

INSTRUMENTACIÓN, DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA PARA EL PROTOTIPO A ESCALA DE UNA CÁMARA DE SECADO DE PAPEL

(An Instrument, Design and Implementation of a Temperature Control's System for a Drying Paper Chamber's Prototype, at Scale)

Nelson Barrera Lombana, David Ricardo Bravo, Ronald Jerez Fonseca

Escuela de Ingeniería Electrónica, UPTC, Grupo de Investigación GIRA,
gira2003@gmail.com

(Recibido septiembre 6 de 2007 y aceptado mayo 8 de 2008)

| | |
|--|--|
| <p>Resumen: Se presenta una breve descripción del diseño e implementación de un sistema de control digital de temperatura para el prototipo a escala de la cámara de secado de la empresa Industrias Explorer. La instrumentación del prototipo se realizó empleando sensores adecuados para la medición de temperatura y humedad relativa. Como actuador del sistema se emplearon resistencias de calentamiento fabricadas con la aleación de Fe-Cr-Al. Además, se desarrolló una interfaz interactiva donde se monitorean y registran las señales involucradas en el proceso desarrollado por la empresa. Para el diseño del controlador y la interfaz se empleó una tarjeta DSP, fabricada por instruNet, programada en LabView.</p> | <p>Abstract: This is a brief description of the design and implementation of a temperature digital control system for a drying chamber's prototype at scale of the company "Industrias Explorer". The prototype implementation was carried out using some suitable sensors for measuring the temperature and the relative humidity. As the actuator system was used some heating resistors made from an alloy Fe-Cr-Al. In addition, an interactive interface was constructed, where the signals involved in the process developed by the company are monitored and recorded. For the controller design and the interface was used a DSP card, manufactured by the instruNet and programmed at the LabView.</p> |
| <p>Palabras clave: Proceso de secado, Humedad relativa, LabView, Controlador digital.</p> | <p>Key words: Drying Process, Relative Humidity, LabView, Digital Controller.</p> |

1. INTRODUCCIÓN

Industrias Explorer es una empresa especializada en el área de distribución, mantenimiento y reparación de transformadores de potencia de media y alta tensión, así como en la reparación de motores. Una de las etapas del servicio de mantenimiento/repación de transformadores es el secado y encube de la parte activa del transformador; el secado se realiza por medio de la recirculación de aire caliente en una cámara y es aplicado a los materiales de aislamiento, generalmente papel Kraft, Presspan y el Faetiso, que son denominados higroscópicos, por su capacidad de absorber humedad del medioambiente. La presencia de humedad en estos materiales no solo disminuye su rigidez eléctrica y su resistencia, sino que obstaculiza la penetración profunda del aceite (usado como aislante eléctrico) en poros y estrechos de las piezas que constituyen las bobinas, y de ahí la importancia de aplicarles el secado.

Inicialmente, de acuerdo con Industrias Explorer y con el propósito de optimizar la primera fase del protocolo actual de secado, se fabricó un prototipo a escala de la cámara de secado para la realización y análisis de procesos tanto en criogénico como en vacío. Posteriormente, el prototipo fue provisto de la instrumentación requerida para sensar las señales de interés. Luego, mediante un sistema de adquisición de datos, se diseñó e implementó un sistema de control digital y una interfaz de

usuario, que permiten monitorear en tiempo real el sistema controlado y ajustar los parámetros del proceso (temperatura, tiempo de duración y razón de registro), así como la creación de un archivo donde se registre la fecha, hora y los valores de las señales involucradas, dependiendo de los ajustes realizados en los parámetros del proceso.

2. DISEÑO DEL PROTOTIPO

El prototipo fue construido a escala 10:1 del tamaño de la cámara de secado usada por la empresa, simulando las condiciones internas de temperatura y recirculación de aire; en él es posible realizar procesos de secado tanto en criogénico como en vacío. Para evitar las fugas térmicas fue recubierto con una capa de lana de vidrio. El resultado final del prototipo se observa en la figura 1; sus dimensiones son de 610 mm x 240 mm x 445 mm.

El prototipo tiene un ventilador que posee un flujo de 7,2 CFM (Chapman, 2000), el cual hace recircular la totalidad del volumen de aire del prototipo en 19,2 segundos, tiempo equivalente al utilizado por el ventilador de la cámara de secado para realizar esta tarea (Segui, 2004).

