

**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES**  
**CONSEJO DE ESTUDIOS DE POSTGRADO**  
**DIVISIÓN DE POSTGRADOS DE INGENIERÍA**  
**POSTGRADO EN AUTOMATIZACIÓN E INSTRUMENTACIÓN**

**CONTROL DE TEMPERATURA EN HORNO PARA ENSAYOS**  
**DE DILATACIÓN TÉRMICA**

*Trabajo de grado presentado ante la Ilustre Universidad de los Andes como  
requisito parcial para optar al título de Magíster Scientiae en  
Automatización e Instrumentación*

**Autor: Gensy Alex Guillén**

**Tutores: Jean F. Dulhoste, Ph. D**

**Carlos J. Jerez R, MSc.**

**José F. Pérez A, MSc.**

**DONACION**

**Junio, 2006**

**SERBIULA**  
Elio Febres Cordero

Licencia Creative Commons  
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela  
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

## DEDICATORIA

*El autor desea dedicar este trabajo a Dios Padre  
Todopoderoso por iluminar nuestras vidas y a mi madre, por  
darme el Don de la vida y por estar siempre a mi lado,  
apoyándome en las buenas y en las malas.*

**Te Amo...**

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis seres queridos, mi eterna gratitud.

Al profesor DULHOSTE, por el interés mostrado y su ayuda en la elaboración y culminación de esta tesis de maestría.

Al profesor Carlos Jeréz, por sus consejos y recomendaciones en esos momentos difíciles.

Al profesor José Fernando, por sus enseñanzas, consejos, su apoyo moral y el interés y preocupación que manifestó durante la última etapa de desarrollo de este trabajo. Gracias por su gran amistad...

Al profesor Ramón Tolosa, por permitir el equipo y el espacio físico del Laboratorio de Metalografía y Tratamientos Térmicos de la Escuela de Ingeniería Mecánica.

A Richard Briceño, personal de este laboratorio, por su gran ayuda, apoyo y paciencia.

Al Postgrado en Automatización e Instrumentación, a todos sus profesores y personal.

Al Fondo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (FONACIT) por el apoyo económico prestado para la realización de esta Maestría.

De manera muy especial a la Sra. Duilian Santana por su bella amistad, consejos y apoyo, tanto a mi persona como a mi madre. Gracias por su confianza y paciencia...

## RESUMEN

El presente trabajo tiene como propósito la implementación de una estrategia de control, basada en un controlador Proporcional-Integral-Derivativo (*PID*) por software, a un proceso térmico representado por un horno de calentamiento eléctrico, empleado para el estudio de las dilataciones térmicas que experimenta una pieza de acero o aluminio sometida a un perfil de calentamiento. Para ello fue necesario obtener un modelo matemático del proceso, mediante la aplicación de la Identificación de Sistemas, específicamente, un método paramétrico, a los datos de entrada y de salida (voltaje /temperatura), y donde se dedujo que, la expresión matemática más adecuada para representar la dinámica del proceso térmico, con un grado de exactitud aceptable, es un modelo *ARX* de 4to orden, pero con la característica de que sus coeficientes son variables de acuerdo a la temperatura de trabajo. A partir del modelo obtenido se propuso y se realizó la implementación de la estrategia de control *PID* a nivel de simulación, utilizando las formulas de sintonización de Ziegler & Nichols para el ajuste del controlador. Se obtuvo como resultado que el uso de un controlador *PID* con parámetros variables, es la opción más viable al momento de implementar, experimentalmente, un controlador de este tipo al proceso térmico en estudio. Finalmente se procedió a la implementación real de la estrategia sobre el horno eléctrico mediante el desarrollo respectivo del hardware y software, todo esto gobernado por un computador personal (*PC*), y donde el controlador *PID* fue implementado por medio de *LabVIEW*<sup>®</sup> 6.1. Las diferentes evaluaciones experimentales que se exponen en el trabajo demostraron que la estrategia de control propuesta presenta un buen comportamiento.

**Descriptores:** instrumentación y control, control de temperatura, *PID*, identificación de sistemas, modelo *ARX*, *LabVIEW*.

## ÍNDICE GENERAL

	Pág
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
RESUMEN	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
ÍNDICE DE TABLAS	xi
<b>CAPÍTULO I</b>	
<b>INTRODUCCIÓN</b>	1
<b>CAPÍTULO II</b>	
<b>MARCO TEÓRICO</b>	
Introducción	4
2.1 Sistemas Dinámicos	4
2.2 Modelo matemático	5
2.2.1 Obtención del modelo matemático	5
2.3 Sistemas lineales clásicos	7
2.4 Identificación de Sistemas	7
2.4.1 Clasificación de los métodos de identificación	8
2.4.2 Procedimiento de identificación	9
Diseño de experimentos y registro de los datos	11
Selección de la estructura del modelo	11
Ajuste del modelo seleccionado	12
Validación del modelo	12
2.5 Aplicación de la Identificación de Sistemas en Horno Eléctricos	13
2.6 Hornos Eléctricos	15
2.6.1 Generalidades	15
2.6.2 Clasificación del calentamiento eléctrico	16
2.7 Introducción a los Sistemas de Control	18
2.7.1 Principios básicos de diseño de sistemas de control	19

2.7.1.1	Requisitos generales de los sistemas de control	19
2.7.1.2	Análisis y diseño de sistemas de control	20
2.7.2	Acciones básicas de control	20
2.7.2.1	Clasificación de controladores industriales analógicos	21
2.7.2.2	Controlador Proporcional-Integral-Derivativo	21
2.7.3	Entonación de los controladores por retroalimentación	22
2.7.3.1	Método de respuesta de razón de un cuarto	23
2.8	Aplicaciones de Control en Hornos Eléctricos	24
<b>CAPÍTULO III</b>		
<b>MODELADO DEL PROCESO TÉRMICO</b>		
	Introducción	26
3.1	Descripción del Equipo	26
3.2	Metodología para el modelado del Proceso Térmico	28
3.3	Implementación a nivel experimental de la metodología	36
3.3.1	Instrumentación	36
	Computador personal	37
	Tarjeta de adquisición de datos	37
	Relé de estado sólido	38
	Transductor de temperatura	38
	Amplificador de termocupla	39
3.3.2	Software	41
3.4	Descripción del programa encargado de generar, adquirir, registrar, analizar y presentar la data del proceso	42
3.4.1	Pantalla de presentación	42
3.4.2	Pantalla de configuración para generar la señal de entrada del proceso térmico	43
3.4.3	Pantalla de visualización de la temperatura del proceso térmico	45
3.4.4	Pantalla final de presentación	47
3.5	Resultados	49
3.5.1	Resultados experimentales	49
3.5.2	Resultados de simulación	54

3.5.2.1 Modelo Final	59
3.5.3 Modelo ARX ajustado	61
3.6 Conclusiones	65
<b>CAPÍTULO IV</b>	
<b>CONTROL DEL PROCESO TÉRMICO</b>	
Introducción	68
4.1 Descripción de la estrategia de control propuesta	68
4.2 Simulación de la estrategia de control	70
4.2.1 Análisis de las simulaciones	75
4.3 Metodología para la implementación a nivel experimental	76
4.4 Implementación real de la estrategia de control	79
4.5 Resultados	82
4.5.1 Perfil de calentamiento a baja temperatura	83
4.5.1.1 Análisis de los resultados	87
4.5.2 Perfil de calentamiento a alta temperatura	88
4.5.2.1 Análisis de los resultados	92
4.6 Conclusiones	93
<b>CAPÍTULO V</b>	
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	
Conclusiones	95
Recomendaciones para futuras investigaciones	97
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	99
<b>ANEXOS</b>	102
A Manual de especificación de la tarjeta de adquisición Lab-PC 1200 de la National Instruments	102
B Manual de especificación y uso del AD594/AD595	107
C Programa para generar, adquirir, registrar, analizar y presentar la data de entrada/salida (voltaje/temperatura) del horno eléctrico	112
D Programa diseñado para implementar un control PID a la temperatura del interior de la cámara del horno eléctrico	119

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
2.1 Sistema con una salida $y$ , una entrada $u$ , una perturbación controlada $w$ y una perturbación no controlada $v$ .	5
2.2 Algoritmo de la Identificación de Sistemas	10
2.3 Disposición de resistencias en el interior del horno	17
2.4 Resistencia de alambre con forma de espiral	17
2.5 Disposición de las resistencias arrolladas en espiral sobre soportes cerámicos.	18
3.1 Vista interior del Horno Eléctrico	27
3.2 Vista frontal del horno eléctrico para ensayos de Dilatación Térmica.	28
3.3 Algoritmo para la adquisición de la temperatura del horno eléctrico	31
3.4 Instrumentación implementada	37
3.5 Circuito eléctrico del Relé de Estado Sólido	38
3.6 Conexiones eléctricas del integrado empleado	40
3.7 Pantalla de presentación del programa.	43
3.8 Pantalla de configuración del programa de identificación	44
3.9 Pantalla de visualización de la temperatura en la cámara del horno eléctrico.	46
3.10 Pantalla final de presentación del programa elaborado.	48
3.11.a Curva de temperatura obtenida en uno de los experimentos.	50
3.11.b Segmento de la curva sólo en régimen permanente.	50
3.12 Señal de alimentación y respuesta del horno eléctrico	51
3.13 Señal de alimentación y respuesta del horno eléctrico en régimen permanente	52
3.14 Segmentos normalizados seleccionados para la identificación	53
3.15 Error de comparación entre la respuesta estimada por los modelos y la respuesta obtenida experimentalmente	55
3.16 Comparación entre la salida del modelo $ARX$ y los datos experimentales. Punto de operación alcanzado 447,29 °C.	56

3.17 Comparación entre la salida del modelo ARX y los datos experimentales. Punto de operación alcanzado 591,77 °C.	57
3.18 Comparación entre la salida del modelo ARX y los datos experimentales. Punto de operación alcanzado 798,72 °C.	58
3.19 Comparación entre la respuesta del modelo y la respuesta experimental para un punto de operación de 447,29°C	63
3.20 Comparación entre la respuesta del modelo y la respuesta experimental para un punto de operación de 591,77°C	64
3.21 Comparación entre la respuesta del modelo y la respuesta experimental para un punto de operación de 798,72°C	65
4.1 Control a lazo cerrado de la temperatura del interior del horno	70
4.2 Diagrama de bloques de la estrategia de control implementada a los modelos de identificación	72
4.3.a Evaluación de la estrategia de control para temperaturas bajas	72
4.3.b Zoom a una temperatura de estabilización de 300°C	73
4.4.a Evaluación de la estrategia de control para temperaturas altas	74
4.4.b Zoom del control PID a 600°C y 700°C, respectivamente	74
4.5 Evolución de cada uno de los parámetros del controlador de acuerdo a los puntos de operación alcanzados	77
4.6 Circuito implementado experimentalmente	79
4.7 Panel principal del programa elaborado	80
4.8 Panel de configuración para aplicar control PID	81
4.9 Panel de supervisión y control de la temperatura del proceso térmico	82
4.10 Perfiles de calentamientos usados en los experimentos	83
4.11 Control con parámetros variables cada $T_s$	84
4.12 Control con parámetros variables cada $T_s$ . $K_p$ es incrementado	84
4.13 Control con parámetros variables cada $T_s$ . $K_p$ es disminuido	85
4.14 Control con parámetros variables cada $T_s$ . $K_i$ es aumentado	85
4.15 Control con parámetros variables cada $T_s$ . $K_i$ es disminuido	86
4.16 Control con parámetros constantes. Valores promedios	86
4.17 Control con parámetros variables cada $T_s$	89

4.18 Control con parámetros variables cada $T_s$ . $K_p$ es aumentado	89
4.19 Control con parámetros variables cada $T_s$ . $K_p$ es disminuido	90
4.20 Control con parámetros variables cada $T_s$ . $K_i$ es aumentado	90
4.21 Control con parámetros variables cada $T_s$ . $K_i$ es disminuido	91
4.22 Control con parámetros constantes. Valores promedios	91

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

## ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
2.1 Formulas para el ajuste de controladores en base a la respuesta de asentamiento de un cuarto.	24
3.1 Voltaje máximo de salida para termocupla Tipo K	39
3.2 Puntos de operación obtenidos experimentalmente	54
3.3 Coeficientes $a_i$ del modelo <i>ARX</i> obtenidos en el procedimiento de identificación.	60
3.4 Coeficientes $b_i$ del modelo <i>ARX</i> obtenidos en el procedimiento de identificación.	60
4.1 Parámetros del controlador <i>PID</i> obtenidos mediante Ziegler & Nichols	71
4.2 Fases de evaluación de la estrategia de control en base a los parámetros del controlador	78
4.3 Temperatura promedio alcanzada por el horno eléctrico a una temperatura de estabilización de 200°C y 300°C.	87
4.4 Temperatura promedio alcanzada por el horno eléctrico a una temperatura de estabilización de 600°C y 700°C	92

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

En la última década, la sociedad industrializada ha venido haciendo uso extenso de los sistemas automatizados gracias al notable avance y progreso de la informática y la electrónica. Así pues, tanto en la vida cotidiana como en la industria, los sistemas de control se han caracterizado por el masivo empleo de medios técnicos de automatización digitales tales como autómatas programables, controladores compactos, sensores y actuadores inteligentes y computadoras personales (PC), como componentes de redes o en conexión independiente.

Una parte esencial para el desarrollo e implementación de un sistema de control lo representa el modelaje y simulación, lo cual se ha constituido como una poderosa herramienta para el diseño, análisis y optimización de sistemas y procesos industriales. Dado a la gran disponibilidad de las computadoras, cada vez más poderosas, de menor costo y de fácil uso, acompañados por software o programas de aplicación y lenguajes de programación altamente flexibles, han permitido la masificación del uso de diferentes técnicas de modelaje, simulación y control de procesos, por ejemplo, los procesos térmicos representados por hornos de calentamiento eléctrico.

Entonces para poder llevar a cabo la implementación de cualquier sistema de control es necesario contar previamente con un modelo matemático de la planta o proceso que se quiera controlar. Este modelo, el cual relaciona las entradas y salidas del proceso mediante una ecuación diferencial o en diferencia, puede ser deducido mediante varios enfoques, entre los cuales se encuentran los métodos de Identificación de Sistemas.

De acuerdo a lo anterior, este trabajo se concentra por una parte en el modelado a través de la Identificación de Sistemas, específicamente un método de identificación paramétrico, y, por otra, en el diseño, análisis e implementación de un sistema de control, basado en un controlador *PID* mediante una aplicación elaborada en *LabVIEW*<sup>®</sup>, de un proceso térmico representado por un horno de calentamiento eléctrico de la casa fabricante THETA modelo DILAMATIC I y adquirido por la Universidad de los Andes en 1.977.

En forma general, el modelado y control del horno de calentamiento eléctrico desarrollado en el presente trabajo, ha sido estructurado de la siguiente manera:

- Capítulo II: se discuten algunas definiciones necesarias para el modelado y control del proceso térmico. Entre estas tenemos ciertos conceptos elementales sobre los sistemas dinámicos, así como las distintas formas para deducir el modelo matemático de una planta o proceso en particular; además se da a conocer todo lo referente a la Identificación de Sistemas, sus métodos y pasos a seguir para su aplicación. Finalmente se describen, en forma general, los hornos de calentamiento eléctrico usados tanto a nivel didáctico como a nivel industrial, al igual que se detallan los sistemas de control, orientándose particularmente hacia la aplicación de estrategias de control basados en controladores *PID*.

- Capítulo III: describe el proceso térmico sobre el cual se realiza el procedimiento de identificación; la metodología utilizada para la adquisición de los datos de entrada y salida del proceso; el desarrollo de toda la programación necesaria para la generación, adquisición, registro, análisis y presentación de la data experimental y posteriormente, se muestran los resultados experimentales así como los referentes a la simulación del modelo matemático obtenido por identificación.

- Capítulo IV: presenta en su primera parte los resultados de la implementación, a nivel de simulación, de la estrategia de control propuesta para abordar, seguidamente, la implementación real del sistema de control, basado en un control

*PID* por software, sobre el equipo físico, previo análisis, evaluación y optimización en base a la simulación con los modelos obtenidos.

- Capítulo V: ofrece las conclusiones arrojadas por el trabajo de investigación e igualmente se describen algunas perspectivas a seguir para futuras investigaciones con miras a mejorar los resultados obtenidos en el presente desarrollo.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Licencia Creative Commons:  
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela  
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### Introducción

En este capítulo se van a discutir algunas definiciones necesarias para el modelado y control del horno de calentamiento eléctrico. En primer lugar se definen algunos conceptos elementales sobre los sistemas dinámicos, así como las vías para la obtención del modelo matemático de cualquier proceso. Luego se presenta todo lo referente a la Identificación de Sistemas, sus métodos y pasos a seguir para la aplicación de éstos, al igual que los campos de aplicación más importantes. Seguidamente se presenta una breve revisión sobre los hornos de calentamiento eléctrico usados tanto a nivel didáctico como a nivel industrial y, finalmente, se realiza un bosquejo en cuanto a los sistemas de control, además se presentan las extensas áreas de aplicación de los controladores *PID* en los distintos hornos de calentamiento eléctrico existentes en las industrias metálicas.

#### 2.1 Sistemas Dinámicos

En pocos términos un sistema es un conjunto de elementos en el cual interactúan diferentes variables y que producen señales que son observables. Estas señales observables, que son de gran interés, generalmente son llamadas salidas. Este sistema también es afectado por señales externas. Las señales externas que son manipuladas se conocen como señales de entradas. Otras señales son llamadas perturbaciones y pueden ser divididas en señales que son medidas directamente y otras señales que son observadas a través de la influencia de éstas sobre la salida del sistema [1]. La Fig. 2.1 muestra claramente la noción de un sistema en un concepto amplio donde  $u$  es la señal de entrada,  $y$  la señal de salida,  $w$  la señal de perturbación controlada y,  $v$  la señal perturbadora no controlada.

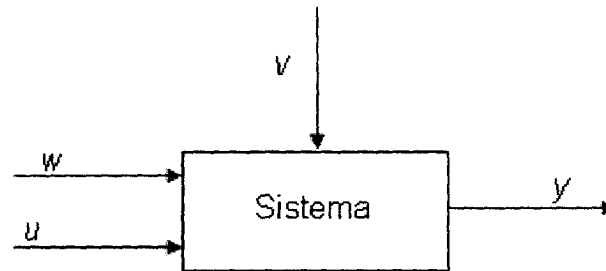


Fig. 2.1 Sistema con una salida  $y$ , una entrada  $u$ , una perturbación controlada  $w$  y una perturbación no controlada  $v$ .

## 2.2 Modelo matemático

Un modelo matemático de un sistema dinámico se define como un juego de ecuaciones que representa la dinámica del sistema con exactitud o al menos razonablemente bien. Este modelo matemático tiene la característica de que no es único para un sistema dado. Un sistema se puede representar de muchos modos diferentes, y por lo tanto, puede tener muchos modelos matemáticos, dependiendo de las perspectivas individuales.

La dinámica de muchos sistemas, sean mecánicos, eléctricos, térmicos, económicos, biológicos, u otros, se puede describir en términos de ecuaciones diferenciales que se obtienen utilizando las leyes físicas que rigen un sistema en particular. Finalmente la respuesta de un sistema dinámico ante una entrada particular (o función excitadora) se logra si se resuelven las ecuaciones diferenciales que modelan dicho sistema [2].

### 2.2.1 Obtención del modelo matemático

Cualquier práctica de modelado es frecuentemente una aproximación del proceso real, ya que muchos factores influyen en el comportamiento del proceso,

haciendo que algunos sean muy complejos para modelar de manera satisfactoria, mientras que otros, simplemente, no se comprenden bien. Entonces el objeto del modelo es capturar aquellas interacciones importantes del proceso real para poder, así, cumplir con el propósito del modelo [3].

El modelo, el cual describe la relación entre las variables del sistema, se expresa generalmente por medio de expresiones matemáticas, tal como ecuaciones diferenciales o en ecuaciones en diferencia. Tales modelos son conocidos como modelos matemáticos o analíticos [1]. Los modelos matemáticos de los sistemas dinámicos son muy útiles en muchas áreas y en muchas aplicaciones, por tal razón, se tienen dos maneras para el diseño de estos modelos:

- **Modelo de conocimiento:** este es el enfoque matemático o analítico; las leyes físicas (tal como las leyes de Newton, transferencia de calor y ecuaciones de balance y energía) son usadas para describir el comportamiento dinámico de un fenómeno o un proceso. Este modelado consiste entonces, en la determinación de las relaciones de entrada y salida del proceso a partir del conocimiento de las leyes que rigen el funcionamiento del mismo.

- **Modelo de representación** (identificación): este es el enfoque experimental; algunos experimentos son realizados sobre el sistema y un modelo en particular es ajustado a los datos experimentales registrados asignando, posteriormente, valores numéricos adecuados a sus parámetros [4]. Este enfoque suele ser más simple que un modelo analítico aunque generalmente no explica, en ningún caso, lo que ocurre físicamente dentro del sistema. Esta característica permite manejar el problema con mayor comodidad que al hacerlo mediante un modelo matemático o teórico mucho más complejo y además, a pesar de su sencillez, este modelo puede representar fielmente las relaciones entre la entrada y salida del proceso.

## 2.3 Sistemas lineales clásicos

A esta clase pertenecen los sistemas cuyo modelo matemático es un conjunto de ecuaciones diferenciales lineales con coeficientes constantes. En estos sistemas consideramos una sola señal de salida. Respecto a la señal de entrada, normalmente consideramos una sola señal, aunque debemos tener presente que aparte de tal señal se tienen una o varias señales de perturbación, las cuales si bien son señales indeseables, son variables y entran al sistema.

La ecuación general que describe este tipo de sistemas es:

$$a_n \frac{d^n Y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} Y}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dY}{dt} + a_0 Y = b_{m-1} \frac{d^m X}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} X}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{dX}{dt} + b_0 X + c_v \frac{d^v P}{dt^v} + \dots + c_1 \frac{dP}{dt} + c_0 P \quad (2.1)$$

donde  $m$ ,  $n$  y  $v$  son enteros positivos;  $a_i$ ,  $b_i$  y  $c_i$  son coeficientes constantes;  $Y$  es la variable de salida,  $X$  es la variable de entrada y  $P$  es la variable de perturbación.

En definitiva la linealidad de gran cantidad de sistemas, ya sean mecánicos o eléctricos, puede aproximarse en un rango razonablemente grande de las variables, pero esto no es el caso usual para sistemas térmicos y/o de fluidos, los cuales tienen un carácter más frecuentemente no lineal [5]. Normalmente las relaciones de entrada y salida de estos sistemas se linealizan en la vecindad de los puntos de operación, limitando el rango de las variables a valores pequeños.

## 2.4 Identificación de Sistemas

El término identificación fue propuesto por Zadeh en 1.956 como una expresión genérica para el problema de la "determinación de la relación entrada-salida de una caja negra por medios experimentales", además citó variadas

terminologías comunes, para ese entonces, al mismo problema: “caracterización”, “medición”, “evaluación”, etc., y se dio cuenta que el término “*identificación*” expresa “*lo esencial del problema con mayor claridad que los términos más comunes dados anteriormente*” [6, 7].

La identificación de sistemas es un campo bastante amplio que trata el modelado matemático de un proceso a partir de datos experimentales. En primer término, un modelo matemático del sistema es formulado en base a las observaciones del proceso. Este modelo se ajusta para reducir el error relativo comparado con los datos del proceso. La prueba final es determinar si el modelo es capaz, en buena manera, de representar la data experimental. El propósito de esta prueba es determinar si el modelo es el adecuado para permitir un control por retroalimentación con un modelo menos conservador aunque la simulación y predicción pueda requerir una mayor exactitud.

En este sentido, el modelado matemático de cualquier proceso mediante la Identificación de Sistemas se centra en la aplicación de métodos de identificación, los cuales pueden clasificarse según diversos puntos de vistas.

#### **2.4.1 Clasificación de los métodos de identificación**

Los métodos de identificación se pueden clasificar según varios puntos de vista entre los cuales se tienen: el tipo de señal de entrada, el estado del proceso en el cual se estudia la respuesta, y la clase de modelo. Para fines del trabajo de investigación, solo se detallará brevemente la clasificación de los métodos de identificación según la clase de modelo por ser uno de éstos aplicado en el capítulo subsiguiente.

Según la clase de modelo se encuentran dos grandes grupos como son: los métodos paramétricos y los métodos no paramétricos. En el primer grupo encontramos los métodos en donde se selecciona un determinado tipo de función o

estructura de modelo, caracterizado por una serie de parámetros, y se presume que la función de transferencia del sistema será de este tipo. La identificación del sistema en este caso consiste en determinar el valor numérico de esos parámetros, lo cual definirá una función de transferencia específica para el sistema en estudio. Estos tipos de métodos son bastante fáciles de implementar a nivel práctico ya que basta con determinar el valor de los parámetros mediante el uso de algún método estadístico. En el segundo grupo se tienen los métodos en donde no se preestablece una estructura paramétrica definida, sino que se determina la función más adecuada en atención al sistema en estudio, obteniéndose la respuesta de forma directa o indirecta del análisis experimental [8].

#### **2.4.2 Procedimiento de Identificación**

En términos generales, un experimento de identificación es realizado excitando el sistema (usando para tal fin alguna clase de señal de entrada como un escalón, una senoidal, o una aleatoria) y observando la entrada y salida sobre un periodo de tiempo. Estas señales normalmente son registradas y almacenadas por un computador personal para posteriormente procesar dicha información. Seguidamente se ajusta un modelo paramétrico a los datos experimentales de entrada y salida del proceso. Entonces, el primer paso es determinar una forma apropiada del modelo (típicamente una ecuación en diferencia lineal de cierto orden). En un segundo paso, un método estadístico es usado para estimar los parámetros desconocidos del modelo, es decir, los coeficientes de la ecuación en diferencia. El Método de Mínimos Cuadrados es el método estadístico que se empleará en esta investigación para estimar los parámetros del modelo.

En la práctica, la estimación de la estructura del modelo y de los parámetros es llevado a cabo frecuentemente de una manera interactiva. Esto significa que una determinada estructura es seleccionada y sus correspondientes parámetros son estimados. Seguidamente el modelo es evaluado para ver si éste es una representación adecuada del proceso. Si no es así, una estructura de modelo más

compleja será considerada, sus parámetros nuevamente son estimados, y el nuevo modelo es evaluado o validado [4].

El procedimiento de identificación de un proceso en particular es ilustrado en la Fig. 2.2 y está constituido básicamente por 4 diferentes pasos [1, 3, 4].

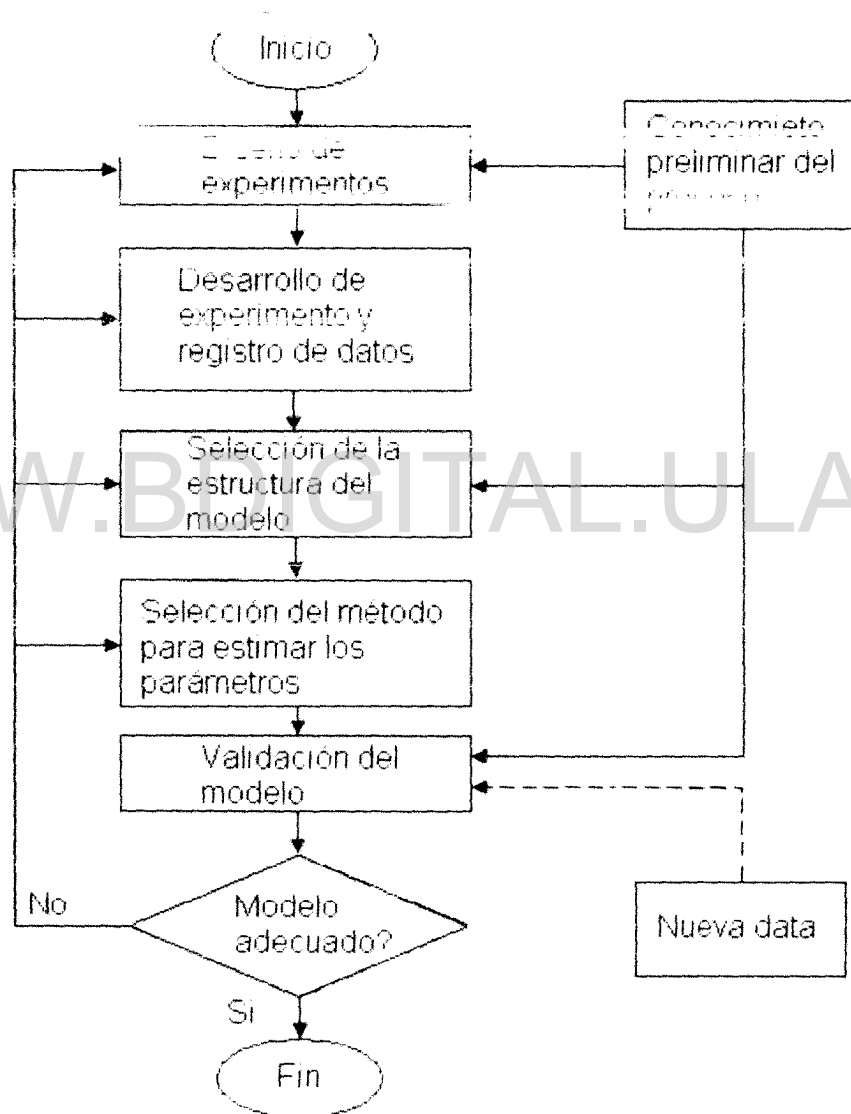


Fig. 2.2 Algoritmo de la Identificación de Sistemas

## Diseño de experimentos y registro de los datos

Esta etapa del procedimiento se centra alrededor del escogencia de la data que mejor describa la respuesta del proceso. Estos datos deben poseer la máxima información posible del proceso y, para eso, se requiere diseñar los experimentos de forma cuidadosa, donde varias decisiones deben ser tomadas en base a cuales entradas y salidas deben ser medidas y cuándo medirlas, así como cuáles señales y de qué manera serán manipuladas (incluyendo la medición de frecuencia). Más aún, las señales son muestreadas usando un intervalo de tiempo constante  $T_s$ , lo cual es una cantidad que ha sido previamente seleccionada. La selección de las señales de entrada posee una influencia sustancial sobre la respuesta observada. Las señales de entrada determinan el punto de operación del sistema y cual parte y modos del sistema son excitados durante el experimento. La libertad del usuario para seleccionar estas características puede variar en función de la aplicación. Por ejemplo, en un proceso industrial, la manipulación total del sistema no es permitido dado a que el sistema posee un modo de producción continuo. En aplicaciones experimentales y durante el desarrollo de las fases de nuevos equipos, la escogencia de las entradas, tal vez, no esta restringida por los requerimientos de producción como en el caso de los procesos industriales.

En cuanto al registro de los datos, esta etapa consiste en recolectar los datos, tanto de entrada como de salida, del proceso para encontrar el modelo matemático que rige el sistema. Estos experimentos suelen realizarse sobre un periodo de tiempo bastante amplio a fin de obtener suficiente información.

## Selección de la estructura del modelo

Basado en una inspección inicial de los datos registrados, un conjunto de modelos candidatos es seleccionado para la posterior evaluación. Estos modelos pueden ser los pertenecientes a una expresión que relacione la entrada y salida (tal como una estructura *ARX*, *ARMAX*, etc.) llamados modelos de caja negra o a los

modelos físicos que han sido derivados a partir de un conocimiento preliminar del proceso. Estos últimos (llamados modelos de caja gris) reflejan las leyes físicas que gobiernan el proceso y que se caracterizan principalmente porque sus parámetros tienen un significado físico. No obstante, los modelos de caja negra tienen parámetros cuyo ajuste conducirá a una representación más precisa de la relación entrada-salida sin considerar el conocimiento físico del proceso. Esta etapa es la más crucial del procedimiento de identificación.

### **Ajuste del modelo seleccionado**

Una vez que un determinado modelo ha sido seleccionado del conjunto, el siguiente paso es evaluarlo, y para ello su desempeño es comparado con los datos registrados que han sido seleccionados para tal fin. Un modelo exitoso debe ser capaz de reproducir los datos como mejor sea posible. En este caso, lo esencial es determinar los parámetros más adecuados del mismo, los cuales le darán la capacidad de desenvolverse satisfactoriamente.

### **Validación del modelo**

La validación constituye el paso final de la identificación y consiste en determinar si se mantiene la equivalencia entre la salida del proceso y la salida del modelo ante situaciones diferentes a las que existían durante el procedimiento que permitió hacer la identificación. En la aplicación de los métodos de identificación lo más natural es confrontar el modelo obtenido con los mismos datos. Todas las técnicas para la validación del modelo están enfocadas en comprobar si el modelo obtenido es lo suficientemente apto. Por tal razón existen algunas técnicas que son convenientes para descartar aquellos modelos que no son los adecuados, pero en general, la técnica más apropiada es el análisis residual.

## 2.5 Aplicación de la Identificación de Sistemas en Hornos Eléctricos

En los últimos 20 años el problema de identificación ha llegado a ser un área esencial de estudio para la teoría de control moderno. El principal esfuerzo en la búsqueda del control se ha extendido al modelado de sistemas lineales y continuos en sus variables de estados, o sistemas muestreados uniformemente. Todo este trabajo ha encontrado un amplio rango de aplicaciones prácticas en procesos industriales y, en menor grado pero de manera significativa, en el control adaptativo en línea.

Investigaciones similares han encontrado importantes aplicaciones en el procesamiento de señales para telecomunicaciones y de radar, donde las técnicas de filtrado adaptativo, basados en la identificación de canales, son ampliamente aplicados en los sistemas comerciales.

Otros trabajos de investigación donde el enfoque principal es el tema de identificación, se han llevado a cabo en diversas universidades. Tal es el caso de Balázs Vödrös *et al* [9] del Departamento de Sistemas de Medición e Información de la Universidad de Tecnología y Económicas, Budapest, Hungría, los cuales desarrollaron la identificación de un horno de laboratorio a partir del registro experimental de las señales de entrada y salida. Como señal excitadora del proceso (señal de entrada) emplearon una secuencia binaria discreta (DIBS) dado que puede ser aproximada a una señal cuadrada pero que posee la ventaja de que los intervalos *on* y *off* varían de periodo en periodo al igual que la longitud de un periodo. Por tanto, el registro experimental de los datos se llevó a cabo en diferentes puntos de operación, ya que se basaron fundamentalmente en que los controladores usados en los hornos industriales operan de forma diferente a distintos rangos de temperatura, lo cual causa que los parámetros, de dichos controladores, tengan que ajustarse específicamente para cada uno de los rangos. De tal forma que haciendo

uso de los métodos de identificación en el dominio frecuencial se enfocó en la obtención de varios modelos discretos del horno de acuerdo al punto de operación alcanzado y en la mejor forma de interpolar entre éstos dependiendo de la temperatura de trabajo deseada. Una vez logrado la interpolación entre los distintos modelos, un método de sintonización fue empleado para hallar los parámetros más adecuados del controlador *PID*.

Adicionalmente a esta investigación, Letsane P. Rathaba [3] miembro del Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Sistemas de la Universidad de Pretoria demostró los grandiosos beneficios de la automatización de un proceso térmico, representado por un horno de arco eléctrico (Electric Arc Furnace), que había sido operado manualmente desde hace mucho tiempo y cuyos resultados muchas veces dejaban imperfecciones por mejorar. Parte de su estudio se centralizó en la implementación de un sistema de control sobre el EAF donde variados factores económicos fueron tomados en cuenta. Sin embargo la principal desventaja de esta implementación fue la falta de un modelo matemático que demostrara ser una representación fiel del comportamiento del proceso térmico y cuya exactitud solo se puede verificar por medio de comparaciones con datos actuales del proceso. En este punto estuvo orientado inicialmente su investigación; en el ajuste de un modelo matemático de simulación existente al proceso real (EAF). El objetivo de esta investigación en particular fue obtener un modelo que fuera capaz de imitar un conjunto seleccionado de datos de salida del proceso a través de la Identificación de Sistemas. El ajuste consistió en la estimación de los parámetros del modelo del EAF ya existente (modelo deducido en investigaciones anteriores) para las diferentes etapas de refinación. Por lo tanto, la contribución de esta investigación fue presentar un modelo obtenido por identificación capaz de representar las distintas etapas de refinación del EAF con una exactitud razonable.

Continuando con las diversas áreas de aplicación de la Identificación de Sistemas, ésta es empleada mayormente en los sistemas térmicos adoptando distintos enfoques. Ejemplo de ello, Garandet *et al* [10] en su trabajo propusieron una

técnica de medición diferencial de resistencia con gran exactitud que permite identificar las características térmicas de un horno durante la etapa inicial de solidificación de líquidos metales y semiconductores. Específicamente esta técnica da la oportunidad de obtener información detallada del fenómeno de transferencia de calor durante esta etapa inicial y, por lo tanto, da la posibilidad de modelar numéricamente la transferencia de calor en el interior del horno eléctrico.

## **2.6 Hornos Eléctricos**

El calentamiento eléctrico en hornos industriales continúa su utilización creciente en competencia con el calentamiento por llamas producidas en la combustión de combustibles sólidos, líquidos y gaseosos. La tecnología del calentamiento por resistencia ha mejorado notablemente en los últimos años, compitiendo, en muchos casos ventajosamente, con el calentamiento por combustión de gas natural, por ejemplo, a pesar del bajo coste de este combustible con la energía eléctrica.

Dentro del calentamiento eléctrico los métodos más frecuentes son: arco, inducción, resistencia óhmica directa de las piezas y resistencias eléctricas; sin considerar los de poco uso a nivel industrial como el plasma, haz de electrones y láser [11]

### **2.6.1 Generalidades**

Se entiende por horno aquellos equipos o dispositivos utilizados en la industria para el calentamiento de piezas o elementos colocados en su interior por encima de la temperatura ambiente. El principio de funcionamiento es extremadamente simple y consiste, esquemáticamente, en una cámara calentada por resistencias eléctricas. Esta cámara, la cual es conocida como cámara de calentamiento u horno, debe ser

aislada para reducir las pérdidas térmicas [12]. El objeto de este calentamiento puede ser muy variado, por lo tanto, a continuación se presentan algunas funciones:

- Fundir.
- Ablandar para una operación de conformado posterior.
- Tratar térmicamente para impartir determinadas propiedades.
- Recubrir las piezas con otros elementos, operación que se facilita frecuentemente operando a temperatura superior a la del ambiente.

El campo de aplicación de los hornos eléctricos es muy extenso dependiendo fundamentalmente de los diferentes tipos de industrias o de las operaciones realizadas con los hornos. Entre tanto tenemos las siguientes:

- Industria Siderúrgica que comprende los hornos altos de reducción, mezcladores, convertidores de acero, hornos de arco, de fusión, etc.;
- Industria del Aluminio con hornos de fusión y mantenimiento, hornos de tratamientos térmicos;
- Industria del Cobre y sus aleaciones con uso de metales no férricos pesados;
- Industria de Automoción que incluyen los de fabricación de vehículos, camiones, motocicletas y bicicletas;
- Fundiciones, tanto de metales férricos como no férricos, entre los cuales: hornos de fusión, hornos de tratamientos térmicos, continuos o intermitentes, de los tipos adecuados a la producción, forma de la pieza, temperatura requerida, etc.;
- Industria de productos manufacturados;
- Industria Química, que incluye la petroquímica y la farmacéutica;
- Industria de la cerámica y del vidrio.

