



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

“IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA PARA LOS HORNOS DE TERMOFORMADO DE LA MAQUINA DE LÁMINAS P7 DE TECHOLUZ EN TUBASEC C.A.”

JOSÉ LUIS CORTÉS LLANGANATE

Trabajo de Titulación modalidad: Proyectos de Investigación y Desarrollo,
presentado ante el Instituto de Posgrado y Educación Continua de la
ESPOCH, como requisito parcial para la obtención del grado de:

**MAGISTER EN SISTEMAS DE CONTROL
Y AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL**

Riobamba – Ecuador

JUNIO – 2017

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

CERTIFICACIÓN:

EL TRIBUNAL DE TRABAJO DE TITULACIÓN CERTIFICA QUE:

El Trabajo de Titulación modalidad **Proyectos de Investigación y Desarrollo**, titulado: “DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA PARA LOS HORNOS DE TERMOFORMADO DE LA MÁQUINA DE LÁMINAS P7 DE TECHOLUZ EN TUBASEC C.A.”, de responsabilidad del Ing. José Luis Cortés Llanganate, ha sido prolijamente revisado y se autoriza su presentación.

Tribunal:

Ing. Wilson Armando Zúñiga Vinuesa, MsC.

PRESIDENTE

Ing. Jorge Luis Hernández Ambato, Ph.D

TUTOR PROYECTO TITULACIÓN

Ing. Alberto Arellano Aucancela, MsC.

MIEMBRO DEL TRIBUNAL

Ing. Fausto Ramiro Cabrera Aguayo, MsC.

MIEMBRO DEL TRIBUNAL

Riobamba, Junio 2017

DERECHOS INTELECTUALES

Yo, José Luis Cortés Llanganate, declaro que soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en el **Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo**, y que el patrimonio intelectual generado por el mismo pertenece exclusivamente a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

JOSÉ LUIS CORTÉS LLANGANATE
No. Cédula: 180415800-2

DERECHOS DE AUTOR

©2017, José Luis Cortés Llanganate

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

JOSÉ LUIS CORTÉS LLANGANATE
No. Cédula: 180415800-2

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Yo, José Luis Cortés Llanganate, declaro que el **Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo**, es de mi autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor, asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este proyecto de investigación de maestría.

Riobamba, junio de 2017.

JOSÉ LUIS CORTÉS LLANGANATE
No. Cédula: 180415800-2

DEDICATORIA

A mis padres Hernán y Mariana, a mi hermano Lenin, quienes siempre me brindan su amor, comprensión e impulsan para culminar las metas que me propongo en la vida.

A mis familiares y amigos quienes están pendientes brindándome su apoyo incondicional.

José Luis

AGRADECIMIENTO

A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, por permitirme obtener nuevos conocimientos para mi desarrollo profesional. A mis maestros quienes impartieron dichos conocimientos con la mejor actitud posible. A los tutores del presente Proyecto de Titulación por brindar su apoyo objetivo.

A la empresa TUBASEC. C.A. por permitirme desarrollar el Proyecto de Titulación en sus instalaciones, y brindarme todas las facilidades del caso.

A mis padres y hermano.

José Luis

ÍNDICE GENERAL

PORTADA.....	i
CERTIFICACIÓN.....	ii
DERECHOS INTELECTUALES.....	iii
DERECHOS DE AUTOR.....	iv
DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD.....	v
DEDICATORIA.....	vi
AGRADECIMIENTO.....	vii
ÍNDICE GENERAL.....	viii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xiii
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	xv
RESUMEN.....	xvii
SUMMARY.....	xviii

CAPÍTULO 1

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.	Planteamiento del problema.....	1
1.1.1.	Situación problemática.....	1
1.1.2.	Formulación del problema.....	3
1.1.3.	Preguntas directrices o específicas de la investigación.....	3
1.1.4.	Justificación de la investigación.....	3
1.2.	Objetivo general de investigación.....	4
1.3.	Objetivos específicos de investigación.....	4
1.4.	Hipótesis.....	4
1.4.1.	Hipótesis general.....	4
1.4.2.	Hipótesis específicas.....	5
1.5.	Identificación de variables.....	5
1.6.	Operacionalización de variables.....	5
1.7.	Matriz de consistencia.....	6

CAPÍTULO 2

2.	MARCO TEÓRICO.....	8
2.1	Estado del arte.....	8
2.2.	Sistemas de Control.....	11
2.3.	Identificación de Sistemas.....	12
2.3.1.	Método de la tangente Ziegler & Nichols.....	14
2.3.2.	Método modificado de la tangente de Miller.....	15
2.3.3.	Método de Smith o Analítico.....	15
2.4.	Controladores PID.....	16
2.4.1.	Controlador proporcional: P.....	17
2.4.2.	Controlador integral: I.....	18
2.4.3.	Controlador proporcional-integral: PI.....	18
2.4.4.	Controlador proporcional-derivativo: PD.....	19
2.4.5.	Controlador proporcional-integral-derivativa: PID.....	19

CAPÍTULO 3

3.	DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN.....	21
3.1.	Diseño y simulación del controlador de temperatura.....	21
3.1.1.	Descripción del Sistema Planta.....	21
3.1.2.	Adquisición de Datos.....	24
3.1.3.	Identificación del Modelo del Horno de Termoformado.....	25
3.1.4.	Diseño del controlador.....	31
3.1.4.1.	Diseño del Controlador Proporcional (P).....	32
3.1.4.2.	Diseño del Controlador Proporcional-Integral (PI).....	33
3.2.	Implementación del sistema de control.....	40
3.2.1.	Estructura del sistema de control.....	40
3.2.2.	Programación del controlador.....	41
3.2.3.	Interacción de los sistemas.....	47

CAPÍTULO 4

4.	RESULTADOS.....	48
4.1.	Resultados de la implementación.....	48
4.2.	Docimasia de la Hipótesis.....	50
4.3.	Conclusiones.....	54
4.4.	Trabajos futuros.....	56

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1:	Importación de principales materias primas plásticas. Enero a mayo 2014 vs enero a mayo 2015, expresado en toneladas.....	1
Tabla 2-1:	Identificación de variables.....	5
Tabla 3-1:	Operacionalización de variables.....	6
Tabla 4-1:	Matriz de consistencia.....	7
Tabla 1-3:	Porcentajes de validación de los métodos de identificación de sistemas.....	29
Tabla 1-4:	Análisis estadísticos de las muestras.....	51
Tabla 2-4:	Prueba T de Student.....	52

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-2:	La salida del sistema sucede como consecuencia de la actuación de la entrada en el proceso.....	11
Figura 2-2:	Distintos tipos de entradas.....	11
Figura 3-2:	Métodos de la tangente; curva de reacción.....	14
Figura 4-2:	Método de dos puntos de Smith, curva de reacción.....	16
Figura 1-3:	Variables del servidor OLE (Object Linking and Embedding) for Process Control OPC.....	25
Figura 2-3:	Estructura del sistema de control.....	40

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-2:	Pasos para la identificación de sistemas.....	13
Gráfico 1-2:	Estructura básica de un controlador PID.....	17
Gráfico 1-3:	Metodología usada para el diseño y simulación del controlador de temperatura.....	21
Gráfico 2-3:	Máquina de láminas P7. En la figura: a: Extrusora, b: Labios laminadores, c: Calandra, y d: Hornos.....	22
Gráfico 3-3:	Visualización del comportamiento de la temperatura del cañón, labios y horno de una termoformadora en función del tiempo.....	23
Gráfico 4-3:	Sistema de control del horno máquina P7.....	24
Gráfico 5-3:	Arquitectura de red de área local de las máquinas de TechoLuz.....	24
Gráfico 6-3:	Aplicación método gráfico. En la figura: a: Respuesta del sistema a la aplicación de una entrada escalón 440, b: Respuesta del modelo identificado por el método de Ziegler & Nichols, c: Respuesta del modelo identificado por el método de Miller, d: Respuesta del modelo identificado por el método Analítico.....	26
Gráfico 7-3:	Visualización de la respuesta del modelo identificado utilizando la herramienta IDENT de MATLAB.....	27
Gráfico 8-3:	Comparación de las respuestas de los diferentes modelos obtenidos.....	28
Gráfico 9-3:	Respuesta al escalón de 440 Vca del modelo sin retardo.....	30
Gráfico 10-3:	Tiempos de respuesta del sistema de control anterior. a: Respuesta Cañón 3, b: Respuesta Labio 4.....	31
Gráfico 11-3:	Esquema del sistema de control a diseñar que utiliza un controlador P.....	32
Gráfico 12-3:	Controlador proporcional aplicado al Sistema. a: Respuesta del Sistema con controlador Proporcional, b: Esfuerzo del controlador proporcional...	33
Gráfico 13-3:	Esquema del sistema de control a diseñar que utiliza un controlador PI.....	33
Gráfico 14-3:	Controlador PI aplicado al sistema si retardo vs sistema con retardo.....	36
Gráfico 15-3:	Esfuerzo del controlador PI, aplicado un Set Point de 140 °C.....	38
Gráfico 16-3:	Esfuerzo Controlador PI, aplicado un Set Point de 250 °C.....	39
Gráfico 17-3:	Simulación del sistema general en LabVIEW.....	41
Gráfico 18-3:	Algoritmo empleado para determinar el periodo correcto que garantice generar voltajes de salida del controlador desde 100Vca.....	43
Gráfico 19-3:	Diagrama de flujo del controlador PI implementado.....	44
Gráfico 20-3:	Diagrama de bloques del controlador de sistema implementado.....	45

Gráfico 21-3:	Implementación del controlador PI calculado, en LabVIEW. a: Recuadro que corresponde a la implementación del controlador PI, b: Recuadro que corresponde al conversor AC/AC, c: Recuadro que corresponde acondicionamiento de salida final de la señal de activación.....	46
Gráfico 22-3:	Bloque de función para el control del Horno.....	47
Gráfico 1-4:	Comparación de sistemas: Simulación, sistema de control anterior, Sistema de control PI.....	48
Gráfico 2-4:	Temperatura de trabajo del horno de entrada. a: Comparación del Set Point vs Process Variable con el sistema de control anterior en marzo del 2015, b: Comparación del Set Point vs Process Variable con el sistema de control Proporcional Integral en marzo del 2015.....	49
Gráfico 3-4:	Diferencia de temperatura entre el Set Point – Process Variable, a: Diferencia de temperatura correspondiente al mes de marzo del 2015, b: Diferencia de temperatura correspondiente al mes de noviembre del 2016.	50
Gráfico 4-4:	Comportamiento dimensional de las placas P7 producidas en el mes de marzo del 2015, antes de aplicar el controlador PI.....	53
Gráfico 5-4:	Comportamiento dimensional de las placas P7 producidas en el mes de noviembre del 2016, después de aplicar el controlador PI.....	53

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1-2:	Ecuación general de un modelo de primer orden.....	13
Ecuación 2-2:	Ganancia del modelo de Ziegler & Nichols.....	14
Ecuación 3-2:	Tiempo del modelo de Miller para alcanzar el 63.2% del cambio total a partir del tiempo muerto.....	15
Ecuación 4-2:	Tiempo del modelo de Smith para alcanzar el 28.3% del cambio total.....	15
Ecuación 5-2:	Tiempo del modelo de Smith para alcanzar el 63.2% del cambio total.....	15
Ecuación 6-2:	Tiempo τ del modelo de Smith.....	16
Ecuación 7-2:	Tiempo muerto del modelo de Smith.....	16
Ecuación 8-2:	Salida del controlador proporcional en función del tiempo.....	17
Ecuación 9-2:	Ganancia del controlador proporcional.....	17
Ecuación 10-2:	Salida del controlador integral en función del tiempo.....	18
Ecuación 11-2:	Ganancia del controlador integral.....	18
Ecuación 12-2:	Salida del controlador proporcional-integral en función del tiempo.....	18
Ecuación 13-2:	Ganancia del controlador proporcional-integral.....	18
Ecuación 14-2:	Salida del controlador proporcional-derivativo en función del tiempo.....	19
Ecuación 15-2:	Ganancia del controlador proporcional-derivativo.....	19
Ecuación 16-2:	Salida del controlador proporcional-integral-derivativo en función del tiempo.....	19
Ecuación 17-2:	Ganancia del controlador proporcional-integral-derivativo.....	20
Ecuación 1-3:	Modelo obtenido mediante método gráfico de Ziegler & Nichols.....	26
Ecuación 2-3:	Modelo obtenido mediante método gráfico de Miller.....	27
Ecuación 3-3:	Modelo obtenido mediante método gráfico de Smith.....	27
Ecuación 4-3:	Modelo obtenido mediante la herramienta IDENT de MATLAB.....	28
Ecuación 5-3:	Modelo simplificado del método gráfico de Smith.....	29
Ecuación 6-3:	Cálculo de la ganancia del controlador proporcional.....	32
Ecuación 7-3:	Polinomio característico general de un sistema de segundo orden.....	34
Ecuación 8-3:	Cálculo de las raíces del polinomio general característico.....	34
Ecuación 9-3:	Tiempo de estabilización de sistema de segundo orden.....	35
Ecuación 10-3:	Cálculo de la parte real de la raíz del polinomio general característico.....	35
Ecuación 11-3:	Sobre-oscilación de un sistema de segundo orden.....	35
Ecuación 12-3:	Coefficiente de amortiguación de un sistema de segundo orden.....	35
Ecuación 13-3:	Ángulo de apertura de los polos complejos.....	35
Ecuación 14-3:	Cálculo del coeficiente de amortiguación del sistema en análisis.....	35

Ecuación 15-3:	Cálculo de la frecuencia natural no amortiguada.....	35
Ecuación 16-3:	Polos deseados del sistema en análisis.....	35
Ecuación 17-3:	Polinomio característico del sistema en análisis.....	36
Ecuación 18-3:	Cálculo de la ganancia del controlador proporcional-integral.....	36
Ecuación 19-3:	Cálculo del tiempo integrativo del controlador proporcional integral.....	36
Ecuación 20-3:	Función de transferencia del controlador proporcional-integral.....	36
Ecuación 21-3:	Error de posición del sistema.....	37
Ecuación 22-3:	Constante del error de posición del sistema.....	37
Ecuación 23-3:	Ganancia en lazo abierto del sistema final.....	37
Ecuación 24-3:	Cálculo de la constante del error de posición del sistema.....	38
Ecuación 25-3:	Cálculo del error de posición del sistema.....	38
Ecuación 26-3:	Voltaje entregado por el convertidor AC-AC de ciclo integral.....	42
Ecuación 27-3:	Número de ciclos que el convertidor AC-AC de ciclo integral conmuta.....	43

RESUMEN

Reducir la variación de temperatura a $\pm 3^{\circ}\text{C}$ respecto de la temperatura de consigna en los hornos de termoformado de la máquina productora de láminas plásticas P7, fue una necesidad de la empresa TUBASEC C.A. en Riobamba. El documento detalla la implementación de un sistema de control de temperatura para los hornos de termoformado en la planta de producción TechoLuz. La investigación partió de la adquisición de datos del horno sometido a una prueba de tipo escalón. Posterior a ello se empleó métodos gráficos implementados en el programa Matlab para la identificación de la función de transferencia del horno. Empleando la función de transferencia se diseñó un controlador Proporcional Integral (PI). La implementación del controlador se realizó mediante un instrumento virtual programado en LabVIEW. El mismo interactúa con el sistema de monitorización y control (SCADA) de la máquina. Para generar el voltaje de salida se empleó el concepto de convertor AC-AC por ciclo integral. Al realizar las pruebas respectivas del sistema de control, se obtuvo una variación final de temperatura de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ respecto de la temperatura de consigna. Se concluye que las características dimensionales de las láminas plásticas mejoraron. Se recomienda diseñar un convertor AC-AC para carga resistiva a medida.

Palabras clave: <CONTROL DE TEMPERATURA>, <CONTROL PROPORCIONAL INTEGRAL (PI)>, <CONVERSION AC-AC>, <CORRIENTE ALTERNA (AC)>, <MATLAB (SOFTWARE MATEMÁTICO)>, <SOFTWARE LABVIEW (INSTRUMENTO VIRTUAL)>, <EMPRESA (TUBASEC)>, <RIOBAMBA (CANTÓN)>.

SUMMARY

Reducing the temperature variation to ± 3 °C with respect to the set-point temperature in the thermoforming ovens of the P7 plastic laminating machine was a necessity of the TUBASEC C.A. company in Riobamba. The document details the implementation of a temperature control system for thermoforming ovens in the TechoLuz production plant. The investigation was based on the acquisition of data of the oven tested with a step-type test. After that it was used graphical methods implemented in Matlab program for the identification of the transfer function in the oven. A Proportional Integral Controller (PI) was designed using the transfer function. The implementation of the controller was performed using a virtual instrument programmed in LabVIEW. It interacts with the monitoring and control system of the machine (SCADA). To generate the output voltage, the AC-AC converter concept was used per integral cycle. When performing the respective tests of the control system, a final temperature variation of ± 2 °C was obtained with respect to the set-point temperature. It is concluded that the dimensional characteristics of plastic films improved. It is recommended to design an AC-AC converter to customized resistive load.

Keywords: <TEMPERATURE CONTROL >, <PROPORTIONAL INTEGRAL CONTROL (PI)>, <AC-AC CONVERTER>, <ALTERNATING CURRENT (AC)>, <MATLAB (MATHEMATICS SOFTWARE)>, <LABVIEW SOFTWARE (VIRTUAL INSTRUMENT)>, <COMPANY(TUBASEC)>, <RIOBAMBA (CANTON)>.

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN.

1.1. Planteamiento del problema.

1.1.1. Situación problemática.

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 (Plastics Europe, 2015, p. 18). 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 1-1. (ASEPLAS, 2015, p. 33).

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

PESO NETO			
Material	2014	2015	Variación (%)
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).

Realizado por: CORTÉS, José, 2017.

En este sentido, la empresa TUBASEC C.A. se ha dedicado a la elaboración de techos traslúcidos en su planta procesadora TechoLuz 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 base a una termoformadora que se adquirió en principio.

Dicha termoformadora no tenía documentos que la identifiquen como planos, o manuales de funcionamiento. En general una termoformadora consta de una extrusora para el derretimiento del material, labios distribuidores para extender el material, una calandra formadora para constituir la placa plana de plástico (polipropileno), la misma que es transformada en láminas P7 en los hornos usando un grupo de ruedas de aluminio.

Los hornos están contruidos con placas metálicas, en cuyo interior se ubican resistencias de potencia para el calentamiento de los mismos. Las resistencias pueden ser de tipo S o tipo U, y las características de potencia varían de acuerdo a los requerimientos de la planta. Tanto la estructura mecánica como los sistemas eléctricos de los hornos implementados se adecuaron a las necesidades iniciales de la empresa.

El control de temperatura de termoformado, es de vital importancia para la producción y el cumplimiento de normas de calidad INEN del producto (INEN 2542, 2010, p. 3). La calidad dimensional y defectos de acabados en productos se deben a amplios rangos de variación de temperatura en el proceso (Jiang & Jiang, 2012, p. 307), lo que 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 (Jiang & Jiang, 2012, p. 307) y (Sivakumar, et al., 2013, p. 1), los sistemas planta (termoformadora) en su mayoría son no lineales. Esto se debe a diversos factores como la forma de las resistencias que podrían producir una irradiación irregular del calor, así como también la histéresis del horno entre otros (Wang, 2012, p. 2627). 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.

Las condiciones antes expuestas pueden convertir al sistema en un sistema complejo de controlar. Actualmente el sistema de control se basa en un control de temperatura mediante histéresis, es decir control on-off tradicional, debido a que es el método más sencillo de implementación (Jiang & Jiang, 2012, p. 308).

Los dispositivos de control más utilizados en el mercado, son los pirómetros. Estos se encuentran en la mayoría de las máquinas que transforma el plástico. Sin embargo, la variación de

temperatura respecto a la consigna que ofrecen los más avanzados de entre este tipo de controladores es de ± 5 °C. Esto se debe a que son de propósito general, y no se basan en las condiciones exactas de la planta en las que van a ser utilizados. Por esta razón se necesita diseñar un controlador a medida de las necesidades de la máquina termoformadora.

1.1.2. Formulación del problema.

¿Un control adecuado de la temperatura en los hornos de termoformado de la máquina de láminas P7 de TechoLuz, que minimice a ± 3 °C la variación de temperatura de proceso, ¿mejora la estabilidad dimensional de las láminas plásticas de polipropileno P7 en TUBASEC C.A.?

1.1.3. Preguntas directrices o específicas de la investigación.

- ¿Cuáles son los controladores de temperatura que se utilizan?
- ¿Es posible obtener un modelo matemático del horno de termoformado, y a partir de él, diseñar un sistema de control de temperatura?
- ¿Es posible implementar el sistema de control diseñado?
- ¿Se minimiza la variación de temperatura en los hornos de termoformado?
- ¿Cuánto mejora la formación de las láminas de polipropileno una vez aplicado el sistema de control de temperatura?

