

Controlador Difuso Multivariable del Perfil de Temperatura de un Horno

Daniel J. López Amado¹, Diego García², Leonardo Davico³ y Sebastián Verrastró⁴

^{1,3,4}Grupo de inteligencia artificial[†], Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Buenos Aires, Argentina

[†]Coordinador: Ing. Claudio Verrastró

²Grupo de Semiconductores[‡], Instituto de Investigaciones Científicas y Técnicas de las Fuerzas Armadas, Buenos Aires, Argentina

[‡]Coordinadora: Dra. Alicia B. Trigubó

Resumen – El control de temperatura de un horno con varias zonas muy próximas entre sí y con temperaturas distintas se hace dificultoso por medio del control clásico, por ejemplo, utilizando controladores PID (Proporcional-Integral-Derivativo). El fuerte acoplamiento entre las distintas zonas y las inercias térmicas propias del sistema, en general imponen un ajuste iterativo de cada una de ellas.

El Grupo de Inteligencia Artificial de la UTN desarrolló un controlador multivariable empleando técnicas de control difuso, que permite la descripción del problema usando variables lingüísticas y logrando que el sistema se comporte, en su conjunto, como si un operador estuviera accionando los controles para compensar las alinealidades del sistema.

Palabras Clave – Controlador, Lógica difusa, Control de temperatura, Control multivariable, Crecimiento de Monocristales.

I. INTRODUCCIÓN

El Grupo de Semiconductores de CITEFA desarrolla sensores infrarrojos de tipo fotovoltaico que se realizan por crecimientos de película monocristalina por Epitaxia en Fase Vapor Isotérmica. Para obtener las condiciones de temperatura necesarias para el proceso de crecimiento de los filmes, se introduce una cápsula en un horno de 5 secciones y pequeñas dimensiones (~50 cm) construido por el grupo.

Para establecer el perfil espacial de temperatura requerido, es necesario controlar la temperatura de cada una de las secciones del horno, la solución estándar a este problema se realiza empleando un controlador PID para cada sección, el ajuste del sistema es tedioso e iterativo dado el fuerte acoplamiento entre las secciones del horno. Este ajuste no es robusto frente a las variaciones de carga del horno.

El Grupo de Inteligencia Artificial de la UTN Facultad Regional Buenos Aires desarrolló un controlador multivariable empleando técnicas de control difuso, que permite la descripción del problema usando

variables lingüísticas y logrando que el sistema se comporte, en su conjunto, como si un operador estuviera accionando los controles para compensar las alinealidades del sistema.

Para el ajuste se simuló el horno con un modelo aproximado obtenido a partir de mediciones en vacío.

II. DESCRIPCION

A. HARDWARE

El controlador se puede dividir en 3 grandes bloques como se muestra en la Fig. 1.

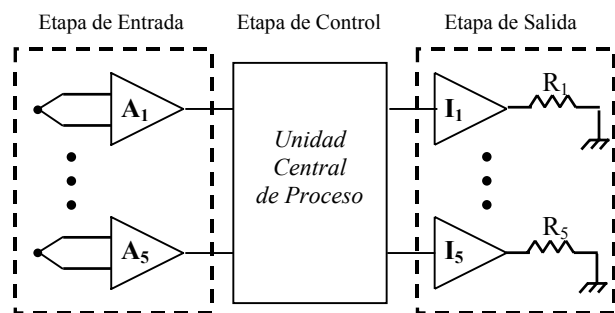


Figura 1. Diagrama en bloques del hardware

A1. Amplificador de termocuplas

La tensión entregada por las termocuplas está en el orden de las decenas de microvoltios. Para medir esta tensión se utilizó el convertor analógico digital (A/D) que tiene incorporado el microcontrolador. El mismo tiene una resolución de 10 bits y su rango de entrada va entre 0 y 4,5 Voltios.

Para no perder la resolución del convertor A/D es necesario intercalar entre la termocupla y el mismo una etapa amplificadora. Esto se implementó con un amplificador de instrumentación con alto rechazo al ruido en modo común. Se fijó una ganancia cercana a las 200 veces y se modificó el offset de la señal de forma de ajustar el rango de temperaturas de funcionamiento al rango de valores de entrada admitidos por el convertor A/D. La salida del amplificador de instrumentación pasa a través de un

filtro pasa bajos que elimina las componentes espurias de alta frecuencia.