### **2.6.2 Clasificación del calentamiento eléctrico**

El calentamiento de piezas por resistencias eléctricas puede ser directo, cuando la corriente pasa por las piezas, o indirecto, cuando las piezas se calientan

por Radiación, Convección o una combinación de ambas, procedente de las resistencias propiamente dichas dispuestas en las proximidades de las piezas.

El calentamiento por resistencia directa es adecuado para piezas metálicas de gran longitud y sección pequeña y uniforme, tales como barras, palanquillas, varillas, alambres y pletinas. Dado que se obtienen tiempos de calentamiento muy cortos, pueden acoplarse los equipos a la cadena de laminación, forja o conformado en caliente.

En la industria es mucho más frecuente el calentamiento indirecto por resistencias eléctricas. Estas resistencias pueden ser barras, varillas, alambres o pletinas, dispuestos en las paredes de la cámara de calentamiento del horno transmitiendo el calor a las piezas por radiación. También se encuentran paquetes de resistencias de los mismos materiales que transmiten el calor por convección al aire o gases, y de éstos, por convección a las piezas.

La Fig. 2.3 muestra una disposición típica de resistencias de alambres o pletinas en las paredes laterales de un horno para tratamientos térmicos hasta una temperatura máxima de 1.100 °C. Las resistencias de alambres con forma de espiral (ver Fig. 2.4) están basadas también en la Ley de Joule y van dispuestas sobre soportes cerámicos adecuados.

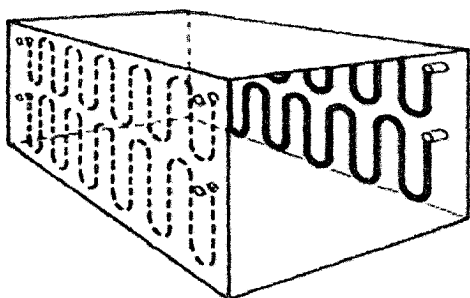


Fig. 2.3 Disposición de resistencias en el interior del horno

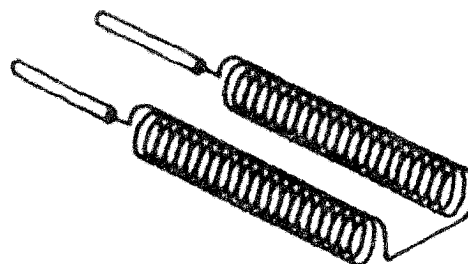


Fig. 2.4 Resistencia de alambre con forma de espiral

La disposición más frecuente de este tipo de resistencias es arrollada en espiral sobre ranuras cerámicas. En la Fig. 2.5 puede observarse varias disposiciones de espirales de alambre en bóveda, pared vertical y solera, sobre módulos de fibra cerámica al vacío y sobre ladrillos o piezas cerámicas densas [11].

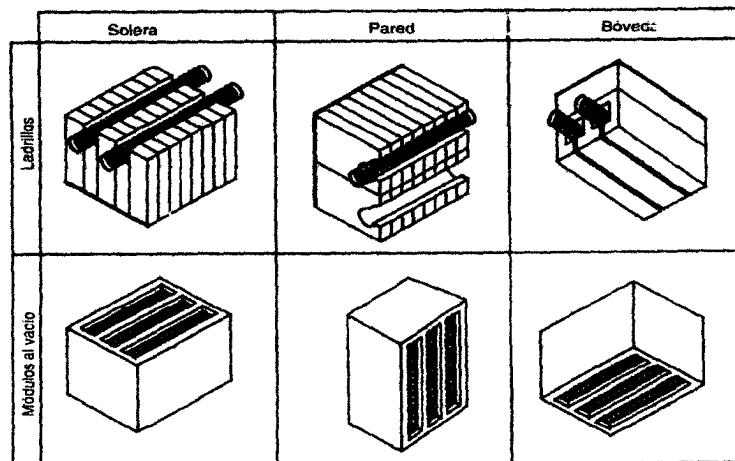


Fig. 2.5 Disposición de las resistencias arrolladas en espiral sobre soportes cerámicos.

## 2.7 Introducción a los Sistemas de Control

En la última década del siglo XX, la sociedad industrializada hace un uso extenso de los sistemas automatizados. Tanto en la vida cotidiana como en la industria, se precisan sistemas de control que regulen magnitudes como la temperatura de una habitación o la concentración de un producto en un reactor químico. Para ello es preciso una adecuada comprensión del sistema a controlar, así como un buen bagaje de conocimientos relativos al análisis y diseño de sistemas de control.

El notable desarrollo de la informática y la electrónica han permitido que los métodos clásicos de diseño surgidos a mediados del siglo pasado, se complementen

con nuevos y potentes procedimientos que, en determinados procesos, resuelven aquellos problemas que la teoría clásica de control dejaba de lado o trataba con poco éxito. Sin embargo, para abordar el estudio de nuevas técnicas de control, es paso obligado el estudio de la teoría clásica, destinada al control de sistemas continuos a partir de su relación entrada-salida.

Continuando con el desarrollo tecnológico que se está presentando en la actualidad, los avances más recientes en la teoría de control moderna están cada día más ondeando en el campo del control óptimo de sistemas, tanto determinísticos como estocásticos, así como en sistemas de control complejos con adaptación y aprendizaje. Ahora que las computadoras digitales se han abaratado y reducido en tamaño, éstas pueden ya utilizarse como parte integral de estos sistemas de control. Por lo tanto, es tanto el abarque de estos avances tecnológicos que se tienen aplicaciones recientes de la teoría de control moderna en áreas no relacionadas con la ingeniería, tal como biología, biomedicina, economía y socioeconomía [13, 14].

## **2.7.1 Principios básicos de diseño de sistemas de control**

### **2.7.1.1 Requisitos generales de los sistemas de control**

Todo sistema de control debe ser estable. Esto es un requisito básico. Además de estabilidad absoluta, un sistema de control debe tener una estabilidad relativa razonable, es decir, la respuesta debe mostrar un amortiguamiento razonable. Así mismo, la velocidad de respuesta debe ser razonablemente rápida, y el sistema de control debe ser capaz de reducir los errores a cero, o a un valor pequeño tolerable. Cualquier sistema de control, para ser útil, debe satisfacer estos requisitos.

El requisito de estabilidad relativa razonable y el de la precisión en estado estacionario tienden a ser incompatibles. Por lo tanto, al diseñar sistemas de control resulta necesario efectuar el mejor compromiso entre estos dos requerimientos.

### **2.7.1.2 Análisis y diseño de sistemas de control**

Para llevar a cabo esta importante tarea se debe conocer de buena manera algunos términos como: análisis, diseño, análisis de respuesta transitoria, entre otros. Por análisis se entiende la investigación del comportamiento de un sistema cuyo modelo matemático se conoce. Por análisis de la respuesta transitoria se entiende generalmente la determinación de la respuesta de un proceso a señales y perturbaciones de entrada. Por análisis de la respuesta en estado estable o estacionario significa la determinación de la respuesta tras la desaparición de la respuesta transitoria.

En el diseño de un sistema se debe tratar de buscar un sistema que satisfaga una tarea dada. Si las características de respuesta dinámica y/o de estado estacionario no son satisfactorias, se debe agregar un compensador al sistema, cuyo diseño no es realizado de forma directa, sino que requiere procedimientos de tanteo.

Dado al gran auge de las computadoras digitales, el análisis, diseño y operación de sistemas de control se han facilitado ya que todos los cálculos necesarios para poder simular los componentes de un sistema o un proceso o para controlar un proceso lo realizan estas poderosas herramientas. Es tanto así, que muchas ecuaciones que se desarrollan para describir los procesos son de naturaleza no lineal y, en consecuencia, la manera más exacta de resolverlas es mediante métodos numéricos, es decir, solución por computadora [15]. De tal manera, el control por computadora ha llegado a ser de uso común, y muchos sistemas de control industrial como por ejemplo, control de vuelo, sistemas de control de robot, entre otros, utilizan controladores digitales.

### **2.7.2 Acciones básicas de control**

Cualquier controlador automático compara el valor real de la salida de una planta o proceso con la entrada de referencia (valor deseado), determina el error, y

produce una señal de control que reducirá el error a cero, o a un valor pequeño. La forma como el controlador automático produce la señal de control, se denomina acción de control.

### **2.7.2.1 Clasificación de controladores industriales analógicos**

Los controladores industriales analógicos se pueden clasificar de acuerdo con sus acciones de control, de la siguiente forma:

1. Controladores de dos posiciones, o intermitente (encendido-apagado)
2. Controladores proporcionales
3. Controladores integrales
4. Controladores proporcional-integral
5. Controladores proporcional-derivativo
6. Controladores tipo proporcional-integral-derivativo

La mayoría de los controladores analógicos industriales utilizan electricidad o algún fluido, como aceite o aire a presión, a modos de fuentes de potencia. La clase de controlador a usar se decidirá en base a la naturaleza de la planta y las condiciones de operación, incluyendo consideraciones tales como seguridad, disponibilidad, confiabilidad, exactitud, peso y tamaño. [2]

En esta sección solo se abordará el controlador de tipo proporcional, integral, derivativo (*PID*), por medio de la ecuación que describe su operación, dado que será tomado en cuenta para el desarrollo del trabajo en los capítulos siguientes.

### **2.7.2.2 Controlador Proporcional-Integral-Derivativo**

La combinación de los efectos de acción proporcional, integral y derivativa, se denomina acción de control *PID*. Esta combinación tiene las ventajas de cada una de

cerrado. Para ajustar los controladores a varios criterios de respuesta se han introducido diversos procedimientos y formulas de ajuste.

Los valores de los parámetros de ajuste dependen de la respuesta de circuito cerrado que se desea, así como de las características dinámicas de otros elementos del circuito de control y, particularmente, del proceso. Es de conocer que si un proceso es no lineal, como generalmente ocurre en la mayoría, estas características cambian de un punto de operación a otro, lo cual significa que un conjunto de parámetros de ajuste puede producir la respuesta que se desea únicamente en un punto de operación, debido a que los controladores con retroalimentación son dispositivos básicamente lineales. A continuación se menciona el procedimiento para ajustar los controladores industriales de tipo *PID* que se basa en un método propuesto por Ziegler & Nichols en el año de 1.942 [15].

### **2.7.3.1 Método de respuesta de razón de un cuarto.**

Para la aplicación de este método, primero, se debe caracterizar el proceso mediante un modelo simple de primer orden con tiempo muerto (*POMTM*). Este modelo es en el que se basan la mayoría de las formulas de ajuste de controladores. En este modelo el proceso se caracteriza mediante tres parámetros a saber: la ganancia  $K$ , el tiempo muerto  $t_0$ , y la constante de tiempo  $\tau$ . De modo que el problema consiste en la manera en que se puedan determinar dichos parámetros para un circuito en particular. La solución consiste en realizar algunas pruebas dinámicas en el sistema real y la simulación del circuito por computadora y para ello, la prueba más sencilla consiste en suministrar una señal de entrada al proceso en forma de escalón. Una vez introducida la señal de prueba y obtenida la respuesta del sistema, mejor conocida como curva de reacción del proceso o respuesta en forma de  $S$ , se determinan los parámetros del modelo.

Una vez conocidos los parámetros  $K$ ,  $\tau$  y  $t_0$  del modelo *POMTM*, se procede a utilizar un conjunto de formulas que se basan en éstos, en un modelo de primer

orden y en la curva de reacción del proceso. Estas formulas se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 2.1 Formulas para el ajuste de controladores en base a la respuesta de asentamiento de un cuarto.

Controlador tipo	Ganancia proporcional $K_c$	Tiempo de integración $\tau_i$	Tiempo de derivación $\tau_d$
Proporcional-Integral-Derivativo (PID)	$\frac{1,2}{K} \left( \frac{t_0}{\tau} \right)^{-1}$	$2,0 t_0$	$\frac{1}{2} t_0$

## 2.8 Aplicaciones de Control en Hornos Eléctricos

El control de tipo Proporcional, Integral, Derivativo (*PID*) es usado ampliamente a nivel industrial, de hecho, sería difícil encontrar algún lazo de control que no utilice cierta variante de esta estrategia de control. En esta sección ilustraremos como los controladores *PID* pueden ser usados en aplicaciones prácticas examinando brevemente algunos trabajos de investigación.

El primero de ellos se desarrollo sobre un horno eléctrico industrial para fundición de mineral y se basó principalmente en el reemplazo de un sistema de control analógico por un sistema de control digital operando sobre un Computador Industrial 386 y un Controlador Lógico Programable (*PLC*). El sistema de control digital comprende una estrategia de control *PID* por software de la potencia del horno eléctrico y un control, a través del *PLC*, de la temperatura del interior del horno y del sistema de alimentación de material. De esta forma G. Dosa *et al* [17], realizaron comparaciones entre sistema de control de potencia tanto analógico como digital y, de igual manera, con el sistema de control de temperatura. Los resultados de comparación mostraron un excelente desempeño del sistema de control digital en cuanto a una regulación precisa de la potencia del horno y de una temperatura uniforme en la cámara del mismo durante un proceso de fundición de mineral.

Una segunda investigación fue desarrollada por Benoit Boulet *et al* [18] y estuvo centrada, primero, en la deducción de un modelo matemático de un horno de arco eléctrico usado en aplicaciones industriales de procesamiento de acero y fundición de metales no ferrosos, así como también en la producción de acero a partir de los residuos de otros procesos, mediante el uso de leyes físicas; segundo, en la simulación del modelo a lazo abierto para estudiar y analizar el comportamiento del sistema dinámico ante variaciones en las posiciones de los electrodos y, finalmente, en la implementación de un sistema a lazo cerrado basado en un controlador *PID*, cuya salida se encarga en ajustar adecuadamente los actuadores hidráulicos y en consecuencia, un nuevo valor de resistencia es fijado, el cual producirá un nuevo valor de corriente que es alimentado al horno de arco eléctrico; valor que convergerá posteriormente al valor configurado como referencia. En definitiva, las simulaciones demostraron que haciendo uso solamente de un controlador tipo *P* se logran buenos resultados, pero si se añaden progresivamente valores a los dos parámetros restantes del controlador (*I*, *D*), la respuesta del horno de arco eléctrico mejora considerablemente.

Por su parte Bill Gough y Don Matovich [19] realizaron un estudio de comparación entre una estrategia de control *PID* y una estrategia de control predictivo-adaptativo de la temperatura de la cámara de un horno industrial de calentamiento por combustión de gas y empleado para el procesamiento de vidrio. En base a sus resultados concluyeron que los controladores *PID* no son los más adecuados para este tipo de proceso dado a las excesivas fluctuaciones de temperatura que experimenta el vidrio debido a sus propiedades físicas y, a los altos tiempos de respuesta del lazo de control, combinado con cambios repentinos en la línea de producción. Por su parte, la estrategia basada en un control predictivo-adaptativo fue capaz de reducir los tiempos de ajuste de temperatura, después de un cambio en el setpoint o de un cambio en la rata de producción, de periodos entre 4 a 6 horas a periodos entre 2 a 3 horas. Además este control disminuye significativamente los materiales de desechos, así como también reduce las tareas de mantenimiento y resintonización de controladores.

## CAPÍTULO III

### MODELADO DEL PROCESO TÉRMICO

#### Introducción

Este capítulo presenta en su primera parte una descripción del horno de calentamiento eléctrico sobre el cual se realiza el procedimiento de identificación así como la metodología utilizada para la recolección de los datos del proceso (voltaje/temperatura).

También se presenta el desarrollo de la programación para la generación, adquisición, registro, análisis y presentación de la data experimental que posteriormente se empleó para deducir el modelo matemático del horno eléctrico mediante la aplicación del método de identificación paramétrico. Finalmente todos los resultados, tanto experimentales como de simulación, son mostrados y analizados al culminar cada sección.

#### 3.1 Descripción del Equipo

El proceso térmico seleccionado para el desarrollo de este trabajo es un horno de la casa fabricante THETA Modelo DILAMATIC I y adquirido en el año de 1.977, ubicado en el Laboratorio de Metalografía y Tratamientos Térmicos (LMTT) perteneciente a la Escuela de Ingeniería Mecánica de la facultad de Ingeniería de la Universidad de los Andes, Mérida-Venezuela. Este equipo es empleado para el estudio de las Dilataciones Térmicas que experimenta una pieza de acero o aluminio sometida a un determinado perfil de calentamiento que puede alcanzar, en la mayoría de los casos, los 900 °C. Estos estudios son de gran importancia para la determinación de nuevas aleaciones, además son necesarios para la enseñanza-aprendizaje de los estudiantes que cursan la carrera de Ingeniería Mecánica.

Tal como se mencionó en la sección 2.1 del capítulo anterior, el horno tiene en su interior varias resistencias de alambre arrolladas en forma de espiral dispuestas sobre ranuras de cerámica [11]. Este horno está conectado a una fuente de alimentación de 110 Voltios (ac) y posee un rango de operación que va desde temperatura ambiente hasta una temperatura máxima de 1.200 °C. En la figura siguiente puede observarse la disposición de las resistencias eléctricas en la parte interior del horno.

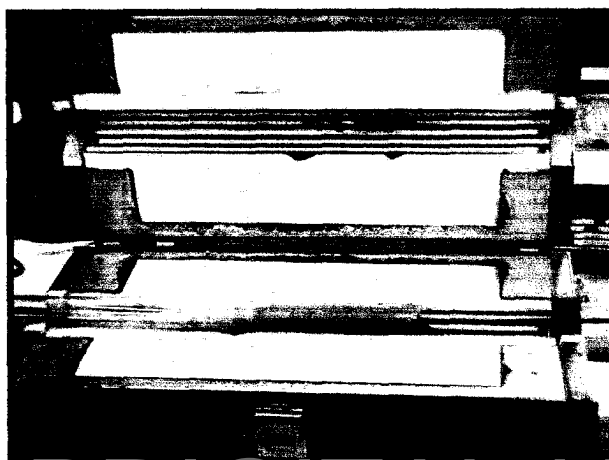


Fig. 3.1 Vista interior del Horno Eléctrico

El equipo se encuentra en su forma original, es decir, cuenta con un medidor de temperatura analógico con un rango de medición de 0 °C a 1200 °C y, se encuentra localizado en la parte frontal del mismo, igualmente se encuentra una perilla con 6 diferentes posiciones de encendido incluyendo la posición de apagado (off) y la posición de encendido continuo (high). Una característica esencial que tiene el horno es que en cualquiera de las posiciones intermedias que posee la perilla, la señal de entrada (señal de voltaje) se comporta como una señal en forma de tren de pulsos.

Ahora bien, la función específica de cada una de las posiciones intermedias es manipular el ancho de los pulsos de encendido, en otras palabras, ajustar el tiempo máximo que el horno puede permanecer encendido, de forma tal que este tiempo puede ir desde un intervalo máximo de 42 segundos hasta un intervalo mínimo de 12 segundos. Debido a que cada una de las posiciones intermedias tiene una duración

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela  
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

de encendido de los pulsos distinta, el horno logra alcanzar diferentes curvas de calentamiento y por ende, variados puntos de operación. Es decir, la temperatura máxima que alcanza el horno se va incrementando a medida que se va aumentando la posición de la perilla hasta la posición máxima. Otra característica que es importante mencionar es que, independientemente de cualquier posición intermedia, el ancho entre cada pulso de encendido o visto como el periodo de tiempo que el horno eléctrico puede permanecer apagado es constante (5 segundos de intervalo entre cada pulso de encendido). Estas características que presenta la señal de alimentación del horno eléctrico nos indica la forma que debe tener la señal de entrada para efectos del proceso de identificación.

Adicionalmente al medidor de temperatura y a la perilla de encendido, el equipo cuenta con un medidor analógico para visualizar las dilataciones térmicas que experimenta la probeta en función de la temperatura. Este medidor se encuentra conectado a la muestra en estudio a través de un tubo cilíndrico de vidrio que se introduce en el interior de la cámara del horno. La Fig. 3.2 ilustra el equipo en su estado original.

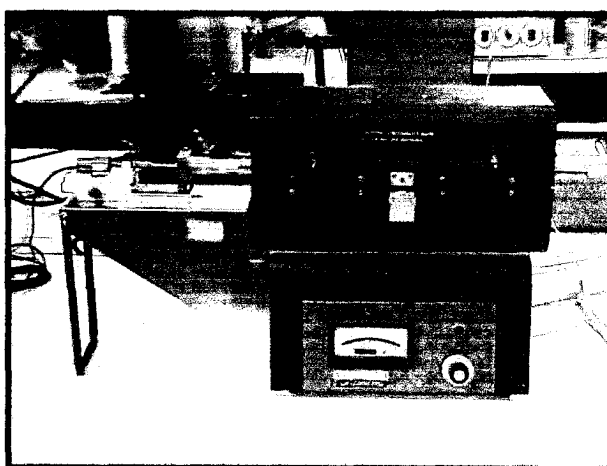


Fig. 3.2 Vista frontal del horno eléctrico para ensayos de Dilatación Térmica.

### 3.2 Metodología para el modelado del Proceso Térmico

Como se ha señalado anteriormente los Sistemas de Identificación fueron aplicados al horno eléctrico de ensayos de dilataciones térmicas, básicamente un

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela  
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

método de identificación paramétrico, mediante el ajuste de un modelo *ARX* al registro experimental de la entrada/salida (voltaje/temperatura) del proceso térmico. Es de acotar que la variable de interés, considerada como variable de salida, es la temperatura de la cámara del interior del horno, ya que otra variable presente en el proceso es la temperatura que experimenta la probeta. Dado a que las dilataciones que experimentará la pieza son estrictamente función de la temperatura de la cámara, controlar esta variable es nuestro principal objetivo.

Por lo tanto, la importancia de la obtención del modelo matemático del proceso térmico, representado por una ecuación diferencial lineal, es debido a que como se desea implementar una estrategia de control *PID* sobre la temperatura de la cámara, es necesario tener un modelo del sistema para poder, así, realizar las respectivas simulaciones del modelo junto con la estrategia de control propuesta. Todo este procedimiento se realiza con la intención primero de determinar los parámetros más óptimos del controlador y, segundo, para diseñar y analizar el comportamiento del lazo de control que se implementará en el capítulo subsiguiente.

Dando inicio al algoritmo de identificación descrito en la sección 2.4 del Capítulo II, las dos primeras etapas son desarrolladas y detalladas a continuación y éstas, fundamentalmente, tienen como finalidad lograr almacenar toda la información necesaria del proceso, comportamiento que sucesivamente será utilizado para ajustar el modelo paramétrico.

El diseño de los experimentos es la etapa inicial del procedimiento de identificación y dentro de ésta debe darse solución a varias cuestiones como por ejemplo; primero, la señal que será medida, en nuestro caso, es la temperatura en el interior del horno eléctrico (cámara del horno) dado que es la variable de mayor importancia para nuestro estudio, la cual es responsable de las dilataciones térmicas que experimenta la pieza de acero o aluminio; segundo, la señal que será manipulada, para nuestro interés, es el voltaje de alimentación del horno, motivado a que la temperatura es estrictamente función del voltaje suministrado. Otra cuestión

que hay que solucionar es cómo serán medidas estas señales pero, por los momentos, esta interrogante no será detallada, dado que en la siguiente sección será abordada con detalles.

Ahora bien, tal como se mencionó en la sección 3.1, la señal de alimentación del proceso es una señal de voltaje en forma de tren de pulsos con una amplitud de 110 V (ac), pero para efectos de identificación, la señal debe tener la característica de que la duración de cada pulso de encendido, al igual que la duración en la cual el horno permanece apagado (ancho entre cada pulso), son aleatorios, ya que, tal como lo expresa [1], la señal de excitación adecuada para la aplicación de los métodos de identificación debe ser una señal aleatoria. La importancia de la selección del tipo de señal de entrada es porque ésta posee una influencia sustancial sobre la respuesta del proceso ya que determina el punto de operación que alcanzará el sistema después de cierto periodo de tiempo.

Para generar una señal que cumpla con este comportamiento se construye un programa que ejecuta dos funciones primordiales, una función es determinar la duración de los tiempos de encendido y de apagado de forma aleatoria a través del uso de la librería de *generación de señales* que el software trae integrado y, así, obtener la señal de alimentación en forma de tren de pulsos y, una segunda función, es adquirir y registrar en forma simultánea la temperatura del interior de la cámara del horno y la señal de entrada. El algoritmo del programa mencionado es representado en la Fig. 3.3 y en él se ilustran las funciones que deben ejecutarse para alcanzar el registro total de los datos entrada/salida del proceso.

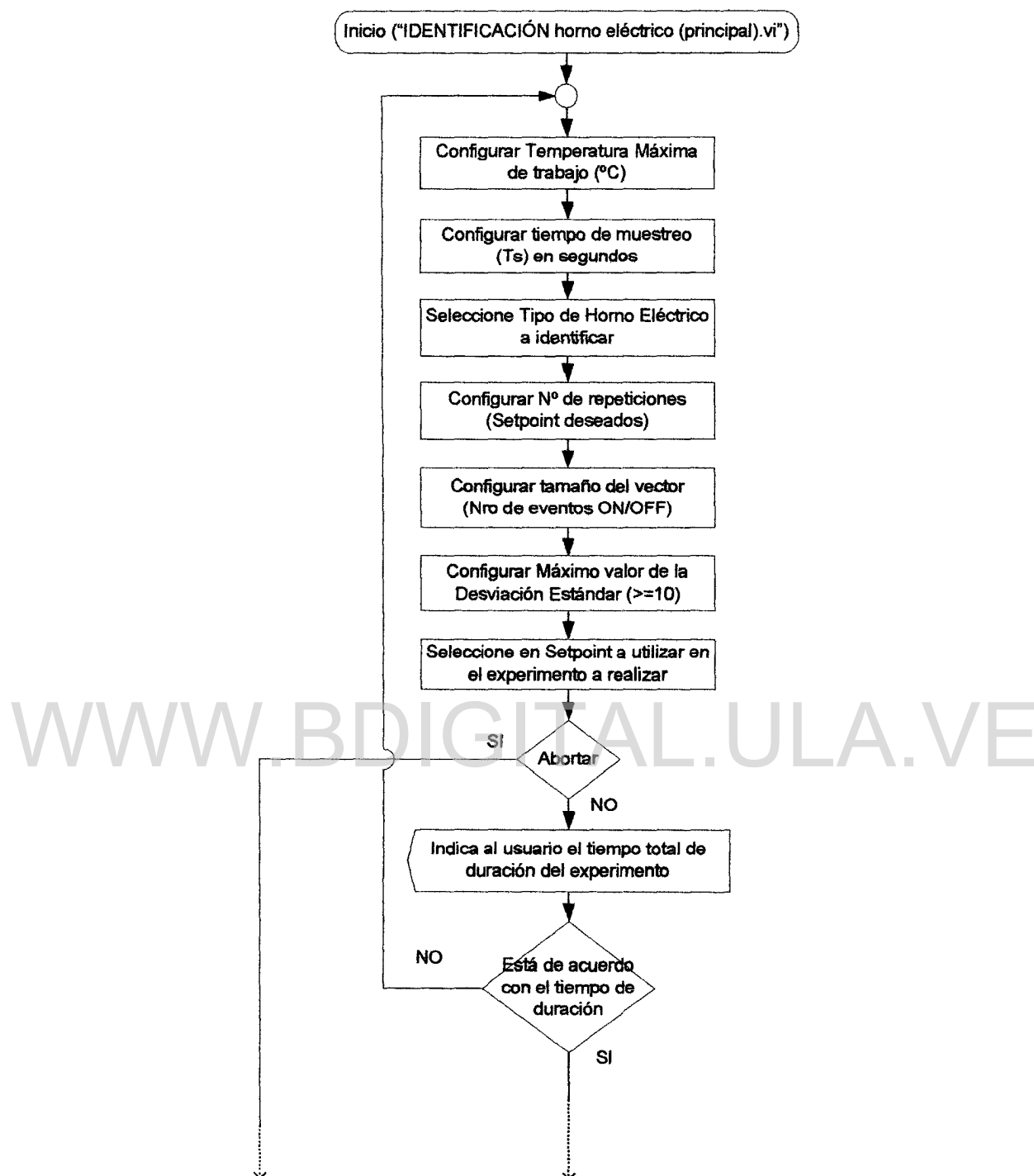


Fig. 3.3 Algoritmo para la adquisición de la temperatura del horno eléctrico

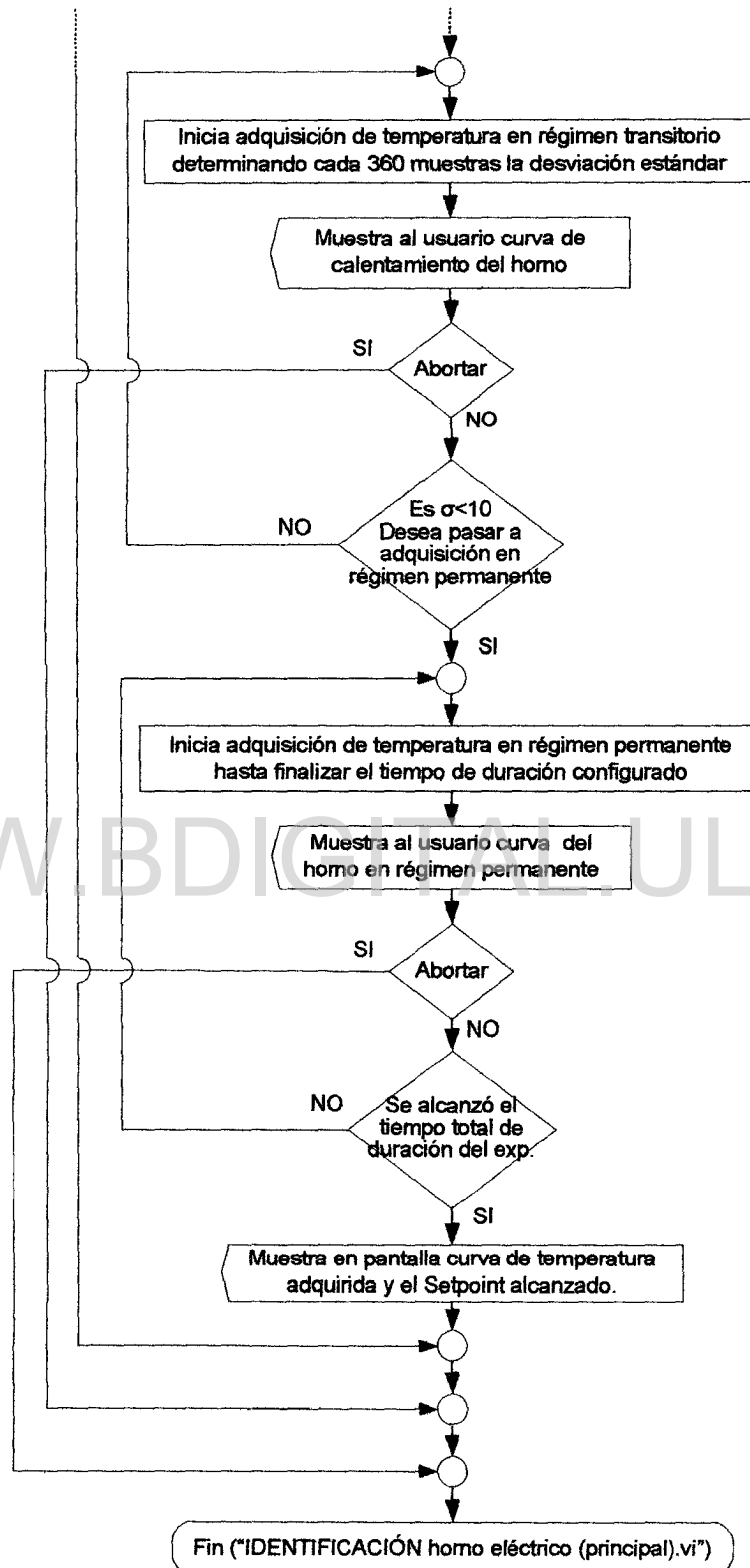


Fig. 3.3 Algoritmo para la adquisición de la temperatura del horno eléctrico  
(continuación)

Recordando nuevamente la etapa de adquisición y registro de los datos, ésta es una de las fases del procedimiento de identificación en la cual se procede a hacer el registro o la recolección completa de los datos tanto de la señal de entrada (señal en forma de tren de pulsos) o señal excitadora, así como de la señal de salida, conocida también como respuesta del sistema, representada por la temperatura del interior del horno.

Una vez obtenida toda la información necesaria del proceso térmico, se continúa con la siguiente fase del algoritmo de identificación; fase que es crucial en el procedimiento de la Identificación de Sistemas. Ésta tiene como propósito seleccionar un determinado modelo que, posteriormente, será ajustado a los datos registrados en las dos primeras fases ya señaladas.

Para el desarrollo de la presente investigación y de acuerdo a los objetivos planteados al inicio de la misma, la expresión que relaciona la entrada y salida del proceso térmico seleccionada es una estructura de modelo *ARX*, representado por la siguiente expresión matemática:

$$\hat{y}(t) = \frac{B(q^{-1})}{A(q^{-1})} u(t) + \frac{1}{A(q^{-1})} e(t) \quad (3.1)$$

donde  $\hat{y}(t)$  es la salida estimada por el modelo en unidades de °C;  $u(t)$  es la señal de entrada o señal de alimentación en Voltios (V);  $e(t)$  es la señal de error;  $q^{-1}$  es el operador de retraso y  $A(q^{-1})$  y  $B(q^{-1})$  son polinomios dados por:

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1 q^{-1} + a_2 q^{-2} + \dots + a_{n_a} q^{-n_a} \quad (3.2)$$

$$B(q^{-1}) = b_1 q^{-1} + b_2 q^{-2} + \dots + b_{n_b} q^{-n_b} \quad (3.3)$$

y cuyos coeficientes están designados como:

$$[a_1 a_2 \dots a_{n_a} \quad b_1 b_2 \dots b_{n_b}] \quad (3.4)$$

En la Ec. (3.2) y la Ec. (3.3) puede observarse que dependiendo del orden ( $n_a$ ,  $n_b$ ) que se establezca para los polinomios, se establece de igual manera el orden del modelo, sin embargo, hay que tener en cuenta que el orden del polinomio  $A(q)$  debe ser mayor o igual al orden del polinomio  $B(q)$ , debido que el denominador común de la Ec. (3.1) determina el orden.

En base a lo señalado en el párrafo anterior se ha decidido realizar el ajuste del modelo a la data experimental estableciendo varios ordenes del polinomio  $A(q)$  que comprenden desde un orden 1 hasta un orden 7, con la finalidad de poder observar, comparar y analizar el respectivo comportamiento de cada modelo  $ARX$ . Ahora bien, en cuanto a los coeficientes del modelo (Ec. (3.4)), éstos son calculados mediante el uso de un método estadístico, específicamente el Método de Mínimos Cuadrados.

Antes de abordar la siguiente fase se debe primero hacer mención a que la respuesta del sistema está compuesta por dos segmentos: un segmento correspondiente al régimen transitorio, y otro, correspondiente al régimen permanente, donde la temperatura del proceso generalmente se mantiene oscilando alrededor de un punto de operación en particular. Generalmente este último segmento (comportamiento en régimen permanente) es dividido en dos partes, donde la primera de éstas es empleada para llevar a cabo el proceso de identificación y, la otra restante, es usada para la fase de validación del modelo obtenido. El procedimiento de cómo seleccionar estas dos partes es, básicamente, subjetivo y se tendrá que confiar más en la intuición y en el conocimiento que se tenga de antemano del proceso en estudio. De igual forma este procedimiento debe ser necesariamente aplicado a la señal de voltaje registrada en la fase de recolección de datos.

Seguidamente para desarrollar la fase concerniente al ajuste del modelo seleccionado se debe en primer término preprocesar o normalizar el segmento de la respuesta en régimen permanente seleccionado para el proceso de identificación y el correspondiente segmento de la señal de entrada, ya que tal como se tienen no es recomendable emplearlas en el procedimiento de identificación dado que, por un lado, no aporta la información necesaria del proceso como tal y, por otro, las señales deben tener una media igual a cero para poder garantizar buenos resultados. A este conjunto de datos no procesados se les conocen como data en bruto. Adicionalmente, puede existir la posibilidad de presentarse pérdidas de datos, interrupciones al momento del almacenamiento de la información, desplazamientos o perturbaciones de bajas frecuencias, durante la realización del experimento y que son corregidos, de igual manera, en esta fase del procedimiento.

Ya ubicado el desarrollo de la investigación en este nivel del procedimiento de identificación, sólo restaría desarrollar la última fase del algoritmo, la cual corresponde a la validación del modelo para determinar la equivalencia entre la salida real del proceso y la salida estimada por éste. Para el progreso de esta fase primero se reproduce la misma señal de alimentación que se utilizó en las dos primeras fases del algoritmo de identificación; señal que posteriormente es empleada como señal de entrada al modelo del proceso térmico y, segundo, se calcula el grado de equivalencia mediante el uso de los criterios de error de integración mínimo representado por el criterio *ICE* (Integral del Cuadrado del Error) [15]. Este criterio de error viene expresado por la siguiente ecuación:

$$ICE = \int_0^x e^2(t) dt \quad (3.5)$$

donde  $e(t)$  es el error o diferencia entre las dos señales de salidas en un tiempo  $t$ , es decir:

$$e(t) = y(t) - \hat{y}(t) \quad (3.6)$$

Detallada la metodología para la identificación del proceso térmico, a continuación se describen todos aquellos elementos que son necesarios para adquirir experimentalmente toda la data referente al horno eléctrico, así como el programa diseñado para tal fin.

### **3.3 Implementación a nivel experimental de la metodología**

Para desarrollar el procedimiento de identificación sobre el proceso térmico representado por el horno eléctrico se han seleccionado una serie de dispositivos que, integrados de cierta manera, permitirán el diseño, ejecución y registro de toda la data del proceso necesaria para aplicar el método de identificación. Además se clarifica el programa diseñado para realizar la captura de las señales de manera automática así como las pantallas y distintos controles e indicadores que se deberán modificar, documentar, controlar u observar a medida que se ejecuta el mismo.

#### **3.3.1 Instrumentación**

La instrumentación requerida para la adquisición digital de la temperatura del interior del horno, así como de la señal de voltaje en forma de tren de pulsos esta conformada por un computador personal, la tarjeta de adquisición de datos de la casa fabricante National Instruments, un relé de estado sólido, el transductor de temperatura y un amplificador para termocupla tipo K disponible en el mercado comercial.

En la Fig. 3.4 se pueden observar los dispositivos que integran el lazo de generación y adquisición de las señales implicadas en el proceso térmico.

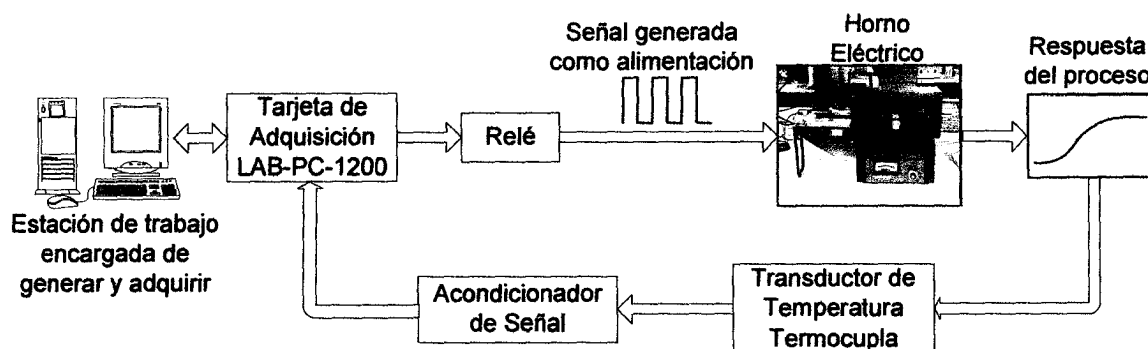


Fig. 3.4 Instrumentación implementada

## Computador personal

La estación de trabajo encargada de generar, adquirir, almacenar, analizar y presentar gráficamente las señales involucradas en el proceso térmico es un computador personal de 1.1 GHz de velocidad de procesamiento, 256 MB de memoria RAM disponible en el recinto de trabajo.