1.1.4. Justificación de la investigación.

En el Plan Nacional del Buen Vivir 2013-2017 se establece como uno de los objetivos el cambio de la matriz productiva. Una de las políticas de dicho Plan es el “Promover la intensidad tecnológica en la producción primaria, de bienes intermedios y finales”. Esto se logra a través de incorporar la investigación científica y de educación superior con el sector productivo que por años no se han vinculado directamente, al menos no en la cantidad que se esperaría (SENPLADES, 2013, p. 301). Al realizar ello, se puede obtener una constante mejora en la productividad, dando lugar no solo a esta mejora, sino a la incorporación de nuevos productos que sustituyan las partidas que importa el país.

Al procesar los datos obtenidos del histórico de temperaturas del sistema de control que posee el sistema de la empresa, la variación de los hornos de termoformado se encuentra en ± 6 °C. Al relacionar las mencionadas temperaturas, con el registro de las dimensiones de las láminas traslúcidas, se observa que, aunque las características determinadas en la norma de calidad (INEN

2542, 2010, p. 3) se mantienen, no existe una regularidad en las dimensiones, provocando en ciertas ocasiones que las mismas estén al límite de la norma. De la misma forma cuando se presentan condiciones más regulares de temperatura, la regularidad dimensional de las láminas es también evidente.

Ante el escenario expuesto, 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.

1.2. Objetivo general de investigación.

Implementar un sistema de control de temperatura para los hornos de termoformado de la máquina de láminas P7 en la planta TechoLuz de TUBASEC C.A. que reduzca la variación de temperatura a ± 3 °C.

1.3. Objetivos específicos de investigación.

- Realizar el estudio del arte de los controladores que son utilizados en temperatura.
- Obtener la función de transferencia aproximada del horno en estudio mediante técnicas de identificación de sistemas que utilizan adquisición de datos.
- Diseñar y simular el sistema de control de temperatura.
- Implementar el sistema de control diseñado.
- Realizar un conjunto de pruebas para verificar el funcionamiento del sistema de control.

1.4. Hipótesis.

1.4.1. Hipótesis general.

Mediante la implementación de un sistema de control de temperatura para los hornos de termoformado de la máquina de láminas P7 planta TechoLuz, se reduce la variación de temperatura a ± 3 °C respecto a la temperatura de consigna.

1.4.2. Hipótesis específicas.

- Existen controladores de temperatura que funcionan adecuadamente en termoformado.
- Es posible obtener un modelo aproximado del horno de termoformado mediante técnicas de identificación de sistemas y a partir de ello diseñar un sistema de control de temperatura.
- Es posible implementar el sistema de control con pocas variaciones a las instalaciones de la máquina.
- Con la temperatura controlada adecuadamente se obtiene más regularidad dimensional en las placas termoformadas de la máquina de TechoLuz.

1.5. Identificación de variables.

En la Tabla 2-1 se muestra las variables identificadas.

Tabla 2-1: Identificación de variables.

VARIABLE	TIPO	CONCEPTO
Temperatura	Dependiente Cuantitativa	Magnitud física que refleja la cantidad de calor, ya sea de un cuerpo, de un objeto o del ambiente.
Modelo del sistema	Independiente Cuantitativa	Representación simplificado de un Sistema elaborado para comprender, predecir y controlar el comportamiento de dicho sistema.
Selección del sistema de control	Dependiente Cualitativa	Sistema de control es el conjunto de dispositivos que actúan juntos para lograr un objetivo de control.
Regularidad dimensional	Dependiente Cuantitativa	Uniformidad en la manera de desarrollarse la dimensión sin que se produzcan grandes cambios o alteraciones

Realizado por: CORTÉS, José, 2017.

1.6. Operacionalización de variables.

La Tabla 3-1 muestra la Operacionalización de las distintas variables.

Tabla 3-1: Operacionalización de variables.

VARIABLE	INDICADOR	TÉCNICA	INSTRUMENTO
Temperatura	Temperatura presente en el horno	Observación	Sistema de medición de temperatura mediante termocuplas
Modelo del sistema	% de estimación	Prueba y error	Simulación mediante Software
Selección del Sistema de control	Tipo de Sistema de control	Revisión bibliográfica Prueba y error	Simulación mediante Software
Regularidad dimensional	Dimensión de las placas de polipropileno	Observación	Flexómetro y calibrador (Pie de rey)

Realizado por: CORTÉS, José, 2017.

1.7. Matriz de consistencia

En la Tabla 4-1 se muestra la matriz de consistencia.

Tabla 4-1: Matriz de consistencia.

Formulación del problema	Objetivo	Hipótesis	Variables	Indicadores	Técnicas	Instrumentos
GENERAL						
¿Un control adecuado de la temperatura en los hornos de termoformado de la máquina P7 de Techo Luz minimiza a ± 3 °C la variación de temperatura y de esta forma mejora el termoformado de las láminas plásticas de polipropileno en Tubasec C.A.?	Implementar un sistema de control de temperatura para los hornos de termo-formado de la máquina P7 en la planta Techo Luz de Tubasec C.A. que minimice la variación de temperatura a ± 3 °C.	Mediante la implementación de un sistema de control de temperatura para los hornos de termoformado de la máquina de láminas P7 planta TechoLuz, se reduce la variación de temperatura a ± 3 °C respecto a la temperatura de consigna.	Temperatura	Temperatura presente en el horno	Observación	Sistema de medición de temperatura mediante termocuplas
ESPECÍFICAS						
¿Cuáles son los controladores de temperatura que se utilizan?	Realizar el estudio del arte de los controladores que son utilizados en temperatura.	Existen controladores de temperatura que funcionan adecuadamente en termoformado.	Selección del Sistema de control	Tipo de Sistema de control	Revisión bibliográfica Prueba y error	Simulación mediante Software
¿Es posible obtener un modelo matemático del horno de termoformado y a partir de él diseñar un sistema de control de temperatura?	Obtener la función de transferencia aproximada del horno en estudio mediante técnicas de identificación de sistemas que utilizan adquisición de datos. Diseñar y simular el sistema de control de temperatura.	Es posible obtener un modelo aproximado del horno de termoformado mediante técnicas de identificación de sistemas y a partir de ello diseñar un sistema de control de temperatura.	Modelo del sistema	% de estimación	Prueba y error	Simulación mediante Software
¿Es posible implementar el sistema de control diseñado?	Implementar el sistema de control diseñado.	Es posible implementar el sistema de control con pocas variaciones a las instalaciones de la máquina.	Selección del Sistema de control	Tipo de Sistema de control	Revisión bibliográfica Prueba y error	Simulación mediante Software
¿Se minimiza la variación de temperatura en los hornos de termoformado? ¿Cuánto mejora la formación de las láminas de polipropileno una vez aplicado el sistema de control de temperatura?	Realizar un conjunto de pruebas para verificar el funcionamiento del sistema de control.	Con la temperatura controlada adecuadamente se obtiene más regularidad dimensional en las placas termoformadas de la máquina de Techo Luz.	Regularidad dimensional	Dimensión de las placas de polipropileno	Observación	Flexómetro y calibrador (Pie de rey)

Realizado por: CORTÉS, José, 2017.

CAPÍTULO 2

2. MARCO TEÓRICO.

2.1. Estado del arte.

Según la Real Academia de la Lengua Española, la temperatura es la magnitud física que expresa el grado o nivel de calor de los cuerpos o del ambiente (Asociación de Academias de la Lengua Española, 2017). Según Lab-Volt Ltda. la temperatura es una medida de la energía cinética promedio de las partículas que constituyen un cuerpo. Un proceso de temperatura puede definirse como un conjunto de operaciones usadas para provocar un cambio de temperatura en un cuerpo. (Lab-Volt Ltda., 2005, pp. 2-5).

Básicamente un proceso de temperatura puede funcionar en dos modos. Modo calefacción cuando se añade energía térmica a un cuerpo para aumentar su temperatura. Modo refrigeración cuando se retira energía térmica de un cuerpo para disminuir su temperatura (Lab-Volt Ltda., 2005, pp. 2-5). La medición y el control de temperatura es uno de los procesos más comunes de encontrar en la industria y en la producción agrícola.

Por ejemplo, en un proceso de tratamiento térmico del acero, es de vital importancia para asegurar una eficacia en la producción, así como también es importante en un proceso de fundición al vacío. Por lo tanto, un sistema de control de temperatura es ampliamente utilizado en la industria, producción agrícola, tratamientos médicos, sistemas de aire acondicionado entre otros. El seleccionar una estrategia de control adecuada a través de los datos de monitoreo en tiempo real se convierte en un factor clave para además obtener un ahorro de energía (Jun, et al., 2014, pp. 91-92).

Existen varias estrategias que han sido aplicadas en los sistemas de control de temperatura. El control Fuzzy Proporcional, Integral y Derivativo (PID), autoajusta las ganancias del controlador PID. Este controlador ha sido ampliamente utilizado en los sistemas de control de temperatura debido a que es fácil de implementar y es efectivo (Jun, et al., 2014, p. 92). En sistemas de refrigeración se propone una estrategia óptima de control de temperatura de aproximación (OAT) para restablecer la temperatura del agua de condensación cada hora, de manera que se maximice

el rendimiento del enfriador de agua combinado y del sistema de torre de enfriamiento (Chia-Wei & Yew-Khoy, 2011, p. 816).

En sistemas de control de temperatura de ambientes se propone un método típico de retardo de tiempo múltiple y sistema no lineal, de extracción automática de reglas (SERFC por sus siglas en inglés) para mantener un valor de temperatura estable en una cámara de ambiente construido con sistema de suministro de aire y sistema de agua caliente. Los parámetros de las funciones de transferencia en cada bucle de control fueron identificados por datos experimentales en un formato de secuencias de tiempo obtenidas a partir del experimento de rendimiento dinámico de respuesta (Zhen, et al., 2010, pp. 386-387).

Las simulaciones de control difusas se implementaron basándose en el ajuste del sistema de suministro de aire y el sistema de agua caliente por SERFC. Los resultados de la simulación muestran que el SERFC para la cámara ambiente ha satisfecho el rendimiento. No hay una sobre-oscilación superior y el error es estable. Dicho concepto (SERFC) puede utilizarse para tratar esos procesos térmicos complejos con dificultades en el modelado de reglas de control difuso, proporcionando una base para la aplicación adicional de control difuso en el sistema de climatización HVAC (Heating, Ventilating and Air Conditioning) (Zhen, et al., 2010, pp. 386-387).

De igual manera para los sistemas de aire acondicionado Turhan, Simani, Zajic, & Gokcen Akkurt presentan el diseño y la implementación de diferentes estrategias de control avanzado que son aplicadas a un modelo no lineal de una unidad térmica en (Turhan, et al., 2017, pp. 1-2). Las estrategias aplicadas fueron: control PID clásico, control difuso, control Adaptativo, control predictivo por modelo (MPC). Se realizó una identificación de sistemas de cajas grises utilizando datos, lo cual proporcionó el modelo del sistema de tiempo continuo no-lineal, físicamente significativo, que representa el punto de referencia en el que se desarrolló el trabajo.

El problema de control de esta unidad térmica es importante, ya que constituye el elemento clave de los sistemas de aire acondicionado pasivo. Los esquemas de control avanzados analizados se utilizan para regular la temperatura del aire de salida de la unidad térmica mediante la explotación de la velocidad del aire de entrada, mientras que la temperatura del aire de entrada se considera como una perturbación externa. El control predictivo por modelo proporcionó el mejor resultado de las diferentes estrategias de control, gracias a que puede anticiparse a los eventos futuros.

El control de temperatura en máquinas de termoformado en el Ecuador es un tema que no ha sido abordado a profundidad. La mayoría de máquinas de procesamiento de plástico utiliza como controladores pirómetros. Las máquinas restantes utilizan PLCs en los cuales se han programado

controladores del tipo On-Off (Burbano, 2013, pp. 83-84), (Carvajal & Paredes, 2013, p. 53), (Martínez & Moya, 2015, pp. 138-139), (Pérez & Chavarro, 2012, pp. 88-89). Por otro lado, China es el país que ha incursionado en la investigación del control de temperatura en máquinas termoformadoras (Wang, 2012, p. 2627), (Dua, et al., 2011, p. 639), (Shi, et al., 2012, p. 257).

De manera particular, Shoubin Wang, Na Li y Fan Yang proponen en (Wang, 2012, p. 2627) controlar la temperatura de un horno de resistencias eléctricas utilizando un controlador Fuzzy Proporcional Integral Derivativo (PID) . El controlador PID es sumamente utilizado por su facilidad de implementación, pero debido a que el horno de resistencias presenta un tiempo de retardo grande, además de no linealidades, es difícil establecer un modelo del horno, y, por lo tanto, el controlador PID no es efectivo.

La teoría de control difusa es utilizada para implementar sistemas de control inteligente en sistemas no lineales, o en sistemas en que los métodos tradicionales no son aplicables. El objetivo del trabajo fue el de sintonizar automáticamente los parámetros del controlador PID. Se implementó una planta típica de un horno de resistencias utilizando MATLAB. Los resultados del controlador Fuzzy PID, en comparación al controlador PID tradicional, demostraron un mejor rendimiento.

De manera similar, en el trabajo de Chunhua Dua se propone un controlador Fuzzy PID aplicado a una máquina termoformadora (Dua, et al., 2011, pp. 639-643). Es importante mencionar que el control difuso fue usado para calcular las constantes del controlador PID de forma automática de acuerdo a las condiciones de variación de la temperatura. Para esto, los autores utilizaron el error del sistema y la velocidad de variación de dicho error, es decir la diferencia de temperatura y la velocidad con que varía la temperatura. Se aplicó el cálculo difuso para cada una de las constantes, y se definieron las respectivas tablas de control. Los resultados reportados fueron bastantes aceptables, sin embargo, los investigadores recalcaron que cada tabla de control difuso varía de acuerdo a la máquina termoformadora.

Por otro lado, una variación se produce en el trabajo de Shi Dequan en el cual a lo expuesto en el apartado anterior se le agrega un sistema de control experto (Shi, et al., 2012, p. 257). Es importante mencionar que cuando existe una variación de temperatura considerable entra en funcionamiento el controlador Fuzzy PID, mientras que cuando la variación es mínima se utiliza el control por sistema experto basado en una base de datos previamente adquirida del horno. Los resultados de simulación realizada en MATLAB evidenciaron que este tipo de sistemas presentan un mejor rendimiento en comparación a un controlador PID tradicional. (Shi, et al., 2012, p. 261).

2.2. Sistemas de Control.

Un sistema de control automático se caracteriza por tener varios elementos interconectados entre sí para formar una configuración denominada sistema, de tal manera que el arreglo resultante es capaz de autorregularse por sí mismo. Además, se puede decir que dicho sistema (o componente del sistema) es susceptible de ser controlado a través de la aplicación de una señal $r(t)$ a manera de entrada para obtener una respuesta de salida $y(t)$. Un sistema de control puede ser representado mediante bloques como se muestra en la Figura 1-2. (Hernández Gaviño, 2010, p. 2).

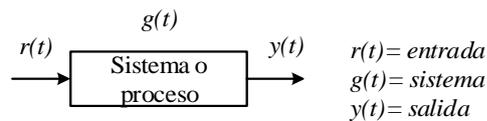


Figura 1-2: La salida del sistema sucede como consecuencia de la actuación de la entrada en el proceso.

Fuente: (Hernández Gaviño, 2010, p. 2).

El vínculo entrada-salida es una relación de causa y efecto con el sistema, por lo que el proceso por controlar (también denominado planta) relaciona la salida con la entrada. Las entradas típicas aplicadas a los sistemas de control son: escalón, rampa e impulso, según se muestra en la Figura 2-2. (Hernández Gaviño, 2010, p. 2).

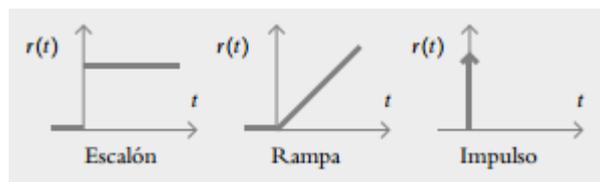


Figura 2-2: Distintos tipos de entradas.

Fuente: (Hernández Gaviño, 2010, p. 2).

Una entrada escalón simula el comportamiento de una referencia constante introducida al sistema. Una entrada tipo rampa es un valor de referencia que se incrementa con el transcurso del tiempo. Finalmente, una entrada impulso es una señal de prueba cuyo valor es grande y sucede en un instante corto de tiempo. La función de transferencia de un sistema es su representación matemática. Finalmente, el problema de control se reduce a la selección y ajuste de un grupo de elementos del sistema, para que, al momento de interactuar el sistema, se comporte de una manera requerida por el operador. (Hernández Gaviño, 2010, p. 2).

2.3. Identificación de Sistemas.

Cuando se habla de diseñar un controlador, sea éste en tiempo continuo o tiempo discreto, se requiere un modelo o función de transferencia de la planta a controlar, mediante la cual se caracteriza su comportamiento dinámico. Una vez obtenido el modelo, el diseñador puede utilizar técnicas clásicas o modernas de control. El modelo o función de transferencia permite al diseñador comprobar y validar los cálculos del controlador, mediante simulación, al observar el comportamiento del sistema respecto a la acción del controlador calculado (López Guillén, 2016, pp. 1-2).

Si se obtiene el valor de consigna deseado, el controlador fue bien determinado o calculado, caso contrario se realiza un ajuste hasta que satisfaga las especificaciones del diseño. Al final, el modelo o función de transferencia se convierte en una herramienta importante, que permite predecir el comportamiento de una planta, sin la necesidad de intervenir físicamente en ella, ahorrando de esta manera recursos. (López Guillén, 2016, pp. 1-2).

En la práctica, se tiene dos métodos principales para obtener el modelo o función de transferencia de un sistema:

- Modelado teórico. Éste método, consiste en aplicar las leyes básicas de la física a la planta para describir el comportamiento dinámico de un proceso. Se trata de un proceso analítico.
- Identificación del sistema. Éste método consiste en utilizar datos almacenados de un experimento realizado a la planta en análisis, para obtener el modelo a partir de ellos. Se trata de un método experimental.

El modelado teórico es el método ideal de aplicación, pues en él se tiene en cuenta todos los fenómenos físicos que intervienen en la planta, sin embargo, tiene un campo de aplicación restringido principalmente a procesos sencillos o en procesos que no se requiera una gran exactitud en el modelo obtenido. En gran cantidad de plantas en análisis suelen existir ciertos parámetros desconocidos, que hacen imposible utilizar el método teórico. El modelo en éste caso sólo se puede determinar experimentando sobre el sistema o planta real. De ahí nace la necesidad de emplear los métodos de identificación de sistemas (López Guillén, 2016, p. 3).

Se entiende por identificación de sistemas a la obtención de forma experimental de un modelo que reproduzca con suficiente exactitud, para los fines deseados, las características dinámicas del proceso objeto de estudio (López Guillén, 2016, p. 4). En términos generales, el proceso de identificación comprende los pasos que se muestra en el Gráfico 1-2:

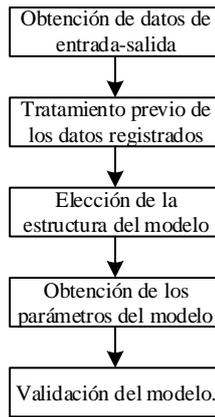


Gráfico 1-2: Pasos para la identificación de sistemas.

Fuente: (López Guillén, 2016, pp. 4-5)

Realizado por: CORTÉS, José, 2017.

Según (López Guillén, 2016, p. 5), si se llega a la conclusión de que el modelo no es válido, se deben revisar los siguientes aspectos como posibles causas:

- El conjunto de datos de entrada-salida no proporciona suficiente información sobre la dinámica del sistema.
- La estructura escogida no es capaz de proporcionar una buena descripción del modelo.
- Cuando se utiliza métodos paramétricos, el criterio de ajuste de parámetros seleccionado no es el más adecuado, es decir los valores determinados no ajustan bien el modelo.

Existen algunas clasificaciones de identificación de sistemas, entre ellas se encuentra la identificación por simple disparo o por lote. En este grupo se encuentran los métodos gráficos de identificación (Baculima Sinchi, 2015, pp. 13-15). Entre los principales métodos se tiene:

- Método de la tangente Ziegler & Nichols
- Método del tangente modificado de Miller
- Método de Smith o Analítico.

Los métodos anteriores son detallados a continuación. Sin embargo, es importante mencionar que dichos métodos sirven para aproximar el sistema de planta a un modelo de primer orden de la forma:

Ecuación 1-2.

$$G_p(s) = \frac{k}{\tau s + 1} e^{-t_m s}$$

donde, el tiempo de muerto t_m es el tiempo que transcurre desde que se aplica una señal de entrada tipo escalón al sistema, hasta que dicha señal aplicada provoca un cambio significativo en la magnitud del mismo.

2.3.1. Método de la tangente Ziegler & Nichols.

El procedimiento requiere que se trace una recta tangente a la curva de reacción del proceso en su punto de inflexión o de máxima pendiente como se muestra en la Figura 3-2.

