análisis**, este capítulo inicia con lo referente a la caracterización de los elementos involucrados en el trabajo, simulaciones, se muestra también la forma de operar el **CTC-f1**, los resultados de su operación y por último su manual de usuario.

Finalmente las conclusiones se especifican en el Capítulo 5.

Capítulo 1

Medición de Temperatura

1.1. Introducción

La temperatura es una variable física caracterizada por el flujo de energía calórica. En un proceso de medición de temperatura se involucran números o equivalencias numéricas para indicar el grado de calentamiento de un cuerpo. Aunque esto solo puede ser medido con el sensor adecuado, la salida del sensor tiene que ser mostrada a un observador por medio de algún instrumento. Para realizar esta presentación se requiere “traducir” la señal del sensor — energía térmica — en otra más conveniente para el observador — voltaje.

1.2. Principios Físicos de los Sensores Termoeléctricos

1.2.1. Fuerza Termoeléctrica

En 1821, el físico alemán Thomas Seebeck, observó que una corriente fluía en un circuito cerrado de dos metales distintos (alambres) cuando sus uniones se encontraban a diferentes temperaturas. Como la ley de Ohm no fue formulada por Georg Simon Ohm sino hasta 1826, la descripción cuantitativa de este fenómeno, conocido hoy como efecto seebeck, no fue posible. El efecto seebeck es responsable por la fuerza termoeléctrica, fem. Esta fuerza resulta de la variación de la densidad de electrones a lo largo de un conductor con un gradiente de temperatura.

La fuerza termoeléctrica es dada por:

$$dE = \sigma_A (T) dT \tag{1.1}$$

donde σ_A es el coeficiente de seebeck del metal A .

La fem de un conductor homogéneo cuyos extremos están a las temperaturas T_1 y T_2 , tiene un valor dado por la ecuación (1.1), tal que:

$$E_A(T_1, T_2) = \int_{T_2}^{T_1} \sigma_A(T) dT \quad (1.2)$$

$$= E_A(T_1) - E_A(T_2) \quad (1.3)$$

En un circuito termoelectrico compuesto por dos conductores homogéneos A y B , con sus extremos a las temperaturas T_1 y T_2 , como se representa en la figura 1.1, la fuerza termoelectrica resultante es:

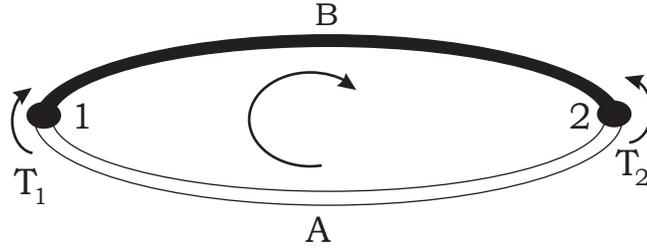


Figura 1.1. Circuito termoelectrico cerrado.

$$E_{AB}(T_1, T_2) = [E_A(T_1) - E_A(T_2)] - [E_B(T_1) - E_B(T_2)] \quad (1.4)$$

o

$$E_{AB}(T_1, T_2) = E_A(T_1, T_2) - E_B(T_1, T_2) \quad (1.5)$$

Sumando las fem parciales y considerando una polaridad positiva cuando el flujo de electrones es en sentido horario, la fem resultante E es:

$$E_{AB}(T_1, T_2) = e_{AB}(T_1) + e_{BA}(T_2) \quad (1.6)$$

La fuerza termoelectrica resultante de un circuito como el representado en la figura 1.1, es únicamente función del tipo de metal y de las temperaturas T_1 y T_2 , así,

$$e_{BA}(T_2) = -e_{AB}(T_2) \quad (1.7)$$

De este modo la ecuación (1.6), puede ser escrita como

$$E_{AB}(T_1, T_2) = e_{AB}(T_1) - e_{AB}(T_2) \quad (1.8)$$

o como una función de las temperaturas:

$$E_{AB}(T_1, T_2) = f(T_1, T_2) \quad (1.9)$$

En un circuito práctico de dos metales, A y B , es decir, lo anteriormente expuesto llevado a la realidad, es difícil usar una función con dos variables. Por esta razón se asume que la

temperatura T_2 , ahora llamada temperatura de referencia será mantenida constante, y se sombolizará por T_r , la ecuación (1.8), puede entonces ser escrita como:

$$E_{AB}(T_1, T_2) = E_{AB}(T_1, T_r) = e_{AB}(T_1) - e_{AB}(T_r) = f_2(T_1) \quad (1.10)$$

La ecuación (1.10) indica que la fem de un circuito de dos metales A y B es función de la temperatura medida T_1 de la junta 1 en la figura 1.1. A esta junta se le conoce como *Juntura de Medición*.

1.2.2. La Ley del Tercer Metal

La aplicación de un circuito práctico con dos metales A y B , para medir temperatura, requiere la introducción de un voltímetro. La introducción de este dispositivo involucra la introducción de un tercer metal, C , como lo muestra la figura 1.2:

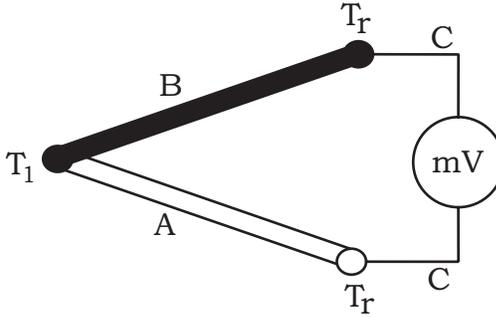


Figura 1.2. Un tercer metal en el circuito.

El tercer metal lo constituyen los conectores del instrumento. La suma de las fem del circuito es:

$$E = e_{AB}(T_1) + e_{BC}(T_r) + e_{CA}(T_r) \quad (1.11)$$

Cuando se asume que $T_1 = T_r$ entonces:

$$E = e_{AB}(T_r) + e_{BC}(T_r) + e_{CA}(T_r) = 0 \quad (1.12)$$

La ecuación (1.12), se puede describir de la forma:

$$e_{BC}(T_r) + e_{CA}(T_r) = -e_{AB}(T_r) \quad (1.13)$$

manipulando las ecuaciones (1.13) y (1.11), se ve que:

$$E = e_{AB}(T_1) - e_{AB}(T_r) \quad (1.14)$$

La ley del tercer metal es basada en esta ecuación.

La introducción de un tercer metal, C , en un circuito de dos metales A y B no altera la fem del circuito, con la condición de que los extremos del metal C estén a la misma temperatura.

El tercer metal puede ser introducido en cualquier punto del circuito, por ejemplo si el metal B es cortado en dos partes y el voltímetro es conectado en medio de estos, la fem resultante del circuito mostrado en la figura 1.3 podría ser:

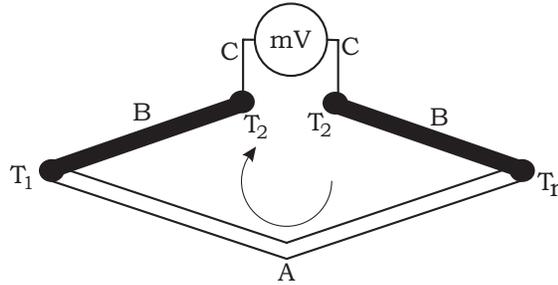


Figura 1.3. Circuito con un tercer metal insertado entre el metal B.

$$E = e_{AB}(T_1) + e_{BC}(T_2) + e_{CB}(T_2) + e_{BA}(T_r) \quad (1.15)$$

Como $e_{BC}(T_2) = -e_{CB}(T_2)$ esta ecuación puede ser rescrita de la forma:

$$E = e_{AB}(T_1) - e_{AB}(T_r) \quad (1.16)$$

La figura 1.4 muestra la situación cuando las uniones B y C están a diferentes temperaturas T_2 y T_3 . En cuyo caso la fem resultante es:

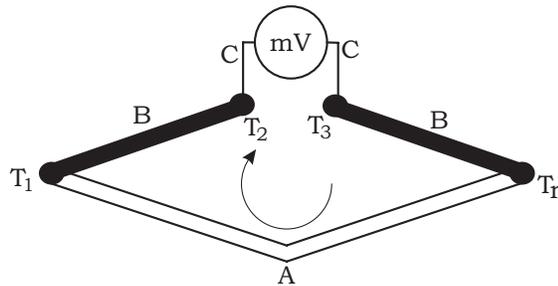


Figura 1.4. Circuito con temperaturas diferentes entre el tercer metal y el metal B.

$$E' = e_{AB}(T_1) + e_{BC}(T_2) + e_{CB}(T_3) + e_{BA}(T_r) \quad (1.17)$$

Una comparación de las ecuaciones (1.16) y (1.17) indica que la diferencia de las fem es:

$$\Delta E = E' - E = e_{BC}(T_2) - e_{CB}(T_3) \quad (1.18)$$

Esto indica que la temperatura de ambas uniones del metal B y C deben ser iguales para asegurarse de el circuito de el valor correcto de fem.

1.3. Termocuplas

La combinación de dos conductores distintos, conectados en uno de sus extremos es conocida como termocupla. Como se muestra en la figura 1.5, el punto de la unión de los metales es llamado la *juntura de medición* y sus extremos libres son conocidos como *junturas de referencia*.

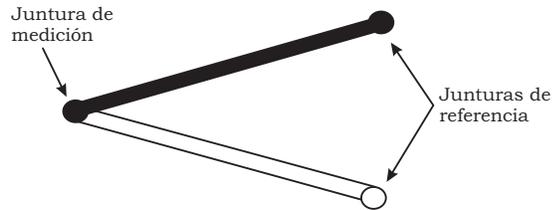


Figura 1.5. Esquema de una termocupla

Los materiales de las termocuplas deben estar caracterizados por:

- Temperatura de fundición alta
- Alta temperatura de funcionamiento
- Alta resistencia a la oxidación y a influencias atmosféricas
- Propiedades que sean estables en el tiempo
- Propiedades que sean repetibles en la fabricación
- Baja resistividad eléctrica
- Bajo coeficiente térmico de resistencia
- Una continua y preferiblemente lineal relación entre la fem y la temperatura

1.3.1. Propiedades de las Termocuplas más Usadas

El estándar internacional IEC584 de la International Electro-Technical Commission cubre las siguientes termocuplas estandarizadas.

Tabla 1.1. Tipos de Termocuplas más Comunes

Código	Componentes	Rango de Temperatura (°C)
T	cobre/cobre-níquel	-200 a 371
J	hierro/cobre-níquel	0 a 760
E	níquel-cromo/cobre-níquel	-200 a 900
K	níquel-cromo/níquel-aluminio	-200 a 1100
N	níquel-cromo-silicio/níquel-silicio	0 a 1260
S	platino-10%rodio/platino	0 a 1480
R	platino-13%rodio/platino	0 a 1480
B	platino-30%rodio/platino-6%rodio	0 a 1820

La fem versus temperatura de las termocuplas mas comúnmente usadas son mostradas en la figura 1.6

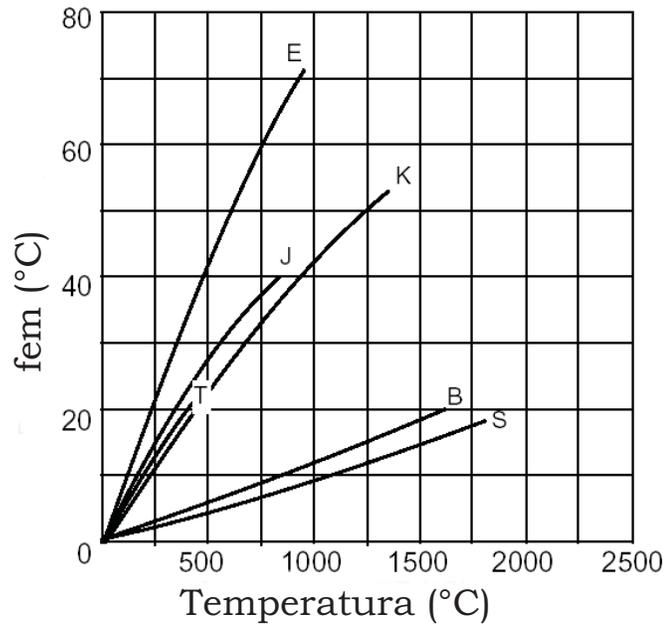


Figura 1.6. fem de las termocuplas más usadas.

De las termocuplas que aquí se mencionan, se describe la tipo K, que fue la usada en el desarrollo de este trabajo (figura 1.7).

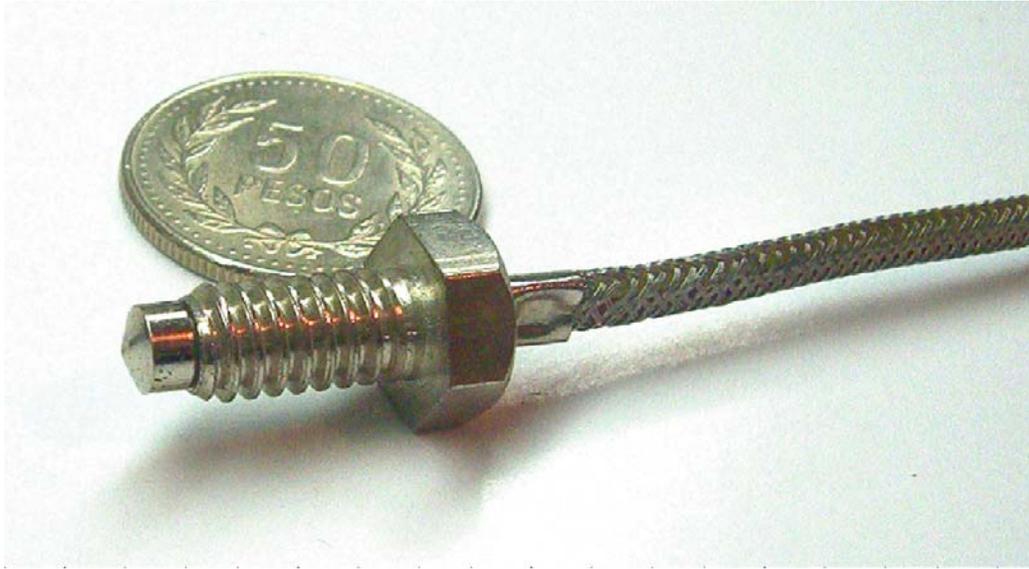


Figura 1.7. Termocupla tipo K utilizada para adquirir la señal de temperatura para el controlador.

1.3.2. Descripción de la Termocupla Tipo K

Níquel – Cromo/Níquel – Aluminio, (90 %Ni – 10 %Cr / 95 %Ni – Al, Si, Mn), también conocida como Cromel/Alumel, Código K. La termocupla tipo K, tiene un rango de operación de temperaturas de -200°C a 1100°C que se puede extender a 1300°C , lo que hace que sea una de las usadas. Como se puede ver de la figura 1.6, su fem esta cerca de la linealidad para un amplio rango de valores de temperatura. Esta termocupla es resistente a atmósferas oxidantes pero es afectada por la reducción y al azufre que este contenido en gases a altas temperaturas.

1.3.3. Juntura de Medición

La juntura de medición, donde ocurre el contacto eléctrico entre los dos distintos conductores, es el punto que sensa la temperatura y debe colocarse en el lugar donde la temperatura va ha ser medida. La juntura de medición debe tener baja resistencia eléctrica y una alta fuerza mecánica, puede ser hecha por soldadura suave o dura, spot, flama o arco eléctrico y también torciendo o enroscando como se muestra en la figura 1.8.

En el caso de uniones soldadas, la presencia de un tercer metal entre los dos cables conductores de la termocupla no influye en la fem resultante, con tal que la unión tenga una temperatura uniforme (*La Ley del Tercer Metal*, sección 1.2.2).

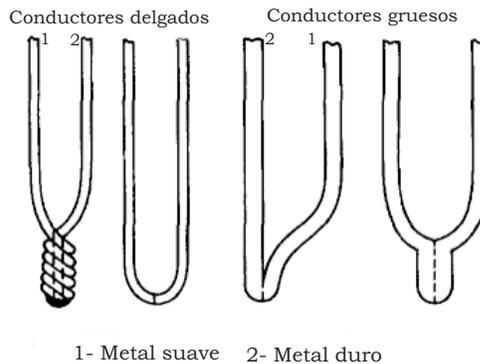


Figura 1.8. Formas de hacer las juntas de las termocuplas.

1.3.4. Los Materiales de la Vaina

Las vainas de protección son usadas para guarecer las termocuplas de influencias químicas o mecánicas. Las siguientes propiedades son consideradas para la elección de los materiales de las vainas:

- Resistencia a altas temperaturas
- Esfuerzo mecánico
- Resistencia a la corrosión
- Resistencia química
- No contamine la termocupla
- Resistencia a choques térmicos
- Impenetrable a gases
- Densidad específica, conductividad térmica y calor específico

Es claro que los materiales de la vaina influyen en la calibración así como en las propiedades dinámicas de la termocupla. Los materiales para las vainas son principalmente metálicos o cerámicos. La termocupla empleada en este trabajo cuenta con una vaina pequeña del tipo metálico (figura 1.7).

Las vainas metálicas dan una buena protección a todas las termocuplas usadas en temperaturas por encima de 1100°C. Los rangos de aplicación de vainas metálicas puede ser incrementado aplicando una capa adicional de protección (tantalio, zirconio).

Las termocuplas de laboratorio, que son ampliamente usadas en la medición de temperatura en hornos, son principalmente diseñadas a “medida”. La necesidad de una medida precisa en estados estables y tratamientos térmicos, pone una limitación en cuanto a su tamaño. La figura 1.9a muestra una termocupla para laboratorio que no cuenta con una

vaina de protección. Cuando se presentan riesgos para la termocupla, esta cuenta con una vaina de protección, como se ve e la figura 1.9b. Cuando las temperaturas superan los 1000°C, las vainas suelen ser de cuarzo.

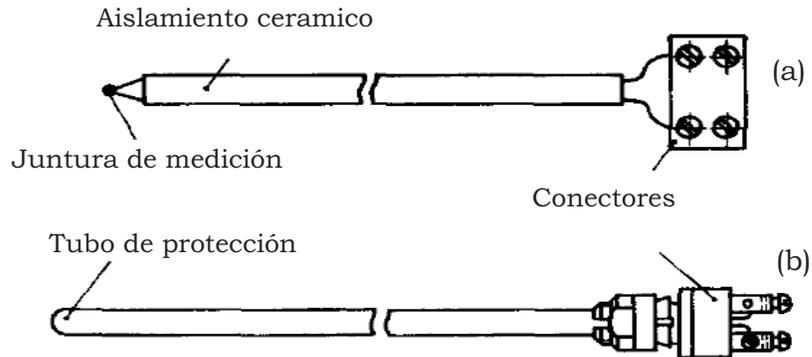


Figura 1.9. Termocuplas comunes en laboratorios.

1.3.5. Descripción Matemática del Sensor

Para la descripción matemática del sensor se asume que el sensor tiene una masa m , un calor específico c y un área superficial A con la que intercambia calor con el medio. Durante la medición de temperatura, sea de un líquido o un medio gaseoso, el sensor es inmerso completamente de modo que no intercambie calor con otro medio.

Para introducir la ecuación diferencial que describe la dinámica del sistema, se asume que en el tiempo $t = 0^-$, un tiempo infinitesimal antes de cero, el sensor se encuentra en un estado estable, con una temperatura ambiente $T_T = T_a$, el subíndice T es por termocupla. En el tiempo $t = 0^+$ el sensor se introduce en el medio a una temperatura T , tal que $T > T_a$. La condición inicial de temperatura en $t = 0^-$ para el sensor es dada por

$$\Theta_T = T_T - T_a = 0$$

y para el medio es:

$$\Theta = T - T_a > 0$$

De acuerdo con la ley de Newton, la transferencia de calor del sensor en un intervalo de tiempo dt es

$$dQ = \alpha A(\Theta - \Theta_T)dt \quad (1.19)$$

donde α es el coeficiente de transferencia de calor y A es el área de transferencia de calor.