El actuador del prototipo, encargado de la variación de la temperatura, corresponde a un conjunto de resistencias de



Figura 1. Resultado final del prototipo.



Figura 3. Sensores implementados
a) RTD, b) sonda HX15 -D

Como se mencionó, las resistencias de calentamiento requieren ser alimentadas con un voltaje de 110 Vac (13,63 Aac) (Mohan, 1997).

Para controlar el flujo de corriente (bidireccional) sobre la carga, se utilizó un Triac (Q4015), que se dispara a través de una señal PWM (TL494N) sincronizada con la red. El circuito de sincronización y disparo se observa en la figura 4 (Benavent, 2002).

CM...1¼BÓelš-5--H!qmÖ6½ Zª Ægò"" œiMÉPÖ'«Û,Ö
nôU!gl W, -3"3fäuéq(xîSÜð Ð •"© ,?Tuñ½3"ªEª°±éyN®
aiÉP±Ç'®-ÿ=SŁóD"OSÓ6L-±8<ÅStG[U:OYB¼CG-ùZª ±bwØ
nĪäE[û\¼_ÀAÇ(ÿO°Æ&-R)SÚa7 Jšù n¼_ àøf-|øF-çø Y
.µ;rĀI"ú["õ%œE+QF...ªCYñiEª]-Ālby,İšúNāaj; €Dūĉā
āDHĪŌZ»lōS[G-Ū-ŌΩ3Ÿ æ7½ĀcgiOQqµ@¼!"-3"ªEĒ,±Bā
~ ¨*zĒĒk¼BŁóBG-šyĀ*º ùZ»DĪZİ?ĐK>rĀt'ĭ^5-À!q±
āi'E c³rp^c':Š4ĉN!q±0

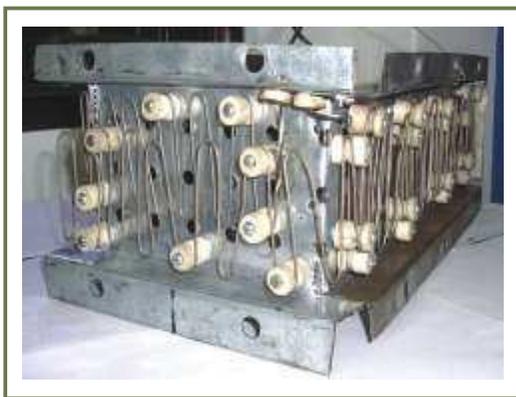


Figura 2. Resistencias de calentamiento del prototipo.

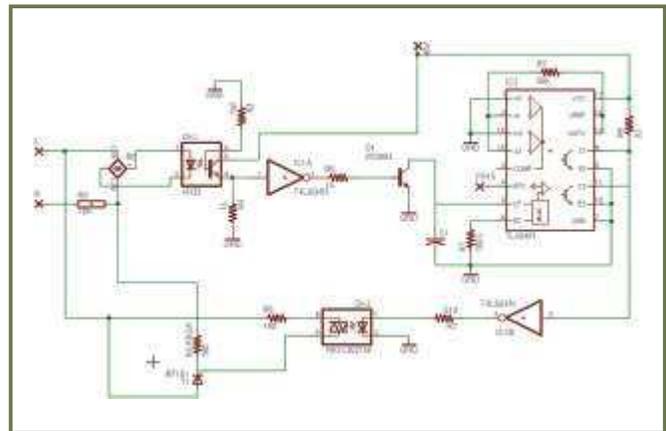


Figura 4. Diagrama esquemático del circuito de sincronización y disparo del triac.

Las señales de interés para el proceso de secado son la temperatura y la humedad relativa; la instrumentación del prototipo se realizó empleando dos sondas RTD Pr-11-2-100-M600-150-E de OMEGA, las cuales miden en un rango de temperatura de -200 °C a 600 °C. Para sensar la humedad relativa se utilizó la sonda transmisora HX15-D de OMEGA, que internamente tiene un sensor de humedad relativa (3% al 95%) y de temperatura (-40 °C a 180 °C). En la figura 3a y 3b se observa la RTD y la sonda HX15-D (Astigarraga, 1994).