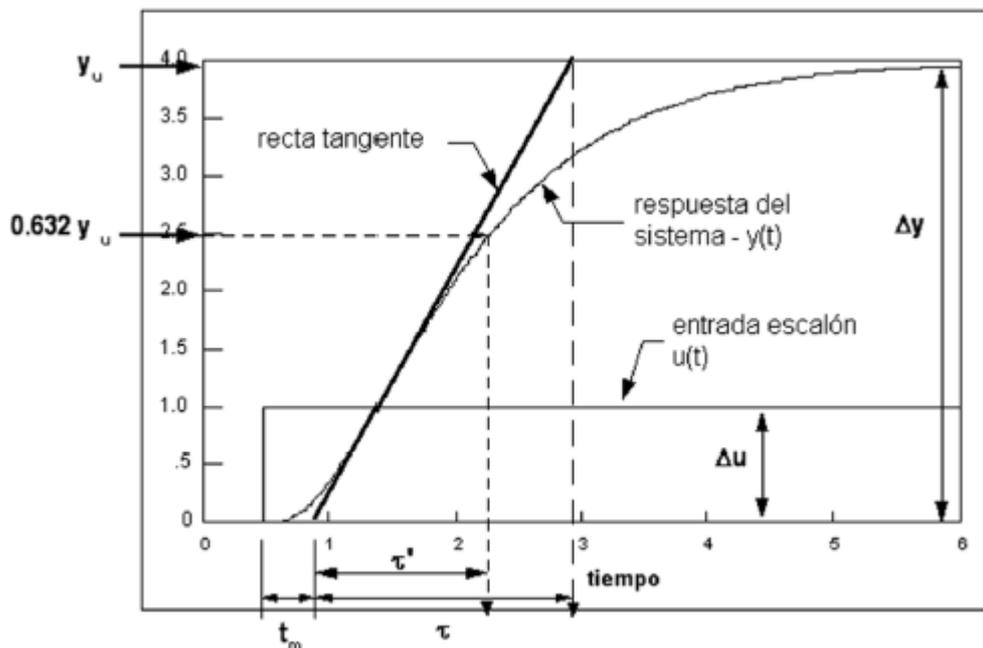


Figura 3-2: Métodos de la tangente; curva de reacción.

Fuente: Alfaro, (Alfaro, 2001, p. 13).

Para obtener un modelo de primer orden que presenta un tiempo de retardo de respuesta del sistema de forma similar a las mostrada en (Ecuación 1-2), se debe identificar la ganancia k , la constante de tiempo τ y el tiempo muerto aparente t_m del sistema (Alfaro, 2001, p. 13). Es importante mencionar que la ganancia k es el radio de la variación total en la señal de salida respecto a las variaciones en la señal de entrada:

Ecuación 2-2.

$$k = \frac{\Delta y}{\Delta u}$$

El tiempo transcurrido entre la aplicación del escalón de entrada y el punto en que la recta tangente corta el eje del tiempo es el tiempo muerto t_m aparente del sistema. Además, el tiempo

transcurrido entre el t_m y el tiempo en que la tangente corta el valor final de la salida y_u es conocido como la constante de tiempo τ (Alfaro, 2001, p. 13).

2.3.2. *Método modificado de la tangente de Miller.*

El procedimiento propuesto por Miller es una variación del método de Ziegler & Nichols, y al igual que éste, el método de Miller requiere que se trace una recta tangente al punto de inflexión de la respuesta del sistema a la prueba de entrada tipo escalón. La ganancia k y el tiempo muerto t_m en este método se calculan de la misma forma que en el método de Ziegler & Nichols.

La variación propuesta por Miller radica en el cálculo de la constante de tiempo del modelo, ésta se calcula como el tiempo requerido para que la respuesta alcance el 63.2% del cambio total a partir del tiempo muerto t_m . Esta variación hace que la respuesta del modelo y la del sistema real coincidan en por lo menos un punto, ambas respuestas pasan por el mismo punto en el instante $t = t_m + \tau$ (Alfaro, 2001, p. 13).

Ecuación 3-2.

$$t = t_m + \tau$$

2.3.3. *Método de Smith o Analítico.*

El método de Ziegler & Nichols y la variación propuesta por Miller requieren que se trace una recta tangente a la curva de reacción del sistema en el punto de inflexión. Esto no siempre es fácil de realizar, principalmente si la respuesta del sistema presenta ruido. El método basado en dos puntos sobre la curva de reacción fue propuesto por Smith y es ejemplificado en la Figura 4-2. Este método es también conocido como analítico.

Para identificar los dos parámetros que requiere el modelo, la constante de tiempo (τ) y el tiempo muerto (t_m) aparente del sistema se pueden establecer dos ecuaciones con dos incógnitas utilizando dos puntos sobre la curva de reacción (Alfaro, 2001, p. 15) Los instantes seleccionados por el método de Smith son los tiempos requeridos para que la respuesta alcance el 28.3% (t_{28}) y el 63.2% (t_{63}) del valor final, y corresponden a :

Ecuación 4-2.

$$t_{28} = t_m + \frac{\tau}{3}$$

Ecuación 5-2.

$$t_{63} = t_m + \tau$$

Resolviendo el sistema se obtiene los valores:

Ecuación 6-2.

$$\tau = 1.5 * (t_{63} - t_{28})$$

Ecuación 7-2.

$$t_m = t_{63} - \tau$$

Finalmente, la ganancia k se calcula usando (Ecuación 2-2) como en los métodos anteriores (Alfaro, 2001, p. 15).

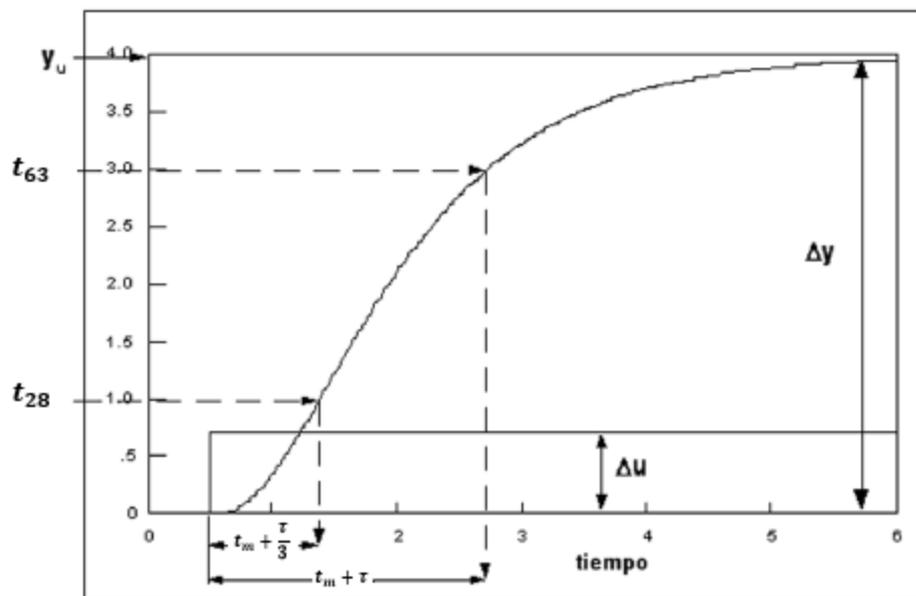


Figura 4-2: Método de dos puntos de Smith, curva de reacción.

Fuente: (Alfaro, 2001, p. 15).

Realizado por: CORTÉS, José, 2017.

2.4. Controladores PID.

Los controladores PID son los controladores que se han usado mayoritariamente en el control de los procesos industriales (Kozák, 2014, pp. 2-3). Los controladores PID, incluyen tres acciones: proporcional (P), integral (I) y derivativa (D). Estos controladores son los denominados P, I, PI, PD y PID (Mazzone, 2016, p. 1).

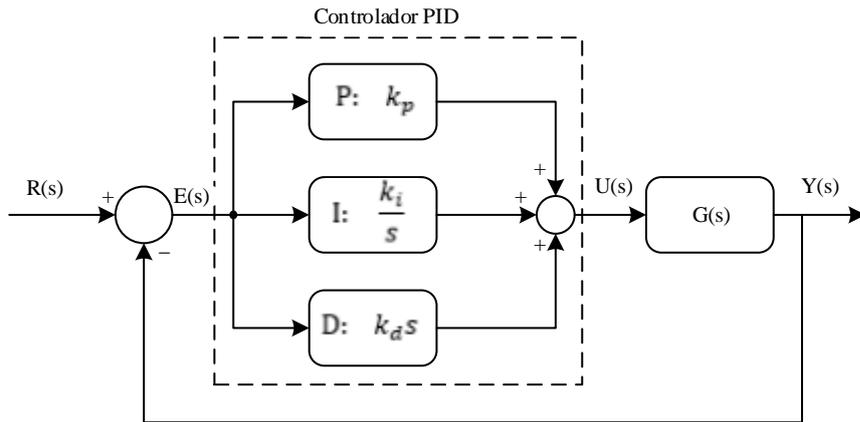


Gráfico 2-2: Estructura básica de un controlador PID.

Realizado por: CORTÉS, José, 2017.

En el Gráfico 2-2 se observa la estructura básica de un controlador PID. $R(s)$ es el valor consigna, $E(s)$ el error del sistema, P es la acción proporcional de ganancia k_p , I es la acción integral de ganancia $\frac{k_i}{s}$, D es la acción derivativa de ganancia $k_d s$, $U(s)$ la respuesta del controlador y $Y(s)$ la respuesta del sistema final.

2.4.1. Controlador proporcional: P.

Se dice que un control es de tipo proporcional cuando la salida del controlador $u(t)$ es proporcional al error $e(t)$ (Hernández Gaviño, 2010, p. 364):

Ecuación 8-2.

$$u(t) = K_p \cdot e(t)$$

Expresando como función de transferencia el valor del controlador queda:

Ecuación 9-2.

$$C_p(s) = K_p$$

Donde K_p es una ganancia ajustable. Un controlador proporcional puede controlar cualquier planta estable, pero posee desempeño limitado y error en régimen permanente (off-set) (Mazzone, 2016, p. 1).

2.4.2. Controlador integral: I.

Se dice que un control es de tipo integral cuando la salida del controlador $u(t)$ es proporcional a la integral del error $e(t)$ (Hernández Gaviño, 2010, p. 364):

Ecuación 10-2.

$$u(t) = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau$$

Expresando como función de transferencia el valor del controlador queda:

Ecuación 11-2.

$$C_i(s) = \frac{K_i}{s}$$

La señal de control $u(t)$ tiene un valor diferente de cero cuando la señal de error $e(t)$ es cero. Por lo que se concluye que, dada una referencia constante, o perturbaciones, el error en régimen permanente es cero (Mazzone, 2016, p. 1).

2.4.3. Controlador proporcional-integral: PI.

Se dice que un control es de tipo proporcional-integral cuando la salida del controlador $u(t)$ es proporcional al error $e(t)$, sumado a una cantidad proporcional a la integral del error $e(t)$ (Hernández Gaviño, 2010, p. 366):

Ecuación 12-2.

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau$$

Donde T_i se denomina tiempo integral y es quien ajusta la acción integral. La función de transferencia resulta:

Ecuación 13-2.

$$C_{pi}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right)$$

En un control proporcional, si no existe señal de error, la señal de control será cero, es necesario que exista error para tener un valor de acción de control. En la acción integral, cuando exista un error pequeño positivo se obtendrá una acción de control creciente, y si fuera negativo la señal de control será decreciente. Al relacionar lo anteriormente expuesto, se infiere que se tendrá un error de estado estacionario igual a cero. En la industria, muchos controladores utilizan sólo una acción PI. Se puede demostrar que un control PI es adecuado para todos los procesos donde la dinámica

es esencialmente de primer orden. Esto se lo realiza en forma sencilla, por ejemplo, mediante una prueba de escalón (Mazzone, 2016, p. 2).

2.4.4. Controlador proporcional-derivativo: PD.

Se dice que un control es de tipo proporcional-derivativo cuando la salida del controlador $v(t)$ es proporcional al error $e(t)$, sumado a una cantidad proporcional a la derivada del error $e(t)$:

Ecuación 14-2.

$$u(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt}$$

Donde T_d es una constante denominada tiempo derivativo. Esta acción tiene carácter de previsión, lo que hace más rápida la acción de control, aunque tiene la desventaja importante que amplifica las señales de ruido y puede provocar saturación en el actuador. La acción de control derivativa nunca se utiliza por sí sola, debido a que solo es eficaz durante periodos transitorios. La función transferencia de un controlador PD resulta:

Ecuación 15-2.

$$C_{pd}(s) = K_p (1 + T_d s)$$

Cuando una acción de control derivativa se agrega a un controlador proporcional, permite obtener un controlador de alta sensibilidad, es decir que responde a la velocidad del cambio del error y produce una corrección significativa antes de que la magnitud del error se vuelva demasiado grande. Aunque el control derivativo no afecta en forma directa al error en estado estacionario, añade amortiguamiento al sistema y, por tanto, permite un valor más grande que la ganancia K , lo cual provoca una mejora en la precisión en estado estable (Mazzone, 2016, p. 2).

2.4.5. Controlador proporcional-integral-derivativa: PID.

Se dice que un control es de tipo proporcional-integral-derivativo cuando la salida del controlador $v(t)$ es proporcional al error $e(t)$, sumado a una cantidad proporcional a la integral del error $e(t)$ más una cantidad proporcional a la derivada del error $e(t)$ (Hernández Gaviño, 2010, p. 368):

Ecuación 16-2.

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + K_p T_d \frac{de(t)}{dt}$$

Esta acción combinada reúne las ventajas de cada una de las tres acciones de control individuales. Su función de transferencia resulta:

Ecuación 17-2.

$$C_{pd}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

CAPÍTULO 3

3. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

3.1. Diseño y simulación del controlador de temperatura.

En términos generales, para el diseño y simulación del controlador de temperatura han sido aplicados los pasos mostrados en el Gráfico 1-3.

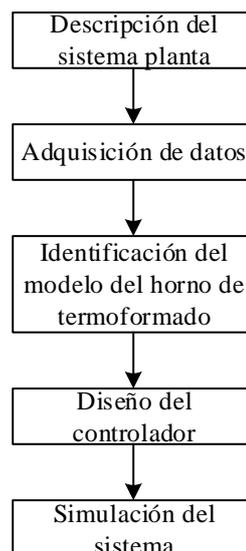


Gráfico 1-3: Metodología usada para el diseño y simulación del controlador de temperatura.

Realizado por: CORTÉS, José, 2017.

3.1.1. Descripción del Sistema Planta.

Como se describe en la introducción, la planta sobre la que se desarrolló el presente trabajo es el horno de entrada de la máquina de Láminas P7 de la Planta TechoLuz de TUBASEC C.A. mostrada en el Gráfico 2-3.



Gráfico 2-3: Máquina de láminas P7. En la figura: a: Extrusora, b: Labios laminadores, c: Calandra, y d: Hornos.

Fuente: TUBASEC C.A., 2017.

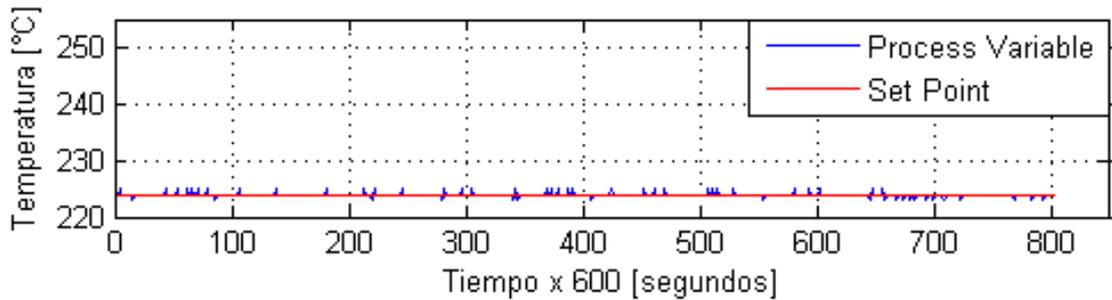
De manera general, esta máquina consta de:

- a) Extrusora: Formado por un tornillo sin fin, donde se derrite el material (polipropileno).
- b) Labios laminadores: Conjunto de placas metálicas que ayuda a la distribución del material derretido.
- c) Calandra: Conjunto de rodillos, donde el material derretido se transforma a un estado sólido formando una placa plana con ciertos milímetros de espesor.
- d) Hornos: Conjunto de placas metálicas, por las cuales atraviesa la lámina plástica para proceder al proceso de termoformado.

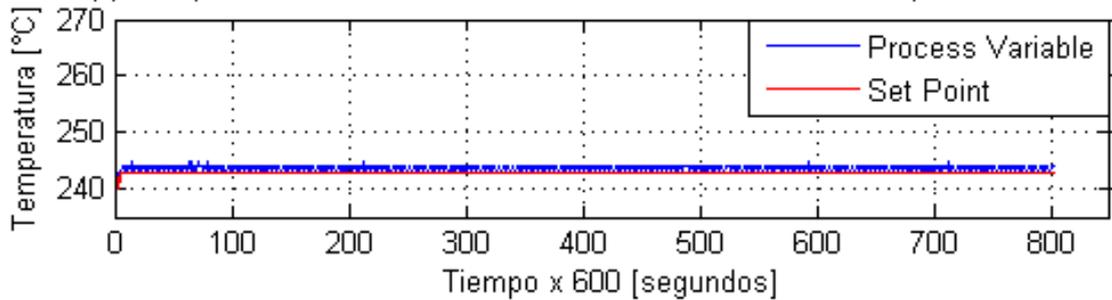
Como se mencionó anteriormente, los hornos fueron construidos localmente por personal técnico de la empresa. Estos fueron basados en la máquina que se adquirió en un principio. De manera particular, el horno, sobre el cual fue desarrollado el presente estudio, está constituido por placas metálicas, las mismas que forman una cámara. Dicha cámara posee un aislamiento de lana de vidrio para reducir la irradiación del calor al exterior. En su interior se ubican resistencias tipo S y tipo U, conocidas así por la forma de las mismas, que son de distinta potencia eléctrica.

Tanto la extrusora, labios laminadores y hornos utilizan resistencias eléctricas para elevar la temperatura de los mismos y se dividen por zonas. Actualmente, el control de temperatura se lo realiza mediante el concepto de Histéresis, y utiliza un PLC para su implementación. En la extrusora y los labios laminadores se controla la temperatura de manera idónea. En los hornos, la variación de temperatura respecto a la temperatura consigna es evidente como se evidencia en el

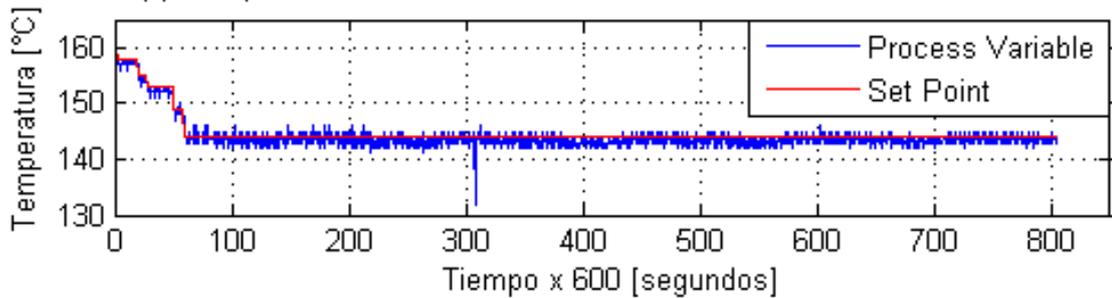
Gráfico 3-3. Resulta importante que dicha temperatura sea correctamente controlada y que no exista una gran variabilidad, en especial en la temperatura del Horno de Entrada.



(a) Comparación del Set Point vs Process Variable Cañón Grupo 4 marzo 2015



(b) Comparación del Set Point vs Process Variable Labio 5 marzo 2015



(c) Comparación del Set Point vs Process Variable Horno Entrada marzo 2015

Gráfico 3-3: Visualización del comportamiento de la temperatura del cañón, labios y horno de una termoformadora en función del tiempo.

Realizado por: CORTÉS, José, 2017.

En el Gráfico 4-3 se observa el esquema de la planta que funciona actualmente. La adquisición de la temperatura se la realiza mediante una termocupla tipo J, que está conectada a los módulos de entrada analógicos de temperatura del PLC SIEMENS S7 1200. En el PLC se realiza el control mediante histéresis.

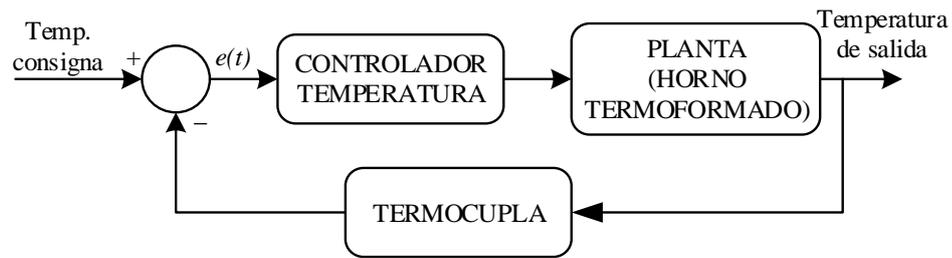


Gráfico 4-3: Sistema de control del horno máquina P7.

