



Recepción: 28 / 07 / 2018

Aceptación: 14 / 09 / 2018

Publicación: 01 / 11 / 2018



Ciencias técnicas y aplicadas

Artículo de investigación

Implementación de un conversor AC/AC mediante un variador de frecuencia aplicado al control de temperatura en una termoformadora de plástico

Implementation of an AC / AC converter by means of a frequency converter applied to the temperature control in a plastic thermoformer

Implementação de um conversor AC / AC por meio de um conversor de frequência aplicado ao controle de temperatura em um termoformador de plástico

Lidia del R. Castro-Cepeda ^I

lidia.castro@epoch.edu.ec

José L. Cortés-Llanganate ^{II}

jocluis1312@hotmail.com

Correspondencia: lidia.castro@epoch.edu.ec

^I Máster Universitario en Ingeniería de La Energía, Ingeniera Industrial, Docente de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.

^{II} Magister en Sistemas de Control y Automatización Industrial, Ingeniero en Electrónica Control y Redes Industriales, Jefe de Plantas de Prefabricados UCEM - Unión Cementera Nacional UCEM, Manta, Ecuador.

Resumen

El presente documento detalla la implementación de un conversor AC/AC mediante un variador de frecuencia aplicado al control de temperatura en una termoformadora de plástico. El trabajo parte de un control de temperatura (controlador PI) implementado mediante un conversor AC/AC por ciclo integral. Dicho conversor AC/AC por ciclo integral es reemplazado por un conversor AC/AC implementado mediante un variador de frecuencia. Se implementa una interfaz de comunicación entre el controlador PI y el variador de frecuencia. Al realizar las pruebas respectivas del sistema de control aplicando el controlador AC/AC anteriormente mencionado, se obtuvo una mejora en el rango de variación de la variable del proceso respecto del valor consigna de $\pm 1^{\circ}\text{C}$. Se utilizó herramientas estadísticas para la verificación de resultados.

Palabras clave: termoformadora; control de temperatura; controlador PI; conversor AC-AC.

Abstract

This document details the implementation of an AC / AC converter by means of a frequency converter applied to the temperature control in a plastic thermoformer. The work starts from a temperature control (PI controller) implemented through an AC / AC converter by integral cycle. Said AC / AC converter per integral cycle is replaced by an AC / AC converter implemented by means of a frequency inverter. A communication interface between the PI controller and the frequency inverter is implemented. When performing the respective tests of the control system applying the aforementioned AC / AC controller, an improvement was obtained in the variation range of the process variable with respect to the set value of $\pm 1^{\circ}\text{C}$. Statistical tools were used to verify results.

Key words: thermoforming; temperature control; PI controller; AC-AC converter.

Resumo

Este documento detalha a implementação de um conversor AC / AC por meio de um conversor de frequência aplicado ao controle de temperatura em um termoformador de plástico. O trabalho parte de um controle de temperatura (controlador PI) implementado através de um conversor AC / AC por ciclo integral. O dito conversor AC / AC por ciclo integral é substituído por um conversor AC / AC implementado por meio de um inversor de frequência. Uma interface de

comunicação entre o controlador PI e o inversor de frequência é implementada. Ao realizar os respectivos testes do sistema de controle aplicando o controlador AC / AC acima mencionado, obteve-se uma melhora na faixa de variação da variável de processo em relação ao valor ajustado de $\pm 1^\circ \text{C}$. Ferramentas estatísticas foram usadas para verificar os resultados.

Palavras chave: termoformagem; controle de temperatura; controlador PI; conversor AC-AC.

Introducción

La industria del plástico a nivel mundial crece a un ritmo agigantado. De hecho, los países desarrollados han reemplazado los productos de madera por plástico, contribuyendo a la disminución de la deforestación, además del tiempo de duración que ofrece el plástico [1]. En el Ecuador, la industria del plástico ha tomado fuerza en los últimos años. Esto se lo ve reflejado en los datos de importación de materia prima evidenciados en la Tabla 1 [2].