A2. Unidad Central de Proceso

La implementación del sistema de control se realizó con un microcontrolador de 8 bits. El mismo posee un conversor analógico digital de 8 canales y 10 bits de resolución, con el que se miden las tensiones amplificadas provenientes de las termocuplas. En la memoria EEPROM se almacenan los perfiles de temperatura, que son recibidos por el puerto serie desde una PC; en la memoria FLASH está grabado el firmware que controla la temperatura de las cinco secciones con la técnica de lógica difusa; cinco salidas de PWM (implementadas por software) que están conectadas a relés de estado sólido, una por cada resistencia calefactora.

A3. Bloque calefactor

La unidad de potencia está compuesta por 5 relés de estado sólido, que comandan directamente las 5 resistencias bobinadas a lo largo del cuerpo del horno conformando las 5 secciones.

El sistema de calefacción de potencia se alimenta a través de un transformador de 24V, para evitar el uso de altas tensiones en el horno. Cada resistencia es de 180W.

B. LÓGICA DIFUSA

B1. Introducción

El concepto de lógica difusa fue introducido por Lotfi A. Zadeh (Zadeh, 1988) y es que en general las cosas no son absolutamente verdaderas o falsas como plantea la lógica booleana. A diferencia de esta, la lógica difusa trabaja con grados de veracidad o falsedad. Por ejemplo, una persona cuya estatura es de 1,8m o más es considerada una persona alta, ahora bien, qué pasa con una persona que mide 1,79m, ¿se puede decir que es una persona baja? La respuesta es no, pero tampoco sería 100% verdadero decir que es una persona alta. En la Fig. 2 se propone un gráfico que indica para cada estatura el grado de veracidad correspondiente al conjunto "persona alta". También se lo llama grado de pertenencia (Del Brio y Sanz Molina, 2002).

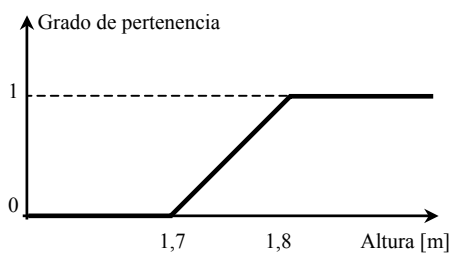


Figura 2. "Persona alta"

Un sistema de control difuso imita la forma que tiene una persona de tomar decisiones basándose en entradas

de datos (a través de sus sentidos) imprecisas. Por ejemplo, un conductor que frena cuando ve que un semáforo pasa de luz amarilla a luz roja, no sabe exactamente a que distancia está del semáforo, ni tampoco la velocidad exacta a la que circula, pero puede darse cuenta que está acercándose "MUY" rápido, rápido, despacio o "MUY" despacio. También puede darse cuenta si está "MUY" lejos, lejos, cerca o "MUY" cerca, y en base a esas vagas apreciaciones puede presionar el freno para detenerse en el lugar adecuado.

Las variables de entrada para este ejemplo son la velocidad del automóvil y la distancia al semáforo. El conductor es quien procesa esas entradas y la salida es la presión ejercida sobre el pedal del freno.

Con estos conceptos en mente se verá cuales son las variables de entradas y los adjetivos con los que trabaja el sistema de control difuso.

B2. Variables de entrada

El sistema de control difuso utiliza dos entradas de datos por cada una de las secciones del horno, la primer variable de entrada es el error de temperatura, se calcula como la diferencia entre la temperatura medida y la temperatura deseada. Esta variable de entrada cuantifica que tan lejos o cerca está la temperatura actual de la temperatura deseada y la misma se ha caracterizado por tres adjetivos, como se muestra en la Fig. 3, que son positivo, cero y negativo (Cox, 1994).

