

Diseño y desarrollo de un controlador de temperatura para un horno de pruebas

Carlos A. Nieves

Candidato a graduación en ingeniería eléctrica, UPPR

Sinopsis

Como parte del proceso de control de calidad, la industria electrónica tiene que hacerles diferentes pruebas a los componentes electrónicos. Una de estas pruebas permite determinar la posible falla del componente cuando se somete a cambios en temperatura y cuando se mantiene a una temperatura alta por un intervalo de tiempo prolongado. El tiempo de calentamiento y el tiempo de enfriamiento son significativos en estas pruebas. Este trabajo explica el diseño de un instrumento para controlar la temperatura en un horno de pruebas usado en este tipo de proceso en la industria electrónica.

Abstract

Design and development of a temperature controller for a test oven

As a part of quality control process, the electronics industry must make different tests to electronic components. One of these tests allows us to determine a possible fault when a component is subjected to temperature changes and when it is maintained at a high temperature for a long time interval. The heat up time and the cool down time are significant in these tests. This paper explains the design of an instrument to control the temperature in a test oven used in this kind of process in the electronics industry.

Nieves/Controlador temperatura para horno pruebas

Introducción

Los hornos usados en la industria electrónica para hacer las pruebas de fallas por temperatura varían en tamaño, pero la gran mayoría dependen de aire caliente como fuente de energía. Para que las pruebas sean confiables, es necesario que la temperatura del horno varíe de acuerdo a la especificación en la prueba diseñada. En este trabajo desarrollamos un controlador de temperatura para un horno típico. Este controlador se desarrolló usando el microprocesador Intel 8088.

Los hornos usados en la industria para hacerles las pruebas a los componentes electrónicos pueden considerarse sistemas RC simples. La constante de tiempo relacionada con cada uno de estos hornos es una función del tamaño de los hornos, de su aislación y de la forma en que se les desea hacer las pruebas a los componentes.

El hecho de que los hornos tengan características de sistemas RC simples hace que al usar un control de realimentación ("feedback") negativa el sistema siempre sea estable, aún cuando se le añada modo integral al algoritmo de control. Debido a estas características, el controlador que diseñamos en este trabajo es uno de tipo proporcional más integral. El usuario escoge los parámetros del controlador de acuerdo a las características de su horno, de manera que el sistema se comporte según lo esperado.

El circuito de control para el calentador del horno se compone de una válvula "ON-OFF" que permite o no la entrada de aire caliente al horno y de un relé que se encarga de abrir y cerrar la válvula al aplicársele un voltaje de 5 y 0 voltios, respectivamente.

Descripción de la operación del controlador

La operación del controlador consiste en aumentar la temperatura de un valor mínimo a un valor máximo en forma de rampa con una pendiente

constante. Luego se mantiene la temperatura constante por un tiempo específico para entonces disminuir la temperatura hasta alcanzar el valor de temperatura mínima. La temperatura mínima se debe mantener constante por otro intervalo de tiempo y luego se repite el ciclo las veces que el usuario lo requiera.

El controlador debe aumentar la temperatura de acuerdo a la forma de onda que muestra la figura 1. Estos valores de temperatura mínima y máxima los entra el usuario mediante un teclado; también el tiempo (t_1) que tardará el sistema en cambiar la temperatura de mínima a máxima y viceversa. De esta forma se establece la pendiente con la cual debe cambiar la temperatura (ecuación 1).

$$m = \frac{(T_{\max} - T_{\min})}{t_1} \quad (1)$$

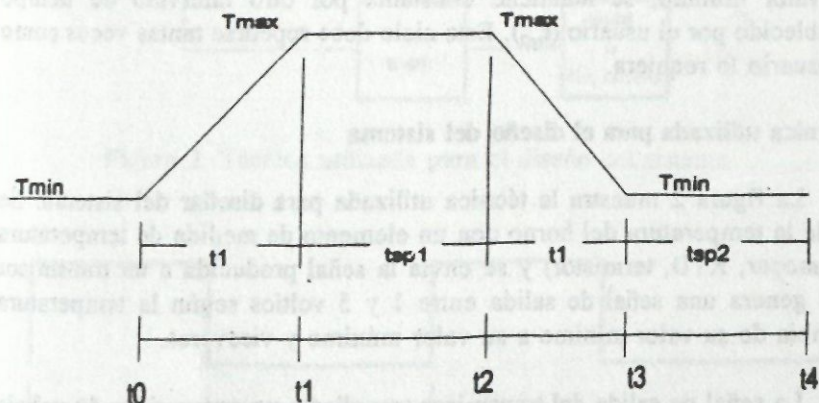


Figura 1. Operación del controlador de temperatura

Nieves/Controlador temperatura para horno pruebas

En la ecuación (1), m es la pendiente en grados Celsius por minuto con la cual la temperatura aumenta o disminuye, T_{\max} es el valor de la temperatura máxima en grados Celsius, T_{\min} es el valor de la temperatura mínima en grados Celsius y t_1 es el tiempo en minutos que le toma al sistema cambiar de una temperatura a otra. De esta forma la temperatura deseada durante este tiempo t_1 se define por la ecuación (2).

$$T_d = m \times t + T_{\min} \quad (2)$$

donde T_d es la temperatura deseada en grados Celsius, t es el tiempo en minutos que transcurre en el proceso hasta alcanzar un valor máximo definido por t_1 .

