



CCADET

CENTRO DE CIENCIAS APLICADAS Y DESARROLLO TECNOLÓGICO
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Diseño y desarrollo de la electrónica de control y medición de un horno de atmosfera controlada

**José Castillo Hernández
Benjamín Valera Orozco
María Esther Mata Zamora**

Junio de 2014

Proyecto Interno

Financiamiento interno

Diseño y desarrollo de la electrónica de control y medición de un horno de atmosfera controlada

José Castillo Hernández, Benjamín Valera Orozco y María Esther Mata Zamora

Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior S/N, Ciudad Universitaria AP 70-186, C.P. 04510, México D.F. México

Resumen

En este trabajo se presenta el diseño y construcción de la electrónica para el control de un horno de atmosfera controlada capaz de generar temperaturas que van desde el ambiente hasta 1200°C. En el diseño propuesto el horno está gobernado por un microcontrolador que realiza las tareas de control y procesamiento de señales. La temperatura se mide a través de un termopar de tipo platino II. Se caracterizó la respuesta del horno para una entrada escalón y a partir de esto se obtuvo su modelo. El modelo se usó para el ajuste del algoritmo de control. El control digital seleccionado para el horno es tipo proporcional e integral (PI). Se programaron además los algoritmos necesarios para que el horno trabaje con el esquema de perfiles de temperatura de tipo rampa. El sistema desarrollado es autónomo y la interface humano-máquina se realiza a través de un teclado de cuatro botones y una pantalla de cristal líquido. Se presentan los resultados experimentales obtenidos.

Indice

Nomenclatura	3
Introducción	4
Definición del problema	4
Entorno actual	4
Descripción del problema	4
Relevancia y limitaciones	5
Método	5
Objetivos y resultados esperados	6
Organización del informe	6
1. Sistema electrónico	7
1.1. Descripción del sistema electrónico	7
1.1.1. Sistema de control y potencia	7
1.1.2. Acondicionamiento de señal	8
1.2. Firmware en el microcontrolador	8
1.2.1. Descripción de la linealización	8
1.2.2. Algoritmo de generación de rampa	9
1.2.3. Descripción de la operación del control de temperatura	11
2. Control del horno	13
2.1. Respuesta escalón	13
2.2. Modelo matemático	13
2.3. Control PI	15
2.4. Simulación del sistema	16
3. Resultados	18
3.1. Prueba experimental de respuesta escalón	18
3.2. Prueba experimental de rampas de temperatura	20
Conclusiones	21
Agradecimientos	22
Anexo A Diagramas electrónicos	23
Anexo B Circuitos impresos	25
Anexo C Lista de material	27
Anexo D Código fuente	30
Referencias Bibliográficas	36

Nomenclatura

Símbolo	Significado
A/D	Analógico/digital
CA	Corriente alterna
e	Error
Delta_Temp	Incremento de temperatura
K	Amplitud normalizada de la respuesta escalón
Kp	Constante de proporción
L	Tiempo de retardo de la respuesta escalón
PI	Proporcional-integral
Pend_Temp	Pendiente de la rampa de temperatura
PWM	Modulación por ancho de pulso
r	Temperatura deseada o referencia
R	Estimación de velocidad de respuesta
RAx	Terminal número x del puerto A del microcontrolador
RBx	Terminal número x del puerto B del microcontrolador
RDx	Terminal número x del puerto D del microcontrolador
Ref	Valor de referencia de la temperatura
Ref_Limite	Temperatura máxima de la rampa
s	Variable en el dominio de Laplace
T	Tiempo que le toma a la respuesta escalón alcanzar el 0.63 de su valor normalizado K después del retardo
Temp	Temperatura
TEMP	Señal de voltaje que genera el termopar
Ti	Constante de integración
Tiempo_ON	Señal de PWM que controla el actuador del horno
TGA	Analizador Termogravimétrico
Tr	Constante de anti-windup
u	Respuesta del actuador real
v	Respuesta del modelo matemático del actuador
W	Tiempo que le toma a la respuesta escalón alcanzar su valor normalizado K después del retardo
y	Temperatura o respuesta del horno

Introducción

Existen diversos equipos que se emplean en el área de investigación que están conformados por actuadores, sensores, controles y etapas de acondicionamiento de señales. Los actuadores y sensores pueden ser de diversos tipos como eléctricos, mecánicos, neumáticos, etc. En el caso del control y la etapa de acondicionamiento es común que sean de tipo electrónico. Estos equipos pueden quedar fuera servicio cuando su electrónica llega a fallar y su reparación no es posible por cuestiones técnicas o económicas; sin embargo los actuadores y sus sensores pueden estar en perfectas condiciones.

En el Laboratorio de Materiales y Nanotecnología se tiene un equipo Analizador Termogravimétrico (Thermogravimetric Analyzer o TGA), modelo 951 fabricado por Du Pont Instruments [Du Pont Instruments 1985]. El TGA permite medir la cantidad y razón de cambio de peso de un material como una función del incremento de temperatura o de manera isotérmica como una función del tiempo en una atmosfera controlada. El TGA no se encuentra en operación dado que no se cuenta con la computadora que controla la interface gráfica y la etapa de potencia. El Laboratorio de Materiales y Nanotecnología está interesado en habilitar este equipo como un horno de atmosfera controlada.

Definición del problema

En este trabajo se presenta el diseño y desarrollo de la electrónica de medición y control de un horno de atmosfera controlada. El horno debe generar temperaturas siguiendo un perfil de calentamiento de tipo rampa, por lo que el algoritmo de control debe reducir lo más posible el sobrepaso de la respuesta. Se debe agregar que la información técnica del horno es limitada, por lo que es necesaria su caracterización.

Entorno actual

El TGA cuenta con un horno que según el fabricante tiene una curva máxima de calentamiento de 100°C por minuto y puede alcanzar temperaturas de hasta 1200°C. Es de tipo eléctrico y su temperatura se mide a través de un termopar de tipo platino II, que está inmerso en la cerámica del horno. Un segundo termopar tipo K se usa para medir la temperatura en las muestras que se introducen en el horno.

Existen en el mercado diversas soluciones como tarjetas de desarrollo y de adquisición para el control y monitoreo de temperatura; sin embargo están orientadas para sistemas en donde los actuadores y sensores son comerciales. El costo de algunas de estas soluciones es elevado, considerando además que se establece una dependencia con algunos programas de desarrollo. Como se menciona en [Montiel et al, 2010] y [Castillo et al, 2013], se busca diseñar tarjetas de desarrollo propias que permitan reducir costo y dependencia; en estos trabajos se generaron resultados que serán aplicados en el presente proyecto.

Descripción del problema

La electrónica original del equipo TGA está incompleta y se desechó debido a que no se cuenta con información suficiente que la respalde. Es por esto que se propone un nuevo diseño para la electrónica de control y medición de temperatura del horno. El control propuesto es digital y está basado en la operación de un microcontrolador. La etapa de medición es parte analógica y parte digital. A continuación se indican los requisitos que debe cumplir el diseño.

- El horno debe generar sus temperaturas siguiendo un perfil de calentamiento de tipo rampa.
- El usuario puede ajustar la pendiente y temperatura máxima del perfil.
- La interface humano-máquina es local.
- El horno puede operar desde una temperatura ambiente hasta alcanzar 1200°C como máximo.
- La pendiente del perfil de calentamiento se ajusta dentro del intervalo de 1°C/min. a 20°C/min.
- La temperatura se mide con un termopar de tipo platino II.
- El sobrepaso máximo de la respuesta debe ser menor de 5°C

Relevancia y limitaciones

Este trabajo permitirá aplicar los resultados obtenidos en trabajos previos y permitirá generar tecnología propia para el CCADET. También permitirá diseñar y probar otras alternativas en la programación de algoritmos de control y acondicionamiento de señales

No se cuenta con información adicional sobre el control del horno y no se tiene planos eléctricos ni electrónicos del mismo. Existe una electrónica original que al parecer se usa para la polarización y el acondicionamiento de los termopares; es de tipo analógica y está desarrollada con circuitos discretos como amplificadores operacionales, transistores y diodos. No se sabe si ésta es funcional, por lo que se recomendó un nuevo diseño.

Método

El control del horno será de tipo PI, similar al presentado en [Castillo et, al 2013], aunque se modificará para que alcance temperaturas de hasta 1200°C. Además debe permitir la operación a través de perfiles de temperatura de tipo rampa con pendientes de 1°C/min hasta 20°C/min. Por otro lado, la interface con el usuario es sólo local. En la figura 1 se muestra que interacción debe tener el sistema electrónico y el horno.

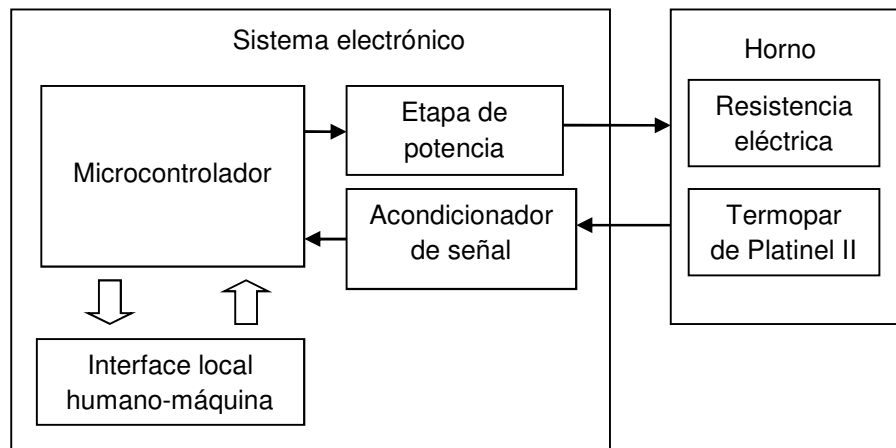


Figura 1. Interacción entre la electrónica y el horno.

El método de diseño considera los siguientes puntos:

- Es necesario caracterizar el horno para obtener su modelo. La información que se tiene por parte del fabricante a este respecto es nula y el dato de 100°C por minuto no hace una diferencia. A través de las simulaciones del modelo se puede determinar las constantes

preliminares de proporcionalidad e integración y en un proceso experimental posterior se puede optimizar la respuesta. La caracterización se llevará mediante una entrada de tipo escalón y se usará un modelo de tres parámetros [Astrom K and Hagglund T, 1995].

- La etapa de potencia que alimenta al horno, seguirá un esquema de control de ráfaga o PWM por ciclos y estará conformada por un relevador de estado sólido discreto.
- Para el termopar de tipo platino II es necesario proponer el circuito de acondicionamiento de su señal. Además por ser un dispositivo no lineal, se requiere establecer una estrategia que linealice su respuesta.
- La interfaz humano-máquina, para el ajuste de la pendiente y la máxima temperatura del perfil de calentamiento, se llevará cabo a través de un teclado de cuatro botones y la información se desplegará en una pantalla alfanumérica de cristal líquido.
- El sistema diseñado no contempla la comunicación con una computadora personal; sin embargo se deja todo preparado por si fuera necesario en un futuro.