Para la adquisición y control de las señales del proceso se utilizó la tarjeta controladora DSP iNet-200 y el módulo de comunicación iNet-100, fabricados por instruNet. El módulo, indicado en la figura 5a, cuenta con canales de entrada y salida de voltaje, así como entradas y salidas digitales, y se caracteriza principalmente porque la conexión de los sensores (RTD y HX15D) se realiza de forma directa, es decir, no es necesario implementar adecuadores de señal porque el módulo ya los trae incorporados, así mismo, es utilizado para enviar las señales de control (PWM, activación de resistencias y ventilador) (Hart, 2002).

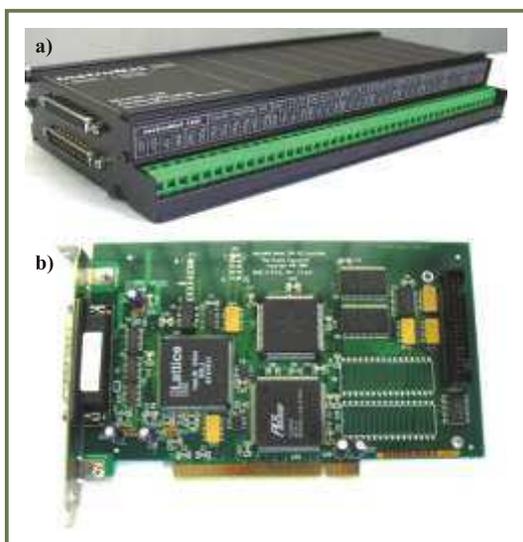


Figura 5. Hardware. a) Módulo iNet-100, b) Tarjeta iNet200.

La tarjeta controladora, figura 5b, es utilizada para adquirir las señales involucradas en el proceso, así como para realizar el control de temperatura. Esta tarjeta está provista de un software básico llamado instruNet World (iW), mediante el cual se puede realizar el monitoreo de las señales. Lo interesante de esta tarjeta es su compatibilidad con softwares tales como TESTPoint, LabVIEW, HPVIEW y DASyLab, en los cuales es posible realizar programas necesarios en aplicaciones de más complejidad.

3. DISEÑO DE LA INTERFAZ DE USUARIO

Antes de realizar el diseño del controlador, se procedió a elaborar la interfaz de usuario, con el propósito de almacenar los datos de las variables del proceso para luego graficarlos y así observar el comportamiento del sistema. Los requerimientos que cumple la interfaz, solicitados por la empresa, son los siguientes:

- Panel interactivo del proceso.
- Monitoreo en tiempo real de las señales de temperatura y humedad relativa.
- Control de la temperatura.
- Creación de un archivo que contenga los datos adquiridos del proceso.

La programación de esta interfaz fue realizada en LabView. Para esto fue necesario adquirir los *drivers* que enlazan el hardware instruNet con el *software* LabView. El resultado final de la interfaz de usuario para el proceso de secado se indica en la figura 6. Esta interfaz realiza el monitoreo en tiempo real de las señales del proceso (temperatura y humedad relativa) y el control de temperatura por medio de un controlador PID



Figura 6. Interfaz del proceso e secado.

digital, y adicionalmente genera un archivo txt, en el cual se registran los valores de las señales del proceso (Tocci, 2004).

La interfaz está dividida en tres paneles llamados ‘Configuración’, ‘Monitoreo’ y ‘Control’. El panel Configuración ajusta el tipo de proceso, el tiempo de duración, la razón de registro de datos en el archivo de texto.txt, el inicio y la parada del proceso; además cuenta con un interruptor llamado “cool”, el cual activa o desactiva el ventilador sin que sea necesario iniciar el proceso; esta función puede ser útil para refrigerar el prototipo una vez terminado el proceso. El panel Monitoreo visualiza las señales de temperatura de las RTDs ($^{\circ}\text{C}$ RTD 1 y $^{\circ}\text{C}$ RTD 2) y del sensor HX15 ($^{\circ}\text{C}$ RTD HX), enseguida se observa un indicador llamado Promedio $^{\circ}\text{C}$, que entrega el promedio de los sensores de temperatura; finalmente aparece el indicador % Humedad Relativa, que muestra el valor de esta; las formas de onda se observan en el graficador llamado “Señales del Proceso”, dependiendo del ‘tipo de señal’ seleccionado en el menú Selección de Señal; la velocidad de visualización de las formas de onda puede ser ajustada con la perilla Delay ms, en un rango de 50 ms a 1000 ms. En el panel Control, el graficador “Señales de Control” muestra las formas de onda de la temperatura actual del prototipo (promedio de las señales de temperatura), la señal de referencia de temperatura del proceso y la señal del controlador digital.