Luego de alcanzar el valor de temperatura máxima, se mantiene la temperatura constante por un tiempo establecido por el usuario (t_{p1}) y luego se disminuye la temperatura con la misma pendiente que aumentó hasta llegar al valor de temperatura mínima. Tan pronto la temperatura alcanza su valor mínimo, se mantiene constante por otro intervalo de tiempo establecido por el usuario (t_{p2}). Este ciclo debe repetirse tantas veces como el usuario lo requiera.

Técnica utilizada para el diseño del sistema

La figura 2 muestra la técnica utilizada para diseñar del sistema. Se mide la temperatura del horno con un elemento de medida de temperatura (termopar, RTD, termistor) y se envía la señal producida a un transmisor que genera una señal de salida entre 1 y 5 voltios según la temperatura cambia de su valor mínimo a su valor máximo y viceversa.

La señal de salida del transmisor se aplica a un convertidor de voltaje análogo a digital para convertir la temperatura medida a su valor equivalente en digital, de tal forma que el controlador la pueda leer. La señal de corrección es discreta y la genera el controlador. Esta señal fija el tiempo durante el cual el contacto del relé está cerrado (válvula "ON-OFF"

abierta). La figura 3 muestra la señal discreta de salida del controlador. La señal fija la fracción de un período T durante el cual el contacto del relé está cerrado, en el cual se define como T_{on} . Al controlar la fracción de T , controlamos la cantidad de energía que se transmite (potencia) al sistema durante el ciclo de período T . Al controlar la potencia transmitida al sistema, controlamos la temperatura.

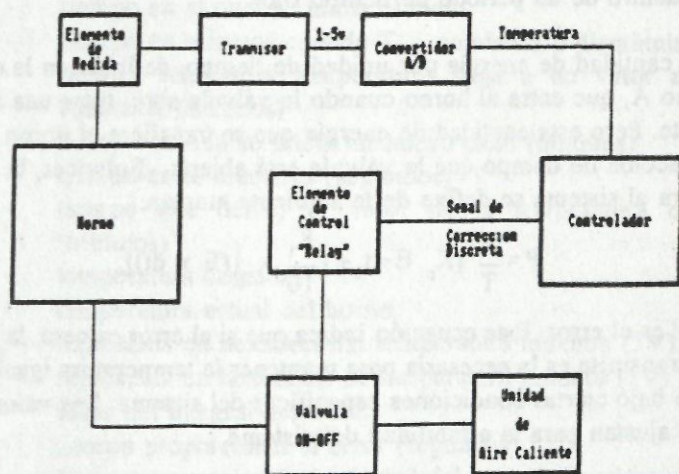


Figura 2. Técnica utilizada para el diseño del sistema

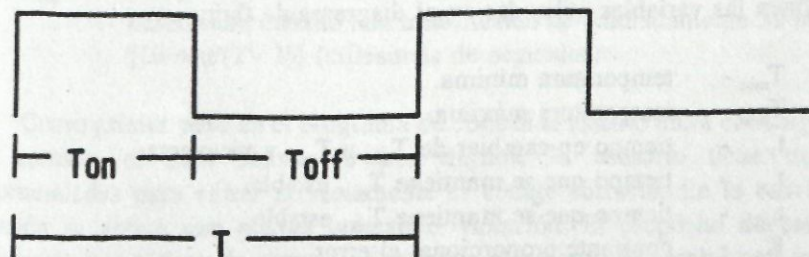


Figura 3. Señal discreta de salida del controlador

Nieves/Controlador temperatura para horno pruebas

La señal discreta de corrección se aplica al elemento de control que en este caso es un relé para entonces cerrar y abrir su contacto por el tiempo que la señal discreta de corrección indique. De esta forma la válvula "ON-OFF" del circuito de control del calentador del horno abre por un tiempo para permitir la entrada de aire caliente al horno y cierra por otro tiempo para evitar la entrada de aire caliente al horno. Toda esta operación se realiza dentro de un período de tiempo fijo.