En este sentido, la empresa TUBASEC C.A. se ha dedicado a la elaboración de techos traslúcidos en su planta procesadora desde hace 15 años, proyectándose al incremento de producción de otro tipo de productos como los de inyección plástica. Actualmente transforma alrededor de 45 toneladas de polipropileno en techos. Las máquinas de producción de techos traslúcidos de la planta TechoLuz son máquinas que han sido implementadas por los técnicos de la empresa. En general, los hornos de las termoformadoras de la planta TechoLuz están contruidos con placas metálicas, en cuyo interior se ubican resistencias para el calentamiento de las paredes internas del horno. Las resistencias son de tipo S, o tipo U que pueden ser de distinta potencia de acuerdo a los requerimientos.

El control de temperatura de termoformado, es de vital importancia para la producción y el cumplimiento de normas de calidad INEN del producto [3]. La calidad dimensional y defectos de acabados en productos se deben a amplios rangos de variación de temperatura en el proceso de termoformado. Esto implica una pérdida de materia prima, energía, mano de obra y lo que es aún peor el no cumplimiento de los plazos de entrega del producto.

Tabla 1. Importación de principales materias primas plásticas. Enero a mayo 2014 vs enero a mayo 2015, expresado en toneladas.

Material	PESO NETO		Variación (%)
	2014	2015	
Polietileno Baja Densidad	33855	40141	18,57
Polietileno Alta Densidad	28324	28408	0,3
Poliestireno	4138	4925	19,02
Polipropileno	39996	41719	4,31
TOTAL	166911	164043	-2

Fuente: ASEPLAS, 2015 (Boletín de la Asociación Ecuatoriana de Plásticos, No. 42, julio 2015).

[4]. Esto implica una pérdida de materia prima, energía, mano de obra y lo que es aún peor el no cumplimiento de los plazos de entrega del producto.

Según [4] y [5], la mayoría de los sistemas de termoformado en plantas industriales son procesos no lineales. Esto se debe a diversos factores como la forma de las resistencias que podría producir una irradiación irregular del calor, así como también la capacidad de almacenar el calor del horno entre otros [6]. Las condiciones expuestas son similares a las que se presenta en los hornos de termoformado de TUBASEC. C.A., siendo los principales inconvenientes la no regularidad de la irradiación del calor, la posición del sensor de temperatura sumado al retardo propio del sistema [6]. Las condiciones antes expuestas pueden convertir al sistema en un sistema complejo de controlar.

Anteriormente el sistema de control se basaba en un control de temperatura mediante histéresis, es decir control on-off tradicional que es el método más sencillo de implementación [4]. Posterior a ello, en el año 2017 se realizó un diseño clásico de control de temperatura, luego del cual se determinó que un controlador PI era el más adecuado para controlar el sistema dentro de los parámetros deseados. Dicho diseño utilizaba un convertor AC/AC por ciclo integral como actuador del sistema, mismo que utiliza contactores para la aplicación de voltajes a las resistencias del horno [7]. Sin embargo, se presentaron 2 inconvenientes: primero, no se eliminó el error en estado estacionario debido a la naturaleza del actuador que se usó para su implementación; Segundo se estimó un tiempo de vida útil del contactor de 18 meses, luego del

cual existe una posibilidad muy alta de avería del mismo. Por esta razón, es importante diseñar un convertor AC/AC a medida para cargas resistivas, para lo cual el primer paso es realizar la comprobación que, al aplicar un voltaje de manera continua como actuador del sistema, se obtiene un error en estado estacionario igual a cero o cercano al mismo.

Ante este escenario, es fundamental que el sistema de control de temperatura tenga un menor rango de variación. De esta forma, es posible minimizar las pérdidas en producción, garantizando que la mayoría de productos que se realicen sean idóneos en cuanto a dimensiones de termoformado, cumpliendo con todas las características técnicas, es decir se incrementaría la productividad de las máquinas.

Modelo de la Planta

En trabajos anteriores, se realizó la identificación del modelo de la planta. Los datos adquiridos fueron procesados a través de MATLAB utilizando la herramienta IDENT llegando a tener una validación del 91.47% como lo demuestra el Gráfico 7-3. Dicha planta quedó expresada de la forma:

$$G(s) = \frac{0.5045}{982.5s + 1}$$

En trabajos previos se eligió utilizar el modelo obtenido por el método analítico, con la propuesta de eliminar la acción del tiempo de retardo del sistema. Con ello se ha logrado simplificar los cálculos e implementación del controlador.