Los indicadores ventilador y resistencia se activan al iniciar el proceso criogénico y muestran que tanto las resistencias de calentamiento como el ventilador están en funcionamiento. El indicador digital PWM señala el voltaje suministrado al circuito PWM (0,45 V y 0,96 V para el máximo y mínimo ciclo útil, respectivamente). Finalmente, los indicadores digitales (no editables) muestran las constantes del controlador PID actuales.

El archivo txt generado por la interfaz se observa en la figura 7, y debe ser abierto en la aplicación de office Excel para su correcta visualización.

Figura 7. Archivo de registro del proceso de secado.

4. DISEÑO DEL CONTROLADOR

El controlador seleccionado para este proceso fue el PID (Proporcional Integral Derivativo). Este es uno de los métodos más frecuentes y precisos en la regulación automática dentro de los procesos industriales; se caracteriza principalmente por mantener la salida en un nivel específico (Set Point), aunque el proceso se someta a perturbaciones; además, responde rápida y exactamente frente a posibles cambios en el nivel de referencia del proceso (Ogata, 1996).

Para realizar el diseño del controlador digital es necesario efectuar el diseño en tiempo continuo, partiendo de la toma de la curva de reacción de la planta. Con la ayuda del archivo txt generado por el programa que controla la interfaz del proceso, explicado en la sección anterior, se obtuvo la curva de reacción mostrada en la figura 8.

Debido a que la temperatura ambiente es variable, su valor promedio se estabilizó a un valor específico; para esto se fijó un voltaje en la entrada de control del PWM de 0,95 V (correspondiente a un valor de 53,14 °C de referencia) a través del módulo de comunicación, obteniendo una temperatura promedio de estabilización de 51,52 °C. Posteriormente se

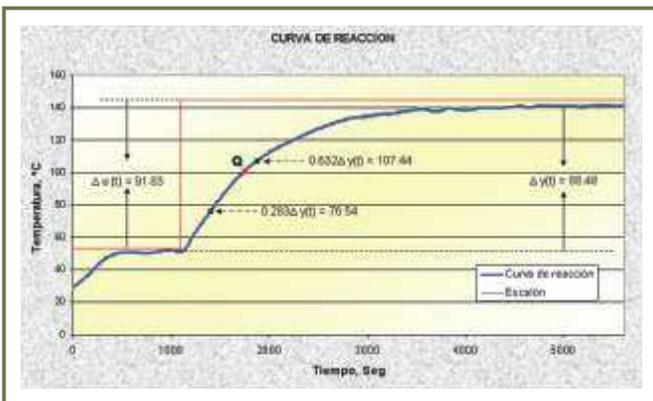


Figura 8. Curva de reacción del prototipo.

ingresó un escalón de 0,5 V al PWM (equivalente a un valor de temperatura de referencia de 144,97 °C), obteniendo una temperatura promedio de estabilización de 140 °C.

El proceso de secado es realizado a una temperatura de 100 °C; por esta razón se tomó la curva de reacción entre 50 °C y 140 °C, con la intención de tener el punto de trabajo, Q, dentro de la región lineal de operación de la planta, como se observa en la figura 8. Observando la curva de reacción del prototipo, esta puede ser aproximada a un modelo de primer orden más tiempo muerto (1).

$$G(s) = \frac{Ke^{-t_0s}}{\tau s + 1} \tag{1}$$

El método para obtener el modelo matemático de la planta a partir de la curva de reacción fue el de los dos puntos, de Smith. Tomando los puntos del 28,3% y 63,2%, de la figura 8, los valores obtenidos para t, t₀ y K fueron:

$$\begin{aligned} \tau &= 709.5 \\ t_0 &= 65.5 \\ K &= 0.963 \end{aligned} \tag{2}$$

Sustituyendo estas constantes en (1), se obtuvo finalmente la función de transferencia de la planta indicada en (3).

$$G(s) = \frac{0.963e^{-65.5s}}{709.5s + 1} \tag{3}$$

4.1 Diseño en tiempo continuo

En (4) se define el controlador PID en el dominio del tiempo.