El calor almacenado en el sensor es:

$$dQ = mc\Theta_T \quad (1.20)$$

donde m es la masa del sensor y c es el calor específico del material del sensor.

De las ecuaciones (1.19) y (1.20) se tiene que:

$$\alpha A(\Theta - \Theta_T)dt = mcd\Theta_T \quad (1.21)$$

o

$$\frac{mc}{\alpha A} \frac{d\Theta_T}{dt} + \Theta_T = \Theta \quad (1.22)$$

Introduciendo la notación:

$$\frac{mc}{\alpha A} = \tau_T \quad (1.23)$$

la ecuación (1.22) puede expresarse como:

$$\tau_T \frac{d\Theta_T}{dt} + \Theta_T = \Theta \quad (1.24)$$

donde τ_T , se conoce como la constante de tiempo del sistema.

La transformada de Laplace de la ecuación (1.24) es:

$$\tau_T s \Theta_T(s) + \Theta_T(s) = \Theta(s) \quad (1.25)$$

La ecuación se reduce a:

$$\Theta_T(s) = \frac{\Theta(s)}{\tau_T s + 1} \quad (1.26)$$

Ahora, el valor $\Theta_T(t)$ puede ser determinado de una manera simple usando la transformada inversa de Laplace. Como ejemplo se puede usar la entrada escalón, con un valor final para Θ , debido a que este valor es constante $\Theta(s) = \theta/s$, con lo que la ecuación (1.26) queda de la forma:

$$\Theta_T(s) = \left(\frac{1}{\tau_T s + 1} \right) \frac{\theta}{s} = \left[\frac{1}{s} - \frac{1}{s + \frac{1}{\tau_T}} \right] \theta \quad (1.27)$$

La transformada inversa de Laplace de esta ecuación es:

$$\Theta_T(t) = \mathcal{L}^{-1}[\Theta_T(s)] = \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_T}} \right) \theta \quad (1.28)$$

La curva de $\Theta_T(t)$ se muestra en la figura 1.10. La ecuación establece que inicialmente el valor de $\Theta_T(t)$ es cero y luego alcanza el valor de θ , con un error de estado estacionario igual a cero. Una de las características importantes de la curva de respuesta es que $\Theta_T(t)$ alcanza el 63.2 % de su valor final cuando $t = \tau_T$.

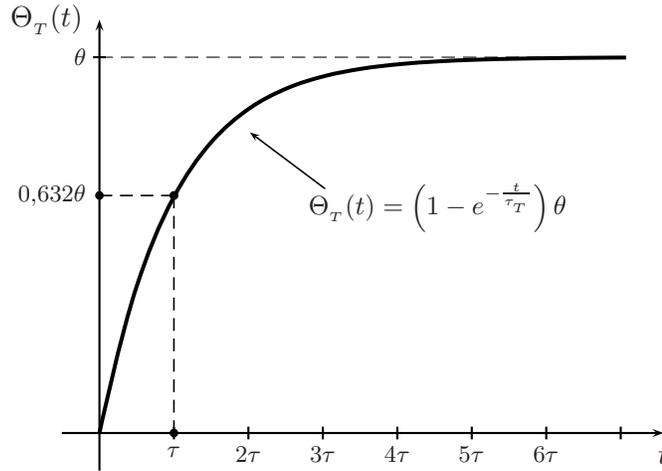


Figura 1.10. Sistema de primer orden.

La ecuación (1.28) muestra que la pendiente de la curva en $t = 0$ es θ/τ_T , como se ve en la siguiente ecuación:

$$\left. \frac{d\Theta_T}{dt} \right|_{t=0} = \left. \frac{\theta}{\tau_T} e^{-\frac{t}{\tau_T}} \right|_{t=0} = \frac{\theta}{\tau_T} \quad (1.29)$$

Lo que indica que el sensor mediría el valor final θ en $t = \tau_T$ si se mantuviera la velocidad inicial de respuesta.

La figura 1.10, también muestra como para $t = 3, 4$ y $5\tau_T$, $\Theta_T(t)$ alcanza el 95, 98.2 y 99.3 % de su valor final respectivamente. De modo que para $t \geq 4\tau_T$, la respuesta permanece dentro del 2 % del valor final, que es lo que en la práctica se utiliza, debido a que el estado estable solo se logra cuando $t = \infty$ [16], [10].

1.4. Acondicionamiento de la Señal de Salida del Sensor de Temperatura

Los métodos para el acondicionamiento de la señal se pueden describir en los siguientes grupos:

- Transformación de la naturaleza de la señal.
- Transformación de la escala de la señal.
- Transformación de la forma de la señal.

1.6. Descripción del Horno

A seguir se presenta una descripción del horno debido a que es el sistema donde la temperatura es medida y controlada.

Un diagrama de bloques para la medida de temperatura y sistema de control de un horno eléctrico es mostrado en la Figura 1.12.

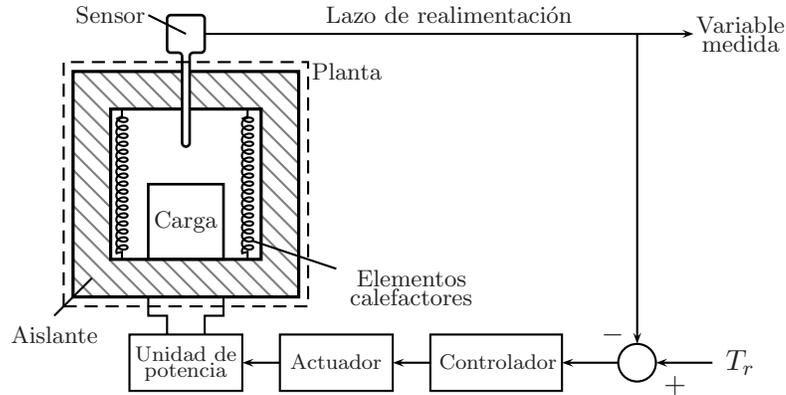


Figura 1.12. Medida y control de temperatura en un horno eléctrico.

1.6.1. Temperatura Interna del Horno

La temperatura interna del horno tiene un cierto valor medido por un sensor de temperatura ubicado de tal forma que no impida o interfiera con la carga del horno. Por esta razón el sensor es usualmente insertado a través de un agujero, ya sea por la parte superior o la parte trasera del horno. Sin embargo, la temperatura de la carga, que es la variable más importante, es difícil de medir, en la mayoría de los casos se asume igual a la temperatura interna del horno en estado estable. Si se asume que la transferencia de calor dentro de la cámara del horno es predominantemente por radiación, puede decirse que la temperatura del sensor no depende de la posición del sensor en la cámara, siempre y cuando el sensor no este demasiado cerca (5 a 7cm) de los elementos calefactores (resistencias) [4].

1.6.2. Descripción Matemática del Horno

Las propiedades dinámicas y estáticas de un horno (planta), pueden ser descritas de una manera aproximada por la siguiente función de transferencia [10]:

$$G_H(s) \approx \frac{K_H e^{-sL_H}}{1 + s\tau_H} \quad (1.30)$$

donde K_H es la constante del sistema [$^{\circ}C/V$], L_H es el retardo del sistema, y τ_H es la constante de tiempo del sistema.

Las propiedades dinámicas del sensor también deben ser tomadas en cuenta para describir el sistema de control de lazo cerrado. Estas propiedades son descritas por la función de transferencia equivalente $G_T(s)$

$$G_T(s) \approx \frac{1}{1 + s\tau_T} \quad (1.31)$$

donde τ_T es la constante de tiempo del sensor.

Para efectos del proceso de control se consideran el sensor y el horno como un solo sistema. Con una transformación sencilla se obtiene la función de transferencia equivalente, G_{HT} como:

$$G_{HT}(s) \approx \frac{K_H e^{-sL_{HT}}}{1 + s\tau_{HT}} \quad (1.32)$$

Donde L_{HT} es el retardo del sensor y el horno juntos, τ_{HT} es la constante de tiempo del horno con el sensor. La constante de tiempo equivalente $\tau_{HT} \approx \tau_H$ se debe a que en la mayoría de los casos

$$\tau_H > 100\tau_T \quad (1.33)$$

y el retardo de tiempo equivalente del horno y el sensor es calculado simplemente como:

$$L_{HT} \approx L_H + \tau_T \quad (1.34)$$

1.6.3. Descripción del Horno Utilizado

El horno utilizado en el trabajo se muestra en la figura 1.13, este horno es eléctrico discontinuo de tipo mufla, el nombre mufla se debe a la forma de la cámara (paralelepípedica alargada). El horno consta de una envolvente metálica, puerta accionada por palanca o brazo y la cámara, en la que están dispuestas las resistencias de calentamiento, el aislante cerámico y la solera que también es cerámica.



Figura 1.13. Horno utilizado para el trabajo.

Las resistencias, mostradas en la figura 1.14, están enrolladas en espiral y dispuestas lateralmente y en la parte superior sobre ranuras en el aislante cerámico. La resistencia total del horno es de 20Ω ($25^{\circ}C$), compuesta por un total de seis resistencias conectadas en serie.

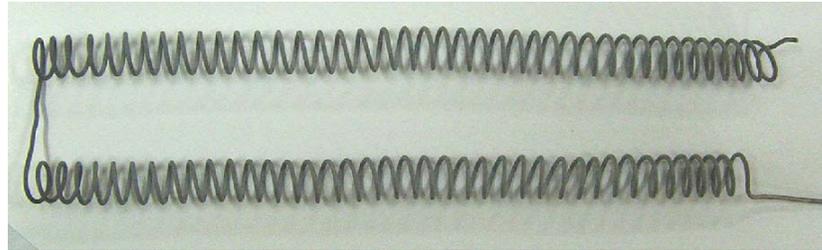


Figura 1.14. Resistencias de calentamiento.

El sistema eléctrico con el que contaba el horno se muestra en la figura 1.15. Este sistema no proporcionaba una forma fiable de calentamiento, debido a que la perilla con que era activado no era capaz de indicar la temperatura del horno, es decir, el número en el despliegue no correspondía o no era una equivalencia del mostrado en la perilla. En ocasiones para controlar un valor de temperatura se abría la cámara, lo que claro, no es un procedimiento adecuado. Finalmente el sistema eléctrico del horno servía como indicador. Por estos motivos el uso del horno era muy reducido, casi nulo.

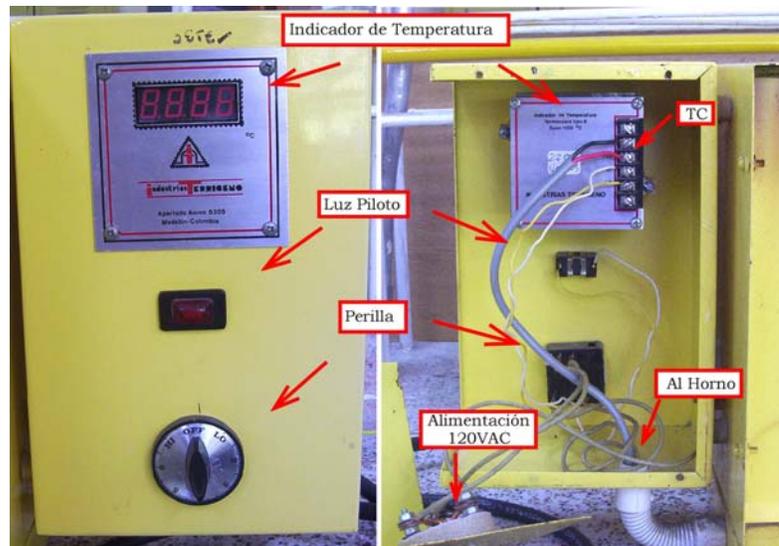


Figura 1.15. Sistema electrónico del horno.

Capítulo 2

Sistemas de Control

2.1. Introducción

Un sistema de control esta constituido básicamente de un controlador automático, un actuador, una planta y un elemento de medición. El controlador detecta una señal de error que es la diferencia entre la señal de entrada y la señal de salida, haciendo que el control automático inyecte una señal de control a un actuador (tal como un motor eléctrico, una válvula neumática, un interruptor, etc.). El sensor o elemento de medición, se encuentra en el trayecto de realimentación de un sistema de lazo cerrado y es el que se encarga de convertir la variable de salida en una que se pueda comparar con la señal de entrada.

Estos controladores en su mayoría, emplean como fuente de energía la electricidad o un fluido presurizado (aire o aceite). Considerando la fuente de energía, se pueden clasificar los controladores como: neumáticos, hidráulicos y eléctricos. El tipo de controlador debe considerar la clase de planta y las condiciones operacionales, así como la seguridad, costos, tiempo de uso, confiabilidad, precisión, peso y tamaño [17].

2.2. Clasificación de los Sistemas de Control.

Los sistemas de control pueden ser clasificados de modos muy variados. Esta es la descripción de algunos de ellos [5].

Sistemas de control lineal y no lineal. En rigor, la mayoría de los sistemas físicos no son lineales. Sin embargo, si la extensión de variaciones de las variables del sistema no es amplia, el sistema puede linealizarse dentro de un rango relativamente estrecho de valores de las variables. Para sistemas lineales, se aplica el principio de superposición. Aquellos sistemas a los que no es aplicable este principio son los sistemas no lineales.

En algunos casos son introducidos intencionalmente elementos no lineales al sistema de control para optimizar su comportamiento.

Sistemas de control invariante en el tiempo y control variante en el tiempo.

Un sistema de control invariante en el tiempo es aquel para el cual, según su nombre lo dice, sus parámetros no varían en el tiempo. Por tanto la respuesta de tal sistema es independiente del tiempo en el que se aplica la entrada. Por el contrario, el control variante en el tiempo es aquel en el que los parámetros varían con el tiempo; su respuesta depende del tiempo en el que se aplica una entrada.

Sistema de control de tiempo continuo y tiempo discreto. En un sistema de control de tiempo continuo, todas las variables son función de un tiempo continuo t . Un sistema de control de tiempo discreto abarca una o más variables que son conocidas solo en instantes discretos de tiempo o tiempo de muestreo.

Sistemas de control con una entrada y una salida y con múltiples entradas y múltiples salidas.

Sistemas de control con parámetros concentrados y con parámetros distribuidos. Los sistemas de control que pueden describirse mediante ecuaciones diferenciales ordinarias son sistemas de control con parámetros concentrados, mientras que los sistemas de control con parámetros distribuidos son aquellos que pueden describirse mediante ecuaciones diferenciales parciales.

Sistemas de control determinísticos y estocásticos. Un sistema de control es determinístico si la respuesta a la entrada es predecible y repetible. De no serlo el sistema de control es estocástico.

Dentro de esta clasificación pueden discriminarse los siguientes tipos de controladores, que son ampliamente utilizados en la industria.

- On/Off
- Proporcionales
- Integrales
- Proporcionales–Integrales
- Proporcionales–Derivativos
- Proporcionales–Integrales–Derivativos

El tipo de control Proporcional–Integral–Derivativo, será discutido en este capítulo ya que fue el utilizado en el desarrollo del trabajo.

2.3. Control PID

La ley de control de un controlador tipo PID, se deriva de una ley de control basada en la suma de tres términos, **Proporcional** (P), **Integral** (I) y **Derivativo** (D). Estos términos también suelen ser conocidos como modos del controlador. Un esquema general para un sistema de control PID se muestra en la figura 2.1.

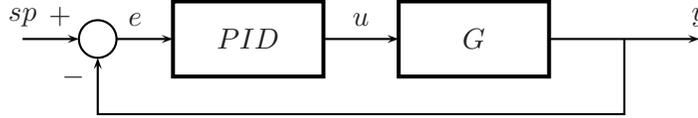


Figura 2.1. Esquema general de un sistema de control.

En esta figura 2.1, sp es la señal de referencia o SetPoint, u es la señal de control y esta limitada a un valor máximo u_{max} y uno mínimo u_{min} y y es la variable controlada o señal de salida y G es el modelo de la planta o sistema a controlar, sobre la cual recae la acción de control.

La descripción de las acciones de control P, I y D se presenta a continuación [8], [17].

2.3.1. Acción de Control Proporcional

La ley de control proporcional es dada por

$$u_P(t) = Ke(t) \quad (2.1)$$

donde u_P es la salida proporcional, K es la ganancia del controlador. Lo que la ecuación (2.1) claramente muestra es que la acción P es proporcional al error, es decir, cuanto mas grande es el error mas grande será la acción de control, para hacer que y se acerque a sp .

La acción proporcional depende únicamente de valores instantáneos del error y solo será distinta de cero si e es distinto de cero.

Si la ecuación (2.1) se transforma por Laplace se expresa como

$$\frac{U_P(s)}{E(s)} = K \quad (2.2)$$

2.3.2. Acción de Control Integral

La acción integral o de reset produce una salida en el controlador que es proporcional al error acumulado. La ley de de control para este caso es dada por

$$u_I(t) = \frac{K}{T_i} \int e(t)dt \quad (2.3)$$

donde T_i es la constante integral, u_I también depende de la ganancia del controlador.

La acción integral no desaparece con e , si e permanece constante la acción integral varia linealmente, ya que, si y no se mueve hacia sp la acción de control debe ser mas fuerte. De este modo, la acción integral no solo considera el valor actual de e , sino que también el anterior. En estado estacionario con $y = sp$, el control es ejercido únicamente por la acción integral, la acción proporcional no esta presente ($e = 0$), pero aunque se elimine el error, se puede producir una respuesta oscilatoria. La acción integral es lenta en respuesta a e y no puede tener cambios abruptos. Sin embargo juega un papel importante en la manera como se alcanza el estado estable.

La ecuación (2.3) transformada por Laplace se puede expresar como

$$\frac{U_I(s)}{E(s)} = \frac{K}{sT_i} \quad (2.4)$$

2.3.3. Acción de Control Derivativa

En esta acción de control, la señal de control derivativo u_D es proporcional a la variación de la señal de error. Esto indica, que mientras la señal de error sea constante, la contribución de la parte derivativa ha de ser cero. La ley de control se puede expresar como

$$u_D(t) = KT_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.5)$$

donde T_d es el tiempo derivativo. Los problemas pueden ocurrir aquí cuando la señal de error presenta también ruido debido a su gran sensibilidad, en este caso la acción derivativa generará señales de gran amplitud. Una ventaja de usar una acción de control derivativa es que responde a las variaciones del error y produce una corrección antes que la magnitud sea demasiado grande. La acción derivativa es conocida como un “modo rápido” que generalmente mejora la estabilidad del sistema. En ocasiones se dice que la acción derivativa anticipa el futuro, esta es otra forma de decir que hace a u depender de la dirección y velocidad de los cambios de e . La acción derivativa nunca se usa sola, siempre se emplea junto con una acción de control proporcional o integral.