En la **Figura 1** se puede observar el modelo de la planta obtenido comparado con la respuesta del sistema real.

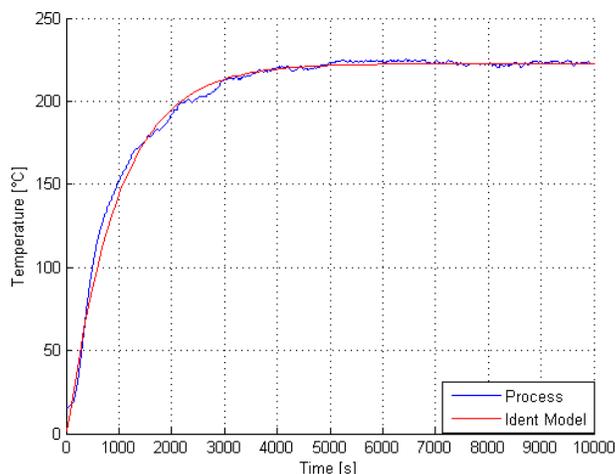


Figura 1. Visualización del modelo de la planta, comparado con la respuesta real del sistema.

Controlador Implementado Mediante Convertor Ac/Ac Por Ciclo Integral.

En la Figura 2 se muestra el esquema del sistema de control implementado. Se trata de un controlador PI, donde $G(s)$ es la función de transferencia de la planta y está dada por:

$$G(s) = \frac{k}{\tau s + 1} = \frac{0.5045}{982.5s + 1}$$

mientras que $C(s)$ es la función de transferencia del controlador PI y está dada por:

$$C(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) = \frac{1.417 + 823.11s}{580.8881s}$$

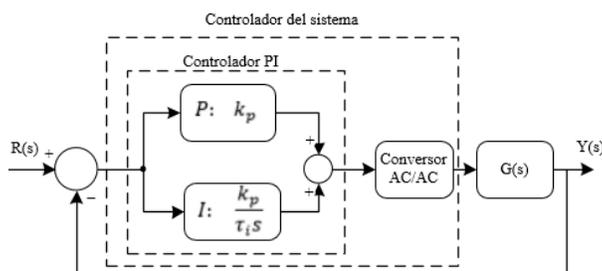


Figura 2. Esquema del sistema de control aplicado un controlador PI

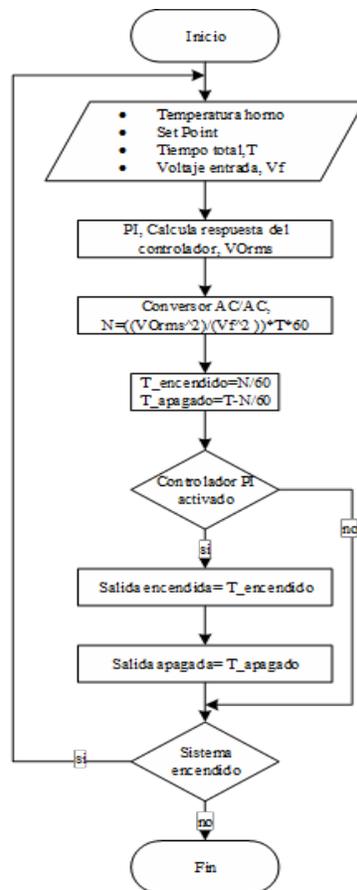


Figura 3. Diagrama de flujo del controlador PI implementado.

La implementación final del controlador consta de:

Controlador PI: Donde se calcula el voltaje que se necesita aplicar a las resistencias tipo S.

Convertor AC/AC por ciclo integral: donde a partir del voltaje calculado en el controlador PI se determina el número de ciclos que las resistencias deben ser alimentadas.

En la Figura 3 se observa el diagrama de flujo del controlador PI implementado. El sistema comienza con la lectura de los valores necesarios para su funcionamiento. La temperatura del horno se adquiere por medio de una termocupla. Los valores de setpoint SP, y el voltaje de entrada V_f , son definidos por el usuario. El controlador PI calcula el voltaje de respuesta del controlador V_o . Luego el convertor AC/AC calcula el valor de N, que corresponde al número de ciclos que la carga debe estar encendida. Al dividir N para 60 se calcula el tiempo de encendido de la salida y al restar ese tiempo del periodo T, se calcula el tiempo de apagado de la misma. Finalmente se verifica si la acción del controlador PI está activada, para plasmar los tiempos de

encendido y apagado en la salida del sistema que activa el contactor al que están conectadas las resistencias tipo “S”.