$$u(t) = Kp \cdot e(t) + Ki \int e(t)dt + Kd \frac{de(t)}{dt} \tag{4}$$

La función de transferencia del controlador PID se expresa en función de la ganancia Kp y las constantes de tiempo integral y derivativo, Ti y Td, como aparece en (5).

$$G_c(s) = Kp \left[1 + \frac{1}{Ti \cdot s} + Td \cdot s \right] \tag{5}$$

En (5) se observa que es necesario determinar los valores de las constantes Kp, Ti y Td para obtener la función de transferencia del controlador. Para esto se empleó el método de sintonización de Cohen-Coon, tabla 1 (4).

Tabla 1. Valores de los parámetros del controlador según Cohen-Coon.

| Control | Kp | Ti | Td |
|---------|--|--|--|
| PID | $\frac{\tau}{K \cdot t_0} \left[\frac{4}{3} + \frac{t_0}{4 \cdot \tau} \right]$ | $\frac{t_0(32 \cdot \tau + 6 \cdot t_0)}{13 \cdot \tau + 8 \cdot t_0}$ | $\frac{4 \cdot t_0 \cdot \tau}{11 \cdot \tau + 2 \cdot t_0}$ |

A partir de las constantes, K , t y t_0 , obtenidas con anterioridad (2), se calculan las constantes del controlador PID utilizando la tabla 1, resultando la función de transferencia del controlador mostrada en (6) (Ogata, 1996).

$$G_c(s) = \frac{357.155s^2 + 15.25s + 0.09826}{s} \quad (6)$$

Finalmente, se obtuvo la función de transferencia en lazo abierto del sistema (Planta + controlador), indicada en (7).

$$GH(s) = \frac{11267.0398s^3 + 137.9254s^2 + 11.6173s + 0.0946}{23236.125s^3 + 742.25s^2 + s} \quad (7)$$

La respuesta al escalón del sistema con el controlador Cohen-Coon se indica en la figura 9; se observa que el controlador mejora el tiempo de respuesta y reduce el error de estado estacionario de la planta.

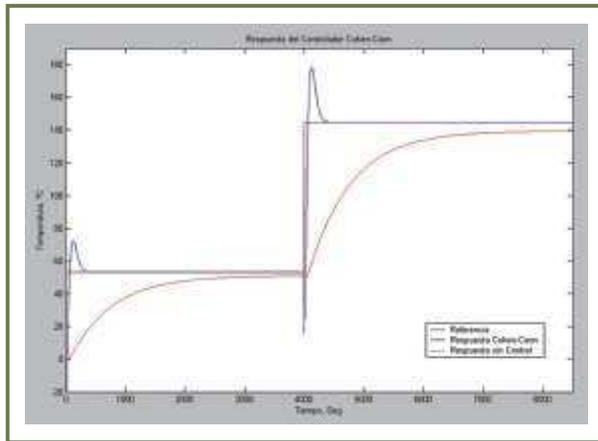


Figura 9. Respuesta al escalón, controlador Cohen-Coon.

4.2 Diseño en tiempo discreto

Como uno de los objetivos es el diseño del controlador digital, es necesario discretizar la ecuación del controlador PID en tiempo continuo (ecuación (4)), para que sea posible la implementación del controlador PID sobre el hardware disponible. Esto se hace aproximando el término integral por el método trapezoidal de integración y el término derivativo por el método de diferenciación hacia atrás. La ecuación del PID discreto (Ogata, 1996) se indica en (8).

$$u(kT) = K_p \left\{ e(kT) + \frac{T}{T_i} \sum_{h=1}^k \frac{e((h-1)T) + e(hT)}{2} + \frac{T_d}{T} [e(kT) - e((k-1)T)] \right\} \quad (8)$$

Posteriormente se discretizó la función de transferencia del sistema (Planta + Controlador) en lazo abierto (ver ecuación (7)) para obtener la función de transferencia del sistema en tiempo discreto, como se indica en (9).

$$GH(z) = \frac{0.484893z^3 + 1.449075z^2 + 1.442975z + 0.478796}{z^3 + 2.968518z^2 + 2.937079z + 0.968561} \quad (9)$$

Se realizó análisis de estabilidad empleando la prueba de Jury y el criterio de Routh-Hurwitz, obteniendo resultados satisfactorios que indicaban la existencia de estabilidad para el sistema. Es importante tener en cuenta que para realizar el análisis de estabilidad se debe calcular la función de transferencia en lazo cerrado a partir de (9) (Ogata, 1996).