La cantidad de energía por unidad de tiempo, definida en la ecuación (3) como A, que entra al horno cuando la válvula abre, tiene una amplitud constante. Pero esta cantidad de energía que se transfiere al horno depende de la fracción de tiempo que la válvula está abierta. Entontes, la potencia que entra al sistema se define de la siguiente manera:

$$P = \frac{A}{T} [K_p E + t_b + \left(\frac{K_i}{10} \times \int (E \times dt)\right)] \quad (3)$$

donde E es el error. Esta ecuación indica que si el error es cero, la potencia que se transmite es la necesaria para mantener la temperatura igual al valor deseado bajo ciertas condiciones específicas del sistema. Los valores de K_i y K_p se ajustan para la estabilidad del sistema.

Algoritmo de control utilizando un microprocesador

El diagrama de flujo que presenta la figura 4 muestra la lógica aplicada en el estudio para el diseño del programa de control. A continuación se definen las variables utilizadas en el diagrama de flujo.

- T_{min} - temperatura mínima.
- T_{max} - temperatura máxima.
- t_1 - tiempo en cambiar de T_{min} a T_{max} y viceversa.
- t_{sp1} - tiempo que se mantiene T_{max} estable.
- t_{sp2} - tiempo que se mantiene T_{min} estable.
- K_p - constante proporcional al error.
- K_i - constante proporcional a la integral del error.

- N - número de veces en repetir el ciclo.
- m - pendiente de la rampa para aumentar o disminuir la temperatura
- t_b - tiempo que la válvula permanece abierta dentro del periodo fijo cuando el error es cero (segundos)
- t_r - tiempo del reloj del sistema (minutos)
- t_0 - tiempo en el cual se inicia el ciclo.
- t_2 - tiempo en minutos cuando T_{max} comienza a disminuir.
- t_3 - tiempo cuando la temperatura llega a un valor mínimo constante (minutos)
- t_4 - tiempo cuando se inicia un nuevo ciclo (minutos)
- t_{em} - tiempo entre muestras (segundos)
- t - tiempo que define el valor de la temperatura deseada (minutos)
- T_d - temperatura deseada.
- T_a - temperatura actual del horno.
- FF_{Hex} - representa en hexadecimal temperatura máxima (5V).
- 33_{Hex} - representa en hexadecimal temperatura mínima (1V).
- Int - valor del integral del error.
- t_p - tiempo proporcional al error (segundos)
- t_i - tiempo proporcional al integral del error (segundos)
- t_{sc} - tiempo de control del relé (segundos)
- T_{on} - tiempo en que se abre la válvula (segundos)
- T_{off} - tiempo en que se cierra la válvula (segundos)
- T_{sub} - tiempo que se utiliza en la subrutina de tiempo para determinar cuándo han transcurrido aproximadamente 39 ms $[10 \text{ seg}/(2^n - 1)]$ (milésimas de segundos)

Como primer paso en el programa de control el usuario entra el código de entrada, el cual consta de tres dígitos. El usuario tiene tres oportunidades para entrar correctamente el código correcto. En la cuarta ocasión se activa una alarma indicando violación. El propósito de esta validación del código de entrada es proteger el proceso de cambios en los datos por personas no autorizadas a programar el sistema. Luego el usuario

Nieves/Controlador temperatura para horno pruebas

entra los siguientes datos: la temperatura mínima y la temperatura máxima en grados Celsius, el tiempo en minutos que tarda el sistema en pasar de la temperatura mínima a la temperatura máxima y viceversa, el tiempo en minutos que se mantiene cada temperatura estable, la constante proporcional al error, la constante de integración al error y el número de veces que desea repetir el ciclo.

Los valores que entra el usuario se almacenan en memoria para entonces determinar la pendiente con la cual se aumenta la temperatura de mínima a máxima en el proceso. Por medio de esta ecuación se puede notar que la unidad de la pendiente va a ser en grados Celsius por minuto. Luego se determina la temperatura deseada en grados Celsius.

El segundo paso a seguir es leer la temperatura actual en el horno, el cual es un valor hexadecimal. Una vez se obtiene esta lectura se calcula la temperatura actual del horno mediante interpolación. Este valor se decodifica y luego se envía hacia la pantalla conjuntamente con el valor de la temperatura deseada. De esta forma el usuario puede leer la temperatura actual y la deseada del proceso durante todo el ciclo.

