

CIATEQ, A. C. Centro de Tecnología Avanzada
Dirección de Posgrado



*Homogenización de la dureza en láminas de acrílico
mediante la optimización del proceso de post-curado*

TESIS QUE PRESENTA

Ing. Claudio Arian Moreno Serna
Asesor: Dr. Ernesto Chavero Navarrete

Para obtener el grado de

Maestro en
Manufactura Avanzada

San Luis Potosí, SLP
agosto, 2022

CARTA DE LIBERACIÓN DEL ASESOR



Santiago de Querétaro, Qro.

16 de mayo de 2022

Mtro. Geovany Gonzalez Carlos

Gerente Posgrado CIATEQ

PRESENTE

Por medio de la presente me dirijo a Usted de la manera mas atenta, de que fui asignado como revisor del trabajo de tesis del **Ing. Claudio Arian Moreno Serna**, con el trabajo titulado:

“Homogenización de la dureza en láminas de acrílico mediante la optimización del proceso de post-curado.”

Después de haber leído, corregido e intercambiado información con el estudiante antes mencionado, el trabajo de tesis que me fue entregado y haciendo resaltar que el estudiante realizó todos los cambios que le fueron sugeridos a la tesis, ésta puede ser autorizada para su publicación y que de esta manera pueda iniciar los tramites correspondientes para iniciar con el proceso de titulación.

Sin otro particular por el momento y en espera de que mis sugerencias sean tomadas en cuenta y en beneficio del estudiante y la institución, agradezco la atención que sirva prestar a la presente.

Dr. Ernesto Chavero Navarrete

ASESOR

CARTA DE LIBERACIÓN DEL REVISOR



**GOBIERNO DE
MÉXICO**



CONACYT
Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología



Ciudad, Estado, 18 de Julio del 2022.

Mtro. Geovany González Carlos
Coordinador Académico
CIATEQ, A.C.

Por medio de la presente me dirijo a usted en calidad de Revisor del proyecto terminal del alumno **Claudio Arian Moreno Serna**, cuyo título es:

“Homogenización de la dureza en láminas de acrílico mediante la optimización del proceso de post-curado”

Después de haberlo leído, corregido e intercambiado información con el alumno, y realizado los cambios que le fueron sugeridos, puede ser autorizada su impresión, a fin de que se inicien los trámites correspondientes para su defensa.

Sin otro particular por el momento, y en espera de que mis sugerencias sean tomadas en cuenta en beneficio del estudiante y la Institución, agradezco la atención prestada.

Atentamente,

Firma

M. en C. José Luis Colín Martínez

F31b Revisión: 01-Mar-2021

Av. Manantiales No. 23-A, Parque Industrial Bernardo Quintana, C.P. 76246, El Marqués, Qro. México.
Tel: +52 (442) 196 1500 www.ciateq.mx



AGRADECIMIENTOS

A CIATEQ A.C. Centro de Tecnología Avanzada, en su sede del Estado de San Luis Potosí, y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por las facilidades otorgadas en la realización y conclusión de mis estudios de posgrado.

En especial a mi asesor de tesis, el Dr. Ernesto Chavero Navarrete; gracias por su tiempo, dedicación y apoyo para lograr concluir este proyecto.

Al Ing. Martín Álvarez Giles e Ing. Efraín Benhumea Vargas por el apoyo y las facilidades necesarias en planta para el desarrollo de este trabajo.

* * *

DEDICATORIA

A mi esposa Diana Carolina y a mis hijos Lía Arianna, Marlene y Leonardo.

* * *

RESUMEN

La lámina de acrílico Prepolímero de Métil Metacrilato (PMMA) es un material plástico capaz de soportar largos períodos de tiempo a la intemperie, dicho producto se obtiene por la polimerización catalizada del monómero métil metacrilato. Este proceso conlleva las etapas de calentamiento, mezclado, coloración, inyección en moldes de vidrio templados y la polimerización final en piscinas y hornos a temperatura controlada. El acrílico posee diversas ventajas como son la resistencia al impacto (dureza), transmisión de luz, peso ligero en comparación con el vidrio o al aluminio, resistencia química, resistencia a la intemperie, estabilidad dimensional y es aislante eléctrico. Para lograr un producto con estas características en valores óptimos es necesario el control y la automatización de todas las fases del proceso involucradas.