## Tarjeta de adquisición de datos

Para hacer posible la interacción de datos entre la estación de trabajo y proceso térmico, se selecciona una tarjeta de adquisición conversora analógico-digital modelo Lab-PC-1200 de la casa fabricante National Instruments por estar disponible inmediatamente en el laboratorio donde se desarrolla el trabajo de investigación.

Esta tarjeta posee las siguientes características: 8 entradas analógicas (4 en modo diferencial) seleccionadas por software, conversión A/D y D/A por aproximaciones sucesivas, resolución de conversión de 12 bits (1:4096), 24 líneas I/O digitales y 100 kS/s de velocidad de muestreo [20]. Una importante ventaja de esta tarjeta es su bajo costo y con una tasa de adquisición de datos considerable. En el anexo A se presenta una descripción más detallada de la tarjeta de adquisición.

## Relé de estado sólido

El elemento encargado de generar los pulsos de encendidos de la señal de alimentación del horno es un relé de estado sólido constituido básicamente por un triac y un circuito de disparo por detección de cruce por cero. Este elemento posee una señal de salida para efectos de control de 0 a 20 V (dc); un valor mínimo de abertura de 4 V (dc); una señal de potencia de 0 a 220 V (ac), y una máxima corriente de carga de 25 A. La Fig. 3.5 ilustra el circuito eléctrico del relé de estado sólido.

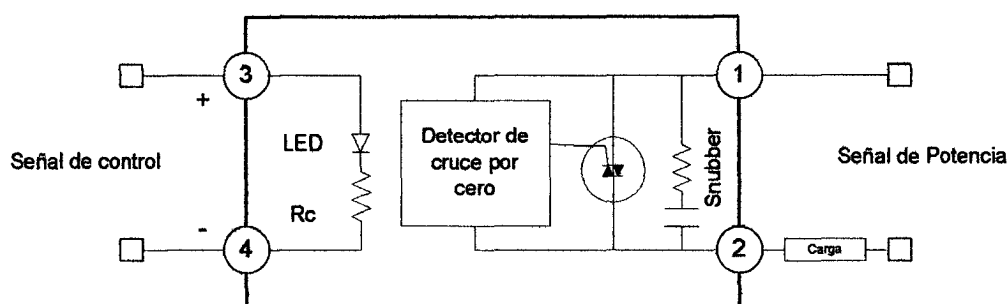


Fig. 3.5 Circuito eléctrico del Relé de Estado Sólido

## Transductor de temperatura

El transductor de temperatura es una termocupla tipo K disponible en el LMTT, y ha sido seleccionado dado que es el transductor más frecuentemente usado en este tipo de procesos. Además la selección de la termocupla se debe a que son bastantes robustas y que pueden operar en un rango de temperatura muy extenso.

Como se sabe la termocupla tipo K esta formada por dos metales diferentes unidos en un punto en el cual se produce un pequeño circuito abierto de voltaje y que es función de la temperatura del proceso. Este voltaje termoeléctrico se conoce como voltaje de Seebeck en honor a Thomas Seebeck, quien descubriera este fenómeno en el año de 1.821. El voltaje producido por la termocupla es no lineal con respecto a

la temperatura, sin embargo para cambios muy pequeños en la temperatura, el voltaje puede ser considerado aproximadamente lineal. El rango de la termocupla tipo K, tanto de temperatura como de voltaje, se ilustra en la siguiente tabla.

Tabla 3.1 Voltaje máximo de salida para termocupla Tipo K

Termocupla	Conductor		Rango de temperatura (°C)	Rango de Voltaje (mV)	Coeficiente Seebeck ( $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ )
	Positivo	Negativo			
		Chromel	Alumen	-270 a 1.372	-6,548 a 54,874

### Amplificador de termocupla

Es muy frecuente que durante el registro de la temperatura de un proceso térmico mediante el uso directo de una tarjeta de adquisición se presente el acoplamiento de ciertos ruidos externos o de voltajes parásitos a la señal proveniente del transductor como consecuencia de los bajos niveles de voltajes que se tienen a la entrada de la tarjeta.

Para minimizar este inconveniente se emplea un circuito amplificador o un circuito de acondicionamiento de señal, representado por el integrado AD595. Este integrado es un dispositivo amplificador monolítico especialmente para termocuplas tipo K [21].

El AD595 es un amplificador de instrumentación completo, además de poseer un chip monolítico para la compensación de la unión de referencia, ya que combinando la referencia del punto frío con un amplificador precalibrado produce un nivel alto de salida de  $10 \text{ mV}/^\circ\text{C}$  directamente desde la señal de la termocupla. La Fig. 3.6 ilustra el diagrama de conexiones del AD595 para ser alimentado con una fuente de  $+15 \text{ V (dc)}$ .



dividido por  $40,44 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ). Adicionalmente, un ajuste en la exactitud absoluta induce un desplazamiento en la entrada que produce una salida en el amplificador de  $11 \mu\text{V}$  y, por lo tanto, este desplazamiento se eleva dado que el AD595 se ajusta para proporcionar una salida de  $250 \text{ mV}$  cuando es aplicada una temperatura de  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  a la termocupla tipo K.

Debido a que el voltaje de salida de la termocupla no es lineal con respecto a la temperatura, el AD595 amplifica linealmente la señal compensada. Por consiguiente; las expresiones dadas a continuación deben ser utilizadas para determinar el voltaje de salida del AD595:

$$AD595_{output} = (\text{Voltaje}_{\text{Termocupla}} + 11\mu\text{V}) \times 247,3 \quad (3.7)$$

o inversamente

$$\text{Voltaje}_{\text{Termocupla}} = (AD595_{output} / 247,3) - 11\mu\text{V} \quad (3.8)$$

En el anexo B se listan los voltajes de salida ideales para el AD595 en función de la temperatura en  $^\circ\text{C}$  proveniente de la termocupla tipo K bajo las normas ANSI con la unión de referencia a  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### 3.3.2. Software

La elaboración del programa, el cual se encarga de generar y adquirir las señales involucradas en el proceso térmico (voltaje y temperatura respectivamente), se hizo mediante el software LabVIEW® (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) de la casa fabricante National Instruments, uno de los más difundidos para aplicaciones de instrumentación virtual y que esta basado en el lenguaje de programación G para facilitar la interacción hombre-máquina y orientado particularmente a la adquisición de datos.

La particularidad del lenguaje G consiste en la posibilidad de programar gráficamente a partir de la asociación de objetos denominados módulos VI (virtual instruments), reduciendo considerablemente los tiempos de desarrollo para lograr la adquisición, control, análisis y presentación de datos [22].

A continuación se presenta el programa encargado de generar la señal de entrada en forma de tren de pulsos y de adquirir la respuesta del proceso térmico. Adicionalmente se explican las funciones más importantes utilizadas en la elaboración del mismo.

### **3.4 Descripción del programa encargado de generar, adquirir, registrar, analizar y presentar la data del proceso**

Se diseñó un programa mediante el uso del lenguaje de programación G con el cual se alcanzó crear una interfaz hombre-máquina amigable, ya que se demuestra la versatilidad de este interesante lenguaje. En general, el programa consta de tres pantallas, las cuales se activan a medida que el usuario así lo desee. Seguidamente se detallan las pantallas del programa elaborado:

#### **3.4.1 Pantalla de presentación:**

Al ejecutar el programa "*Presentación1*", se muestra la pantalla de inicio, el cual espera a que el usuario confirme el inicio de la generación de la señal de entrada y la adquisición de la temperatura (Fig. 3.7). En esta pantalla podemos visualizar los siguientes datos de interés:

- Una fotografía del horno eléctrico para ensayos de dilatación térmica.
- Identificación del laboratorio donde se realiza el trabajo de investigación.
- Se detalla el objetivo principal del programa elaborado para la etapa de identificación.

- Se identifica la persona responsable de la elaboración del programa.
- Se visualizan dos botones de control que poseen las siguientes funciones: el primero encargado de abortar la ejecución del programa cuando el usuario así lo desee y el segundo, encargado de dar inicio al programa de generación y adquisición de datos del proceso.

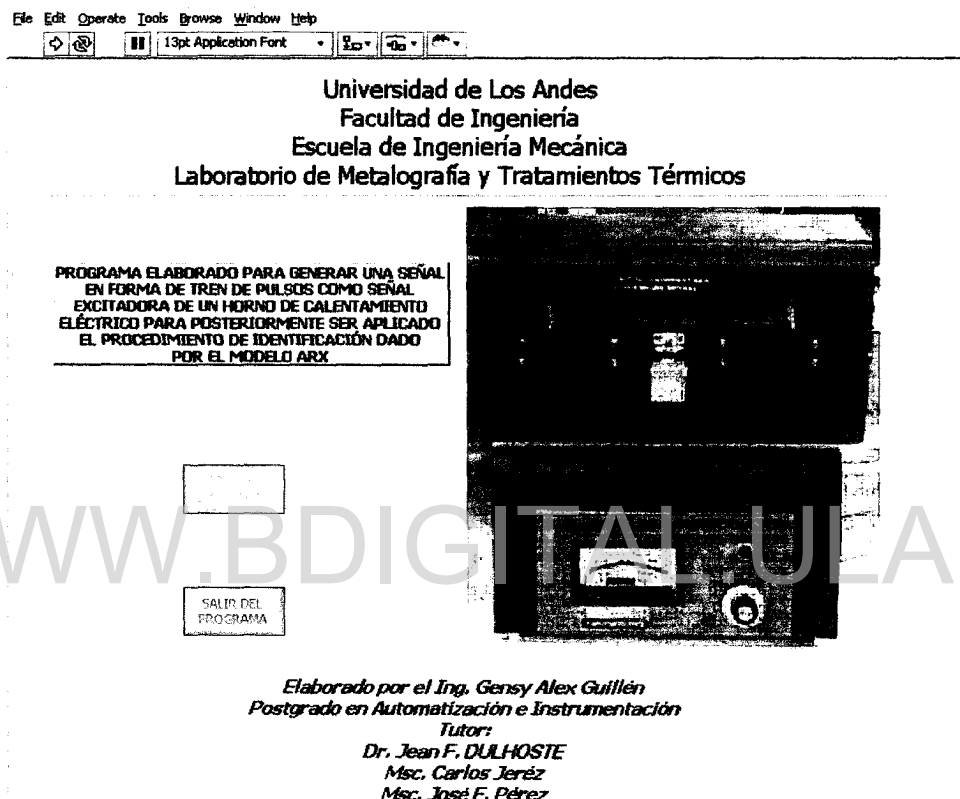


Fig. 3.7 Pantalla de presentación del programa.

### 3.4.2 Pantalla de configuración para generar la señal de entrada del proceso térmico

Una vez que el usuario ha decidido dar inicio a la ejecución del programa encargado de generar y adquirir la temperatura del horno, se presenta la pantalla de

configuración representada por la Fig. 3.8 y donde podemos visualizar los siguientes controles e indicadores:

- Nombre del archivo, en formato .xls y .mat, que almacena toda la data de temperatura tanto en régimen transitorio como en régimen permanente.
- Nombre del archivo, en formato .xls y .mat, que almacena solo la data de temperatura en régimen permanente.

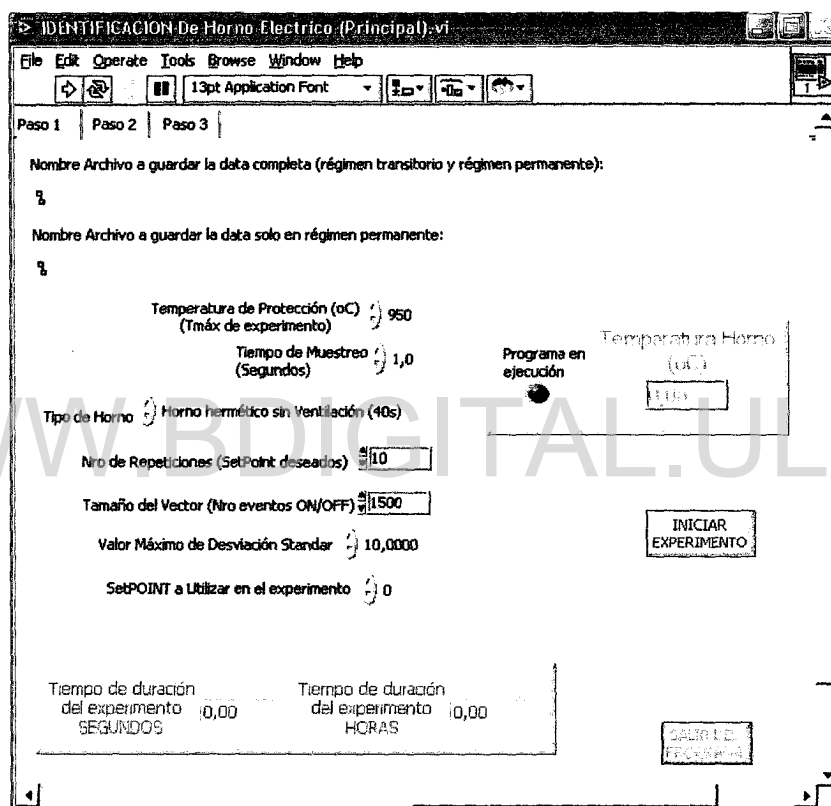


Fig. 3.8 Pantalla de configuración del programa de identificación

- Temperatura máxima de trabajo, en °C, o temperatura de protección del horno eléctrico.
- Tiempo de muestreo correspondiente al tiempo en que se adquiere cada valor de temperatura y viene dado en segundos.
- Tipo de horno eléctrico: para este caso y pensando en futuros trabajos de investigación, se ha decidido realizar una configuración especial para poder trabajar

con 2 diferentes hornos eléctricos, de acuerdo a la selección del usuario. Los hornos configurados son: (1) horno hermético sin ventilación y (2) horno hermético con ventilación.

- Número de setpoint deseados, es decir, la cantidad de respuestas que desea el usuario que el horno alcance. En otras palabras, este dato proporciona la cantidad de experimentos que se deben realizar para poder conseguir varias curvas de calentamiento del horno. Por experiencia se debe realizar al menos 10 experimentos con diferentes setpoint o puntos de operación.

- Tamaño del vector; éste se refiere al número de eventos ON/OFF. Es importante señalar que cada elemento o evento del vector ON/OFF corresponde bien sea a un intervalo de tiempo de encendido o de apagado.

- Valor Máximo de la Desviación Estándar; este valor se utiliza como comparación para determinar en que momento la data de temperatura está en régimen permanente.

- Por último, se debe seleccionar el experimento que se realizará en función del número de setpoint deseados, es decir, éste determinará el punto de operación que se alcanzará.

Una vez que el usuario ha suministrado todos estos datos de interés, adicionalmente se puede visualizar la temperatura en el interior del horno eléctrico, el tiempo total que durará todo el experimento en segundos y en minutos y, finalmente, dos botones de control, uno encargado de iniciar el experimento y por lo tanto, iniciar la generación de pulsos de apagados y encendidos aleatorios y, otro, para abortar la ejecución del programa.

### **3.4.3 Pantalla de visualización de la temperatura del proceso térmico**

Esta es la pantalla (ver Fig. 3.9) que el programa ofrece al usuario para que pueda visualizar la generación de la señal en forma de tren de pulsos y la adquisición de la temperatura. Básicamente en ésta se ejecutan dos procesos: en el primero, se da inicio a la adquisición y almacenamiento en memoria de la temperatura en el

interior de la cámara a medida que se va calentando, al igual que los pulsos de encendido y apagado de la alimentación del horno cuando la temperatura presenta un comportamiento transitorio. Una vez que la temperatura cambia a un comportamiento en régimen permanente se da inicio al segundo proceso, el cual ejecuta las mismas funciones que el proceso anterior pero a diferencia que solo almacena la data de entrada/salida en régimen permanente y, además, indica, cada 360 muestras, el setpoint o punto de operación posiblemente alcanzado y la desviación estándar. A continuación se expresa la función de cada uno de los indicadores y controles que se pueden observar en esta pantalla:

- Un indicador visual para saber que el programa está en ejecución y otro indicador de la carga del horno eléctrico (encendido/apagado).

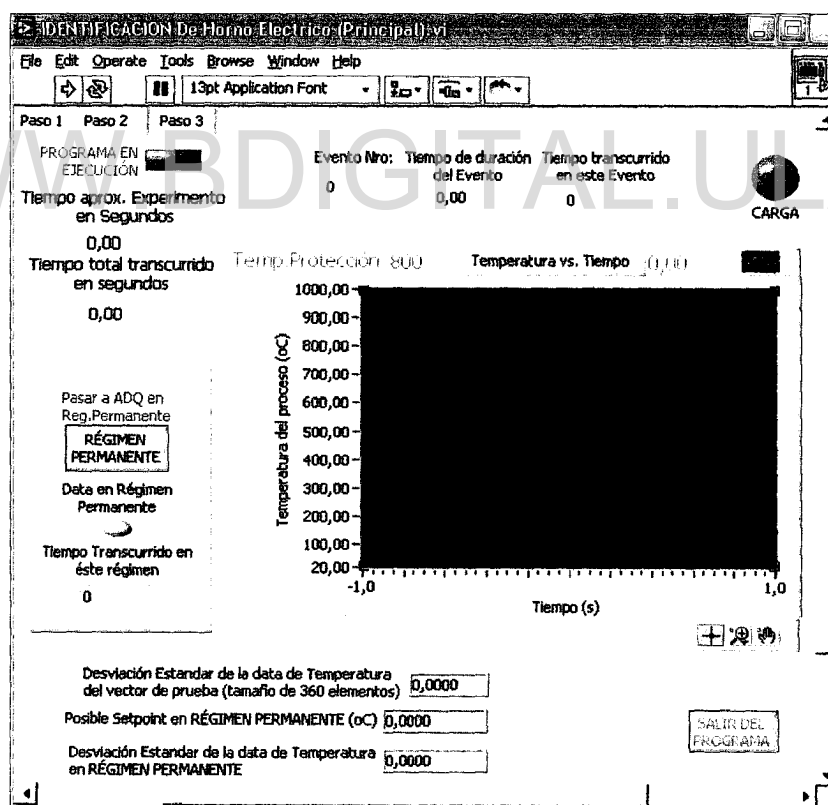


Fig. 3.9 Pantalla de visualización de la temperatura en la cámara del horno eléctrico.

- Tiempo total de duración del experimento expresado en segundos.
- Tiempo que ha transcurrido una vez dado inicio al experimento, expresado en segundos.
  - Se tiene un indicador del evento que se esta desarrollando, es decir, se indica que evento, ya sea apagado o encendido, se está ejecutando, además se visualiza el tiempo de duración del evento y el tiempo que ha transcurrido en el mismo.
  - Un visualizador gráfico donde se indica la temperatura que está experimentando el interior del horno eléctrico cada periodo de muestreo.
  - Un indicador de la desviación estándar de una muestra de 360 elementos (temperatura) cuando se tiene un comportamiento en régimen transitorio.
  - Un botón de control que da al usuario la posibilidad de escoger si mantiene la adquisición de temperatura en régimen transitorio o pasa a la adquisición de temperatura en régimen permanente. Esto se debe a que posiblemente, después de un prolongado periodo de tiempo, la temperatura de la cámara del horno puede presentar un comportamiento en régimen permanente a pesar de poseer una desviación estándar mayor a la configurada como valor mínimo de comparación.
  - Una vez iniciado la adquisición en régimen permanente, un indicador visual informa al usuario que se está adquiriendo la data de temperatura y voltaje en régimen permanente.
  - Dos indicadores donde se puede visualizar el punto de operación posiblemente alcanzado por el horno y la desviación estándar.
  - Por ultimo, un botón de control para que el usuario detenga el proceso de adquisición y por ende finalice la ejecución del programa cuando así lo desee o en caso de un fallo.

#### **3.4.4 Pantalla final de presentación**

La pantalla final de presentación corresponde a la tercera pantalla que el programa ofrece al usuario y básicamente consta de un indicador gráfico donde se representa la curva de la temperatura del interior del horno adquirida solamente en

régimen permanente y cuyo setpoint o punto de operación alcanzado, expresado en un promedio de todos los valores de temperatura de la curva, es presentado en un indicador al igual que la desviación estándar definitiva para esta curva. En la Fig. 3.10 se observa la tercera pantalla que el programa ofrece al usuario.

Para un mejor entendimiento del programa elaborado, el Anexo C detalla, con más claridad, las distintas funciones de los indicadores y controles encontrados en las diferentes pantallas mostradas en la presente sección.

Una vez almacenada la data definitiva del proceso en formato .mat se continúa con la etapa de preprocesamiento y procesamiento de los datos para ser aplicado el método de identificación, tarea que es realizada con las librerías contenidas en *MatLab* para este fin. Todo el procedimiento involucrado para la realización de esta tarea se describe en la siguiente sección.

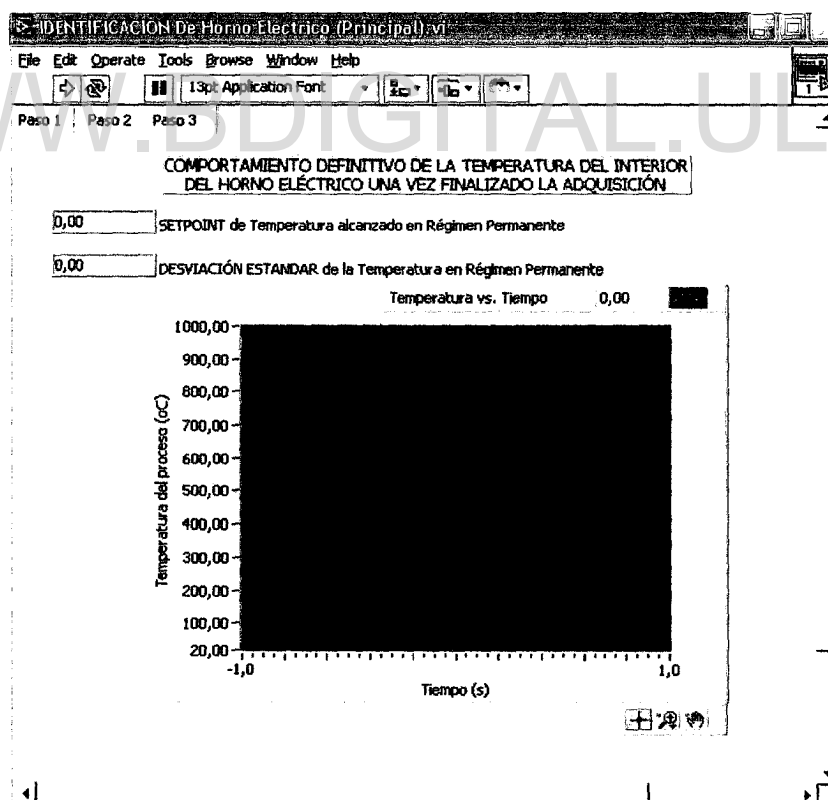


Fig. 3.10 Pantalla final de presentación del programa elaborado.

## 3.5 Resultados

Para la presentación de los resultados de forma tal que se adquiriera el mayor entendimiento posible, la presente sección ha sido estructurada en dos partes: la primera abarca sólo los resultados obtenidos con la implementación experimental del lazo de generación y adquisición y, la segunda, muestra los resultados de las simulaciones matemáticas de los modelos obtenidos por identificación de sistemas.

### 3.5.1 Resultados experimentales

La adquisición de la data necesaria para el proceso de identificación se facilitó al emplear el programa diseñado, ya que se logró de manera automatizada el almacenamiento digital de la temperatura del interior del horno eléctrico y de la señal en forma de tren de pulsos correspondiente a la señal de alimentación del equipo. Como se mencionó en las secciones anteriores, la principal función del programa es generar los tiempos de encendido y apagado de la alimentación del horno de manera aleatoria empleando para tal fin una salida digital de la tarjeta de adquisición como bits de control a una electrónica externa encargada de conmutar el control a la carga (horno), representada específicamente por el Relé de estado sólido. Por su parte la temperatura es capturada utilizando una entrada analógica de la tarjeta que posteriormente es convertida a un valor digital para su almacenamiento.

A continuación se ofrecen los resultados obtenidos con el programa de generación y adquisición de temperatura y para ello, es importante mencionar que se realizaron varios experimentos a manera de recolectar la mayor información posible del proceso térmico pero solo es presentado uno de éstos, ya que de otra manera se haría muy extenso la presentación de esta sección. En la Fig. 3.11.a se puede observar toda la curva de temperatura, o también llamada respuesta del horno, adquirida durante todo el experimento, y en la Fig. 3.11.b se observa la misma curva pero solo en régimen permanente.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela  
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

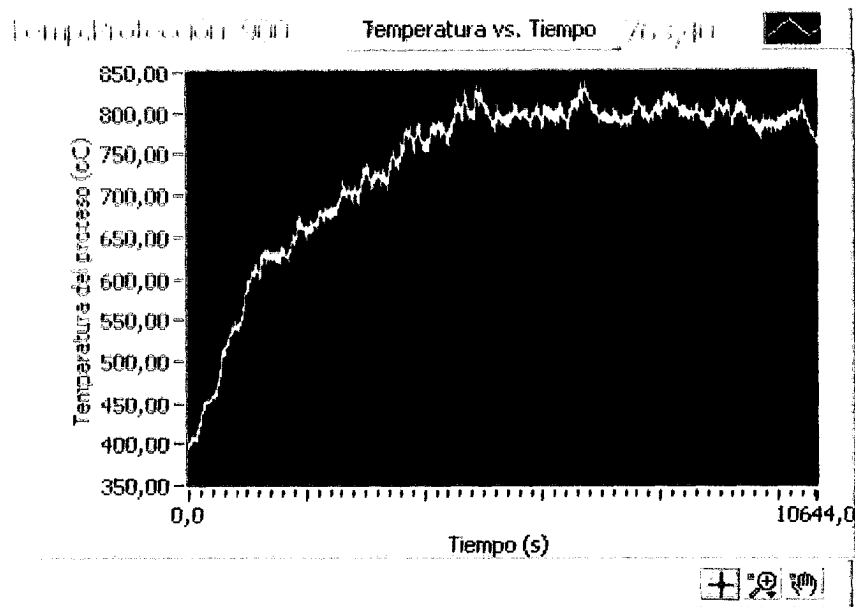


Fig. 3.11.a Curva de temperatura obtenida en uno de los experimentos.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

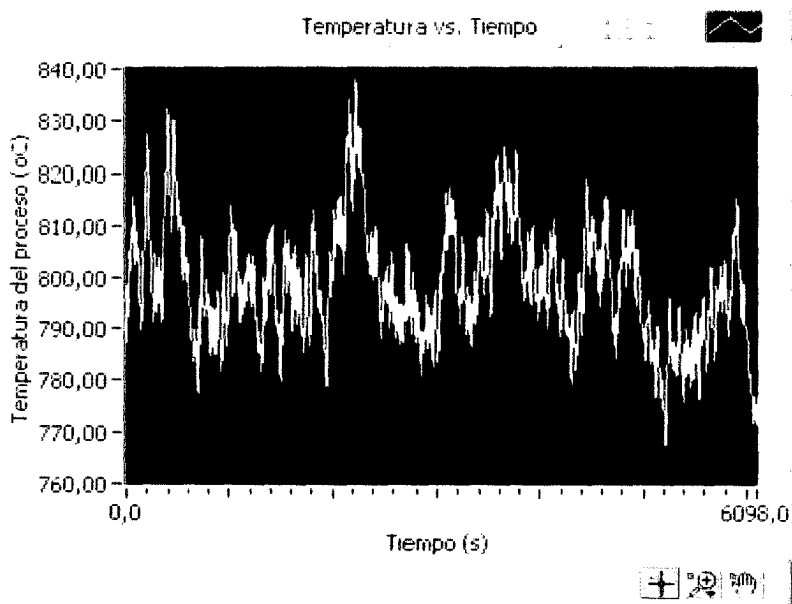


Fig. 3.11.b Segmento de la curva sólo en régimen permanente.

Licencia Creative Commons:  
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela  
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Una vez almacenada toda la data (voltaje/temperatura) se envía a *MatLab* para ser empleada en el procedimiento de identificación. Es importante dejar claro que para este procedimiento sólo interesa la data en régimen permanente ya que, en principio, nos aporta el punto de operación alcanzado; uno de los parámetros del proceso que se empleará al momento de implementar la estrategia de control, además nos permite estudiar el comportamiento del horno alrededor de este punto.

Para iniciar el desarrollo del procedimiento de identificación se presenta la respuesta del horno, tanto en régimen transitorio como en régimen permanente y la señal de alimentación (ver Fig. 3.12), recordando que esta señal posee tiempos de apagado y encendido aleatorios. Por lo tanto, solo un pequeño segmento de la señal de voltaje es representado dado que presentar la data completa de esta señal no permitiría ver con claridad los pulsos de la misma.

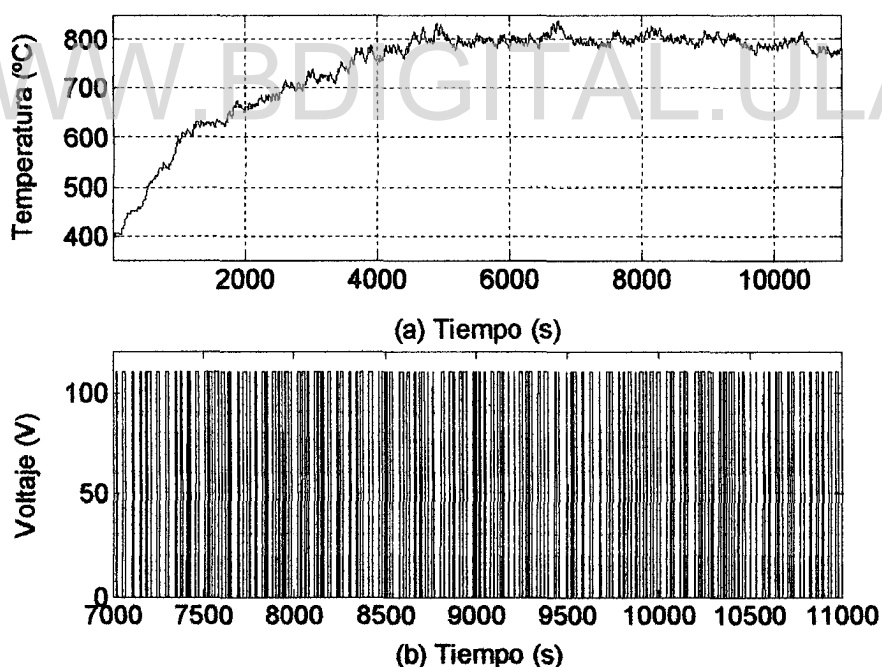


Fig. 3.12 Señal de alimentación y respuesta del horno eléctrico

Tal como se mencionó a lo largo de la presente sección, sólo interesa la data correspondiente al comportamiento del proceso en régimen permanente; data que es mostrada con mayor claridad en la Fig. 3.13.

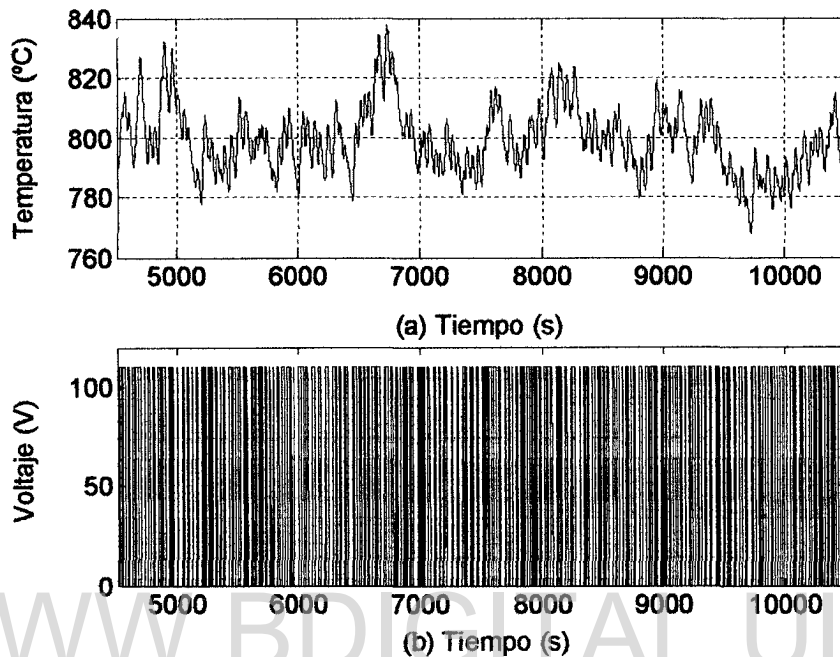


Fig. 3.13 Señal de alimentación y respuesta del horno eléctrico en régimen permanente

Seguidamente se procede a dividir cada una de las señales (voltaje y temperatura) observadas en la figura anterior en dos segmentos, a saber, un segmento que será utilizado para el procedimiento de identificación del proceso y, otro segmento, será usado para la posterior validación del modelo paramétrico.

Ya seleccionado los dos segmentos, estos son normalizados mediante la metodología ya detallada y, de esta forma, asegurar la obtención de buenos resultados de identificación. La normalización de estos segmentos es presentado en la Fig. 3.14 para ambas señales del proceso.

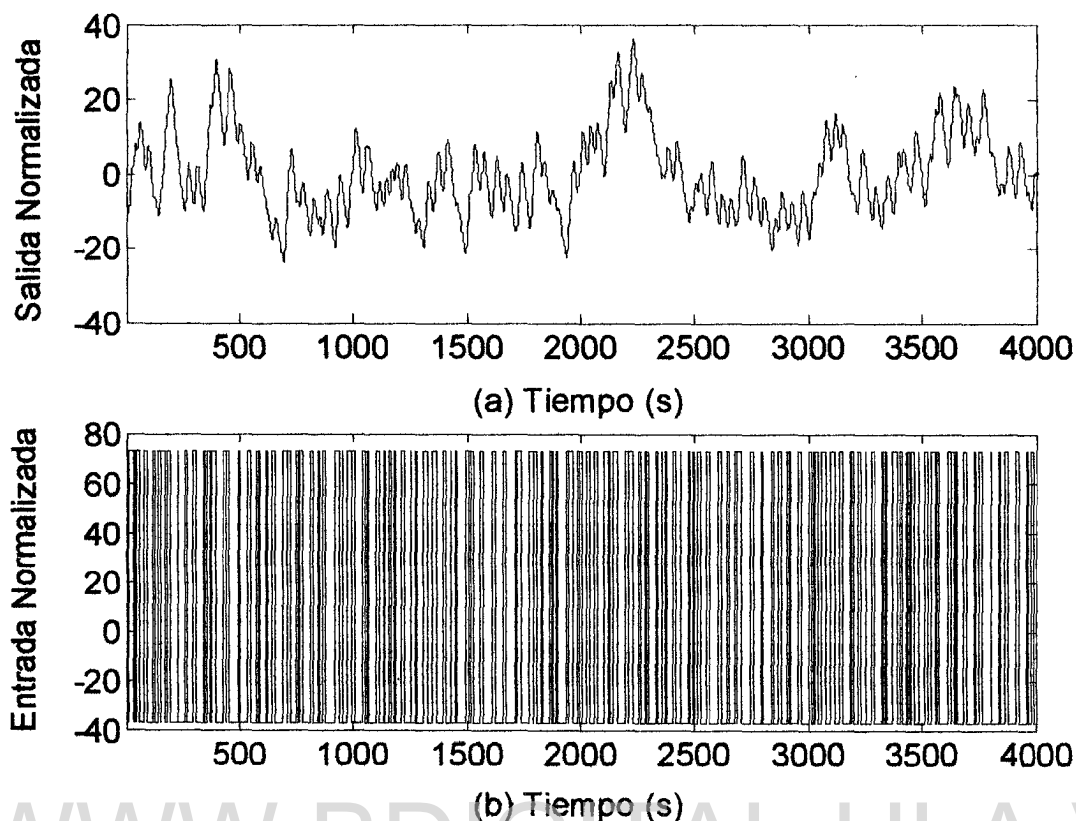


Fig. 3.14 Segmentos normalizados seleccionados para la identificación

Es necesario recordar que adicionalmente a los resultados mostrados, fueron realizados seis experimentos donde se obtuvieron seis distintas respuestas del proceso con diferentes puntos de operación. La Tabla 3.2 da a conocer los diferentes puntos de operación alcanzados por cada uno de los experimentos realizados adicionalmente. Es de acotar que el punto de operación alcanzado por el proceso es establecido por medio del cálculo de la media de la señal de temperatura en régimen permanente. Todos estos datos, tanto de voltaje como de temperatura, se almacenaron y el procedimiento que se ha detallado hasta ahora, ha sido aplicado de igual forma a los demás conjuntos de datos.

Tabla 3.2 Puntos de operación obtenidos experimentalmente

Experimento N°	Punto de Operación alcanzado por el horno eléctrico (°C)
1	249,67
2	396,27
3	447,29
4	591,77
5	729,83
6	798,72
7	935,63

Una vez que los datos han sido normalizados, se procede a ajustar el modelo paramétrico través de las herramientas de identificación facilitadas por MatLab. Los resultados respectivos de las simulaciones matemáticas de los modelos son presentados a continuación.

### 3.5.2 Resultados de simulación

Los modelos obtenidos por identificación fueron simulados mediante la herramienta de simulación Simulink-MatLab según lo descrito en la metodología presentada en la sección 3.2 y, cuyo objetivo principal estuvo centrado en variar el orden de los polinomios que conforman la estructura del modelo  $ARX$  (ver Ec. 3.1), manteniendo siempre la precaución de que el orden del polinomio  $A(q^{-1})$  sea mayor al orden del polinomio  $B(q^{-1})$ .

Antes de presentar los resultados es importante mencionar que la señal de entrada utilizada para simular los diferentes modelos es el segmento de la señal de voltaje en régimen permanente (Fig. 3.13.b) seleccionado para el procedimiento de validación. De igual manera, la validación de cada modelo es determinada usando el segmento de la respuesta del proceso en régimen permanente (Fig. 3.13.a) seleccionado para esta etapa final del procedimiento de identificación. Puede decirse

entonces que la simulación de los modelos corresponde a la última fase del algoritmo de identificación expresado en el Capítulo II.

Señalado esto, se presentan los resultados de comparación entre la salida del modelo (salida estimada), para cada uno de los órdenes establecidos, y la señal de temperatura obtenida en los distintos experimentos realizados. Estos resultados de comparación corresponden al error de equivalencia calculado mediante el criterio de evaluación *ICE* (Ec. 3.5).

En la Fig. 3.15 se puede observar el error *ICE* de cada modelo *ARX* en función de los diferentes órdenes establecidos. Vale comentar que cada curva de error corresponde a cada uno de los experimentos de identificación realizados en la sección 3.5.1 y cuyos puntos de operación alcanzados se detallaron en la Tabla 3.2.