Realizado por: CORTÉS, José, 2017.

3.1.2. Adquisición de Datos.

Debido a la forma de construcción del horno, la utilización de métodos analíticos para la obtención de una función de transferencia que describa el comportamiento del horno se convierte en una tarea bastante pesada, pues para ello se necesita conocer distintos parámetros de los materiales utilizados para la construcción del horno. Es importante mencionar que la empresa TUBASEC C.A. no dispone de información técnica de los hornos manufacturados por sus técnicos ni mucho menos las características de los materiales utilizados en su construcción. En consecuencia, la mejor forma de conocer la función de transferencia es utilizando técnicas de identificación de sistemas aplicando métodos gráficos.

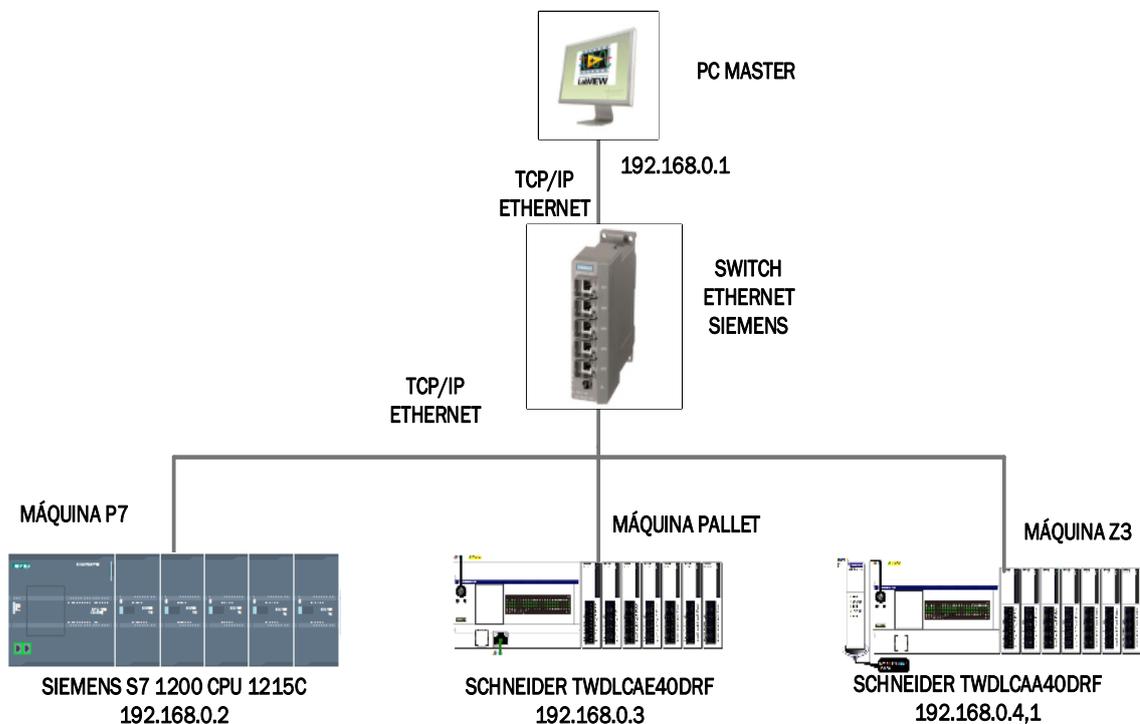


Gráfico 5-3: Arquitectura de red de área local de las máquinas de TechoLuz.

Realizado por: CORTÉS, José, 2017.

Para emplear dichos métodos es necesario obtener y almacenar datos de temperatura generados en el sistema. La planta TechoLuz posee un sistema SCADA para el monitoreo de la temperatura de la máquina de termoformado. En el Gráfico 5-3, se observa la arquitectura de red local del sistema SCADA que funciona en la planta.

Para obtener y almacenar los datos, se creó una aplicación en LabVIEW, la cual se conecta a las variables del servidor OLE (Object Linking and Embedding) for Process Control, OPC. En la Figura 1-3, se pueden observar algunas de las variables del servidor OPC.

Tag Name	Address	Data Type	Scan Rate	Scaling	Description
SENSOR_INFERIOR	I0.4	Boolean	100	None	SENSOR INFERIOR TC
SENSOR_SUPERIOR	I0.5	Boolean	100	None	SENSOR SUPERIOR T
SENSOR_SEGURIDAD	I0.6	Boolean	100	None	SENSOR SEGURIDAD
Temp_canon1	IW128	Word	100	None	temperaturaCanon 1
Temp_canon2	IW130	Word	100	None	temperatura canon 2
Temp_canon3	IW132	Word	100	None	temperatura canon 3
Temp_canon4	IW134	Word	100	None	temperatura canon 4
Temp_canon5	IW136	Word	100	None	temperatura canon 5
Temp_rejilla	IW138	Word	100	None	temperatura rejilla
Temp_labio1	IW140	Word	100	None	Temperatura labio1
Temp_labio2	IW142	Word	100	None	Temperatura labio2
Temp_labio3	IW144	Word	100	None	Temperatura labio3
Temp_labio4	IW146	Word	100	None	Temperatura labio4
Temp_labio5	IW148	Word	100	None	Temperatura labio5
Temp_HEC	IW150	Word	100	None	Temperatura homo de e

Figura 1-3: Variables del servidor OLE (Object Linking and Embedding) for Process Control OPC.

Fuente: TUBASEC C.A., 2017.

A través de LabVIEW, se programó un instrumento virtual para realizar la prueba de escalón a las resistencias de calentamiento de los hornos (las mismas que son los actuadores del sistema). Esta prueba es necesaria para la obtención de los datos de respuesta de las resistencias para la identificación del sistema. El programa se encarga de la activación del contactor que controla la conexión de las resistencias a la red de 440 Vca. De manera simultánea, se registra y almacena la variación de temperatura durante el experimento en un archivo de texto cada segundo. Posteriormente estos resultados fueron procesados mediante MATLAB.

3.1.3. Identificación del Modelo del Horno de Termoformado.

En el Gráfico 6-3a se observa la respuesta al escalón de 440 Vca aplicado a la planta analizada. Como se puede observar, el comportamiento de la planta es similar a un sistema de primer orden. Esto ha sido determinado debido a que cumple las características de dichos sistemas, como son:

autorregulación, en la que el sistema alcanza el estado estacionario sin requerir la intervención de un sistema de control y porcentajes del valor de estado estacionario respecto al tiempo (Arántegui, 2010-2011, p. 75). Además, es posible observar que la respuesta del sistema a una excitación de escalón es monótona, creciente y sin oscilaciones (Betancor, et al., 2006, p. 4).

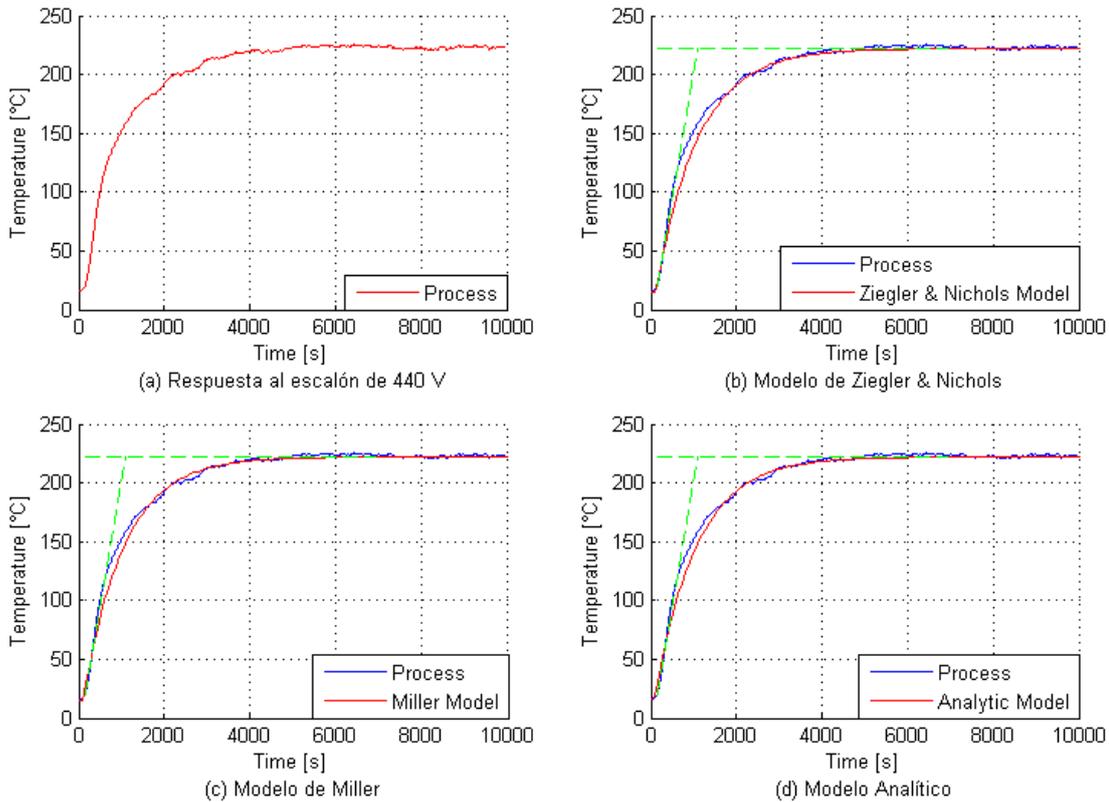


Gráfico 6-3: Aplicación método gráfico. En la figura: a: Respuesta del sistema a la aplicación de una entrada escalón 440, b: Respuesta del modelo identificado por el método de Ziegler & Nichols, c: Respuesta del modelo identificado por el método de Miller, d: Respuesta del modelo identificado por el método Analítico.

Realizado por: CORTÉS, José, 2017.

Una vez obtenidos los datos, estos han sido procesados utilizando MATLAB donde a través de un algoritmo, detallado en los anexos A y B, han sido aplicados los métodos gráficos de Ziegler & Nichols, Miller y Analítico. En primer lugar, en el Gráfico 6-3b se observa la respuesta del modelo obtenido mediante la aplicación del método gráfico de Ziegler & Nichols. Dicho modelo viene dado por la siguiente ecuación:

Ecuación 1-3.

$$G(s) = \frac{0.5045}{990s + 1} e^{-110s}.$$

Además, en el Gráfico 6-3c se observa la respuesta del modelo obtenido mediante la aplicación del método de Miller. Dicho modelo está definido por la siguiente ecuación:

Ecuación 2-3.

$$G(s) = \frac{0.5045}{944s + 1} e^{-110s}.$$

Por otro lado, en el Gráfico 6-3d se observa la respuesta del modelo obtenido mediante la aplicación del método Analítico. Dicho modelo viene dado por la siguiente ecuación:

Ecuación 3-3.

$$G(s) = \frac{0.5045}{982.5s + 1} e^{-71.5s}.$$

De manera alternativa, los datos adquiridos fueron procesados mediante la herramienta IDENT de MATLAB. A través de esto, se obtuvo la identificación del modelo con una validación del 91.47% como lo demuestra el Gráfico 7-3.

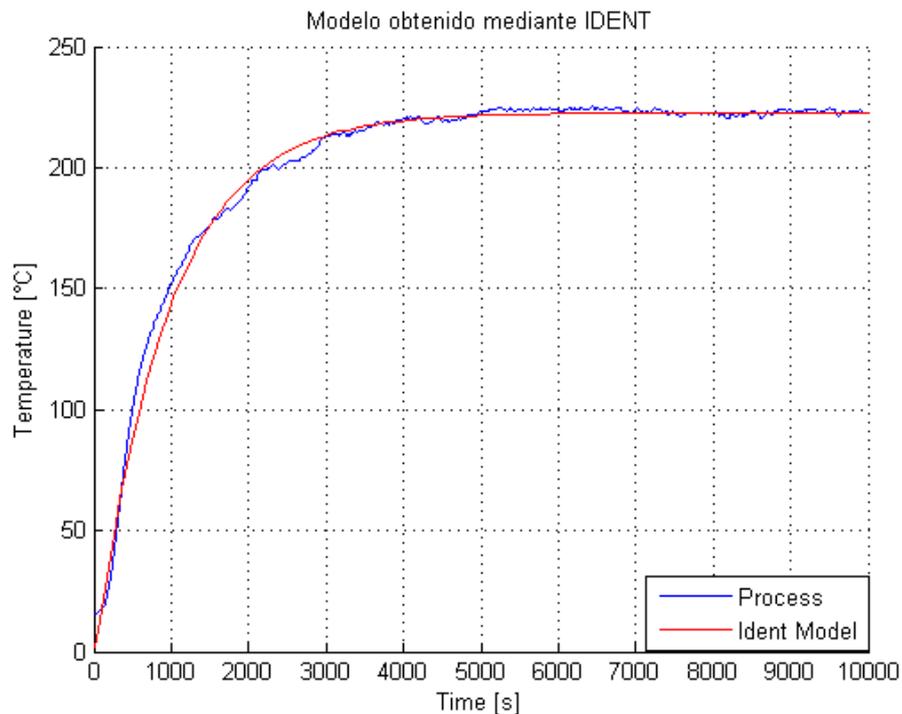


Gráfico 7-3: Visualización de la respuesta del modelo identificado utilizando la herramienta IDENT de MATLAB.

Realizado por: CORTÉS, José, 2017.

Otro de los resultados obtenidos de IDENT es la descripción del comportamiento del modelo en dominio de 'S'. De hecho, en la siguiente ecuación se describe el comportamiento de la planta obtenido a través de la herramienta IDENT:

Ecuación 4-3.

$$G(s) = \frac{0.506}{938.8s + 1} e^{-30s}.$$

De la comparación de las respuestas de la prueba de escalón de 440 Vca aplicado a cada uno de los cuatro métodos empleados, se puede establecer que la dinámica de los modelos en los cuatro métodos es similar como lo demuestra el Gráfico 8-3. Al analizar las funciones de transferencias obtenidas a través de Ziegler & Nichols, Miller, Analítico e IDENT, las cuales fueron expresadas en (Ecuación 1-3), (Ecuación 2-3), (Ecuación 3-3) y (Ecuación 4-3) respectivamente, existe una clara diferencia en el retardo del sistema del modelo obtenido de las tres primeras funciones respecto la última.

Lo anterior se puede justificar debido a que la herramienta IDENT utiliza las funciones correspondientes propias de dicha aplicación para la identificación (Ljung, 2017, pp. 4.66-4.90). También, en el presente trabajo ha sido utilizado el método de Modelo de Procesos, en el cual se seleccionó el modelo de primer orden con retardo de sistema. Debido a esta misma razón, la ganancia de la función de transferencia (Ecuación 4-3) es mayor a las demás (Ecuación 1-3), (Ecuación 2-3) y (Ecuación 3-3), aunque no sea una diferencia significativa.

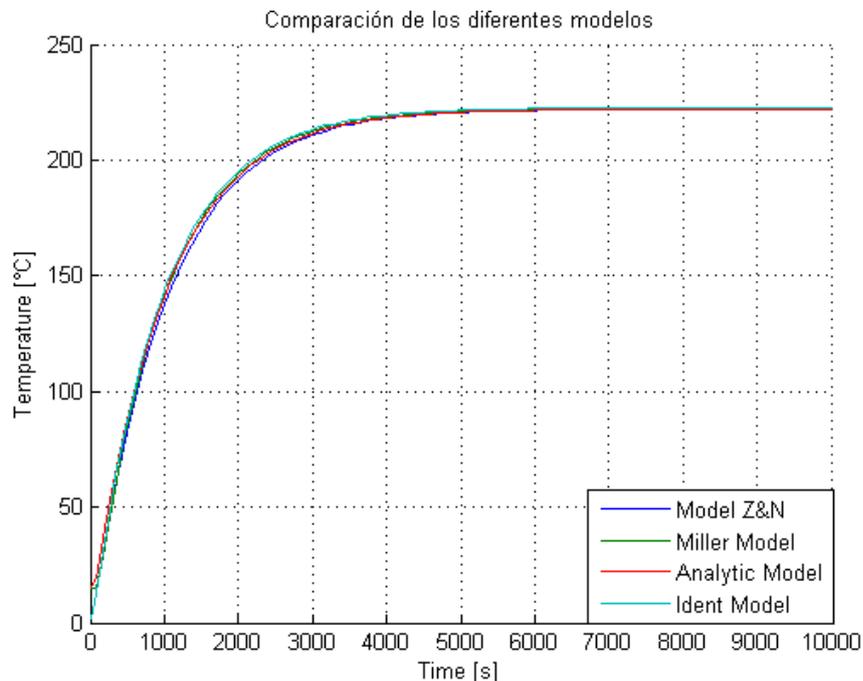


Gráfico 8-3: Comparación de las respuestas de los diferentes modelos obtenidos.

Realizado por: CORTÉS, José, 2017.

La identificación utilizando la herramienta IDENT sólo ha sido usada con el fin de determinar el comportamiento de las acciones del elemento control desde el punto de vista de los modelos de análisis considerados. Se ha podido comparar las respuestas de los métodos gráficos con la obtenida en IDENT. De esta forma ha sido apreciada la similitud de los métodos manuales (métodos gráficos de identificación), respecto a un método que emplea procesamiento netamente computacional. Se ha elegido utilizar el modelo obtenido por el método analítico para el resto de procesamiento al momento de diseñar el controlador, 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. Por lo tanto, el modelo que se propone usar se detalla a continuación:

Ecuación 5-3.

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

En la

Tabla 1-3 se observa el porcentaje de validación de cada uno de los métodos de identificación utilizados. Los datos de validación han sido obtenidos utilizando la herramienta IDENT. En primera instancia, las funciones de transferencia de los distintos modelos fueron importadas a dicha herramienta, luego de lo cual, se activó la visualización de los porcentajes de validación disponible para obtener dichos valores. El método analítico sin retardo ofrece el porcentaje de validación más cercano al obtenido mediante la herramienta IDENT. Esto reafirma la validez de la utilización del método analítico sin retardo.

Tabla 1-3: Porcentajes de validación de los métodos de identificación de sistemas.

Método identificación	% Validación
Ziegler & Nichols	89.71
Miller	90.65
Analítico	90.67
Analítico sin retardo	90.95
IDENT	91.47

Realizado por: CORTÉS, José, 2017.

Finalmente, en el Gráfico 9-3, se observa la respuesta al escalón de 440 Vca aplicado al modelo propuesto en (Ecuación 5-3). Es importante enfatizar que la propuesta de dicho modelo obedece a

la posibilidad de ser aplicado y determinado manualmente. Sin embargo, el algoritmo planteado en MATLAB permitió una rápida aplicación de los métodos de Ziegler & Nichols, método de Miller y método Analítico para la identificación del modelo adecuado de planta a partir de datos obtenidos sobre la respuesta de la planta ante una entrada tipo escalón de 440 Vca. Además, el modelo Analítico sin retardo propuesto en (Ecuación 5-3), simplifica los cálculos del controlador y el esfuerzo de procesamiento computacional para resolver y obtener la salida del sistema.

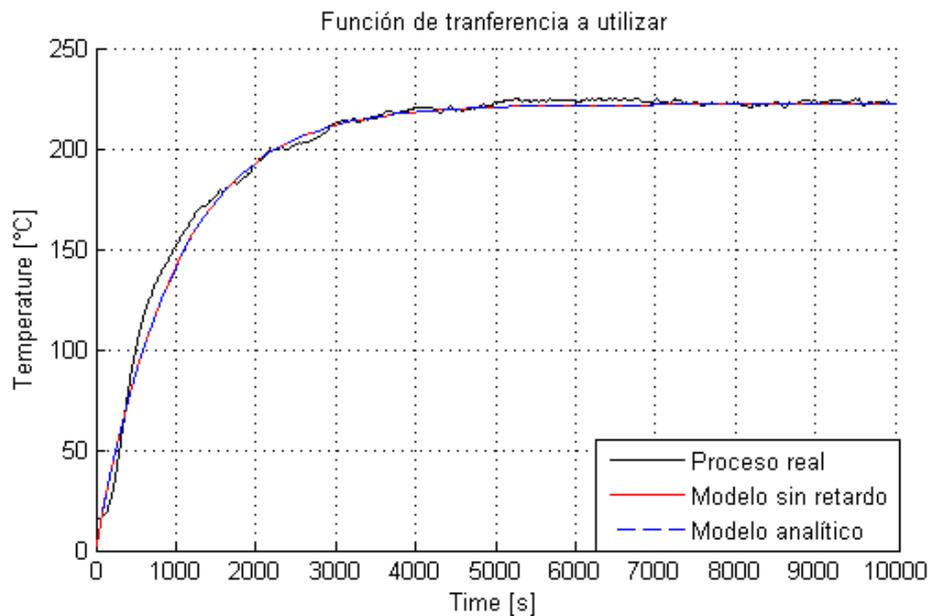


Gráfico 9-3: Respuesta al escalón de 440 Vca del modelo sin retardo.