La ecuación (2.5) transformada por Laplace se puede expresar como

$$\frac{U_D(s)}{E(s)} = KT_d s \quad (2.6)$$

Ahora, cambiando las acciones de control descritas, en el más simple de los controladores PID, la ley de control es de la siguiente forma:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.7)$$

o de igual manera y como es mas comúnmente conocido

$$u(t) = K \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (2.8)$$

Si aplicamos la transformada de Laplace a (2.8), se obtiene:

$$U(s) = K \left(1 + \frac{1}{sT_i} + sT_d \right) E(s) \quad (2.9)$$

Esto se expresa como la función de transferencia del controlador $G_c(s)$ y se escribe como:

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K \left(1 + \frac{1}{sT_i} + sT_d \right) \quad (2.10)$$

2.4. Modificación del PID

2.4.1. Derivador con Ganancia Limitada

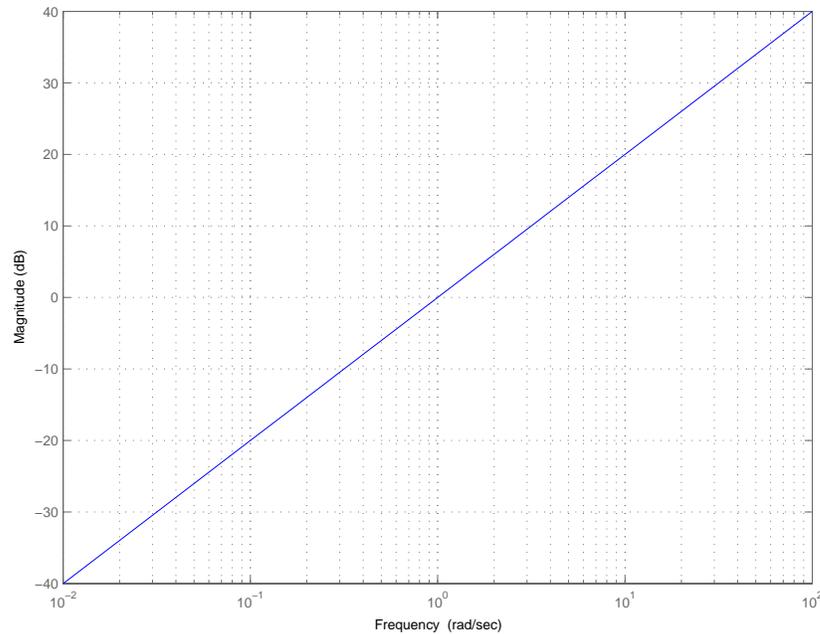


Figura 2.2. Respuesta en frecuencia de un derivador puro

Un problema que presenta la ecuación (2.5), es decir, un derivador puro, es que resulta sensible a altas frecuencias como se ve en la figura 2.2, y no es recomendable su implementación, dado que esto amplificaría las señales de ruido. Para evitar esto, la ganancia del controlador debe ser limitada. Esta limitación puede ser realizada modificando la ecuación (2.6) como sigue [15]

$$\frac{U_D(s)}{E(s)} = \frac{KsT_d}{1 + \frac{sT_d}{N}} \quad (2.11)$$

La ecuación (2.11) suele ser conocida como derivador real, este derivador tiene la ganancia limitada por N en altas frecuencias. El valor de N esta entre 3 y 20. La figura 2.3, muestra la respuesta en frecuencia de un derivador con ganancia limitada.

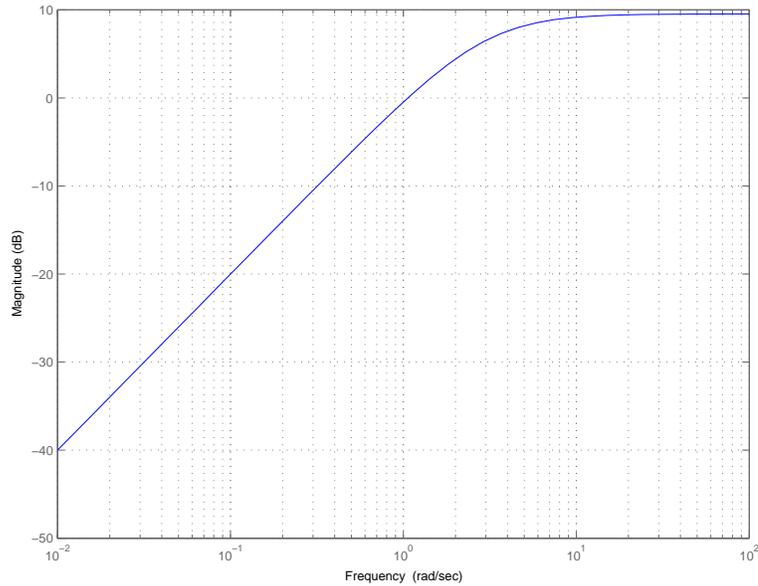


Figura 2.3. Respuesta en frecuencia de un derivador con ganancia limitada.

El termino $1/\left(1 + \frac{sT_d}{N}\right)$ de la ecuación (2.11), corresponde a un filtro pasa bajas.

2.4.2. Modificación de la Acción Proporcional

Del trabajo con controladores analógicos se concluyó que era mejor no trabajar con la derivada de la señal de referencia (excesivo esfuerzo de control). Además es conveniente un termino b en la señal de referencia como parte de la acción proporcional, de modo que la acción proporcional descrita por la ecuación (2.2) puede ser expresada como

$$U_P(s) = K(bSP(s) - Y(s)) \quad (2.12)$$

Esta es una manera de separar la respuesta de la señal de referencia de la respuesta a disturbios. También se puede ver como una manera de posicionar los ceros de lazo cerrado.

Del parámetro b se puede decir que tiene poca influencia en las cercanías del estado estable, de modo que la acción integral dominaría. Ahora, si $b \neq 1$, la acción proporcional es diferente de cero en estado estable.

Con estas modificaciones, el control PID queda de la siguiente forma

$$U(s) = K \left[(bSP(s) - Y(s)) + \frac{1}{sT_i} E(s) - \frac{sT_d}{1 + \frac{sT_d}{N}} Y(s) \right] \quad (2.13)$$

2.5. Controlador por Modelo Interno (IMC)

Este método exige que la función de transferencia de la planta $G(s)$ se exprese como el producto de dos funciones de transferencia [13].

$$G(s) = p_a(s)p_m(s) \quad (2.14)$$

donde $p_m(s)$ contiene los componentes de $G(s)$ (polos y ceros) que serán cancelados con el controlador, ya que este método se emplea en sistemas estables, tanto $G(s)$ como $p_m(s)$ no tendrán polos en el semiplano derecho, y $p_a(s)$ contiene los elementos de $G(s)$ que no serán cancelados por el controlador, es preciso que $p_a(s)$ tenga la forma de un filtro pasa todo como el que se presenta a continuación

$$p_a(s) = \prod_{i,j} \left(\frac{-\tau_i s + 1}{\tau_i s + 1} \right) \left(\frac{\tau_j^2 s^2 - 2\tau_j \zeta_j s + 1}{\tau_j^2 s^2 + 2\tau_j \zeta_j s + 1} \right) e^{-sT} \quad (2.15)$$

con $\tau_i, \tau_j > 0$ y $0 < \zeta_j < 1$.

Así como con $G(s)$, también se supondrá una función de transferencia de lazo cerrado deseada de la forma

$$G_{cl}(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{p_a(s)}{(\lambda s + 1)^r} \quad (2.16)$$

Donde $C(s)$ es la señal de salida, $R(s)$ es la señal de entrada y r es el orden del sistema.

El controlador $G_c(s)$ debe relacionarse con (2.16) del modo siguiente

$$G_{cl}(s) = \frac{p_a(s)}{(\lambda s + 1)^r} = \frac{G_c(s)G(s)}{1 + G_c(s)G(s)} \quad (2.17)$$

De esta ecuación se obtiene el valor de $G_c(s)$

$$\begin{aligned} G_c(s) &= \frac{G_{cl}(s)}{G(s) - G_{cl}(s)G(s)} \\ &= \frac{p_m^{-1}(s)}{(\lambda s + 1)^r - p_a(s)} \end{aligned} \quad (2.18)$$

El controlador de la ecuación (2.18) es el controlador por modelo interno $G_{IMC}(s)$.

2.5.1. Aproximación a un PID

Ya que el error en estado estable ante la entrada escalón es cero ($p_a(0) = 1$, $G_{cl}(0) = 1$), la función de lazo abierto debe tener por lo menos un integrador, y como la planta se supuso estable en lazo abierto, debe existir un polo en el origen, y este polo debe estar en el controlador.

El denominador del controlador $G_{IMC}(s)$ es:

$$\begin{aligned} (\lambda s + 1)^r - p_a(s) \Big|_{s=0} &= 1^r - p_a(0) \\ &= 1 - 1 \\ &= 0 \end{aligned} \quad (2.19)$$

La ecuación (2.19) demuestra que el controlador $G_{IMC}(s)$ tiene características integrales, entonces el controlador puede expresarse como

$$G_{IMC}(s) = \frac{f(s)}{s} \quad (2.20)$$

Al expandir la ecuación (2.20) por series de Maclaurin se tiene

$$G_{IMC}(s) = \frac{1}{s} \left[f(0) + f'(0)s + \frac{f''(0)}{2}s^2 + \frac{f'''(0)}{6}s^3 + \dots \right] \quad (2.21)$$

Cuando se desprecian los términos de orden superior, la ecuación (2.21) queda de la siguiente forma

$$\begin{aligned} G_{IMC}(s) &\approx \frac{1}{s} \left[f(0) + f'(0)s + \frac{f''(0)}{2}s^2 \right] \\ &\approx \frac{f(0)}{s} + f'(0) + \frac{f''(0)}{2}s \\ &\approx f'(0) \left[1 + \frac{f(0)}{f'(0)s} + \frac{f''(0)}{2f'(0)}s \right] \\ &\approx K \left[1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right] \end{aligned} \quad (2.22)$$

donde:

$$\begin{aligned} K &= f'(0) \\ T_i &= \frac{f'(0)}{f(0)} \\ T_d &= \frac{f''(0)}{2f'(0)} \end{aligned} \quad (2.23)$$

La ecuación (2.22) muestra que los primeros tres términos de la serie (2.21) constituyen un controlador PID.

Para encontrar los valores de las derivadas de $f(s)$, y por tanto los parámetros del controlador se recurre al siguiente procedimiento.

Relacionando las ecuaciones (2.18) y (2.20) se obtiene la siguiente relación

$$\begin{aligned}\frac{f(s)}{s} &= \frac{1}{s} \left[\frac{sp_m^{-1}(s)}{(\lambda s + 1)^r - p_a(s)} \right] \\ &= \frac{1}{s} \left[\frac{p_m^{-1}(s)}{D(s)} \right]\end{aligned}\quad (2.24)$$

donde

$$D(s) = \frac{(\lambda s + 1)^r - p_a s}{s} \quad (2.25)$$

De modo que $f(s)$ puede expresarse como

$$f(s) = \frac{p_m^{-1}(s)}{D(s)} \quad (2.26)$$

Ahora con (2.26) se calculan las derivadas de $f(s)$ con respecto a s . Pero antes es necesario saber la primera y la segunda derivada de $D(s)$, esto se obtiene de (2.25). Luego de eso, se nota que también es necesario el cálculo de las derivadas de $p_a(s)$ y $p_m(s)$, cuyas formas no dependen más que del modelo de la planta.

Con el fin de calcular los parámetros del controlador se considera un sistema de primer orden con tiempo muerto, como el que se presenta en la ecuación (2.27)

$$G(s) = p_a(s)p_m(s) = \frac{K_H e^{-Ls}}{\tau s + 1} \quad (2.27)$$

Esta ecuación muestra que $p_a(s) = e^{-Ls}$ y $p_m(s) = \frac{K_H}{\tau s + 1}$, así, la dinámica de lazo cerrado deseada es

$$G_{cl}(s) = \frac{p_a(s)}{(\lambda s + 1)^r} = \frac{e^{-Ls}}{(\lambda s + 1)} \quad (2.28)$$

Con la ecuación (2.18) se determina el controlador requerido

$$G_{IMC}(s) = \frac{p_m^{-1}(s)}{(\lambda s + 1)^r - p_a(s)} = \frac{K_H^{-1}(\tau s + 1)}{(\lambda s + 1) - e^{-Ls}} \quad (2.29)$$

Ahora se calcula $f(0)$, $f'(0)$ y $f''(0)$. Este calculo como ya se dijo depende del calculo de las derivadas de $D(s)$, $p_a(s)$ y $p_m(s)$, lo que finalmente conduce a

$$\begin{aligned} f(0) &= \frac{1}{K_H(\lambda + L)} \\ f'(0) &= \frac{1}{K_H(\lambda + L)} \left[\tau + \frac{L^2}{2(\lambda + L)} \right] \\ f''(0) &= \frac{L^2}{K_H(\lambda + L)^2} \left[\tau + \frac{L^2}{2(\lambda + L)} \right] \left[1 - \frac{L}{3T_i} \right] \end{aligned} \quad (2.30)$$

Con base en este resultado y la ecuación (2.23) los valores de K , T_i y T_d , serán entonces

$$\begin{aligned} K &= \frac{T_i}{K_H(\lambda + L)} \\ T_i &= \tau + \frac{L^2}{2(\lambda + L)} \\ T_d &= \frac{L^2}{2(\lambda + L)} \left[1 - \frac{L}{3T_i} \right] \end{aligned} \quad (2.31)$$

2.6. Discretización del controlador PID

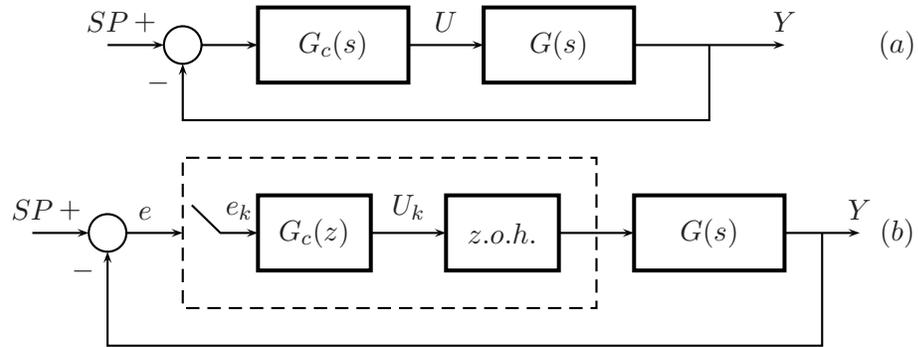


Figura 2.4. Lazo de control de tiempo continuo (a) y su equivalente de tiempo discreto (b).

Lo que se pretende hacer aquí es obtener un nuevo lazo de control (figura 2.4b) con un comportamiento similar al lazo de tiempo continuo (figura 2.4a) [3], [14].

Para conocer mas sobre los por menores que están envueltos en este proceso, se analiza el diagrama de la figura 2.5, que corresponde a la siguiente función de transferencia:

$$G_c(s) = \frac{k}{\tau s + 1} \quad (2.32)$$

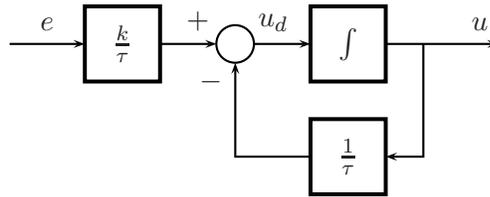


Figura 2.5. Diagrama de bloques para la ecuación (2.32)

El problema se presenta en el bloque de integración, pero esto se soluciona definiendo un nuevo mecanismo de integración de tiempo discreto, la integral que hay que modificar es

$$u(t) = \int_0^t u_d(\lambda) d\lambda \quad (2.33)$$

De modo que la ecuación (2.33) se pueda aproximar por:

$$u(kh) = \int_0^{kh} u_d(\lambda) d\lambda = u(kh - h) + \int_{kh-h}^{kh} u_d(\lambda) d\lambda \quad (2.34)$$

La integral del extremo derecho de la ecuación (2.34) corresponde a una operación de tiempo continuo. Ahora se trabajara con esa integral para hallar una solución aproximada teniendo en cuenta que solo se conoce $u_d(kh)$.

2.6.1. Integrador de Tustin

Para hallar el valor mas aproximado de la integral que nos interesa, nos podemos ayudar de la figura 2.6.

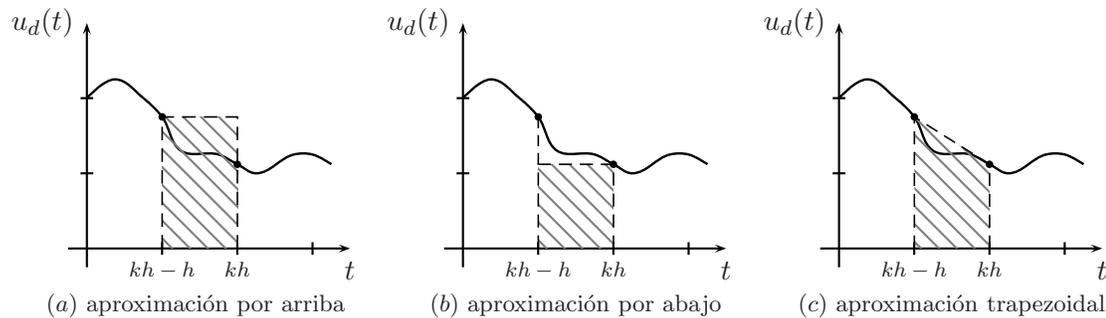


Figura 2.6. Valor mas aproximado de la integral (a) por “arriba”, (b) por “abajo” y (c) trapezoidal.

Las tres figuras nos dan tres valores distintos para el area bajo la curva, la figura 2.6a, muestra una aproximación por “arriba”, la figura 2.6b, una aproximación por “abajo”,

pero la que mas cerca esta del valor real es la figura 2.6c. El valor del área bajo la curva es entonces

$$\int_{kh-h}^{kh} u_d(\lambda) d\lambda \approx \frac{h}{2} [u_d(kh) + u_d(kh-h)] \quad (2.35)$$

Con la aproximación de la ecuación (2.35), el valor de $u(kh)$ se expresa como

$$u(kh) = u(kh-h) + \frac{h}{2} [u_d(kh) + u_d(kh-h)] \quad (2.36)$$

Ahora, utilizando el operador q^1 , se puede obtener una nueva forma de expresar $u(kh)$, como sigue

$$u(kh) = \frac{h}{2} \frac{q+1}{q-1} u_d(kh) \quad (2.37)$$

La ecuación (2.37) es conocida como **Integrador de Tustin**, y es la forma en tiempo discreto para la integral que se usara en la discretización del controlador PID.

¹También conocido como *operador de desplazamiento hacia adelante* [3], tiene la propiedad,

$$qf(k) = f(k+1)$$

La inversa del operador de desplazamiento hacia adelante es llamado operador de desplazamiento hacia atrás u operador de retardo y es denotado por q^{-1} . Tal que

$$q^{-1}f(k) = f(k-1)$$

En lo referente a problemas relacionados con la ecuación característica de un sistema, tal como la estabilidad y el orden de un sistema, es más conveniente usar el operador de desplazamiento hacia adelante. En cuanto a problemas de causalidad, es más conveniente usar el operador de desplazamiento hacia atrás. El cálculo de operadores da una descripción compacta de sistemas y hace más fácil derivar relaciones entre sistemas, porque la manipulación de ecuaciones de diferencias se reduce a un problema algebraico.

El operador de desplazamiento es usado para simplificar la manipulación de ecuaciones de diferencias de alto grado. Considere la ecuación

$$y(k+na) + a_1y(k+na-1) + \dots + a_nay(k) = b_0u(k+nb) + \dots + b_nb(k)$$

donde $na \geq nb$. Usando el operador de desplazamiento da

$$(q^{na} + a_1q^{na-1} + \dots + a_n) y(k) = (b_0q^{nb} + \dots + b_n) u(k)$$

Con la introducción de los polinomios

$$A(z) = z^{na} + a_1z^{na-1} + \dots + a_n$$

y

$$B(z) = b_0z^{nb} + b_1z^{nb-1} + \dots + b_n$$

la ecuación de diferencias puede ser escrita como

$$A(q)y(k) = B(q)u(k)$$

La figura 2.7 representa la ecuación (2.32) y es también la variación de la figura 2.5 esta vez con un integrador de Tustin.

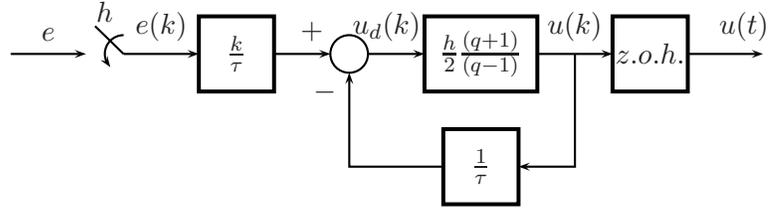


Figura 2.7. Diagrama de bloques de un controlador con un integrador de Tustin.