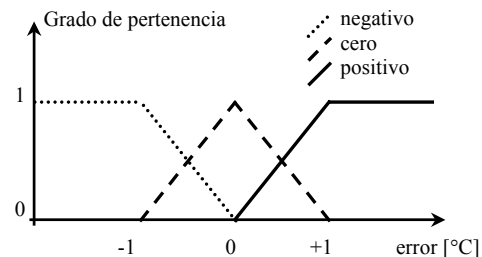


Figura 3. Adjetivos de "error"

La segunda variable de entrada es la derivada de la temperatura, se calcula como la diferencia entre la temperatura actual y la temperatura medida en la iteración anterior. Esta variable de entrada cuantifica que tan rápido o lento cambia la temperatura actual. También se ha caracterizado por tres adjetivos, como se muestra en la Fig. 4, que son positiva, cero y negativa.

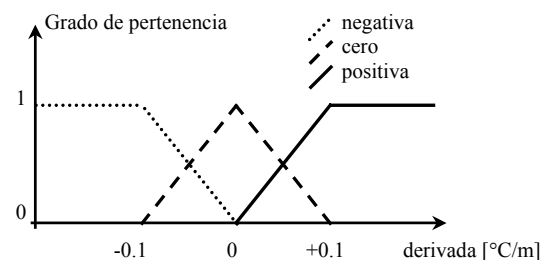


Figura 4. Adjetivos de "derivada"

Hasta aquí se explicó cuales son las entradas a nuestro sistema difuso y los adjetivos definidos para las mismas. Ahora se explicará como el sistema procesa esos valores.

B3. Motor de control difuso

El motor de control difuso procesa reglas del estilo *SI antecedente1 Y antecedente2 ENTONCES consecuente*. Este procesamiento es cercano al tipo de razonamiento que emplea el experto humano, y es por ello que con criterio y sentido común pueden escribirse las reglas que controlan a un sistema (Brubaker,1992).

El sistema de control procesa 9 reglas que están representadas en la Tabla 1. En la primera fila están los adjetivos de la variable de entrada “error de Temperatura”, en la primera columna los de la variable de entrada “derivada de Temperatura” y en las intersecciones están los adjetivos de la variable de salida “Ciclo de Actividad”.

error de Temp der. de Temp	N (negativo)	Z (cero)	P (positivo)
N (negativo)	Aumentar ciclo <i>REGLA 1</i>	Aumentar ciclo <i>REGLA 2</i>	Dejar igual <i>REGLA 3</i>
Z (cero)	Aumentar ciclo <i>REGLA 4</i>	Dejar igual <i>REGLA 5</i>	Disminuir ciclo <i>REGLA 6</i>
P (positivo)	Dejar igual <i>REGLA 7</i>	Disminuir ciclo <i>REGLA 8</i>	Disminuir ciclo <i>REGLA 9</i>

Tabla 1. Matriz de Reglas

Las reglas se leen como sigue:

REGLA 1: *SI el error es negativo Y la derivada es negativa ENTONCES Aumentar ciclo.*

La regla 1 dice que si la temperatura está por debajo de la deseada (error negativo) y además la temperatura es cada vez menor (derivada negativa) entonces se debe aumentar el ciclo de actividad de la tensión que alimenta la resistencia calefactora. De la misma manera se pueden interpretar todas las otras reglas.

B4. Variables de Salida

La salida regula el “Ciclo de Actividad” de la tensión que alimenta la resistencia calefactora, y actúa sobre la potencia disipada por la misma. Existen cinco variables de salida, una por cada sección del horno. Se definen tres adjetivos para cada una ellas como se muestra en la

Fig. 5, que son Aumentar ciclo, Disminuir ciclo, Dejar igual. De esta manera la salida no sólo depende de las entradas “error” y “derivada”, sino también del estado anterior de la salida, ya que se trabaja con la variación del ciclo de actividad y no con un valor absoluto del mismo, por lo tanto este tipo de controlador difuso es del tipo PI (Proporcional - Integral) (Tsoukalas and Uhrig,1997).