Objetivo y resultados esperados

- Diseñar y construir un sistema electrónico para el control de temperatura de un horno de atmosfera controlada que cumpla con las especificaciones establecidas de temperatura máxima, pendiente y sobrepaso.
- El diseño propuesto debe ser, en medida de lo posible, desarrollado con componentes de fácil adquisición en el mercado nacional y de un costo accesible.

Organización del informe

En el capítulo uno se da la descripción de la electrónica de control y acondicionamiento de señal. Se presenta el algoritmo de generación de rampa y su interacción con el control PI. Se describe el funcionamiento de la interfaz humano-máquina y los pasos a seguir para el uso de equipo. En el capítulo dos se discute la caracterización del horno que se basa en la obtención experimental de respuesta escalón. Se discute la aproximación de su modelo y su comparación contra los datos experimentales. Se describe el control PI, su ajuste teórico y se muestran las gráficas de su simulación cuando se aplica al horno. En el capítulo tres se presentan los resultados experimentales para diferentes condiciones de operación que se obtuvieron del diseño propuesto.

1. Sistema electrónico

El sistema electrónico se conforma de un microcontrolador, una etapa de acondicionamiento para la señal de un termopar de tipo platínel II, una etapa de potencia de corriente alterna (CA) y una interface humano-maquina local con base en un teclado y una pantalla de cristal líquido. Su diagrama de bloques se ilustra en la figura 2.

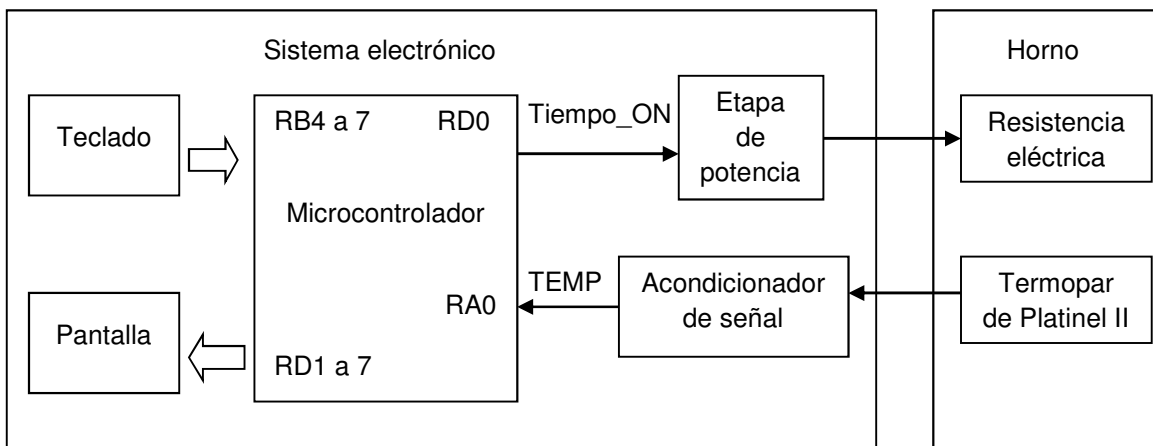


Figura 2. Diagrama de bloques del sistema electrónico.

El microcontrolador genera la señal `Tiempo_ON` que está modulada por ancho de pulso (pulse width modulation, PWM). Esta señal controla la etapa de potencia; su ancho del pulso es proporcional a la potencia CA que se aplica al horno. El ancho del pulso lo establece un control PI que se programó en el microcontrolador. Para cerrar el lazo de control, la señal `TEMP` del termopar se acondiciona y envía a la entrada `RA0` del convertidor analógico/digital (A/D) del Microcontrolador. El horno trabaja siguiendo una rampa de temperatura que puede establecer el usuario a través del teclado y la pantalla. El usuario debe ingresar la información de temperatura límite y pendiente del perfil de calentamiento

1.1. Descripción del sistema electrónico

A continuación se describen las etapas del sistema electrónico. Para mayores detalles consulte los Anexos A y B.

1.1.1. Sistema de control y potencia

En el informe técnico [Castillo et al, 2013] se reportó el diseño de un control PI para un horno semicerrado. En ese trabajo se desarrolló una electrónica de control con base en el microcontrolador PIC18F4553. El circuito tiene conectado un teclado de 4 botones, una pantalla de cristal líquido y una referencia de voltaje que se usa para el convertidor A/D interno del microcontrolador. Este conjunto se considera como un sistema de desarrollo por su versatilidad, dado que se puede emplear en otras aplicaciones como sistemas de adquisición de datos, controles de actuadores, interfaces para computadoras, etc. En el mismo trabajo también se desarrolló una etapa de potencia que está compuesta por un arreglo de un opto acoplador y un tiristor; este arreglo también se conoce como relevador de estado sólido. La electrónica de control y la etapa de potencia se usaron como base para el sistema de control que se presenta en este trabajo. Esto permite aprovechar los resultados generados en trabajos anteriores. Para el acondicionamiento de la señal del termopar fue necesario un nuevo diseño.

1.1.2. Acondicionamiento de señal

La temperatura de este horno también se mide a través de un termopar; sin embargo, es importante resaltar que este no es de tipo k sino de tipo platino II. Para los termopares de tipo k existen diversos circuitos integrados que facilitan ampliamente el acondicionamiento de su señal como el AD595 [Analog Devices, 1999], pero para el del tipo platino no se encontró algún circuito de propósito particular que permitiera la compensación de la junta fría, el acondicionamiento de la señal y la linealización de su respuesta. Por esta razón se propuso el arreglo mostrado en la figura 3 para la compensación de la junta fría y el acondicionamiento de la señal.

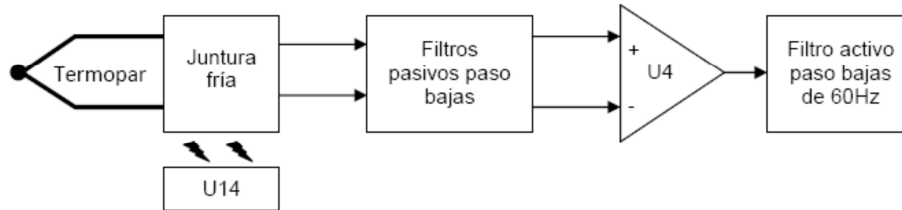


Figura 3. Circuito de acondicionamiento del termopar de platino II.

La señal diferencial del termopar se amplifica con el circuito U8 por un factor de 100. Se usa un arreglo de filtros pasivos para atenuar las altas frecuencias y el ruido que pueda contaminar la señal original. Una vez amplificada la señal, se vuelve a filtrar para reducir la componente de 60Hz. Para compensar la junta fría se mide su temperatura con el circuito U14 que corresponde a un LM35 [National Instruments, 2005]. La señal que se obtiene del acondicionamiento se envía a la terminal RA0 del convertidor A/D del microcontrolador.

1.2. Firmware en el microcontrolador

Fue necesaria una nueva programación del microcontrolador por las razones que se expone a continuación. Dado que la respuesta del termopar no es lineal, se deben realizar diferentes ajustes para corregir su comportamiento. Estos se realizaron por software a través de aproximaciones piezolineales, es decir, que la respuesta se aproximó por segmentos de recta. Por otro lado, ahora la respuesta del horno no es de tipo escalón sino de tipo rampa, aunque para el ajuste del control PI la respuesta escalón es fundamental. Finalmente las opciones de la interface humano-maquina son diferentes porque ahora no existe una comunicación con la computadora, se debe incluir la pendiente de la rampa como un parámetro de ajuste y no se tiene la libertad de modificar las constantes de proporcionalidad e integración.

1.2.1. Descripción de la linealización.

En la figura 4 se muestra la gráfica del coeficiente de Seebeck para termopar de platino II. Como se puede apreciar, el coeficiente no es constante en el intervalo de temperatura y por tanto el sensor no es lineal. La gráfica se obtuvo a partir la tabla 1 en donde se muestra la temperatura en intervalos de 10°C y se indica el voltaje que genera el sensor. Una tabla más completa se puede obtener en [Turner. (2014)]. Para la linealización se usó una aproximación piezolineal a partir de los datos de voltaje termoeléctrico. Se generaron 124 rectas para corregir la respuesta del sensor, cada una es válida en un intervalo de 10°C. Las curvas se programaron en el microcontrolador con operaciones de punto flotante. El algoritmo que selecciona que curva se debe usar está desarrollado con base en una comparación de umbrales. Los umbrales se toman directamente de la tabla 1 y corresponden a los voltajes termoeléctricos del termopar.

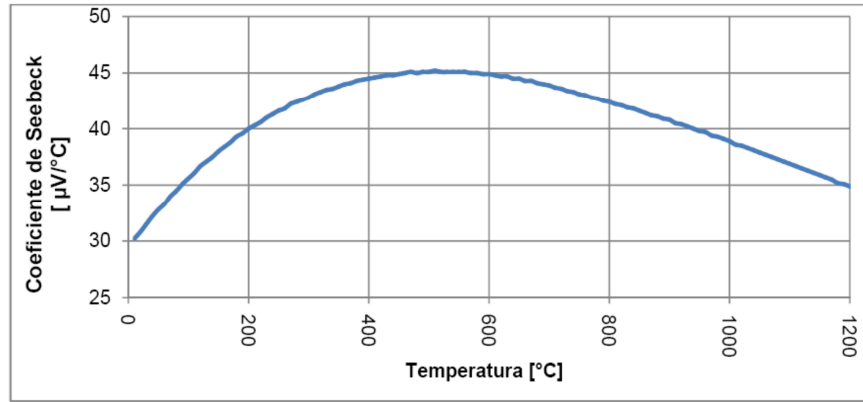


Figura 4. Coeficiente de Seebeck para el termopar de platino II.

°C	mV	°C	mV	°C	mV	°C	mV	°C	mV	°C	mV
0	0	210	7.518	420	16.56	630	26.005	840	35.086	1050	43.443
10	0.302	220	7.924	430	17.008	640	26.45	850	35.502	1060	43.82
20	0.61	230	8.334	440	17.456	650	26.895	860	35.916	1070	44.195
30	0.925	240	8.747	450	17.905	660	27.338	870	36.328	1080	44.568
40	1.247	250	9.163	460	18.355	670	27.781	880	36.739	1090	44.939
50	1.575	260	9.581	470	18.806	680	28.222	890	37.148	1100	45.308
60	1.908	270	10.003	480	19.256	690	28.662	900	37.556	1110	45.675
70	2.248	280	10.427	490	19.707	700	29.101	910	37.961	1120	46.04
80	2.593	290	10.853	500	20.158	710	29.538	920	38.365	1130	46.403
90	2.944	300	11.281	510	20.61	720	29.974	930	38.767	1140	46.764
100	3.3	310	11.712	520	21.061	730	30.408	940	39.167	1150	47.123
110	3.661	320	12.145	530	21.512	740	30.841	950	39.565	1160	47.48
120	4.028	330	12.58	540	21.963	750	31.272	960	39.962	1170	47.835
130	4.399	340	13.016	550	22.414	760	31.702	970	40.356	1180	48.187
140	4.774	350	13.454	560	22.865	770	32.13	980	40.749	1190	48.538
150	5.154	360	13.894	570	23.315	780	32.557	990	41.14	1200	48.887
160	5.538	370	14.335	580	23.765	790	32.982	1000	41.529	1210	49.233
170	5.926	380	14.778	590	24.214	800	33.406	1010	41.915	1220	49.578
180	6.319	390	15.222	600	24.663	810	33.828	1020	42.3	1230	49.92
190	6.715	400	15.667	610	25.111	820	34.249	1030	42.683	1240	50.261
200	7.115	410	16.113	620	25.558	830	34.668	1040	43.064	1250	50.599

Tabla 1. Voltaje termoelectrónico generado por el termopar de platino II.