Realizado por: CORTÉS, José, 2017.

Como se observa en el Gráfico 9-3, el comportamiento del modelo con retardo (línea segmentada-azul) y sin retardo (línea sólida-roja) es similar. Esto se puede explicar debido a que el proceso de estabilización de temperatura en análisis es un proceso lento y el tiempo de retardo obtenido al aplicar del método de identificación Analítico, determinado en (Ecuación 3-3), es apenas de 71.5 segundos frente a los 4000 segundos aproximadamente en que la planta llega a estabilizarse al aplicarse una entrada del tipo escalón.

Al determinarse que el modelo de la planta (horno) se puede aproximar a una función de transferencia sin retardo, y además ésta representa a un sistema de primer orden, los controladores que serán diseñados serán: Controlador Proporcional (P) y Controlador Proporcional-Integral (PI) (Arántegui, 2010-2011, pp. 77-78). Consideraciones teóricas de las características de dichos controladores serán analizadas para determinar el más adecuado a utilizar debido a que un controlador P puede presentar errores en estado estacionario, mientras que el controlador PI puede

asegura un error de estado estacionario igual a cero debido a la acción integrativa del mismo. (Mazzone, 2016, p. 10)

3.1.4. Diseño del controlador.

El calentamiento de la máquina, por experiencia de los técnicos que la operan, tarda aproximadamente 3 horas en el sector de los labios laminadores antes de ingresar material para el arranque de producción. La extrusora tarda un promedio de 2 horas hasta estabilizarse en la temperatura deseada. En el Gráfico 10-3 se observa las gráficas de los tiempos de respuesta respectivo, una vez alcanzado el Set Point, la temperatura se mantienen en él. En los hornos tardan poco tiempo en alcanzar la temperatura de consigna. Sin embargo, la variación de la temperatura entorno al valor de set point es de ± 6 °C.

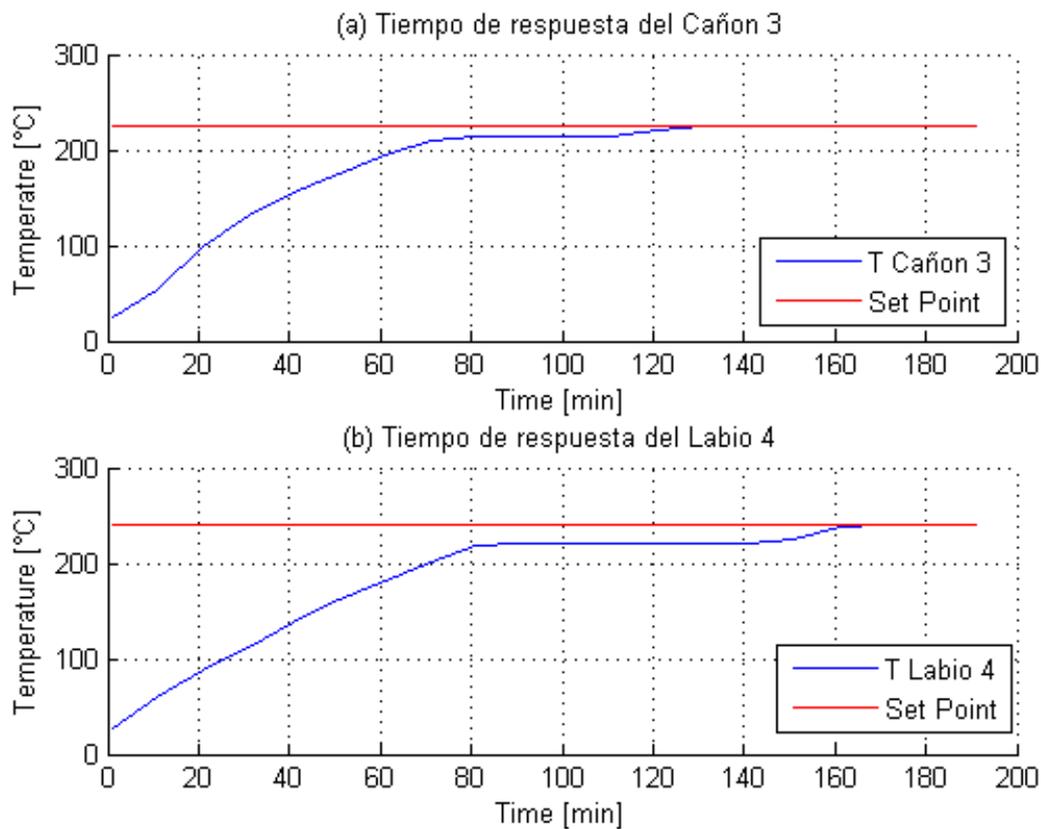


Gráfico 10-3: Tiempos de respuesta del sistema de control anterior. a: Respuesta Cañón 3, b: Respuesta Labio 4.

Realizado por: CORTÉS, José, 2017.

El objetivo del controlador a diseñar es reducir la variación de la temperatura en el horno de entrada a ± 3 °C. Los parámetros iniciales para el diseño fueron los siguientes:

$$M_p = 2\%$$

$$t_s = 3600s$$

donde:

M_p : Sobre – oscilación de la respuesta en temperatura del sistema

t_s : tiempo de estabilización

3.1.4.1. Diseño del Controlador Proporcional (P).

El primer controlador que se diseñó, fue un controlador proporcional P, cuyo esquema de sistema de control se muestra en el Gráfico 11-3.

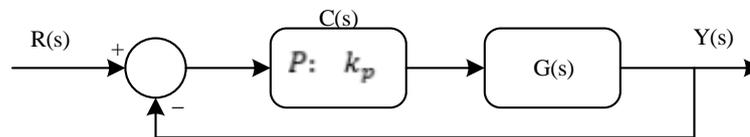


Gráfico 11-3: Esquema del sistema de control a diseñar que utiliza un controlador P.

Realizado por: CORTÉS, José, 2017.

Para el cálculo del controlador P se empleó el método de la Curva de Reacción, basado en los parámetros sugeridos por Ziegler & Nichols (Mazzone, 2016, p. 3). La ganancia k_p se calcula utilizando la fórmula:

Ecuación 6-3.

$$k_p = \frac{\tau}{k t_m} = 27.24.$$

Los valores τ, k, t_m han sido obtenidos de (Ecuación 5-3) que corresponde al método Analítico. Como se mencionó anteriormente, los controladores de tipo P presentan un error en estado estacionario. Para reducir o eliminar dicho error la ganancia del controlador debe ser alta. La salida del controlador de igual manera será alta. (Arántegui, 2010-2011, p. 77). Dicha salida puede ser físicamente imposible de aplicar al sistema que se desea controlar, debido a que existen limitaciones en las magnitudes de respuesta que se puedan generar y aplicar.

La respuesta del sistema aplicado un controlador P cuya ganancia es (Ecuación 6-3), se tiene en el Gráfico 12-3a. Se observa de manera clara que el error en estado estacionario no se ha eliminado.

En el Gráfico 12-3b se muestra el esfuerzo del controlador P, donde se observa como este controlador es imposible implementar debido a que la salida del controlador en los primeros minutos sobrepasa los 440 Vca, el cual es el límite físico de aplicación del voltaje.

Por lo tanto, debido a lo expuesto, el controlador proporcional P no es funcional para el objetivo planteado de reducir la variación de temperatura a ± 3 °C respecto al valor consigna, siendo además difícil implementar.

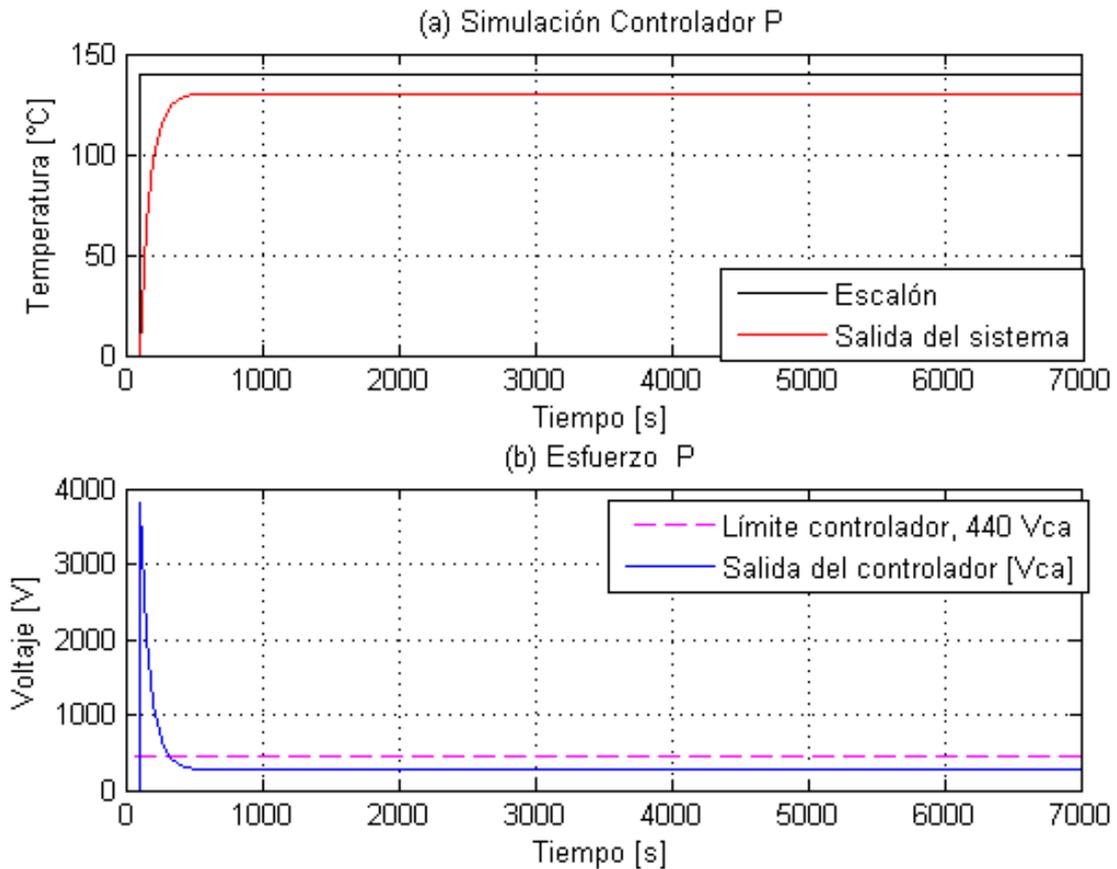


Gráfico 12-3: Controlador proporcional aplicado al Sistema. a: Respuesta del Sistema con controlador Proporcional, b: Esfuerzo del controlador proporcional.

Realizado por: CORTÉS, José, 2017.

3.1.4.2. Diseño del Controlador Proporcional-Integral (PI).

El segundo controlador considerado debido a las características de la función de transferencia obtenida del sistema y de las necesidades de funcionamiento fue un controlador PI. En el Gráfico 13-3 se observa el esquema básico del sistema de control basado en un controlador PI que se utilizó para el diseño.

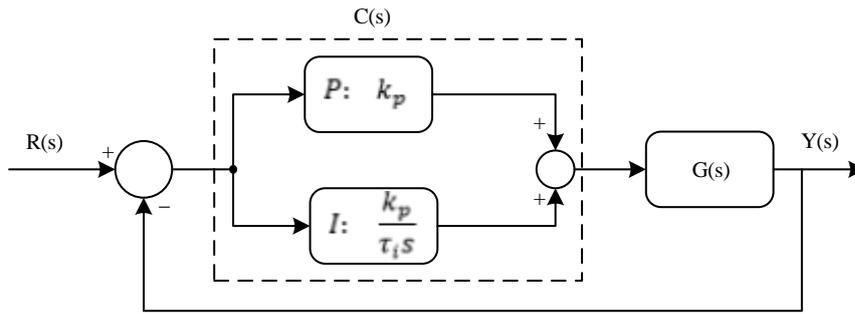


Gráfico 13-3: Esquema del sistema de control a diseñar que utiliza un controlador PI.

Realizado por: CORTÉS, José, 2017.

Donde:

$$G(s) = \frac{k}{\tau s + 1} = \frac{0.5045}{982.5s + 1} \quad \text{Función de transferencia de la planta}$$

$$C(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad \text{Función de transferencia del controlador PI}$$

Una función de transferencia $G_1(s)$ de primer orden en lazo abierto, se convierte en una función de transferencia $G_2(s)$ de segundo orden en lazo cerrado, cuando a $G_1(s)$ se le aplica un controlador de tipo integral y se lo retroalimenta. Es así como el denominador de $G_2(s)$ es denominado como polinomio característico $P(s)$.

Considerando que el polinomio característico $P(s)$ de un sistema de control de segundo orden viene determinado por la siguiente ecuación:

Ecuación 7-3.

$$P(s) = s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2 = 0$$

Donde:

$\xi =$ Coeficiente de amortiguación

$\omega_n =$ Frecuencia natural no amortiguada

De (Ecuación 7-3) se obtienen las raíces, que a su vez serán los polos por los cuales el comportamiento del sistema será definido. De tal manera, los polos obtenidos son:

Ecuación 8-3.

$$p_{1,2} = -\xi\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1 - \xi^2}$$

El tiempo de estabilización del sistema viene definido por:

Ecuación 9-3.

$$t_s = \frac{\pi}{\xi \omega_n}$$

Despejando $\xi \omega_n$ de (Ecuación 9-3):

Ecuación 10-3.

$$\xi \omega_n = \frac{\pi}{t_s} = \frac{\pi}{3600} = 0.0008727$$

La sobre-oscilación del sistema viene definida por:

Ecuación 11-3.

$$Mp = e^{-\frac{\pi}{\tan(\theta)}}$$

El ángulo de apertura de los polos complejos viene representado por θ .

Teniendo la siguiente igualdad:

Ecuación 12-3.

$$\xi = \cos \theta$$

Despejando θ de (Ecuación 11-3):

Ecuación 13-3.

$$\theta = \tan^{-1}\left(-\frac{\pi}{\ln(Mp)}\right) = \tan^{-1}\left(-\frac{\pi}{\ln(0.02)}\right) = 38.76^\circ$$

Se calcula el coeficiente de amortiguación (Ecuación 12-3), obteniendo:

Ecuación 14-3.

$$\xi = \cos 38.76^\circ = 0.77977$$

Despejando de (Ecuación 10-3) la frecuencia natural no amortiguada ω_n :

Ecuación 15-3.

$$\omega_n = \frac{0.0008727}{\xi} = \frac{0.0008727}{0.77977} = 0.0011192$$

Finalmente, los polos del sistema (Ecuación 8-3) son:

Ecuación 16-3.

$$p_{1,2} = -0.0008727 \pm j0.0007007$$

Para el cálculo del controlador ha sido utilizado el método de asignación de polos. El polinomio característico $P(s)$ del sistema de control en análisis viene determinado por:

Ecuación 17-3.

$$P(s) = s^2 + \frac{1}{\tau}(1 + k_p k)s + \frac{k_p k}{\tau_i \tau} = 0.$$

Se puede relacionar el polinomio característico general de un sistema de segundo orden (Ecuación 7-3) con el polinomio característico del sistema en análisis (Ecuación 17-3). Al resolver el sistema de ecuaciones que se forma se ha obtenido los valores de ganancias del controlador PI.

Ecuación 18-3.

$$k_p = \frac{2\xi\omega n\tau - 1}{k} = 1.417$$

Ecuación 19-3.

$$\tau_i = \frac{2\xi\omega n\tau - 1}{\omega n^2 \tau} = 580.8881$$

Así el controlador PI calculado queda expresado como:

Ecuación 20-3.

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

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

En el Gráfico 14-3 se muestra el comportamiento del controlador PI, considerando la aplicación de dicho controlador al modelo de sistema obtenido con el método analítico (sistema con retardo) y el modelo propuesto (sistema sin retardo). Inicialmente, se observa que la sobre-oscilación de la respuesta del sistema con retardo rebasa el valor de consigna en un 4.3% al cabo de una hora (3600 s), mientras que la sobre-elongación del sistema sin retardo rebasa el valor de consigna en solo 3.0% en el mismo tiempo.

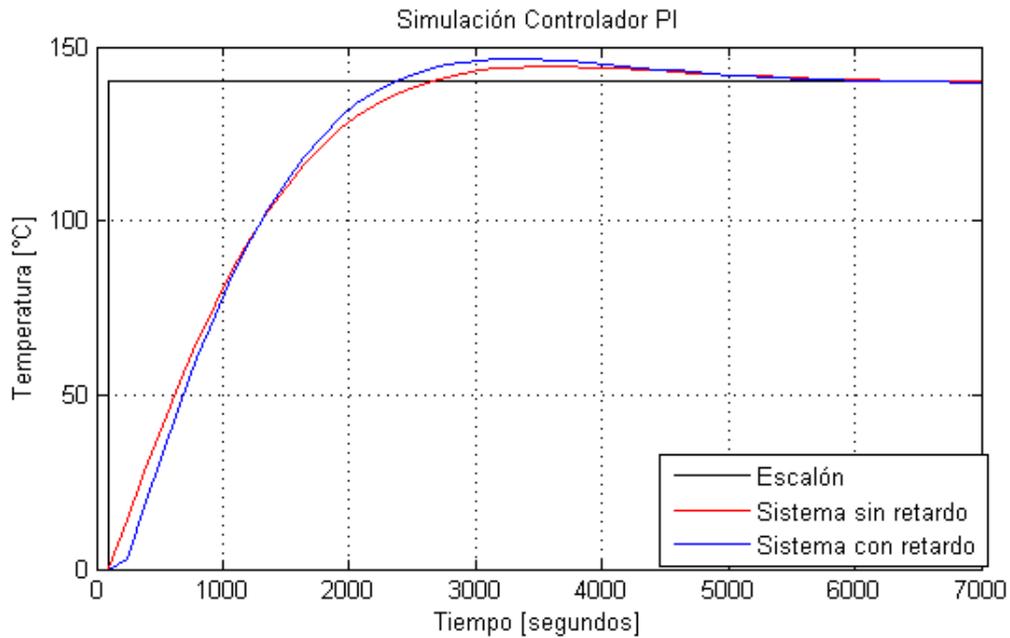


Gráfico 14-3: Controlador PI aplicado al sistema si retardo vs sistema con retardo.

Realizado por: CORTÉS, José, 2017.

Es evidente que la respuesta del sistema sin retardo es la más óptima, sin embargo, para el resto de este trabajo es importante considerar la respuesta del sistema con retardo ya que es el modelo que más se aproxima al comportamiento real de la planta. De hecho, a simple vista se observa que la temperatura alcanza el valor de consigna (dentro de los límites de ± 3 °C propuestos para este trabajo) a los 4540 s (aproximadamente 1h 15') y se mantiene así por el resto del análisis.

El error de posición del sistema se calcula mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 21-3.

$$e_p = \frac{1}{1 + k1}$$

donde:

Ecuación 22-3.

$$k1 = \lim_{s \rightarrow 0} G_{LA}(s)$$

$G_{LA}(s)$ es la ganancia en lazo abierto del sistema final en análisis, mostrada a continuación:

Ecuación 23-3.

$$G_{LA}(s) = \frac{(k_p T_i s + k_p)}{T_i s} \frac{k}{\tau s + 1}$$

A continuación, se demuestra la estabilidad del sistema mediante el cálculo del error. Para ello se calcula (Ecuación 22-3) con la función de transferencia (Ecuación 23-3).

Desarrollando lo antes expuesto:

Ecuación 24-3.

$$k1 = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{(k_p T_i s + k_p)}{T_i s} \frac{k}{\tau s + 1} = \frac{0 + k_p}{0} \left(\frac{k}{1} \right) = \infty$$

Con el valor de ganancia $k1$ obtenido, se procede a calcular (Ecuación 21-3) de la siguiente forma:

Ecuación 25-3.

$$e_p = \frac{1}{1 + k1} = \frac{1}{1 + \infty} = 0$$

Como se observa el error del sistema en estado estacionario expresado en (Ecuación 25-3) es cero, debido a que se ha aplicado un control integral al mismo. De esta forma, provisionalmente el objetivo de reducir la variación de temperatura a $\pm 3^\circ\text{C}$ ha sido cumplido en la etapa de diseño y simulación de la planta.