2.6.2. Discretización de la Acción Proporcional

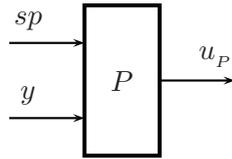


Figura 2.8. Ley de control proporcional.

Esta es la mas simple de todas y se puede representar por la figura 2.8, cuya ecuación se expresa como

$$u_P(kh) = b(sp(kh)) - y(kh) \quad (2.38)$$

2.6.3. Discretización de la Acción Integral

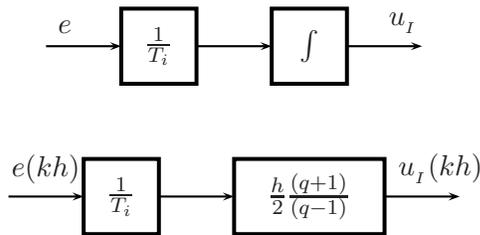


Figura 2.9. Ley de control integral.

En la figura 2.9, se reemplaza el integrador de tiempo continuo por el integrador de Tustin. Con lo que se obtiene que la acción integral es

$$u_I(kh) = \left(\frac{h}{2T_i} \frac{q+1}{q-1} \right) e(kh) = \frac{h}{2T_i} \left(1 + \frac{2}{q-1} \right) e(kh) \quad (2.39)$$

La ecuación (2.39) puede expresarse como

$$u_I(kh) = \frac{h}{2T_i} [e(kh) + x(kh)] \quad (2.40)$$

donde $x(kh) = \frac{2}{q-1}e(kh)$, que expresada como ecuación de diferencias es

$$x(kh + h) = x(kh) + 2e(kh) \quad (2.41)$$

Las ecuaciones (2.40) y (2.41), conforman el siguiente modelo en espacio de estados

$$\begin{cases} x(kh + h) = x(kh) + 2e(kh) \\ u_I(kh) = \frac{h}{2T_i}x(kh) + \frac{h}{2T_i}e(kh) \end{cases} \quad (2.42)$$

2.6.4. Discretización de la Acción Derivativa

A diferencia de las anteriores discretizaciones, con esta se iniciará desde el modelo en tiempo continuo. El derivador que se usará es el ya mostrado anteriormente en la ecuación (2.11) (derivador con ganancia limitada)

$$U_D(s) = \frac{-T_d s}{\frac{T_d}{N}s + 1} Y(s) \quad (2.43)$$

La diferencia con el anterior esta en el signo menos. Esta ecuación también puede ser escrita como sigue

$$\begin{aligned} U_D(s) &= - \left[N - \frac{N}{\frac{T_d}{N}s + 1} \right] Y(s) \\ &= \frac{N}{\frac{T_d}{N}s + 1} Y(s) - NY(s) \end{aligned} \quad (2.44)$$

De esta ecuación se obtiene el término

$$X(s) = \frac{N}{\frac{T_d}{N}s + 1} Y(s) \quad (2.45)$$

Al cual se le aplica la transformada inversa de Laplace, de modo que

$$\frac{T_d}{N} \frac{dx}{dt} = -x(t) + Ny(t) \quad (2.46)$$

El modelo en espacio de estados del derivador de tiempo continuo se expresa del siguiente modo

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = \frac{-N}{T_d}x(t) + \frac{N^2}{T_d}y(t) \\ u_D = x(t) - Ny(t) \end{cases} \quad (2.47)$$

La figura 2.10 muestra el diagrama de bloques del derivador de tiempo continuo.

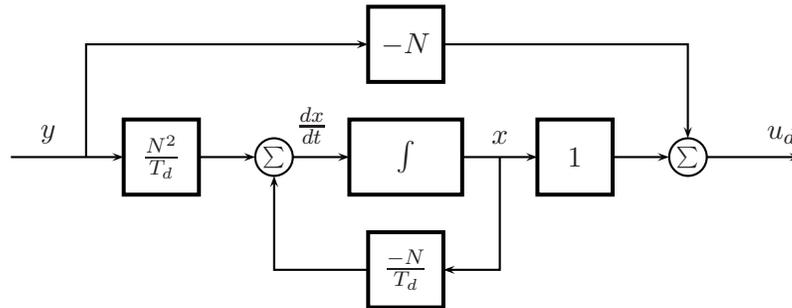


Figura 2.10. Derivador de tiempo continuo.

De nuevo, el integrador de tiempo continuo se reemplaza por el de Tustin, como se muestra en la figura 2.11

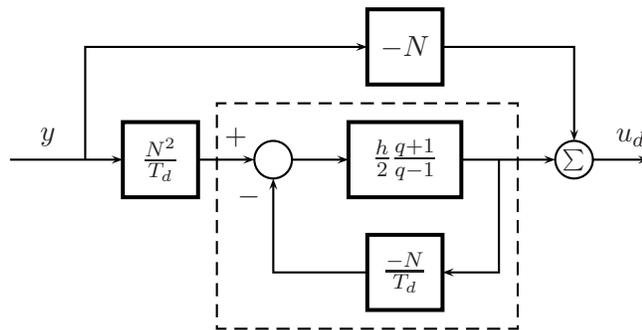


Figura 2.11. Derivador de tiempo discreto.

La ecuación que representa el controlador de la figura 2.11 es

$$u_D(kh) = \left[-N + \frac{N^2 \frac{h}{2} \frac{q+1}{q-1}}{1 + \frac{N}{T_d} \frac{h}{2} \frac{q+1}{q-1}} \right] y(kh) = \left[\frac{-N}{1 + \frac{N^2 \frac{h}{2} \frac{q+1}{q-1}}{T_d}} \right] y(kh) \quad (2.48)$$

Reorganizando esta ecuación e introduciendo nuevos términos, se puede escribir

$$u_D(kh) = K_d \frac{q+1}{q+p} y(kh) \quad (2.49)$$

donde

$$K_d = \frac{-2T_d N}{2T_d + hN} \quad (2.50)$$

$$p = \frac{hN - 2T_d}{hN + 2T_d}$$

Expresando (2.49) como una ecuación de diferencias se tiene

$$u_D(kh) = K_d \left[\frac{-(1-p)}{q+p} y(kh) + y(kh) \right] \quad (2.51)$$

De aquí se obtiene la ecuación (2.52) para así obtener el modelo en espacio de estados de la acción derivativa (2.53)

$$x(kh) = -\frac{(1+p)}{q+p} y(kh) \quad (2.52)$$

$$\begin{cases} x(kh+h) = -px(kh) - (1+p)y(kh) \\ u_D(kh) = K_d x(kh) + K_d y(kh) \end{cases} \quad (2.53)$$

2.7. Implementación

A continuación se presenta un código base escrito en *C* para las acciones de control proporcional, integral y derivativa [14].

Listado 2.7.1 Código para acción proporcional.

```
float proporcional(float Uc, float y)
{
    return b*Uc - y;
}
```

Listado 2.7.2 Código para acción integral.

```
float integral( float ek)
{
    static float x=0;
    float Ui;
    Ui = (h/(2*Ti))*x + (h/(2*Ti))*ek;
    x = x +2*ek;
    return Ui;
}
```

Listado 2.7.3 Código para acción derivativa.

```
float derivativa(float y)
{
    static float x = 0;
    float Ud;
    Ud = Kd*x + Kd*y;
    x = -p*x - (1 + p)*y;
    return Ud;
}
```

Las funciones anteriores pueden ser usadas del siguiente modo

Listado 2.7.4 Código para la función principal.

```
void main(void)
{
    y =salida();
    Uc = referencia();
    E = Uc - y;
    Up = proporcional(Uc, y);
    Ui = integral(E);
    Ud = derivativa(y);
    U = Kp*(Up + Ui + Ud);
}
```

Capítulo 3

Controlador de Temperatura CTC–f1

3.1. Introducción

En este capítulo se va a describir el dispositivo construido para controlar temperatura, el que será denominado **CTC–f1**. La descripción se hace empezando desde las partes que lo conforman, su funcionamiento y modo de operación y su empotrado final en el horno. Una descripción de su uso también se puede encontrar en el manual de usuario, que se presenta en este documento (Capítulo 4, sección 4.8).

3.2. Componentes

Los componentes esenciales de del controlador **CTC–f1** son los siguientes:

- Compensador de Juntura Fría.
- Microcontrolador
- Reloj de Tiempo Real
- Actuador
- Dispositivo de entrada de comandos
- Dispositivo para Despliegue de Información

3.2.1. Compensador de Juntura Fría

El compensador de juntura fría del que a continuación se hará referencia, es del tipo ya nombrado en el capítulo 1, sección 1.5. Este compensador es el *AD595* de ANALOG DEVICES, cuyo esquema y apariencia pueden ser vistos en la figura 3.1.

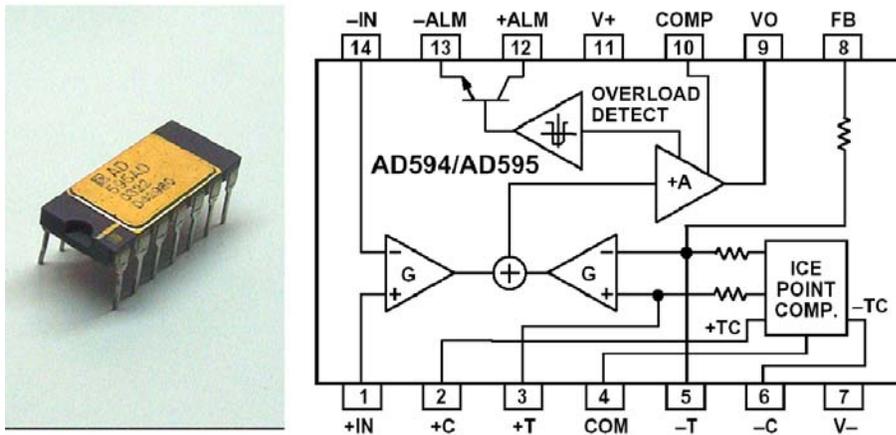


Figura 3.1. AD595

El AD595 es un amplificador de instrumentación y un compensador de junta fría para termocuplas, embebidos en un chip. El amplificador está precalibrado para dar una salida de $10\text{mV}/^\circ\text{C}$ directamente desde la señal de la termocupla. Puede ser usado como un amplificador lineal o como controlador de un setpoint usando un setpoint de entrada.

El AD595 es alimentado por una fuente simple o por una fuente dual, en cuyo caso pueden medirse temperaturas por debajo de los 0°C . El AD594 es precalibrado para termocuplas tipo *J*, mientras el AD595 es precalibrado para termocuplas tipo *K*.

La figura 3.2 muestra cómo debe ser conectado el AD595, la parte *a* es para una fuente simple de $+5\text{V}$, esta conexión provee un rango de medición de temperatura de 0°C a 300°C . La parte *b* muestra una conexión para una fuente dual, lo que incrementa el rango de las mediciones. Si el rango de el voltaje positivo se incrementa de 5V a 15V , se pueden obtener medidas de temperatura hasta 1250°C para termocuplas tipo *K* usando el AD595 [2].

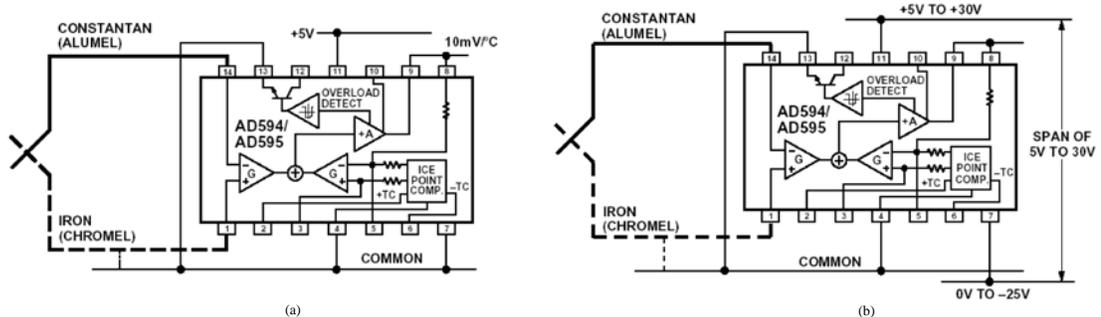


Figura 3.2. Conexión del AD595

3.2.2. Microcontrolador

Este es obviamente el dispositivo más complejo e importante del controlador **CTC-f1**. De él dependen, la adquisición de la señal, el sistema de control, y la interfase entre el usuario y el dispositivo.

El microcontrolador usado fue un PIC18f452 de Microchip, su esquema se muestra en la figura 3.3. Este microcontrolador esta optimizado para que su arquitectura y conjunto de instrucciones sean compatibles con C, tiene una memoria FLASH de $32Kbytes$, puede trabajar con instrucciones que involucren hasta 16bits. Entre sus características se encuentran [11]:

- Timers (Timer0, Timer1, Timer2, Timer3)
- Modulo PWM
- Puerto I^2C
- Modulo USART
- Conversor Análogo Digital de 10 bits
- Memoria EEPROM
- entre otros

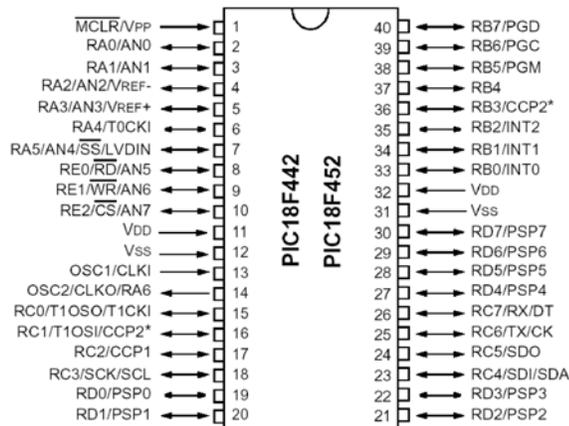


Figura 3.3. Microcontrolador PIC18f452

Los elementos usados del microcontrolador para este proyecto fueron, el conversor análogo digital, con su máxima resolución (10 bits), para la adquisición de la señal y para el voltaje de referencia involucrado en la conversión, y los puertos de entrada y salida, para manejo de los demás componentes del **CTC-f1**. Las conexiones a los elementos manejados y controlados por el microcontrolador se muestran en la figura 3.4.

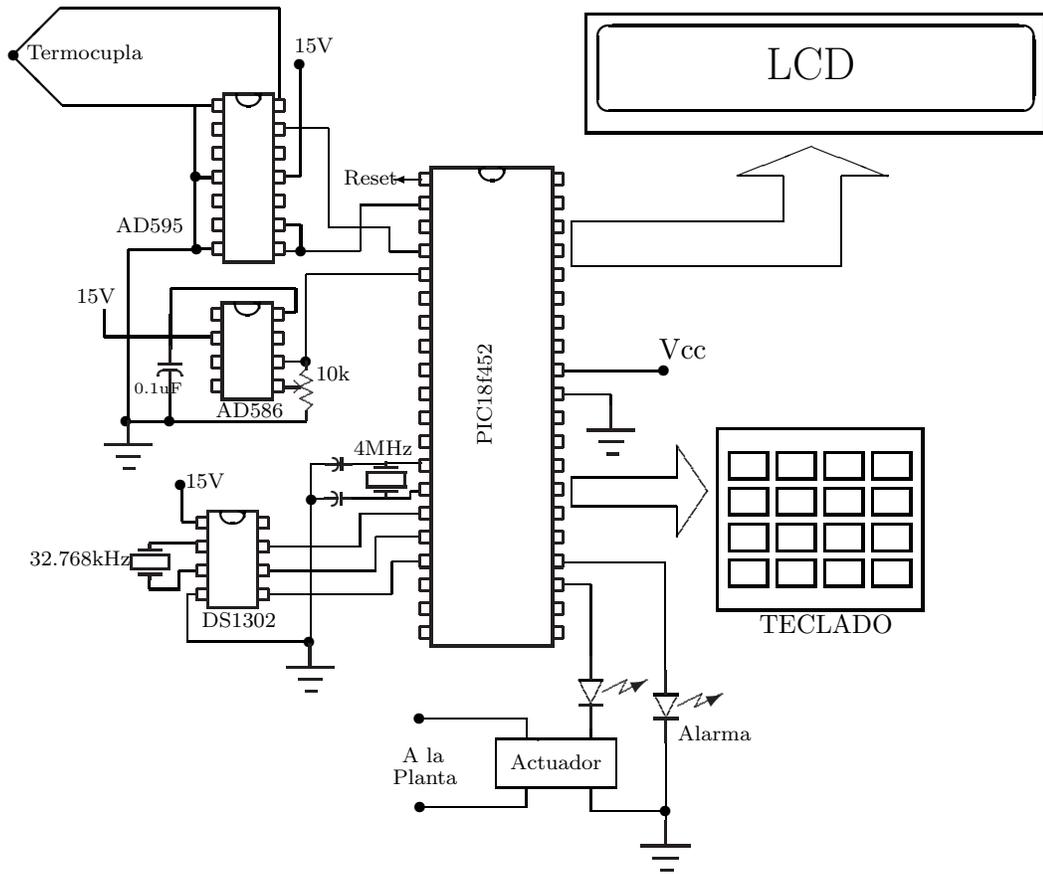


Figura 3.4. Diagrama de Conexiones del Microcontrolador

En esta figura (3.4), se ve también que la frecuencia de operación del microcontrolador fue de $4MHz$ y el voltaje de referencia es suministrado por el AD586 de ANALOG DEVICES. Este dispositivo se usó para hacer más fiable la lectura del convertidor, adicionalmente, no solo se trabaja con un solo dato del convertidor, sino que se toman varios y se hace un promedio (filtro moving average).

El *AD586* tiene una precisión de $5,000V \pm 2mV$, que es manejada por un trimmer. El esquema del *AD586* y su configuración se muestran en la figura 3.5 [1].

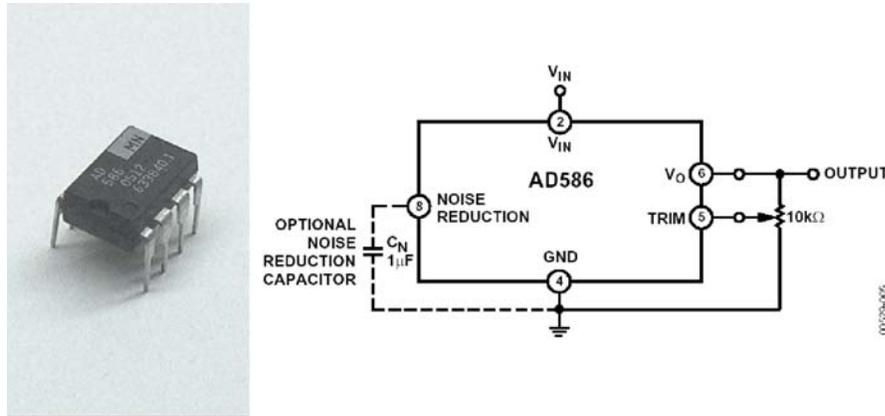


Figura 3.5. Esquema del *AD586*

3.2.3. Reloj de Tiempo Real

El reloj de tiempo real que se usó para este proyecto fue un *DS1302* de la compañía MAXIM. Este dispositivo se usó principalmente por las ventajas que tiene frente al microcontrolador para contar tiempos largos, además que trabaja independientemente una vez es inicializado, labor que es realizada por el microcontrolador. Su esquema se muestra en la figura 3.6.

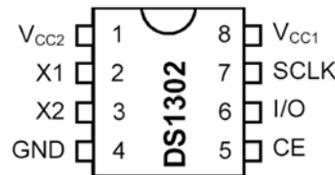


Figura 3.6. Reloj de tiempo real *DS1302*.

El *DS1302* contiene un reloj/calendario de tiempo real y 31 bytes de RAM. Su comunicación es por una interfase serial a un microcontrolador. El reloj/calendario de tiempo real entrega segundos, minutos, horas, día de la semana y día del mes, mes y año. El calendario se ajusta para meses de menos de 31 días y para años bisiestos. El reloj opera en formato de 24 o 12 horas con un indicador para AM/PM.