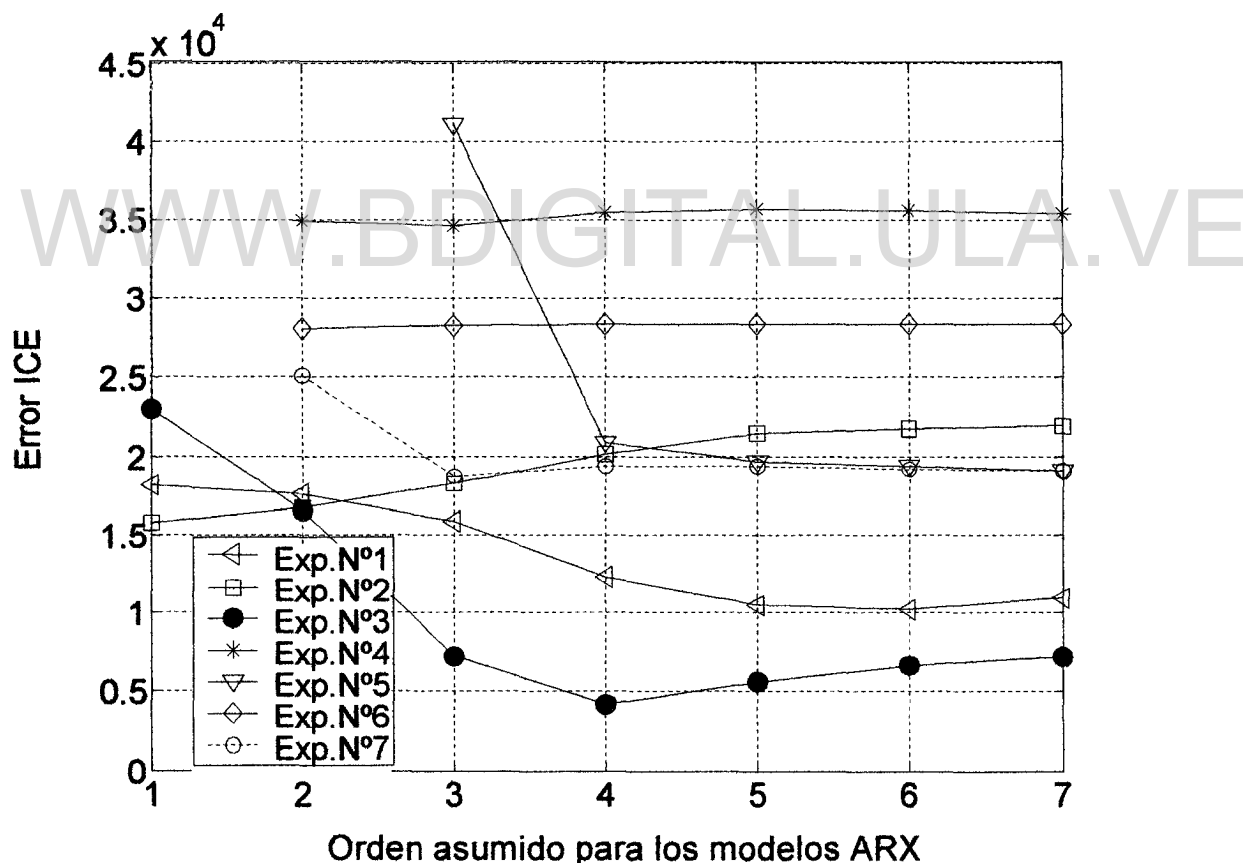


Fig. 3.15 Error de comparación entre la respuesta estimada por los modelos y la respuesta obtenida experimentalmente

Ahora para una mejor comprensión de los resultados se muestra la curva de respuesta estimada por el modelo *ARX* para cada uno de los órdenes establecidos y la respectiva señal de temperatura obtenida experimentalmente (segmento seleccionado para la validación del modelo) a través de las Fig. 3.16, 3.17 y 3.18. Las figuras a las cuales se hace referencia corresponden a aquellos modelos de identificación obtenidos con la data de los experimentos cuyos puntos de operación alcanzados fueron de 447,29 °C, 591,77 °C y 798,72 °C, respectivamente (Exp. N° 3, Exp. N° 4, Exp. N° 6).

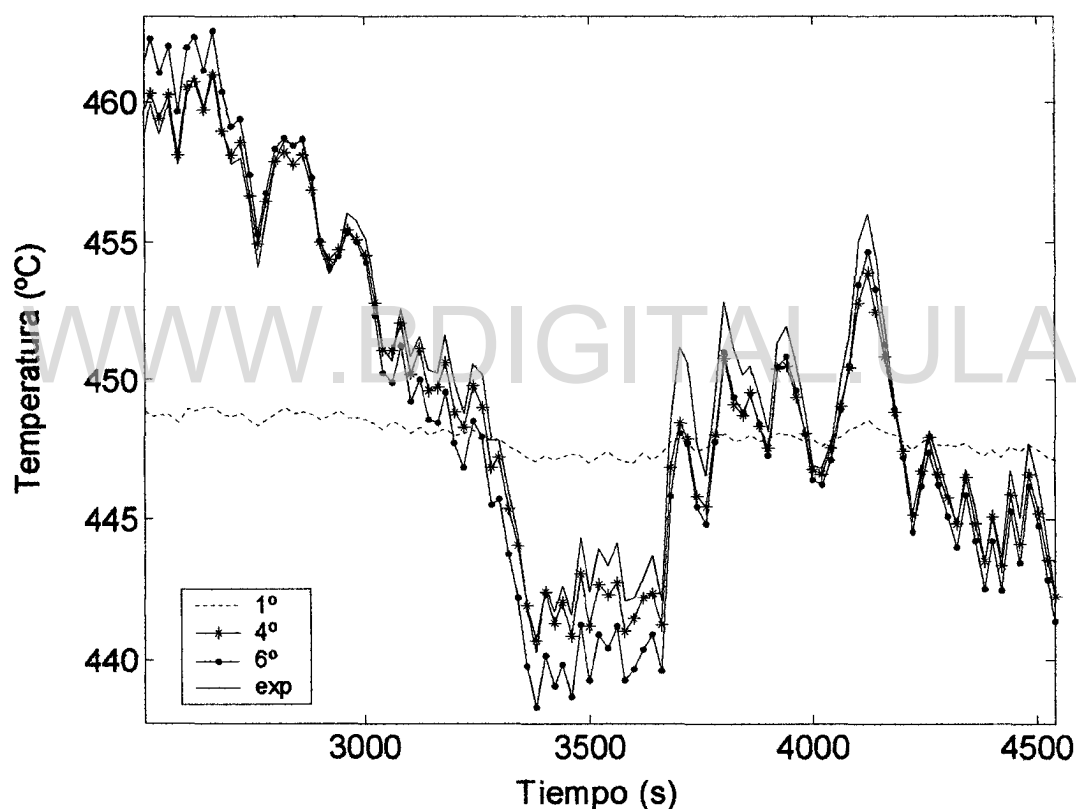


Fig. 3.16 Comparación entre la salida del modelo *ARX* y los datos experimentales.  
Punto de operación alcanzado 447,29 °C.

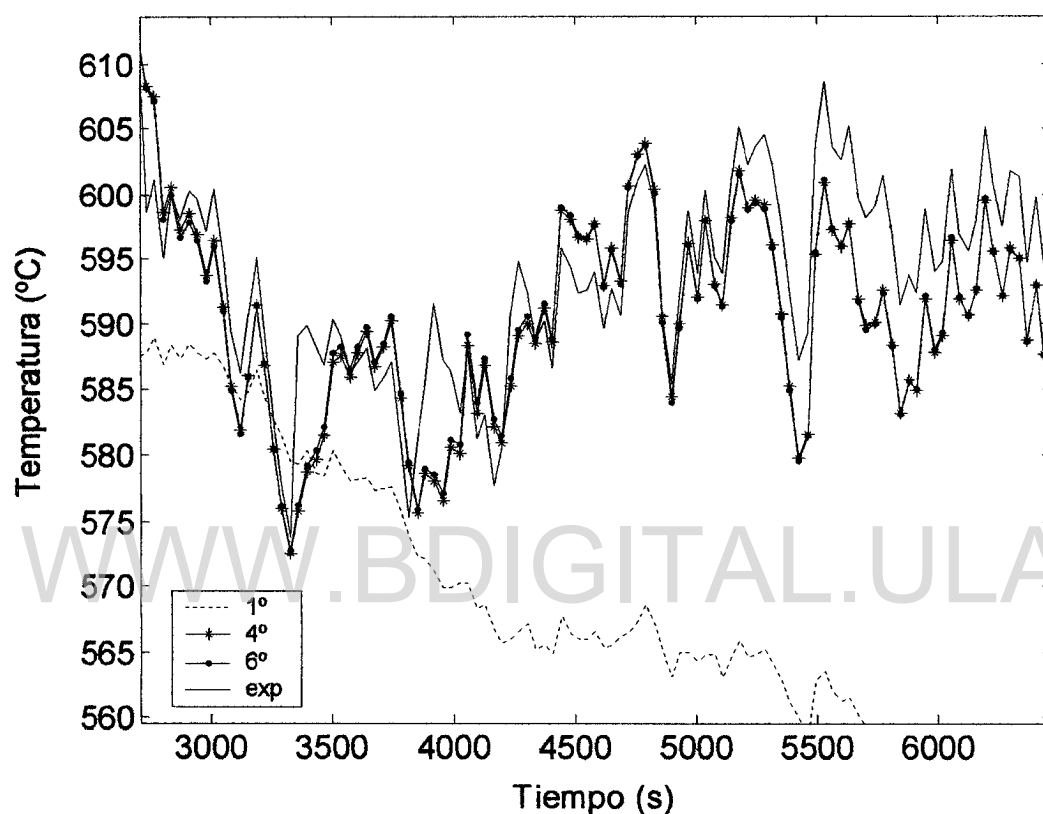


Fig. 3.17 Comparación entre la salida del modelo ARX y los datos experimentales.  
Punto de operación alcanzado 591,77 °C.

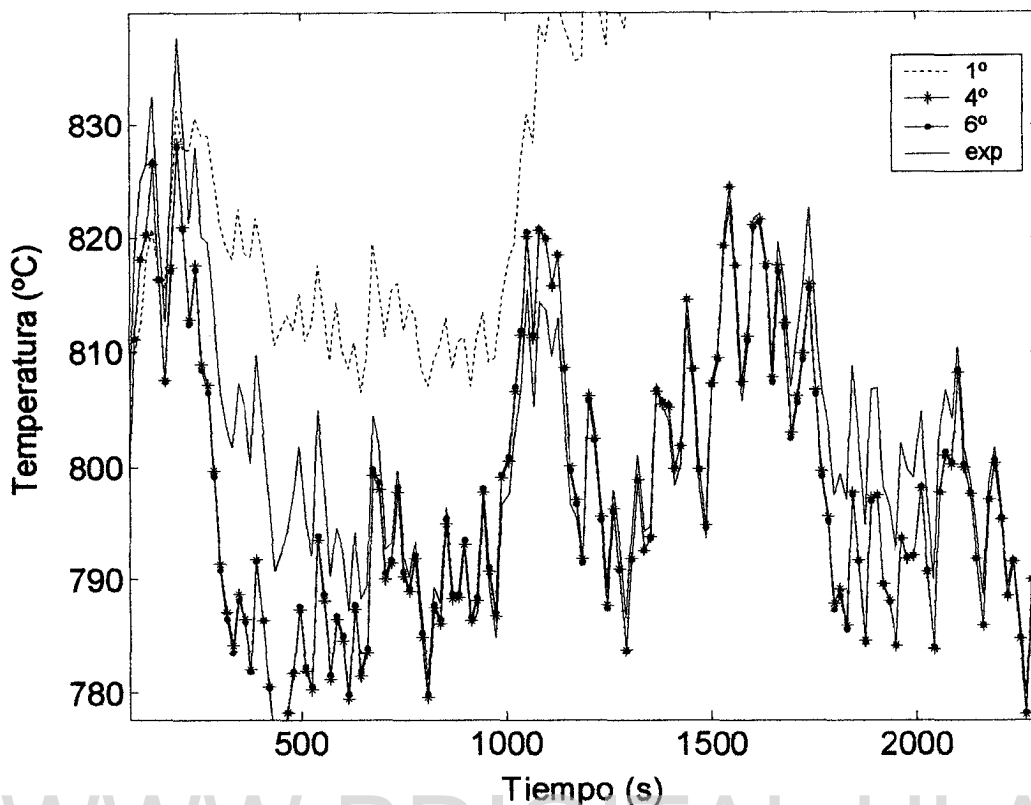


Fig. 3.18 Comparación entre la salida del modelo ARX y los datos experimentales.

Punto de operación alcanzado 798,72 °C.

En las figuras anteriores se ha podido observar las distintas respuestas estimadas por los modelos para tres puntos de operación en particular y de las cuales se resume lo siguiente:

- Sólo una parte de las respuestas estimadas es mostrada por razones de visualización puesto que de manera contraria, sería un tanto complicado distinguirlas.
- El modelo que peor estima la data experimental corresponde a un modelo de 1er orden, dado que arroja un error de comparación elevado.
- Los modelos con un orden mayor a 3, poseen un desempeño bastante aceptable, ya que la respuesta estimada sigue de buena manera la respuesta obtenida experimentalmente.

- En concordancia con lo anterior, es entonces factible seleccionar un solo orden del modelo *ARX* para los distintos puntos de operación, pues simplificaría notablemente los tiempos de simulación.

### 3.5.2.1 Modelo Final

De acuerdo a los resultados presentados hasta los momentos y considerando que el proceso térmico en estudio es representado generalmente por una ecuación lineal de orden superior (entre 3er y 4to orden), se deduce que el modelo *ARX* que mejor estima los resultados experimentales debe ser de 4to orden, ya que al observar la Fig. 3.15, el punto de inflexión en la mayoría de las curvas de error *ICE* corresponde aproximadamente a un modelo de 4to orden. Por lo tanto, para simplificar los resultados, se procede a seleccionar un modelo de este orden por cada experimento realizado, derivándose así sólo siete modelos *ARX*, con la principal característica de que cada uno de éstos posee un punto de operación en particular.

En definitiva se tienen siete modelos paramétricos con un rango de operación entre los 249,67°C y los 935,63°C a sabiendas de que cada uno de éstos posee su propio rango de temperatura en el cual funciona adecuadamente y que, generalmente, se encuentra alrededor del punto de operación

Ahora bien, la ecuación lineal que describe el comportamiento experimentado por el proceso térmico en los siete diferentes ensayos elaborados, es expresada por la Ec. 3.1, pero para una mejor comprensión de ésta, se presenta en el dominio temporal, es decir:

$$y(t) + a_1y(t-1) + a_2y(t-2) + a_3y(t-3) + a_4y(t-4) = b_1u(t-1) + b_2u(t-2) + b_3u(t-3) + b_4u(t-4) + e(t) \quad (3.9)$$

donde  $y(t)$  es la salida estimada por el modelo en unidades de  $^{\circ}\text{C}$ ,  $u(t)$  es la señal de entrada en Voltios y  $a_i$ ,  $b_i$  son los coeficientes del modelo y los cuales varían de acuerdo al modelo que se desea. En otras palabras, estos coeficientes son variables en función de la temperatura de operación.

Las siguientes tablas resumen los valores de los coeficientes  $a_i$  y  $b_i$  del modelo para cada uno de los experimentos.

Tabla 3.3 Coeficientes  $a_i$  del modelo ARX obtenidos en el procedimiento de identificación.

		Punto de operación ( $^{\circ}\text{C}$ )	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$
Experimento N°	1	249,67	-0,9712	-0,39266	-0,14724	0,51128
	2	396,51	-1,069	-0,18886	-0,25195	0,51027
	3	447,29	-0,88527	-0,49464	-0,034471	0,41469
	4	591,77	-1,1186	-0,25446	-0,12254	0,25214
	5	729,83	-0,91138	-0,23313	-0,13442	0,28145
	6	798,72	-0,92177	-0,36761	-0,018456	0,31147
	7	935,63	-0,91127	-0,16966	-0,24925	0,33671

Tabla 3.4 Coeficientes  $b_i$  del modelo ARX obtenidos en el procedimiento de identificación.

		Punto de operación ( $^{\circ}\text{C}$ )	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$
Experimento N°	1	249,67	0,0000581	0,0001427	0,0003331	0,0002491
	2	396,51	0,0001891	0,0007247	0,0005045	0,0003704
	3	447,29	0,0005012	0,0012549	0,0009148	0,0003934
	4	591,77	0,0008966	0,0014446	0,0010134	0,0001637
	5	729,83	0,0029856	0,0035117	0,0034836	0,0025244
	6	798,72	0,0015203	0,0027448	0,0023152	0,0006665
	7	935,63	0,0027865	0,0041872	0,004528	0,0044694

Dado que el Capítulo IV tiene por objetivo principal diseñar y analizar la implementación de una estrategia de control basado en un controlador PID, se hace necesario obtener un modelo *ARX* con coeficientes variables cada periodo de muestreo, es decir, que éstos sean función de la temperatura que se configure como perfil de calentamiento o como setpoint del controlador. Dicho esto, la sección siguiente detalla el ajuste al cual es sometido los diferentes modelos de 4to orden obtenidos por identificación.

### 3.5.3 Modelo *ARX* ajustado

Tal como se mencionó al final de la sección precedente, se optó por ajustar los modelos *ARX* de 4to orden a un único modelo pero con coeficientes variables cada periodo de muestreo y en función de la temperatura de operación. Tal ajuste surge de las necesidades de tener un solo modelo para las simulaciones respectivas de la estrategia de control a ser implementada en el Capítulo IV.

Para tal efecto, los diferentes coeficientes de  $a_i$  y  $b_i$ , de cada modelo *ARX* de 4to orden, son ajustados a una función polinómica de 3er grado, por ser éste el grado del polinomio más adecuado. En definitiva, la ecuación lineal que representa el modelo *ARX* ajustado es expresada en la Ec. 3.9, pero cuyos coeficientes están en función de la temperatura de operación. Seguidamente se presenta el ajuste polinómico realizado a los coeficientes del modelo.

Coefficientes  $a_i$ :

$$a_1 = (-1,02 * 10^{-9})T^3 + (2,38 * 10^{-6})T^2 - (0,0015)T - 0,717 \quad (3.10)$$

$$a_2 = (2,395 * 10^{-9})T^3 - (4,039 * 10^{-6})T^2 + (0,0022)T - 0,736 \quad (3.11)$$

$$a_3 = (-4,093 * 10^{-9})T^3 + (5,50 * 10^{-6})T^2 - (0,0018)T + 0,0035 \quad (3.12)$$

$$a_4 = (2,73 * 10^{-9})T^3 - (3,85 * 10^{-6})T^2 + (0,0011)T + 0,4495 \quad (3.13)$$

Coefficientes  $b_i$ :

$$b_1 = (-1,86 * 10^{-11})T^3 + (3,42 * 10^{-8})T^2 - (1,4934 * 10^{-5})T + 0,0019 \quad (3.14)$$

$$b_2 = (-4,006 * 10^{-12})T^3 + (9,28 * 10^{-9})T^2 - (5,1076 * 10^{-7})T - 0,0002 \quad (3.15)$$

$$b_3 = (-3,06 * 10^{-12})T^3 + (1,30 * 10^{-8})T^2 - (5,9626 * 10^{-6})T + 0,0010 \quad (3.16)$$

$$b_4 = (3,08 * 10^{-11})T^3 - (4,002 * 10^{-8})T^2 + (1,7249 * 10^{-5})T - 0,0020 \quad (3.17)$$

Así pues, ya obtenido el "**modelo ARX único**", llamado así para facilitar el entendimiento de los resultados, es simulado utilizando las mismas señales de pruebas empleadas en las simulaciones anteriores, a saber, los segmentos de la señal de alimentación seleccionados para el procedimiento de validación. De igual forma la respuesta del modelo es comparada con las respuestas experimentales del proceso correspondientes a los puntos de operación 447,29°C, 591,77°C y 798,72°C. Las simulaciones son presentadas en las siguientes figuras.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

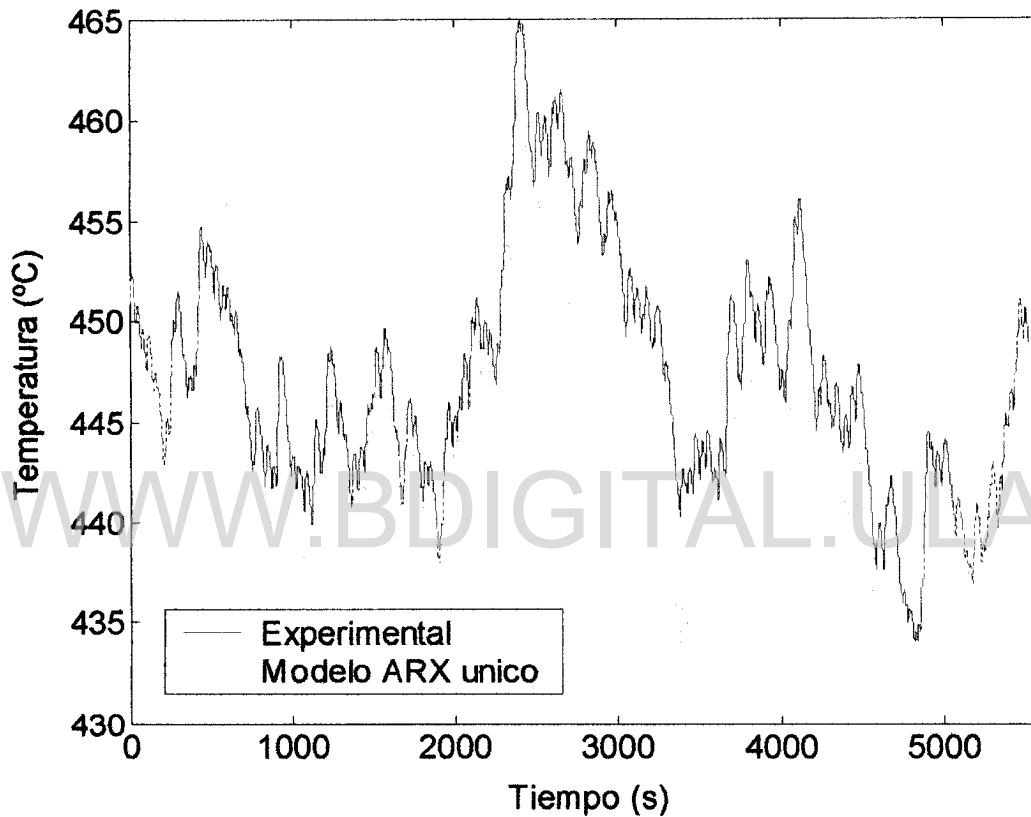


Fig. 3.19 Comparación entre la respuesta del modelo y la respuesta experimental para un punto de operación de 447,29°C

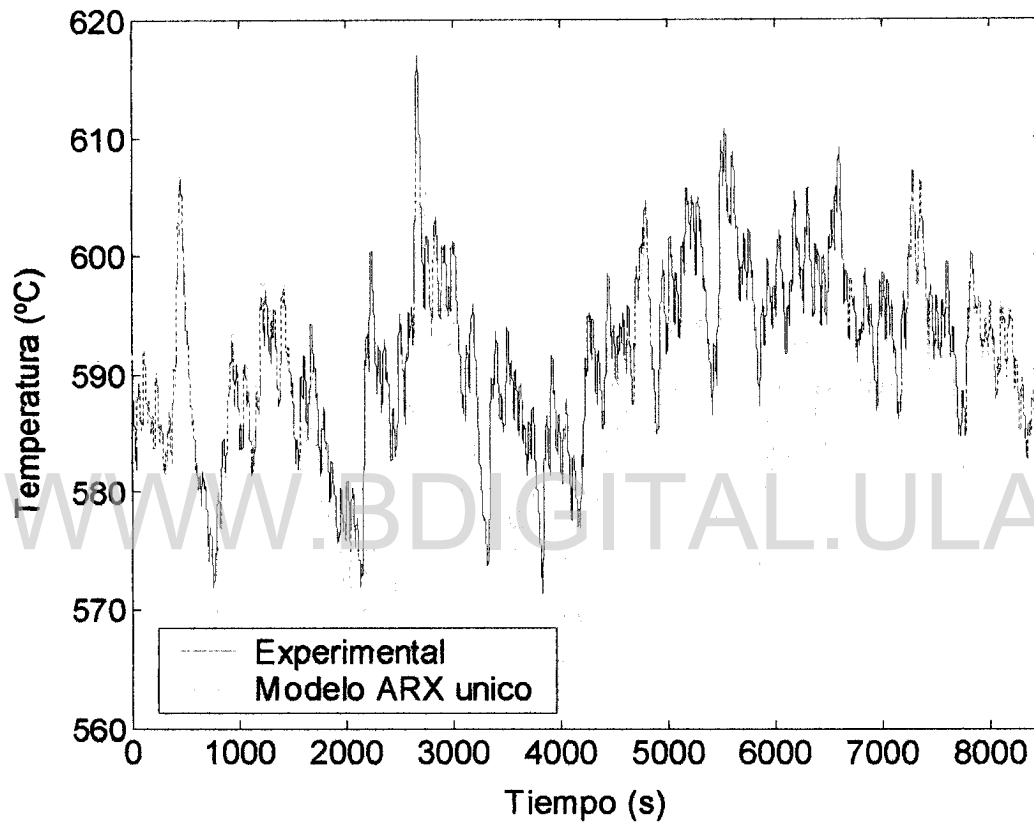


Fig. 3.20 Comparación entre la respuesta del modelo y la respuesta experimental para un punto de operación de 591,77°C

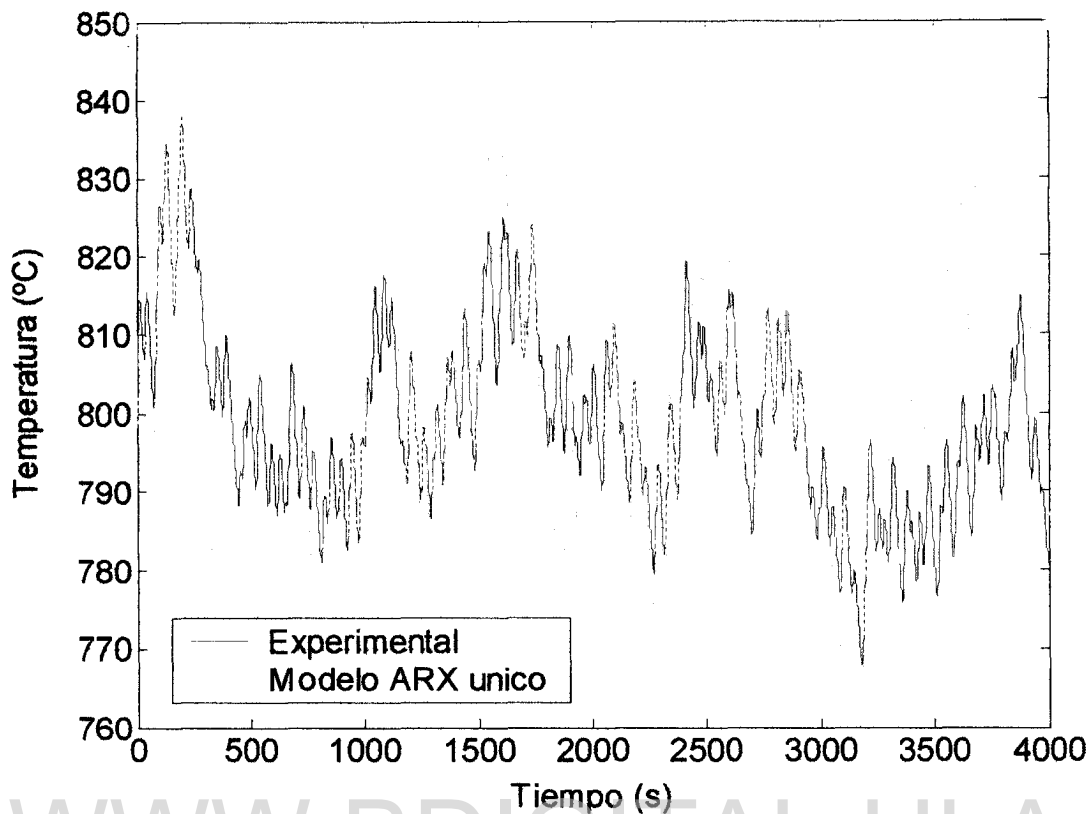


Fig. 3.21 Comparación entre la respuesta del modelo y la respuesta experimental para un punto de operación de 798,72°C

Los resultados de las simulaciones demuestran que al haber realizado un ajuste polinómico de 3er grado a los diferentes coeficientes  $a_i$ ,  $b_i$  de los modelos deducidos en la sección 3.5.2.1, el modelo *ARX* único funciona adecuadamente, puesto que las distintas salidas estimadas (Fig. 3.19; Fig. 3.20; Fig. 3.21) siguen en buena manera las respuestas experimentales correspondientes a los experimentos N° 3, 4, y 6.

### 3.6 Conclusiones

Como se vio a lo largo del desarrollo del presente capítulo, el modelado del proceso térmico estuvo estructurado en varias etapas, iniciándose por una parte con la descripción detallada del proceso representado por el horno de calentamiento

eléctrico y en la cual se aclaró que la señal de entrada ideal para el procedimiento de identificación, es una señal en forma de tren de pulsos con tiempos de encendidos y apagados aleatorios; además por otro lado, se explicó el procedimiento paso a paso para ajustar el modelo paramétrico a la data de entrada/salida del proceso. De igual forma fue especificado tanto la instrumentación como el software necesarios para generar, adquirir, registrar, analizar y presentar toda la data proveniente del proceso térmico y, con el cual se lograron realizar siete diferentes experimentos, alcanzando cada uno de éstos, un punto de operación en particular.

Con los resultados logrados experimentalmente se demostró las grandes ventajas y facilidades que ofrece el lenguaje de programación gráfico al momento de realizar la adquisición y registros de los datos tanto de la señal de voltaje como de la respuesta de proceso térmico. Posteriormente estos resultados fueron procesados y normalizados para poder ser utilizados en el procedimiento de identificación y en el cual se obtuvieron varios modelos *ARX* de diferentes ordenes para cada uno de los experimentos realizados. Las simulaciones respectivas de estos modelos revelaron que el error de comparación (*ICE*) entre la salida estimada y la respuesta experimental disminuye, en la mayoría de los casos, cuando el orden del modelo es mayor a 3, confirmándose así lo expuesto en el Capítulo II, donde se mencionó que estos tipos de procesos térmicos son sistemas no lineales y que el modelo matemático más adecuado para representarlos son aquellos modelos de orden superior, generalmente de 3ero o 4to orden. Además se pudo observar que cuando el punto de operación alcanzado es mucho mayor, la identificación arroja mejores resultados, puesto que la respuesta estimada por los modelos está más cerca de la respuesta experimental.

De acuerdo a esto, se decidió seleccionar un modelo *ARX* de 4to orden para cada uno de los experimentos, es decir, un modelo matemático para cada punto de operación, ya que tener varios modelos con órdenes diferentes complicaría de cierto modo las simulaciones referentes a la implementación de la estrategia de control. Por otro lado se optó por reducir los modelos a un solo modelo *ARX* de 4to (*modelo*

**ARX único**) pero con la característica principal de que sus coeficientes ( $a_i$ ,  $b_i$ ), son variables cada periodo de muestreo y están en función de la temperatura de trabajo. Con los resultados de simulación se consiguió que el *modelo ARX único* es capaz de representar de buena manera la dinámica del horno eléctrico en estudio.

En resumen puede decirse entonces que, en cuanto a los modelos de 4to orden, obtenidos para cada data experimental, éstos funcionan adecuadamente en un rango de temperatura óptimo que, generalmente, se encuentra alrededor del punto de operación característico de cada uno de ellos, abarcando en forma general, un rango de trabajo que va desde aproximadamente 230°C hasta 1000°C. Dado que estos modelos sólo pueden ser usados en determinados rangos de temperaturas, un modelo con coeficientes variables es lo más viable al momento de implementar una estrategia de control a la temperatura del interior del horno eléctrico.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

## CAPÍTULO IV

# CONTROL DEL PROCESO TÉRMICO

## Introducción

El objetivo principal de este capítulo es presentar los resultados y análisis de la evaluación del sistema de adquisición, presentación, control y supervisión de temperatura mediante la realización de diferentes experimentos sobre el horno de calentamiento eléctrico para ensayos de dilataciones térmicas.

Para tal fin, el capítulo ha sido estructurado de la siguiente forma: en primer término se presenta la simulación de la estrategia de control propuesta sobre el modelo paramétrico del horno, usando un controlador del tipo Proporcional-Integral-Derivativo (*PID*), cuyos parámetros son los obtenidos por medio de las formulas de sintonización de Ziegler & Nichols para respuesta de asentamiento de un cuarto [15]. Una vez obtenidos los resultados y análisis de las simulaciones, se realiza la implementación real de esta estrategia en el equipo físico, para seguir con la elaboración de los experimentos destinados a su evaluación.

### 4.1 Descripción de la estrategia de control propuesta

Dado que el horno de calentamiento eléctrico representa un proceso térmico característico de sistemas con una constante de tiempo muy prolongada [15] y cuya variable a controlar es la temperatura en el interior de la cámara del mismo, se ha propuesto la implementación de una estrategia de control basada en un controlador del tipo Proporcional-Integral-Derivativo (*PID*).

Para la implementación de la estrategia se debe tomar en cuenta los resultados obtenidos en el procedimiento de identificación realizado en el capítulo anterior, en el cual se logró deducir siete modelos paramétricos de 4to orden, cada uno con un punto de operación en particular. De modo general, los modelos abarcan un rango de temperatura que va aproximadamente desde los 250°C hasta los 935°C, teniendo presente que cada uno de ellos tiene un rango específico en el cual funciona adecuadamente y éste, generalmente, se encuentra alrededor de su punto de operación.

Como consecuencia de esta característica, la estrategia de control es implementada a cada uno de los modelos de manera independiente, es decir, por cada modelo se tiene un controlador *PID* en particular y, por ende, un juego de parámetros ( $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ ) específicos, obtenidos mediante las ecuaciones de sintonización dadas por Ziegler & Nichols [15]. En total se tienen siete controladores *PID* y siete diferentes juegos de parámetros. Es de recordar que adicionalmente en el capítulo anterior, los siete modelos fueron reducidos a un solo modelo denominado "*modelo ARX único*", y cuya característica principal es que sus coeficientes ( $a$ ,  $b$ ) son variables respecto a la temperatura programada como referencia o setpoint del controlador. A este modelo, de igual forma, se le implementa la estrategia de control pero empleando igualmente los siete controladores *PID*, procedimiento que se realiza mediante el uso de un algoritmo de cambio.

En la sección siguiente, se realizarán las simulaciones respectivas de la implementación de la estrategia tanto en los siete modelos como en el *modelo ARX único*. Es bueno mencionar que en el primer caso, cada modelo unido a su respectivo controlador es utilizado en un determinado rango de temperatura; rango que es configurado previamente a las simulaciones y en base a lo mencionado al inicio de la presente sección (algoritmo de cambio). De acuerdo a esto, el algoritmo de cambio seleccionará que modelo es empleado conforme al perfil de temperatura programado (setpoint del controlador). En relación al segundo caso, este algoritmo solo determinará que controlador es usado acorde al mismo perfil de temperatura.

## 4.2 Simulación de la estrategia de control

Como se mencionó en la sección precedente, se realizó la implementación de una estrategia de control *PID* a los modelos de identificación y se llevaron a cabo diversas simulaciones con variados perfiles de temperatura. La siguiente figura (Fig. 4.1) detalla de manera general el lazo de control implementado al modelo del horno de calentamiento eléctrico obtenido mediante identificación.

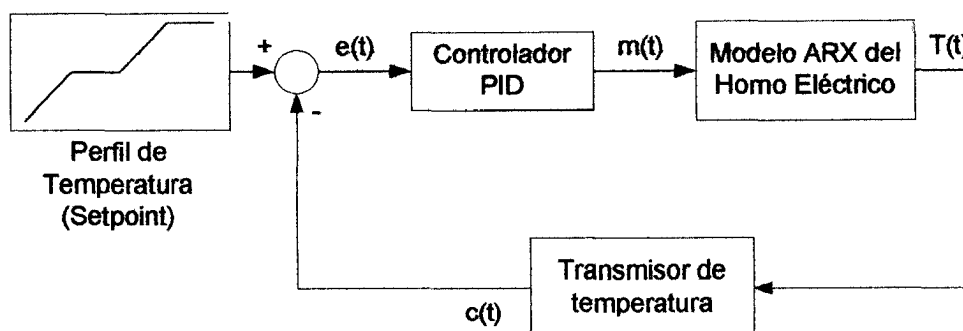


Fig. 4.1 Control a lazo cerrado de la temperatura del interior del horno

Los valores de los parámetros del controlador fueron obtenidos mediante la utilización de las formulas de sintonización para respuesta de asentamiento de un cuarto en cada uno de los modelos paramétricos. Dado esto, se obtuvieron siete distintos juegos de parámetros del controlador. Los valores correspondientes a los juegos de parámetros son mostrados en la Tabla 4.1.

A continuación son presentados los resultados de las simulaciones de la estrategia de control propuesta. En primer lugar se simula la estrategia usando los siete modelos obtenidos y los siete controladores *PID* de manera simultanea, es decir, se utiliza el algoritmo de cambio que determina que modelo, junto con su respectivo controlador, funciona de acuerdo a un rango de temperatura fijado previamente.

Tabla 4.1 Parámetros del controlador *PID* obtenidos mediante Ziegler & Nichols

Juego de parámetros N°	Punto de Operación <sup>1</sup> (°C)	$K_p$ (%/%)	$K_i$ (1/s)	$K_d$ (s)
1	249,67	7,7533	71,595	83,348
2	396,27	5,3818	48,285	39,018
3	447,29	14,194	21,645	46,131
4	591,77	8,2263	24,975	30,849
5	729,83	15,617	9,99	23,425
6	798,72	14,224	13,32	28,448
7	935,63	12,144	9,99	18,216
Valor promedio de cada parámetro		11,077	28,543	38,491

En segundo lugar se simula de nuevo la estrategia de control utilizando el *modelo ARX único*, es decir, un modelo cuyos coeficientes  $a_i$ ,  $b_i$  varían en función de la temperatura programada como perfil o setpoint. En cuanto a los controladores, éstos son utilizados simultáneamente de acuerdo al algoritmo de cambio. Para tener una clara referencia de la implementación de la estrategia sobre los modelos, la Fig. 4.2 muestra el diagrama de bloques elaborado con la herramienta de simulación Simulink-MatLab.

La Fig. 4.3 muestra ya el resultado de la evaluación de la estrategia de control empleando los siete modelos *ARX* de manera simultánea y el modelo *ARX* con coeficientes variables (*modelo ARX único*), utilizando un perfil de calentamiento a baja temperatura, a sabiendas que el rango óptimo de funcionamiento de los modelos está comprendido entre los 250°C y los 935°C. Este perfil de calentamiento tiene dos temperaturas de estabilización, 200°C y 300°C, y dos rampas de calentamiento, además se inicia desde temperatura ambiente (25°C). Para facilitar el entendimiento de los resultados, la respuesta obtenida utilizando los siete modelos es identificada como "*Modelos ARX*" mientras que la respuesta del *modelo ARX único* es designada como "*Modelo Único*".