La dureza de la lámina de acrílico es controlada en la polimerización final o proceso de post-curado en un horno de convección, una deficiente homogenización de la temperatura al interior del horno genera diferentes valores de dureza a lo largo de la lámina. Es por eso, que el control de temperatura en este proceso es una condición crítica que debe optimizarse.

En PLASTIGAS de México SA de CV con la intención de mejorar el proceso de post-curado, se implementó una metodología para el control de temperatura independiente para cada zona de calentamiento, se realizó un análisis del modelo del incremento y conservación de temperatura en valores predefinidos y se determinó la reubicación de turbinas de recirculación de aire caliente en zonas específicas.

Como resultado de esta metodología se logró incrementar la homogenización de la dureza de la lámina de acrílico, incrementando en un 9.7% la dureza de la lámina en zonas donde se tenía deficiencia. De esta manera, la calidad de la lámina fabricada mejoró notablemente asegurando las especificaciones solicitadas por el cliente y minimizando así el riesgo de pérdidas por producción defectuosa.

Palabras clave: Ingeniería y tecnología, Tecnología de materiales, Plásticos, Lámina de acrílico, Dureza.

ABSTRACT

Acrylic sheet Prepolymer Methyl Methacrylate (PMMA) is a plastic material capable of withstanding long periods of time outdoors, this product is obtained by the catalyzed polymerization of methyl methacrylate monomer. This process involves the stages of heating, mixing, coloring, injection into tempered glass molds and final polymerization in pools and ovens at controlled temperatures.

Acrylic has several advantages such as impact resistance (hardness), light transmission, light weight compared to glass or aluminum, chemical resistance, weather resistance, dimensional stability and electrical insulation. To achieve a product with these characteristics at optimum values, it is necessary to control and automate all the process steps involved.

The hardness of the acrylic sheet is controlled in the final polymerization or post-curing process in a convection oven, a deficient homogenization of the temperature inside the oven generates different hardness values along the sheet. That is why temperature control in this process is a critical condition that must be optimized.

In PLASTIGAS de México SA de CV, with the intention of improving the post-curing process, a methodology for the independent temperature control for each heating zone was implemented, a model analysis of the increase and conservation of temperature in predefined values was carried out and the relocation of hot air recirculation turbines in specific zones was determined.

As a result of this methodology, it was possible to increase the homogenization of the hardness of the acrylic sheet, increasing by 9.7% the hardness of the sheet in areas where it was deficient. In this way, the quality of the manufactured sheet improved notably, ensuring the specifications requested by the client and thus minimizing the risk of losses due to defective production.

Keywords: Engineering and technology, Materials technology, Plastics, Acrylic sheet, Hardness.

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	v
ABSTRACT	vi
ÍNDICE DE CONTENIDO	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE TABLAS	xii
ABREVIATURAS	xiii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. ANTECEDENTES	2
1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	3
1.3. JUSTIFICACIÓN.....	7
1.4. OBJETIVOS.....	7
1.4.1. Objetivo general	7
1.4.2. Objetivos específicos	7
1.5. HIPÓTESIS	8
2. MARCO TEÓRICO	9
2.1. HORNOS INDUSTRIALES.....	9
2.1.1. Hornos de convección	10
2.1.2. Hornos de inducción.....	11
2.1.3. Horno de radiación.....	12
2.2. LÁMINAS DE ACRÍLICO.....	14
2.3. MODELACIÓN MATEMÁTICA DEL SISTEMA	16
2.3.1. Modelo matemático de un sistema térmico.....	17
2.4. TEORÍA DE CONTROL.....	21
2.4.1. Controlador PID.....	22
2.4.2. Sintonización del controlador	31
2.5. CONTROLADORES LÓGICOS PROGRAMABLES.....	34
2.5.1. Lógica de escalera.....	39
2.6. CONTROL ESTADÍSTICO DE PROCESO.....	42
2.6.1. Gráficas de control por variables.....	43
2.6.2. Capacidad del proceso	45
3. PROCEDIMIENTO.....	49