La interfase entre el *DS1302* y el microcontrolador es serial síncrona. Tan solo un bus de tres líneas se requiere: CE (pin de habilitación de la comunicación), I/O (línea de datos bidireccional) y SCLK (señal de reloj). El dato puede ser transmitido del reloj o al reloj byte por byte o en modo burst de 31 bytes.

Además de lo anterior, el *DS1302* es capaz de conmutar entre dos fuentes de alimentación, la principal V_{CC2} y una alterna V_{CC1} , que se encuentra como respaldo, en caso de fallo eléctrico y así mantener el calendario [9].

La figura 3.7, muestra la conexión serial entre el reloj de tiempo real *DS1302* y el microcontrolador.

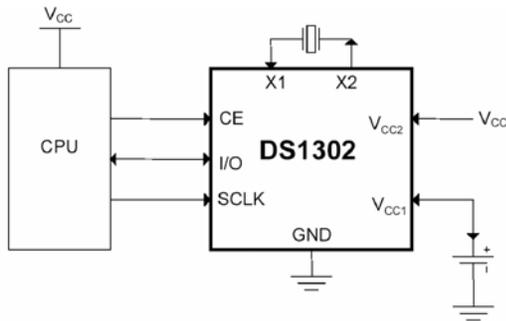


Figura 3.7. Conexión entre el reloj de tiempo real *DS1302* y el microcontrolador.

3.2.4. Actuador

El actuador utilizado en el controlador **CTC-f1** fue un relay de estado sólido, el *TSS16G48S* marca TOSHIBA, como el que se muestra en la figura 3.8.

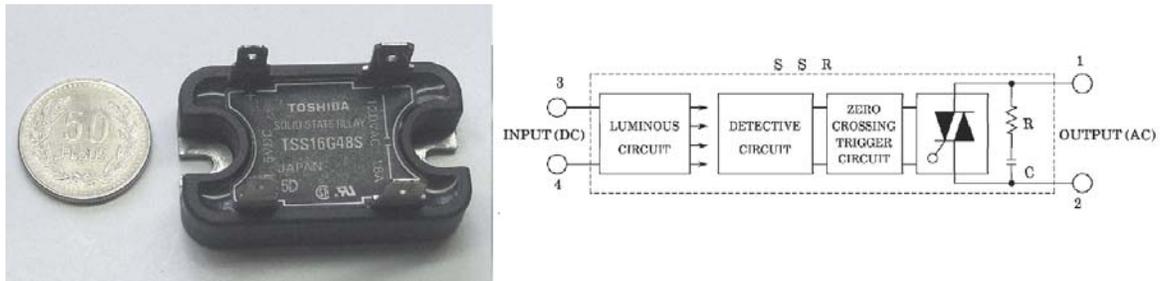


Figura 3.8. Relay *TSS16G48S* TOSHIBA.

Este relay cuenta con un aislamiento óptico, opera a un máximo de $16A$ y $120V_{AC}$ y es compatible con dispositivos TTL con un volaje máximo de entrada de $5.5V$, y la corriente no debe superar los $30mA$ [18].

3.2.5. Dispositivo de entrada de comandos

El dispositivo para la entrada de comandos es simplemente un teclado matricial de 4x4 teclas, como el mostrado en la figura 3.9.



Figura 3.9. Teclado matricial para entrada de comandos.

Desde el teclado se pueden acceder los datos para modificar los parámetros del controlador, valores de temperatura y tiempos de operación. Tiene de igual modo implementada, con manejo desde el microcontrolador una tecla para el aceptar (enter) y otra para cancelar (cancel).

3.2.6. Dispositivo para Despliegue de Información

La información manejada por el controlador **CTC-f1** es desplegada por una pantalla de cristal líquido o LCD, como el de la figura 3.10

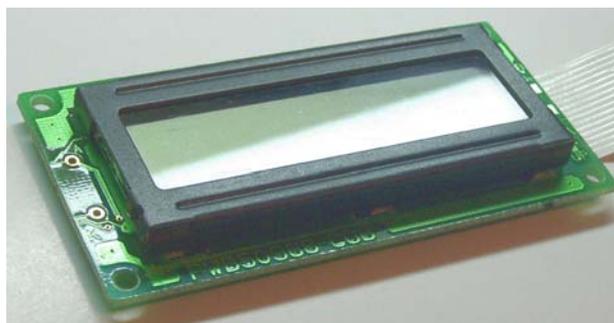


Figura 3.10. Pantalla LCD.

Esta pantalla cuenta con 2 filas y 16 columnas para mostrar los caracteres, sean números letras o símbolos, cada carácter dispone de una matriz de 5x7 puntos. La pantalla puede comunicarse con el microcontrolador por medio de un bus de 8 pines o de 4 pines, como fue el caso para este proyecto.

La información que muestra la pantalla se describe en la siguiente sección 4.8.4.

La unión de todos los componentes hacen el controlador **CTC-f1**, la figura 3.11 muestra el controlador totalmente ensamblado, listo para ser empotrado en el horno.



Figura 3.11. Controlador **CTC-f1**

3.3. Empotrado del **CTC-f1** en el horno

Las consideraciones generales para empotrar el controlador consideran los siguientes ítems:

- Debe estar a una distancia prudente, de tal modo que la temperatura externa del horno no comprometa su estructura y funcionamiento.
- La caja que lo contenga debe tener un tipo de aislamiento térmico y debe estar sujeta al horno.
- El controlador debe estar bien sujeto a la caja mencionada en el ítem anterior.
- Conectar adecuadamente los cables de alimentación, debido a que existen elementos de baja y alta potencia.
- El interruptor principal y la entrada de los cables de alimentación también deben considerar el primer ítem.

El esquema general del empotrado del controlador, se muestra en la figura 3.12. Esta figura da una consideración general del aspecto que debe tener la caja que contenga al controlador **CTC-f1** y donde pueden ir puestos el interruptor principal y la entrada de alimentación.



Figura 3.12. Empotrado del **CTC-f1**

Capítulo 4

Resultados y Análisis.

4.1. Introducción

Los resultados de este trabajo involucran lo obtenido desde la caracterización de la termocupla hasta el controlador **CTC-f1** como resultado final.

Los resultados del trabajo se centran en dos aspectos, las curvas para tratamiento térmico del **CTC-f1** sobre el horno, y el **CTC-f1**.

Además, coherente con el objetivo general del trabajo, esto es, *Diseñar y construir un controlador de temperatura para un horno eléctrico, que le permita ascender a un valor de temperatura y conservarlo por un lapso de tiempo*, se incluye en este capítulo el manual de usuario del controlador como resultado del trabajo.

4.2. Caracterización de la Termocupla

La termocupla es una tipo K, como ya se explicó en el capítulo 1, sección 1.3. La caracterización se hizo para determinar el tiempo de respuesta de la termocupla y comparar luego esta respuesta con el tiempo de respuesta del horno. La figura 4.1 muestra la respuesta del sensor.

Como se puede ver en la figura 4.1, el sistema se puede aproximar por un sistema de primer orden. El análisis de la gráfica indica un $\tau = 162s$ para una entrada escalón de $290^{\circ}C$ aproximadamente. La respuesta está en voltios debido a que este dato de voltaje proviene del AD595, es decir, el sensor como tal es el conjunto *termocupla - AD595*, es por esto que los voltajes de la gráfica son altos, comparados con los entregados por la termocupla únicamente. La función de transferencia de la termocupla se hizo considerando lo indicado en el manual del AD595.

La función de transferencia de la termocupla es entonces:

$$T = 98,711V + 1,468$$

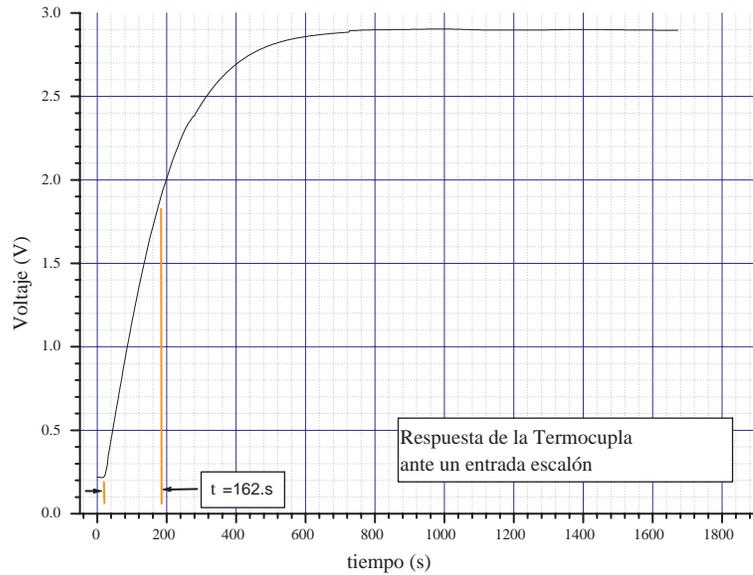


Figura 4.1. Respuesta de la termocupla ante una entrada escalón

Donde V , es el valor en voltios entregado por el $AD595$.

La comparación del tiempo de repuesta de la termocupla con el del horno se hace para considerar la aproximación mencionada en el capítulo 1, sección 1.6.2

4.3. Caracterización del Horno

Para la caracterización del horno se procedió, al igual que con la termocupla, utilizando una señal de entrada tipo escalón. La señal de entrada fue en voltios AC y la salida se registró en grados centígrados. El procedimiento fue el siguiente, primero la señal de entrada se aplicó y se dejó al horno alcanzar un valor estable (dentro de un rango de operación) de $377^{\circ}C$. El valor de la señal de entrada fue $62VAC$ valor *rms*, luego se incrementó el valor de la señal de entrada a $69VAC$ (un escalón de $7VAC$), con lo que el sistema aumentó su temperatura hasta $475^{\circ}C$, como lo muestra la grafica 4.2.

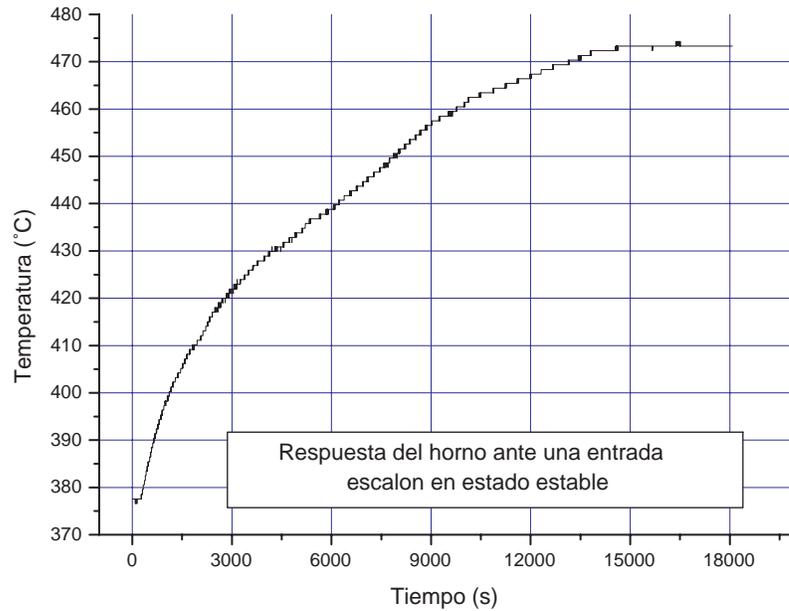


Figura 4.2. Respuesta del horno en un rango de operación.

De esta grafica se tiene la tabla 4.1:

Tabla 4.1. Caracterización del horno

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
Tiempo de respuesta	τ	5721	s
Tiempo muerto	L	65.9	s
Constante del horno	K_H	13.93	°C/V

Los valores de τ y L , se obtienen como se ilustra en la figura 4.3 [15].

El valor de K_H se obtiene de la razón entre la diferencia del valor máximo y el mínimo de temperatura y la diferencia entre los valores de la señal de entrada.

Como se puede ver el valor de τ del horno es mucho mayor que el de la termocupla, por lo que el modelo utilizado para la planta fue:

$$G(s) = \frac{13,93 e^{-65,9s}}{5721s + 1} \quad (4.1)$$

Es este modelo el que fue utilizado para las simulaciones.

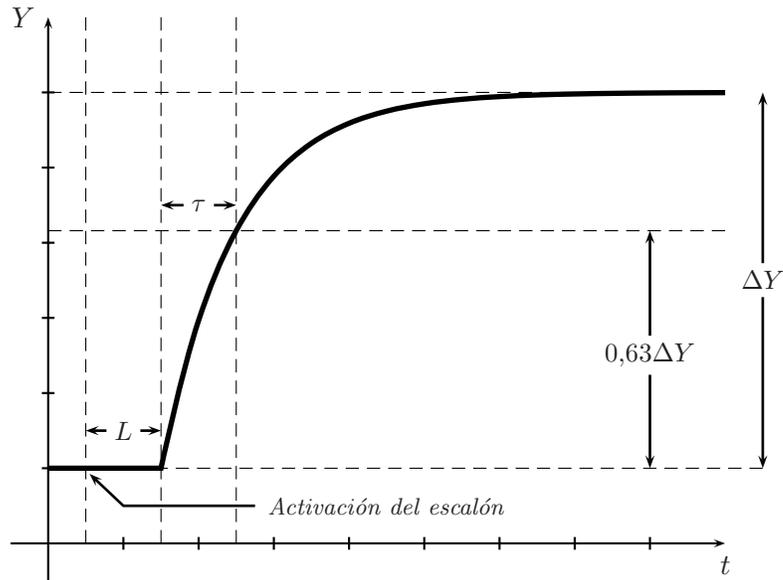


Figura 4.3. Forma de calcular los valores de τ y L .

4.4. Parámetros del controlador

Ahora, con el modelo de la planta que, es como ya se dijo, un sistema de primer orden, se obtienen los parámetros del controlador. Estos parámetros se obtienen a partir de un controlador por modelo interno (ecuación (2.17)), la forma de estos parámetros esta expuesta en las ecuaciones 2.31, remplazando los valores de τ , L y K_H y considerando un $\lambda = 0,5$ ¹, los valores para T_i , K y T_d serán:

Tabla 4.2. Parametros del controlador

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
Tiempo integral	T_i	5753.8	s
Tiempo derivativo	T_d	32.56	s
Constante del controlador	K	6.22	V/°C

Así, la ley de control se puede expresar como

$$U(s) = K \left[(SP(s) - Y(s)) + \frac{1}{5753,8s} E(s) - \frac{32,56s}{1 + \frac{32,56}{3}s} Y(s) \right] \quad (4.2)$$

Que corresponde a la ecuación 2.13 con $b = 1$ y $N = 3$ [13].

¹Se opto por este valor con base en los resultados de las simulaciones

4.5. Simulación

El objetivo de la simulación es dar un vistazo preliminar del posible comportamiento del horno y saber su respuesta ante los requerimientos impuestos por el operario, es decir, las rampas y los escalones. La simulación se hizo con la herramienta *Simulink* de *MatLab*. El diagrama de bloques de la simulación se muestra en la figura 4.4.

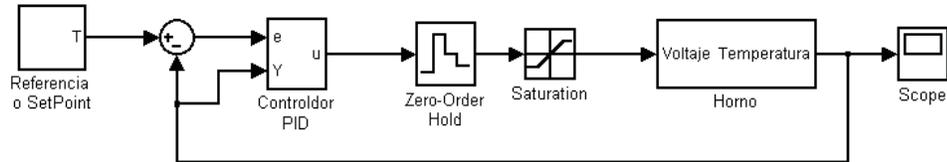


Figura 4.4. Diagrama de bloques para la simulación

La figura 4.4 incluye un bloque del controlador, que se construye a partir de la ecuación (4.2) y que se ilustra en la figura 4.5.

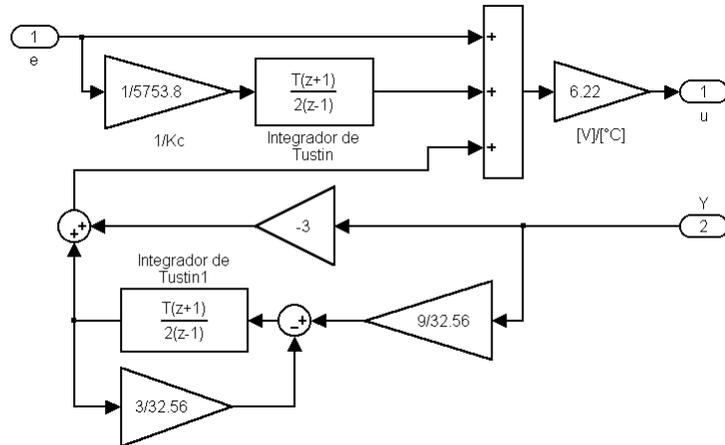


Figura 4.5. Diagrama de bloques del controlador

Para la simulación y el proceso real de control se empleó un tiempo de muestreo de $h = 1s$.

Los resultados de la simulación se presentan en la siguiente serie de figuras.