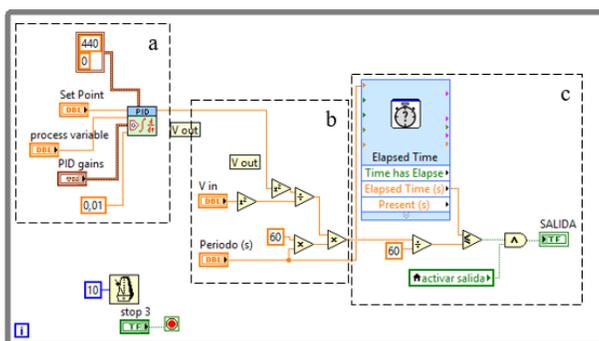


Figura 4. Implementación del controlador PI, en LabVIEW. a: Recuadro que corresponde a la implementación del controlador PI, b: Recuadro que corresponde al convertor AC/AC por ciclo integral, c: Recuadro que corresponde a acondicionamiento de salida final de la señal de activación.

En la Figura 4 se observa el controlador PI que ha sido implementado en LabVIEW. El recuadro (a) muestra la implementación del controlador PI que ha sido realizada mediante las herramientas que tiene LabVIEW. Los límites de respuesta han sido programados de 0 a 440. Enmarcada en el recuadro (b), se encuentra la implementación del convertor AC/AC por ciclo integral. El convertor sirve para controlar el actuador (conmutador electromecánico) del sistema planta. El mismo utiliza la respuesta del controlador PI para calcular los ciclos necesarios de activación para obtener el voltaje calculado. Finalmente, en el recuadro (c) se observa la codificación del número de ciclos N , es decir que convierte el número ciclos N en tiempo de activación y desactivación de la salida que está conectada al contacto que controla las resistencias tipo “S”.

En la Figura 5, una comparación de la respuesta del sistema de control anterior (línea azul) versus la respuesta del controlador PI implementado (línea roja) y su respectiva simulación (línea verde) puede ser observada. La intermitencia de la respuesta del controlador anterior (línea azul) de tipo on-off ha sido evidenciada de igual manera en la misma figura. De la misma forma ha sido evidenciado que el controlador PI ha regulado de mejor forma el control de temperatura (línea roja).

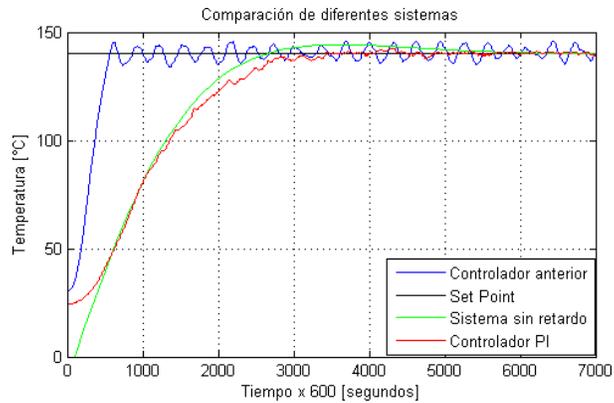


Figura 5. Comparación de sistemas: Simulación, sistema de control anterior, Sistema de control PI.

Controlador Implementado Mediante Conversor Ac/Ac Utilizando Un Variador De Frecuencia.

El error en estado estacionario en el controlador anterior implementado no fue cero como se esperaba. Esto se produjo debido a que para la implementación del mismo se usó el concepto de conversor AC-AC por ciclo integral para generar la señal de control final. Es decir, se tiene una señal de encendido y apagado que matemáticamente genera el valor entregado por el controlador. Si se tuviese una señal continua de control, y no en ciclos, el resultado fuese similar al obtenido en la simulación del sistema. Dicha señal puede ser generada en un variador de frecuencia.

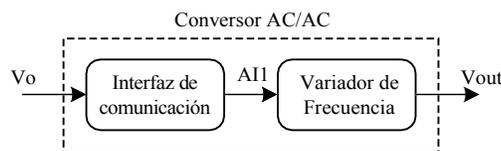


Figura 6. Detalle de implementación del conversor AC/AC mediante un variador de frecuencia.