1.2.2. Algoritmo de generación de rampa

En la figura 5 se muestra el diagrama de flujo del algoritmo de generación de rampa y su interacción con el control PI. A continuación se da la descripción de su funcionamiento.

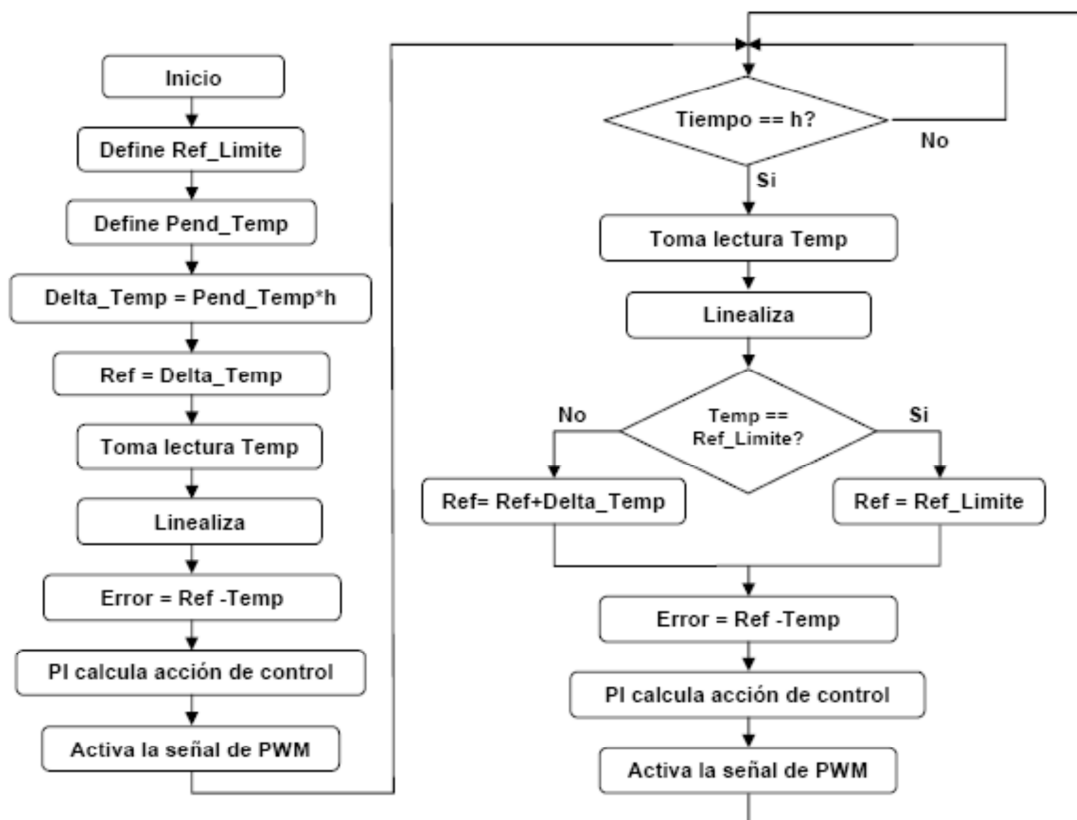


Figura 5. Diagrama de flujo del algoritmo de rampa.

1. El algoritmo inicia con la definición de temperatura máxima Ref_Limite y la pendiente Pend_Temp que caracterizan la rampa.
2. Se calcula el incremento de temperatura Delta_Temp como el producto de Pend_Temp por h. La variable h es el tiempo de muestreo de la temperatura.
3. Se inicializa Ref con valor de Delta_temp. Ref corresponde al valor ideal de la rampa y se ajusta cada tiempo h.
4. Se toma la primera lectura de temperatura, se linealiza y se almacena en Temp.
5. Se calcula la variable de error como la diferencia entre Ref y Temp.
6. La señal de error la procesa el control PI que establece el ciclo de trabajo del PWM. El PWM controla el actuador del horno.
7. Se verifica si un tiempo de duración h ha transcurrido; este tiempo es de 2 s.
8. Cumplido el tiempo, se toma una nueva lectura de temperatura, se linealiza y almacena en Temp.
9. A continuación se verifica si Temp llegó al valor de Ref_Limite. Si se esto cumple, Ref se actualiza con Ref_Limite; en caso contrario Ref se incrementa por Delta_Temp.
10. Se calcula el error y el control PI genera el nuevo valor de PWM.
11. El proceso es cíclico y se repite desde el punto 7.

El algoritmo fue programado en lenguaje C para microcontroladores de MicroChip [CustomComputer, 2007]. El código fuente se puede consultar en el Anexo D.

1.2.3. Descripción de la operación del control de temperatura

El encendido, ajuste y activación del horno se realiza de manera local mediante su interface humano-máquina. Los parámetros de operación se ingresan a través de un teclado y en una pantalla de cristal líquido se despliega la información. La tabla 2 muestra los diferentes modos de operación y la funcionalidad que se habilita en cada tecla. Esta tabla nos indica además la secuencia de pasos a seguir para operar el sistema.

Paso	Despliegue	Botones	Comentarios	Modos de operación
1			Al encender el equipo aparece la pantalla de presentación. Presione cualquier botón para ingresar al menú de opciones.	Presentación
2			Presione + o – para ajustar el valor máximo de la rampa de temperatura. Presione Menú+ o Menú- para desplazarse por las opciones.	Opciones
3			Presione + o – para ajustar el la pendiente de la rampa de temperatura. Presione Menú+ o Menú- para desplazarse por las opciones.	
4			El horno está listo para operar. Presione + para encenderlo y acceder al modo de operación. Presione Menú+ o Menú- para desplazarse por las opciones.	
5			Cuando el horno esta en operación, se despliegan alternadamente las pantallas que se indican. Presione cualquier botón para regresar al menú de opciones y apagar la etapa de potencia.	Operación

Tabla 2. Modos de operación del control de temperatura.

El equipo tiene tres modos de funcionamiento:

- Modo de Inicio. Cuando el usuario enciende el equipo, se despliega una pantalla sencilla de presentación.
- Menú de Opciones. En este modo el usuario puede ajustar los parámetros de pendiente y temperatura máxima de la rampa de calentamiento. Cuando el usuario ha ingresado los valores que considere pertinente puede pasar al modo de operación.
- Modo de Operación. En este modo el control de temperatura activa el horno mediante la etapa de potencia. El horno se calienta siguiendo el perfil de la rampa que ajustó el usuario. En este modo se despliegan dos pantallas alternadamente. En la primera se presenta la pendiente y temperatura máxima del perfil de calentamiento y en la segunda se da la temperatura que está midiendo el termopar.

2. Control del horno

Para realizar el control de cualquier planta es recomendable contar con el modelo matemático de la misma. En ocasiones el fabricante nos ofrece esta información; sin embargo cuando no se cuenta con esto, es posible muchas veces obtener una aproximación a partir de datos experimentales. En nuestro caso, debido a que la planta es lenta, contar con un modelo del horno nos permite que el ajuste de los parámetros del control PI se vuelva más ágil. Para tener una idea de la velocidad de la planta y la necesidad del modelo, basta con tomar en cuenta el parámetro de 100°C por minuto que proporcionó el fabricante. Es decir, que en principio para alcanzar 1000°C se requiere de 10 minutos; sin embargo también se debe considerar que el tiempo que le toma al horno enfriarse puede ser similar. Es decir que es necesario de 20 minutos para realizar una prueba. Generalmente se requiere de varias pruebas para sintonizar un control; esto y cuando se cuente con parámetros confiables iniciales. Si se cuenta con modelo adecuado, este se programar y se analiza en una computadora, reduciendo drásticamente el tiempo de análisis en la obtención de los parámetros iniciales del control.

2.1. Respuesta escalón

Para la caracterización se eligió obtener la respuesta del horno ante una entrada escalón. Una prueba preliminar se llevó cabo apoyándose en el sistema electrónico desarrollado para realizar la activación del horno y el registro de la temperatura.

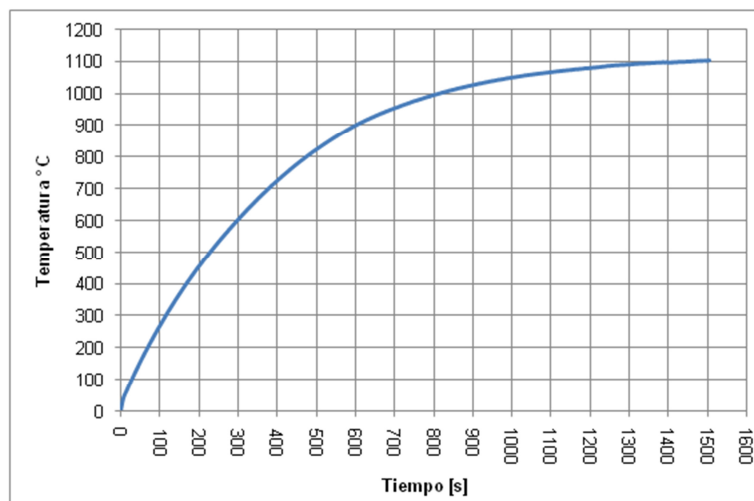


Figura 6. Respuesta experimental del horno para una entrada escalón del 50%.

El sistema se ajustó para generar una señal de PWM del 70% y los datos de la temperatura se almacenaron en archivo de texto. En esta prueba se observó que el horno alcanzaba una temperatura mayor de 1250°C y no llegaba a su estabilización. Se realizó otra prueba pero ajustando el PWM para que genere un ciclo de trabajo del 50%. En esta ocasión se observó que el horno tendía a estabilizarse alrededor de 1102°C . En la figura 6 se muestra la gráfica que se generó con los datos registrados.

2.2. Modelo matemático

La gráfica de la figura 6 indica que la respuesta de la planta se puede aproximar a un sistema de primer orden. En [Astrom K. and Hagglund T, 1995], se da el procedimiento para obtener este

modelo con retardo, que se ajusta a través de tres parámetros. La ecuación de modelo en Laplace se indica en la ecuación 1 y en la ecuación 2 se da su respuesta para una entrada escalón:

$$G(s)=K/(1+sT)\exp(-sL) \quad (1)$$

$$s(t)=K(1-\exp(-(L-t)/T)) \quad (2)$$

Los valores de K, T y L se pueden obtener la figura 7. Es importante resaltar que la curva de donde se extraen estas constantes debe estar normalizada; es decir, la curva se escala con respecto a la amplitud del escalón de entrada que se aplicó a la planta. En nuestro caso este valor fue de 50 (por 50% del ciclo de trabajo).