3.1. ANÁLISIS DEL PROCESO ACTUAL DE POST-CURADO	49
3.2. RECONFIGURACIÓN DEL HORNO DE POST-CURADO.....	54
3.3. SINCRONIZACIÓN DEL AVANCE DE LA CADENA DEL HORNO	55
3.4. CONTROL DE TEMPERATURA DE LAS ZONAS DE CALENTAMIENTO	57
4. RESULTADOS	62
CONCLUSIONES	69
RECOMENDACIONES	70
APORTACIÓN DE LA TESIS.....	71
APORTACIÓN SOCIAL DE LA TESIS.....	72
REFERENCIAS.....	73
ANEXOS	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Distribución del horno de post-curado.	2
Figura 2. Deformación de la lámina con la exposición al calor.	4
Figura 3. Configuración de la zona de calentamiento en un horno de convección.	4
Figura 4. Perfil de temperatura interna de una lámina de 12.0 mm, tamaño L2.	5
Figura 5. Análisis de dureza en el extremo caliente de la lámina.....	6
Figura 6. Análisis de dureza en el extremo frío de la lámina.	6
Figura 7. Horno de secado y/o curado.....	11
Figura 8. Horno de inducción industrial.	12
Figura 9. Efecto del ángulo de incidencia de rayos infrarrojos.....	13
Figura 10. Interior de un horno de radiación.	14
Figura 11. Láminas de acrílico en diferentes colores.	15
Figura 12. Láminas de acrílico en lote de producción.	16
Figura 13. Diagrama de bloques del sistema de horno de convección.	20
Figura 14. Diagrama de bloques de un sistema de control.	21
Figura 15. Diagrama de bloques de un controlador proporcional.	23
Figura 16. Diagrama de bloques del modelo de control integral.	24
Figura 17. Área bajo la curva sobre un periodo de tiempo.....	25
Figura 18. Combinación proporcional e integral.	26
Figura 19. Respuesta de un controlador PI a un impulso escalón.	27
Figura 20. El tiempo de retraso cambia en proporción a la constante de tiempo.	27
Figura 21. Modo derivativo de un proceso.....	29
Figura 22. Salida del proceso con y sin derivación.	29
Figura 23. Forma estándar de un controlador PID.	30
Figura 24. Acción derivativa en una señal con ruido.	31
Figura 25. Curva de respuesta del sistema en forma de S.	32
Figura 26. Oscilación sostenida con periodo P_{cr}	33
Figura 27. PLC 1769-L33ER de Allen Bradley.	35
Figura 28. Estructura interna de un PLC.....	35
Figura 29. Símbolos gráficos de instrucciones de lógica de escalera.	40

Figura 30. Diagrama de funcionamiento para temporizadores.....	41
Figura 31. Diagrama de tiempo para instrucciones de conteo.	42
Figura 32. Tipos de salida de un proceso.	43
Figura 33. Relación entre las especificaciones y la distribución de un proceso.	46
Figura 34. Efectos de la reducción de la variación sobre la capacidad del proceso.	47
Figura 35. Perfil de temperatura interna de una lámina de 12.0 mm, tamaño L2. .	49
Figura 36. Distribución de turbinas por zona en horno de convección.	50
Figura 37. Configuración del horno de post-curado.	51
Figura 38. Detalle de inyección de aire caliente a lámina de acrílico.	51
Figura 39. Detalle del motor de turbina e intercambiadores de calor.....	52
Figura 40. Vista superior del horno de inducción.	52
Figura 41. Lote de material entrando al horno de post-curado.	53
Figura 42. Modificación de la posición de las turbinas 5 y 6. a) Antes, b) Después.	54
Figura 43. Modificaciones al Interior del horno en las zonas 5 y 6. a) Antes, b) Después.....	55
Figura 44. Temperatura máxima por zona en el lado frío con 12 minutos de recorrido.....	56
Figura 45. Temperatura máxima por zona en el lado frío con 13.3 minutos de recorrido.....	56
Figura 46. Modelo de planta de primer orden con retardo.....	57
Figura 47. Modelo matemático de primer orden con retardo para el comportamiento de la temperatura.....	58
Figura 48. Respuesta del controlador propuesto a una entrada escalón.....	58
Figura 49. Modelo matemático del controlador PI.....	59
Figura 50. Sistema de control con la planta y controlador en Simulink.....	59
Figura 51. Respuesta a un impulso escalón de la planta + controlador en Simulink.	59
Figura 52. Programación del lazo de control en Process Control Designer.	60
Figura 53. Configuración del bloque de función para entrada analógica.	61
Figura 54. Configuración del bloque de función promedio.....	61