El tercer paso es comparar la temperatura deseada del horno con la temperatura actual, lo cual define el error en temperatura con la siguiente ecuación (4)

$$E = T_d - T_{act} \quad (4)$$

Después de calcular el error se determina el tiempo en que el relé está cerrado y el tiempo en que el relé va a estar abierto utilizando las siguientes ecuaciones:

$$Q = E \cdot t_{cm} \quad (5)$$

$$t_p = K_p E + t_b \quad (6)$$

$$t_i = \frac{K_i Q}{t_{em}} \quad (7)$$

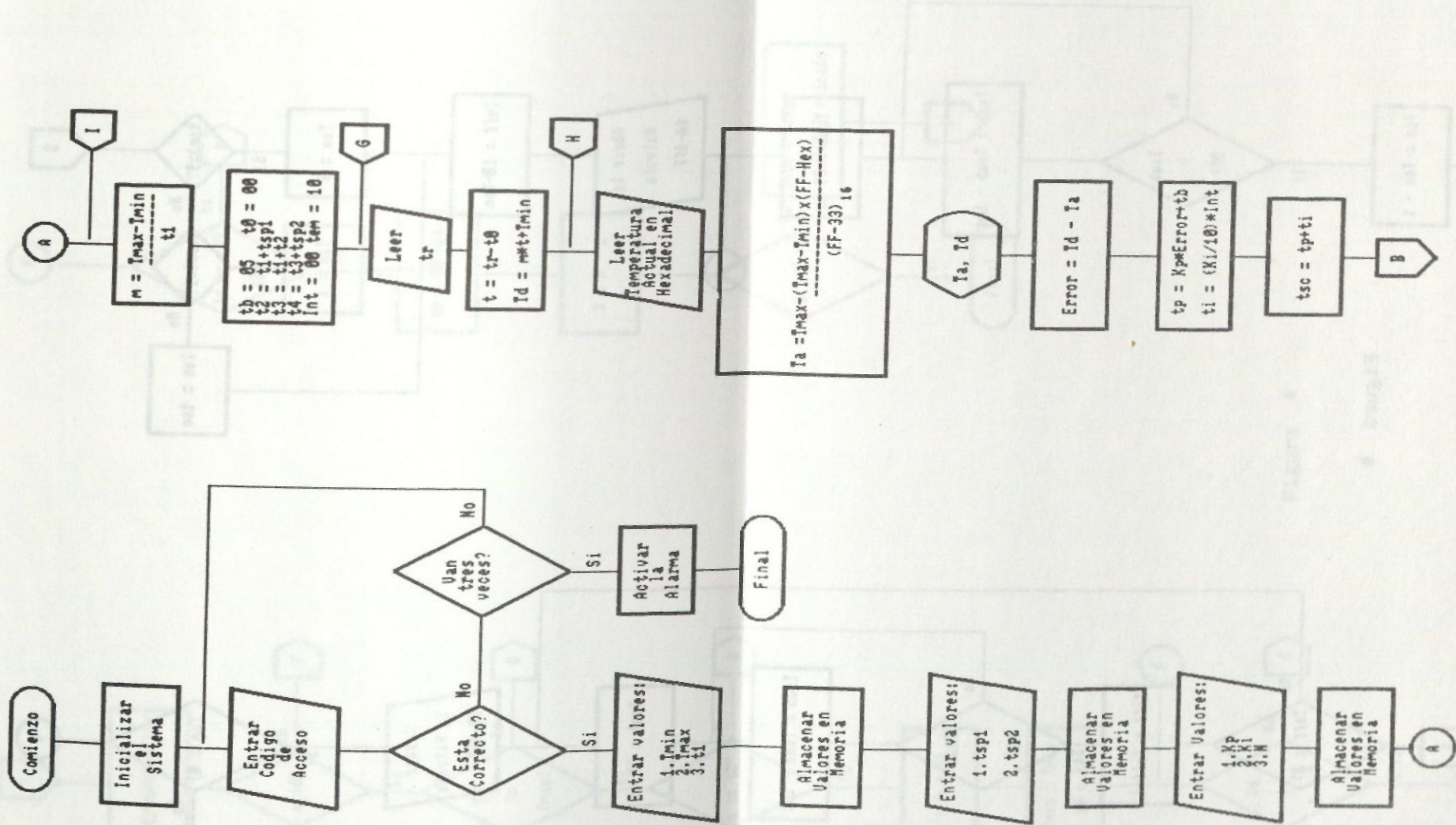
$$t_{sc} = t_p + t_i \quad (8)$$

$$T_{off} = 10 - T_{on} \quad (9)$$

donde Q es el valor del integral del error, t_{em} indica el tiempo entre las muestras y E es el error. En la ecuación (7) se divide entre t_{em} para usar K_i como entero y en la ecuación (8) la constante 10 define un período fijo de tiempo en segundos.