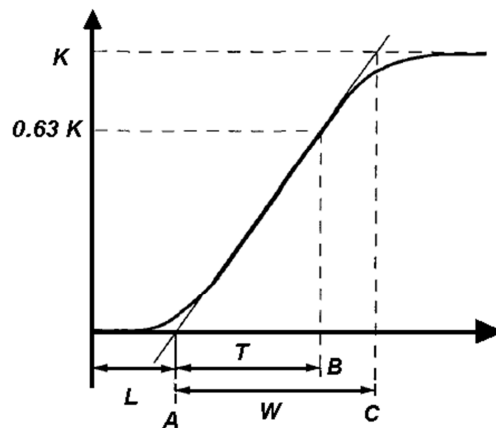


Figura 7. Modelo de primer orden de tres parámetros para una respuesta escalón.

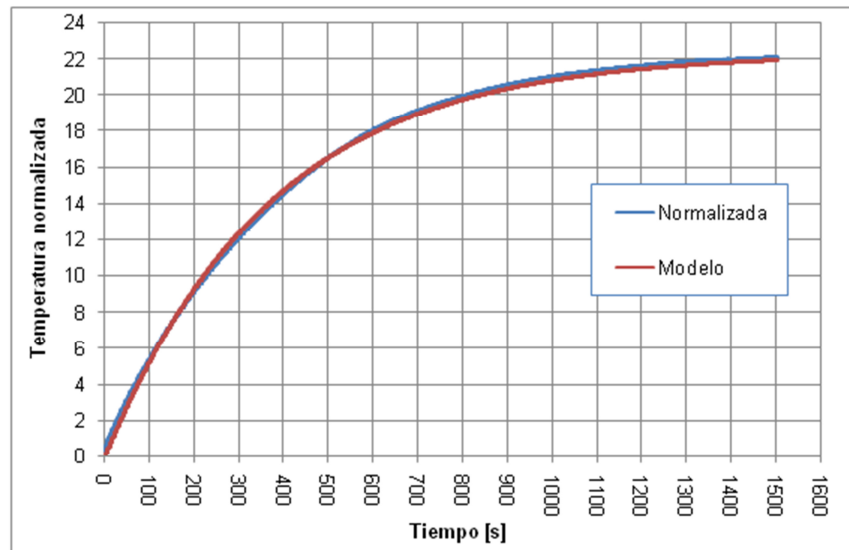


Figura 8. Respuesta normalizada del horno y su modelo matemático

Primero se obtuvieron los valores gráficamente y después de afinaron en una hoja de cálculo en donde se compararon contra los datos experimentales. Los valores finales que resultaron fueron $K=22.3$, $T=370s$, $L=2s$ y $W= 440s$. W es un parámetro que se usará más adelante para el control PI. En la figura 8 se muestra la respuesta experimental normalizada del horno y la respuesta del modelo.

2.3. Control PI

Como ya se mencionó, el horno debe operar de tal forma que su calentamiento debe seguir un perfil de tipo rampa. Antes de esto es necesario obtener su control para una entrada escalón que permita obtener una respuesta con un sobrepaso menor de 5°C y que alcance su respuesta en el menor tiempo posible. Para lograr esto se usó un control PI con su etapa de anti-windup. En este control se deben ajustar tres constantes, la constante de proporción K_p , la constante de integración T_i y la constante de anti-windup T_r . Un estudio muy completo sobre controladores PI se puede consultar en [Astrom K and Hagglund T, 1995].

En la figura 9 se presenta su diagrama de bloques, en donde se observa que se incluye un bloque del modelo matemático del actuador ideal y otro que representa al actuador real. La variable v es la repuesta del modelo y no está limitada. La respuesta del actuado real es u y está acotada; cuando llega a su límite máximo se dice que está saturada. La variable e representa el error entre la temperatura deseada o referencia r y la temperatura o respuesta del horno y . El bloque $1/s$ representa la integración en el dominio de Laplace. La variable e se multiplica por las constantes K_p y K_p/T_i . La diferencia entre la respuesta real u y la ideal v se multiplica por $1/T_r$ y su resultado se retroalimenta para afecta la acción de integración; es aquí en donde se lleva a cabo el proceso de anti-windup que se explicará a continuación.

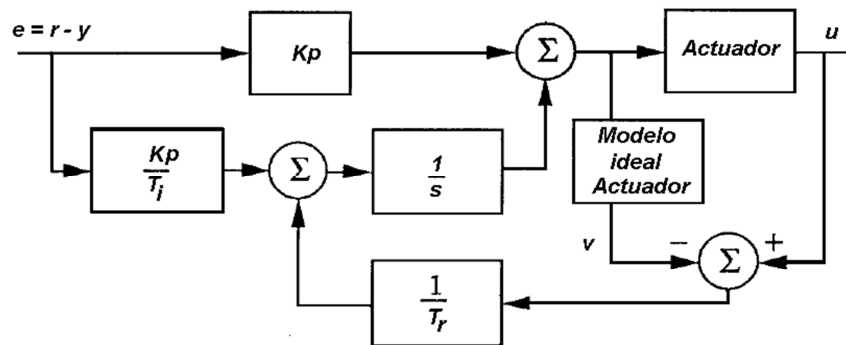


Figura 9. Diagrama de bloques del control PI con etapa de anti-windup.

En la figura 9 se observa que cuando la respuesta del actuador se satura, la respuesta del modelo puede seguir creciendo sin límite. A partir de esto, la diferencia entre v y u es negativa, lo que reduce la acción integradora. En caso contrario la diferencia es cero, debido a que la respuesta del actuador y del modelo es idéntica. Bajo esta condición la etapa de integración opera de manera normal. Esto permite que el control responda a una mayor velocidad y reduce la oscilación alrededor del valor final.

Las constantes T_i y K_p se determinan de los parámetros obtenidos de la respuesta escalón normalizada, aplicando el método de Ziegler-Nichols como se muestra a continuación:

$$R = K/W = 0.05s^{-1} \quad (3)$$

$$K_p = 0.9/(RL) = 9 \quad (4)$$

$$T_i = L/0.3 = 6s \quad (5)$$

Donde R es la estimación de la velocidad de respuesta normalizada de la planta. Por otro lado, para el cálculo de T_r , no hay un procedimiento establecido, por lo que su ajuste se realiza a través

de prueba y error; sin embargo, en este trabajo, la constante T_r se calculó según lo sugiere [Astrom K and Hagglund T, 1995] como:

$$T_r = \sqrt{T_i} = 2.5s \quad (6)$$

Este cálculo da una estimación del valor de T_r , pero sus unidades se consideran en segundos. En la simulación y las pruebas experimentales, el valor calculado se mantuvo sin cambios, aunque sí se modificó el valor T_i como se verá más adelante.

2.4. Simulación del sistema

La planta y el control se simularon en ambiente Simulink de Matlab. En la figura 10 se presenta el diagrama de bloques que se usó para el ajuste de las constantes del control. En la figura 11 se muestran algunas de las curvas que se obtuvieron de las simulaciones.

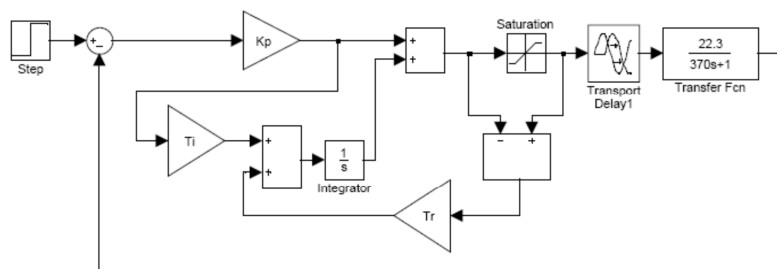


Figura 10. Diagrama de bloques del control PI y el modelo del horno.

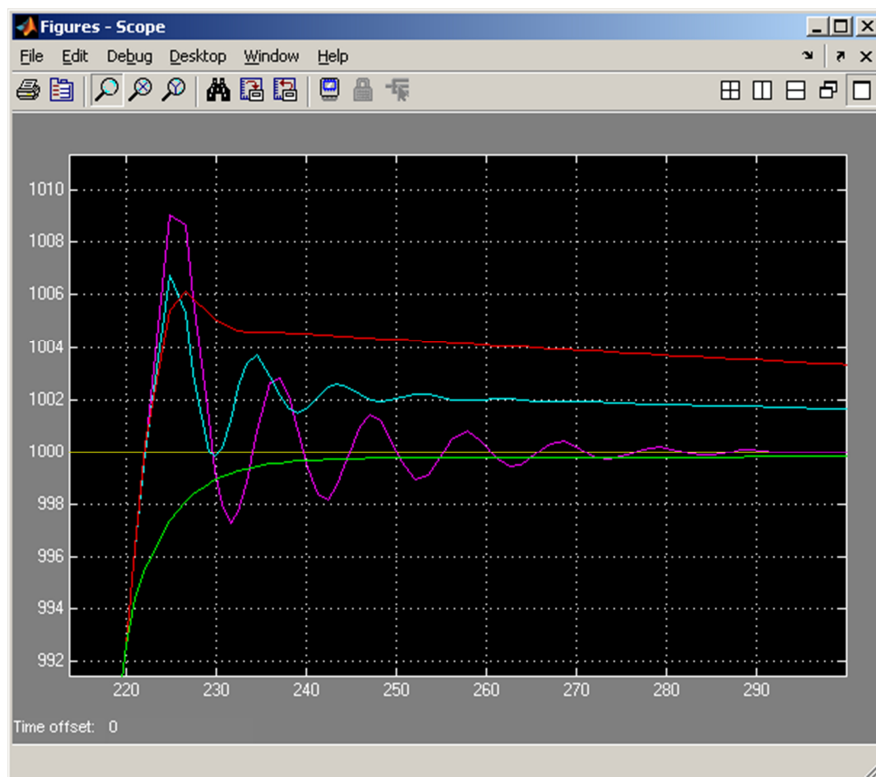


Figura 11. Respuestas escalón de la simulación del control PI del horno en MATLAB.

La simulación se realizó para una temperatura final de 1000°C que se indica con línea amarilla. La curva en color magenta corresponde a los parámetros iniciales de $K_p=9$ y $T_i=6s$. Como puede apreciarse, la respuesta tiene un sobrepaso mayor de 5°C. Para la línea azul se ajustó $K_p=9$ y $T_i=200s$, en este caso, se redujo el sobrepaso pero se incrementó el tiempo de asentamiento. Para el trazo en rojo se modificaron los valores a $K_p=4.5$ y $T_i=200s$. Como se observa, se obtuvo una mejora en la oscilación pero la respuesta tarda en estabilizarse. Este procedimiento se continuó hasta llegar a las constantes $K_p=2$ y $T_i=375s$, que corresponden a la respuesta en verde. Estos valores se eligieron como punto de partida para el ajuste experimental del control PI.