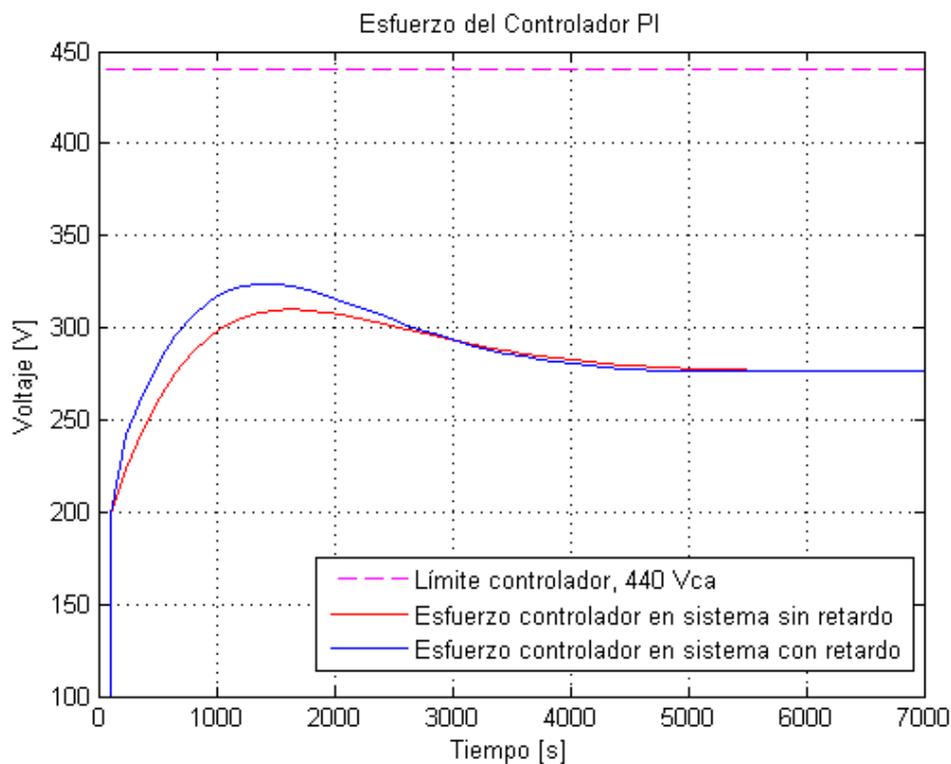


Gráfico 15-3: Esfuerzo del controlador PI, aplicado un Set Point de 140°C .

Realizado por: CORTÉS, José, 2017.

En el Gráfico 15-3 se observa el esfuerzo del controlador PI al aplicarlo en el sistema con un Set Point de 140 °C, temperatura a la que trabaja normalmente en el horno. Tanto en el sistema con retardo (Ecuación 3-3), como sin retardo (Ecuación 5-3) la respuesta del controlador PI no sobrepasa el límite superior del voltaje que se puede aplicar (en este caso 440 Vca).

Esto demuestra que el controlador calculado se puede implementar. En la práctica y para el caso de este análisis, el punto de operación de la temperatura del horno no sobrepasa los 150 °C. Esto se justifica debido a que la temperatura en la que comienza la fundición del polipropileno según las hojas técnicas del proveedor es 170 °C. En otras palabras, si se regulara el horno a la temperatura antes expuesta, la placa plana de polipropileno volvería a un estado líquido.

Por otro lado, se analizó un segundo caso aplicativo, el cual es presentado en el Gráfico 16-3. El valor del Set Point es 250 °C. Como se observa en la figura, en gran parte del sistema se requiere dotar más de 440 Vca, para estabilizarlo en el Set Point propuesto. Por lo tanto, el controlador es imposible implementarlo. De hecho, si este hubiese sido el caso, se debería incrementar la potencia de las resistencias del horno para poder alcanzar dichos valores.

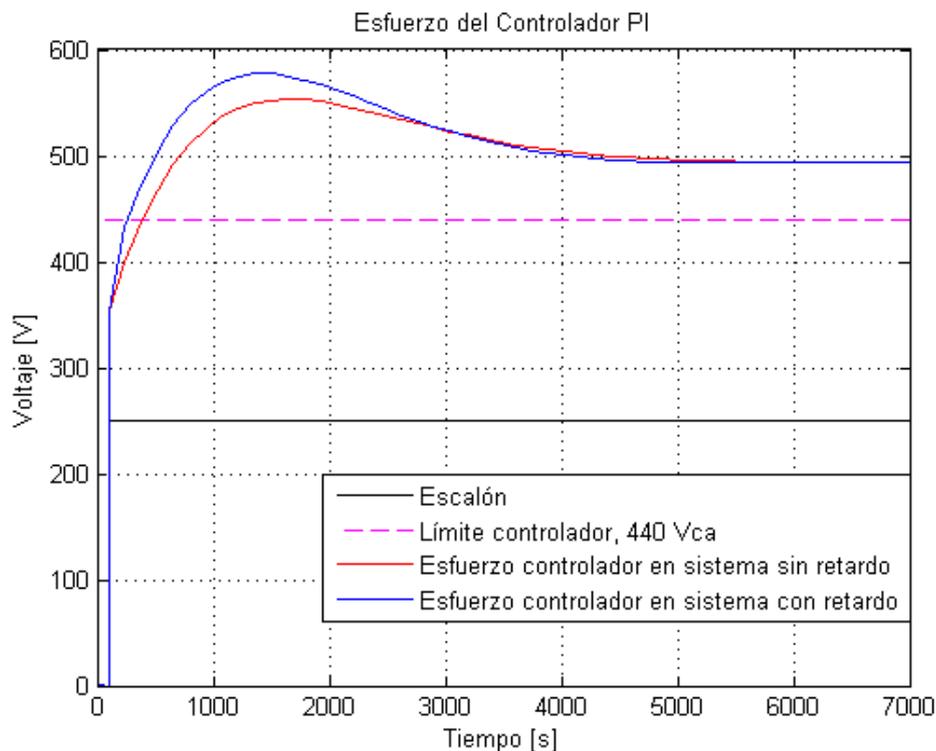


Gráfico 16-3: Esfuerzo Controlador PI, aplicado un Set Point de 250 °C

Realizado por: CORTÉS, José, 2017.

3.2. Implementación del sistema de control

3.2.1. Estructura del sistema de control.

De manera general el sistema de control se estructura como se observa en la Figura 2-3.

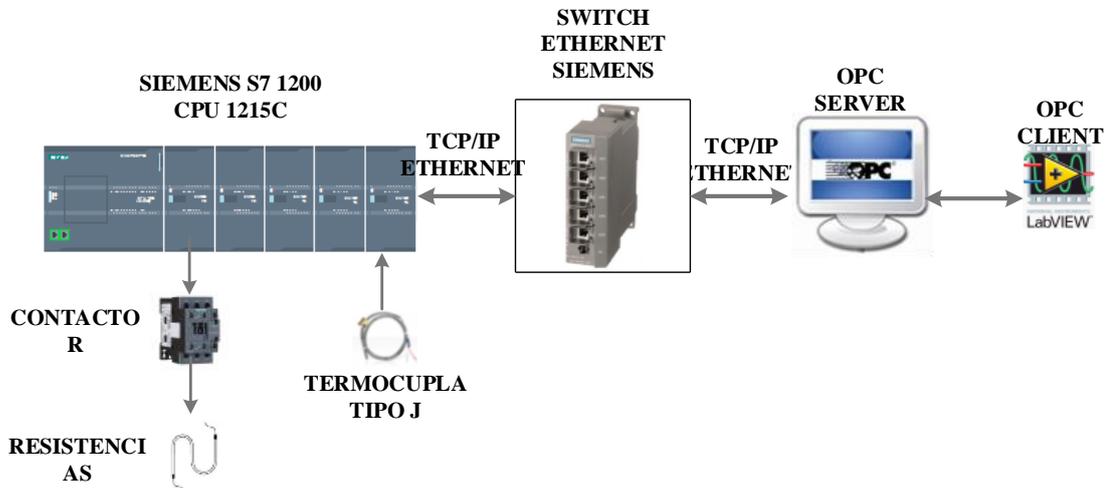


Figura 2-3: Estructura del sistema de control

Realizado por: CORTÉS, José, 2017.

Los componentes principales son:

- PLC SIEMENS S7 1200. – El Controlador Lógico Programable, es en el cual se ejecuta la programación inherente de control de toda la máquina y que en el controlador realiza las funciones de una tarjeta de adquisición de datos.
- Cliente OPC. – El cliente OPC es un Instrumento virtual (VI) de LabVIEW en el cual será programado el controlador.
- OPC Server. – El Servidor OPC permite la comunicación entre el PLC y el cliente OPC. En él se declaran las variables necesarias para la interacción de los dos elementos anteriormente mencionados.
- Actuador y sensor. – El actuador es el conjunto de resistencias tipo S accionadas mediante un contactor; mientras el sensor trata de una termocupla tipo J, que está conectado al módulo de entradas analógicas del PLC.

3.2.2. Programación del controlador.

La ecuación del controlador PI fue definida por (36) en la sección anterior. El controlador PI se implementó en un instrumento virtual programado en LabVIEW. En primera instancia fueron empleadas las herramientas de simulación de sistemas que presenta LabVIEW para implementar el controlador PI. El resultado obtenido de la simulación se muestra en el Gráfico 17-3. La señal de salida del sistema (línea roja) se estabiliza en 140 °C, donde dicho valor es el valor de consigna deseado. De esta forma, en la plataforma de implementación (LabVIEW), pudo ser comprobado que el controlador PI calculado en el diseño funciona correctamente.

Como ha sido indicado en el Gráfico 15-3, de la sección 3.1.4.2, la salida del controlador PI son los valores de voltaje necesario para controlar el sistema planta. De esta manera, el actuador del sistema debe ser capaz de trabajar en función de entregar dichos valores a las resistencias tipo “S”. Una opción de lograr lo mencionado hubiera sido mediante la utilización de variadores de frecuencia, sin embargo, el condicionante en esta alternativa es el costo económico en la adquisición del mismo. Por lo tanto, otra opción es la aplicación de conceptos de electrónica de potencia, y de manera particular fundamentos relacionados a los convertidores AC/AC.

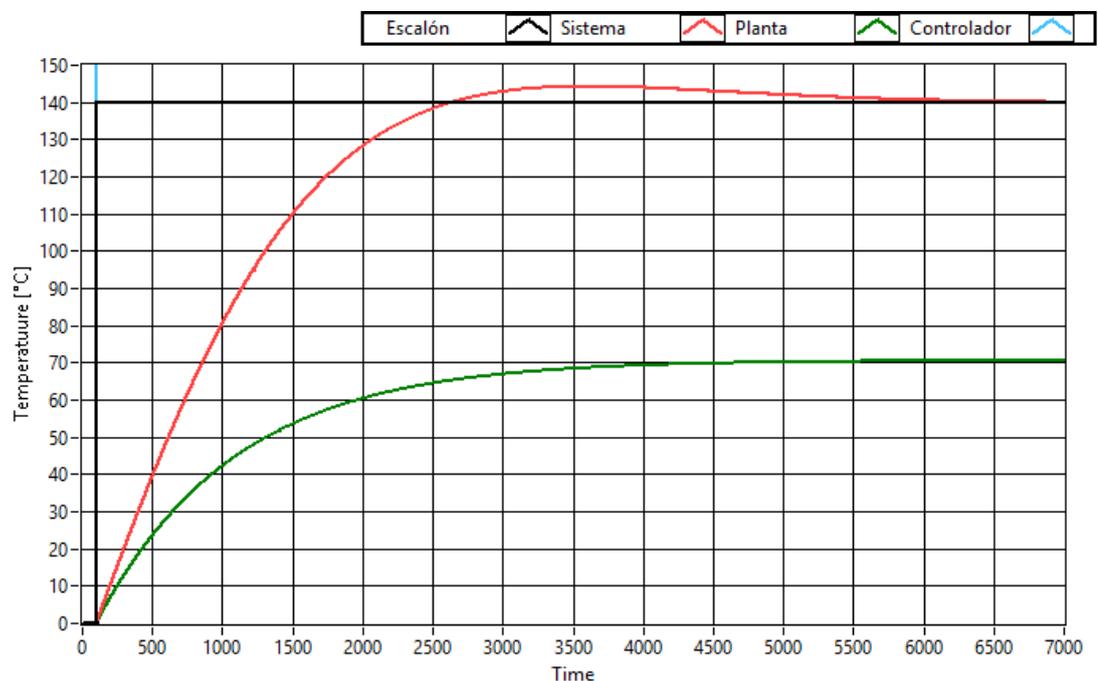


Gráfico 17-3: Simulación del sistema general en LabVIEW.

Realizado por: CORTÉS, José, 2017.

La idea principal ha partido del hecho de utilizar los circuitos de potencia que tiene implementada la máquina, evitando modificarlos de cualquier manera. El más sencillo de implementar en las condiciones de los circuitos de la máquina es el Conversor AC/AC de control por ciclo integral, esto debido a que en él se controlan el número de ciclos que deben pasar para obtener el voltaje deseado. La fórmula para calcular el voltaje entregado por este tipo de conversor AC/AC está dada por:

Ecuación 26-3.

$$V_{Orms}^2 = \frac{Vf^2}{T} N$$

donde:

V_{Orms} = Voltaje rms entregado por el controlador

Vf = Voltaje rms que ingresa al conversor

T = Número de ciclos totales utilizado por el conversor

N = Número de ciclos que el conversor conmuta la salida con la carga

La temperatura promedio en el horno es 130 °C. Sin embargo, un requerimiento de la empresa TUBASEC C.A. es que la temperatura pueda ser regulada también a 110 °C, dependiendo del tipo de placas que se desean producir. La definición de la temperatura a partir de la cual el horno puede trabajar es importante pues a partir de esta se determina el voltaje de respuesta del controlador y por ende el número de ciclos totales necesarios para la implementación del conversor AC/AC.

Al aplicar un escalón de 100 °C en la simulación, se ha obtenido que el voltaje mínimo calculado por el controlador es 140 Vca, es decir que a partir de este valor se debe tener control total de los voltajes que entrega el conversor AC/AC.

En el Gráfico 18-3, se puede observar el algoritmo utilizado para determinar el número de ciclos necesarios para tener un control de voltaje adecuado y que garantice generar voltajes desde 100 Vca. Con dicho algoritmo se ahorró tiempo en el cálculo de número de ciclos de forma manual. Al aplicar el mismo, se determinó que son necesarios 1098 ciclos, o lo que es lo mismo 18.3 segundos. Para la implementación, se redondeó el valor a 18 segundos, es decir 1080 ciclos.

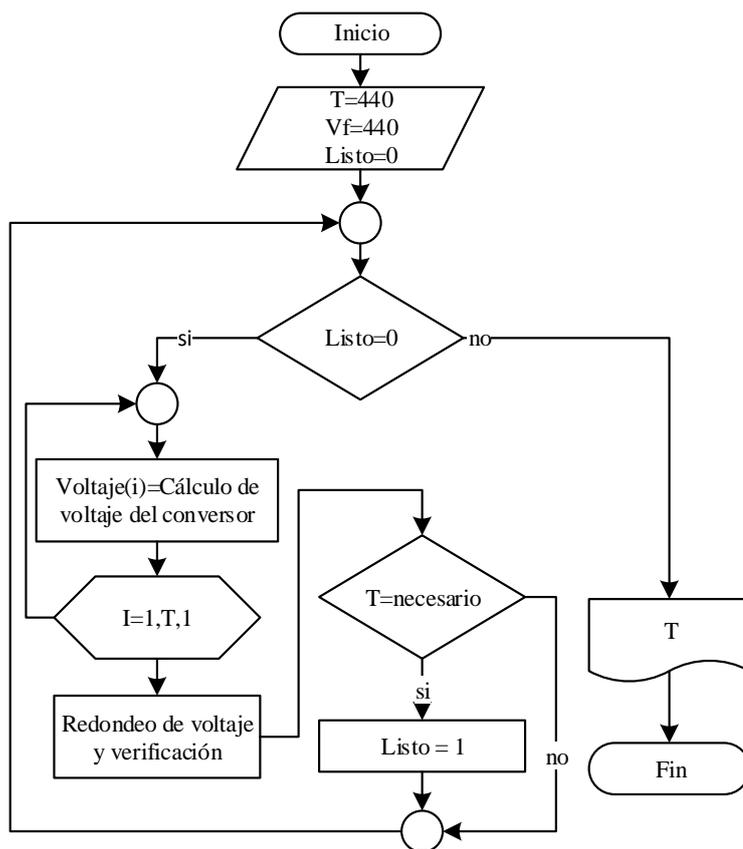


Gráfico 18-3: Algoritmo empleado para determinar el periodo correcto que garantice generar voltajes de salida del controlador desde 100Vca.

Realizado por: CORTÉS, José, 2017.

De (Ecuación 26-3) ha sido despejado N , para obtener el número de ciclos que el conversor debe conmutar la salida con la carga, dado un voltaje Vf como requerimiento del conversor. De esta manera ha sido obtenida la fórmula:

Ecuación 27-3.

$$N = \frac{V_{Orms}^2}{Vf^2} T$$

La fórmula anterior ha sido programada en el instrumento virtual (LabVIEW), en conjunto con el controlador PI. De esta manera, la implementación final del controlador consta de:

- Controlador PI: Donde se calcula el voltaje que se necesita aplicar a las resistencias tipo S.
- Conversor AC/AC por ciclo integral: donde se genera a partir del voltaje calculado en el controlador PI, el voltaje que se aplica finalmente a las resistencias.

En el Gráfico 19-3 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 la termocupla. Los valores de Set Point SP , tiempo total T , Voltaje de entrada V_f , son definidos por el usuario.

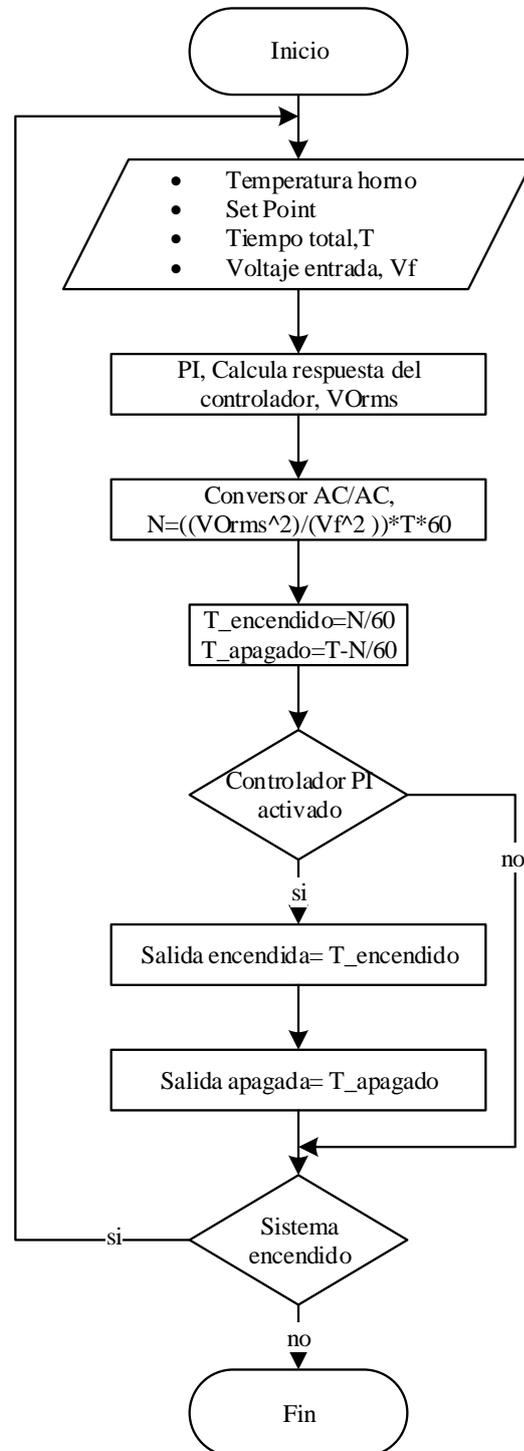


Gráfico 19-3: Diagrama de flujo del controlador PI implementado.

Realizado por: CORTÉS, José, 2017.

El controlador PI calcula el voltaje de respuesta del controlador V_{Orms} . Luego el conversor AC/AC calcula el valor de N , que corresponde al número de ciclos que la salida debe estar encendida. Posterior, se calcula el tiempo de encendido y el tiempo de apagado de la salida. 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”.

En el Gráfico 20-3 se muestra el diagrama de bloques del controlador implementado. Como se mencionó anteriormente, el controlador del sistema se compone del controlador PI que obtiene el valor numérico del voltaje de respuesta del controlador, y del conversor AC/AC que acondiciona la señal de salida del controlador y lo transforma en dicho voltaje.

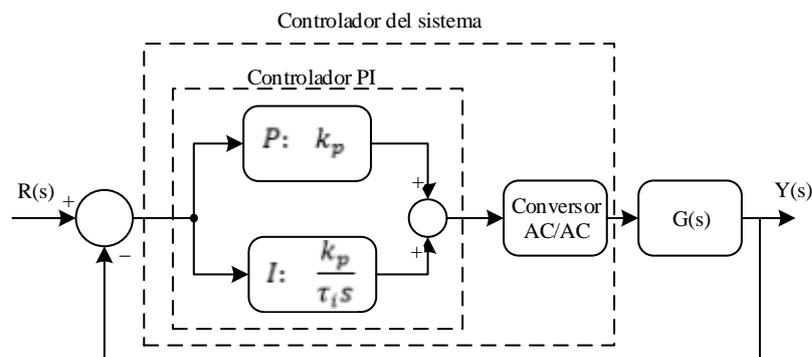


Gráfico 20-3: Diagrama de bloques del controlador de sistema implementado.