Figura 55. Configuración del bloque de función PID. a) Configuración, b) Sintonización.	62
Figura 56. Configuración del bloque salida analógica.	62
Figura 57. Perfil de temperatura interno de la lámina después de la reconfiguración del horno.....	63
Figura 58. Perfil de temperatura interno de la lámina para la 2da prueba de validación.	64
Figura 59. Muestreo de durezas de la lámina de acrílico utilizando el software SuperCEP.....	65
Figura 60. Capacidad del proceso y grafico de control por variables, marzo 2018.	66
Figura 61. Capacidad del proceso y grafico de control por variables, marzo 2019.	66
Figura 62. Capacidad del proceso y grafico de control por variables, marzo 2020.	66
Figura 63. Capacidad del proceso y grafico de control por variables, marzo 2021.	67
Figura 64. Capacidad del proceso y grafico de control por variables, marzo 2022.	67
Figura 65. Quejas y reclamaciones de clientes por defectos de dureza.	68

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparativo de dureza Rockwell de láminas de diferentes fabricantes...	7
Tabla 2. Regla de sintonía de Ziegler-Nichols basada en la respuesta escalón de la planta (primer método).....	33
Tabla 3. Regla de sintonía de Ziegler-Nichols basada en la ganancia crítica K_{cr} y periodo crítico P_{cr} (segundo método).	34
Tabla 4. Factores para estimar límites tres sigmas para la gráfica X y la gráfica R.	44
Tabla 5. Resultados de perfil interno de temperatura de la lámina de acrílico.....	65

ABREVIATURAS

Cp: Es el valor de la diferencia entre el límite de especificación inferior y el límite de especificación superior, dividido por un sigma de las desviaciones. Se considera que el proceso está dentro de las especificaciones si el índice $CP \geq 1.0$

CpK: Es un índice de capacidad. Es utilizado para saber si el proceso se ajusta a las tolerancias, es decir, si la media natural del proceso está centrada o no con relación al valor nominal del mismo. Se considera que el proceso está dentro de las especificaciones si el índice $CPK \geq 1.0$

HDT: *Heat Deflection Temperature*. Es la temperatura a la cual un polímero o plástico se deforma bajo una carga específica. Esta propiedad de los materiales plásticos es aplicada en muchos aspectos del diseño de productos, en la ingeniería y manufactura de productos que usan componentes termoplásticos.

HRM: Escala de dureza usada para metales de rodamientos, plásticos y otros materiales suaves o materiales delgados. Utiliza la bola más pequeña y la carga más pesada que no da efecto yunque.

PID: Es un controlador simultáneo por realimentación. Este calcula la o error entre un valor medido y un valor deseado. El algoritmo consiste en tres parámetros distintos: proporcional, integral u derivativo. El valor proporcional depende del error actual. El integral depende de los errores pasados y el derivativo es una predicción de los errores futuros.

PLC: Controlador lógico programable es una computadora industrial con la capacidad de procesar señales de campo tanto digitales para botones de mando o interruptores de paso, como analógicas para sensores, instrumentos, transductores. Un PLC realiza la lógica para poder controlar dispositivos como motores, pistones válvulas con ello controlando determinado proceso en base a un algoritmo programado.

PMMA: Prepolímero de Métil Metacrilato.

1. INTRODUCCIÓN

Una lámina de acrílico es un material plástico que obtiene por la polimerización catalizada del monómero metil metacrilato. En su estado natural es incoloro (transparente) y se puede pigmentar para obtener diferentes colores. El acrílico posee diversas características físicas: gran resistencia química ya que es inerte a muchas sustancias corrosivas, resistencia a la intemperie, es aislante eléctrico, es de peso ligero en comparación al vidrio o al aluminio, posee excelente transmisión de luz, resistencia al Impacto (Dureza) y estabilidad dimensional.

Para lograr tener un producto con todas estas características es necesario realizar un proceso de fabricación específico que conlleva las siguientes etapas: 1) Calentamiento, 2) Mezclado, 3) Coloración, 4) Inyección en moldes de vidrio templados y 5) polimerización final en piscinas y hornos a temperatura controlada. El control y la automatización de todas las fases del proceso involucradas es crucial para obtener las especificaciones de fabricación requeridas.

Plastiglas de México S.A de C.V. es una empresa líder en la fabricación de lámina acrílica *cell-cast* de norte América con una participación mayoritaria en México, Estados Unidos y Canadá. En su planta ubicada en San Luis Potosí se fabrican alrededor de 6000 toneladas anuales de lámina de acrílico. Uno de los principales problemas en la fabricación de esta lamina que se tienen en esta planta es la homogeneidad de la dureza en toda la superficie de la lámina.