3. Resultados

A continuación se muestran los resultados generados durante las pruebas experimentales del control PI para la entrada escalón y el algoritmo de la rampa de calentamiento.

3.1. Prueba experimental de respuesta escalón

En la figura 12 se muestra el arreglo en donde se probó de manera experimental el control PI con las constantes K_p y T_i seleccionadas. También se muestra el horno que está conectado al sistema electrónico, un osciloscopio en donde se monitoreó la acción de control que corresponde a la corriente del horno, una sonda de corriente y una computadora en donde se almacenaron los registros de temperatura. La tarjeta electrónica que se aprecia es una versión de desarrollo del sistema final. Esta tarjeta facilitó realizar todas las pruebas y modificaciones necesarias tanto en software como en hardware. La tarjeta se comunica con la computadora de manera serial a través del sistema PicKit2 de programación, que también funciona como sistema de adquisición de datos.

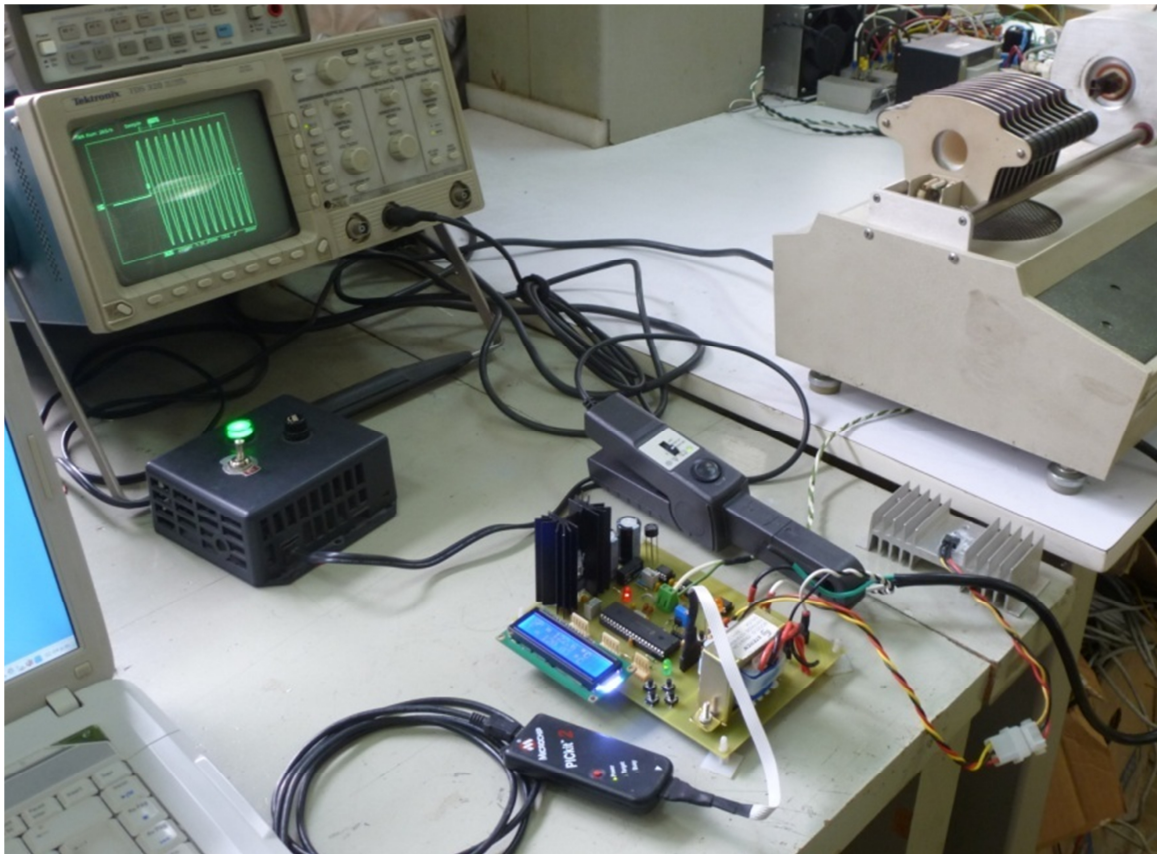


Figura 12. Arreglo experimental para la respuesta escalón del control PI

Se realizaron varias pruebas antes de llegar a los valores finales del sistema. Cada prueba tomó del orden de 35 minutos; 15 del calentamiento y 20 minutos de enfriamiento. En la figura 13 se muestran las gráficas de tres pruebas que consideramos representativas. Para los experimentos, la temperatura objetivo fue de 1000°C , manteniendo el parámetro de K_p fijo en 2 y ajustando T_i en 350s, 450s y 550s. Por el orden de la temperatura, en la gráfica no se aprecia cual fue el

sobrepaso obtenido en cada caso, sin embargo se observa que el control se estabiliza alrededor de la temperatura deseada después de los 500 segundos.

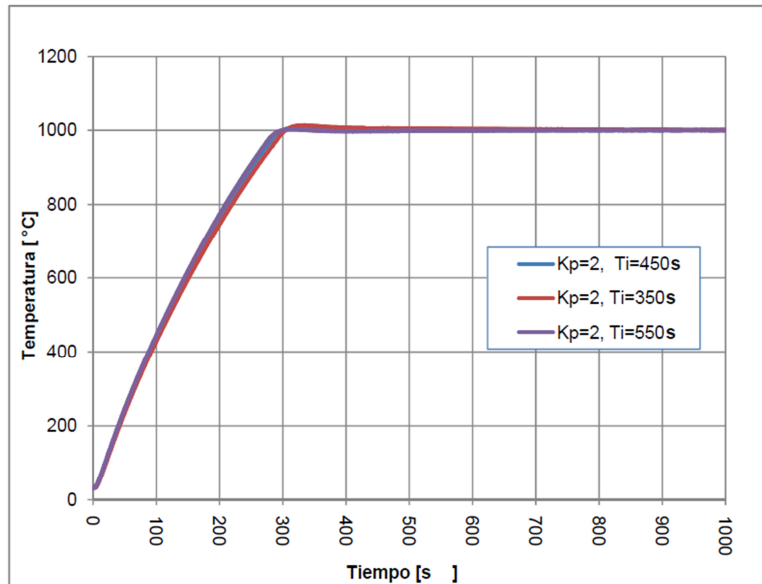


Figura 13. Respuestas experimentales del control PI para una entrada escalón de 1000°C y diferentes constantes de K_p y T_i .

En la figura 14 se presenta un acercamiento de las gráficas de la figura 13 alrededor de 1000°C. Para los valores de $K_p=2$ y $T_i=350s$ se observa, a diferencia de la simulación, un sobrepaso mayor de 10°C y además se aprecia como esta característica de la respuesta se reduce conforme se incrementa la constante T_i .

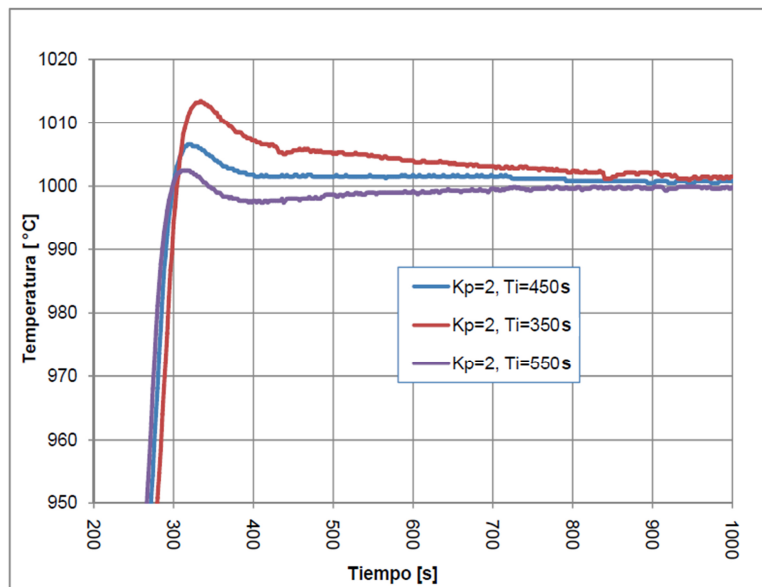


Figura 14. Acercamiento de la respuesta escalón del horno alrededor de la temperatura objetivo de 1000°C.

Al término de las pruebas, los valores seleccionados para el control fueron $K_p=2$ y $T_i=550s$. Con estos valores se obtuvo un sobrepaso menor de $5^{\circ}C$ que se presentó alrededor de 320 segundos y la señal se estabilizó en $1000^{\circ}C$ aproximadamente en 700 segundos.

3.2. Prueba experimental de rampas de temperatura

Una vez ajustado el control PI se procedió a probar el algoritmo de la rampa de calentamiento. Se realizaron dos tipos de pruebas. En la primera se fijó la pendiente de la rampa y se modificó la temperatura máxima. En la segunda se mantuvo fija la temperatura máxima y se varió la pendiente. La figura 15 muestra la gráfica para las temperaturas de $250^{\circ}C$ a $1250^{\circ}C$, con incrementos de $250^{\circ}C$ y manteniendo la pendiente en $20^{\circ}C/min$. Consideramos que estos valores de temperatura y pendiente cubren los casos críticos bajo los cuales el horno debe operar. En la figura 15 se puede observar que las curvas siguen sin problema la rampa ideal que se identifica por el trazo naranja y que la temperatura se estabiliza en el valor seleccionado.

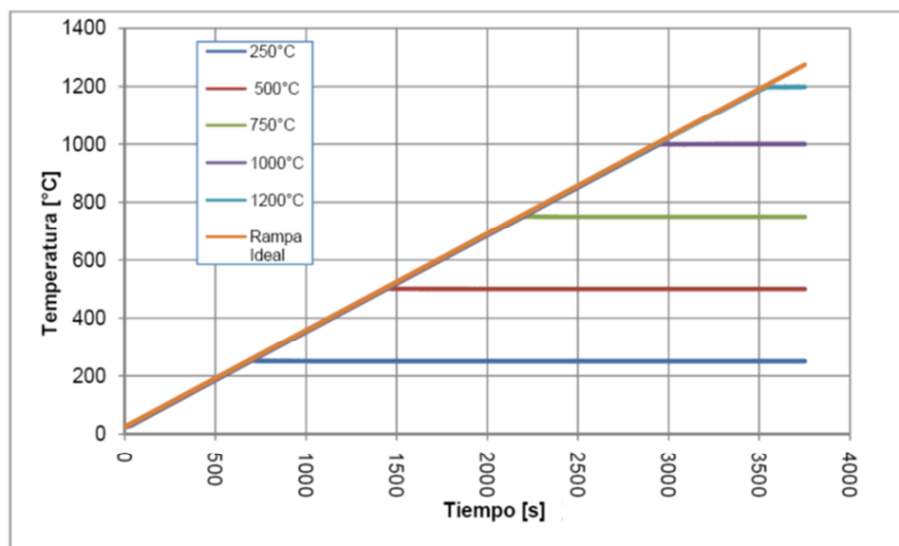


Figura 15. Respuesta del horno para rampa de calentamiento con pendiente de $20^{\circ}C/min$ y diferentes temperaturas máximas.