La Figura 2 representa de igual forma el esquema de implementación del controlador empleando un conversor AC/AC (variador de frecuencia). La diferencia de lo expuesto en este apartado se puede observar en la Figura 6. El voltaje de salida calculado por el controlador se lo implementa mediante un variador de frecuencia. Para ello se ha aprovechado una de las entradas analógicas

del mismo. Entre la salida del controlador y el variador se ha configurado una interfaz de comunicación que transforma el voltaje calculado, en una señal de voltaje (0 a +10 V). Dicha señal controla la variación de salida del variador de frecuencia entre 0 a 440 Vca.



Figura 7. Esquema de implementación del convertor AC/AC mediante un variador de frecuencia.

En la Figura 7 se puede observar el esquema de implementación del controlador propuesto. Para ello se ha configurado la salida analógica del PLC para rangos de voltaje de (0 a +10 V). Físicamente se conectó los negativos tanto del PLC como del variador de frecuencia para que el voltaje enviado por el PLC tenga efecto en el Variador de Frecuencia

Resultados

La implementación de este nuevo controlador, al igual que trabajos anteriores se realizó mientras la máquina termoformadora se encontraba en funcionamiento dentro de la fábrica de producción de hojas de techos traslúcidos, por lo mismo se debía considerar la utilización de las mismas instalaciones y recursos de la planta, evitando paros prolongados. Por este motivo, el concepto de un convertor AC/AC utilizando un variador de frecuencia y su implementación no representará cambios físicos en las instalaciones de la termoformadora.

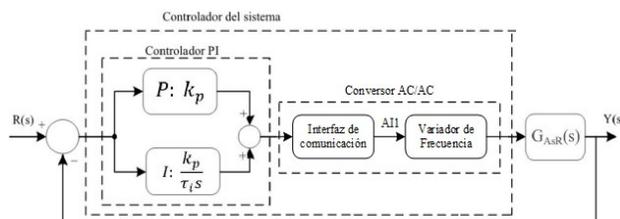


Figura 8. Diagrama de bloques de la implementación final conformado convertor AC/AC utilizando un variador de frecuencia.

En la Figura 8 se muestra el diagrama de bloques del controlador implementado. Como ya se ha mencionado el controlador del sistema se compone del conversor AC/AC que acondiciona la señal de salida del controlador y el variador de frecuencia que ajusta la tensión en función de los requisitos de este procedimiento, con lo que se espera reducir el consumo energético y mejorar las propiedades de la plancha termoformada.

Siguiendo el mismo esquema de trabajos anteriores, la primera prueba fue realizada al encender la máquina para que llegue a la temperatura de trabajo, sin la presencia de lámina de polipropileno en el horno. En la figura 9, se muestra una comparación de la respuesta del sistema de control anterior versus la respuesta del controlador AC/AC utilizando un variador de frecuencia. La intermitencia de la respuesta del controlador anterior con el actual ha sido evidenciada. De la misma forma que se ha evidenciado que el controlador AC/AC utilizando un variador de frecuencia ha regulado de mejor forma el control de temperatura.

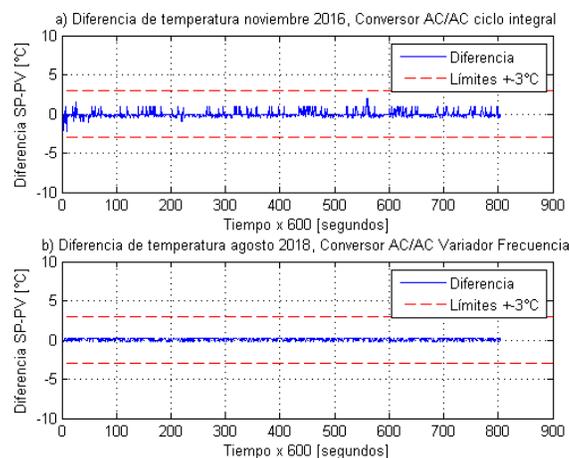


Figura 9. Diferencia de temperatura entre el Set Point – Process Variable, a: Diferencia de temperatura correspondiente al mes de noviembre del 2016, Control PI con conversor AC/AC por ciclo integral b: Diferencia de temperatura correspondiente al mes de agosto del 2018, después implementación conversor AC/AC mediante variador de frecuencia.