Realizado por: CORTÉS, José, 2017.

En la Gráfico 21-3 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 conversor AC/AC por ciclo integral.

El conversor 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 numero ciclos N en tiempo de activación y desactivación de la salida que está conectada al contacto que controla las resistencias tipo “S”.

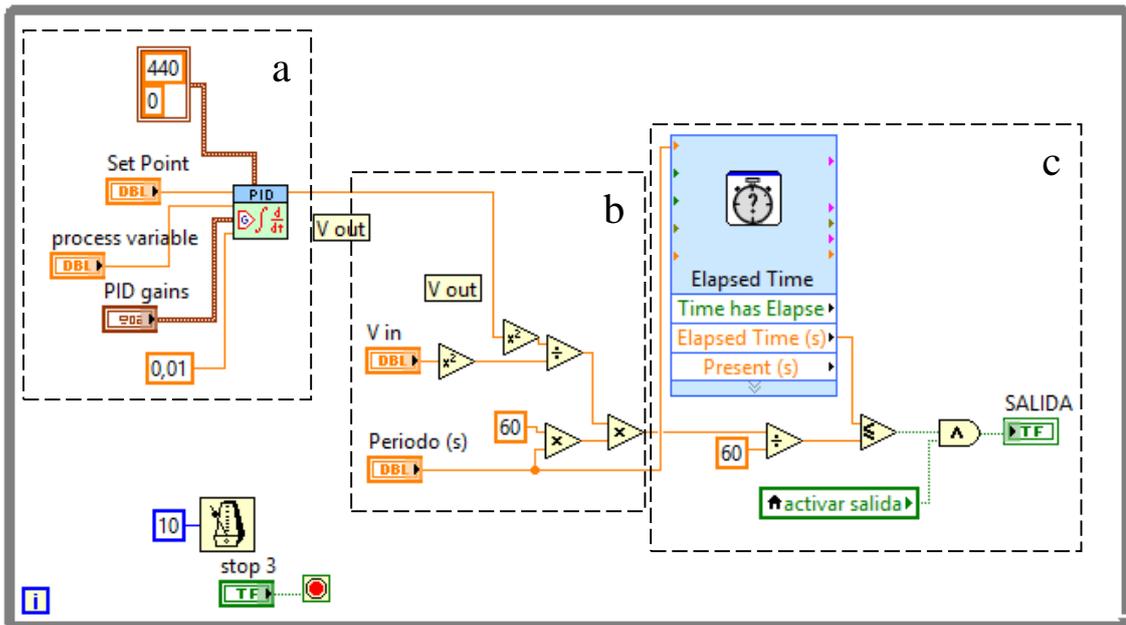


Gráfico 21-3: Implementación del controlador PI calculado, en LabVIEW. a: Recuadro que corresponde a la implementación del controlador PI, b: Recuadro que corresponde al convertor AC/AC, c: Recuadro que corresponde acondicionamiento de salida final de la señal de activación.

Realizado por: CORTÉS, José, 2017.

Es importante mencionar que, de acuerdo al Gráfico 21-3, la variable booleana denominada SALIDA está enlazada a la variable del OPC server que controla la activación del contactor conectado a las resistencias del horno. La variable “Process Variable” en la Gráfico 21-3, ha sido enlazada a la variable del OPC server que conecta a la entrada analógica de lectura de temperatura del horno.

En el Gráfico 22-3 se observa el bloque de programación del PLC que corresponde al horno controlado a través de este análisis. En dicho bloque se ha añadido la entrada de la memoria %M3.3 que corresponde a la variable SALIDA del controlador antes mencionado. Además, ha sido ubicada una variable booleana, memoria %M1.6, mediante la cual se activa o desactiva el actuador del control desde el instrumento virtual programado con el controlador PI.

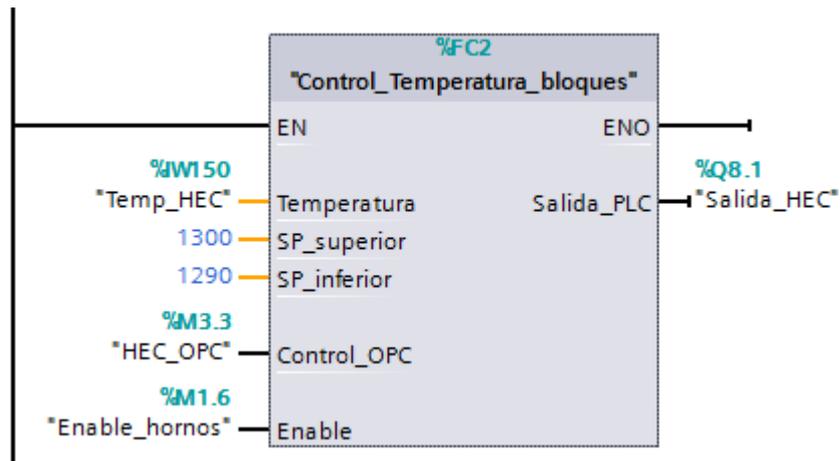


Gráfico 22-3: Bloque de función para el control del Horno.

Realizado por: José Cortés, 2017.

3.2.3. Interacción de los sistemas.

El HMI controla el valor del “Set Point” de cada uno de las zonas de la termoformadora. Este valor es enviado mediante el OPC Server hacia el PLC a través de una red TCP/IP Ethernet, donde el PLC controla la temperatura de trabajo de las zonas mencionadas. Para realizar las pruebas correspondientes, se ha seguido la siguiente secuencia:

- Encender el PLC y el sistema SCADA.
- Configurar el valor del “Set Point” a 0 °C.
- Desactivar la programación del PLC mediante el botón “Enable_hornos”, correspondiente al horno en estudio.
- Ejecutar el VI programado en LabVIEW correspondiente al controlador PI.
- Esperar el tiempo de estabilización considerado para el horno y aplicar los demás instructivos de trabajo de la máquina.

De esta forma, se ha incluido la acción del controlador programado sin afectar el control de temperatura de la extrusora ni de los labios laminadores de la máquina en general.

CAPITULO 4

4. RESULTADOS

4.1. Resultados de la implementación.

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 el

Gráfico 1-4, 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 figura. De la misma forma ha sido evidenciado que el controlador PI ha regulado de mejor forma el control de temperatura (línea roja).

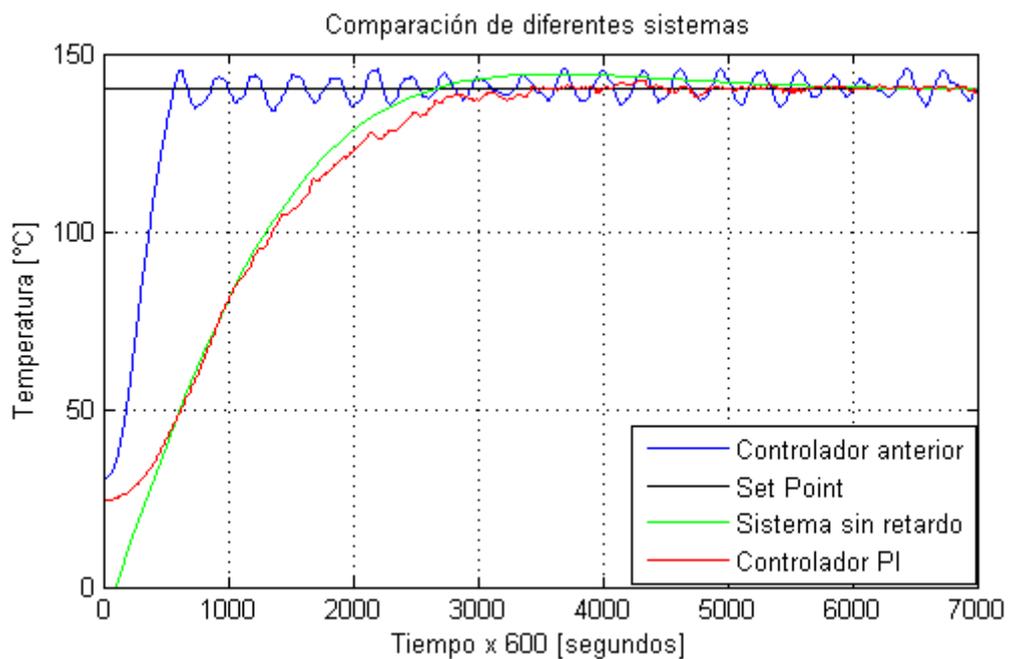


Gráfico 1-4: Comparación de sistemas: Simulación, sistema de control anterior, Sistema de control PI.

Realizado por: CORTÉS, José, 2017.

En el Gráfico 2-4a se observa los valores de temperatura del horno de entrada de la primera semana de trabajo del mes de marzo año 2015. El sistema empleaba un sistema de control por histéresis modificado. Es evidente que la temperatura varía a lo largo del tiempo, llegando algunas ocasiones a ser mayor a 5 °C.

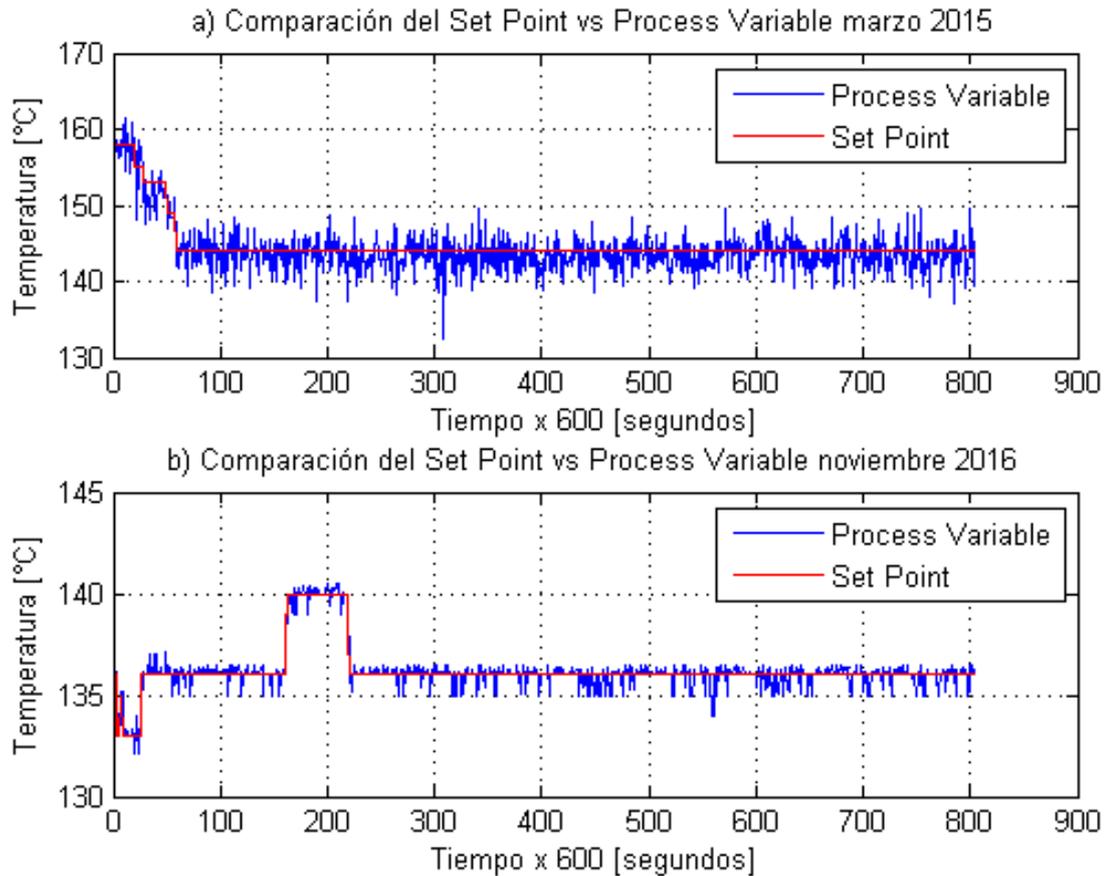


Gráfico 2-4: Temperatura de trabajo del horno de entrada. a: Comparación del Set Point vs Process Variable con el sistema de control anterior en marzo del 2015, b: Comparación del Set Point vs Process Variable con el sistema de control Proporcional Integral en marzo del 2015.

Realizado por: CORTÉS, José, 2017.

La primera intervención en producción del controlador PI en el sistema ha sido realizado cuando la planta estaba ya arrancada, es decir cuando los hornos de la máquina estaban encendidos y con lámina plana de polipropileno en el horno. En la Gráfico 2-4b se observa la respuesta del sistema controlado mediante el controlador PI implementado, la segunda semana del mes de noviembre del 2016. Es importante observar que ha existido una mejoría significativa en el control de temperatura, respecto a los observados en la Gráfico 2-4a.

La diferencia neta del “Set Point” respecto el “Process Variable” se observa en el Gráfico 3-4. Tanto en el literal a) como b) se ubicó en rojo los límites de variación de temperatura buscados. En el primer caso mucha de las veces ha sobrepasado dicho umbral, mientras en el segundo caso,

el cual corresponde a la diferencia una vez aplicado el controlador PI, no ha sobrepasado en ningún instante dicho umbral.

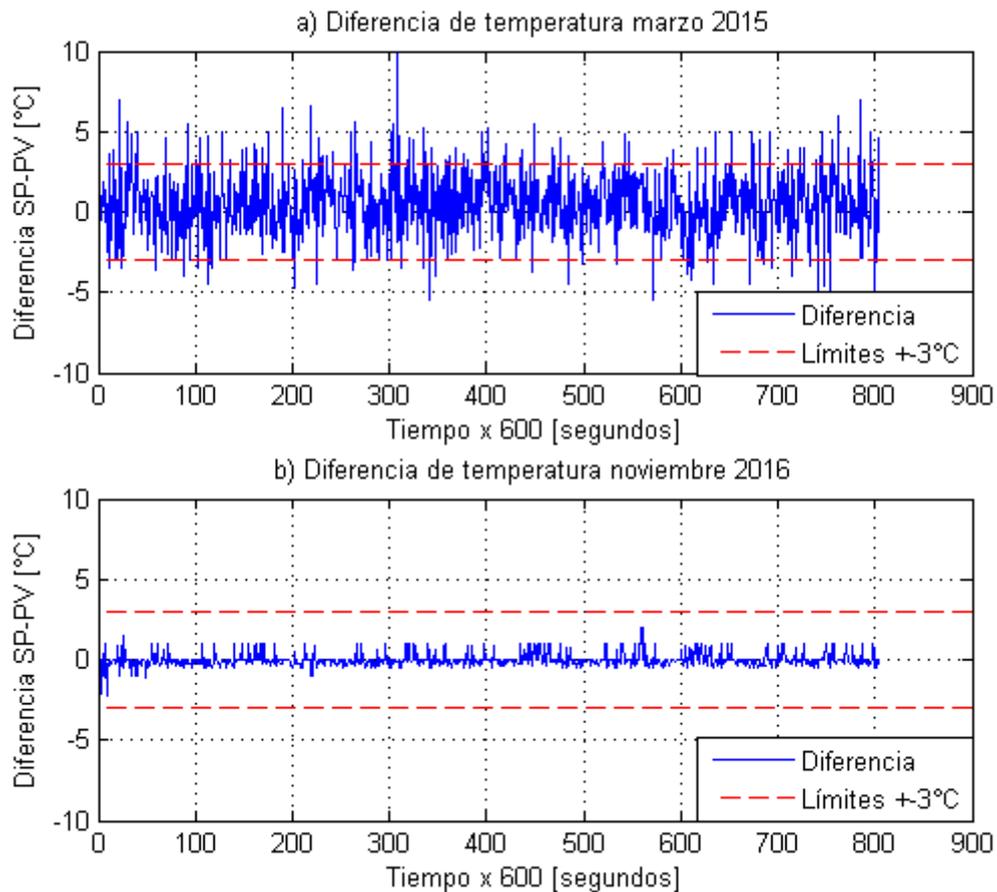


Gráfico 3-4: Diferencia de temperatura entre el Set Point – Process Variable, a: Diferencia de temperatura correspondiente al mes de marzo del 2015, b: Diferencia de temperatura correspondiente al mes de noviembre del 2016.

Realizado por: CORTÉS, José, 2017.

4.2. Docimasia de la Hipótesis

Con los datos expuestos anteriormente hubiera sido suficiente para demostrar la mejoría del sistema planta gracias a la intervención del sistema de control PI. Sin embargo, se ha realizado un análisis estadístico de los escenarios expuestos. La diferencia entre el “Set Point” y el “Process Variable” del sistema de control anterior, cuyo control se realiza por histéresis modificada, ha sido denominada “caso 1”. La diferencia entre el “Set Point” y el “Process Variable” del sistema de control implementado, cuyo control utiliza un controlador PI, ha sido denominado “caso 2”.

Al analizar la Tabla 1-4 ha sido notoria la mejora significativa de los datos en el sistema con controlador PI respecto al sistema de control anterior. La media de los datos después de la

aplicación del controlador PI ha sido reducida. De igual manera la desviación estándar ha sido reducida. Se concluye que un 78.10% de los datos del caso 2 son normales respecto a la media; en el sistema del caso 1 un 71.14 % son normales respecto a su media. Al comparar los datos del caso 1 respecto a la desviación estándar del caso 2, se observa que sólo un 17.79 % de los datos son normales, con ello se observa la mejoría del sistema de control aplicando el controlador PI.

Tabla 1-4: Análisis estadísticos de las muestras

Parámetro	Caso 1	Caso 2
Número de datos, n	804	804
Mínimo, min	-5.5	-2.2
Máximo, max	11.4	2
Sumatoria, $\sum x_i$	387.2	1.2
Media, x_m	0.4816	0.0015
Varianza, σ^2	4.7343	0.1804
Desviación estándar, σ	2.1758	0.4248
Desviación típica, s_x	0.0767	0.0149

Realizado por: CORTÉS, José, 2017.

Calculando los intervalos de confianza (40) en (41) para el caso 1 y (42) para el caso 2, con un nivel de confiabilidad del 95%:

$$\alpha = 0.05 \quad (38)$$

$$t_{\infty,0.025} = 1.96 \quad (39)$$

$$(x_m - t_{\infty,0.025} * s_x < \mu < x_m + t_{\infty,0.025} * s_x) \quad (40)$$

$$(0.3312 < \mu < 0.6320) \quad (41)$$

$$(-0.0279 < \mu < 0.0309) \quad (42)$$

Realizando un análisis de los resultados obtenidos, se observa que el 0% de las muestras del caso 1 se encuentran en el intervalo de confianza, mientras que un 44.4% de las muestras del caso 2 se encuentran en su respectivo intervalo de confianza.

Como una herramienta adicional a las ya utilizadas anteriormente, se realizó la prueba T de Student para muestras relacionadas, Tabla 2-4, para la comprobación de la hipótesis planteada

inicialmente. Para ello ha sido planteada la hipótesis nula **H0**, y la hipótesis alterna **H1**, a continuación, mencionadas:

- **H0:** No se reduce la variación de temperatura a ± 3 °C respecto a la temperatura de consigna, después de implementar un sistema de control de temperatura en el horno de termoformado.
- **H1:** Se reduce la variación de temperatura a ± 3 °C respecto a la temperatura de consigna, después de implementar un sistema de control de temperatura en el horno de termoformado.

Tabla 2-4: Prueba T de Student.

<i>Parámetros</i>	<i>Caso 1</i>	<i>Caso 2</i>
Media	0,48159204	0,00149254
Varianza	4,734255993	0,18043986
Observaciones	804	804
Coefficiente de correlación de Pearson	0,231611899	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	803	
Estadístico t	6,426915736	
P(T<=t) una cola	1,11555E-10	
Valor crítico de t (una cola)	1,646753427	
P(T<=t) dos colas	2,23111E-10	
Valor crítico de t (dos colas)	1,962922627	

Realizado por: CORTÉS, José, 2017.

El valor de significancia bilateral (P(T<=t) dos colas) de la prueba T de Student da como resultado $2,23111 \times 10^{-10} \cong 0$, con lo cual ha sido rechazada la hipótesis nula. Por lo tanto, fue aceptada la hipótesis alterna. De esta forma ha sido demostrado que el sistema reduce la variación de temperatura a ± 3 °C respecto a la temperatura de consigna luego de aplicar el controlador PI al sistema.

A la par de la verificación del control de temperatura, también se ha realizado la verificación dimensional de las láminas P7. En el Gráfico 4-4 se observa el comportamiento medio del ancho de las placas P7 de 5 ondas, producidas en el mes de marzo del 2015, considerando que el valor nominal de esta dimensión es 920 mm .