A simple vista, la respuesta de horno muestra que el control opera de manera correcta, manteniendo la pendiente estable con un sobrepaso limitado en el punto de inflexión en cada curva. Para tener una mejor apreciación de la temperatura, en la figura 16 se muestra un acercamiento de la curva de $1000^{\circ}C$, en donde se observa que el cambio alrededor del valor máximo es menor a $2^{\circ}C$. Por último, en la figura 17 se presenta la respuesta del horno para una temperatura máxima de $500^{\circ}C$ y pendientes que van de $5^{\circ}C/min$ a $20^{\circ}C/min$ con cambios de $5^{\circ}C/min$. Se corroboró que las curvas siguieran su contraparte ideal; sin embargo, las curvas ideales no se presentan en la figura para una mejor apreciación del control.

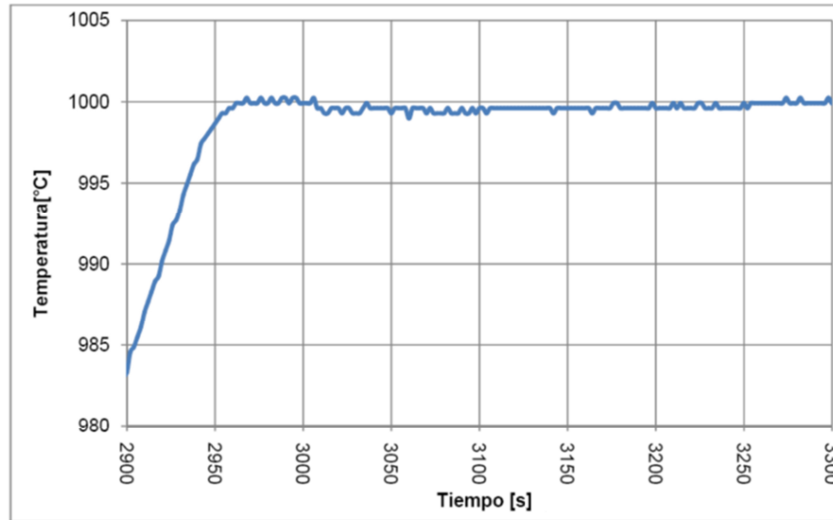


Figura 16. Acercamiento de la rampa de 1000°C con pendiente de 20°C/min.

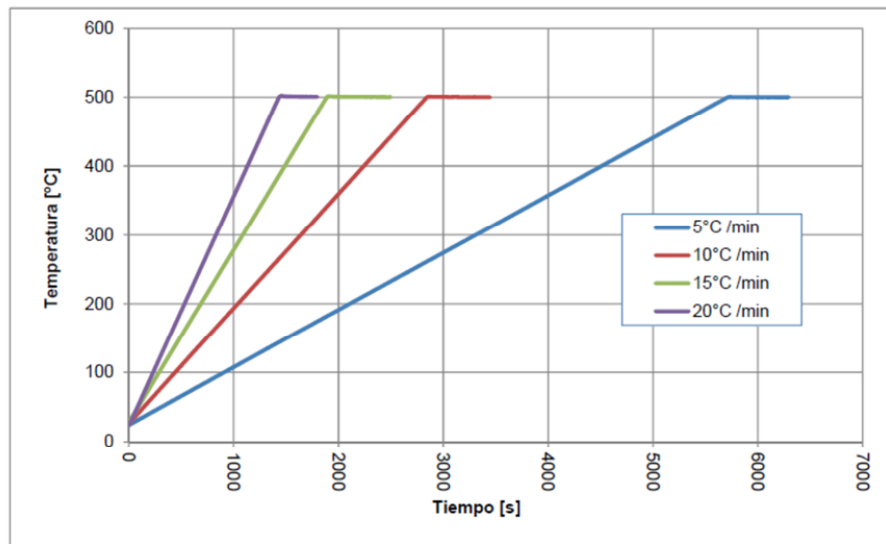


Figura 17. Respuesta del horno para rampa de calentamiento con diferentes pendientes y temperatura máxima de 500°C.

Conclusiones

En este informe se presentaron los resultados del diseño y desarrollo de un control de temperatura para un horno de atmosfera controlada. Se aprovecharon los resultados obtenidos en trabajos previos, permitiendo una continuidad sobre esta línea de trabajo. Se probó un circuito de acondicionamiento de señal para el termopar del horno; si bien el diseño se planteó para un tipo en particular, consideramos que el circuito desarrollado se puede emplear, en principio, para otros tipos de termopares. Para linealizar la respuesta del sensor se probó, con excelentes resultados, una estrategia con base en su tabla de voltaje termoeléctrico. Consideramos que el algoritmo desarrollado puede ser empleado en otro tipo de sensores, siempre y cuando se cuente con una

tabla o datos de su caracterización y su respuesta se pueda aproximar de manera piezolineal. Por otro lado, en cuanto al funcionamiento del horno, se reafirmó el desempeño del control PI desarrollado en un trabajo anterior, obteniendo un sobrepaso menor de 5°C en la respuesta escalón del horno. Además de esto, se diseñó un algoritmo que permite al horno generar temperaturas siguiendo una rampa de calentamiento que se puede ajustar para su pendiente y temperatura máxima. Por otro lado, desde el punto de vista de desarrollo, se generó una tecnología propia para centro, que permitió reutilizar un equipo que se consideraba fuera de operación. Para finalizar, la electrónica desarrollada es escalable y adaptable, por lo que esperamos emplearla en futuros desarrollos.

Agradecimientos

Se agradece al M. en I. Salvador Rodríguez Lozano la supervisión de la fabricación de los diversos circuitos impresos que requirieron durante las fases de caracterización, pruebas y diseño final del prototipo desarrollado.

Anexo A Diagramas electrónicos

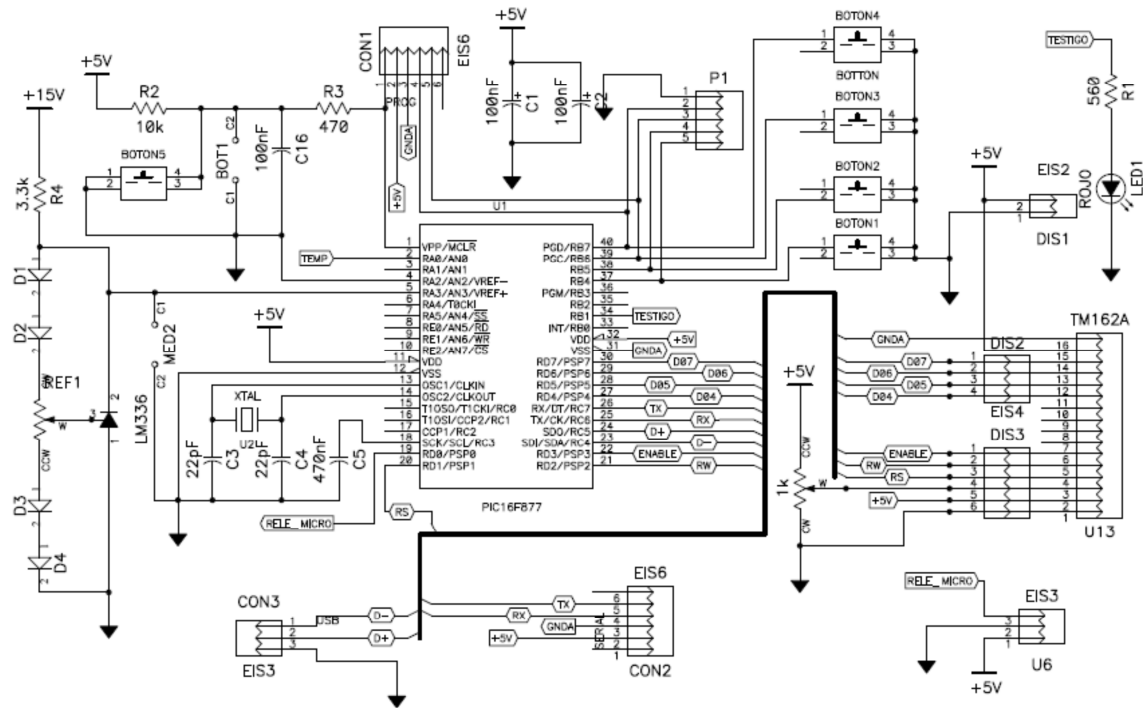


Figura A1. Diagrama Electrónico del control.

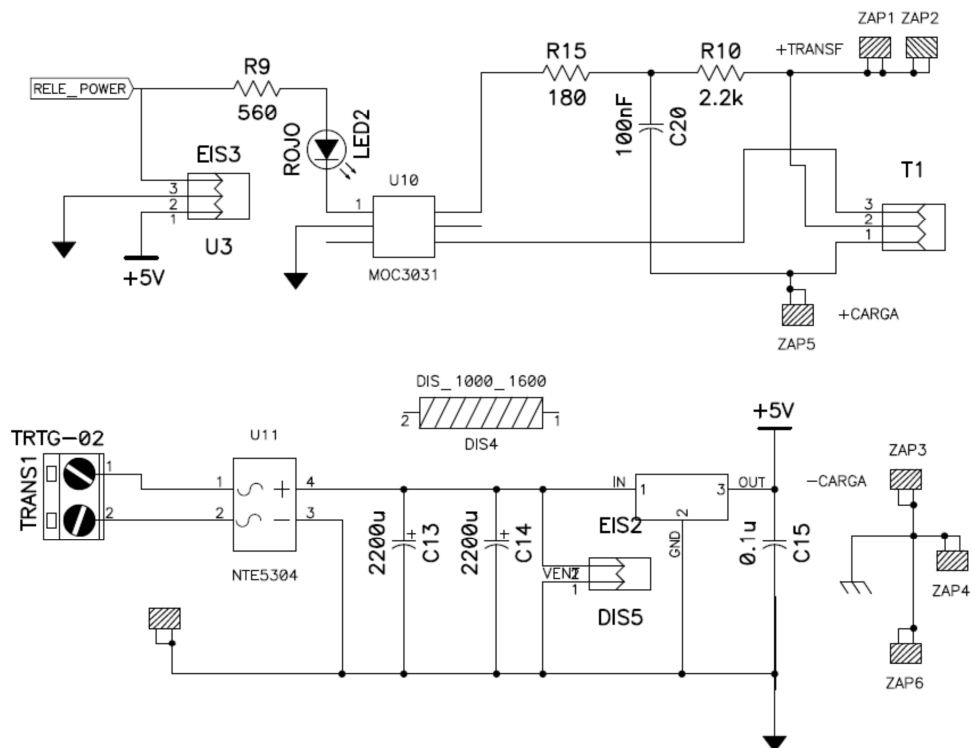


Figura A2. Etapa de potencia y polarización.