Diseñado el controlador discreto y comprobada la estabilidad del sistema, se procede a verificar la respuesta al escalón para este caso, mostrada en la figura 10.

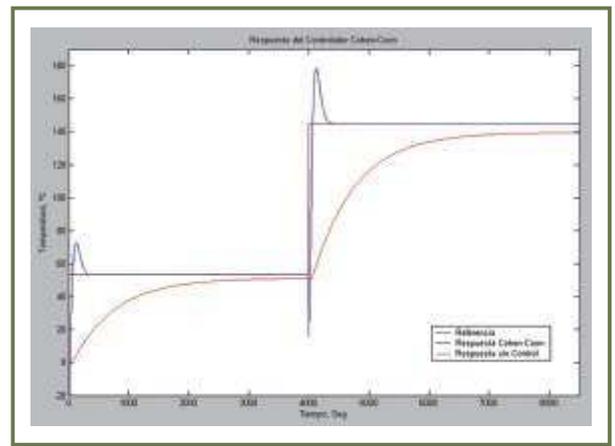


Figura 10. Respuesta al escalón del sistema de control discreto.

Se observa que la respuesta del sistema es similar a la obtenida con el control en tiempo continuo (figura 9), mejorando (respecto al sistema sin control, figura 8) el tiempo de estabilización (1000 segundos) y obteniendo el seguimiento deseado de la señal de referencia.

Como la expresión para el controlador PID discreto (8) se obtuvo a partir de la (4), los valores para K_p , T_i y T_d son iguales a los hallados en tiempo continuo, es decir, las constantes del controlador digital son las mismas que las del controlador continuo. De esta manera se implementó (8) en el programa de la interfaz descrita en la sección anterior.

5. VERIFICACIÓN DEL SISTEMA CONTROLADO

5.1 Prueba del controlador

Se mencionó que los procesos de secado se realizan a una temperatura de 100 °C. La figura 11 muestra el comportamiento del sistema con y sin control. Se observa que el sistema controlado respecto al sistema sin control mejora el tiempo de respuesta, aproximadamente en 1800 segundos, además de mantener un error de estado estacionario bastante pequeño. Mantener la temperatura lo más uniforme posible evitará que

las propiedades del material sometido al proceso de secado resulten afectadas, además, la disminución del tiempo de respuesta implica una duración del proceso de secado menor al del sistema sin control y, por ende, un ahorro de energía.

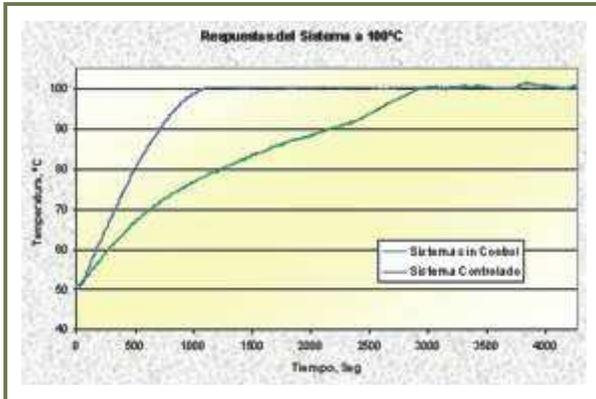


Figura 11. Respuesta del sistema controlado y sin control a 100 °C.

Posteriormente el sistema fue sometido a perturbaciones con el propósito de observar el comportamiento del controlador ante desviaciones de la temperatura interna respecto a la referencia.

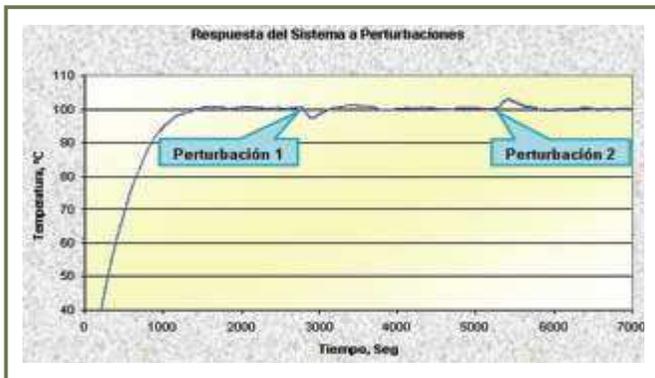


Figura 12. Respuesta del sistema controlado ante perturbaciones.