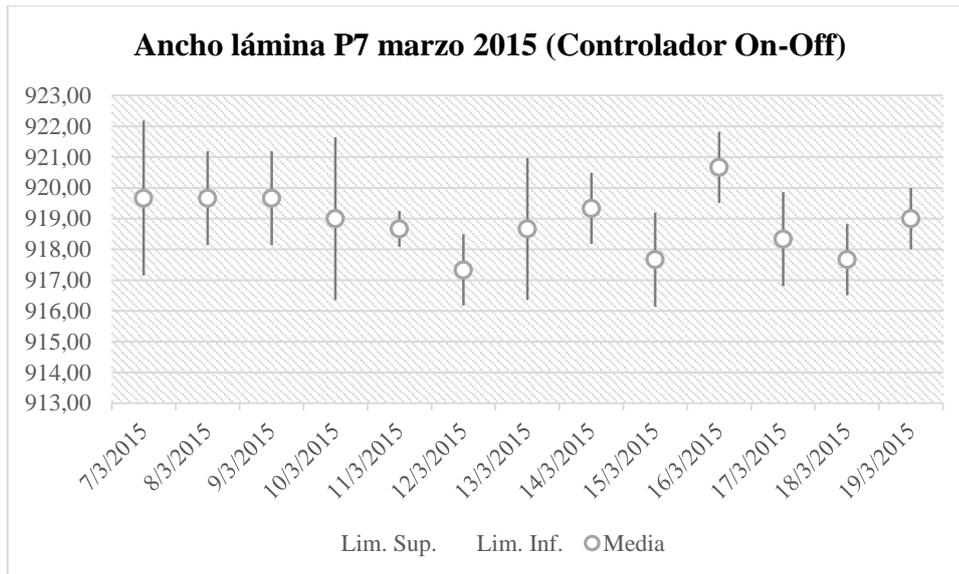


Gráfico 4-4: Comportamiento dimensional de las placas P7 producidas en el mes de marzo del 2015, antes de aplicar el controlador PI.

Fuente: Laboratorio TechoLuz

Realizado por: CORTÉS, José, 2017.

En el Gráfico 5-44 se observa el comportamiento medio del ancho de las placas P7 de 5 ondas, producidas en el mes de noviembre del 2016. Es importante mencionar que se tomó en cuenta únicamente los días de producción de láminas de 5 ondas, pues mencionadas láminas representan el 65% del total de número de placas producidas y el 61% en kg de materia prima producidas.

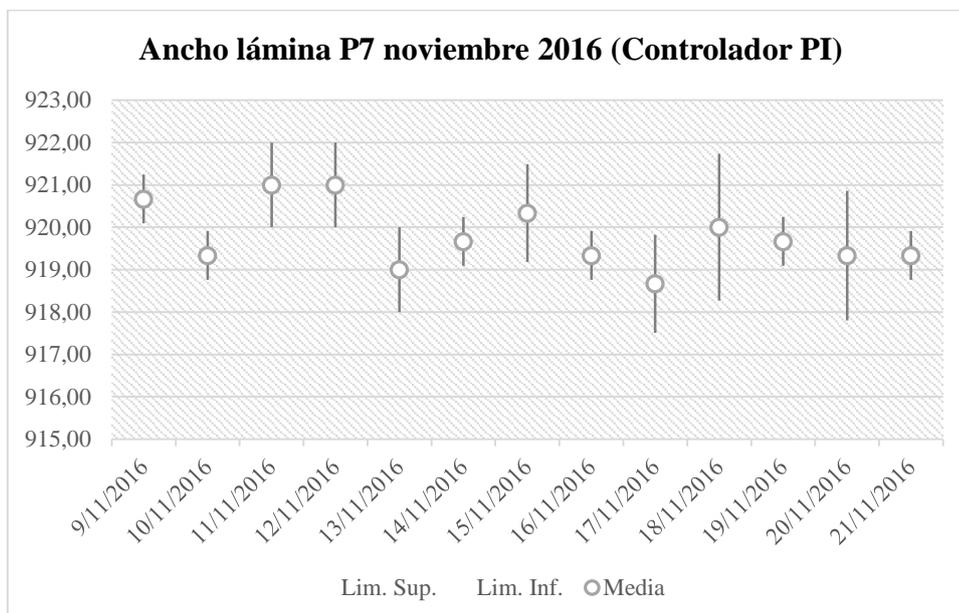


Gráfico 5-4: Comportamiento dimensional de las placas P7 producidas en el mes de noviembre del 2016, después de aplicar el controlador PI.

Fuente: Laboratorio TechoLuz

Realizado por: CORTÉS, José, 2017.

Los Gráfico 4-4 y Gráfico 5-4 representan la media de las muestras , con la desviación estándar de cada conjuntos de datos. Se tiene un grupo de datos por cada día de producción. Las mediciones fueron obtenidas utilizando instrumentos de medida calibrados por el laboratorio de la empresa. Los valores procesados en las figuras respectivas fueron obtenidos por el Laboratorio de TechoLuz, quien se encarga de llevar el control de calidad de las láminas plásticas. En general, de acuerdo al instructivo de Laboratorio de Techo Luz, se toman tres muestras diarias de los datos dimensionales en los diferentes ámbitos involucrados.

Realizando un análisis rápido se observó una mejoría en el ancho de la placa, pues las medidas del producto luego de aplicar el controlador PI son más estables respecto a las placas producidas con el sistema de control anterior. Esto se verifica al comparar el Gráfico 4-4 con el Gráfico 5-4. En la última figura, se observa que se tiene una menor variación de la desviación estándar respecto a la media. Sólo una muestra de los días procesados presenta un nivel de variación de la desviación estándar significativa en noviembre del 2016 y corresponde a menos de 2 mm. Por otro lado, en el mes de marzo del 2015 fueron tres días donde las variaciones de la desviación estándar son significativas y corresponden a más de 2 mm, acercándose a 3.

El error en estado estacionario en el controlador implementado no fue cero como se esperaba. Esto se produjo debido a que para la implementación del mismo se usó el concepto de convertor 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. Además, no se tiene una lectura del voltaje de entrada para de esta forma corregir el cálculo de número de ciclos necesarios para la generación de la señal de control final.

El voltaje de entrada del convertor es variable, depende del voltaje que entregue la red eléctrica. 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, pero la implementación del mismo supone un costo significativo que no justifica su inversión cuando con el sistema implementado se ha obtenido los resultados requeridos.

4.3. Conclusiones.

- Mediante técnicas gráficas de identificación de sistemas se obtuvo la función de transferencia de la planta, la misma que es de primer orden y presenta un tiempo de retardo del sistema

como era de esperarse luego de haber realizar el estudio del arte en las plantas de máquinas termoformadoras.

- El retardo del sistema no fue significativo para la planta en análisis, pues representó el 2.75 % del tiempo de estado transitorio en el peor de los casos (110 segundos) de los métodos de identificación de sistemas utilizados. Debido a este hecho se pudo despreciar dicho retardo de tiempo y anularlo de la función de transferencia el momento que se procedió al cálculo del controlador respectivo del sistema.
- Un controlador tipo Proporcional Integral (PI) es suficiente para controlar el sistema en los requerimientos planteados de funcionamiento del horno. La acción integrativa del controlador en la simulación eliminó el error en estado estacionario, con lo que se cumplió el objetivo de reducir la variación de temperatura a ± 3 °C. Al aplicar el controlador calculado a la planta con el retardo del sistema, cumple de igual forma con el objetivo planteado, la única variación es que presenta un overshoot más alto que el planteado inicialmente.
- El controlador calculado para el sistema fue implementado mediante la utilización de un Instrumento Virtual. Con ello no se alteró ninguna instalación eléctrica del sistema. De igual manera se utilizó el concepto de convertor AC-AC para aplicar la señal calculada por el controlador a la planta. De esta forma se garantizó que el contactor que controla el encendido de las resistencias no se deteriore de manera rápida al no conmutar el mismo en tiempos demasiados cortos.
- El error en estado estacionario en el controlador implementado no fue cero como se esperaba. Esto se debe a que en la implementación se utilizó el concepto de convertor AC-AC por ciclo integral para generar la señal de control final. Si la señal de control hubiera sido continua, y no en ciclos, el resultado sería similar al obtenido en la simulación del sistema. Sin embargo este resultado no afecta que se cumpla con el objetivo de reducir la variación de temperatura a ± 3 °C como se demostró en el análisis de resultados.
- La reducción de la variación de temperatura final que se obtuvo del sistema fue de ± 2 °C. Además, se comprobó que un control más estable de la temperatura en el horno de entrada de

la máquina termoformadora ayuda a mantener una estabilidad dimensional en el producto final.

4.4. Trabajos futuros.

La implementación del controlador calculado ha utilizado el concepto de convertor AC-AC por ciclo integral, sin embargo, como se analizó en los resultados no se pudo obtener un error de estado estacionario igual a cero. El emplear un variador de frecuencia que se puede adquirir en el mercado supondría un costo importante si se lo quiere implementar en algún horno similar, más aún si son un grupo de hornos que se controlan de manera individual. Sería importante trabajar en el diseño de un convertor AC-AC para cargas resistivas a medida; de esta forma se reducirían los costos el momento de la implementación final.

La importancia del diseño del convertor propuesto radica también en la eliminación del contactor empleado para la activación de las resistencias, mismo que tiene una estimación de vida útil de 18 meses, debido a la alta cantidad de conmutaciones. Después de transcurrir el tiempo mencionado hay una posibilidad muy alta que el contactor se averíe y que sea necesario reemplazarlo, lo que implica un aumento en el costo de mantenimiento de la máquina.

Por otro lado, sería importante el estudio de más hornos del tipo analizado en el presente trabajo. Con el estudio mencionado se tendría una idea más consolidada de la función de transferencia respectiva, y si fuese el caso se podría diseñar un controlador que se pueda poner en marcha de forma inmediata en cualquier horno de este tipo. Los estudios deben incluir la factibilidad de la creación del controlador a medida en los diferentes ámbitos, tecnológicos y económicos.

BIBLIOGRAFÍA

ALFARO, V. (2001). Identificación de procesos sobreamortiguados utilizando técnicas de lazo abierto. Ingeniería N° 11, pp. 11-25.
[Recuperado el 6 de Mayo de 2016]
http://eie.ucr.ac.cr/uploads/file/documentos/pub_inv/articulos/valfaro01A.pdf

ARÁNTGUEI, J. (2010-2011). Control de Procesos. Lleida, Cataluña: Universidad de Lleida. pp. 75-80.

ASOCIACIÓN DE ACADEMIAS DE LA LENGUA ESPAÑOLA. (2017).
[Recuperado del Diccionario de la lengua española el 24 de Marzo de 2017]
<http://dle.rae.es/?id=ZQ9rRqa>

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. pp. 13-23.

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, p. 4.

BURBANO, J. (2013). Automatización y puesta en marcha de máquina inyectora Reed 100 en Plásticos Ecuatorianos S.A. Tesis de Ingeniería no publicada, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador, pp. 83-86.

CARVAJAL, A., & PAREDES, D. (2013). Automatización del sistema de termoformado de láminas de poliestireno para la empresa Latermec Cia. Ltda. Tesis de Ingeniería no publicada, Escuela Politécnica Nacional, Ecuador, pp. 53.

CHIA-WEI, L., & YEW-KHOY, C. (Mayo de 2011). A study on an optimal approach temperature control strategy of condensing water temperature for energy saving. *International Journal of Refrigeration*, N° 34, pp. 816–823.

DUA, C., CHENB, S., & LIANGA, X. (2011). Application of Fuzzy Theory in Temperature Control System of Thermoforming Machine. *Procedia Engineering* 15, pp. 639-643.

ECUADOR. ASOCIACIÓN ECUATORIANA DE PLÁSTICOS. (ASEPLAS). (2015). Estadísticas. *Revista Integra*, Edición 42, p. 33.

ECUADOR. INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACION (INEN). (2010). Norma 2542. Tolerancia en dimensiones. Láminas plásticas. Requisitos, Quito - Ecuador. p. 3.

ECUADOR. SECRETARÍA NACIONAL DE PLANIFICACIÓN Y DESARROLLO (SENPLADES). (2013). Plan Nacional de Desarrollo / Plan Nacional para el Buen Vivir 2013-2017. Quito, Ecuador: Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo. pp. 301-302.

www.buenvivir.gob.ec

HERNÁNDEZ GAVIÑO, R. (2010). Introducción a los sistemas de control: Conceptos, aplicaciones y simulación con MATLAB. México: PEARSON EDUCACIÓN. pp. 2-366.

JIANG, W., & JIANG, X. (2012). Design of an Intelligent Temperature Control System Based on the Fuzzy Self-tuning PID. *Procedia Engineering* 43, pp. 307-311.

JUN, L., XIAN-LIN, M., & WEN-LONG, S. (2014). Intelligent Temperature Control System Design Based on Single-Chip Microcomputer. *Journal of Harbin Institute of Technology*, N° 21, pp. 91-95.
<https://wenku.baidu.com/view/1995e88c7c1cfad6195fa7f2.html>

KOZÁK, S. (2014). State-of-the-art in control engineering. *Journal of Electrical Systems and Information Technology* 1, N° 1, pp. 1-9.

Lab-Volt Ltda. (2005). Control de proceso de temperatura (Primera ed.). Quebec, Canadá: Lab-Volt. pp. 2-5.

LJUNG, L. (2017). System Identification Toolbox™ User's Guide. Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc.
https://www.mathworks.com/help/pdf_doc/ident/ident.pdf

LÓPEZ GUILLÉN, M. E. (2016). Identificación de Sistemas. Aplicación al modelado de un motor de continua. Alcalá: Universidad de Alcalá. pp. 4-6.
<http://www.depeca.uah.es/depeca/repositorio/assignaturas/32328/Tema6.pdf>

MARTÍNEZ, L., & MOYA, F. (2015). Diseño y construcción de una máquina termoformadora de plástico con control automático para la empresa Miviltech Soluciones Industriales

S.A. Tesis de Ingeniería no publicada, Universidad de las Fuerzas Armadas, Ecuador, pp. 138-140.

MAZZONE, V. (2016). Controladores PID. Universidad Nacional de Quilmes, pp. 1-10.

Obtenido de Universidad Nacional de Quilmes

<http://iaci.unq.edu.ar/caut1>.

PÉREZ, V., & CHAVARRO, B. (2012). Diseño y construcción de una máquina de termoformado.

Tesis de Ingeniería no publicada, Universidad Estatal de Milagro, Ecuador, pp. 88-89.

PLASTICS EUROPE. (2015). Since 2006 recycling and energy recovery have increased. *Plastics – the Facts 2015*, p. 18.

[Recuperado el 12 de abril de 2016]

www.plasticseurope.org

SHI, D., GAO, G., GAO, Z., & XIAO, P. (2012). Application of Expert Fuzzy PID Method for Temperature Control of Heating Furnace. *Procedia Engineering* 29, pp. 257-261.

SIVAKUMAR, P., PRABHAKARAN, D., & KANNADASAN, T. (2013). Comparative analysis of advanced controllers. *American Journal of Engineering Research*, II (1), pp. 1-6.

TURHAN, C., SIMANI, S., ZAJIC, I., & GOKCEN AKKURT, G. (2017). Performance Analysis of Data-Driven and Model-Based Control Strategies Applied to a Thermal Unit Model. *Energies*, pp. 1-20. doi:10.3390/en10010067

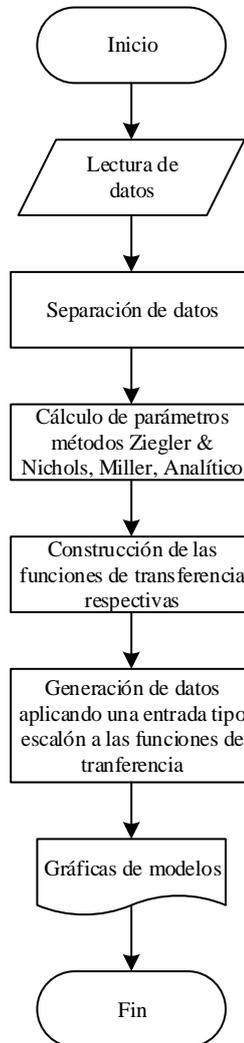
WANG, S. (2012). Resistance Furnace Temperature System on Fuzzy PID Controller. *Journal of Information & Computational Science*, N° 9, pp. 2627-2634.

ZHEN, L., JILI, Z., YONGPAN, C., TIANYI, Z., & HUI, L. (2010). Fuzzy control model and simulation of supply air system in a test rig of low-temperature hot-water radiator system. *Energy and Buildings*, pp. 386-392.

ANEXOS

ANEXO A

Diagrama de flujo del algoritmo utilizado para la identificación del sistema aplicando métodos gráficos de identificación



ANEXO B

Código MATLAB de la identificación del sistema aplicando métodos gráficos de identificación.

```
clc;
clear all;
close all
%% Lectura de datos
A=load('datos.txt');
t=A(:,1);      % tiempo
V=A(:,2);      % voltaje
T=A(:,3);      % temperatura
s=A(:,4);      % escalón
VA=V.*s;
v=440;
pin=A(1,3);
longi=length(A);

%% Método de Ziegler & Nichols
k1=222/(v-0);      %Cálculo ganancia
th1=110;           %Retardo del sistema
tao1=1100-th1;     %Cálculo constante de tiempo tao
gp1=tf([k1],[tao1 1],'inputDelay',th1); %Generación de la función de transferencia
[y1,t1]=step(gp1,10000); %Obtención de datos aplicando función escalón

%% Método de Miller
k2=222/(v-0);      %Cálculo ganancia
th2=110;           %Retardo del sistema
p63=find(T>=222*0.6321+pin,1); %Busca valor del 63.21%
tao2=t(p63)-th2;   %Cálculo constante de tiempo tao
gp2=tf([k2],[tao2 1],'inputDelay',th2); %Generación de la función de transferencia
[y2,t2]=step(gp2,10000); %Obtención de datos aplicando función escalón

%% Método Analítico
k3=(222)/(v-0);
p28=find(T>=222*0.284+pin,1); %Busca valor del 28.4%
%declara sistema simbólico
syms th3 tao3
r=solve(th3+tao3==t(p63),th3+tao3/3==t(p28)); %Resuelve el sistema planteado para el método
th3=eval(r.th3); %Cálculo Retardo del Sistema
tao3=eval(r.tao3); %Cálculo constante de tiempo tao
gp3=tf([k3],[tao3 1],'inputDelay',th3); %Generación de la función de transferencia
[y3,t3]=step(gp3,10000); %Obtención de datos aplicando función escalón

%% Método analítico sin retardo
gp4=tf([k3],[tao3 1]); %Generación de la función de transferencia
[y4,t4]=step(gp4,10000); %Obtención de datos aplicando función escalón

%% Función obtenida por IDENT
k_i=0.506;
th_i=30;
tao_i=938.8;
gpi=tf([k_i],[tao_i 1],'inputDelay',th_i); %Generación de la función de transferencia
[yi,ti]=step(gpi,10000); %Obtención de datos aplicando función escalón

%% gráficas
%% Gráfica de las respuestas Ziegler & Nichols, Miller, Analítico
figure(1)
subplot(2,2,1)
```

```

grid on
hold on
plot(t,T,'r')
legend('Process')
title('Respuesta al escalón de 440 V aplicado')
xlabel('Time [s]')
ylabel('Temperature [°C]')

subplot(2,2,2)
grid on
hold on
plot(t,T,t1,(y1.*440),'r')
legend('Process','Ziegler & Nichols Model')
plot([110 1100],[pin 222],'g--',[0 longi-3000],[222 222],'g--')
title('Modelo de Ziegler & Nichols')
xlabel('Time [s]')
ylabel('Temperature [°C]')

subplot(2,2,3)
grid on
hold on
plot(t,T,t2,(y2.*440),'r')
legend('Process','Miller Model')
plot([110 1100],[pin 222],'g--',[0 longi-3000],[222 222],'g--')
title('Modelo de Miller')
xlabel('Time [s]')
ylabel('Temperature [°C]')

subplot(2,2,4)
grid on
hold on
plot(t,T,t3,(y3.*440),'r')
legend('Process','Analytic Model')
plot([110 1100],[pin 222],'g--',[0 longi-3000],[222 222],'g--')
title('Modelo Analítico')
xlabel('Time [s]')
ylabel('Temperature [°C]')

%% Respuesta método IDENT
figure(2)
grid on
hold on
plot(t,T,ti,*440,'r')
legend('Process','Ident Model')
title('Modelo obtenido mediante IDENT')
xlabel('Time [s]')
ylabel('Temperature [°C]')

%% Comparación distintos modelos
figure(3)
grid on
hold on
plot(t1,(y1.*440),t2,(y2.*440),t3,(y3.*440),ti,yi.*440)
legend('Model Z&N','Miller Model','Analytic Model','Ident Model')
%plot([110 1100],[pin 222],'k--',[0 longi],[222 222],'k--')
title('Comparación de los diferentes modelos')
xlabel('Time [s]')
ylabel('Temperature [°C]')

```

```
%% Comparación modelo Analítico con y sin retardo respecto el proceso real
figure(4)
grid on
hold on
plot(t,T,'k',t4,(y4.*440),'r',t3,(y3.*440),'b--')
legend('Proceso real','Modelo sin retardo','Modelo analítico')
title('Función de tranferencia a utilizar')
xlabel('Time [s]')
ylabel('Temperature [°C]')
```