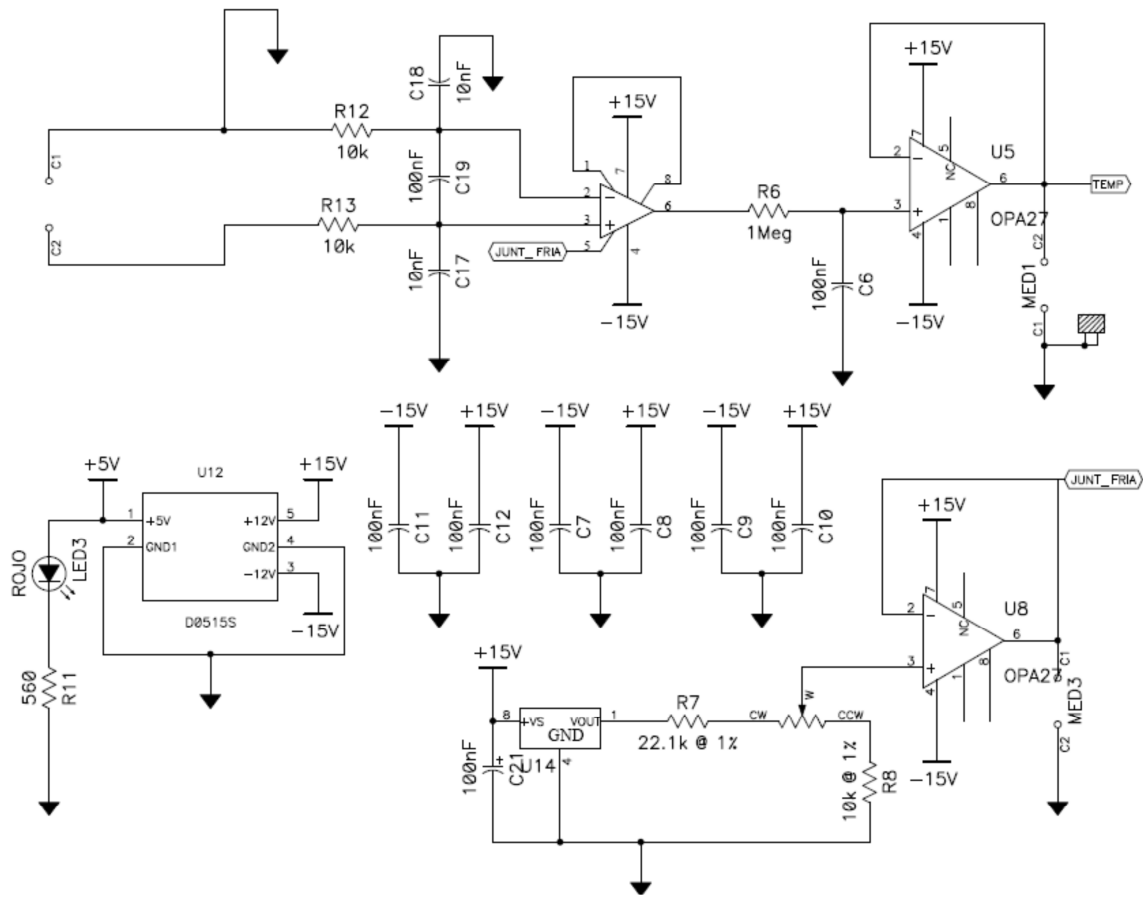


Figura A3. Circuito de acondicionamiento de señal.

Anexo B Circuitos Impresos

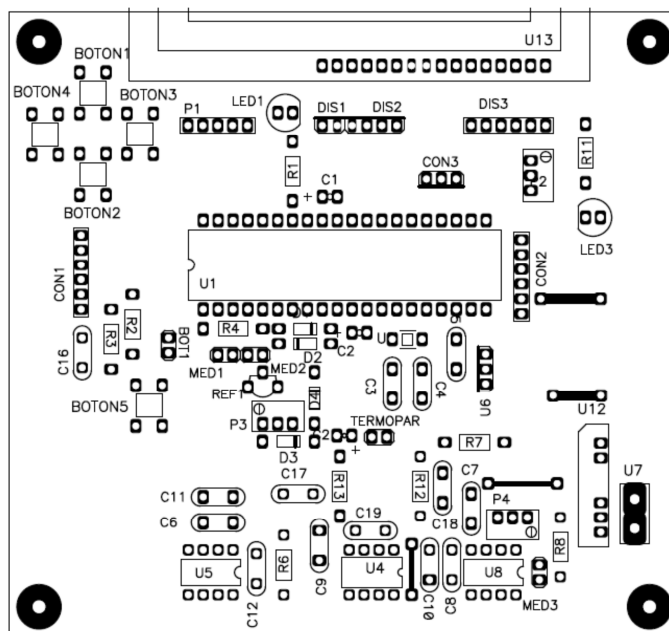


Figura B1. Máscara de serigrafía de la etapa de control y acondicionamiento de señal.

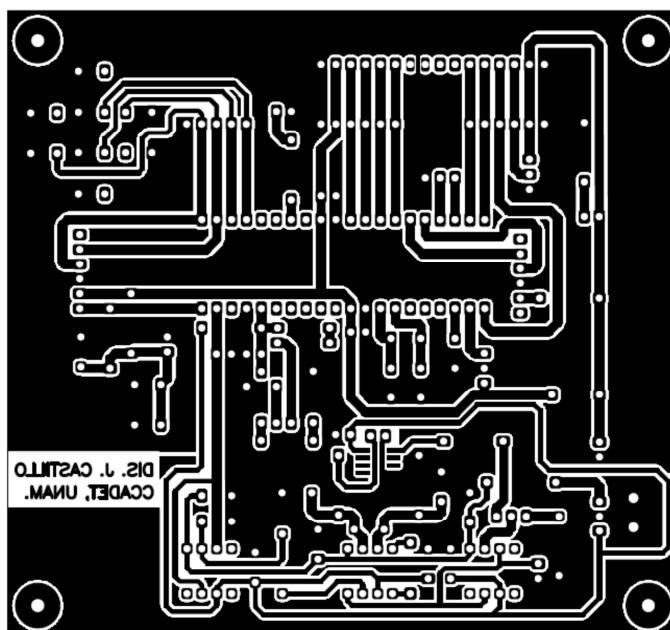


Figura B2. Circuito impreso de la etapa de control y acondicionamiento de señal.

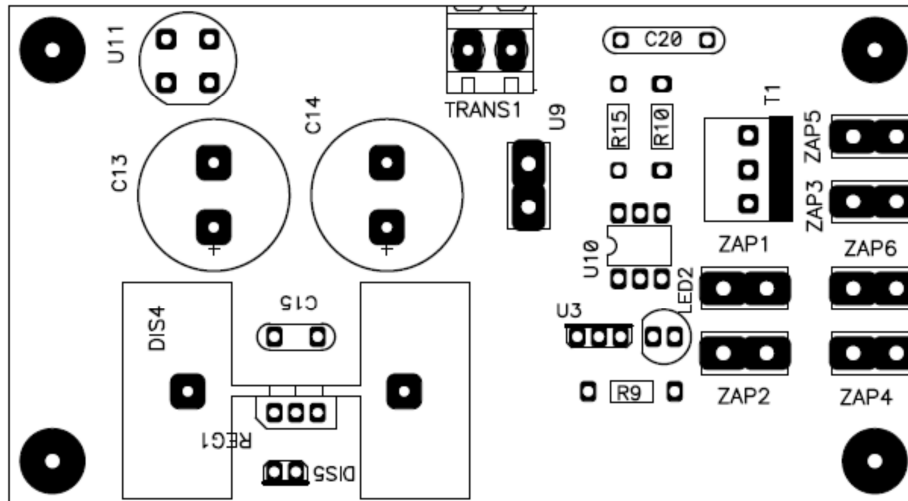


Figura B3. Máscara de serigrafía de la etapa de polarización y potencia.

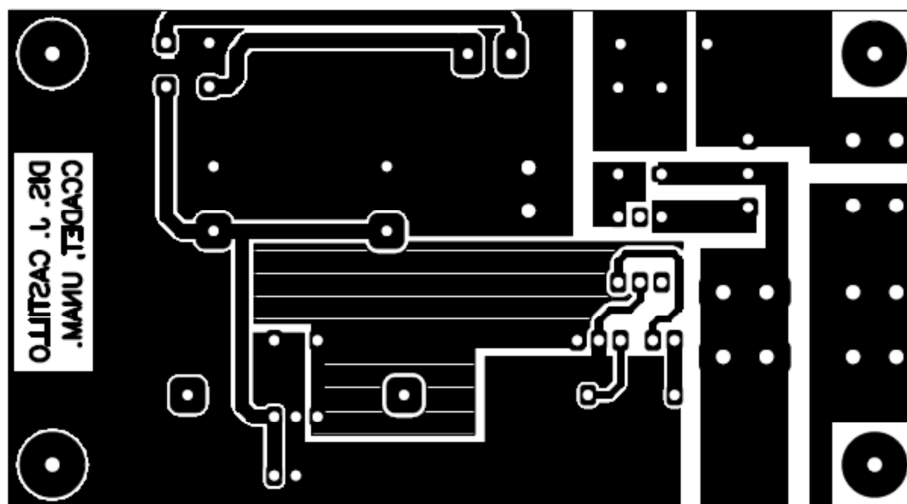


Figura B4. Circuito impreso de la etapa de polarización y potencia.