<sup>1</sup> Este valor corresponde al punto de operación alcanzado por cada modelo paramétrico

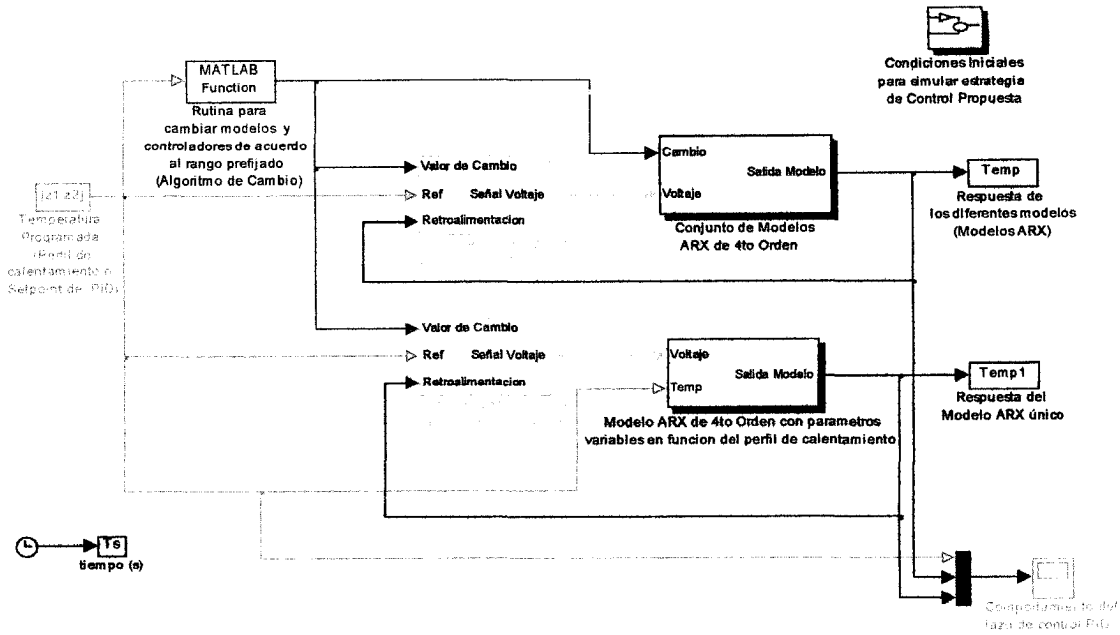


Fig. 4.2 Diagrama de bloques de la estrategia de control implementada a los modelos de identificación

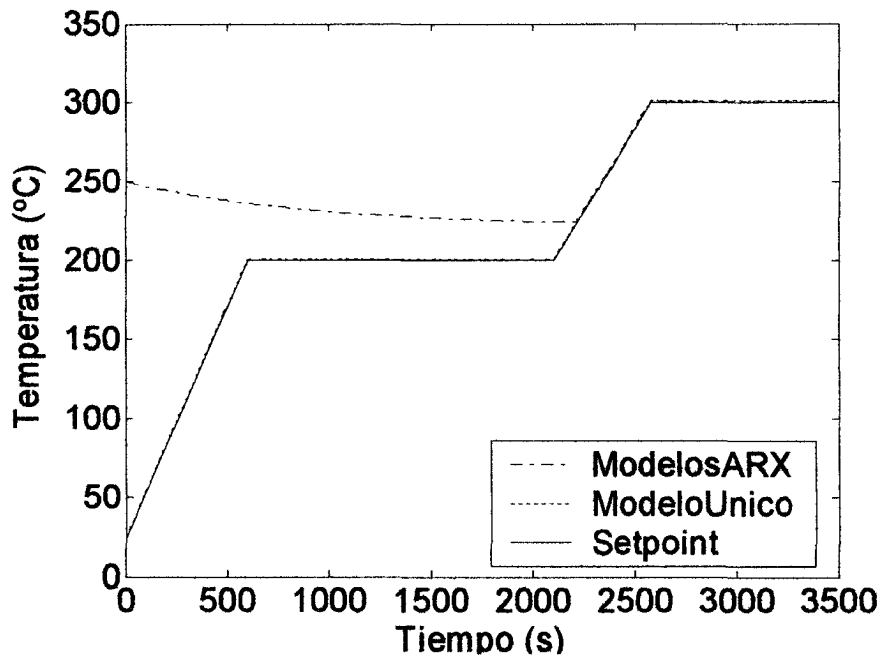


Fig. 4.3.a Comportamiento de la temperatura para un perfil a baja temperatura

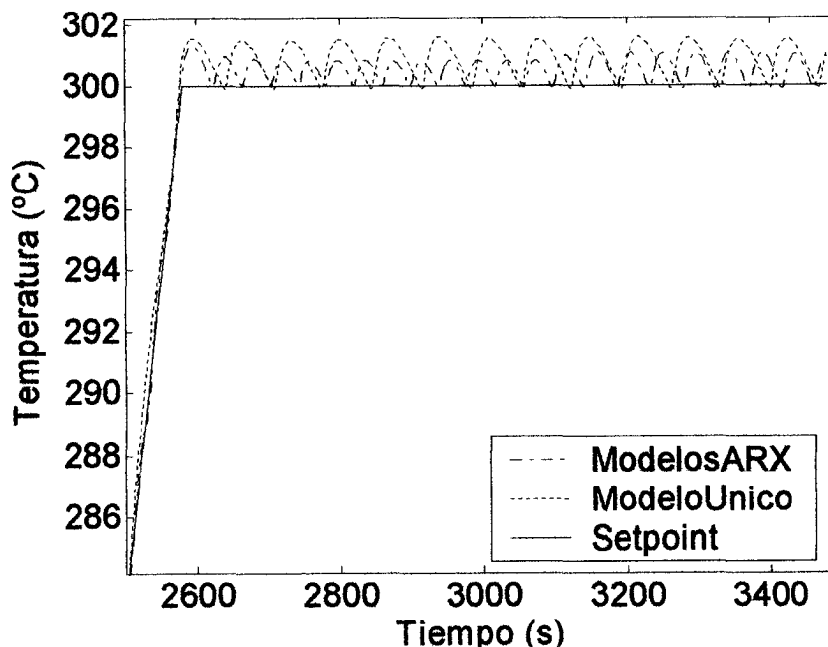


Fig. 4.3.b Zoom a una temperatura de estabilización de 300°C

De forma inmediata puede observarse que el comportamiento de la temperatura durante los primeros 2300 s no es el adecuado cuando son utilizados todos los *modelos ARX* de manera simultánea (ver Fig. 4.3.a), caso contrario sucede cuando es utilizado el *modelo ARX único*. La razón del comportamiento presentado al momento de usar todos los modelos ("*Modelos ARX*") se debe primero a que la parte inicial del perfil de temperatura está por debajo del rango óptimo de funcionamiento de todos los modelos, y segundo, que el punto de operación más bajo alcanzado fue de 249,67°C, y por tanto, el correspondiente modelo *ARX* abarca un rango de funcionamiento alrededor de este punto de operación. Estas características del modelo provocan que la temperatura estimada no logre descender hasta la primera temperatura de estabilización, pero una vez que el valor del setpoint supera la temperatura más baja que el modelo puede alcanzar, la respuesta sigue correctamente el perfil de temperatura (ver Fig. 4.3.b). En cuanto a los parámetros del controlador, éstos permiten un control adecuado, ya que la respuesta estimada de los modelos presenta un comportamiento acorde a cualquier sistema de control sintonizado correctamente.

Para obtener mayor información del funcionamiento de la estrategia, se evaluó de igual modo utilizando un perfil de temperatura mucho mayor. Este perfil parte nuevamente desde temperatura ambiente y posee dos temperaturas de estabilización, 600°C y 700°C. Dicha evaluación es presentada en la Fig. 4.4.

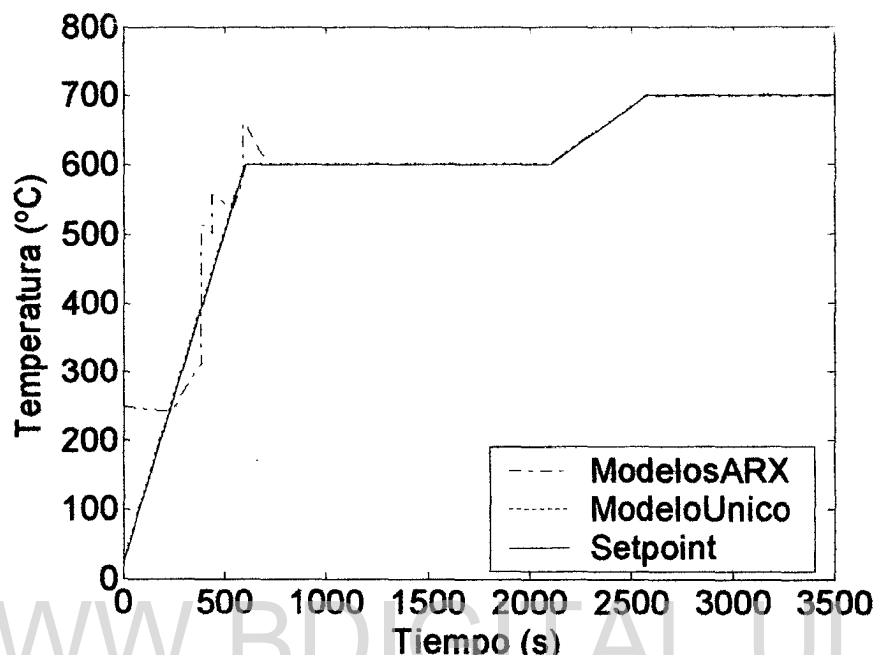


Fig. 4.4.a Comportamiento de la temperatura para un perfil a alta temperatura

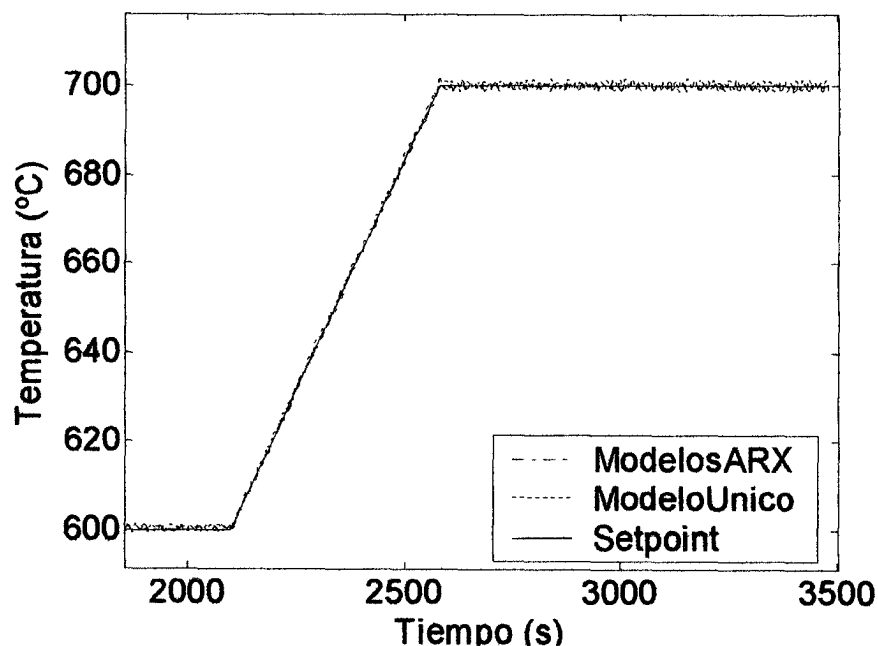


Fig. 4.4.b Zoom a una temperatura de 600°C y 700°C, respectivamente

En la Fig. 4.4.a puede detallarse claramente que durante los primeros 700 s la respuesta estimada por los *modelos ARX* presenta varios cambios bruscos como consecuencia de que el modelo que se está utilizando cambia bruscamente de acuerdo a los rangos de temperaturas programados en el algoritmo de cambio, es decir, en un instante cualquiera de tiempo cada modelo estima un valor de temperatura diferente, derivando esto que cuando el modelo es cambiado por otro modelo sucedan estos picos abruptos durante la simulación. Sin embargo, una vez transcurrido un periodo de simulación de 700 s, la temperatura estimada se comporta adecuadamente (ver Fig. 4.4.b), dado que, entre los 600°C y los 700°C se está utilizando un sólo modelo de todo el conjunto de modelos *ARX*. En cuanto al *modelo ARX único*, este presenta un comportamiento adecuado a pesar de que la temperatura de referencia parte desde una temperatura ambiente de 25°C. Nuevamente puede verse que el controlador diseñado controla la temperatura estimada por los modelos adecuadamente.

#### 4.2.1 Análisis de las simulaciones

Visto la evaluación de la estrategia de control *PID* implementada a los modelos *ARX* obtenidos por identificación, puede resumirse que en cuanto a lo que a simulación se refiere, el modelo *ARX* con coeficientes variables en función de la temperatura programada (*Modelo ARX único*), presenta un comportamiento bastante aceptable sin importar que la temperatura de referencia parta inicialmente desde temperatura ambiente. En cuanto al uso de los modelos *ARX* de forma simultánea es recomendable emplearlos cuando la temperatura de referencia parta desde los 240°C, ya que así se aseguraría que la respuesta del modelo que se vaya a emplear para ese rango de temperatura alcance en buena manera la temperatura de referencia programada.

En cuanto al controlador, puede decirse que éste tiene un desenvolvimiento adecuado, permitiendo un buen control sobre la temperatura estimada por los modelos matemáticos.

### 4.3 Metodología para la implementación a nivel experimental

Como se mencionó, el control de la temperatura es llevado a cabo por un controlador *PID* cuyos parámetros corresponden a los obtenidos mediante las ecuaciones de sintonización de Ziegler & Nichols, lo cual fue detallado en la sección 4.1. Como se sabe se obtuvieron siete diferentes juegos de parámetros que corresponden a una temperatura promedio de trabajo en particular, es decir, a un punto de operación específico (Tabla 4.1). Tomando como base los resultados de simulación se optó por ajustar los valores de cada uno de los parámetros, a saber:  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$ , a una función polinómica de segundo orden con el fin de que estos parámetros varíen de acuerdo a la temperatura que se tenga en el interior del horno eléctrico. Este procedimiento se realiza para hacer que el cambio de los valores, respectivos de cada parámetro de un rango de operación a otro, sea más suave. Ya que como se sabe, cada juego de parámetros obtenido posee un funcionamiento óptimo en un determinado rango de temperatura, generalmente un rango que se encuentra alrededor del punto de operación alcanzado por cada modelo. El comportamiento de cada uno de los parámetros obtenidos por sintonización es mostrado en la Fig. 4.5 al igual que el ajuste realizado sobre estos.

En cuanto a la salida del controlador, la cual va dirigida hacia el elemento final de control (relé), se configuró para controlar de forma interrumpida la intensidad de corriente que alimenta las resistencias que proveen el calentamiento en el interior del horno, al emplear una salida digital de la tarjeta de adquisición como bits de control en el convertidor D/A de corriente empleado. Esto se consigue al emplear una salida temporizada (counter 1) para controlar la corriente de referencia y así controlar el ciclo de servicio de la señal analógica de voltaje. De esta manera con la rutina de control se logra variar la duración del pulso de encendido del horno desde 0,01 segundos hasta 1,0 segundos.

Con relación a la adquisición de la temperatura, la misma es tomada a través de una entrada analógica de la misma tarjeta de adquisición (canal 0), siguiendo la misma metodología detallada en el capítulo de modelado del horno eléctrico.

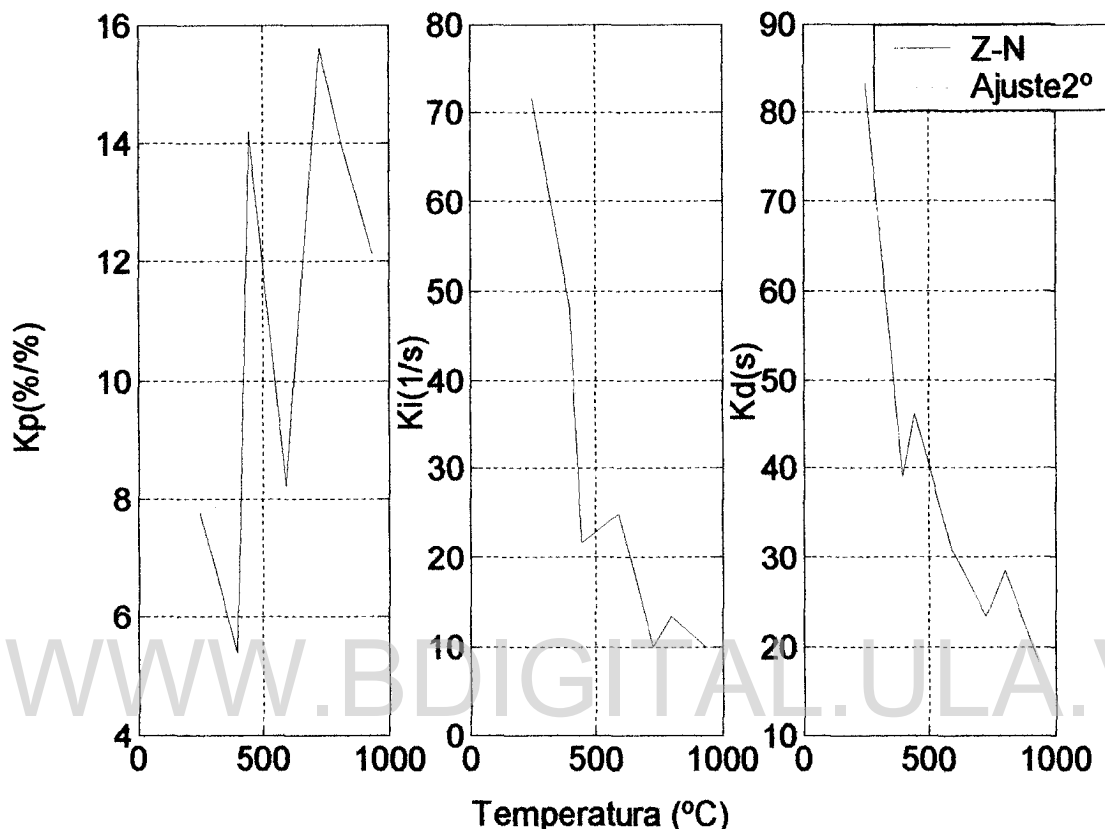


Fig. 4.5 Evolución de cada uno de los parámetros del controlador de acuerdo a los puntos de operación alcanzados

Ahora bien, en cuanto al diseño de los experimentos se seleccionan dos modalidades de ensayos: un ensayo con un perfil de calentamiento a baja temperatura que va desde temperatura ambiente hasta los 300°C y, otro ensayo con un perfil de calentamiento mucho mayor, es decir, desde una temperatura en particular hasta los 700°C, dado que generalmente el horno eléctrico ya ha sido precalentado.

Inicialmente la estrategia de control es evaluada utilizando como parámetros del controlador los valores obtenidos de los ajustes polinómicos realizados a los distintos juegos de parámetros. No obstante para mejorar la respuesta de la estrategia de control implementada, adicionalmente se efectuará un ajuste fino a los parámetros del controlador, específicamente los parámetros  $K_p$  y  $K_i$ . Así pues, las diferentes formas de evaluación de la estrategia en base a los parámetros del controlador se detallan en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2 Fases de evaluación de la estrategia de control en base a los parámetros del controlador

Fase	Forma de evaluación	Perfil experimentado	
1	Los parámetros son variables y sin modificaciones	Baja temperatura	Alta temperatura
2	Los parámetros son variables, pero solo $K_p$ es incrementado en un 100%	Baja temperatura	Alta temperatura
3	Los parámetros son variables, pero solo $K_p$ es disminuido un 50%	Baja temperatura	Alta temperatura
4	Los parámetros son variables, pero solo $K_i$ es incrementado en un 100%	Baja temperatura	Alta temperatura
5	Los parámetros son variables, pero solo $K_i$ es disminuido un 50%	Baja temperatura	Alta temperatura
6	Los parámetros permanecen constantes. Valores promedios <sup>2</sup>	Baja temperatura	Alta temperatura

De acuerdo a la tabla anterior, lo que se desea es evaluar la estrategia de control *PID* haciendo hincapié en los parámetros del controlador, es decir, en uno de los ensayos experimentales se procederá a utilizar el valor de cada parámetro tal cual como se obtiene de la función polinómica de 2º, no obstante teniendo siempre presente que estos valores cambian cada periodo de muestreo ( $T_s$ ); en otros

<sup>2</sup> Los valores promedios son dados en la Tabla 4.1.

ensayos se procederá de la misma forma pero manipulando solamente la banda proporcional y la constante de integración en un cierto porcentaje y de manera independiente y, en un último ensayo experimental, el valor de cada parámetro utilizado es el promedio de todos los valores de cada parámetro. Para este caso en particular, el valor de los parámetros permanece constante a lo largo de todo el experimento.

#### 4.4 Implementación real de la estrategia de control

Ya analizado el comportamiento del modelo matemático del horno eléctrico, a continuación se realiza la implementación real bajo el lenguaje de programación *LabVIEW*. Para tal efecto se elaboró un programa que posee la capacidad de adquirir, presentar, almacenar, controlar y supervisar la temperatura del interior del horno. Particularmente la variable de interés se controla mediante el controlador *PID* integrado en el ToolKit de control de la National Instrument. Este programa se basa en una interfaz gráfica amigable, la cual a su vez está integrada con los dispositivos siguientes: la tarjeta de adquisición Lab-PC-1200, el elemento de control representado por un relé de estado sólido, el elemento transductor de temperatura (termocupla tipo K), y el proceso térmico constituido por el horno de calentamiento eléctrico. Los dispositivos integrados para el completo control, supervisión y adquisición de la temperatura del interior del proceso, son representados en la Fig. 4.6.

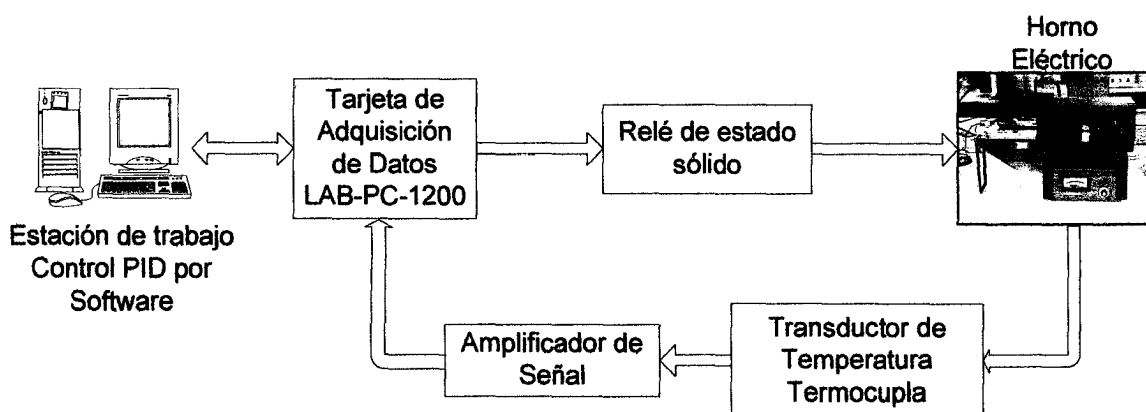


Fig. 4.6 Circuito implementado experimentalmente

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela  
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Seguidamente se presenta el programa elaborado en el cual se emplearon las librerías de adquisición de datos para I/O analógicas, archivos de I/O de datos digitales, objetos gráficos y todas aquellas expresiones necesarias para el desarrollo de las rutinas de control.

El programa consta de dos pantallas, siendo la primera de ellas el panel principal en la cual se identifican algunos datos de interés, así como dos botones de control que acceden al segundo programa cuya función es la de implementar la estrategia de control. La Fig. 4.7 muestra el panel principal y la Fig. 4.8 presenta el panel de configuración de control.

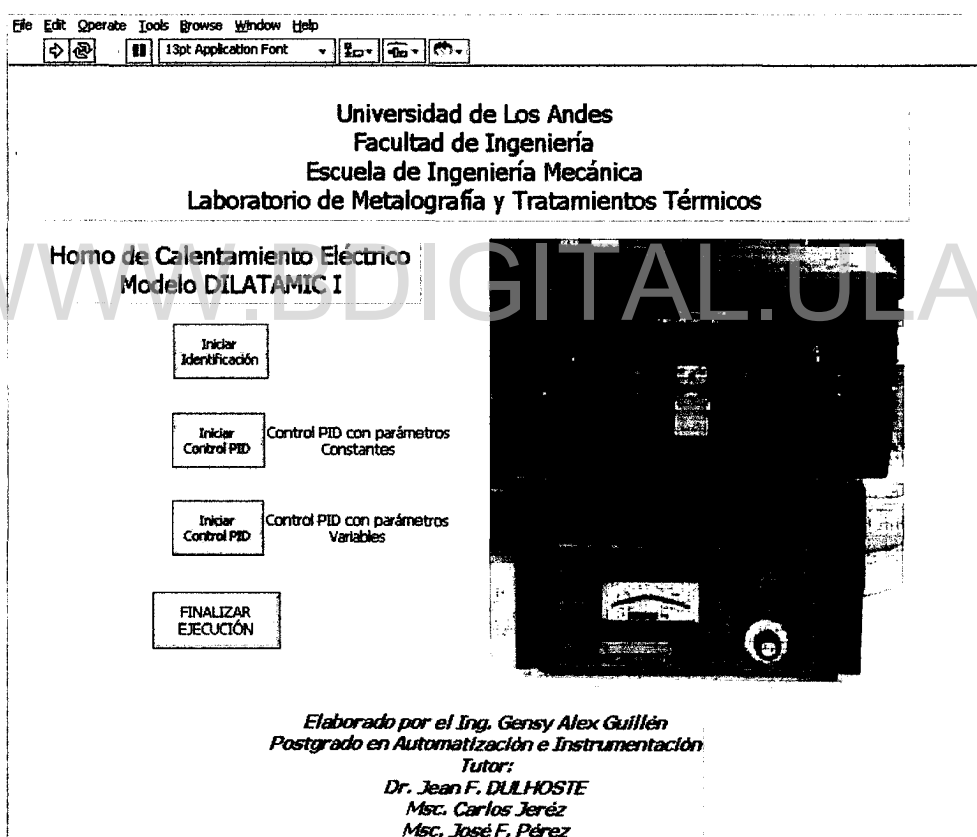


Fig. 4.7 Panel principal del programa elaborado

En el panel de configuración se puede visualizar la ruta donde se almacena toda la data tanto de entrada como de salida (Voltaje/Temperatura) desde el

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela  
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

momento en que se inicia la ejecución del programa; un conjunto de vectores donde se configura el perfil de temperatura deseado (temperatura de referencia o setpoint); controles digitales para ajustar el valor de temperatura máximo permitido (temperatura de protección) y el periodo de muestreo; también se visualizan varios indicadores de tiempo de duración del experimento y un indicador gráfico. Finalmente se tienen dos botones de control cuyas funciones son la de permitir acceder al panel de supervisión y control (Fig. 4.9) y la de abortar la ejecución del programa (Salir).

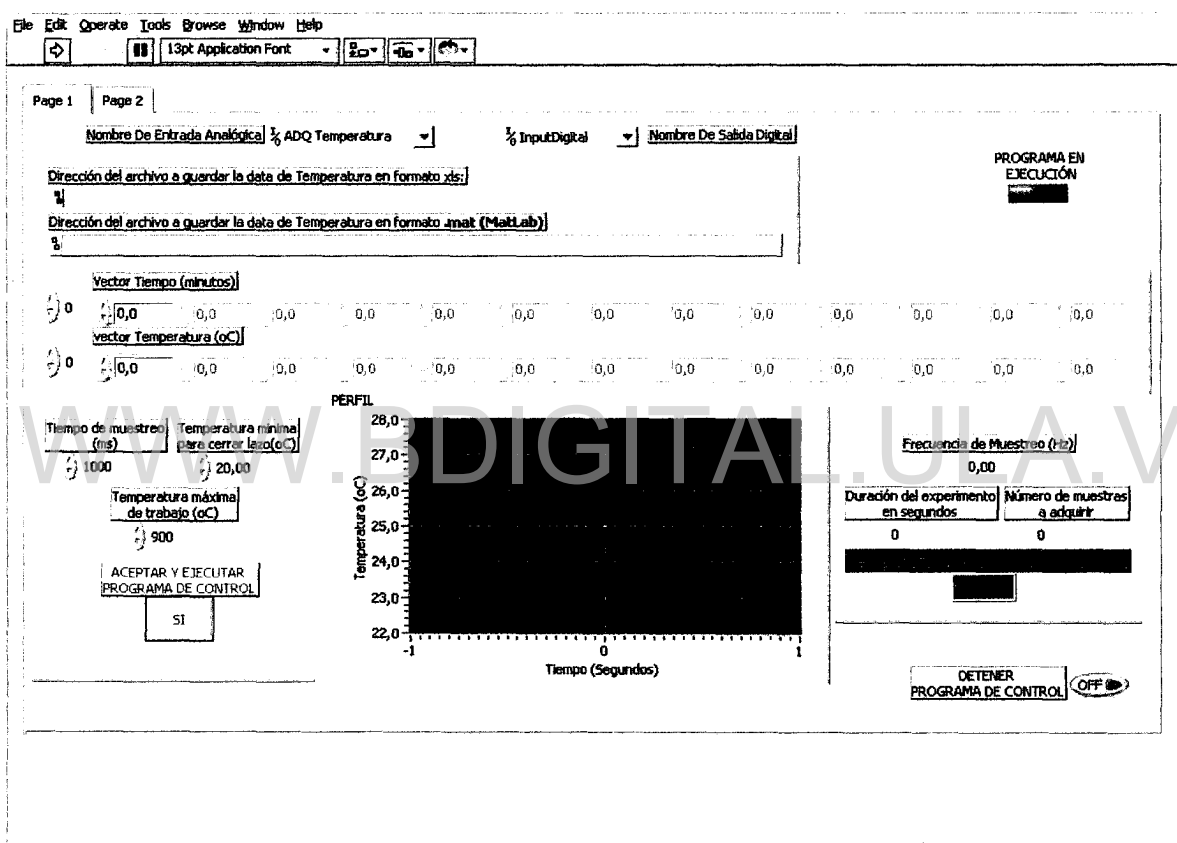


Fig. 4.8 Panel de configuración para aplicar control PID

La supervisión y control de la temperatura se visualiza en la Fig 4.9, donde se puede destacar un indicador gráfico de la temperatura del interior del horno y de la temperatura programada como perfil deseado, así como la salida del controlador y el voltaje en porcentaje que se está alimentando al proceso. Además se muestra el

correspondiente valor de cada parámetro del controlador a través de un indicador digital.

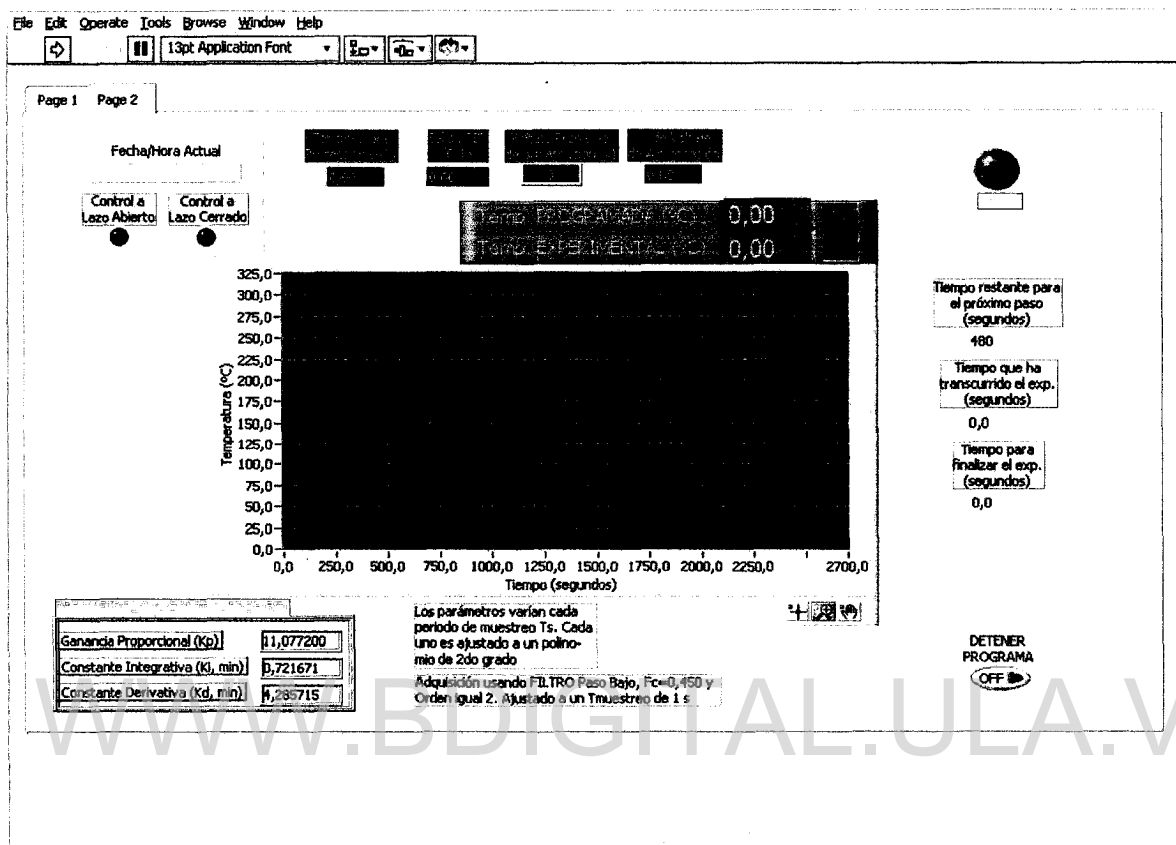


Fig. 4.9 Panel de supervisión y control de la temperatura del proceso térmico

En el Anexo D se presenta una descripción más detallada del programa elaborado para implementar una estrategia de control *PID* sobre la temperatura del interior de la cámara del horno eléctrico.

## 4.5 Resultados

Esta sección esta compuesta por dos etapas, en la primera de ésta se presentan los resultados alcanzados al experimentar el primer perfil de calentamiento (Fig. 4.10.a) con un controlador cuyos parámetros fueron utilizados de acuerdo a lo estipulado en la Tabla 4.2. La segunda etapa de esta sección muestra los resultados

obtenidos al experimentar el otro perfil seleccionado (Fig. 4.10.b) y empleando de forma similar los parámetros. Es de acotar que el primer perfil se inicia desde temperatura ambiente, tomando como base los resultados generados en la sección de simulaciones para un modelo con coeficientes variables en función de la temperatura programada como referencia (*Modelo ARX único*).

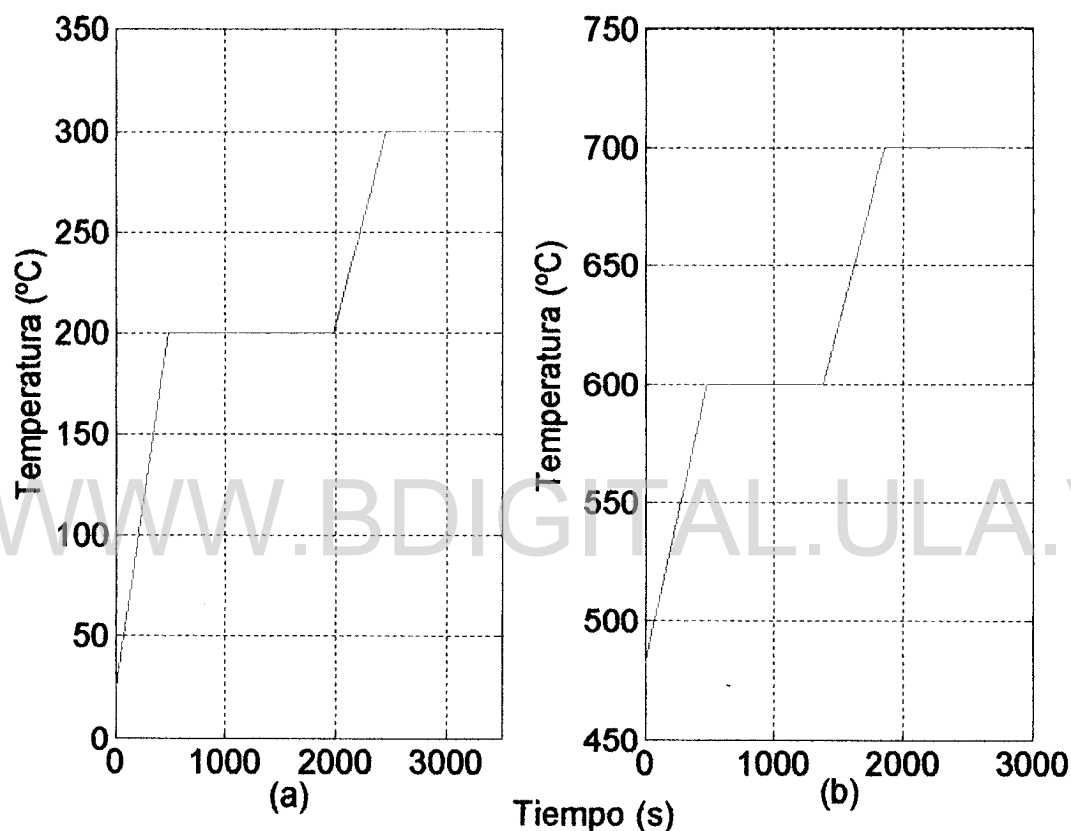


Fig. 4.10 Perfiles de calentamientos usados en los experimentos

#### 4.5.1 Perfil de calentamiento a baja temperatura

Como se mencionó, esta sección abarca sólo los resultados obtenidos al emplear como setpoint del controlador el perfil mostrado en la Fig. 4.10.a. El respectivo análisis de dichos resultados es presentado al final de los mismos.