Estos valores de tiempo tanto para el contacto del relé cerrado como para el contacto del relé abierto tienen un valor máximo y mínimo. El tiempo en que el contacto del relé va a estar abierto depende directamente del valor de t_{sc} . El tiempo en que el contacto va a estar cerrado tiene un intervalo desde un mínimo de 1 segundo ($1A_{Hex}$) hasta un máximo de 9 segundos ($E6_{Hex}$).

Cuando el tiempo transcurrido en el proceso es equivalente al tiempo t_1 , entonces se procede a mantener la temperatura deseada constante en el valor de T_{max} . Cuando el tiempo transcurrido es t_2 , se disminuye el valor de la temperatura deseada invirtiendo el signo de la pendiente para disminuir la temperatura con la misma pendiente que se aumentó hasta que transcurra el mismo tiempo t_1 . Luego se procede a mantener la temperatura deseada constante en el valor de T_{min} . Este ciclo se repite tantas veces (N) como el usuario especifique mediante la entrada de este valor en el programa.



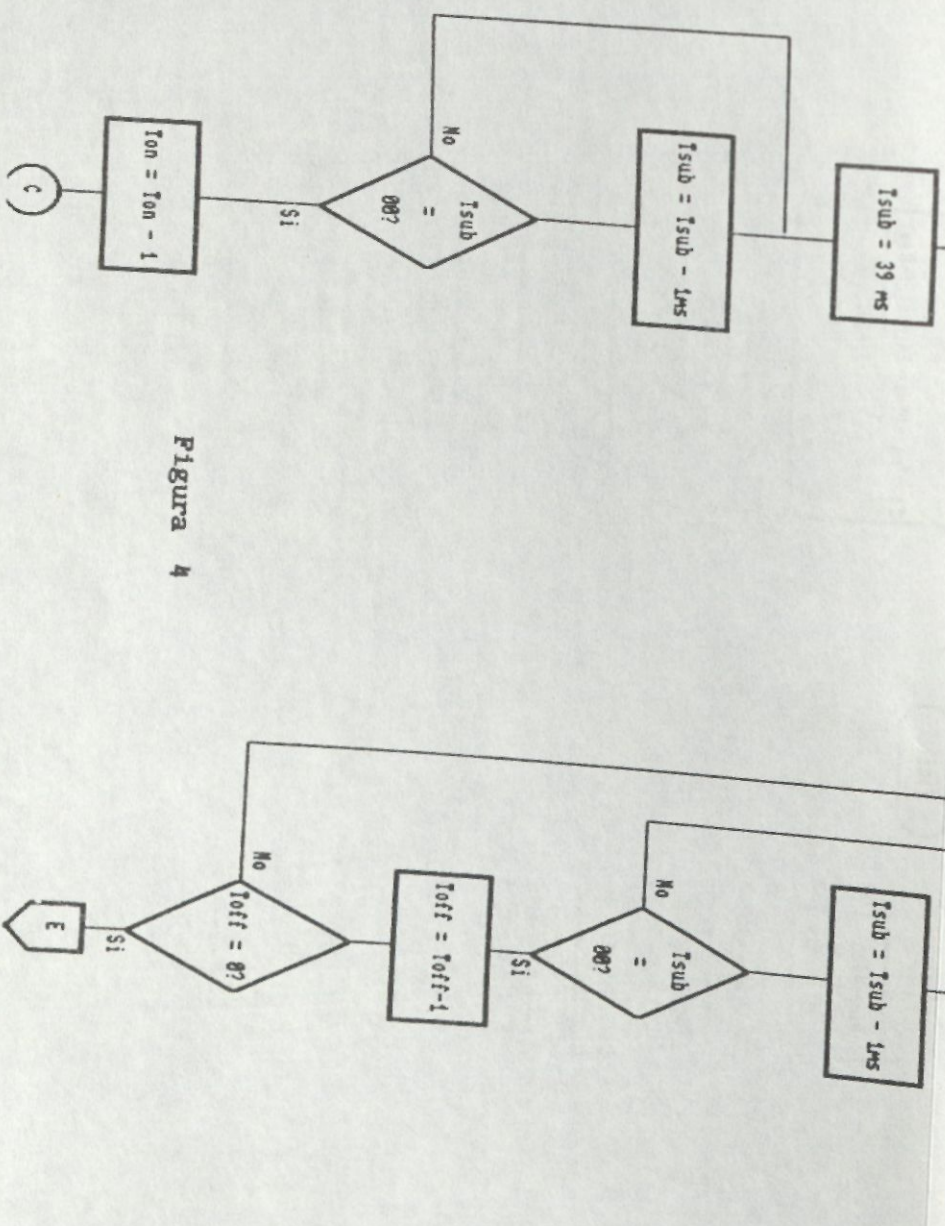
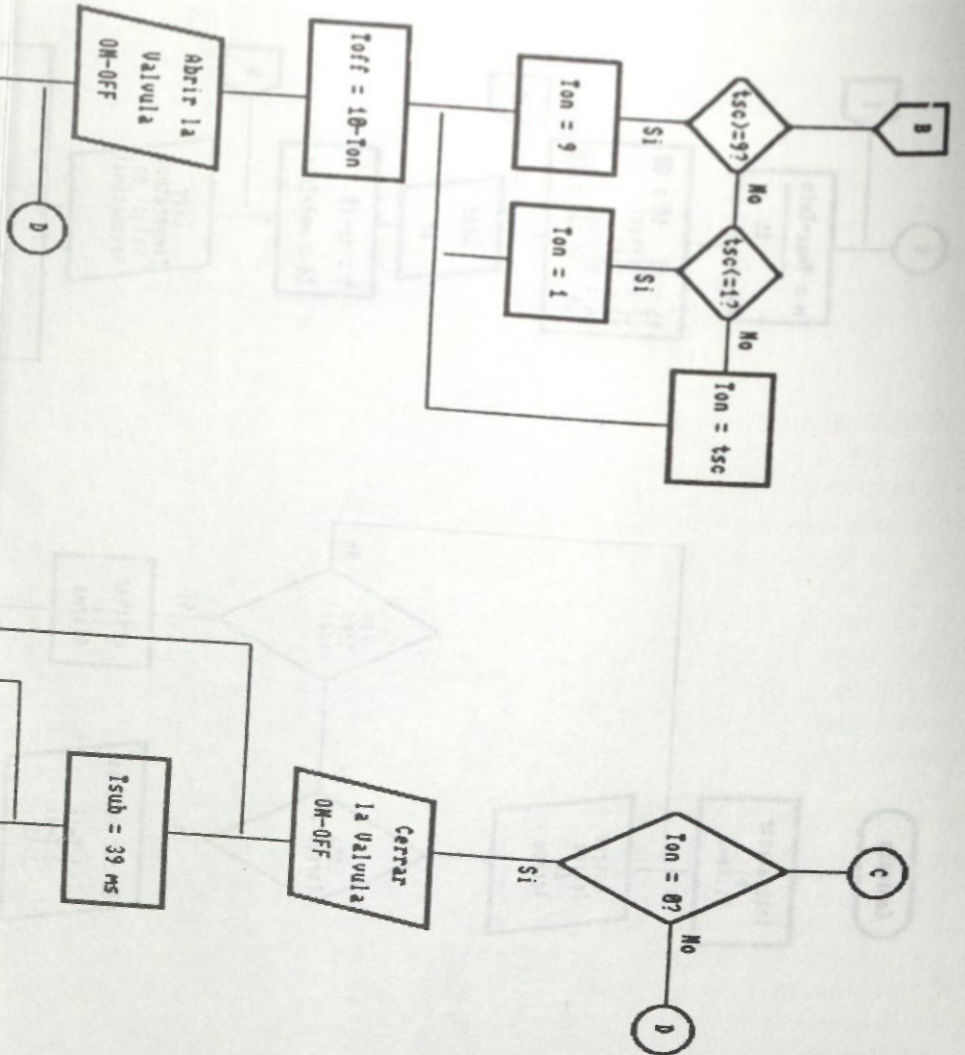