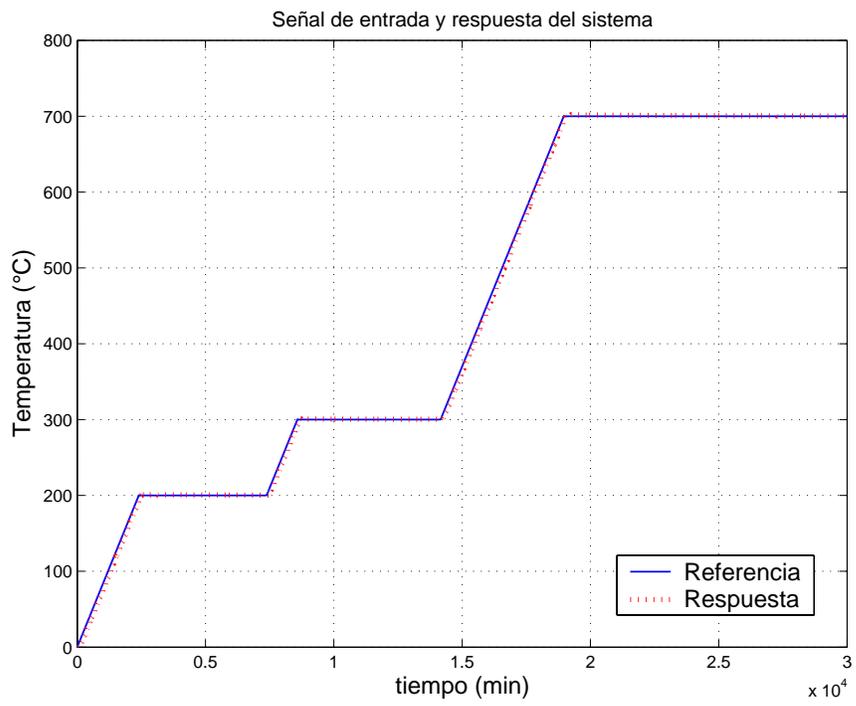


Figura 4.6. Relación entrada salida

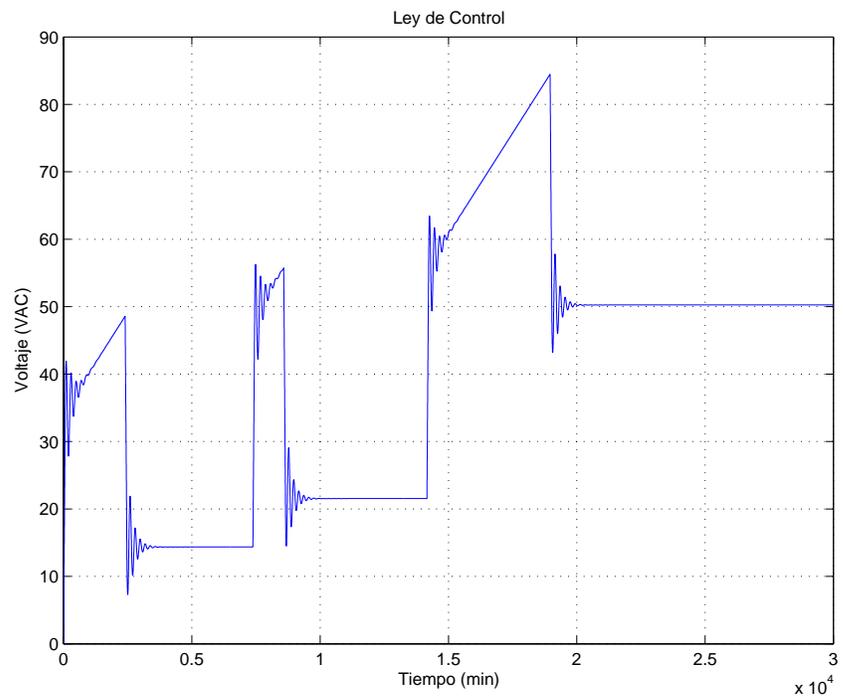


Figura 4.7. Ley de control

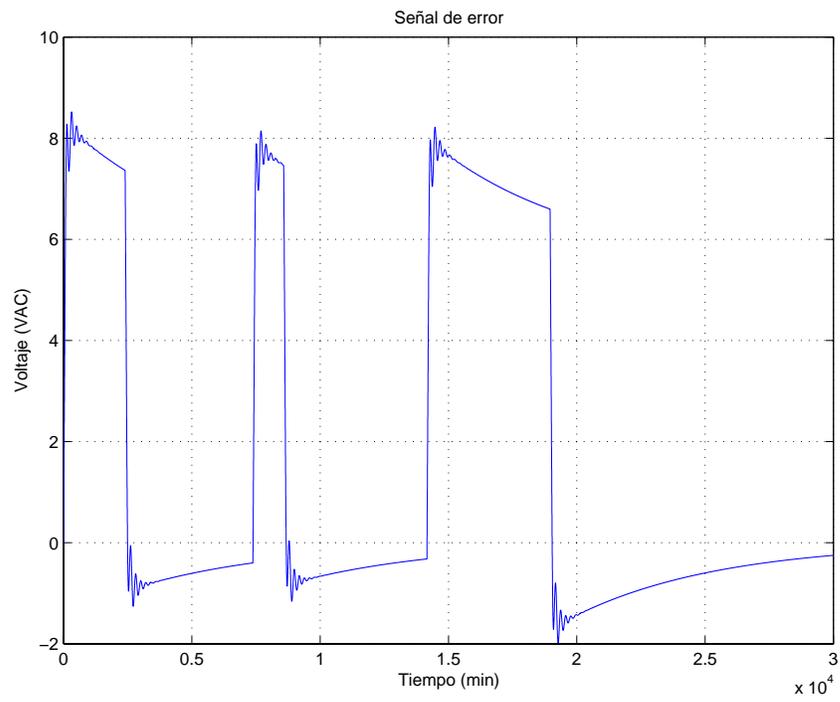


Figura 4.8. Señal de Error

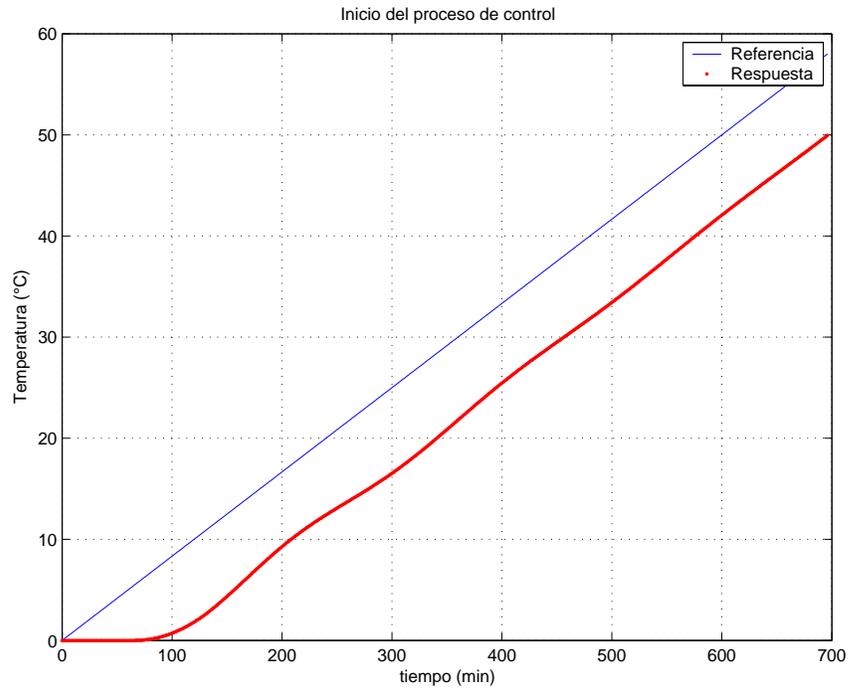


Figura 4.9. Inicio de la rampa

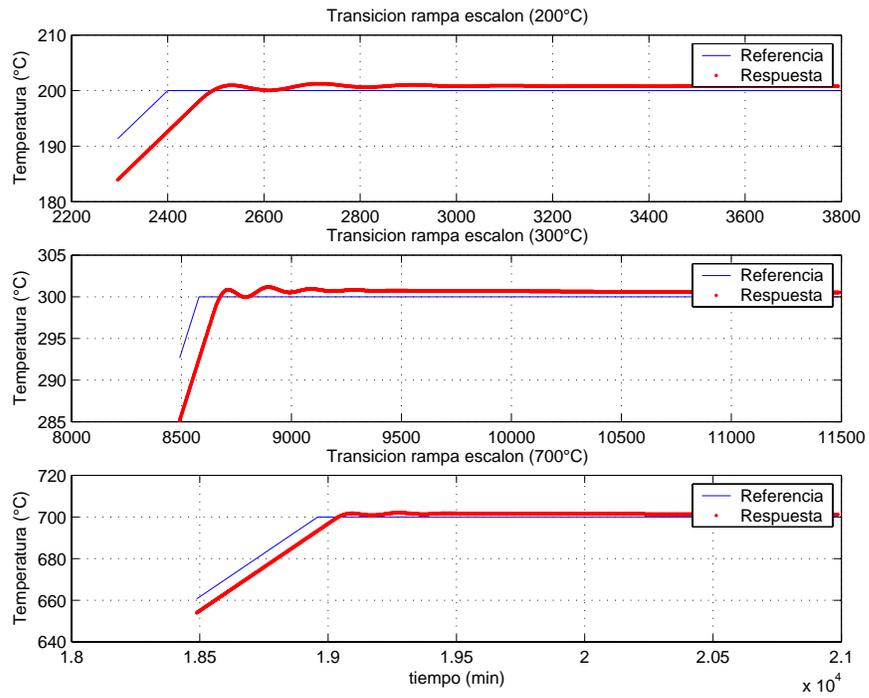


Figura 4.10. Transición rampa – escalón

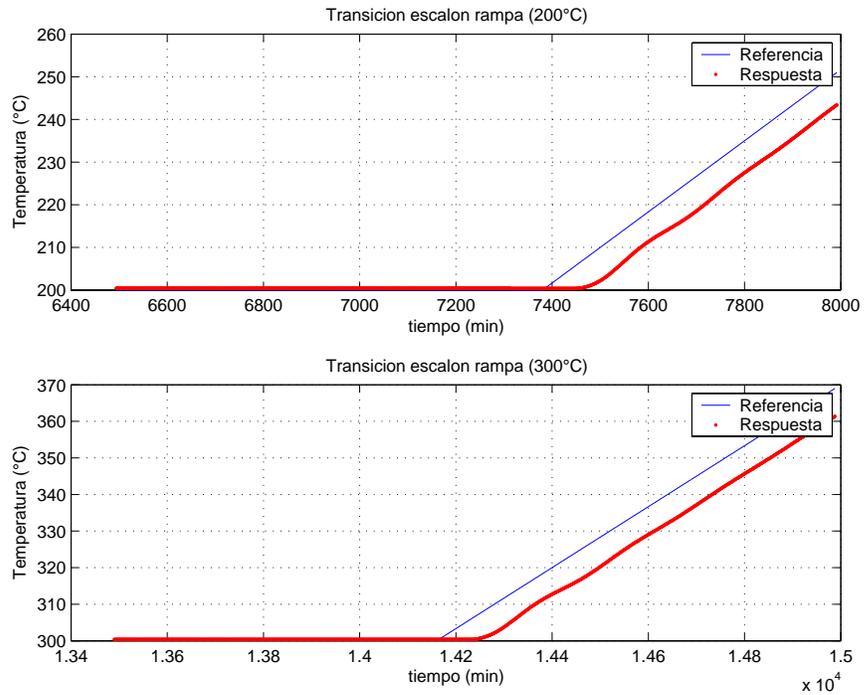


Figura 4.11. Transición escalón – rampa

La ley de control expuesta en la figura 4.7 fue la aplicada a la planta. Pero como se ve, los voltajes son altos y son AC (rms), cosa que el microcontrolador no puede manejar. Por ello se genero una señal PWM a partir del resultado de la ley de control y esta señal fue la que se aplicó al actuador. La ley de control se hizo tomando como base la ecuación para un voltaje rms (ecuación (4.3)), en la que la señal de alimentación V es considerada con su valor rms, la figura 4.12 da una visión mas clara de la ecuación 4.3 [12].

$$U = \left[\frac{1}{h} \int_0^t V^2 dt \right]^{1/2} \quad (4.3)$$

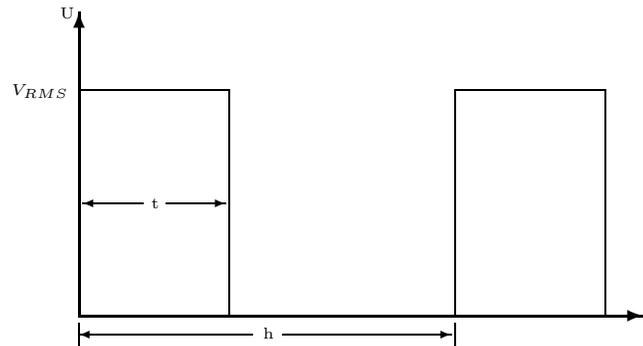


Figura 4.12. Señal PWM aplicada al Relay

donde U es la ley de control y h es el tiempo de muestreo y corresponde también al periodo de la señal PWM. Dado que lo que interesa es el tiempo útil de la señal PWM, se resuelve para t , siendo este expresado del modo siguiente

$$t = \frac{U^2}{V^2} h \quad (4.4)$$

4.6. Funcionamiento y Modo de Operación del Controlador CTC-f1

En esta sección se describe cómo el controlador **CTC-f1** trabaja desde el momento que se enciende hasta que el proceso de tratamiento térmico termina. El proceso se lleva a cabo en 9 pasos que se describen a seguir:

1. Configuración del microcontrolador:
 - Configura los puerto, para manejo del teclado, reloj y actuador.
 - Configura la pantalla LCD, en modo de bus de 4 líneas y caracteres de 5x7.
 - Configura el conversor análogo/digital con una entrada para voltaje de referencia
 - Configura el reloj con un valor por defecto (12:00:00)
 - Carga otros valores por defecto (pendiente, constantes del controlador)

2. Aparece un mensaje letra por letra en la fila superior del LCD, indicando que es un controlador de temperatura. Luego aparecerá en la fila inferior un mensaje que se desplaza de derecha a izquierda, mostrando el nombre del laboratorio y el de la universidad.
3. Estos dos mensajes seguirán mostrándose hasta que el usuario haga una de dos cosas:
 - i. Presione la tecla asterisco (*). Este hecho, hará que al usuario se le presente un menú, en el que podrá escoger la pendiente o información del controlador.
 - Escoger la pendiente. Se presentan tres opciones de variación de temperatura, 3, 5 o $10^{\circ}C/min$. La última es por defecto.
 - Información del Controlador (*Acerca de...*). Aquí, el usuario obtiene información sobre el tipo de controlador, la versión y el fabricante.

Para salir de este menú puede hacerlo, oprimiendo el número que el menú indique.
 - ii. Presione la letra *D* (enter). Esto hace que los mensajes de la pantalla se desplacen a la izquierda, dando paso a un nuevo mensaje. Si no se fijo algún dato, se cargan los que están por defecto
4. El nuevo mensaje muestra al usuario la posibilidad de escoger la cantidad de rampas. En la fila superior, el mensaje dice la variación ($^{\circ}C/min$) que tendrán las pendientes, la fila inferior da al usuario la posibilidad de escoger entre 1, 2 o 3 rampas. El usuario la escoge oprimiendo en el teclado el respectivo número.
5. A continuación se ingresarán los valores de temperatura que debe alcanzar el horno y los tiempos que debe durar estable con estos valores de temperatura. Si fue escogida una sola rampa, aparecerá un mensaje en la fila superior que dice (1Rampa->1Escalon), esto quiere decir que los valores que se ingresen deben ser: un valor de temperatura, que es el que se quiere alcanzar con la pendiente ya fijada, y un tiempo, que es el tiempo que este valor de temperatura debe permanecer estable. En la fila inferior aparecerá entonces, un mensaje que indicará al usuario ingresar el valor de temperatura *T_1*:. El valor de temperatura se almacena oprimiendo la tecla *D* (enter). Luego aparecerá un mensaje en la fila inferior pidiendo al usuario ingresar el tiempo para el valor de temperatura anteriormente almacenado (*t*->*T_1 00h00m*).
6. Si el usuario escogió dos o tres rampas, el procedimiento es similar a como se explico para una sola rampa. En la fila superior el mensaje indicara si se trata de 2 o 3 rampas. En la fila inferior los mensajes aparecerán para que el usuario ingrese los valores de temperatura para cada rampa y el tiempo para cada una.
7. Si por alguna razón los datos no se ingresan debidamente, es decir, no están dentro de los valores mínimos y máximos permitidos, tanto de temperatura como de tiempo, el dispositivo mostrara una advertencia y no permitirá continuar hasta que esto se solucione (los valores permitidos y sus restricciones se especifican en el manual).
8. Después que los pasos anteriores se han llevado a cabo, el dispositivo iniciará el proceso de control de temperatura. La pantalla, durante todo el proceso de control,

mostrará en la fila superior el estado en el que el proceso se encuentra, es decir, si está en la primera rampa, primer escalón, segunda rampa, segundo escalón, tercera rampa o tercer escalón y el valor de referencia o SetPoint (SP) para ese proceso. En la fila inferior, la pantalla debe mostrar el valor de temperatura del horno durante todo el proceso.

9. Cuando el proceso finalice, en la pantalla se podrá ver un mensaje que diga que el proceso ha concluido y el valor de temperatura actual del horno.

4.7. Respuesta del CTC-f1

Para describir las curvas de tratamiento térmico obtenidas, se iniciara mostrando desde las primeras sin carga en el horno, hasta las que se obtuvieron finalmente con carga.

La figura 4.13 muestra un tratamiento con dos rampas y un solo escalón. Se puede ver cómo efectivamente la temperatura del sistema asciende en la primera rampa y lo hace hasta 200°C. Los problemas que presenta esta gráfica se ven en la transición rampa –escalón y en el valor de las pendientes de las rampas. En el primero, la rampa alcanza el valor de temperatura para el escalón, pero cuando se debe iniciar, la temperatura desciende mucho, aproximadamente 15°C y empieza de nuevo a calentarse para alcanzar el SetPoint del escalón. En la variación de temperatura de las rampas, el valor no se acerca ni siquiera al 50 % del valor fijado.

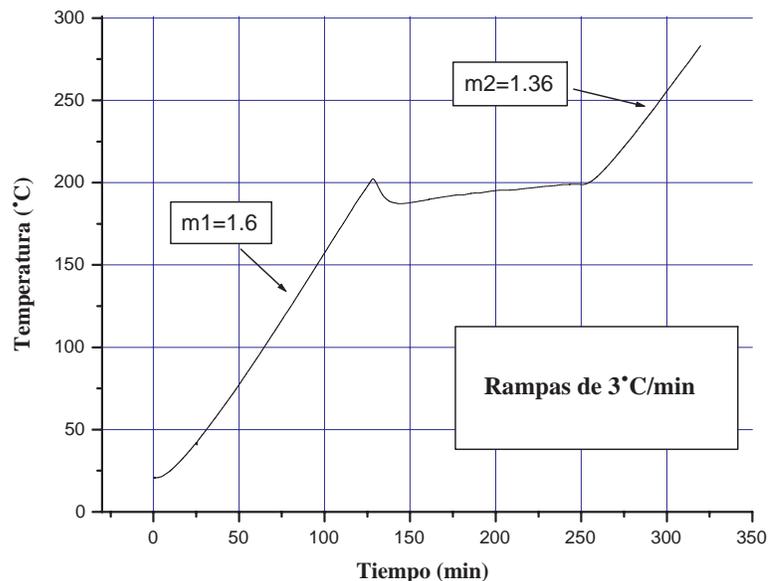


Figura 4.13. Respuesta del sistema para un proceso de control de 2 rampas de 3°C/min.

La figura 4.14 muestra un proceso de tratamiento térmico completo para 3 rampas de 5°C/min. Esta figura muestra los mismos problemas que la figura 4.13, con la diferencia que la variación de calentamiento en las rampas ahora supera el 50% del valor fijado. También se ve que los tiempos para los escalones están dentro de un rango que se considera aceptable.

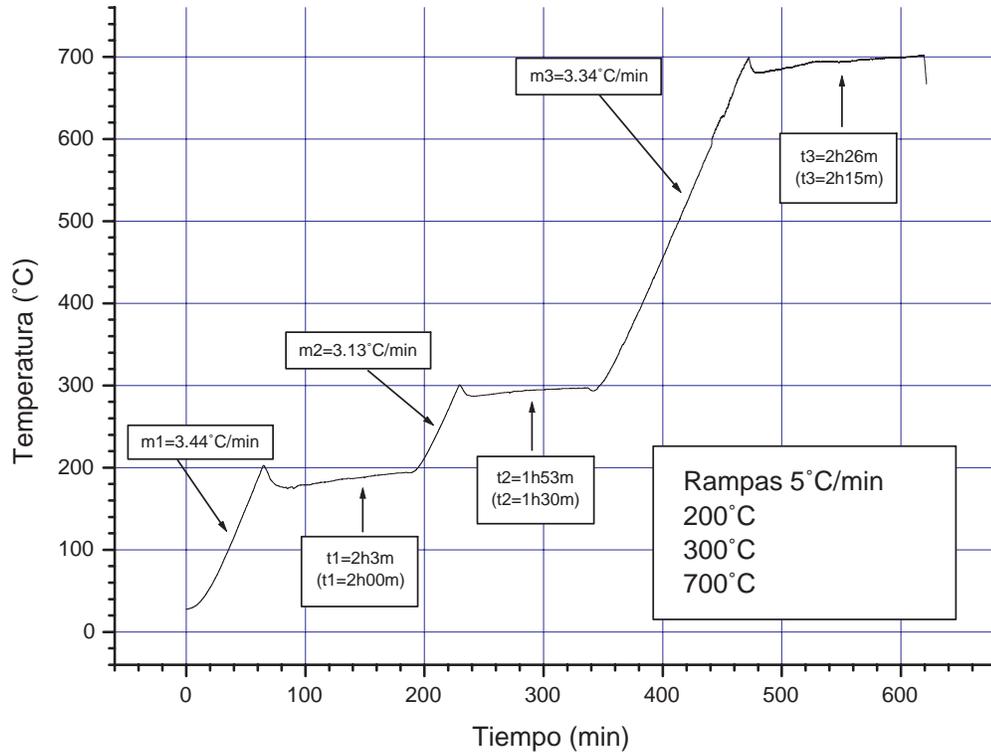


Figura 4.14. Respuesta del sistema para un proceso de control de 3 rampas de 5°C/min.