La figura 12 muestra la respuesta del sistema sometido a dos perturbaciones. La “Perturbación 1” se aplicó abriendo la puerta del prototipo unos cuantos centímetros (4 cm); como era de esperar, la temperatura disminuyó, aproximadamente en 4 °C, y posteriormente fue restablecida al valor de la referencia en un tiempo de 1000 segundos. Transcurridos 1500 segundos desde la estabilización mencionada, fue aplicada la “Perturbación 2”, cerrando completamente la puerta del prototipo; al igual que en el caso anterior, la temperatura interna se modificó, pero en este caso aumentó en 3 °C, aproximadamente, y de nuevo la acción del controlador llevó la temperatura del prototipo al valor de referencia después de 650 segundos.

5.2 Proceso de secado

Verificado el funcionamiento del controlador en el sistema, se realizó una prueba de secado empleando conjuntamente la interfaz diseñada y el prototipo de la cámara de secado. Los parámetros del proceso ingresados en la interfaz fueron los siguientes: “PROCESO = Criogénico”, “Temp Ref. °C = 100”, “Raz Reg, Seg = 1” y “Tiempo = 6 hor 1 min”. El material sometido al proceso de secado fue papel Prespan en láminas, el cual es utilizado para aislamiento entre bobinas de los transformadores; se emplearon 5 láminas (18x35 cm c/u) con un peso inicial de 783 g, las cuales se humedecieron en agua (alcanzando un peso de 1378 g), con el propósito de observar qué tanta humedad se extraía en el proceso, además, para obtener una curva de humedad más representativa. Las láminas fueron ubicadas dentro del prototipo, como se observa en la figura 13.



Figura 13. Ubicación de las láminas Prespan dentro del prototipo.

Transcurrido el tiempo programado para el proceso, se obtuvieron los resultados de temperatura y %HR mostrados en la figura 14.

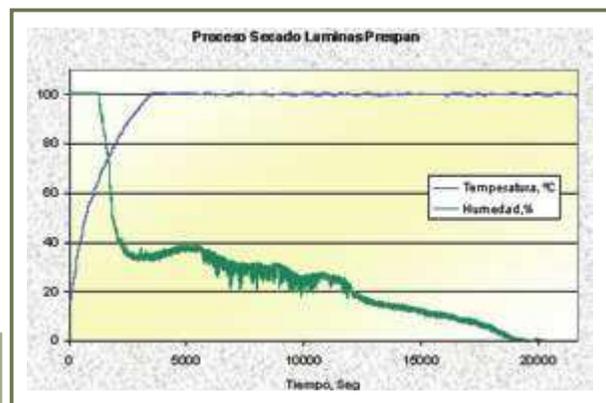


Figura 14. Comportamiento de la humedad relativa y temperatura en el proceso de secado.

El comportamiento de la curva de humedad relativa en el proceso, figura 14, es satisfactorio y corresponde a los resultados esperados.

Culminado el proceso, las láminas Prespan fueron pesadas para determinar la cantidad de humedad extraída; el peso resultante fue de 765 g, lo que significa que fueron extraídos 613 g de agua, y respecto a las láminas a temperatura ambiente (antes del proceso) se extrajeron 18 g de agua.

5.3 Resultados de la programación

Anteriormente se describió que el programa de la interfaz se desarrolló en LabView; este software contiene un VI para implementar un controlador PID, en la librería de Control llamado Simple PID.vi, pero no fue el implementado en el programa, ya que presenta un problema en la acción integral, lo que ocasionaba una respuesta como la observada en la figura 15.