#### 4.5.1.1 Control *PID* con parámetros variables y sin modificaciones (fase N° 1).

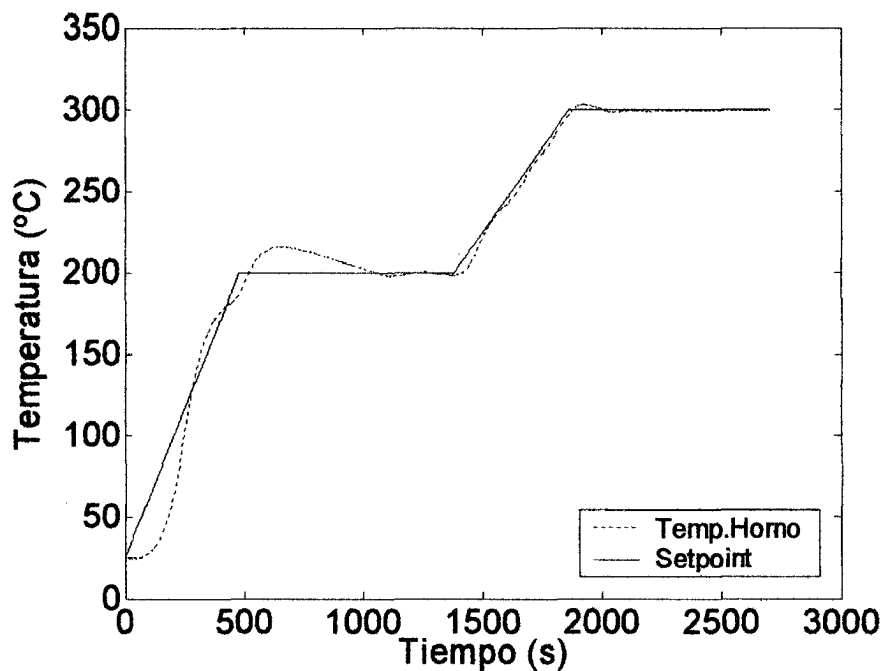


Fig. 4.11 Control con parámetros variables cada  $T_s$

#### 4.5.1.2 Control *PID* con parámetros variables. La banda proporcional es incrementada en un 100% (fase N° 2).

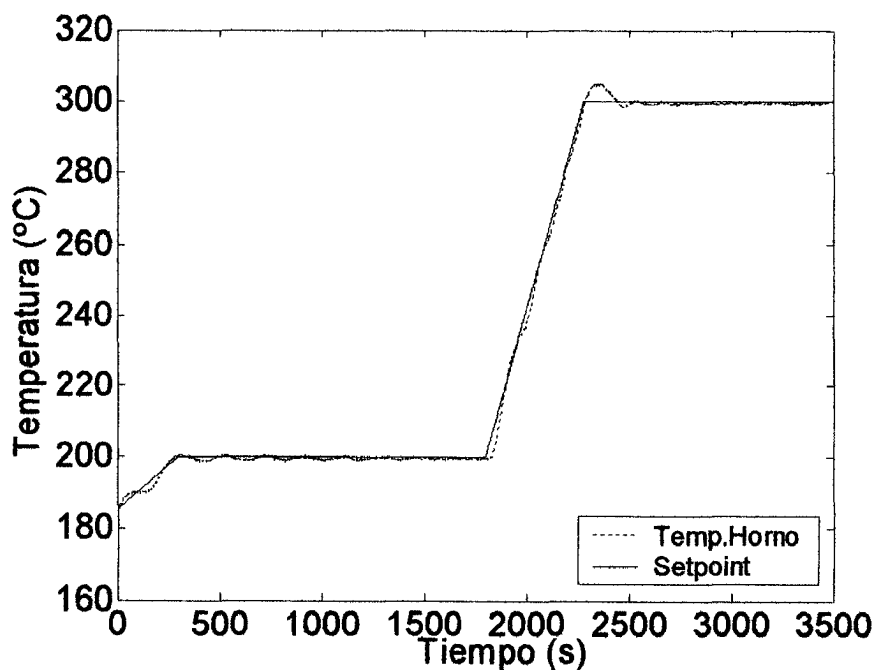


Fig. 4.12 Control con parámetros variables cada  $T_s$ .  $K_p$  es incrementado

4.5.1.3 Control *PID* con parámetros variables. La banda proporcional es disminuida en un 50% (fase N° 3).

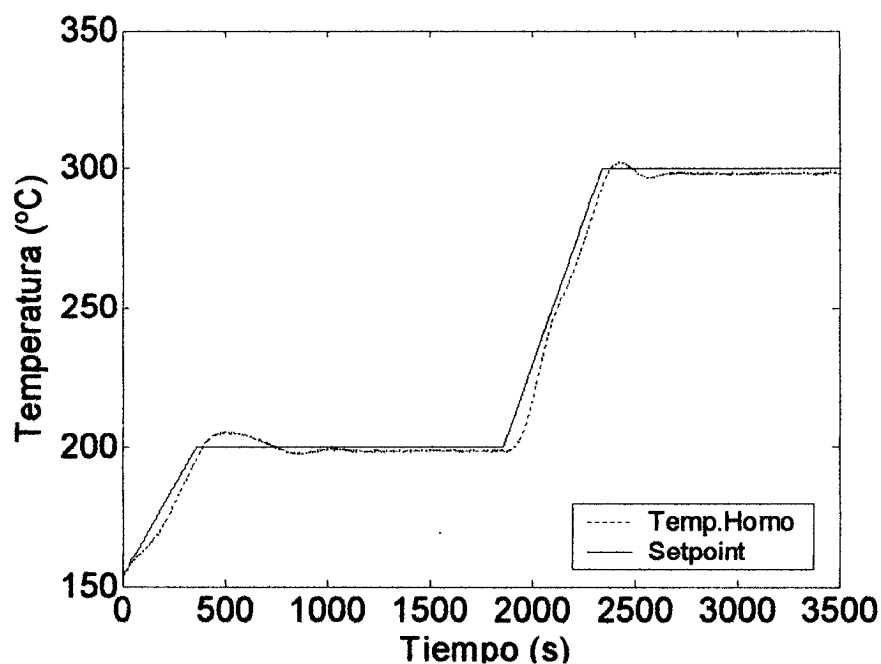


Fig. 4.13 Control con parámetros variables cada  $T_s$ .  $K_p$  es disminuido

4.5.1.4 Control *PID* con parámetros variables. La constante de integración es aumentada en un 100% (fase N° 4).

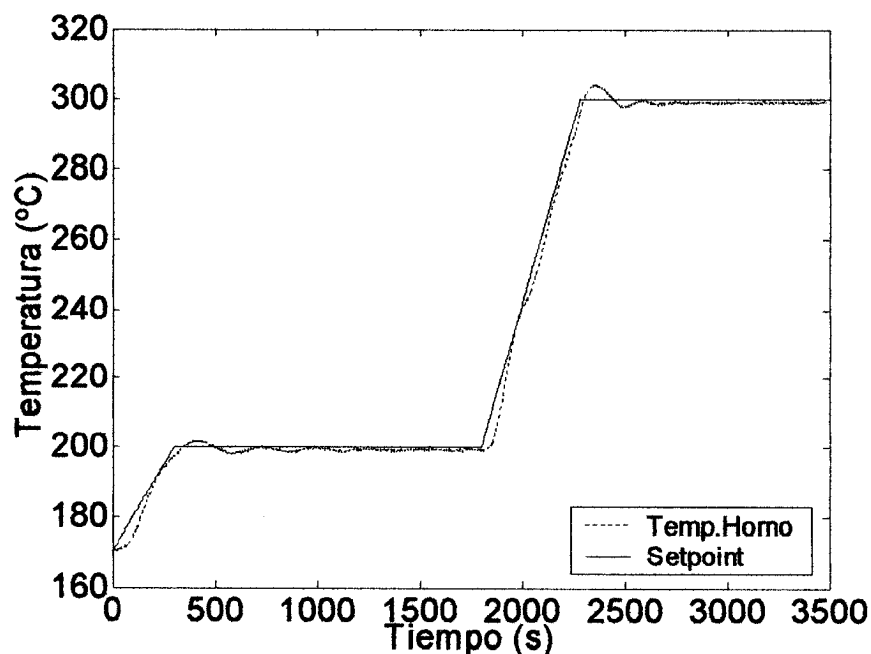


Fig. 4.14 Control con parámetros variables cada  $T_s$ .  $K_i$  es aumentado

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela  
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

4.5.1.5 Control *PID* con parámetros variables. La constante de integración es disminuida en un 50% (fase N° 5).

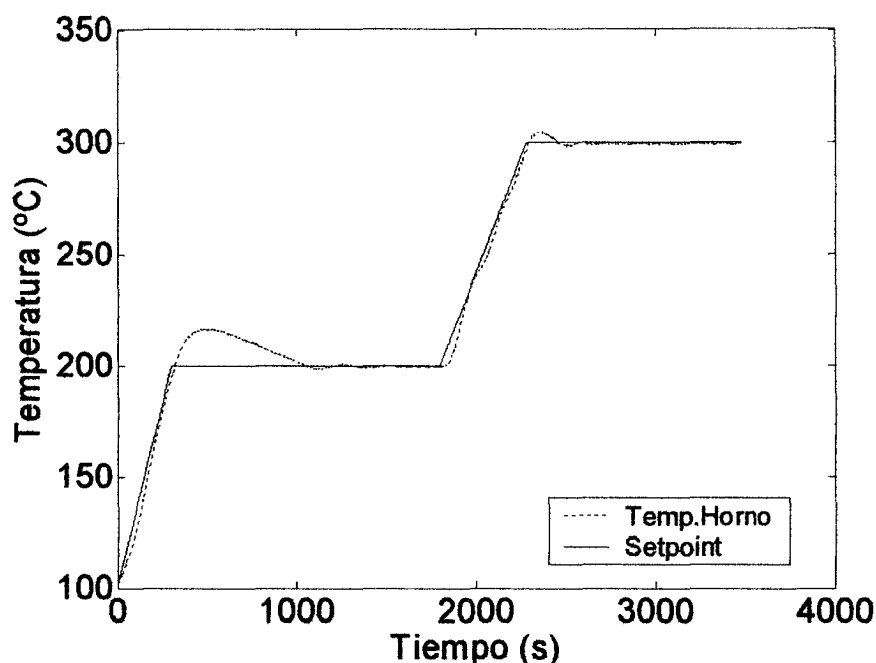


Fig. 4.15 Control con parámetros variables cada  $T_s$ .  $K_i$  es disminuido

4.5.1.6 Control *PID* con parámetros constantes (fase N° 6).

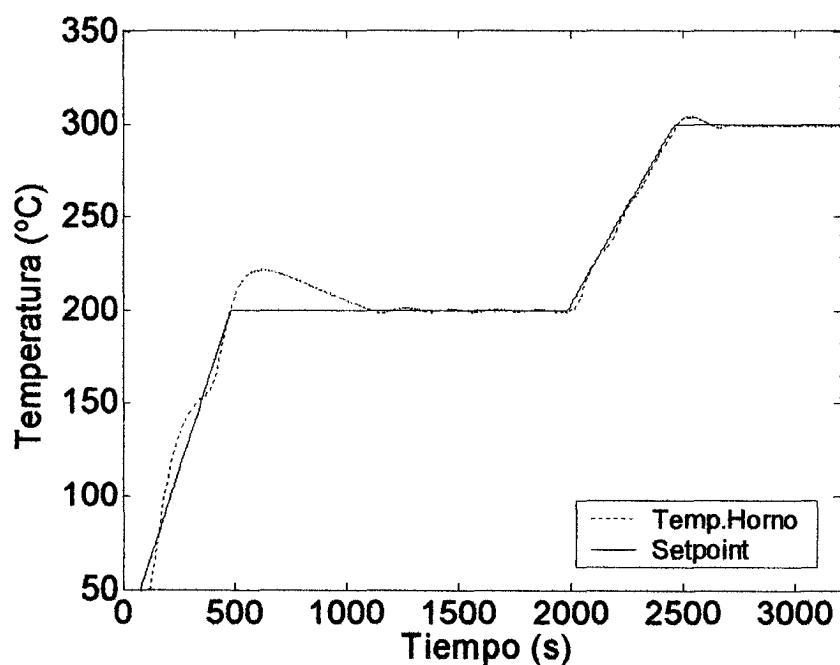


Fig. 4.16 Control con parámetros constantes. Valores promedios

Para una presentación más clara de los resultados, a continuación se presenta una tabla contentiva de algunos datos de interés como son: Temperatura promedio alcanzada una vez que la temperatura del interior del horno se estabiliza, banda en la cual se mantiene oscilando, modo en que se usaron los parámetros del *PID*, entre otros.

Tabla 4.3 Temperatura promedio alcanzada por el horno eléctrico a una temperatura de estabilización de 200°C y 300°C.

Parámetros del controlador	$T_{\text{estabilización}} (^{\circ}\text{C})$	$\bar{T}_{\text{Horno}} (^{\circ}\text{C})$	$B_{\text{oscilacion}} (^{\circ}\text{C})$	$(^{\circ}\text{C})$
$\text{PID} = f(T_{\text{Horno}})$	200	-	-	-
	300	299,17	1,45	$\pm 0,72$
$\text{PID} = f(T_{\text{Horno}})  _{K_p \uparrow}$	200	199,67	1,98	$\pm 0,96$
	300	299,52	1,69	$\pm 0,85$
$\text{PID} = f(T_{\text{Horno}})  _{K_p \downarrow}$	200	198,79	1,18	$\pm 0,60$
	300	299,28	1,47	$\pm 0,73$
$\text{PID} = f(T_{\text{Horno}})  _{K_i \uparrow}$	200	199,33	2,05	$\pm 1,02$
	300	299,10	1,73	$\pm 0,86$
$\text{PID} = f(T_{\text{Horno}})  _{K_i \downarrow}$	200	199,44	2,44	$\pm 1,22$
	300	299,19	1,76	$\pm 0,88$
$\text{PID} = \bar{K}_p, \bar{K}_i, \bar{K}_d$	200	199,75	2,64	$\pm 1,60$
	300	299,41	1,60	$\pm 0,81$

#### 4.5.1.1 Análisis de los resultados

Los distintos experimentos realizados, en los cuales los parámetros del controlador *PID* se utilizaron de acuerdo a la Tabla 4.2, permiten deducir las siguientes observaciones:

- Cuando los parámetros del controlador son utilizados sin ninguna modificación (ver Fig. 4.11), la respuesta del sistema presenta un comportamiento inadecuado

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela  
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

durante los primeros 1000 s, dado que experimenta un sobrecalentamiento una vez que la temperatura de referencia (setpoint) se encuentra en 200°C, pero posteriormente a este periodo de tiempo, la temperatura del horno mejora.

- Ya cuando la ganancia proporcional es incrementada, la respuesta del sistema es bastante aceptable, pues al observar la Fig. 4.12 puede notarse que dicha respuesta está más cercana al setpoint que la respuesta observada en la Fig. 4.11, no obstante, las oscilaciones han aumentado. Ahora cuando este mismo parámetro es disminuido, la respuesta se aleja del setpoint, es decir, el error en estado estacionario se hace más claro (ver Fig. 4.13), sin embargo las oscilaciones se reducen considerablemente, puesto que al realizar un ajuste de este tipo, la temperatura del proceso oscila en una banda mucho menor (ver Tabla 4.3) que el resto de los experimentos.

- Por su parte cuando es realizado un ajuste al parámetro  $K_i$  se consigue un buen resultado cuando éste es incrementado (ver Fig. 4.14) pero las oscilaciones a una temperatura de estabilización de 200°C aumentan considerablemente, ya que oscila en una banda de 2,05°C.

- Al emplear solo los valores promedios de los parámetros, las oscilaciones se mantiene todavía, atenuándose más aún, a una temperatura de 200°C, además se presenta un sobrecalentamiento, tal como se observa en la Fig. 4.16. De acuerdo a la Tabla 4.2, al utilizar como parámetros del controlador los valores promedios de éstos, la respuesta del proceso, cuando se experimenta un perfil a 200°C, oscila en una banda mucho mayor (2,64°C) que el resto de los resultados, pero estas oscilaciones disminuyen cuando se alcanza una temperatura de 300°C.

#### **4.5.2 Perfil de calentamiento a alta temperatura**

Esta sección presenta los resultados obtenidos al emplear como perfil de calentamiento el perfil mostrado en la Fig. 4.10.b. Es importante destacar que los experimentos se realizaron con el horno eléctrico ya calentado, dado que otros perfiles de menor temperatura habían sido experimentados anteriormente. Al igual que en la sección anterior el respectivo análisis es presentado al final de ésta.

4.5.2.3 Control *PID* con parámetros variables. La banda proporcional es disminuida en un 50% (fase N° 3).

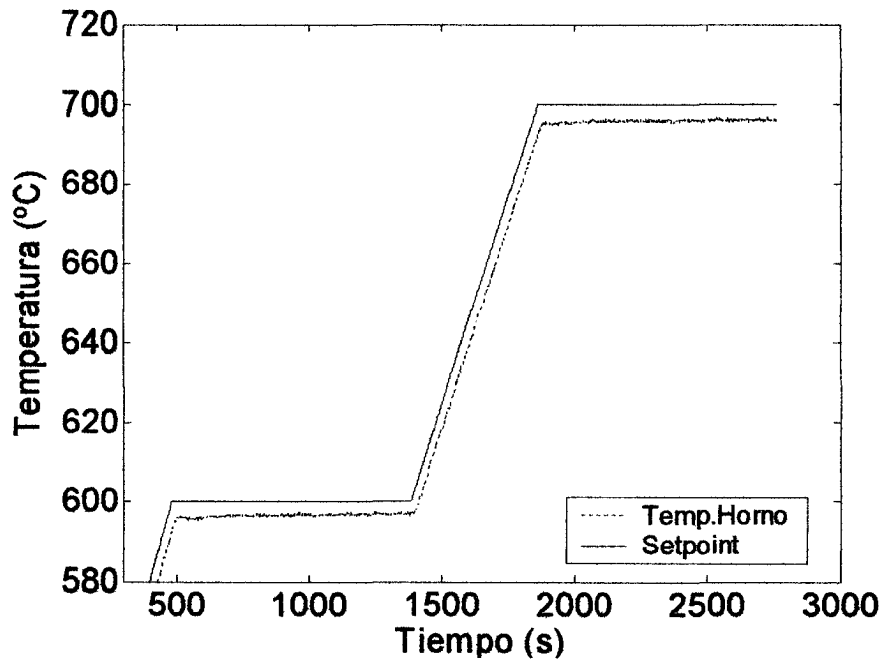


Fig. 4.19 Control con parámetros variables cada  $T_s$ .  $K_p$  es disminuido

4.5.2.4 Control *PID* con parámetros variables. La constante de integración es aumentada en un 100% (fase N° 4).

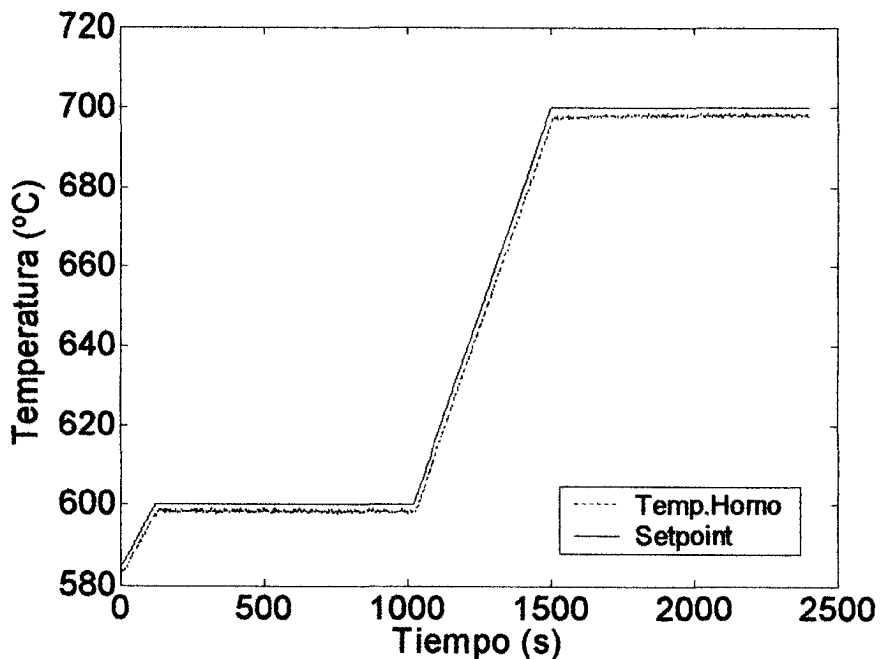


Fig. 4.20 Control con parámetros variables cada  $T_s$ .  $K_i$  es aumentado

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela  
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

4.5.2.5 Control *PID* con parámetros variables. La constante de integración es disminuida en un 50% (fase N° 5).

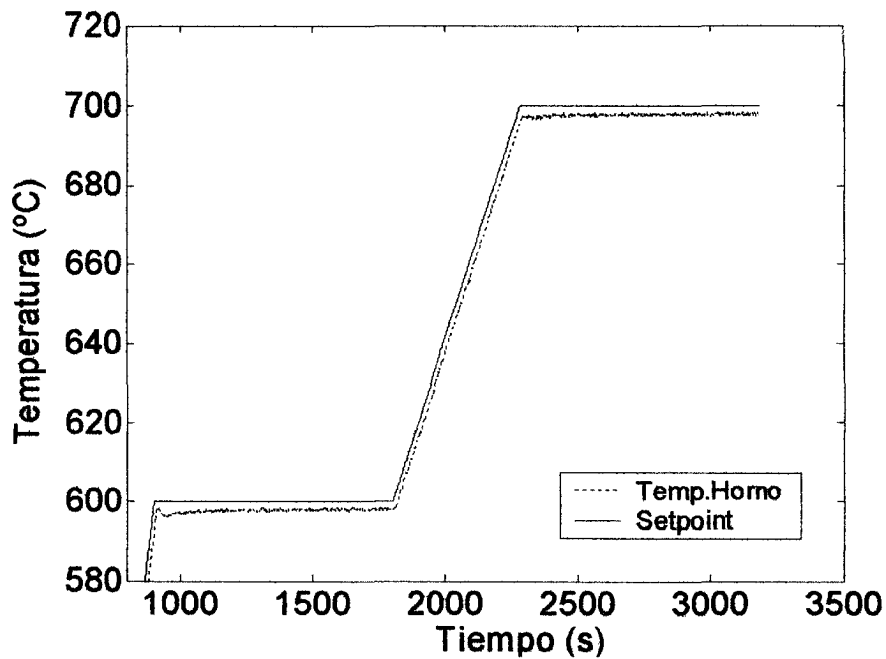


Fig. 4.21 Control con parámetros variables cada  $T_s$ .  $K_i$  es disminuido

4.5.2.6 Control *PID* con parámetros constantes (fase N° 6).

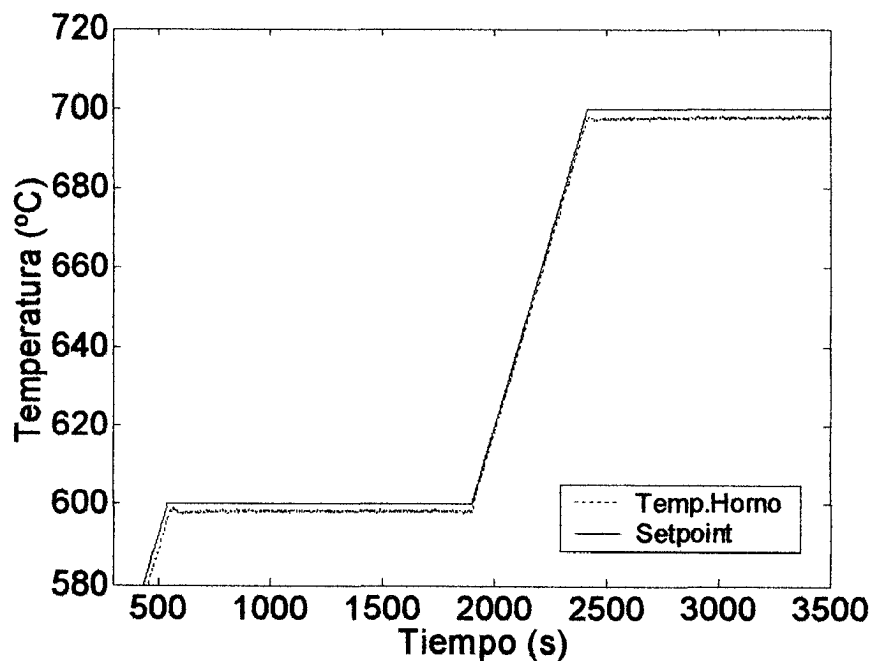


Fig. 4.22 Control con parámetros constantes. Valores Promedios.

La tabla dada a continuación detalla, al igual que la Tabla 4.3, datos de interés para la evaluación de la estrategia de control implementada a temperaturas de experimentación mayores.

Tabla 4.4 Temperatura promedio alcanzada por el horno eléctrico a una temperatura de estabilización de 600°C y 700°C

Parámetros del controlador	$T_{\text{estabilización}} (^{\circ}\text{C})$	$\bar{T}_{\text{Horno}} (^{\circ}\text{C})$	$B_{\text{oscilacion}} (^{\circ}\text{C})$	$(^{\circ}\text{C})$
PID = $f(T_{\text{Horno}})$	600	598,46	1,26	$\pm 0,64$
	700	698,23	1,43	$\pm 0,73$
PID = $f(T_{\text{Horno}})  _{K_p \uparrow}$	600	599,27	1,69	$\pm 0,83$
	700	699,03	1,83	$\pm 0,91$
PID = $f(T_{\text{Horno}})  _{K_p \downarrow}$	600	596,92	1,18	$\pm 0,59$
	700	696,23	1,75	$\pm 0,87$
PID = $f(T_{\text{Horno}})  _{K_i \uparrow}$	600	598,50	1,63	$\pm 0,82$
	700	698,02	1,45	$\pm 0,72$
PID = $f(T_{\text{Horno}})  _{K_i \downarrow}$	600	598,12	1,25	$\pm 0,63$
	700	697,86	1,42	$\pm 0,71$
PID = $\bar{K}_p, \bar{K}_i, \bar{K}_d$	600	598,31	1,27	$\pm 0,60$
	700	697,82	1,39	$\pm 0,70$

#### 4.5.2.1 Análisis de los resultados

Los resultados, al momento de experimentar un perfil de temperatura mayor, muestran de forma clara que el error en estado estacionario se hace más notable, más aún cuando la ganancia proporcional es disminuida. Esto puede detallarse en la Tabla 4.4, donde al realizar un ajuste de este tipo la temperatura del proceso se aleja sustancialmente del setpoint. Ahora al realizar un ajuste en forma incremental al mismo parámetro ( $K_p$ ), el sistema de control mejora la respuesta del proceso (ver Fig. 4.18), dado que el error en estado estacionario se hace más pequeño en

comparación con el resto de los resultados. Otra observación importante es que las distintas respuestas obtenidas del proceso presentan la característica de que oscilan aproximadamente en una misma banda una vez que éstas se han estabilizado.

En forma general puede decirse entonces que la estrategia de control implementada permite conseguir resultados aceptables ya que la respuesta del proceso no oscila más de  $\pm 1^\circ\text{C}$ . Por lo tanto, para obtener buenos resultados experimentales al momento de ensayar un perfil de calentamiento a elevada temperatura, la mejor opción es implementar un controlador cuyos parámetros sean variables en función de la temperatura del proceso y sólo incrementar la ganancia proporcional ( $K_p \uparrow$ ), pues aseguraríamos que el valor del error en estado estacionario este más cercano a cero.

## 4.6 Conclusiones

Como se vio a lo largo del presente capítulo, el control del proceso térmico estuvo compuesto básicamente por dos etapas esenciales, en la cual, una de éstas, se centró en el estudio y análisis de la estrategia de control *PID* mediante la simulación de los modelos matemáticos obtenidos por identificación y cuyos resultados mostraron que el uso de los diferentes juegos de parámetros (calculados a través de las formulas de sintonización de Ziegler & Nichols), por medio de un algoritmo de cambio, permiten un buen control sobre la temperatura estimada por los modelos paramétricos, sobre todo cuando es empleado el *modelo ARX único*, a pesar que el perfil de temperatura se inicia desde temperatura ambiente. Adicionalmente se analizaron los resultados obtenidos al emplear todos los modelos *ARX* de forma simultanea y el modelo *ARX* con coeficientes ( $a_i, b_i$ ) variables, de los cuales se derivó que cuando los coeficientes del modelo varían en función de la temperatura programada como setpoint, se alcanzan mejores resultados.

La otra etapa se orientó al diseño e implementación real del sistema de control bajo el lenguaje de programación seleccionado para esta tarea y cuyas evaluaciones

demonstraron que el lazo implementado a la temperatura del interior de la cámara del horno de calentamiento eléctrico cumple con las expectativas planteadas al inicio de la investigación, ya que al emplear dos perfiles distintos de calentamiento, el controlador logra mantener la temperatura cercana a la referencia (setpoint). Para ello se llevaron a cabo diversos experimentos prestando mayor atención en los parámetros del controlador, de tal forma que se apostó al uso de parámetros variables cada periodo de muestreo y, adicionalmente, realizando ciertos ajustes finos en dos de éstos,  $K_p$  y  $K_i$ . Como resultado se obtuvo un control con un comportamiento aceptable, mejor aún cuando la ganancia proporcional es ajustada en forma incremental. Es bueno mencionar que los ajustes en estos parámetros se hicieron siguiendo las bases teóricas contenidas en las fuentes bibliográficas, pues al analizar en principio el comportamiento del controlador sin modificar sus parámetros, éste posee un error de estado estacionario, de modo que si se desea eliminarlo la solución es hacer un ajuste fino, bien sea, sobre la banda proporcional o sobre la constante de integración.

En resumen, tal como se mencionó anteriormente, el sistema de control presenta un mejor comportamiento cuando es incrementado el parámetro  $K_p$ , permitiendo esto decir que un ajuste un poco mayor, podría permitir mejoras en el funcionamiento del controlador puesto que se reduciría el error de estado estacionario a un valor más pequeño (cerca de cero). Por otro lado esta estrategia de control permite experimentar diferentes perfiles de temperaturas en un rango óptimo de funcionamiento que va desde 250°C hasta los 800°C. No obstante, si se desea experimentar algún perfil menor, es preferible precalentar inicialmente el horno eléctrico hasta que éste alcance una temperatura promedio de 200°C, ya que así se evitaría un sobrecalentamiento mucho mayor de la temperatura en el interior de la cámara con respecto a la temperatura de referencia, tal como se reflejó en los experimentos realizados a bajas temperaturas (Fig. 4.11. Fig. 4.15. Fig. 4.16).

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### Conclusiones

Los primeros resultados mostraron que, mediante el uso de los Sistemas de Identificación, específicamente un método de identificación paramétrico, es posible obtener un modelo lineal de un horno de calentamiento eléctrico, el cual es utilizado para el estudio y análisis de las dilataciones térmicas, que experimenta una pieza de acero o aluminio cuando es sometida a un perfil de calentamiento cualquiera. Para tal efecto, se elaboró un programa donde se logró interconectar el dispositivo de medición de la temperatura del interior de la cámara del horno, unido al circuito integrado de amplificación y el elemento final de control a una tarjeta de adquisición de datos, por intermedio de una entrada y salida analógica. Éste se diseñó para generar una señal de voltaje en forma de pulsos, con la característica fundamental de ser aleatoria, además para adquirir, almacenar, supervisar y presentar el comportamiento en el horno eléctrico durante el experimento.

Con la aplicación del método paramétrico de identificación se obtuvieron siete diferentes modelos *ARX* de 4to orden, cada uno con un punto de operación o temperatura promedio de trabajo en particular, los cuales se simularon y validaron utilizando como señal de entrada una señal de voltaje simulada e igual a la empleada en los experimentos de identificación. De estas simulaciones se dedujo el uso de un modelo *ARX* único pero cuyos coeficientes son variables en función de la temperatura de trabajo.

La implementación de la estrategia de control *PID* tanto en los siete modelos de identificación como en el modelo único demostró que con los distintos juegos de parámetros ( $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ ) obtenidos mediante las técnicas de sintonización de Ziegler &

Nichols se adquieren muy buenos resultados, principalmente cuando se usa el modelo con coeficientes variables. Es de acotar que el empleo de los siete modelos de manera simultánea arroja mejores resultados cuando cada uno de ellos es utilizado dentro de su rango de funcionamiento óptimo.

Una vez realizada las simulaciones respectivas de la estrategia de control, se realizó la implementación real sobre el horno físico a través un programa con el cual se integró de nuevo el transductor de temperatura y el elemento final de control a la tarjeta de adquisición de datos, por medio de una entrada analógica y una salida digital. El programa elaborado permitió evaluar el comportamiento del controlador ante variados perfiles de calentamiento, programados como setpoint. Estas evaluaciones demostraron que, ajustando los parámetros del controlador, obtenidos en la etapa anterior, a una expresión matemática de segundo orden, se adquieren resultados bastante aceptables cuando se experimentan perfiles de calentamientos, dentro de un rango de temperatura que va desde los 250°C hasta 900°C, a pesar de la existencia de un error en estado estacionario de aproximadamente 1°C. Estos resultados mejoraron cuando la ganancia proporcional del controlador fue incrementada, ya que el valor de este error se redujo, en comparación con el valor que se obtiene cuando los parámetros son empleados sin modificación alguna. Además, el rango de oscilación de la temperatura del horno, una vez que se ha estabilizado, está en el orden de  $\pm 1^\circ\text{C}$ , lo que representa un comportamiento óptimo del controlador, teniendo en cuenta el rango de medición del transductor de temperatura.

En resumen, la estrategia de control, basado en un controlador *PID*, se comporta con gran fidelidad de acuerdo a los resultados y análisis presentados a lo largo de todo el desarrollo del presente trabajo de investigación.

Finalmente con la ejecución de este trabajo de investigación, hemos demostrado la factibilidad de utilizar una tarjeta de adquisición de datos como dispositivo de interconexión entre el proceso térmico y el computador personal. Así

mismo, observamos que una de las ventajas al usar el *PC* como estación de trabajo, es que ofrece mayor facilidad al momento de implementar cualquier sistema de control por software, ya que se reducen considerablemente los costos comparados con la inversión económica que conllevaría la implementación real de controladores físicos.

## Recomendaciones para futuras investigaciones

El inicio de este trabajo de investigación estuvo centrado en el ajuste de un modelo paramétrico, específicamente una estructura de modelo *ARX*, a la data experimental del horno eléctrico y cuyas simulaciones mostraron que un modelo con una estructura de este tipo, aporta resultados bastante aceptables. Tratar de ajustar los mismos datos del proceso térmico a otra estructura, por ejemplo, un modelo *ARMAX*, *OE*, *BJ*,..., podrían mejorar los resultados de simulación, además, emplear otro criterio para determinar los coeficientes del modelo, sería otra opción.

Otro tópico, en la cual se basó esta investigación, fue la búsqueda de los parámetros más adecuados para el controlador *PID* implementado tanto a nivel de simulaciones como a nivel experimental, y donde se optó por las ecuaciones de sintonización dadas por Ziegler & Nichols. Otras ecuaciones para sintonizar controladores de este tipo también son conocidas, las cuales utilizándolas para esta investigación en particular, permitiría efectuar comparaciones con los resultados obtenidos.

Los diferentes ajustes realizados a los distintos parámetros del controlador, arrojaron mejores resultados cuando la ganancia proporcional es incrementada. Un ajuste un poco más cauteloso de los parámetros del controlador, en especial del parámetro  $K_p$  podría conllevar a reducir la desviación o error en estado estacionario a un valor mucho menor que el alcanzado en estos resultados.

De manera general, el sistema de control basado en una estrategia de control *PID* implementado a la temperatura del interior de la cámara del horno se comporta con gran fidelidad de acuerdo a los resultados y análisis presentados, pero se podrían implementar nuevas formas de control en aras de mejorar su comportamiento en cuanto a precisión y velocidad de respuesta, tanto en régimen transitorio como en régimen permanente.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ljung. L., 1.999, **System identification-Theory for the user**, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2<sup>nd</sup> edition.
- [2] Ogata, K., 1.983, **Ingeniería de Control Moderna**, Prentice Hall, Segunda edición.
- [3] Letsame, P., Rathaba, 2.005, **Model Fitting for electric arc furnace refining**, Tesis de Maestría en Ingeniería (Ingeniería Electrónica), Universidad de Pretoria.
- [4] Torsten, Soderstrom & Petre, Stoica, 1.989, **System Identification**, Prentice Hall
- [5] Jesús E., Rodríguez A., 1.998, **Introducción a la Ingeniería del control automático**, McGraw Hill, México.
- [6] Zadeh, L., 1.956, "**On the identification problem**", IRE, Transactions on Circuit Theory, 3. Pp. 277-281.
- [7] B. R., Gainer, 1978, "**General System Identification: Fundamentals and Results**", *Applied General Systems Research*, Pp. 91-104. New York, USA.
- [8] Jean, F. Dulhoste, 1.995, "**Comparación de métodos de Identificación basados en la respuesta impulsiva y al escalón**", Trabajo de Ascenso, Universidad de los Andes, Mérida-Venezuela.
- [9] Balázs, Vödrös and István Kollár, 2.003, "**Identification of a Furnace from Quasi-Periodic Measurements**", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 32, No 1.
- [10] J. Garandet, 2.002, "**Identification of furnace thermal characteristics from resistance measurements**", International journal of heat and mass transfer, Vol. 45, 1045-1054.

- [11] Julio, Astigarraga, 1.994, **Hornos Industriales de Resistencias**, McGraw Hill.
- [12] Guillermo, Gonzales, 2.001, **Aplicación de electrotecnologías en procesos industriales de calentamiento**, Boletín IIE del Instituto de investigaciones eléctricas, Marzo-Abril, México.
- [13] **Control de Sistemas Continuos**, McGraw Hill, Madrid, 1.996.
- [14] Richard, Dort, 1.978, **Sistemas Automáticos de Control**, Fondo Educativo Interamericano, Bogotá.
- [15] Smith & Corripio, 2002, **Control Automático de Procesos**, Editorial Limusa, Grupo Noriega Editores, México, DF.
- [16] Germán, Alba, 1998, "**Control de Temperatura PID vía el puerto paralelo del PC LIC-PCTC**", Trabajo de Ascenso, Universidad de los Andes, Mérida-Venezuela.
- [17] G. Dosa, A. Kepes, and T. Ma., 1996, "**Computer Control of High Power Electric Furnace**", Challenges in Process Intensification Symposium, August 24 to 29, Montreal, Quebec, Canada.
- [18] Benoit, Boulet, Gino Lalli, and Mark Ajersch, 2.003, "**Modeling and Control of a Electric Arc Furnace**", IEEE, Proceedings of the American Control Conference, June 4-6, Denver, Colorado.
- [19] Bill, Gough, and Don, Matovich, 2004, "**Predictive-Adaptive Temperature Control of Molten Glass**", Presented at the World Batch Forum North American Conference, May 16-19, Chicago, IL.
- [20] National Instruments, 1.998, **DAQ Lab-PC-1200/AI. User Manual**, Texas, U.S.A.
- [21] Analog Devices Inc., 1.999, **Monolithic Thermocouple Amplifiers with Cold Junction Compensation**, One Technology Way, P.O. Box9106, Norwood, U.S.A.

[22] Kleisinger, Gretchen, 1.999, "**Adquisición y Análisis de ECG con Instrumentos Virtuales**", Facultad de Ciencias Exactas, UNNE, Argentina.

## Otras bibliografías consultadas

1. Ljung, L., 1.994, **Modeling of Dynamic Systems**, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.
2. Antonio, Creus, 1.998, **Instrumentación Industrial**, Alfaomega Grupo Editor, Pitágoras 1139, Col. Del Valle, México, D. F.
3. José F., Pérez A., 2.001, "**Automatización de un Dilatómetro con Sistema de Control y Supervisión**", Postgrado en Automatización e Instrumentación, Universidad de los Andes, Mérida-Venezuela.
4. José F., Pérez A., 2.002, "**Automatización del Espectrofotómetro de Absorción Atómica, Varian AA-1475, para la simplificación de las operaciones de análisis**", Tesis de Maestría, Postgrado en Automatización e Instrumentación, Universidad de los Andes, Mérida-Venezuela.
5. Edgar A., Camargo C., 2.002, "**Automatización de la Técnica de Kelvin**", Tesis de Maestría, Postgrado en Automatización e Instrumentación, Universidad de los Andes, Mérida-Venezuela.