Anexo C Lista de material

ID	Descripción
D1	Diodo 1N4148
D2	Diodo 1N4148
D3	Diodo 1N4148
D4	Diodo 1N4148
BOTON1	PushBotton
BOTON2	PushBotton
BOTON3	PushBotton
BOTON4	PushBotton
BOTON5	PushBotton
C1	Capacitor tantalio 100nF
C2	Capacitor tantalio 100nF
C3	Capacitor 22pF
C4	Capacitor 22pF
C5	Capacitor 470nF
C6	Capacitor 100nF
C7	Capacitor 100nF
C8	Capacitor 100nF
C9	Capacitor 100nF
C10	Capacitor 100nF
C11	Capacitor 100nF
C12	Capacitor 100nF
C13	Capacitor Electrolitico de 2200u
C14	Capacitor Electrolitico de 2200u
C15	Capacitor 0.1u
C16	Capacitor 100nF
C17	Capacitor 10nF
C18	Capacitor 10nF
C19	Capacitor 100nF
C20	Capacitor 100nF
C21	Capacitor tantalio 100nF
ZAP5	ZAPATA
ZAP2	ZAPATA
ZAP1	ZAPATA
ZAP3	ZAPATA
ZAP4	ZAPATA
ZAP6	ZAPATA
U1	Microcontrolador PIC18F4553
U2	Cristal de 20 MHz
U3	Conector EIS3

U4	Circuito Integrado AD621AN
U5	OPAM OPA27
U6	Conector EIS3
U7	ZAPATA
U8	OPAM OPA27
U9	ZAPATA
U10	Opto acoplador MOC3031
U11	Puente de diodos NTE5304
U12	Circuito Integrado D0515S
U13	LCD TM162A
U14	LM35DM
REF1	LM336
LED1	LED
LED2	LED
LED3	LED
DIS1	Conector EIS2
DIS2	Conector EIS4
DIS3	Conector EIS6
DIS4	DISIPADOR
DIS5	Conector EIS2
CON1	Conector EIS6
CON2	Conector EIS6
CON3	Conector EIS3
BOT1	JMP
MED1	JMP
MED2	JMP
MED3	JMP
TERMOPAR	JMP
P1	Conector EIS5
P2	TRIMPOT 1k
P3	TRIMPOT 10k
P4	TRIMPOT 1k
T1	CONECTOR
TRANS1	Conector TRTG-02
REG1	Regulador LM7805
R1	Resistencia de 560
R2	Resistencia de 10k
R3	Resistencia de 470
R4	Resistencia de 3.3k
R6	Resistencia de 1Meg
R7	Resistencia de 22.1k @ 1%

R8	Resistencia de 10k @ 1%
R9	Resistencia 560
R10	Resistencia 2.2k
R11	Resistencia de 560
R12	Resistencia de 10k
R13	Resistencia de 10k
R15	Resistencia 180
TRIAC	BTA08

Anexo D. Código Fuente

```
#include<18f4553.h>
#device ADC=12
#use fast_io (B)
#include<math.h>
//=====
//===== CONSTANTES PARA EL PID =====
//=====
#define PERIODO_TIMER2    249
#define MUESTRAS    150
#define PERIODO    400

//=====
//===== VARIABLES PARA PID =====
//=====
float Ti=450.0;
floatKp=2.0;
float h=2.0;
floatControl_Ideal=0.0;
floatControl_Real=0.0;
float Ki=0;
float Kc=0;
float Ajuste=0;
float Error=0.0;
float P0=0.0;
float I0=0.0;
floatRef=0.0;
floatDelta_Temp=0.0;
floatRef_Limite=750.0;
shortintEquipo_TEC;
floatPend_Temp =20.0;
//=====
//===== VARIABLES GENERALES =====
//=====
longSum_contador = 0;
long Ton=0;
long Tiempo=0;
longTiempo_On=0;
longTiempo_real=0;
longlongSum_Temp=0;
floatTemp=0;
floatTemp_ant=0;
int Monitor=0;
shortint ACTIVA_ADC=1;
shortintLectura_Inicial=TRUE;
// =====
// =====  Rutina de Interrupcion de Convertidor  =====
// =====
#INT_AD
void LECTURA_AD(){
    Sum_Temp=Sum_Temp+read_adc(ADC_READ_ONLY);
    read_adc(ADC_START_ONLY);
    Sum_contador++;
}
```

```

//=====
//===== DECLARACION DE FUNCIONES GENERALES ===
//=====
voidIterfaz_TECLADO(void);
void INICIALIZA (void);
void LEC_INICIAL(void);
void DESPLIEGUE (void);
void LEE_ADC(void);
long CONTROL_PI(void);
float COMPENSA(float);
void INICIALIZA (void);
voidLetreros_datos(int);
void Interfaz(void);
voidAjuste_Ref(void);
voidActiva_Equipo(void);
voidmenu_letrero(int);
voidmenu_accion(void);

// =====
// ===== PROGRAMA PRINCIPAL Y FUNCIONES =====
// =====
voidmain() {

    INICIALIZA();
    delay_ms(500);
    opcion=1;
    Equipo_TEC=false;
    Lectura_Inicial=1;
    Sum_Temp=0;
    Sum_contador=0;
    while (TRUE){
        if(!Equipo_TEC){
            menu_letrero(menu_inc_dec(VEL_MENU,3));
            menu_accion();
        }
        else{
            Iterfaz_TECLADO();
            opcion=1;
            menu_letrero(1);
            delay_ms(500);
        }
    }
}

//=====
//===== RUTINAS CUANDO LA INTERFAZ ES POR TECLADO =====
//=====
voidIterfaz_TECLADO(void){
    while (Equipo_TEC){
        if (Lectura_Inicial){
            Sum_Temp=0;
            Sum_contador=0;
            Monitor=0;
            Tiempo=0;
            Tiempo_On=0;
            Error=0.0;
            P0=0.0;

```

```

        I0=0.0;
        LEC_INICIAL();
        DESPLIEGUE();
        Lectura_Inicial=FALSE;
    }
    LEE_ADC();
    Equipo_TEC = !Tecla_Pres();
}
disable_interrupts(INT_TIMER2);
output_low(PIN_B0);
output_low(PIN_B1);
}
//=====
//===== RUTINAS DEL CONTROL PI =====
//=====
void LEC_INICIAL(void){
    enable_interrupts(INT_AD);
    read_adc(ADC_START_ONLY );

    while (Sum_contador<MUESTRAS);
    if (Sum_contador==MUESTRAS) {
        disable_interrupts(INT_AD);
        Temp=(float)(Sum_Temp/MUESTRAS);
        Temp = COMPENSA(Temp);
        Temp_ant=Temp;
        Ref=Temp;
        Sum_Temp=0;
        Sum_contador=0;
        set_timer2(0);
        enable_interrupts(INT_TIMER2);
    }
}

void LEE_ADC(void){
    if ((Tiempo==(PERIODO-2))&&ACTIVA_ADC){
        enable_interrupts(INT_AD);
        read_adc(ADC_START_ONLY );
        ACTIVA_ADC=0;
        while (Sum_contador<MUESTRAS);
    }
    if (Sum_contador==MUESTRAS) {
        disable_interrupts(INT_AD);
        ACTIVA_ADC=1;
        Temp=(float)(Sum_Temp/MUESTRAS);
        Temp = COMPENSA(Temp);
        if ((Ref + Delta_Temp )<Ref_Limite) Ref = Ref + Delta_Temp;
        else Ref = Ref_Limite;
        Sum_Temp=0;
        Sum_contador=0;
        Tiempo_On=CONTROL_PI();
        DESPLIEGUE();
    }
}

long CONTROL_PI(void){
    Error= Ref-Temp ;
}

```

```

        P0= Kp*Error;
        Control_Ideal= P0+I0;
        I0 = I0 + Ki*P0+ Kc*(Control_Real-Control_Ideal);
        Temp_ant=Temp;
        return (long)(Control_Real*Ajuste);
    }

float COMPENSA(float dato){
    int j=0;
    shortint ciclo=1;
    while (ciclo){
        if (dato<=umbral[j]) {
            dato = dato*pendiente[j]+ ordenada[j];
            ciclo=0;
        }
        else {
            j++;
        }
    }
    return dato;
}

void DESPLIEGUE (void){
    lcd_send_byte(0,comando[ CLEAR]);
    lcd_gotoxy(1,1);
    printf(lcd_putc,"SP = %5.1f %cC",Ref_Limite,0xDF);
    lcd_gotoxy(1,2);
    printf(lcd_putc,"T = %5.2f %cC",Temp,0xDF);
}

//=====
//===== RUTINAS DE LOS MENUS =====
//=====

voidAjuste_Ref(void){
    int x;
    x=inc_dec(VEL_TECLA);
    Ref_Limite= Ref_Limite + Valor_delta(x,1.0,10.0);
    if (Ref_Limite>Ref_MAX) Ref_Limite=Ref_MAX;

    elseif (Ref_Limite<Ref_MIN) Ref_Limite=Ref_MIN;
    if (x!=0){
        Letreros_datos(Let_temp);
    }
}

voidActiva_Equipo(void){
    if (Boton7) {
        Equipo_TEC=TRUE;
        Lectura_Inicial=TRUE;
        Letreros_datos(Let_Equi);
        delay_ms(500);
    }
}

```

```

void menu_letrero(int x){
    if (x!=0){
        lcd_send_byte(0,comando[CLEAR]); // Borra la pantalla
        lcd_gotoxy(1,1);
    }
    switch (x){
        case 1: printf(lcd_putc,"= TEMPERATURA =");
                Letreros_datos(Let_temp);
                break;

        case 2: printf(lcd_putc,"== PENDIENTE ==");
                Letreros_datos(Let_Pend_Temp);
                break;

        case 3: printf(lcd_putc,"=== EQUIPO ===");
                Letreros_datos(Let_Equi);
                break;
        default: break;
    }
}

void Letreros_datos(int x){
    lcd_gotoxy(1,2);

    switch (x){

        case 1: printf(lcd_putc,"  %5.2f %cC ", Ref_Limite,0xDF );
                break;
        case 2: printf(lcd_putc," %6.1f %cC/min ",Pend_Temp,0xDF);
                break;
        case 3: if (Equipo_TEC)printf(lcd_putc,"***ENCENDIDO***");
                else printf(lcd_putc,"*** APAGADO ***");
                break;
        default: break;
    }
}

void menu_accion(void){

    switch (opcion){
        case 1: Ajuste_Ref();
                break;
        case 2: Ajuste_Pend_Temp();
                break;
        case 3: Activa_Equipo();
                break;
        default: break;
    }
}

//=====
//===== RUTINAS DE INICIALIZACION =====
//=====

```

```

void INICIALIZA (void){
    Teclado_Init();
    set_tris_B(0b11110000);
    ADCON2=0X96;
    ADON=1;
    setup_adc_ports(AN0_TO_AN1|VREF_VREF);
    set_adc_channel(0);
    delay_us(20);
    setup_timer_2(T2_DIV_BY_16, PERIODO_TIMER2,15);
    lcd_init();
    lcd_send_byte(0,comando[CLEAR]);
    lcd_gotoxy(1,1);
    printf(lcd_putc,"==  CCADET  ==");
    lcd_gotoxy(1,2);
    printf(lcd_putc,"=  U. N. A. M.  =");
    delay_ms(500);
    enable_interrupts(INT_RB);
    enable_interrupts(GLOBAL);
}

```

Referencias

- [1]. AnalogDevices. (1999) Monolithic Thermocouple Amplifiers with Cold Junction Compensation. Analog Devices USA.
- [2]. Astrom K, Hagglund T. (1995) PID Controllers: Theory, design and tuning. 2nd edition. USA Instruments Society of America.
- [3]. Microchip. (2007) PIC18F2458/2553/4458/4553 Data Sheet. Microchip USA.
- [4]. Castillo J, Mata M, Valera B. (2013) Controlador de temperatura proporcional integral: Informe Técnico. CCADETUNAM.
- [5]. Montiel MH, Mata M. Valera B, Lopez R. (2010) Sistema de medición del campo crítico de propagación y temperatura de Curie en materiales ferromagnéticos: Informe Técnico. CCADET UNAM.
- [6]. National Instruments. (2005) LM35 PrecisionTemperatureSensors. National Instruments USA.
- [7] Turner. (2014)Thermoelectric Voltage as a Function of Temperature (°C), Reference Junctions at 0°C. [On line]. Available at: www.tuner.tw/omega%20cd/zsection/Z265273.PDF. [March 12, 2013].
- [8] Du Pont Instruments. (1985) 951 Thermogravimetric Analyzer, Operator's Manual.