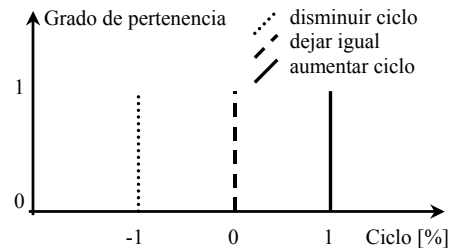


Figura 5. Adjetivos de “Ciclo de Actividad”

Para los adjetivos de la variable de salida se utilizó el modelo Sugeno, el cual asigna todo el valor de verdad a un solo elemento. Esto tiene como ventaja frente al modelo Mamdani que requiere menos memoria de programa para el almacenamiento de las tablas con las formas de las funciones de pertenencia, además es sumamente sencillo de implementar la rutina de defuzificación. Como se verá posteriormente esta se realiza mediante un promedio ponderado que da como resultado el porcentaje que debe modificarse el ciclo de actividad (Vas, 1999).

B5. Implementación del software

La estructura del software está representada por el diagrama en bloques de la Fig. 6. Se distinguen cinco etapas que son ejecutadas repetitivamente.

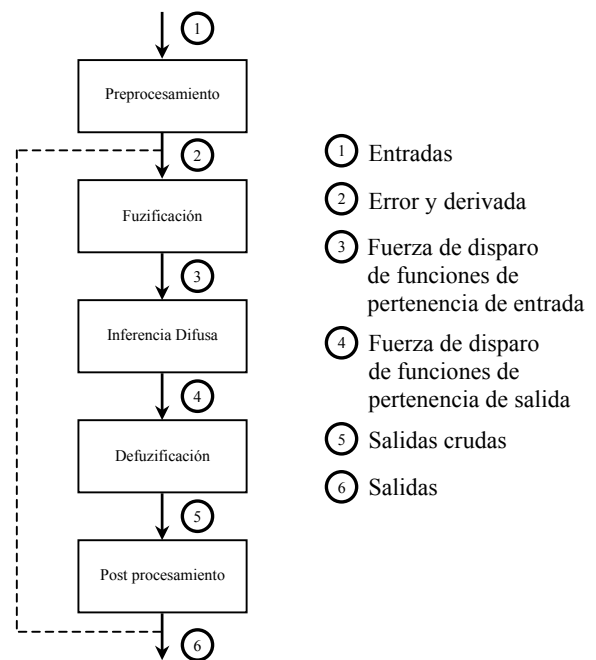


Figura 6. Estructura del software

Preprocesamiento: Se calculan las 10 entradas del sistema. El error de temperatura y la derivada de cada sección.

Fuzificación: Se calcula el grado de pertenencia a los adjetivos de entrada utilizando el valor de las entradas calculadas en el bloque anterior.

Inferencia Difusa: Se evalúan las nueve reglas mencionadas anteriormente. El consecuente de cada regla es el producto lógico de sus antecedentes. Este producto se calcula como el mínimo valor entre los antecedentes, como se muestra a continuación.

- Aumentar ciclo = $\text{mín}(\text{error negativo, derivada negativa})$
- Aumentar ciclo = $\text{mín}(\text{error cero, derivada negativa})$
- Aumentar ciclo = $\text{mín}(\text{error negativo, derivada cero})$
- Dejar igual = $\text{mín}(\text{error positivo, derivada negativa})$
- Dejar igual = $\text{mín}(\text{error cero, derivada cero})$
- Dejar igual = $\text{mín}(\text{error negativo, derivada positiva})$
- Disminuir ciclo = $\text{mín}(\text{error positivo, derivada cero})$
- Disminuir ciclo = $\text{mín}(\text{error cero, derivada positiva})$
- Disminuir ciclo = $\text{mín}(\text{error positivo, derivada positiva})$

Luego se trabaja con los consecuentes y se calcula la fuerza de activación de cada salida difusa como el máximo valor entre todas las reglas que la mencionan, como se muestra a continuación.