Con el análisis del código del controlador se descubrió que el error en la transición rampa – escalón se debía a la forma como se estaba fijando el setpoint. Corregido esto, se procedió de nuevo a tomar datos para el proceso de tratamiento térmico. Las graficas que se obtuvieron fueron 4.15 y 4.16.

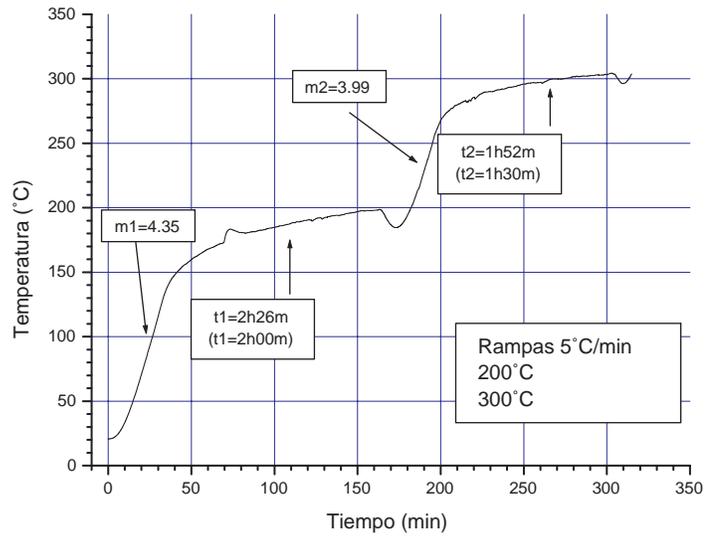


Figura 4.15. Proceso de control de 2 rampas de 5°C/min, con corrección en la transición rampas – escalón.

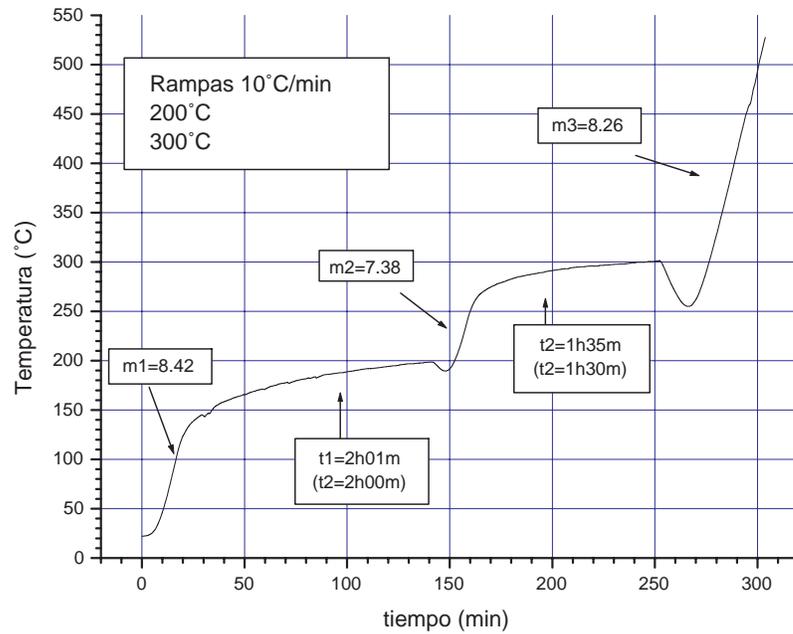


Figura 4.16. Proceso de control de 3 rampas de 10°C/min con corrección en la transición rampas – escalón.

Las gráficas ahora muestran que efectivamente el error en la transición rampas – escalón ha desaparecido, aunque la transición no se note tan drásticamente. El valor de las pendientes en ambos casos ha superado el 70 % llegando hasta el 85 % aproximadamente. Los tiempos de duración de los escalones están dentro de los rangos fijados, pero se presenta un problema que es muy evidente, y es el cambio brusco de temperatura en la transición escalón – rampa. El mas drástico se presenta en la segunda transición escalón – rampa de la figura 4.16, que son aproximadamente 50°C.

Para buscarle una solución a este problema, se recurrió a modificaciones en el hardware, con técnicas para disminuir el ruido (adición de condensadores de by pass), y a variaciones en el software del **CTC-f1** . A partir de este proceso se descubrió una falla en una constante del controlador mal dimensionada. Una vez corregida la constante se hicieron pruebas de nuevo, cuyo resultado se presenta en las figuras 4.17 y 4.18.

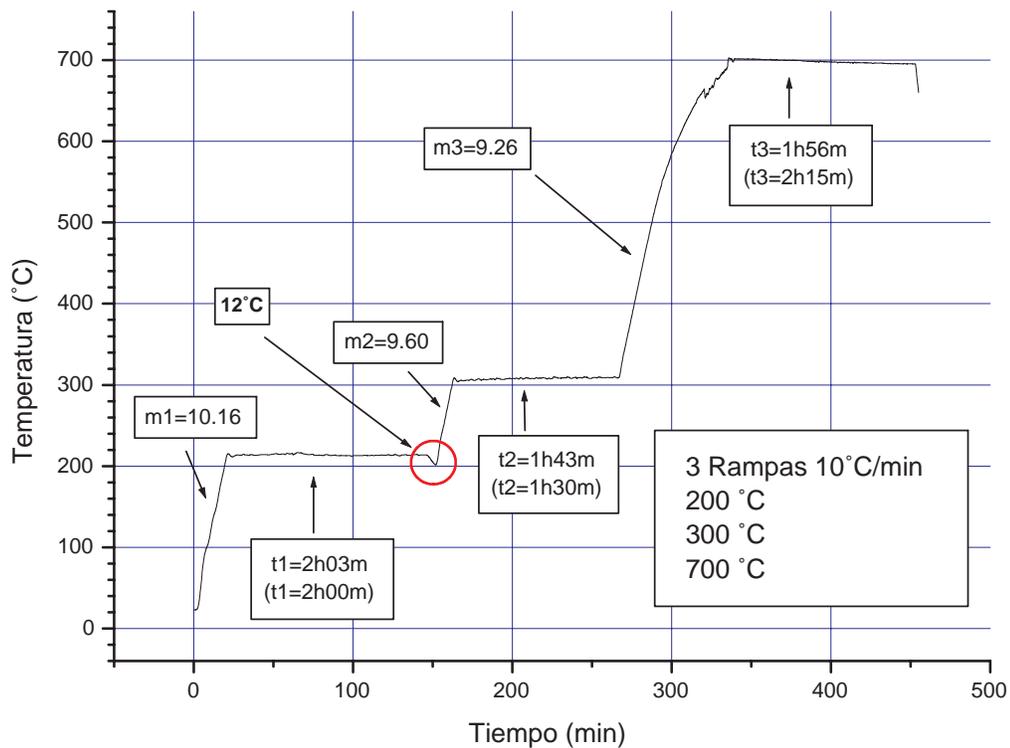


Figura 4.17. Proceso de control de 3 rampas de 10°C/min, con corrección en una constante del controlador.

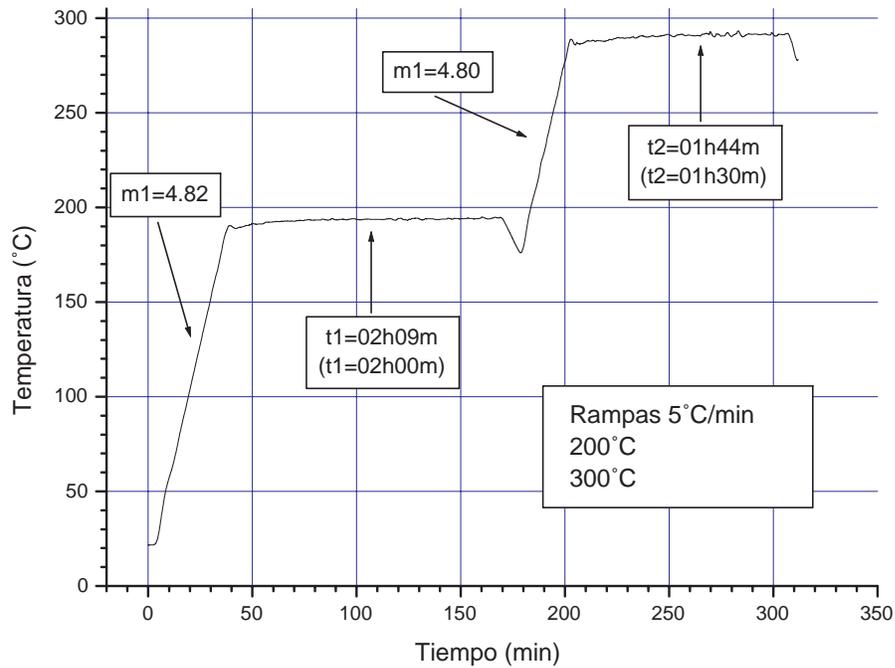


Figura 4.18. Proceso de control de 2 rampas de $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$, con corrección en una constante del controlador.

Lo que muestran las figuras 4.17 y 4.18 es un mejoramiento bastante considerable. Las pendientes están por encima del 90 % del valor fijado, las transiciones entre rampa – escalón y escalón – rampa, son definidas y claras, los tiempos de duración de los escalones están dentro de lo impuesto por el usuario, pero aun persiste un pequeño error en la transición escalón – rampa.

Este error no era predecible y podía ser causado por algún tipo de interferencia externa a la cual el controlador resultaba sensible. Es de anotar que para todas las figuras que hasta aquí se han presentado, el proceso de control se había llevado a cabo con el controlador en su fase experimental, es decir, todavía se encontraba montado en la protoboard.

Una vez el controlador fue montado en un circuito impreso y puesto en su lugar junto al horno como en el manual se especifica, se obtuvieron mejores resultados como los que muestran las figuras 4.19

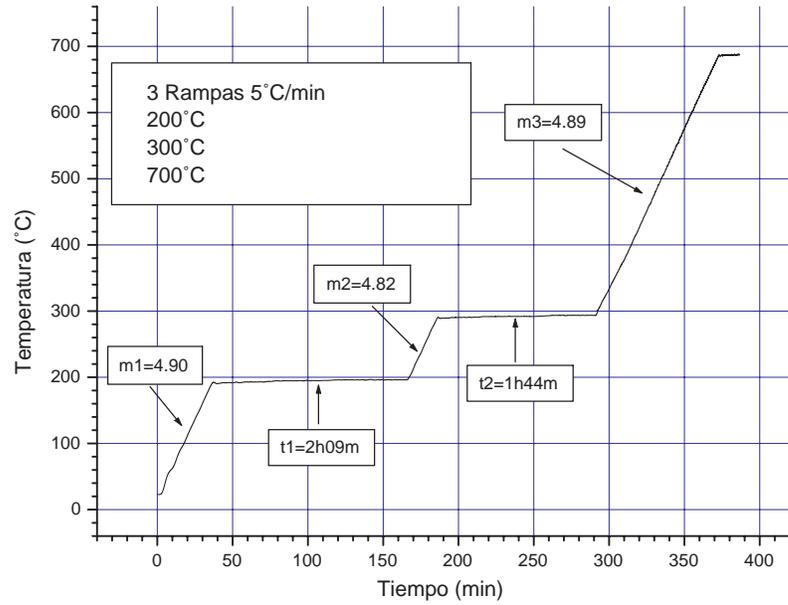


Figura 4.19. Proceso de Tratamiento térmico funcional

Para validar el proceso de control y el controlador **CTC-f1**, se hicieron pruebas “reales”, es decir, con carga en el horno, los resultado se muestran en la figura 4.20.

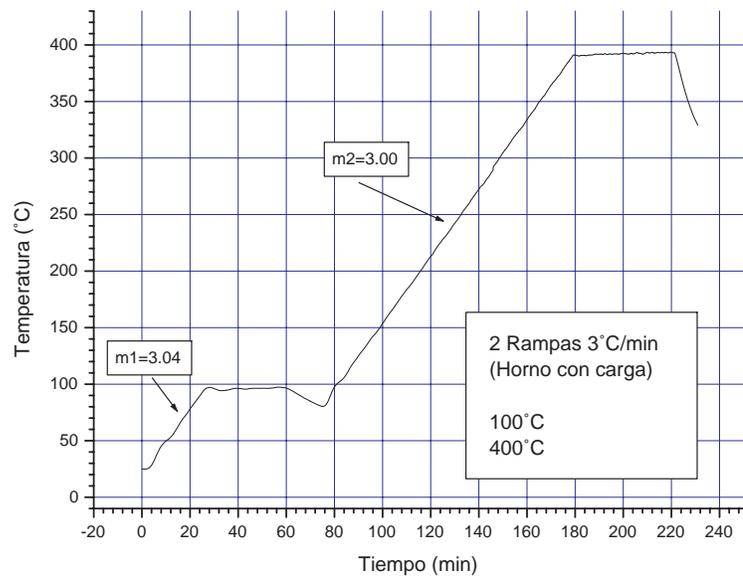


Figura 4.20. Proceso de Tratamiento térmico para validación del controlador, horno con carga

La figura 4.21 muestra como varia la temperatura durante el escalón en el proceso de control, esta variación es de 6°C aproximadamente, desde que se inicia el escalón hasta que termina y se inicia la nueva rampa o termina el proceso, y de 2°C cerca del final del escalón.

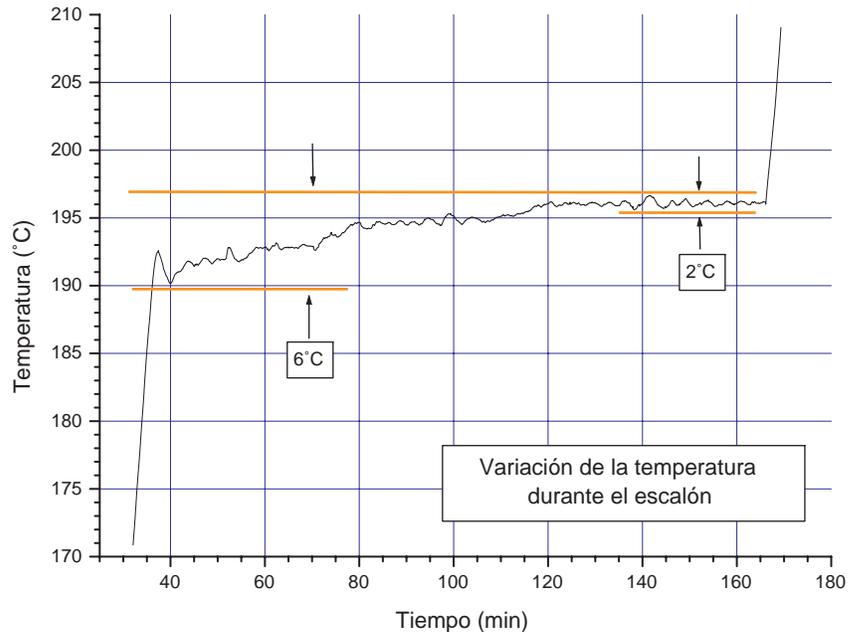


Figura 4.21. Variación de la temperatura en el escalón.

4.8. Manual de usuario del CTC-f1

4.8.1. Introducción

El **CTC-f1** es un controlador de temperatura tipo PID, diseñado con el objeto de dar funcionalidad a un horno eléctrico del laboratorio del grupo CYTEMAC de la Universidad del Cauca. El funcionamiento de este controlador se encuentra potenciado para el horno mencionado, aunque no se descarta un buen rendimiento en otros de su tipo. Este controlador se diseñó bajo las especificaciones de los investigadores del laboratorio, dentro de las cuales se cuenta con el número de rampas y la tasa de variación de temperatura. El controlador **CTC-f1** es capaz de operar en un rango de 10°C a 1000°C utilizando como sensor una termocupla tipo K.



Figura 4.22. Controlador de temperatura CTC-f1 .

4.8.2. Instalación

Precauciones e instrucciones de montaje

ATENCIÓN

Lea estas precauciones antes de instalar u operar el CTC-f1 .

Precauciones para la instalación

- Instalar en una caja metálica aterrizada, evitar que el sensor toque partes metálicas.
- Cablear de acuerdo a la información presente en este manual.
- Colocar el controlador a una distancia prudente de la fuente emisora de calor.

Precauciones de configuración

Las funciones del controlador son seleccionadas por el usuario, por ende es responsabilidad del usuario que la configuración del controlador esté dentro de los parámetros de funcionalidad ².

Precauciones de manipulación

El **CTC-f1** es un dispositivo electrónico y debe ser usado adecuadamente, el uso indebido puede provocar mal funcionamiento y acortar su tiempo de vida útil.

Instrucciones de montaje

El controlador **CTC-f1** necesita un agujero de 85x175mm en la caja metálica que lo contenga, para poder insertarlo y asegurarlo. Para el montaje se debe utilizar los tornillos de sujeción con los que cuenta el controlador. La figura 4.23 muestra las dimensiones del controlador y la figura 4.24 muestra el montaje y el modo de sujeción del controlador **CTC-f1** a la caja.

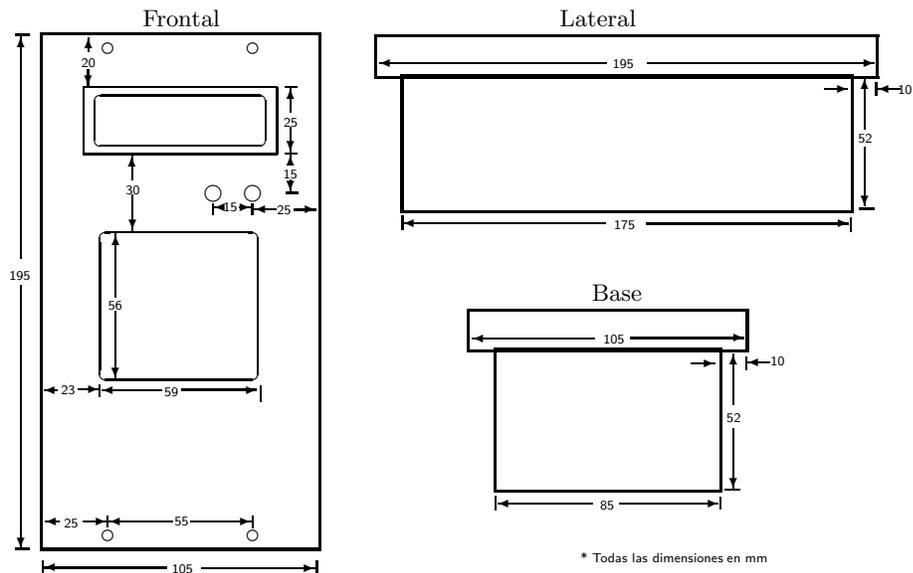


Figura 4.23. Dimensiones del controlador

²El controlador cuenta con parámetros preestablecidos para evitar un posible sobre funcionalidad, estos parámetros se especifican mas adelante