Figura 4

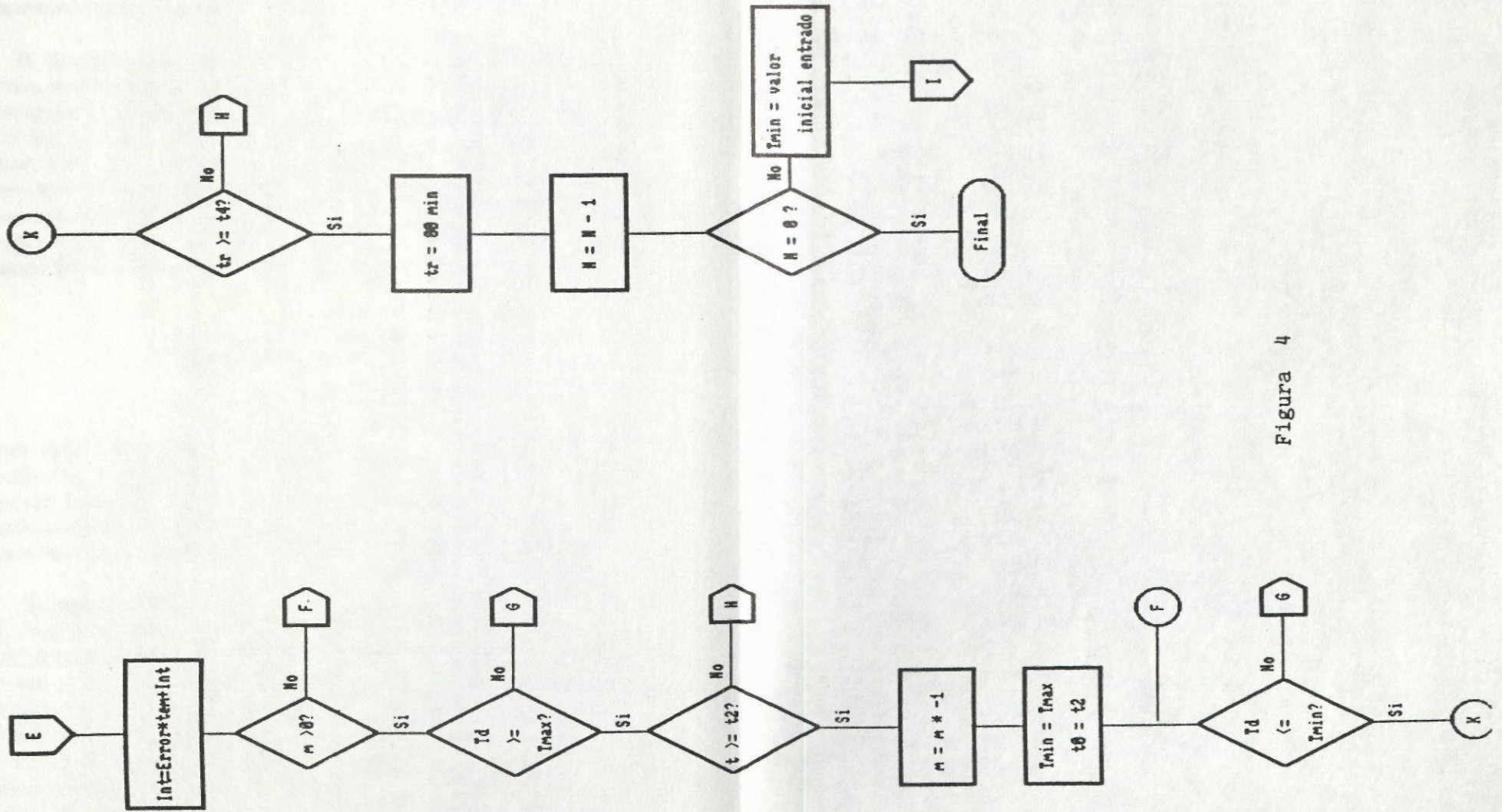


Figura 4

Diagrama en bloque del sistema desarrollado

El diagrama en bloque de la figura 5 muestra la forma en que el sistema se desarrolla. Se puede observar que una vez el elemento de medida de temperatura obtiene una muestra, el transmisor la convierte a un voltaje en el rango de 1 a 5 voltios y luego envía este valor al convertidor análogo-digital. Este convertidor indica en su salida de ocho líneas de datos el equivalente en hexadecimal de la temperatura leída, donde FF_{HEX} representa el valor de temperatura máxima y 33_{HEX} representa el valor de temperatura mínima. Estos valores se determinan por la resolución del convertidor análogo-digital mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Resolución A/D} = \frac{(5 \text{ voltios})}{(2^n - 1)} \quad (10)$$

donde cinco voltios representa el valor máximo del voltaje análogo y la sección $2^n - 1$ representa el valor máximo de salida digital; en este caso como el convertidor tiene ocho líneas, equivale a 255_{10} o FF_{HEX} . Luego el microprocesador (en este caso el microprocesador Intel 8088) obtiene la lectura del convertidor durante la ejecución del programa de control.

La barra ("bus") de direcciones se compone de las líneas de dirección del microprocesador que se utilizan para seleccionar los diferentes periféricos externos que complementan la operación del microprocesador. La barra de datos está constituida por las líneas de datos del microprocesador, las cuales se utilizan para transferir o recibir información de cada uno de los periféricos externos. La barra de control se define por las diferentes líneas de señales de entrada y salida que contiene el microprocesador para el control de los periféricos externos durante la corrida del programa.