Aumentar ciclo = $\text{máx}(\text{consecuente de la regla 1, consecuente de la regla 2, consecuente de la regla 4})$

Dejar igual = $\text{máx}(\text{consecuente de la regla 3, consecuente de la regla 5, consecuente de la regla 7})$

Disminuir ciclo = $\text{máx}(\text{consecuente de la regla 6, consecuente de la regla 8, consecuente de la regla 9})$

Defuzificación: Con los resultados obtenidos en la inferencia difusa se calcula la salida del sistema como el promedio ponderado de cada uno de los centroides definidos en los adjetivos de salida por su respectiva fuerza de activación.

$$\text{Salida} = \frac{\text{CAC} \times \text{FAC} + \text{CDI} \times \text{FDI} + \text{CDC} \times \text{FDC}}{\text{FAC} + \text{FDI} + \text{FDC}}, \quad (1)$$

donde:

- CAC: Centroide Aumentar ciclo
- FAC: Fuerza de activación de Aumentar ciclo
- CDI: Centroide Dejar igual
- FDI: Fuerza de activación de Dejar igual
- CDC: Centroide Disminuir ciclo
- FDC: Fuerza de activación de Disminuir ciclo

Postprocesamiento: Con el valor obtenido en la defuzificación, se calcula el nuevo ciclo de actividad para la modulación por ancho de pulso (PWM). Esto se realiza para las cinco salidas.

Control On Off: Cuando la entrada “error de Temperatura” de una sección determinada está fuera de la banda $\pm 10^\circ\text{C}$ se satura la salida de dicha sección,

pasando el control a ser de tipo “on off”. Esto se indica en la Fig. 6 con una línea punteada que vincula directamente la salida con las entradas preprocesadas sin pasar por los bloques intermedios.

III. DESARROLLO

A. Filtro digital para eliminar ruido de línea

Los conductores de las termocuplas recorren largas distancias y pasan cerca de conductores de energía con corrientes elevadas. Estas condiciones producen que a la tensión de las termocuplas se le suma una componente de ruido relacionada con la tensión de línea (50 Hz) y sus armónicos.

Para eliminar la componente de ruido se implementó un filtro digital que integra al ruido de línea en una cantidad entera de ciclos. Se toman 64 muestras por cada uno de los canales en un tiempo igual a 1,3 seg, que equivale a 65 ciclos completos de la tensión de línea. Luego se promedian las 64 muestras, dando como resultado el valor filtrado.

B. Compensación de la medición de la termocupla

Cuando dos cables compuestos de distintos metales se juntan en ambos extremos y una de las uniones es calentada, aparece un flujo de corriente en el circuito termoeléctrico. Si el circuito se abre, se puede medir una diferencia de tensión que es función de la temperatura de la juntura y de los materiales con que están hechos los cables. La medición de esta tensión trae aparejado un primer problema, al ser los cables del instrumento con el que se mide de distinto material que los de la termocupla, aparecen dos termocuplas (no deseadas) en dichas uniones, como se muestra en la Fig. 7. Si no se tienen en cuenta, la medición será errónea, pues se medirá la sumatoria algebraica de las tres tensiones, la de la termocupla principal y las dos de las termocuplas residuales.

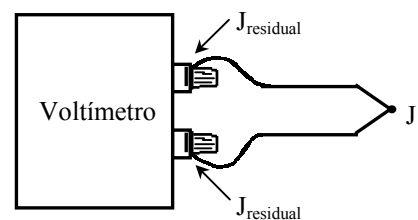


Figura 7. Esquema de medición

Para solucionar este inconveniente se instaló un sensor de temperatura en la bornera de entrada, que mide la temperatura a la que están las conexiones de las termocuplas, es decir, la temperatura a la que están las termocuplas parásitas. De esta manera se compensa por software la tensión medida, restándole a la misma el valor de tensión que introducen las termocuplas parásitas. El valor a restar se extrae de una tabla almacenada en el microcontrolador.

C. PWM de salida

Se realiza una modulación de ciclo de actividad en cada una de las cinco salidas. La resolución de la modulación es quien otorga sensibilidad al controlador y se logra con rutinas de software una resolución de 16 bits.

Cuando se enciende una salida, la resistencia calefactora produce un pico de corriente. Si se encendieran todas las salidas en el mismo instante, el pico de corriente producido provocaría ruidos que afectarían a la lectura del conversor analógico digital.