En la Figura 10a se observa los valores de temperatura del horno de entrada de la primera semana de trabajo del mes de noviembre del año 2016. El proceso empleaba un sistema de control por Proporcional Integral. Es evidente que la temperatura varía a lo largo del tiempo, llegando algunas ocasiones a ser 3 °C.

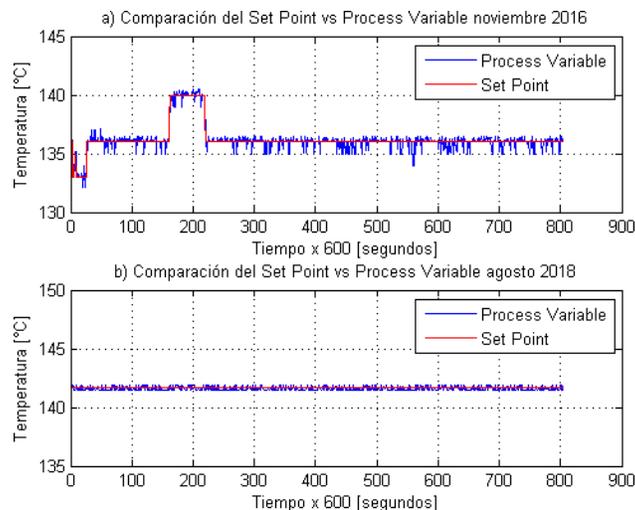


Figura 10. Temperatura de trabajo del horno de entrada. a: Comparación del Set Point vs Process Variable con el sistema de control anterior en noviembre del 2016, b: Comparación del Set Point vs Process Variable con el sistema de control AC/AC utilizando un variador de frecuencia en agosto del 2018.

En la Figura 10b se observa los valores de temperatura del horno de entrada de la segunda semana de trabajo del mes de agosto del año 2018. El proceso emplea un controlador PI implementado con un conversor AC/AC mediante un variador de frecuencia. En esta ocasión la temperatura a lo largo del tiempo varía por debajo de los 2°C.

En la Tabla 2 se puede observar un análisis estadístico de los casos presentados. La varianza y la desviación estándar ha sido reducida en el caso número 2. Se concluye que un 66.79 % de los datos del caso 2 son normales respecto a la media; en el sistema del caso 1 un 78.10 % son normales respecto a su media. Al comparar los datos del caso 1 respecto a la desviación estándar del caso 2, se observa que el 0% de los datos son normales; con ello se demuestra que en el caso número 2, el sistema con conversor AC/AC implementado mediante variador de frecuencia ha mejorado su control.

Tabla 2. Análisis estadísticos de las muestras

Parámetro	Antes	Después
Número de datos,	804	804
Mínimo, <i>min</i>	-2.2	-0.24
Máximo, <i>max</i>	2	0.26
Sumatoria, $\sum x_i$	1.2	-8.61
Media, \bar{x}_m	0.0550	-0.0107
Varianza, σ^2	0.1804	0.0122
Desviación estándar, σ	0.4248	0.1107
Desviación típica, s_x	0.0149	0.0039

De igual forma se realizó la prueba T de Student para muestras relacionadas, Tabla 3, para la comprobación de la hipótesis planteada inicialmente. Para ello ha sido planteada la hipótesis nula H_0 , y la hipótesis alterna H_1 , a continuación, mencionadas:

H_0 : No se reduce la variación de temperatura a ± 2 °C respecto a la temperatura de consigna, después de implementar el convertor AC/AC utilizando el variador de frecuencia.

H_1 : Se reduce la variación de temperatura a ± 2 °C respecto a la temperatura de consigna, después de después de implementar el convertor AC/AC utilizando el variador de frecuencia.