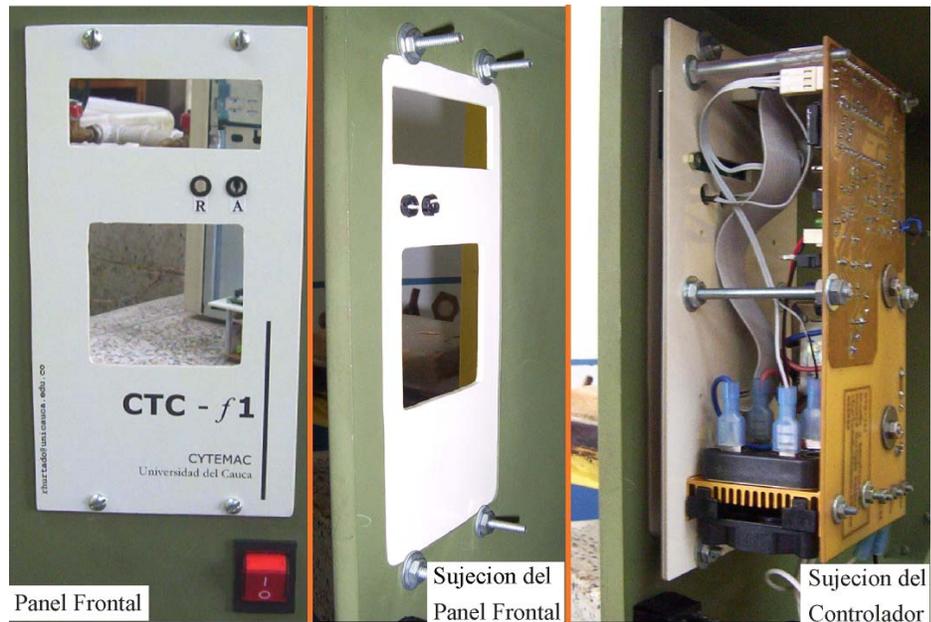


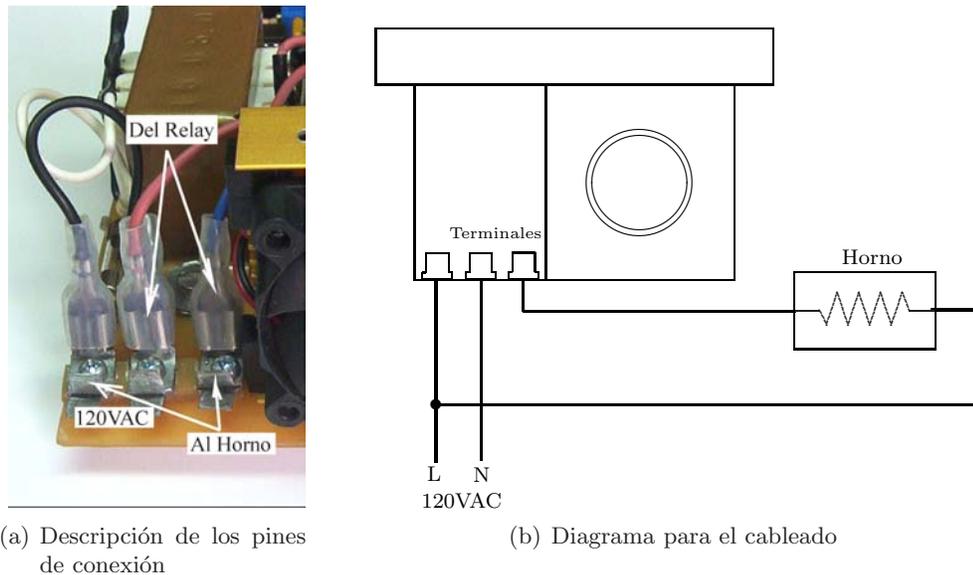
Figura 4.24. Montaje y sujeción del controlador

Las consideraciones generales para empotrar el controlador consideran los siguientes ítems:

- Debe estar a una distancia prudente, de tal modo que la temperatura externa del horno no comprometa su estructura y funcionamiento.
- La caja que lo contenga debe tener un tipo de aislamiento térmico y debe estar sujeta al horno.
- El controlador debe estar bien sujeto a la caja mencionada en el ítem anterior.
- Conectar adecuadamente los cables de alimentación, debido a que existen elementos de baja y alta potencia.
- El interruptor principal y la entrada de los cables de alimentación también deben considerar el primer ítem.

Cableado

El **CTC-f1** opera con $120VAC$, $60Hz$. La figura 4.25(a) muestra la parte inferior del controlador y describe que señales van conectadas a cada terminal. La figura 4.25(b) muestra un esquema básico de cableado para el **CTC-f1**.



(a) Descripción de los pines de conexión

(b) Diagrama para el cableado

Figura 4.25. Esquema básico de cableado del **CTC-f1**

4.8.3. Operación

Controles e indicadores

La figura 4.26 muestra el panel frontal del **CTC-f1**, con sus controles e indicadores.

Las funciones de cada elemento mostrado en la figura 4.26 se describe a continuación:

Despliegue LCD

Este siempre estará mostrando información al usuario sobre las funciones del controlador y el estado del proceso de control. En las funciones, el usuario podrá escoger los parámetros de operación del controlador, como son: la pendiente, el número de rampas, las temperaturas y los tiempos de operación. Durante el proceso de control, en el LCD se podrá visualizar si el proceso se encuentra en la primera rampa, primer escalón, segunda rampa, segundo escalón, tercera rampa o tercer escalón, además del SetPoint y la temperatura a la cual se encuentra el sistema.

Indicador de relay

Este LED se enciende cada vez que el relay se activa y su duración de encendido depende de la ley de control y de la señal PWM aplicada a la planta.

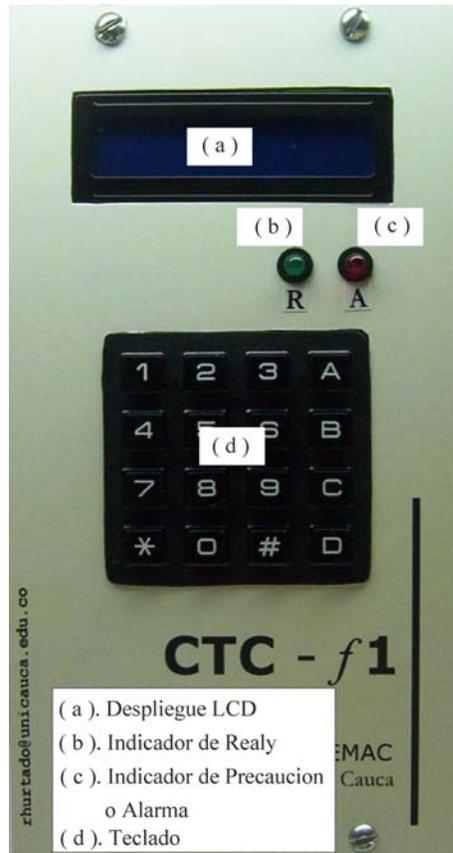


Figura 4.26. Panel frontal del **CTC-f1**

Indicador de precaución o alarma

Este LED se enciende cada vez que un parámetro de funcionamiento introducido al controlador por el usuario no se encuentra dentro de los rangos de operación establecido de antemano o no son acordes al proceso de funcionamiento, los rangos de funcionamiento permitidos se especificaran mas adelante así como las causas de un encendido del LED.

Teclado

Es desde aquí que se le dan las órdenes al controlador **CTC-f1** . Las teclas de 0 - 9 permiten ingresar los valores numéricos de temperatura y de tiempo, escoger el numero de rampas, su pendiente y navegar por algún menú. La tecla asterisco (*) tiene como función permitirle al usuario entrar en un menú donde podrá fijar el valor de la pendiente de calentamiento y obtener información acerca del controlador, su versión y fabricante. La tecla *D*, corresponde al *enter o aceptar*, con esta tecla se puede pasar de un mensaje en el LCD a otro, así como también aceptar los datos de temperatura y de tiempo introducidos por el usuario. La tecla *C*, corresponde a la tecla *cancel o cancelar*, sirve para corregir un dato mal introducido, sea de tiempo o de temperatura.

4.8.4. Funcionamiento

El funcionamiento básico del controlador **CTC-f1** en un proceso de control de temperatura es el siguiente:

Encienda el controlador. Si en la pantalla LCD aparece un mensaje que dice **ATENCION! TC no conectada**, el proceso de control no se llevara a cabo hasta que esto se solucione. Este mensaje se presenta porque el sensor no esta conectado o sufrió alguna avería.

En caso contrario en el LCD aparecerá un mensaje en la fila superior de la pantalla, este mensaje se mostrará al usuario letra por letra hasta que finalmente diga: **CTRL TEMPERATURA**, seguido de esto, en la fila inferior aparecerá otro mensaje que dirá: **Universidad del Cauca - CYTEMAC**, este mensaje se desplazará de derecha a izquierda quedando el controlador en *modo espera* hasta que el usuario haga una de las dos siguientes operaciones:

- i. Presione la tecla asterisco (*). Con esto el usuario ocasiona que el controlado **CTC-f1** entre en un nuevo *menú de parámetros* del controlador, donde presentará al usuario un conjunto de opciones. Estas opciones son variación de la pendiente e información acerca del controlador. Se puede acceder a cada una de estas opciones oprimiendo la tecla que el menú indique. En la opción de variación de pendiente el usuario podrá escoger entre tres valores (3, 5 o $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$) oprimiendo la tecla que se indique como se ve en la figura 4.27, luego regresara al menú de parámetros. En la opción de información del controlador se pude encontrar información sobre el tipo de controlador, y otra adicional que se muestra mas adelante. Estando en el menú de parámetros del controlador y ya escogida la nueva variación de temperatura, el usuario puede oprimir la opción salir y regresar al modo de espera del controlador.



Figura 4.27. Variación de la pendiente de calentamiento en el menú de parámetros

- ii. Presione la tecla *D* (enter). Con esto el usuario hace que el controlador opere con la variación de temperatura por defecto ($10^{\circ}\text{C}/\text{min}$) y pase a la siguiente parte del proceso.

Después de haber escogido la variación de temperatura, al usuario se le presentará en el LCD lo siguiente: En la fila superior, un mensaje indicándole que escogerá el número de rampas para el proceso de control. Este mensaje mostrará la variación de temperatura ya escogida. En la fila inferior se verá las opciones que el usuario tiene, que son 1 2 o 3, ver figura 4.28.



Figura 4.28. Numero de rampas con una variación ya escogida

Una vez se ha escogido el número de rampas para el proceso de control, el usuario deberá ingresar los valores de temperatura que el horno debe alcanzar y el tiempo que este valor de temperatura debe estar estable. Para esto el controlador mostrará en el LCD un mensaje en la fila superior que le indicará cuantas rampas ha escogido, si por ejemplo el usuario ingreso una rampa el mensaje será 1Rampa->1Escalon, de modo que los valores que ingrese a continuación corresponderán a una temperatura que se quiere alcanzar con la pendiente ya fijada y el tiempo que este valor de temperatura debe permanecer estable. Para esto, en la fila inferior del LCD aparecerá un mensaje que indicará al usuario ingresar el valor de temperatura T_1:, este valor de temperatura se almacena oprimiendo la tecla *D* (enter), si no se ingresa un dato de temperatura el controlador no operará y pedirá un valor de temperatura que este dentro de los permitidos. Una vez almacenado el dato de temperatura, en esta misma fila del LCD aparecerá un mensaje que pida al usuario ingresar el valor de tiempo de la siguiente forma: t->T_1 00h00m, si se oprime la tecla *D* (enter), el valor que se almacena de tiempo es 00h00m, si desea otro valor debe ingresarlo con el teclado numérico. Los valores de temperatura y tiempos permitidos se muestran mas adelante. Las figuras 4.29 y 4.30 muestran cómo el LCD informa de lo anterior al usuario

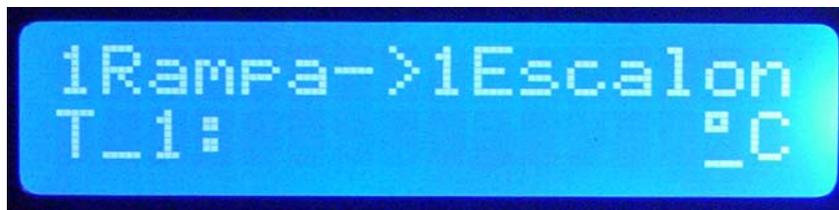


Figura 4.29. Ingreso del valor de temperatura

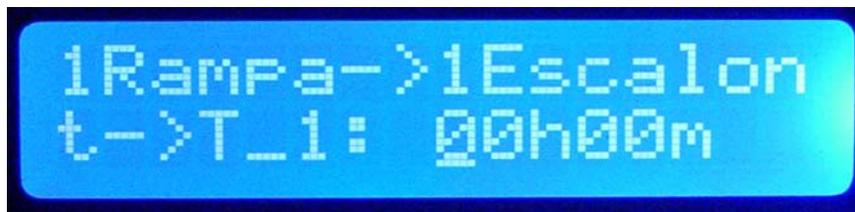


Figura 4.30. Ingreso del valor de tiempo para un valor de temperatura

Ahora, si el usuario ingresó dos rampas para el proceso de control, el mensaje que aparecerá en la fila superior del LCD será: 2Rampa->2Escalon, los valores de temperatura que se ingresen serán dos: T_1: y T_2: y los valores de tiempo también serán dos: t->T_1 00h00m y t->T_2 00h00m. El procedimiento es similar para cuando el usuario ha ingresado tres rampas para el proceso de control.

Después que los valores de temperatura y sus tiempos de duración han sido almacenados, el proceso de control se inicia. Durante todo el proceso de control, el LCD mostrará en la fila superior, el estado en el que el proceso se encuentra, es decir, si está en la primera rampa, primer escalón, segunda rampa, segundo escalón, tercera rampa o tercer escalón y el valor de referencia o SetPoint para esa parte del proceso. En la fila inferior, la pantalla mostrará el valor de temperatura del horno durante todo el proceso. Lo anteriormente descrito se muestra en la figura 4.31. El LED del relay se encenderá durante el proceso de control, según la ley de control le indique.



Figura 4.31. Información durante el proceso de control

Una vez el proceso de control ha finalizado, el controlador mostrará en el LCD un mensaje de **Concluido...** además de un mensaje que indicará al usuario el valor de temperatura actual del horno.

4.8.5. Valores por defecto y limitaciones de parámetros

El **CTC-f1** tiene, por defecto establecido, un valor de variación de temperatura para el proceso de control que es de: $10^{\circ}C/min$. Si el usuario desea cambiar la variación de temperatura debe hacerlo como ya se explicó anteriormente.

Las limitaciones de parámetros se refiere a los valores máximos y mínimos de temperatura y de tiempo que se pueden ingresar. El valor mínimo de temperatura es de $100^{\circ}C$ y el máximo es de $1000^{\circ}C$. Cuando el proceso involucra varias rampas, el valor de temperatura siguiente debe ser mayor que el anterior, es decir, si T_1 debe ser menor que T_2 y T_3 ($T_1 < T_2 < T_3$), esto debido a que el proceso de control del **CTC-f1** es de calentamiento ascendente. Los valores de tiempo son: mínimo 00h00m (cero horas cero minutos), máximo 12h59m (doce horas cincuenta y nueve minutos). Los valores como 00h70m no los acepta el **CTC-f1**, debe escribir su equivalente en horas y minutos, es decir, 01h10m

Cada vez que se introduzca un dato fuera de lo especificado, el controlador advertirá con un mensaje en el LCD y el indicador de precaución o alarma se encenderá en el panel frontal.

4.8.6. Especificaciones

Las especificaciones del **CTC-f1** en sus parámetros fundamentales se muestran en la tabla 4.3

Tabla 4.3. Especificaciones del **CTC-f1**

Parámetro	Valor	Unidades
Alimentación	120	VAC
	7	A
	60	Hz
Relay	16	A
Temperatura de operación	0 – 60	°C
Sensor	termocupla	K
Tiempo de muestreo	1	s
Rango de medición	10 – 1000	°C
Peso	654	g
Dimensiones	195 x 105 x 67	mm
Consumo de potencia	6.6	W

Capítulo 5

Conclusiones

El objetivo general, se cumplió completamente. El sistema realiza el ascenso de temperatura según la variación establecida por el usuario dentro de un 90 %, los tiempos de duración del escalón se adaptan a un amplio rango de procesos de tratamiento térmico y cumple con los valores fijados.

Con lo anterior se logró recuperar un equipo que, por falta de un adecuado modo de operación, se encontraba desechado, y con ello agilizar el proceso de investigación llevado a cabo por el grupo CYTEMAC de la Universidad del Cauca.

No solo se logró un sistema para tratamiento térmico, sino que el dispositivo es fácil de operar y “amistoso” con el usuario.

Como conclusiones secundarias, dentro del proceso de diseño y construcción del controlador, es interesante citar las siguientes:

De la caracterización de la termocupla. No es posible hacerlo si no se cuenta con un dispositivo adecuado. Si se pretende caracterizar haciendo la amplificación de la señal que entrega la termocupla con el uso de varios amplificadores operacionales, los datos obtenidos no resultaron, además este sistema requiere la suma de una temperatura de referencia, en otras palabras otro sensor de temperatura. Para esto, se pensó inicialmente en el uso de un diodo, pero la idea luego fue desechada.

Para solucionar los problemas mencionados, se hizo uso del amplificador *AD595*, que por ser embebido en un solo chip, minimiza influencias externas como ruido, además de tener una salida lineal.

De la caracterización del horno.

Para esta caracterización es necesario alimentar el horno con una señal PWM. Para este fin existen diferentes procedimientos, por ejemplo, poner un interruptor de encendido y apagado del horno, usar un transistor de potencia, utilizar un relay, usar un controlador de temperatura, o un variac, etc.

De todos los anteriores (todos probados en el trabajo), solo el variac da un resultado positivo ya que la señal que le llega al horno es confiable.

Del actuador.

Conseguida la caracterización del horno se cuenta con los parámetros para la ley de control que permite simular y operar el controlador. Esta ley de control se aplica sobre el actuador que inicialmente se pensó, sería un transistor de potencia, pero debido a las dificultades para su acondicionamiento, se optó por un relay de estado sólido que es más sencillo y práctico.

Bibliografía

- [1] ANALOG DEVICES *High Precision 5V Reference AD586*, USA, Analog Devices Inc., 2005.
- [2] ANALOG DEVICES *Monolithic Thermocouple Amplifiers with Cold Junction Compensation AD594/AD595*, USA, Analog Devices Inc., 1999.
- [3] ÅSTRÖM K.J., WITTENMARK B. *Computer-Controlled Systems, Theory and design*, 3ed., Prentice Hall, 1997.
- [4] ASTIGARRAGA URQUIZA, Julio. *HORNOS, Hornos Industriales de Resistencia*, Mc Graw – Hill Interamericana, S.A. 1999.
- [5] CREUS SOLÉ, Antonio. *Instrumentación Industrial*, 6ed., Santa fe de Bogota, Alfaomega, 2000.
- [6] ELSEVIER SCIENCE LTD. *Encyclopedia of Materials: Science and Technology, Thermal Analysis*, 2001.
- [7] ELSEVIER SCIENCE LTD. *Encyclopedia of Materials: Science and Technology, Thermal Processes*, 2001.
- [8] LEVA A., COX C., RUANO A. *Hands-on PID Autotuning: A Guide to Better Utilisation*, IFAC PROFESSIONAL BRIEF.
- [9] MAXIM *DS1302 Trickle-Charge Timekeeping Chip*, USA, Maxim Integrated Products, 2005.
- [10] MICHALSKI L., ECKERSDORF K., KUCHARSKI J., MCGHEE J. *Temperature Measurement*, 2ed., Wiley, 2001.
- [11] MICROCHIP *PIC18f452 Data Sheet*, Microchip Technology Inc, 2002.
- [12] RASHID. Muhammad H. *Electrónica de Potencia*, 2ed., México, Prentice Hall, 1995.
- [13] RENGIFO RODAS, Carlos Felipe. *Ajuste de Controladores PID por Aproximación de un Controlador por Modelo Interno*, Universidad del Cauca, Popayán.
- [14] RENGIFO RODAS, Carlos Felipe. *Notas de clase, Control Digital*, Universidad del Cauca, Popayán 2004.

- [15] RENGIFO RODAS, Carlos Felipe. *Notas de clase, Controladores PID*, Universidad del Cauca, Popayán 2004.
- [16] OGATA, Katsuhiko. *Dinámica de Sistemas*, 1ed., México, Prentice Hall, 1993.
- [17] OGATA, Katsuhiko. *Ingeniería de Control Moderna*, 3ed., México, Prentice Hall, 1998.
- [18] TOSHIBA *TSS16G48S, TSS16J48S*, Toshiba Corporation, 2001.
- [19] WILLARD H. H., MERRITT JR L. L., DEAN J. A., SETTLE JR F A. *Métodos Instrumentales de Análisis*, 1ed. en español, Compañía editorial continental, México, 1986.