Para evitar este problema, se fija el instante de encendido de cada una de las salidas en posiciones equidistantes dentro del periodo de la señal de salida, de esta manera el encendido de las salidas es secuencial, minimizando los efectos producidos por el pico de corriente.

D. Interfaz de comando y configuración del sistema

La interfaz de comando del controlador es RS-232, permitiendo su conexión a una PC. El software de PC permite configurar las temperaturas deseadas para cada una de las secciones, y también permite introducir los coeficientes del polinomio de calibración de cada termocupla hasta el grado 9.

Una vez calibrado y configurado se pueden visualizar las temperaturas de cada una de las secciones, el valor de temperatura ambiente, y el valor porcentual del ciclo de actividad de las 5 salidas.

Todos los parámetros del controlador son almacenados en memoria no volátil para evitar una desprogramación por un corte de alimentación, de esta manera, una vez configurados los parámetros funcionales, el controlador puede funcionar en forma independiente de la PC, incluso puede apagarse.

E. Modelo y Simulación

Una de las principales ventajas de implementar un control con lógica difusa es que no es necesario modelizar en forma exacta la planta que se desea controlar (Banks and Hayward, 2001).

Sobre la base de mediciones en vacío se construyó un modelo aproximado del horno. Este modelo, mostrado en la Fig. 8, sólo incluye la capacidad térmica de cada sección, la resistencia térmica de pérdida al medio ambiente y una resistencia térmica entre secciones que modeliza en forma aproximada la influencia de una sección sobre la siguiente.

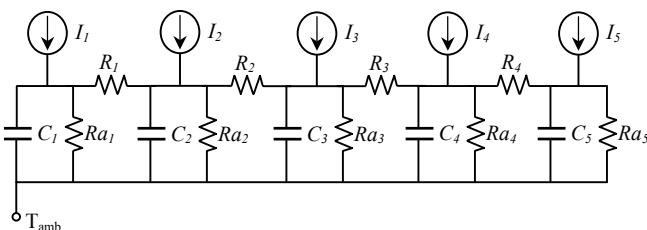


Figura 8. Modelo Aproximado del Horno

El modelo se utilizó para realizar simulaciones y poder ajustar las variables del controlador. En la Fig. 9 se muestra un gráfico realizado con un software para simulación de sistemas difusos llamado "Cubical".

La simulación se realizó tomando condiciones iniciales nulas, es decir, fijando las temperaturas iniciales de cada una de las secciones igual a 0°C. La temperatura ambiente, Tamb, se fijó en 20°C y se utilizaron como referencia los siguientes valores de temperaturas:

- Temperatura Sección 1: 400 °C
- Temperatura Sección 2: 480 °C
- Temperatura Sección 3: 520 °C
- Temperatura Sección 4: 560 °C
- Temperatura Sección 5: 600 °C

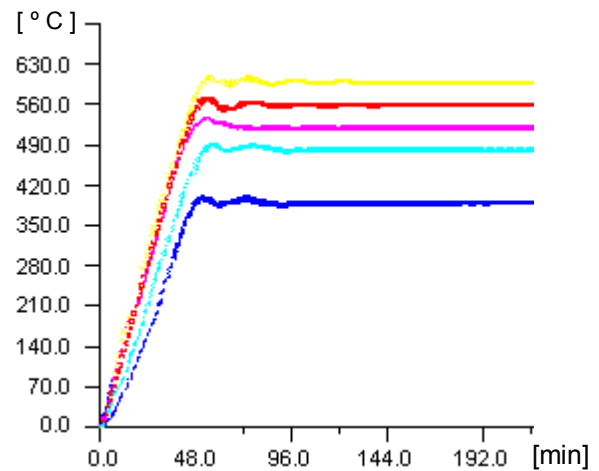


Figura 9. Simulación

F. Resultados

En esta sección se incluyen curvas realizadas una vez instalado el controlador difuso.

Desde la PC se configuró el perfil espacial de temperatura, ingresando como valores deseados los mismos que se utilizaron para realizar la simulación descrita anteriormente.

La Figura 10 muestra la respuesta del sistema de control difuso con el horno en vacío.