Tabla 3. Prueba T de student

	<i>Caso 1</i>	<i>Caso 2</i>
Media	0,0550	-0,0107
Varianza	0,1983	0,0123
Observaciones	804,0000	804,0000
Coefficiente de correlación de Pearson	0,4329	
Diferencia hipotética de las medias	0,0000	
Grados de libertad	803,0000	
Estadístico t	4,5496	
P(T<=t) una cola	0,0000	
Valor crítico de t (una cola)	1,6468	
P(T<=t) dos colas	0,000006	
Valor crítico de t (dos colas)	1,9629	

El variador de frecuencia

El valor de significancia bilateral ($P(T \leq t)$ dos colas) de la prueba T de Student ha resultado $6 \times 10^{-6} \cong 0$, con lo cual ha sido rechazada la hipótesis nula. Por lo tanto, ha sido aceptada la hipótesis alterna. De esta forma ha sido demostrado que el sistema reduce la variación de temperatura a ± 2 °C respecto a la temperatura de consigna luego de implementar el convertor AC/AC mediante un variador de frecuencia.

Conclusiones

Al aplicar un convertor AC/AC mediante un variador de Frecuencia, el control de temperatura de los hornos de la termoformadora ha mejorado. Se empleó el mismo controlador calculado previamente. Mediante el variador de Frecuencia se aplicó el voltaje calculado por el controlador a las resistencias del horno.

La variación de la temperatura mejoró, reduciéndose a ± 1 °C. Esto se logró gracias al convertor AC/AC implementado; al eliminar las variaciones de voltaje que se tenía en el convertor anterior se redujo de igual manera la variación de temperatura. El error en estado estacionario no se pudo eliminar como se esperaba, debido a las características propias del horno que se expuso en un principio.

Sería conveniente diseñar un convertor AC/AC a medida para cargas resistivas, debido que el variador de frecuencia empleado se lo ha subutilizado; de esta manera se reducirían los costos de implementación de los controladores de este tipo en máquinas termoformadoras.

Referencias Bibliográficas

- Plastics Europe. (2015). Since 2006 recycling and energy recovery have increased. *Plastics – the Facts 2015*, 18. Recuperado el 12 de abril de 2016, de www.plasticseurope.org.
- ASEPLAS. (2015). Estadísticas. *Revista Integra*, 33.
- INEN 2542. (2010). Tolerancia en dimensiones. *Láminas plásticas. Requisitos*, 3.
- Jiang, W., & Jiang, X. (2012). Design of an Intelligent Temperature Control System Based on the Fuzzy Self-tuning PID. *Procedia Engineering* 43, 307-311.

- Sivakumar, P., Prabhakaran, D., & Kannadasan, T. (2013). Comparative analysis of advanced controllers. *American Journal of Engineering Research*, II (1), 1-6.
- Wang, S. (2012). Resistance Furnace Temperature System on Fuzzy PID Controller. *Journal of Information & Computational Science*, 9, 2627 – 2634.
- Cortés, J, Hernández, J. (2017) “Implementación de un sistema de control de temperatura para los hornos de termoformado de la máquina de láminas p7 de Techoluz en Tubasec C.A. Riobamba: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Dua, C., Chenb, S., & Lianga, X. (2011). Application of Fuzzy Theory in Temperature Control System of Thermoforming Machine. *Procedia Engineering* 15, 639 – 643.
- Shi, D., Gao, G., Gao, Z., & Xiao, P. (2012). Application of Expert Fuzzy PID Method for Temperature Control of Heating Furnace. *Procedia Engineering* 29, 257 – 261.
- Alfaro, V. (2001). Identificación de procesos sobre amortiguados utilizando técnicas de lazo abierto. *Ingeniería* (11), 11-25. Recuperado el 6 de mayo de 2016, de http://eie.ucr.ac.cr/uploads/file/documentos/pub_inv/articulos/valfaro01A.pdf
- Arántegui, J. (2010-2011). *Control de Procesos*. Lleida, Cataluña: Universidad de Lleida.
- Betancor, C., Cerezo, J., & Vega, A. (2006). *Diseño de un Sistema de Control de Temperatura*. (D. d. Automática, Ed.) *Tecnología, Aprendizaje y Enseñanza de la Electrónica*, 4.
- Baculima Sinchi, P. F. (2015). *Implementación de un algoritmo Híbrido basado en control predictivo y PID para el control de sistemas de Retardo dominante*. Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana.
- Mazzone, V. (2 de mayo de 2016). *Controladores PID*. Obtenido de Universidad Nacional de Quilmes: <http://iaci.unq.edu.ar/caut1>.