## **Anexo A**

**Manual de especificación de la tarjeta de adquisición Lab-PC 1200 de la National Instruments**

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Licencia Creative Commons:  
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela  
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

# Low-Cost Multifunction I/O – 100 kS/s, 12-Bit, 8 Analog Inputs

## 1200 Family

PCI-1200  
DAQCard-1200  
Lab-PC-1200  
Lab-PC-1200AI  
DAQPad-1200

### Analog Inputs

8 single-ended, 4 differential channels  
100 kS/s sampling rate  
12-bit resolution

### Analog Output (not for Lab-PC-1200AI)

2 channels, 12-bit resolution

### Digital I/O

24 (5 V/TTL) lines in 8-bit ports

### Counter/Timers

Three, 16-bit resolution

### Triggering

Digital

### Driver Software

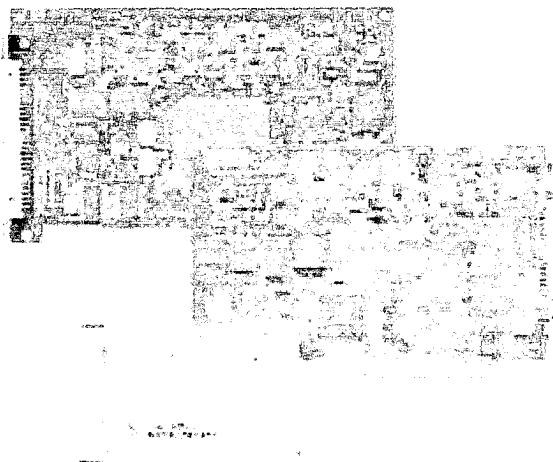
NI-DAQ  
Windows 2000/NT/9x  
Mac OS\*  
\*not for all hardware,  
refer to page 192

### Application Software

LabVIEW  
LabWindows/CVI  
ComponentWorks  
VirtualBench  
Measure  
BridgeVIEW  
Lookout

### Calibration Certificate Included!

(refer to page 216)



Make sure you consider our  
new low-cost 12-bit E Series  
products – refer to page 239.

Bus	Analog Inputs	Resolution	Sampling Rate	Input Range	Analog Outputs	Resolution	Output Rate	Output Range	Digital I/O	Counter/Timers	Triggers
PCI, PCMCIA, ISA, Parallel Port	8 SE/4 DI	12 bits	100 kS/s	up to ±5 V	2	12 bits	1 kS/s	±5 V	24	3, 16-bit	Digital

\*No analog outputs on Lab-PC-1200AI

Table 1. 1200 Family Channel, Speed, and Resolution Specifications (refer to page 314 for more detailed specifications)

## Overview

The 1200 Family devices are low-cost, multifunction I/O devices with up to 100 kS/s, 12-bit performance on 8 single-ended or 4 differential analog inputs. The 1200 Family features digital triggering capability; three 16-bit, 8 MHz counter/timers; two 12-bit analog outputs; and 24 digital I/O lines. The 1200AI does not include the two analog outputs.

## Hardware Analog Input

The 1200 Family has eight single-ended or 4 differential 12-bit analog input channels. The voltage input range is software programmable for 0-10 V (unipolar) or ±5 V (bipolar). A software-programmable gain amplifier has gain selections of 1, 2, 5, 10, 20, 50, or 100.

The single-channel sampling rate of the ADC is 100 kS/s. The PCI, DAQCard, and Lab-PC versions can sustain this rate, but the DAQPad cannot. The sustainable data transfer rate to a standard PC parallel port is 25 kS/s (depending on your computer). If you need an external solution with faster sampling, consider the DAQPad-6020E for USB, (100 kS/s, page 241) and the DAQPad-6070E for IEEE 1394 (1.25 MS/s, page 226). When scanning multiple channels, the maximum sampling rate for all 1200 family products is 83.3 kS/s at a gain of 1.

Data acquisition with the 1200 Family devices is available in three modes: 1) continuous acquisition of a single channel, 2) multichannel acquisition with continuous scanning, or 3) multichannel acquisition with interval scanning with a resolution of 1  $\mu$ s.

The 1200 Family devices have two hardware triggering modes – pretrigger mode and posttrigger mode. In pretrigger mode, the device collects samples until a trigger is received at the external trigger input, and then continues to collect a specified number of samples. In posttrigger mode, the device collects a specified number of samples after it receives a trigger.

## Analog Output

The 1200 Family has two double-buffered 12-bit DACs that are connected to two analog output channels. You can independently configure each channel through software for unipolar (0-10 V) or bipolar (±5 V) operation. The resolution of the 12-bit DAC is 2.44 mV in both polarities.

ACH0	1	2	ACH1
ACH2	3	4	ACH3
ACH4	5	6	ACH5
ACH6	7	8	ACH7
ACH8	9	10	DACTOUT <sup>1</sup>
AISENSE/AIN0	11	12	DACTOUT <sup>1</sup>
AGND	13	14	PA0
DGND	15	16	PA2
PA1	17	18	PA4
PA3	19	20	PA6
PA5	21	22	PA8
PA7	23	24	PA2
PB3	25	26	PB4
PB5	27	28	PB6
PB7	29	30	PC0
PC1	31	32	PC2
PC3	33	34	PC4
PC5	35	36	PC6
PC7	37	38	EXTTRIG
EXTUPDATE <sup>1</sup>	39	40	EXTCONV <sup>1</sup>
OUTB0	41	42	GATB0
OUTB1	43	44	GATB1
CLKB1	45	46	OUTB2
GATB2	47	48	CLKB2
+5V	49	50	DGND

<sup>1</sup>Not available on Lab-PC-1200AI

Figure 1. 1200 Family I/O Connector

# Low-Cost Multifunction I/O<sup>4</sup>— 100 kS/s, 12-Bit, 8 Analog Inputs

1200 Family

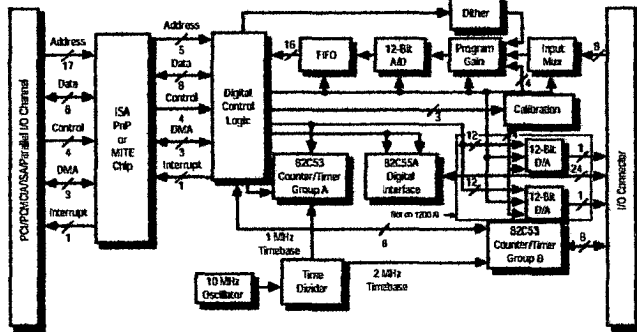


Figure 2. 1200 Family Hardware Block Diagram

## Self-Calibration

The analog inputs and outputs of the 1200 Family have self-calibration circuitry to correct for gain and offset errors. You can use the permanently-stored factory calibration constants or store additional sets of constants for different operating conditions in the user-modifiable section of an EEPROM on the device.

## Digital I/O

The 1200 Family devices have 24 digital I/O lines that are 5 V/TTL compatible and configurable as three 8-bit ports for input, output, bidirectional, or handshaking modes. The digital output ports of the 1200 series can sink 2.5 mA on each line.

## Counter/Timer

The 1200 Family uses two 82C53 counter/timer integrated circuits, each containing three independent 16-bit counter/timers. One 82C53 is dedicated for A/D and D/A timing. The three counters on the other 82C53 are available for general time-related functions, such as clock output, pulse output, and event counting. Of these three counters, one may be required for timing of analog I/O, and one has a built-in 20 MHz source clock.

## I/O Connector

The I/O connector is a 50-pin male ribbon cable connector diagrammed in Figure 1. ACH<0..7> are eight analog input channels. DAC0OUT and DAC1OUT are the two analog output channels. EXUPDATE, EXTCONV, and EXTTRIG are TTL lines through which you can externally control analog I/O. CLKB<1..2>, GATB<0..2>, and OUTB<0..2> are the clock, gate, and output of the user-available counters. PA<0..7>, PB<0..7>, and PC<0..7> are the three 8-bit digital I/O ports.

## DAQPad-1200 Parallel Port Interface

The DAQPad-1200 includes a 1 m parallel port cable with two 25-pin D-Sub connectors. The DAQPad-1200 rear panel includes two parallel port connectors, Port A for connection to the PC parallel port, and Port B, for transparent pass-through connection to any other standard parallel port device.

## DAQPad-1200 Power

The DAQPad-1200 is powered by any 9 to 42 VDC source. With the AC adapter unit included, you can power the DAQPad-1200 from any standard 120 VAC or 230 VAC source.

The optional BP-1 rechargeable battery pack is the same size as the DAQPad-1200 and powers it for 11 hours. The charger unit included with the BP-1 is not CE certified.

## BNC and Breadboard Accessories

The BNC-2081 accessory has labeled BNC connections for the analog signals of the 1200 Family. The SC-2071 and SC-2072 are breadboard accessories with labeled and numbered screw terminals, respectively; the 1200 device must be in single-ended mode to use the SC-2071.

Make sure you consider our new low-cost E Series products – refer to page 239.

## Ordering Information

### 1200 Family

#### PCI-1200 and NI-DAQ for

Windows 2000/NT/9x.....777386-01  
Mac OS.....777097-01

#### DAQCard-1200 and NI-DAQ for

Windows 2000/NT/9x.....777087-01  
Mac OS.....777087-02

Lab-PC-1200.....777227-01

Lab-PC-1200AI.....777292-01

#### DAQPad-1200 for Parallel Port with AC adapter

U.S. 120 VAC.....776895-01  
Universal Euro 240 VAC.....776895-31  
United Kingdom 240 VAC.....776895-06

Includes NI-DAQ for Windows 2000/NT/9x on CD unless otherwise noted  
See pages 192 and 210 for more details.

#### BP-1 rechargeable battery pack with charger

120 VAC.....776896-01  
240 VAC.....776896-31

BNC-2081.....776599-90

SC-2071.....776358-91

SC-2072.....776358-92

## Example Configurations

Family	DAQ Board	Cable (page 297)	Accessory (page 297)
1200	PCI-1200	NB1 (180524-10)	CB-S0LP (777101-01)
	DAQCard-1200	PR50-50F (182799-01)	CB-S0LP (777101-01)
	Lab-PC-1200	NB1 (180524-10)	CB-S0LP (777101-01)
	Lab-PC-1200AI	NB1 (180524-10)	CB-S0LP (777101-01)
1200AI	DAQPad-1200	NB1 (180524-10)	CB-S0LP (777101-01)

For more detailed cable and accessory options, refer to pages 286-299

Data Acquisition

# Specifications

## 1200 Family

These specifications are typical at 25 °C unless otherwise stated

### Analog Input

#### Input Characteristics

Number of channels	8 single-ended, or 4 differential, software selectable
Type of ADC	Successive approximation
Resolution	12 bits, 1 in 4,096
Maximum sampling rate	
PCI, DAQCard, Lab-PC	100 kS/s
DAQPad	100 kS/s to FIFO; 25 kS/s to PC with standard Centronics port

#### Input signal ranges

Gain (Software Selectable)	Range (Software Selectable)	
	Bipolar	Unipolar
1	±5 V	0 to 10 V
2	±2.5 V	0 to 5 V
5	±1 V	0 to 2 V
10	±500 mV	0 to 1 V
20	±250 mV	0 to 500 mV
50	±100 mV	0 to 200 mV
100	±50 mV	0 to 100 mV

Input coupling ..... DC

Maximum working voltage (signal + common mode) ..... In differential or NRSE mode, the negative input/AISENSE should remain within ±5 V (bipolar) or -5 to 2 V (unipolar) of AGND except for the DAQCard-1200, where the values are ±6 V (bipolar) and -6 to 2 V (unipolar). The positive input should remain within -5 V to +10 V or AGND. For the DAQCard-1200 in RSE mode, the input signal referenced to AGND should remain within ±5 V (bipolar) or 0 to 10 V (unipolar).

Overvoltage protection  
 PCI, DAQCard, Lab-PC ..... ±35 V powered on, ±25 V powered off  
 DAQPad ..... ±42 V powered on, ±15 V powered off  
 Inputs protected ..... ACH<0..7>

FIFO buffer size  
 PCI ..... 4,096 samples  
 DAQCard ..... 1,024 samples  
 Lab-PC ..... 512 samples  
 DAQPad ..... 2,048 samples

Data transfers  
 PCI, Lab-PC ..... DMA, interrupts, programmed I/O  
 DAQCard, DAQPad ..... Interrupts, programmed I/O

DMA modes  
 PCI ..... Scatter-gather  
 Lab-PC ..... Single transfer  
 Dither ..... Available

#### Transfer Characteristics

Relative accuracy ..... ±0.5 LSB typical dithered, ±1.5 LSB max undithered  
 DNL ..... ±1 LSB max  
 No missing codes ..... 12 bits, guaranteed  
 Offset error

Error		PCI, DAQCard, Lab-PC	DAQPad
Pregain	After calibration	±10 µV max	±5 µV max
	Before calibration	±20 mV max	±15 mV max
Postgain	After calibration	±1 mV max	±360 µV max
	Before calibration	±200 mV max	±150 mV max

Gain error (relative to calibration reference)  
 After calibration ..... 0.02% of reading max  
 Before calibration ..... ±2% of reading max

#### Amplifier Characteristics

Input bias current  
 PCI, DAQCard, Lab-PC ..... ±100 pA  
 DAQPad ..... ±200 nA  
 Input offset current ..... ±100 pA

#### Input impedance

Normal powered on ..... 100 GΩ in parallel with 50 pF  
 Powered off ..... 4.7 kΩ min  
 Overload ..... 4.7 kΩ min  
 CMRR ..... 70 dB typical, DC to 60 Hz

#### Dynamic Characteristics

Bandwidth (small signal -3 dB)

Gain	PCI, DAQCard, Lab-PC	DAQPad
1 to 10	250 kHz	400 kHz
20	150 kHz	200 kHz
50	60 kHz	80 kHz
100	30 kHz	40 kHz

Setting time for full-scale step

Gain	Accuracy ±0.024% (±1 LCB)		
	PCI, Lab-PC	DAQCard	DAQPad
	µs typical/µs max	µs typical/µs max	µs max
1	10/14	-/10	25
2 to 10	13/16	-/10	25
20	15/19	12/15	25
50	27/34	25/30	25
100	60/80	60/80	60

System noise (including quantization error) in LSB<sub>rms</sub>

Gain	PCI, DAQCard, Lab-PC		DAQPad	
	Dither Off	Dither On	Dither Off	Dither On
1 to 50	0.3	0.5	0.3	0.6
100	0.5	0.7	0.6	0.8

#### Stability

Recommended warm-up time ..... 15 minutes  
 Offset temperature coefficient  
 Pregain ..... ±15 µV/°C  
 Postgain ..... ±100 µV/°C  
 Gain temperature coefficient  
 PCI, DAQCard, Lab-PC ..... ±40 ppm/°C  
 DAQPad ..... ±50 ppm/°C

### Analog Output (not for Lab-PC-1200A)

#### Output Characteristics

Number of channels ..... Two voltage  
 Resolution ..... 12 bits, 1 in 4,096  
 Typical update rate ..... 1 kS/s (system dependent)  
 Type of DAC ..... Double buffered, multiplying  
 Data transfers ..... Interrupts, programmed I/O

#### Transfer Characteristics

Relative accuracy ..... ±0.25 LSB typical, ±0.50 LSB max  
 ±0.50 LSB typical, ±1.0 LSB max (DAQCard)  
 DNL ..... ±0.25 LSB typical, ±0.75 LSB max  
 ±0.50 LSB typical, ±0.90 LSB max (DAQCard)  
 Monotonicity ..... 12 bits, guaranteed  
 Offset error  
 After calibration ..... ±0.2 mV max; ±0.5 mV max for DAQCard  
 Before calibration ..... ±50 mV max; ±75 mV max for DAQCard  
 Gain error (relative to internal reference)  
 After calibration ..... 0.01% of reading max  
 0.02% of reading max (DAQCard)  
 Before calibration ..... ±1% of reading max  
 ±2% of reading max (DAQCard)

#### Voltage Output

Ranges ..... 0 to 10 V, ±5 V, software selectable  
 Output coupling ..... DC  
 Output impedance ..... 0.2 Ω typical  
 0.5 Ω typical (DAQCard)  
 Current drive ..... ±2 mA  
 1 mA max per channel (DAQCard)  
 Protection ..... Short circuit to ground  
 80 mA momentary short-circuit protection to ground (DAQCard)

# Specifications

1200 Family

## 1200 Family (continued)

Power-on state	
PCI, DAQCard, Lab-PC	0 V
DAQPad	0 V bipolar mode, 5 V unipolar mode

### Dynamic Characteristics

Setting time to full-scale range (FSR)	
PCI, Lab-PC	5 $\mu$ s to $\pm 1$ LSB
DAQCard	20 $\mu$ s to $\pm 1$ LSB
DAQPad	6 $\mu$ s to $\pm 1$ LSB

### Stability

Offset temperature coefficient	
PCI, DAQCard, Lab-PC	$\pm 50$ $\mu$ V/ $^{\circ}$ C
DAQPad	$\pm 60$ $\mu$ V/ $^{\circ}$ C
Gain temperature coefficient	
PCI, DAQCard, Lab-PC	$\pm 30$ ppm/ $^{\circ}$ C
DAQPad	$\pm 10$ ppm/ $^{\circ}$ C

### Digital I/O

Number of channels	24 I/O (three 8-bit ports; uses the 82C55A PPI)
--------------------	---

Compatibility	5 V/TTL
---------------	---------

#### Digital logic levels

Level	Minimum	Maximum
Input low voltage	-0.3 V	0.8 V
Input high voltage	2.2 V	5.3 V
Output low voltage ( $I_{out} = 2.5$ mA)	—	0.4 V
Output high voltage ( $I_{out} = 2.5$ mA)	3.7 V	—

Handshaking	2-wire, 2 ports
Power-on state	Input
Protection	-0.5 to 5.5 V powered on, $\pm 0.5$ V powered off
Data transfers	Interrupts, programmed I/O

### Timing I/O

Number of channels	3 counter/timers (uses two 82C53 STCs)
Protection	-0.5 V to 5.5 V powered on, $\pm 0.5$ V powered off
Resolution	16 bits
Compatibility	5 V/TTL, counter gate and clock inputs are pulled up with 100 k $\Omega$ onboard resistors
Base clock available	2 MHz
Base clock accuracy	$\pm 50$ ppm max, $\pm 0.01\%$
Maximum source frequency	8 MHz
Minimum source pulse duration	60 ns
Minimum gate pulse duration	50 ns

#### Digital logic levels

Level	Minimum	Maximum
Input low voltage	-0.3 V	0.8 V
Input high voltage	2.2 V	5.3 V
Output low voltage ( $I_{out} = 2.1$ mA for PCI, Lab-PC) ( $I_{out} = 4$ mA for DAQCard, DAQPad)	—	0.45 V
Output high voltage ( $I_{out} = 0.92$ mA for PCI, Lab-PC) ( $I_{out} = 1$ mA for DAQCard, DAQPad)	3.7 V	—

Data transfer	Interrupts, programmed I/O
---------------	----------------------------

### Digital Trigger

Compatibility	5 V/TTL
Response	Rising edge
Pulse width	50 ns min

### Bus interface

PCI	Master, slave
DAQCard, Lab-PC, DAQPad	Slave

### Power Requirements

+5 VDC ( $\pm 5\%$ )	
PCI	425 mA
DAQCard	150 mA, 50 mA power-down mode
Lab-PC	185 mA
Lab-PC-1200AI	150 mA
+12 VDC	
DAQPad	250 mA
Power available at I/O connector	+4.65 to +5.25 V, 400 mA fused +5 VDC, 500 mA (DAQCard)

### Physical

Dimensions	
PCI, Lab-PC	17.5 x 10.6 cm (6.9 by 4.2 in.)
DAQCard	Type II PC Card
DAQPad	14.6 by 21.3 by 3.8 cm (5.8 by 8.4 by 1.5 in.)
Weight	
DAQPad	0.77 kg (1.7 lb)
I/O connectors	50-pin male
Parallel port connector	
Type	2 female 25-pin D-Sub, EPP and SPP (Centronics)
Throughput	180 kbytes/s (EPP), 41 kbytes/s (Centronics)

### Environment

Operating temperature	0 to 50 $^{\circ}$ C, DAQCard should not exceed 50 $^{\circ}$ C while in PCMCIA slot
Storage temperature	-20 to 70 $^{\circ}$ C
Relative humidity	5% to 90% noncondensing

### BP-1 Rechargeable Battery Pack

Output	12 VDC, 3.2 Ah
Run time with DAQPad	5 h loaded at 350 mA from +5 V I/O; 11 h unloaded
Dimensions	14.6 by 21.3 by 3.8 cm (5.8 by 8.4 by 1.5 in.)
Weight	1.92 kg (4.2 lb)

### Certifications and Compliances

#### CE Mark Compliance $\text{CE}$

\*The charger included with the BP-1 is not CE compliant

Data Acquisition

## **Anexo B**

### **Manual de especificación y uso del AD594/AD595**

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Licencia Creative Commons:  
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela  
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)



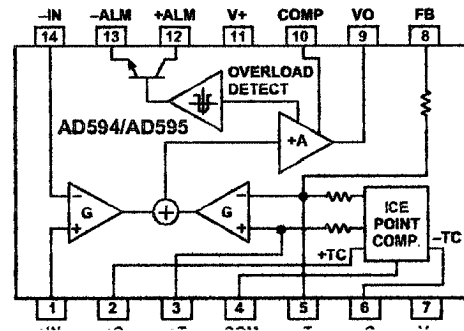
# Monolithic Thermocouple Amplifiers with Cold Junction Compensation

## AD594/AD595

### FEATURES

**Pretrimmed for Type J (AD594) or Type K (AD595) Thermocouples**  
**Can Be Used with Type T Thermocouple Inputs**  
**Low Impedance Voltage Output: 10 mV/°C**  
**Built-in Ice Point Compensation**  
**Wide Power Supply Range: +5 V to ±15 V**  
**Low Power: <1 mW typical**  
**Thermocouple Failure Alarm**  
**Laser Wafer Trimmed to 1°C Calibration Accuracy**  
**Setpoint Mode Operation**  
**Self-Contained Celsius Thermometer Operation**  
**High Impedance Differential Input**  
**Side-Brazed DIP or Low Cost Cerdip**

### FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM



### PRODUCT DESCRIPTION

The AD594/AD595 is a complete instrumentation amplifier and thermocouple cold junction compensator on a monolithic chip. It combines an ice point reference with a precalibrated amplifier to produce a high level (10 mV/°C) output directly from a thermocouple signal. Pin-strapping options allow it to be used as a linear amplifier-compensator or as a switched output setpoint controller using either fixed or remote setpoint control. It can be used to amplify its compensation voltage directly, thereby converting it to a stand-alone Celsius transducer with a low impedance voltage output.

The AD594/AD595 includes a thermocouple failure alarm that indicates if one or both thermocouple leads become open. The alarm output has a flexible format which includes TTL drive capability.

The AD594/AD595 can be powered from a single ended supply (including +5 V) and by including a negative supply, temperatures below 0°C can be measured. To minimize self-heating, an unloaded AD594/AD595 will typically operate with a total supply current 160  $\mu$ A, but is also capable of delivering in excess of  $\pm 5$  mA to a load.

The AD594 is precalibrated by laser wafer trimming to match the characteristic of type J (iron-constantan) thermocouples and the AD595 is laser trimmed for type K (chromel-alumel) inputs. The temperature transducer voltages and gain control resistors

are available at the package pins so that the circuit can be reconfigured for the thermocouple types by the addition of two or three resistors. These terminals also allow more precise calibration for both thermocouple and thermometer applications.

The AD594/AD595 is available in two performance grades. The C and the A versions have calibration accuracies of  $\pm 1^\circ\text{C}$  and  $\pm 3^\circ\text{C}$ , respectively. Both are designed to be used from 0°C to +50°C, and are available in 14-pin, hermetically sealed, side-brazed ceramic DIPs as well as low cost cerdip packages.

### PRODUCT HIGHLIGHTS

1. The AD594/AD595 provides cold junction compensation, amplification, and an output buffer in a single IC package.
2. Compensation, zero, and scale factor are all precalibrated by laser wafer trimming (LWT) of each IC chip.
3. Flexible pinout provides for operation as a setpoint controller or a stand-alone temperature transducer calibrated in degrees Celsius.
4. Operation at remote application sites is facilitated by low quiescent current and a wide supply voltage range +5 V to dual supplies spanning 30 V.
5. Differential input rejects common-mode noise voltage on the thermocouple leads.

### REV. C

Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices.

One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A.  
 Tel: 781/329-4700 World Wide Web Site: <http://www.analog.com>  
 Fax: 781/326-6703 © Analog Devices, Inc., 1999

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela  
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

# AD594/AD595—SPECIFICATIONS (unless otherwise noted)

Model	AD594A			AD594C			AD595A			AD595C			Units
	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
<b>ABSOLUTE MAXIMUM RATING</b>													
+V <sub>S</sub> to -V <sub>S</sub>			36			36			36			36	Volts
Common-Mode Input Voltage	-V <sub>S</sub> - 0.15		+V <sub>S</sub>	-V <sub>S</sub> - 0.15		+V <sub>S</sub>	-V <sub>S</sub> - 0.15		+V <sub>S</sub>	-V <sub>S</sub> - 0.15		+V <sub>S</sub>	Volts
Differential Input Voltage			+V <sub>S</sub>			+V <sub>S</sub>			+V <sub>S</sub>			+V <sub>S</sub>	Volts
<b>Alarm Voltages</b>													
+ALM	-V <sub>S</sub>		-V <sub>S</sub> + 36	-V <sub>S</sub>		-V <sub>S</sub> + 36	-V <sub>S</sub>		-V <sub>S</sub> + 36	-V <sub>S</sub>		-V <sub>S</sub> + 36	Volts
-ALM			+V <sub>S</sub>			+V <sub>S</sub>			+V <sub>S</sub>			+V <sub>S</sub>	Volts
Operating Temperature Range	55		+125	55		+125	55		+125	55		+125	°C
Output Short Circuit to Common	Indefinite			Indefinite			Indefinite			Indefinite			
<b>TEMPERATURE MEASUREMENT<sup>1</sup></b> (Specified Temperature Range 0°C to +50°C)													
Calibration Error at +25°C <sup>1</sup>			±3			±1			±3			±1	°C
Stability vs. Temperature <sup>2</sup>			±0.05			±0.025			±0.05			±0.025	°C/°C
Gain Error			±1.5			±0.75			±1.5			±0.75	%
Nominal Transfer Function			10			10			10			10	mV/°C
<b>AMPLIFIER CHARACTERISTICS</b>													
Closed Loop Gain <sup>3</sup>	<b>193.4</b>			<b>193.4</b>			<b>247.3</b>			<b>247.3</b>			
Input Offset Voltage	(Temperature in °C) × 51.70 μV/°C			(Temperature in °C) × 51.70 μV/°C			(Temperature in °C) × 40.44 μV/°C			(Temperature in °C) × 40.44 μV/°C			μV
Input Bias Current	0.1			0.1			0.1			0.1			μA
Differential Input Range	-10		+50	-10		+50	-10		+50	-10		+50	mV
Common-Mode Range	-V <sub>S</sub> - 0.15		-V <sub>S</sub> - 4	-V <sub>S</sub> - 0.15		-V <sub>S</sub> - 4	-V <sub>S</sub> - 0.15		-V <sub>S</sub> - 4	-V <sub>S</sub> - 0.15		-V <sub>S</sub> - 4	Volts
Common-Mode Sensitivity - RTO	10			10			10			10			mV/V
Power Supply Sensitivity - RTO	10			10			10			10			mV/V
<b>Output Voltage Range</b>													
Dual Supply	-V <sub>S</sub> + 2.5		+V <sub>S</sub> - 2	-V <sub>S</sub> + 2.5		+V <sub>S</sub> - 2	-V <sub>S</sub> + 2.5		+V <sub>S</sub> - 2	-V <sub>S</sub> + 2.5		+V <sub>S</sub> - 2	Volts
Single Supply	0		+V <sub>S</sub> - 2	0		+V <sub>S</sub> - 2	0		+V <sub>S</sub> - 2	0		+V <sub>S</sub> - 2	Volts
Usable Output Current <sup>4</sup>		±5			±5			±5			±5		mA
3 dB Bandwidth	15			15			15			15			kHz
<b>ALARM CHARACTERISTICS</b>													
V <sub>CS(AlM)</sub> at 2 mA	0.3			0.3			0.3			0.3			Volts
Leakage Current	±1			±1			±1			±1			μA max
Operating Voltage at -ALM	+V <sub>S</sub> - 4			+V <sub>S</sub> - 4			+V <sub>S</sub> - 4			+V <sub>S</sub> - 4			Volts
Short Circuit Current	20			20			20			20			mA
<b>POWER REQUIREMENTS</b>													
Specified Performance	+V <sub>S</sub> = 5, -V <sub>S</sub> = 0			+V <sub>S</sub> = 5, -V <sub>S</sub> = 0			+V <sub>S</sub> = 5, -V <sub>S</sub> = 0			+V <sub>S</sub> = 5, -V <sub>S</sub> = 0			Volts
Operating <sup>5</sup>	+V <sub>S</sub> to -V <sub>S</sub> ≤ 30			+V <sub>S</sub> to -V <sub>S</sub> ≤ 30			+V <sub>S</sub> to -V <sub>S</sub> ≤ 30			+V <sub>S</sub> to -V <sub>S</sub> ≤ 30			Volts
Quiescent Current (No Load)													
+V <sub>S</sub>		160	300		160	300		160	300		160	300	μA
-V <sub>S</sub>		100			100			100			100		μA
<b>PACKAGE OPTION</b>													
TO-116 (D-14)	AD594AD			AD594CD			AD595AD			AD595CD			
TO-18 (C-14)	AD594AC			AD594CC			AD595AC			AD595CC			

**NOTES**  
<sup>1</sup>Calibrated for minimum error at +25°C using a thermocouple sensitivity of 51.7 μV/°C. Since a J type thermocouple deviates from this straight line approximation, the AD594 will normally read 3.1 mV when the measuring junction is at 0°C. The AD595 will similarly read 2.7 mV at 0°C.

<sup>2</sup>Pin 8 shorted to Pin 9.  
<sup>3</sup>Current Sink Capability in single supply configuration is limited to current drawn to ground through a 50 kΩ resistor at output voltages below 2.5 V.  
<sup>4</sup>-V<sub>S</sub> must not exceed -16.5 V.

are guaranteed, although only those shown in boldface are tested on all production units. Specifications subject to change without notice.

### INTERPRETING AD594/AD595 OUTPUT VOLTAGES

To achieve a temperature proportional output of 10 mV/°C and accurately compensate for the reference junction over the rated operating range of the circuit, the AD594/AD595 is gain trimmed to match the transfer characteristic of J and K type thermocouples at 25°C. For a type J output in this temperature range the TC is 51.70 μV/°C, while for a type K it is 40.44 μV/°C. The resulting gain for the AD594 is 193.4 (10 mV/°C divided by 51.7 μV/°C) and for the AD595 is 247.3 (10 mV/°C divided by 40.44 μV/°C). In addition, an absolute accuracy trim induces an input offset to the output amplifier characteristic of 16 μV for the AD594 and 11 μV for the AD595. This offset arises because the AD594/AD595 is trimmed for a 250 mV output while applying a 25°C thermocouple input.

Because a thermocouple output voltage is nonlinear with respect to temperature, and the AD594/AD595 linearly amplifies the

compensated signal, the following transfer functions should be used to determine the actual output voltages.

$$AD594 \text{ output} = (\text{Type J Voltage} + 16 \mu\text{V}) \times 193.4$$

$$AD595 \text{ output} = (\text{Type K Voltage} + 11 \mu\text{V}) \times 247.3 \text{ or conversely:}$$

$$\text{Type J voltage} = (AD594 \text{ output}/193.4) - 16 \mu\text{V}$$

$$\text{Type K voltage} = (AD595 \text{ output}/247.3) - 11 \mu\text{V}$$

Table I lists the ideal AD594/AD595 output voltages as a function of Celsius temperature for type J and K ANSI standard thermocouples, with the package and reference junction at 25°C. As is normally the case, these outputs are subject to calibration, gain and temperature sensitivity errors. Output values for intermediate temperatures can be interpolated, or calculated using the output equations and ANSI thermocouple voltage tables referred to zero degrees Celsius. Due to a slight variation in alloy content between ANSI type J and DIN FE-CUNI

Table I. Output Voltage vs. Thermocouple Temperature (Ambient +25°C,  $V_s = -5\text{ V}, +15\text{ V}$ )

Thermocouple Temperature °C	Type J Voltage mV	AD594 Output mV	Type K Voltage mV	AD595 Output mV
-200	7.890	1523	-5.891	1454
-180	-7.402	-1428	-5.550	-1370
160	6.821	1316	-5.141	1269
-140	-6.159	-1188	-4.669	-1152
-120	-5.426	-1046	-4.138	-1021
-100	-4.632	-893	-3.553	-876
-80	3.785	729	-2.920	719
-60	-2.892	-556	-2.243	-552
-40	-1.960	-376	-1.527	-375
20	-995	-189	-777	-189
-10	-501	-94	-392	-94
0	0	3.1	0	2.7
10	507	101	397	101
20	1.019	200	798	200
25	1.277	250	1.000	250
30	1.536	300	1.203	300
40	2.058	401	1.611	401
50	2.585	503	2.022	503
60	3.115	606	2.436	605
80	4.186	813	3.266	810
100	5.268	1022	4.095	1015
120	6.359	1233	4.919	1219
140	7.457	1445	5.733	1420
160	8.560	1659	6.539	1620
180	9.667	1873	7.338	1817
200	10.777	2087	8.137	2015
220	11.887	2302	8.938	2213
240	12.998	2517	9.745	2413
260	14.108	2732	10.560	2614
280	15.217	2946	11.381	2817
300	16.325	3160	12.207	3022
320	17.432	3374	13.039	3227
340	18.537	3588	13.874	3434
360	19.640	3801	14.712	3641
380	20.743	4015	15.552	3849
400	21.846	4228	16.395	4057
420	22.949	4441	17.241	4266
440	24.054	4655	18.088	4476
460	25.161	4869	18.938	4686
480	26.272	5084	19.788	4896

Thermocouple Temperature °C	Type J Voltage mV	AD594 Output mV	Type K Voltage mV	AD595 Output mV
500	27.388	5300	20.640	5107
520	28.511	5517	21.493	5318
540	29.642	5736	22.346	5529
560	30.782	5956	23.198	5740
580	31.933	6179	24.050	5950
600	33.096	6404	24.902	6161
620	34.273	6632	25.751	6371
640	35.464	6862	26.599	6581
660	36.671	7095	27.445	6790
680	37.893	7332	28.288	6998
700	39.130	7571	29.128	7206
720	40.382	7813	29.965	7413
740	41.647	8058	30.799	7619
750	42.283	8181	31.214	7722
760	-	-	31.629	7825
780	-	-	32.455	8029
800	-	-	33.277	8232
820	-	-	34.095	8434
840	-	-	34.909	8636
860	-	-	35.718	8836
880	-	-	36.524	9035
900	-	-	37.325	9233
920	-	-	38.122	9430
940	-	-	38.915	9626
960	-	-	39.703	9821
980	-	-	40.488	10015
1000	-	-	41.269	10209
1020	-	-	42.045	10400
1040	-	-	42.817	10591
1060	-	-	43.585	10781
1080	-	-	44.339	10970
1100	-	-	45.108	11158
1120	-	-	45.863	11345
1140	-	-	46.612	11530
1160	-	-	47.356	11714
1180	-	-	48.095	11897
1200	-	-	48.828	12078
1220	-	-	49.555	12258
1240	-	-	50.276	12436
1250	-	-	50.633	12524

thermocouples Table I should not be used in conjunction with European standard thermocouples. Instead the transfer function given previously and a DIN thermocouple table should be used. AD594 type K and DIN NICK-NI thermocouples are composed

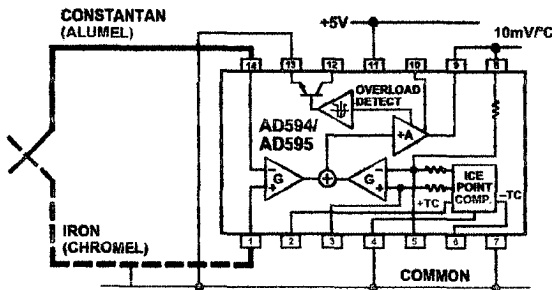


Figure 1. Basic Connection, Single Supply Operation

of identical alloys and exhibit similar behavior. The upper temperature limits in Table I are those recommended for type J and type K thermocouples by the majority of vendors.

### SINGLE AND DUAL SUPPLY CONNECTIONS

The AD594/AD595 is a completely self-contained thermocouple conditioner. Using a single +5 V supply the interconnections shown in figure 1 will provide a direct output from a type J thermocouple (AD594) or type K thermocouple (AD595) measuring from 0°C to +300°C.

Any convenient supply voltage from +5 V to +30 V may be used, with self-heating errors being minimized at lower supply levels. In the single supply configuration the +5 V supply connects to Pin 11 with the V- connection at Pin 7 strapped to power and signal common at Pin 4. The thermocouple wire inputs connect to Pins 1 and 14 either directly from the measuring point or through intervening connections of similar thermocouple wire type. When the alarm output at Pin 13 is not used it should be connected to common or -V. The precalibrated feedback network at Pin 8 is tied to the output at Pin 9 to provide a 10 mV/°C nominal temperature transfer characteristic.

By using a wider ranging dual supply, as shown in Figure 2, the AD594/AD595 can be interfaced to thermocouples measuring both negative and extended positive temperatures.

# AD594/AD595

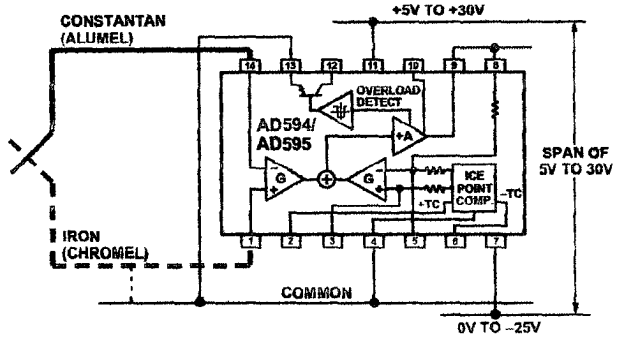


Figure 2. Dual Supply Operation

With a negative supply the output can indicate negative temperatures and drive grounded loads or loads returned to positive voltages. Increasing the positive supply from 5 V to 15 V extends the output voltage range well beyond the 750°C temperature limit recommended for type J thermocouples (AD594) and the 1250°C for type K thermocouples (AD595).

Common-mode voltages on the thermocouple inputs must remain within the common-mode range of the AD594/AD595, with a return path provided for the bias currents. If the thermocouple is not remotely grounded, then the dotted line connections in Figures 1 and 2 are recommended. A resistor may be needed in this connection to assure that common-mode voltages induced in the thermocouple loop are not converted to normal mode.

### THERMOCOUPLE CONNECTIONS

The isothermal terminating connections of a pair of thermocouple wires forms an effective reference junction. This junction must be kept at the same temperature as the AD594/AD595 for the internal cold junction compensation to be effective.

A method that provides for thermal equilibrium is the printed circuit board connection layout illustrated in Figure 3.

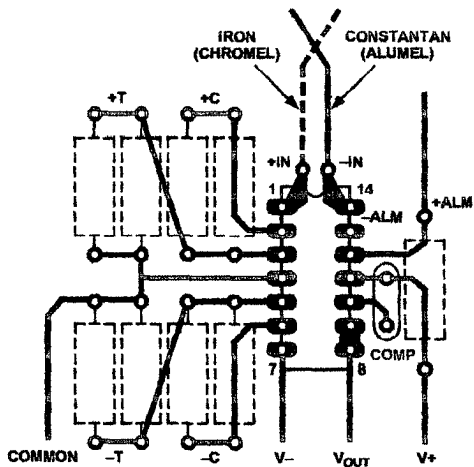


Figure 3. PCB Connections

Here the AD594/AD595 package temperature and circuit board are thermally contacted in the copper printed circuit board tracks under Pins 1 and 14. The reference junction is now composed of a copper-constantan (or copper-alumel) connection and copper-iron (or copper-chromel) connection, both of which are at the same temperature as the AD594/AD595.

The printed circuit board layout shown also provides for placement of optional alarm load resistors, recalibration resistors and a compensation capacitor to limit bandwidth.