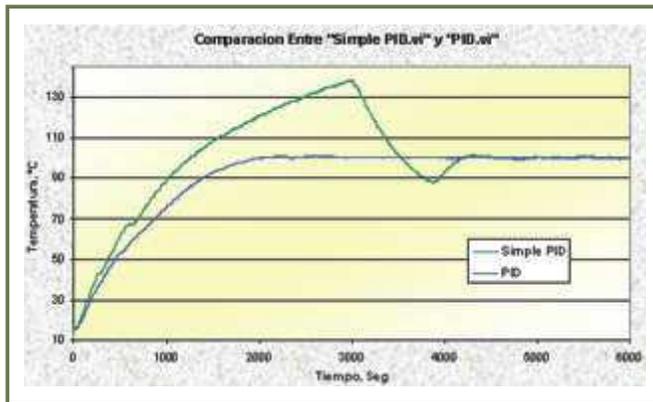


Figura 15. Comparación de respuesta en los subVIs "Simple PID.vi" y "PID.vi".

Por esta razón se construyó un VI en el cual se programó correctamente la ecuación discreta del PID (ecuación (8)). El resultado del sistema con el VI programado (PID.vi) se observa en la figura 15. La estructura principal de este VI se muestra en la figura 16.

Una vez realizadas las verificaciones anteriores, se concluye que el sistema (Interfaz y Prototipo) está habilitado para que la empresa Industrias Explorer realice las pruebas de secado que considere pertinentes.

6. CONCLUSIONES

La aplicación de este proyecto en Industrias Explorer tecnificará el proceso de secado, ya que permite controlar la temperatura, realizar el monitoreo en tiempo real de las señales de interés (temperatura y humedad relativa) y crear un informe

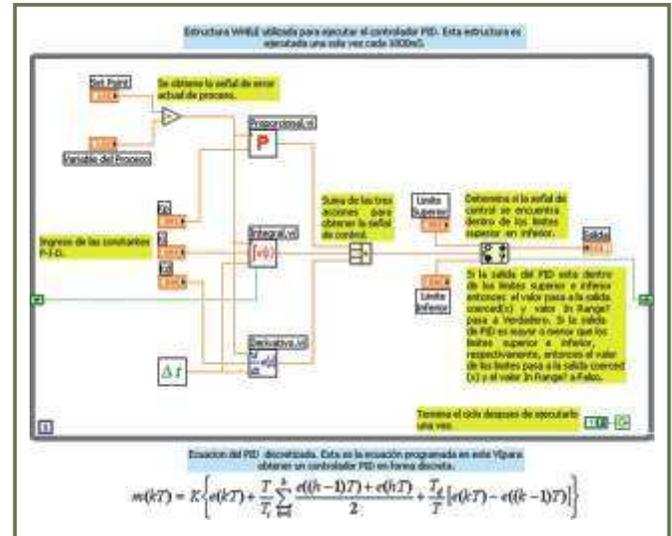


Figura 16. Estructura principal del controlador PID programado.

detallado del comportamiento de las variables durante el proceso, el cual debe ser anexado al informe final de reparación o mantenimiento requerido por el cliente.

El desconocimiento de la tecnología fabricada por instruNet impuso adquirir y desarrollar información que a la postre será de gran utilidad para cualquier persona que tenga conocimiento de las tecnologías tradicionales, como National Instruments (LabView) o Hewlett Packard (HPView), y desee realizar una aplicación bajo este hardware por su economía y compatibilidad respecto a una gran variedad de equipos y sistemas.

7. REFERENCIAS

- Astiggarraga U., J. (1994). Hornos industriales de resistencias. Madrid: McGraw-Hill.
- Benavent, J. M. (2002). Electrónica de Potencia. Teoría y aplicaciones, 2 ed. México: Alfa Omega.
- Chapman, B. P. (2000). Máquinas eléctricas. Teoría y aplicaciones, 3 ed. Madrid: Prentice Hall.
- Hart, D. W. (2002). Electrónica de Potencia, 2 ed. Madrid: Prentice Hall.
- Mohan, N. (1997). Power Electronics, Converters, Applications, and Design, 2 ed. University of Minnesota: Jhon Wilkey.
- Ogata, K. (1996). Sistemas de control en tiempo discreto, 2 ed. México: Editorial Prentice Hall.
- Rashid, M. H. (1995). Electrónica de potencia. Circuitos, dispositivos y aplicaciones. Madrid: Prentice Hall.
- Segui Ch., S. (2004). Electrónica de potencia. Fundamentos básicos. México: Alfa Omega.
- Tocci, R. (2004). Digital Systems Principles and Applications, 8. ed. Prentice Hall.