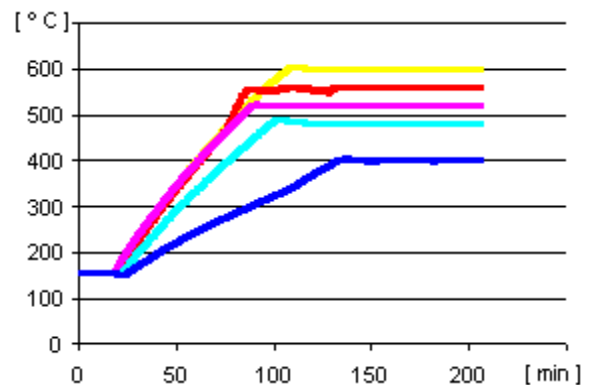


Figura 10. Horno en vacío

Como puede observarse en ella, no existen sobreimpulsos y una vez terminado el transitorio se logra el perfil espacial de temperatura ingresado desde la PC. El error en estado estacionario es $\pm 1^\circ\text{C}$.

La Figura 11 muestra la respuesta del sistema de control difuso frente a variaciones de carga del horno.

Se selecciona desde la PC el perfil espacial de temperatura ingresando como referencia los siguientes valores:

- Temperatura Sección 1: 450°C
- Temperatura Sección 2: 450°C
- Temperatura Sección 3: 470°C
- Temperatura Sección 4: 650°C
- Temperatura Sección 5: 650°C

Una vez terminado el transitorio, el mismo no se muestra en la gráfica, se introduce una ampolla de 28cm de longitud hasta el fondo del horno. Se puede observar en el gráfico como en ese instante comienza a descender la temperatura. Se registró un error máximo de 8°C en la sección número 3.

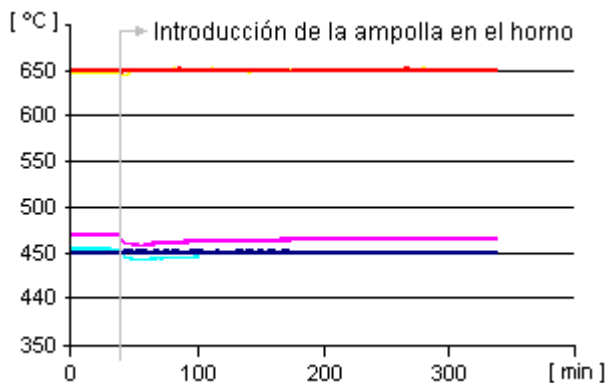


Figura 11. Horno con carga

IV. CONCLUSIONES

Por la complejidad del modelo matemático que describe el comportamiento del horno en su totalidad y el tiempo que se hubiera tenido que invertir en investigar y realizar este modelo, parece haber sido lo más adecuado encarar el problema utilizando el control por lógica difusa.

En la puesta en marcha solamente se debieron corregir detalles constructivos, pero no fue necesario corregir las variables del controlador.

En base a los ensayos realizados se pudo observar que el control tuvo una respuesta rápida frente a las variaciones de temperatura del medio, fue robusto frente a variaciones de carga del horno, no presentó sobreimpulsos, los cuales podrían destruir la muestra bajo ensayo y se logró el perfil espacial de temperatura dentro de las limitaciones constructivas del horno.

V. REFERENCIAS

- Banks W. and G. Hayward, *Fuzzy logic in embedded microcomputers and control systems*, Byte Craft Limited, Canada (2001).
- Brubaker D.I, "Fuzzy-logic basics: intuitive rules replace complex math" *Engineering Design News*, 111-116 (1992).
- Cox, E., *The Fuzzy Systems Handbook*, Academic Press (1994).
- Del Brio B. M. y Sanz Molina A., *Redes Neuronales y Sistemas Difusos*, Alfaomega, Madrid, 244-268 (2002).
- Tsoukalas L.H. and Uhrig R.E., "Fuzzy and Neural Approaches in Engineering" John Wiley & Sons, New York, 162 (1997).
- Vas, P. *Artificial - Intelligence- Based, Electrical Machines and Drives*, Oxford, New York 221-227 (1999).
- Zadeh, L., "Fuzzy logic" *IEEE Computer*, 1-83 (1988).