To ensure secure bonding the thermocouple wire should be cleaned to remove oxidation prior to soldering. Noncorrosive rosin flux is effective with iron, constantan, chromel and alumel and the following solders: 95% tin-5% antimony, 95% tin-5% silver or 90% tin-10% lead.

### FUNCTIONAL DESCRIPTION

The AD594 behaves like two differential amplifiers. The outputs are summed and used to control a high gain amplifier, as shown in Figure 4.

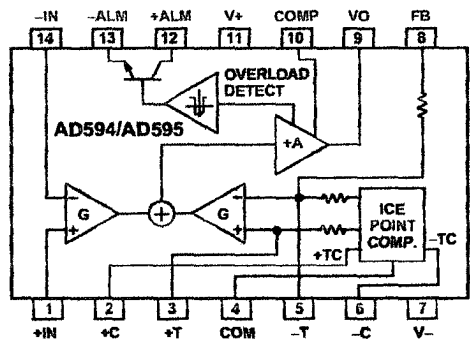


Figure 4. AD594/AD595 Block Diagram

In normal operation the main amplifier output, at Pin 9, is connected to the feedback network, at Pin 8. Thermocouple signals applied to the floating input stage, at Pins 1 and 14, are amplified by gain G of the differential amplifier and are then further amplified by gain A in the main amplifier. The output of the main amplifier is fed back to a second differential stage in an inverting connection. The feedback signal is amplified by this stage and is also applied to the main amplifier input through a summing circuit. Because of the inversion, the amplifier causes the feedback to be driven to reduce this difference signal to a small value. The two differential amplifiers are made to match and have identical gains, G. As a result, the feedback signal that must be applied to the right-hand differential amplifier will precisely match the thermocouple input signal when the difference signal has been reduced to zero. The feedback network is trimmed so that the effective gain to the output, at Pins 8 and 9, results in a voltage of 10 mV/°C of thermocouple excitation.

In addition to the feedback signal, a cold junction compensation voltage is applied to the right-hand differential amplifier. The compensation is a differential voltage proportional to the Celsius temperature of the AD594/AD595. This signal disturbs the differential input so that the amplifier output must adjust to restore the input to equal the applied thermocouple voltage.

The compensation is applied through the gain scaling resistors so that its effect on the main output is also 10 mV/°C. As a result, the compensation voltage adds to the effect of the thermocouple voltage a signal directly proportional to the difference between 0°C and the AD594/AD595 temperature. If the thermocouple reference junction is maintained at the AD594/AD595 temperature, the output of the AD594/AD595 will correspond to the reading that would have been obtained from amplification of a signal from a thermocouple referenced to an ice bath.

## Anexo C

### **Programa para generar, adquirir, registrar, analizar y presentar la data de entrada/salida (voltaje/temperatura) del horno eléctrico.**

#### **C.1 Descripción del programa**

Para la adquisición y registro de la data del proceso térmico, representado por el horno de calentamiento eléctrico, se diseñó un programa amigable basado en el lenguaje de programación gráfica *LabVIEW*<sup>®</sup> y cuya función es la de generar, adquirir, registrar, analizar y presentar gráficamente los datos experimentales.

#### **C.2 Pantalla Principal**

Al ejecutar el programa "*Presentación1.vi*" se muestra la pantalla principal del mismo (Fig. C.1) y donde se observan los siguientes datos de interés:

- Una fotografía del horno eléctrico utilizado para ensayos de dilatación térmica.
- Se identifica el laboratorio donde se implementó el programa elaborado.
- Se detalla el objetivo principal del programa.
- Se identifica la persona responsable de la elaboración del programa.
- Se visualizan dos botones de control para las siguientes funciones: uno para dar inicio a la ejecución del programa de generación y adquisición de los datos (INICIAR PROGRAMA) y, otro, para salir por completo del programa (SALIR DEL PROGRAMA).

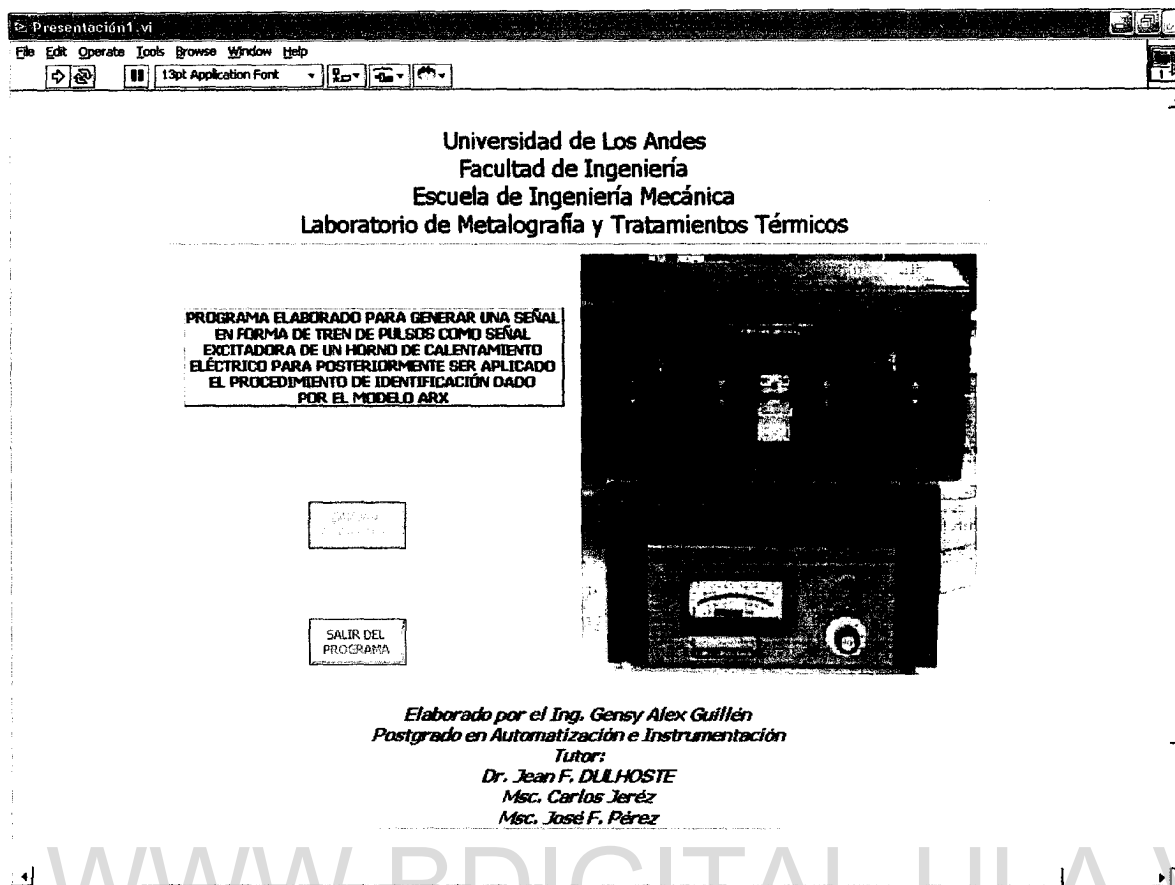


Figura C.1 Pantalla Principal del programa

### C.3 Pantalla para la configuración del experimento y de la señal de entrada

Una vez que el usuario decide dar inicio al programa, es presentada la pantalla de configuración mostrada en la Fig. C.2. Seguidamente se detallan los datos que el usuario debe configurar para iniciar con el experimento.

- Nombre del archivo donde se almacenan los datos de voltaje y temperatura cada periodo de muestreo.
- Nombre del archivo donde se almacenan los datos, pero solo los correspondientes al régimen permanente.
- Temperatura de protección en °C (Máxima temperatura de trabajo 1000°C)

- Tiempo de muestreo (periodo de muestreo), en el cual se adquiere cada dato de voltaje y temperatura y es expresado en segundos.
- Tipo de Horno Eléctrico: es un control configurado para trabajar con dos diferentes hornos eléctricos, de acuerdo a la selección del usuario. Los hornos configurados son: (1) horno hermético sin ventilación (horno utilizado para el presente estudio) y (2) horno hermético con ventilación.
- Número de repeticiones: corresponde al número de experimentos que el usuario desea realizar, es decir, las diferentes respuestas (curvas de calentamiento) que el horno alcanzará en variados experimentos, cada una con un punto de operación en particular.
- Tamaño del vector: este control se refiere a la cantidad de eventos ON/OFF, es decir, encendido/apagado de la potencia del horno. Es importante señalar que este dato es usado para estimar la duración total del experimento, así como los tiempos aleatorios de encendido o apagado.

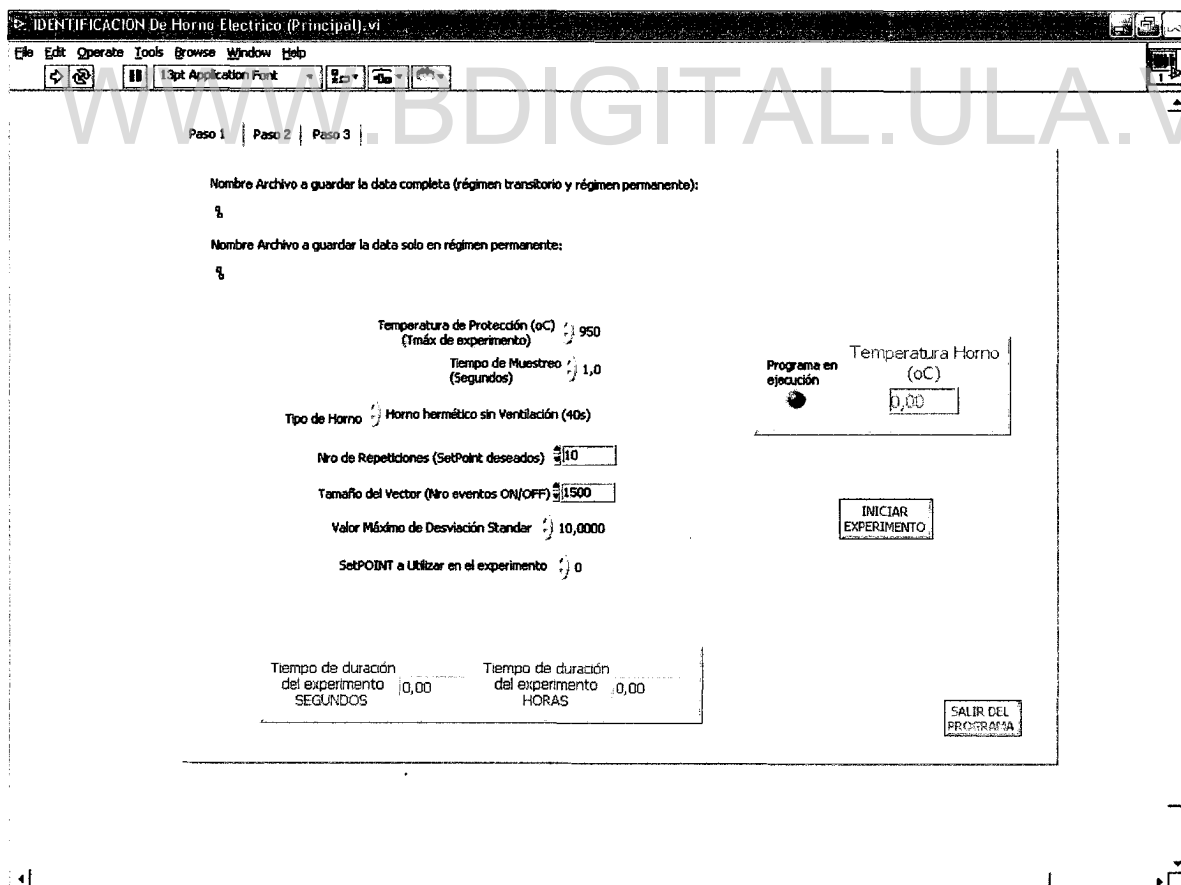


Figura C.2 Pantalla de configuración del experimento

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela  
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

- Valor máximo de la Desviación Estándar: el programa ha sido configurado para que calcule la desviación estándar de una muestra conformada por 360 datos (solamente para la temperatura); valor que es posteriormente comparado con la desviación estándar configurada por el usuario. De esta forma se determina cuando la temperatura está presentado un comportamiento en régimen permanente.
- Setpoint a utilizar: el usuario debe seleccionar que experimento se realizará, de acuerdo al valor configurado en el control "Número de repeticiones", recordando que cada experimento o repetición alcanzará un punto de operación o setpoint en particular.

Una vez que el usuario ha proporcionado todos los datos, el programa muestra la temperatura que se tiene actualmente en el interior del horno eléctrico, asimismo, el tiempo de duración del experimento, tanto en segundos como en minutos, y dos botones de control: uno para continuar con la ejecución del programa y, otro, para abortar la ejecución del mismo.

## **C.4 Pantalla de visualización de la temperatura del proceso térmico**

Una vez finalizada la configuración inicial, el programa ofrece al usuario la pantalla de visualización que se muestra en la Fig. C.3. En esta parte del programa, se da inicio a la adquisición y almacenamiento, en memoria, de la temperatura del horno eléctrico y de la señal de voltaje, tanto en régimen transitorio (calentamiento de la cámara del horno) como el régimen permanente (la temperatura comienza a oscilar alrededor de un determinado punto). Para obtener mayor información y entendimiento del programa, a continuación se especifican las funciones de los distintos indicadores y controles encontrados en la pantalla de visualización.

- Programa en ejecución: es un indicador visual que muestra al usuario que el programa está en progreso.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela  
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

- Carga: indica el momento en que el horno esta encendido (CARGA ON).

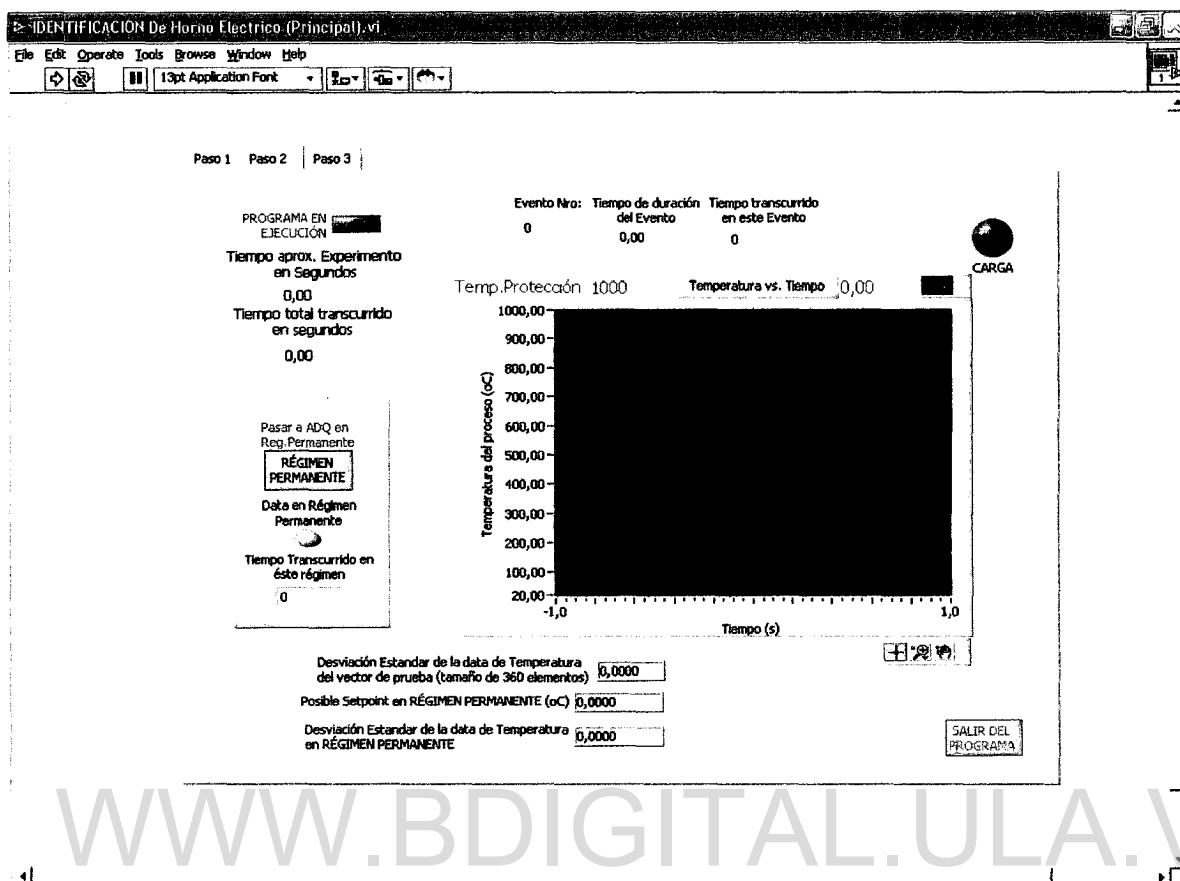


Figura C.3 Pantalla de visualización del proceso térmico

- Tiempo aproximado del experimento: indica la duración total (segundos) del experimento en progreso.
  - Tiempo total transcurrido: indica el tiempo que transcurre una vez que se da inicio a la ejecución del programa.
  - Evento Nro: indica el evento (encendido/apagado) que se está ejecutando.
  - Tiempo de duración del evento: indica el tiempo que durará el evento actual, es decir, la duración del pulso, ya sea, de encendido o apagado.
  - Tiempo transcurrido en este evento: indica el tiempo que transcurre una vez que se inicia el evento.
  - Temperatura vs. Tiempo: es un indicador gráfico que muestra la temperatura que se tiene en el interior del horno eléctrico cada periodo de muestreo. Adicionalmente se puede observar un indicador digital de dicha

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela  
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

temperatura en °C, así como un indicador de la temperatura de protección configurada previamente en la pantalla anterior (Fig. C.2).

- Un panel de control correspondiente solamente a la adquisición y almacenamiento de los datos en régimen permanente y, en él, se encuentra un botón de control para que el usuario, si así lo desea, cambie a adquisición en régimen permanente, es decir, cuando la temperatura presente un comportamiento de este tipo, además se tiene un indicador visual que muestra al usuario que se está en este régimen y otro indicador digital, el cual presenta el tiempo que ha transcurrido desde que la temperatura experimenta un comportamiento en régimen permanente.

- Un indicador de la desviación estándar de una muestra de 360 datos de temperatura; valor que es calculado solamente cuando el comportamiento de la temperatura pertenece a un régimen transitorio.

- Un indicador que muestra al usuario, una vez que la temperatura se encuentra en un régimen permanente, el posible setpoint o punto de operación alcanzado en el experimento, expresado en °C.

- Un botón de control que da al usuario la opción de detener la ejecución del programa, ya sea porque así lo desee o por razones de seguridad.

Adicionalmente es necesario hacer mención a que el programa ha sido diseñado para desconectar el horno de la fuente de alimentación en caso de una emergencia a través de un algoritmo de protección donde la temperatura adquirida es comparada con el valor de temperatura de protección, configurado inicialmente por el usuario. No obstante, se ha diseñado un circuito electrónico que ejecuta la función de un protector térmico para una posible situación de fallo o colapso de la estación de trabajo (PC).

## **C.5 Pantalla final de presentación de resultados**

Transcurrido el tiempo total de adquisición y almacenamiento, tanto de la temperatura como de la señal de voltaje, es presentado al usuario la pantalla de

resultados (Fig. C.4), correspondiente a la última pantalla del programa elaborado. En ella se puede observar básicamente lo siguiente:

- Un indicador del setpoint o punto de operación ( $^{\circ}\text{C}$ ) alcanzado durante el régimen permanente.
- Un indicador del valor de la desviación estándar final adquirida por la data de temperatura.
- Un indicador gráfico “Temperatura vs. Tiempo” que muestra al usuario la curva de temperatura adquirida en régimen permanente. Posteriormente la señal de temperatura es utilizada para el procedimiento de identificación, unido a la correspondiente señal de voltaje.

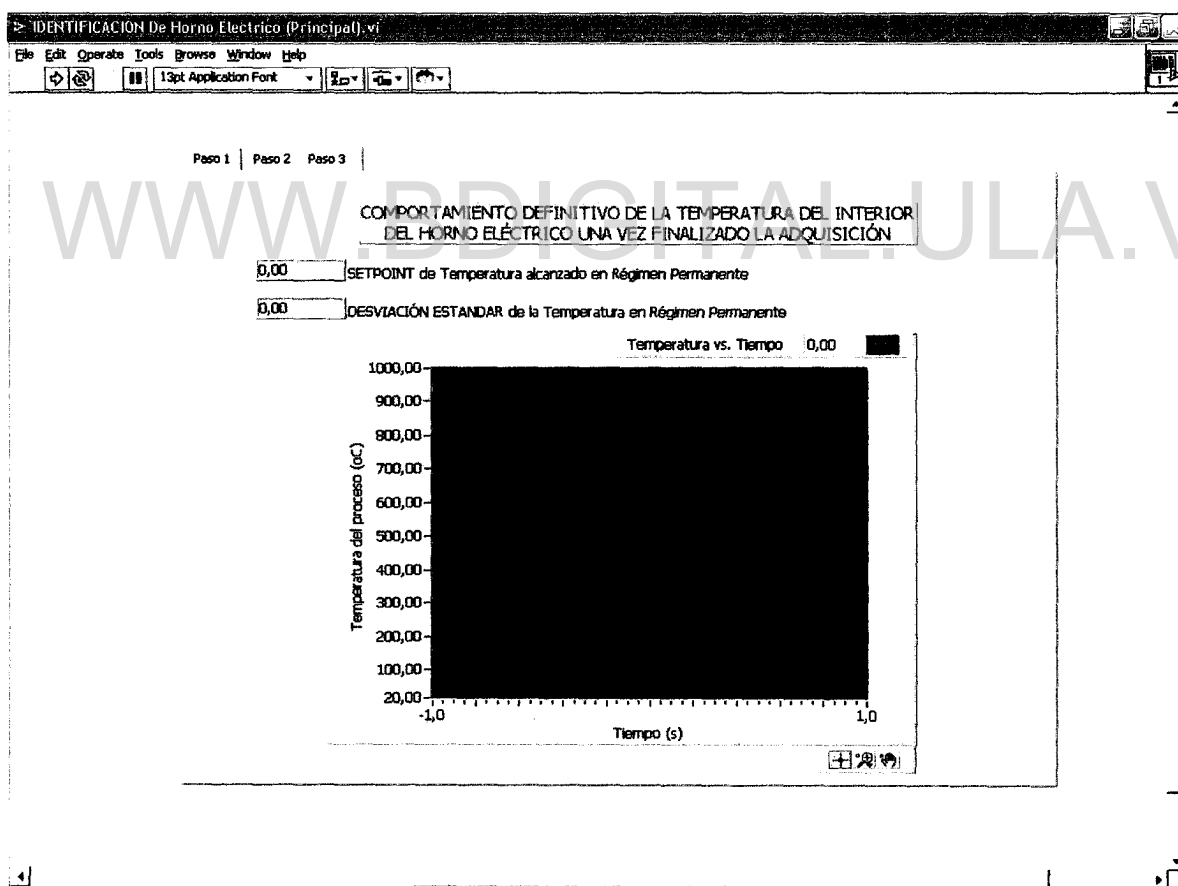


Figura C.4 Pantalla final de presentación

## Anexo D

### Programa diseñado para implementar un control PID a la temperatura del interior de la cámara del horno eléctrico

#### D.1 Descripción del programa

Para la implementación de una estrategia de control *PID*, se diseñó un programa en *LabVIEW*<sup>®</sup> con la finalidad de adquirir, comparar, controlar y supervisar la temperatura del interior del proceso térmico representado por el horno de calentamiento eléctrico. Para efectos de experimentación, el programa se configuró para poder ser ejecutado en dos modalidades, a saber, uno para implementar un control *PID* cuyos parámetros son constantes o fijos y, otro, para implementar nuevamente un control *PID* pero con parámetros variables cada periodo de muestreo. A continuación se describe cada una de las diferentes funciones del programa elaborado.

#### D.2 Panel principal

La Fig. D.1 muestra la pantalla correspondiente al panel principal y la cual el usuario selecciona el tipo de control *PID* que quiere implementar sobre el horno eléctrico. En ésta se observan algunos datos que serán descritos seguidamente:

- Una fotografía del horno eléctrico utilizado para ensayos de dilatación térmica y sobre el cual se implementa la estrategia de control.
- Se identifica el laboratorio donde se implementó el control, así como las características del horno eléctrico.
- Se identifica la persona responsable de la elaboración del programa.
- Se visualizan tres botones de control para las siguientes funciones: primero, para seleccionar un control *PID* pero cuyos parámetros del controlador son

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela  
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

constantes; segundo, para seleccionar un control *PID* con parámetros variables cada periodo de muestreo y en función de la temperatura programada como setpoint del controlador y, por último, se le da la opción al usuario para que detenga y, por consiguiente, salga de la ejecución del programa de control.

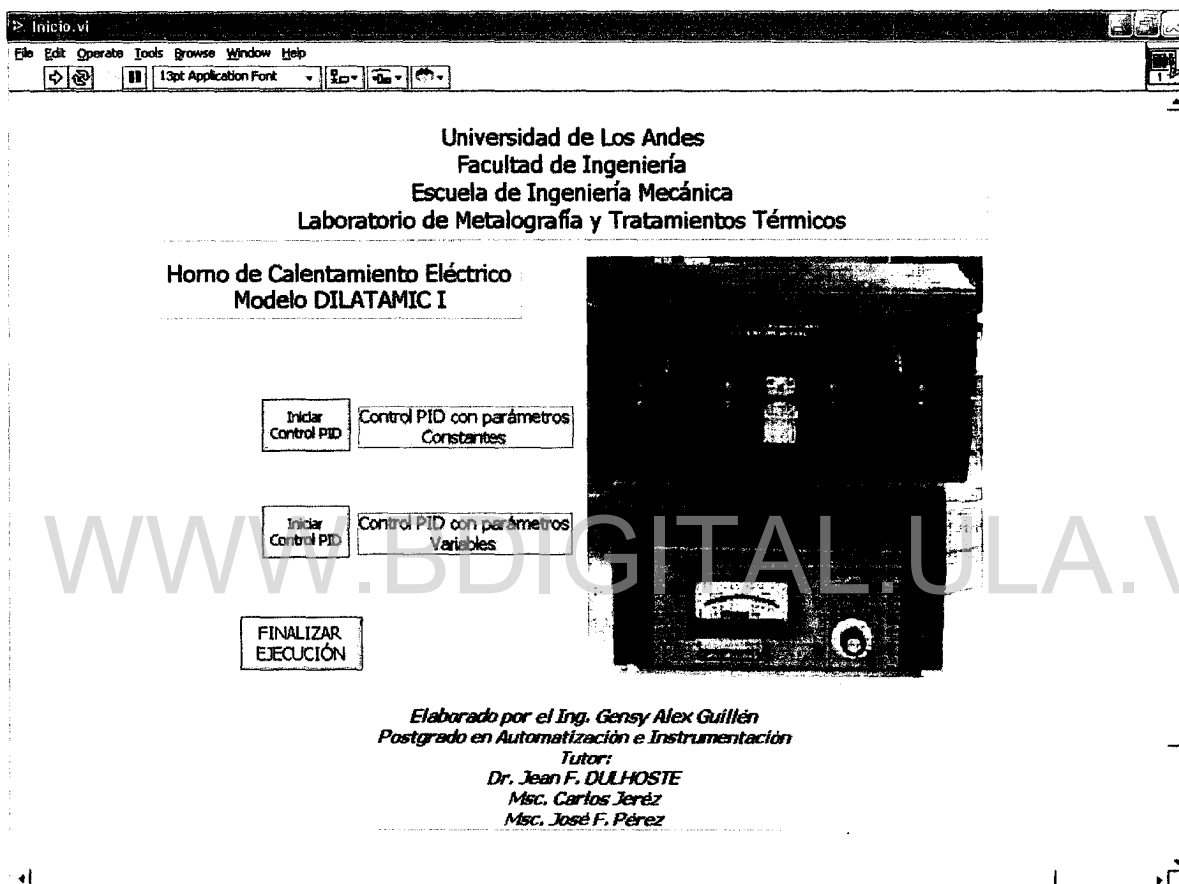


Figura D.1 Panel principal del programa de control

Una vez que el usuario decide dar inicio a cualquiera de las dos modalidades de control *PID*, se activa la pantalla correspondiente a la configuración del control, sin embargo, para fines de información, solo se detallará el programa concerniente al control *PID* con parámetros variables.

## D.3 Pantalla de configuración para un control PID con parámetros variables cada periodo de muestreo

La Fig. D.2 muestra la pantalla de configuración correspondiente a un control *PID* con parámetros variables. En ésta se puede visualizar una serie de datos que el usuario debe configurar para implementar, sobre el horno, un control de este tipo. Éstos son:

- Nombre de la entrada analógica encargada de adquirir los datos de temperatura.
- Nombre de la salida digital por la cual se enviarán las acciones de control al elemento final de control (Relé de estado sólido).

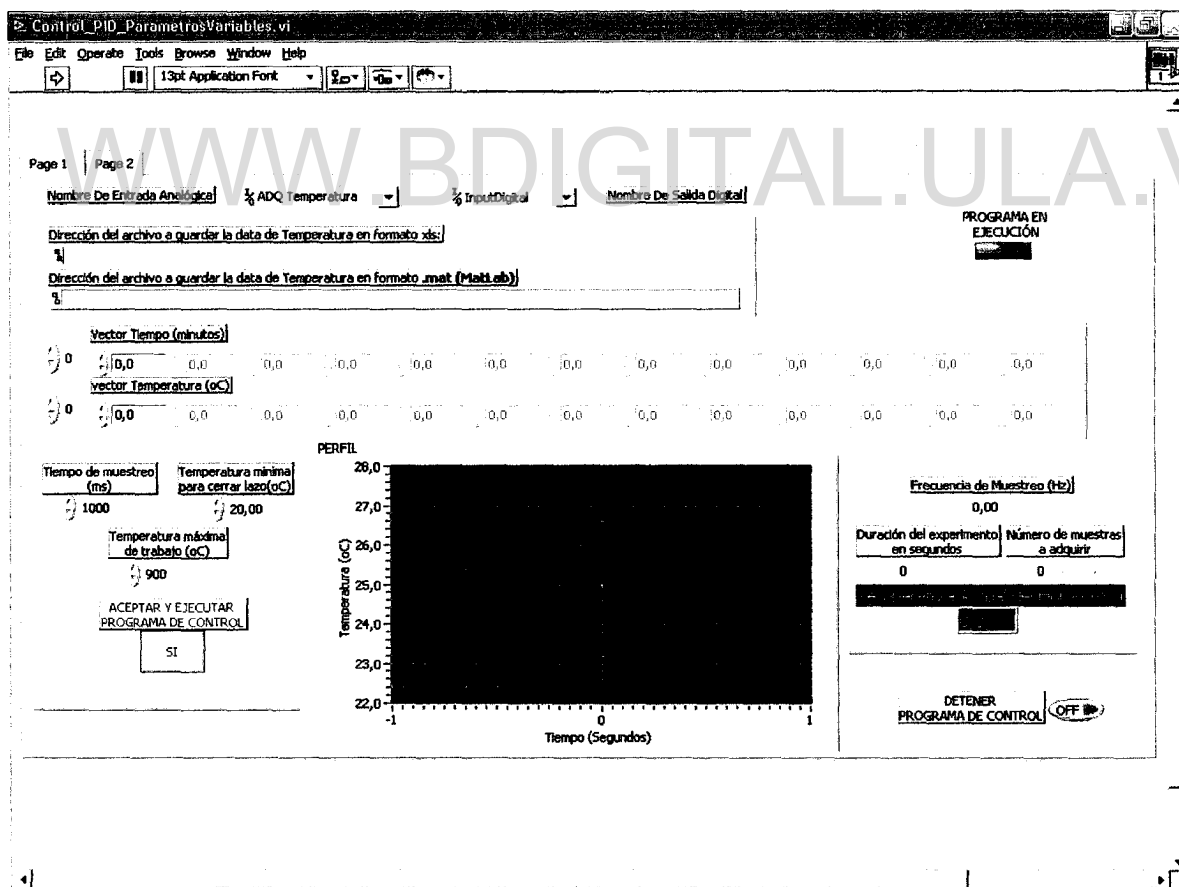


Figura D.2 Pantalla de Configuración

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela  
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

- Nombre del archivo, en formato .xls y .mat., donde se almacenarán los datos de entrada/salida (voltaje/temperatura) del proceso térmico desde que se ejecuta el programa.
- Dos vectores filas para configurar el perfil de calentamiento deseado o, visto desde otro punto, como el setpoint del controlador. El usuario debe ingresar el tiempo en minutos y su correspondiente valor de temperatura en °C, hasta un máximo de seis rampas de calentamiento y seis temperaturas de permanencia.
  - Tiempo de muestreo en ms.
  - Temperatura mínima (°C) para cerrar el lazo de control: el programa ha sido configurado para que el usuario decida si inicia el control a lazo abierto hasta un determinado valor de temperatura o si inicia el control a lazo cerrado desde que se ejecuta el programa.
  - Temperatura máxima de trabajo (°C): es el valor máximo de temperatura que el programa permitirá que el horno alcance. Este valor no debe exceder los 1000°C.
  - Un botón de control que permite al usuario aceptar y ejecutar el programa de control. Así mismo se tiene un botón de control para detener y salir de la ejecución del programa en caso que el usuario así lo desee o en caso de un posible fallo.

Adicionalmente a esta serie de controles, se tienen unos indicadores digitales de interés para el usuario y los cuales corresponden a:

- Programa en Ejecución: es un indicador visual que advierte al usuario que el programa esta ejecutándose.
- Perfil: es un indicador gráfico donde se puede observar el perfil de calentamiento o setpoint que ha sido configurado mediante los dos vectores filas (vector tiempo/vector temperatura).
  - Frecuencia de muestreo en Hz.
  - Duración del experimento: indica el tiempo total que durará el experimento y es expresado en segundos.

- Número de muestras a adquirir: este valor indica la cantidad de datos, tanto de voltaje como de temperatura, que se almacenarán. Este número es dependiente del periodo de muestreo configurado previamente.
- Finalmente, se cuenta con un indicador digital donde se puede visualizar la temperatura actual que se tiene en el interior de la cámara del horno eléctrico, expresado en °C.

Ya configurado todos aquellos datos necesarios para la implementación de la estrategia de control *PID* y una vez que el usuario decide aceptar y ejecutar el programa de control, es presentada la pantalla referente a la supervisión y control de la temperatura en estudio.

#### **D.4 Pantalla de supervisión y control de la temperatura del proceso térmico**

El panel de supervisión y control, que se visualiza en la Fig. D.3, está encargado de mostrar, al usuario, el comportamiento de la temperatura del interior del horno eléctrico frente a un controlador cuyo setpoint corresponde al perfil configurado previamente y, con unos parámetros que son variables cada periodo de muestreo y en función del setpoint. Cabe destacar que los valores iniciales de los parámetros del controlador, a saber,  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$ , son aquellos valores obtenidos mediante las ecuaciones de sintonización de Ziegler & Nichols en la etapa correspondiente al diseño, análisis y simulación de la estrategia de control *PID*; etapa previa a la implementación real sobre el horno eléctrico. A continuación se detalla cada uno de los indicadores con los cuales cuenta la pantalla mostrada en la Fig. D.3.

- Fecha/Hora actual: es un indicador que se emplea para registrar el momento en el cual es realizado el experimento de control.
- Control a lazo abierto/Control a lazo cerrado: son indicadores visuales que advierten al usuario el modo de control configurado.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela  
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

- **Parámetros del controlador PID:** su función es indicar los valores respectivos de cada parámetro en cada instante de muestreo.

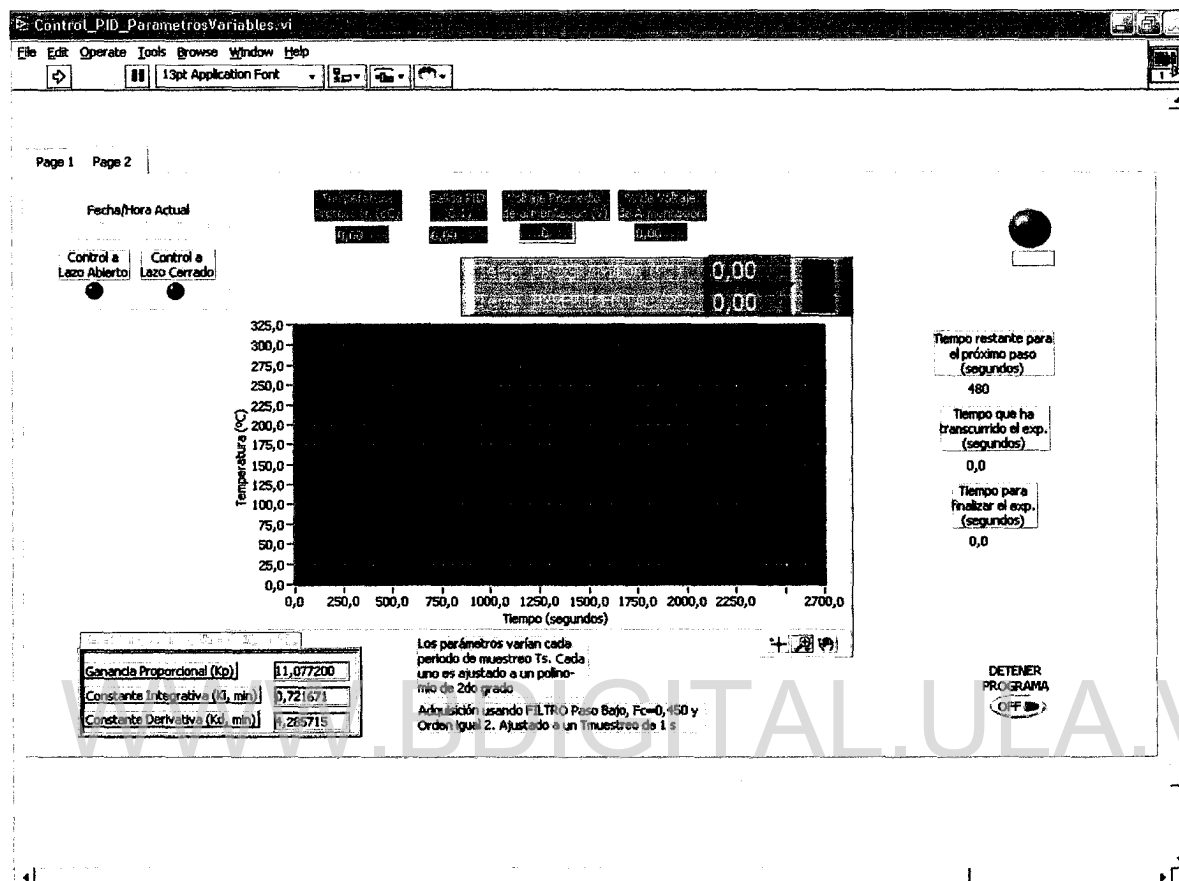


Figura D.3. Pantalla de Supervisión y Control PID

- **Temperatura de protección (°C):** muestra la temperatura configurada para proteger el horno eléctrico en caso de un posible fallo.
- **Salida PID:** éste indica la salida actual del controlador en un rango comprendido entre 0 y 1. Su valor es utilizado para controlar la duración del pulso de encendido, ya que el programa ha sido configurado para permitir una duración máxima del pulso de encendido de 1 segundo.
- **Voltaje promedio de alimentación:** indica el voltaje que está siendo suministrado al horno entre 0 y 110 V (ac).