Nieves/Controlador temperatura para horno pruebas

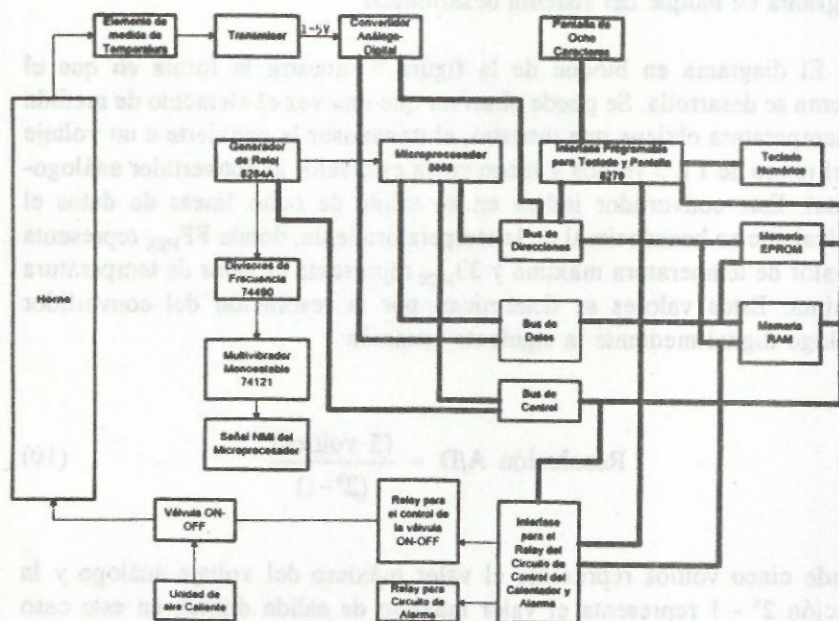


Figura 5. Diagrama de bloques del sistema desarrollado

El interfase programable para el teclado y la pantalla codifica los valores numéricos entrados por el teclado mientras se ejecuta el programa de control. Además, este interfase envía por la pantalla los diferentes mensajes para la entrada de datos durante la corrida del programa y los valores de temperatura deseada y temperatura actual del horno durante todo el proceso. El interfase para el relé del circuito de control del calentador y para el relé de la alarma de seguridad se encarga de activar o desactivar cada relé de acuerdo a las especificaciones del programa de control usando un dígito binario para cada uno.

La memoria EPROM ("Erasable Programable Read Only Memory") es donde se almacena el programa de control del sistema permanentemente. La

memoria RAM ("Random Access Memory") es la que almacena los resultados que se obtienen durante la ejecución del programa de control.

El generador de reloj genera la frecuencia, en este caso 5 MHz, con la cual el microprocesador trabaja. Este generador además genera otra frecuencia equivalente a la mitad de la que le envía al microprocesador (2.5 MHz), la cuál se utiliza para generar un reloj real por medio de divisores de frecuencia para obtener el valor de 1 Hz. Esta frecuencia se envía al multivibrador monoestable para entonces crear un pulso con un ancho mucho menor al 50% del período total de un segundo y de esta forma interrumpir siempre al microprocesador por una pequeña fracción de tiempo, al enviar este pulso a la señal de entrada NMI ("Nonmaskable Interrupt") del microprocesador. Luego, mediante programación, se incrementa una localización de memoria por cada interrupción y de esta forma se determina que transcurre 1 segundo de tiempo.

Conclusiones

Mediante el desarrollo de este trabajo investigativo se ha comprobado una de las muchas aplicaciones en las que se puede utilizar un microprocesador; en este caso como controlador de un sistema de temperatura programable. En este estudio se aplicaron dos formas que se utilizan para corregir una señal de error; generar una señal de corrección proporcional al error y generar una señal de corrección proporcional al integral del error, lo cual define este controlador como tipo PI. El corregir proporcional a la integral del error permite reducir el error en estado estable.

El diseño del circuito transmisor con salida de uno a cinco voltios hace que este sea tipo estándar y logra la compatibilidad requerida con el convertidor análogo a digital para comunicar al sistema de control del microprocesador con el horno. El transmisor es lineal, lo cual permite determinar la temperatura actual del horno mediante interpolación. Este circuito transmisor puede componerse de un transductor, ya sea un

Nieves/Controlador temperatura para horno pruebas

termopar, un RTD o un termistor y amplificar esta señal mediante el uso de amplificadores operacionales.

La señal de salida discreta se encarga de fijar la fracción de tiempo en la cual se permite transmitirle energía al horno dentro de un período fijo. La fracción de tiempo de 5 segundos dentro del periodo fijo de 10 segundos determina el tiempo durante el cual la válvula está abierta siempre que el error sea cero.

En este trabajo partimos de la realidad de que el horno es un sistema tipo cero. Al usar un controlador PI y al ser la entrada una rampa, lo más que logramos es reducir el error en estado estable, pero nunca podemos llevarlo a cero. El intentar reducir este error a cero aumenta las posibilidades de inestabilidad grandemente y no se debe hacer si no se saben las características exactas del horno.

Este estudio puede continuarse en el diseño del algoritmo de control que logre que el error en estado estable para un sistema tipo cero en respuesta a una rampa sea cero.