La dureza de la lámina se genera en el proceso de post-curado en un horno de convección con 10 zonas de diferentes temperaturas, de las cuales 8 zonas son de calentamiento y 2 zonas son de enfriamiento, en cada una de las zonas se ingresan estructuras con 15 moldes. Actualmente, por el diseño del horno de post-curado se generan dos niveles de dureza en una misma lamina, en un extremo se tienen los valores de especificación (lado caliente) y en el otro extremo no se logran los valores de especificación (lado frío). La diferencia de los valores de dureza produce rechazos del cliente ya que no se cumplen las especificaciones acordadas. La

Figura 1 muestra la configuración del horno de convección para el proceso de post-curado de una lámina acrílica.

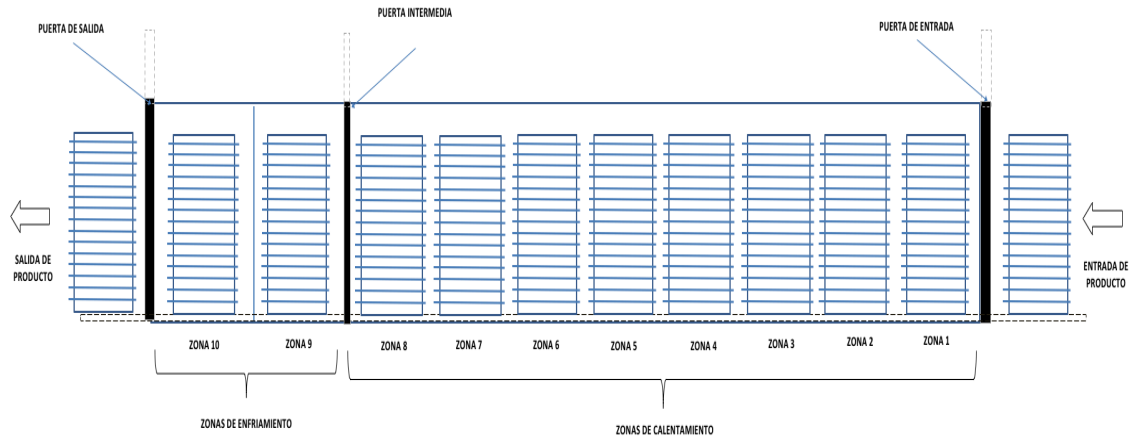


Figura 1. Distribución del horno de post-curado.
Elaboración propia.

De acuerdo con lo anteriormente mencionado, el propósito de este trabajo es determinar las razones por las cuales no se logra la homogenización de la dureza en la lámina, así como optimizar el control de temperatura apoyándonos con el software Matlab y la automatización de la estancia del material dentro del horno en la fase de post-curado utilizando el software *Process Control Designer*, la programación del PLC del avance de la cadena interna del horno utilizando el software *RSLogix 500*. Se rediseñarán también dos zonas de calentamiento que permitirán una dureza uniforme en toda la lámina y con el software *SuperCEP* se realizara un análisis de la capacidad del proceso para validar los resultados.

1.1. ANTECEDENTES

En Plastiglas de México es una empresa perteneciente al grupo Unigel de Brasil, dedicada desde 1959 a la producción de lámina de acrílico bajo el proceso cell-cast, con la mayor capacidad instalada en América. Es también el principal distribuidor de marcas reconocidas a nivel mundial de laminados plásticos y químicos en México. Cuenta con dos plantas de producción localizadas en Ocoyoacac en el Estado de México y en San Luis Potosí, S.L.P, logrando alcanzar

los más altos estándares de calidad a nivel internacional, cumpliendo diferentes normas oficiales de calidad por lo que cuenta con la certificación ISO-9002 desde octubre de 1998 por parte de Bureau Veritas Quality Certification.

En planta San Luis Potosí, la producción anual es en promedio de 6000 toneladas, lo que representan aproximadamente 400,000 piezas distribuidas en 7 tamaños: Q (200 x100 mm), C3 (180 x120 mm), L0 (240 x120 mm), L2 (250 x130 mm), K (240 x 150 mm) y R0 (240 x 180 mm) y en 16 espesores: 1.5 mm, 2.0 mm, 2.3 mm, 2.6 mm, 2.8 mm, 3.0 mm, 4.0 mm, 4.3 mm, 4.5 mm, 5.4 mm, 5.6 mm, 6.0 mm, 8.0 mm, 9.0 mm, 10.0 mm, 12.0 mm. Con una variedad de más de 120 colores.

Sin embargo, se han presentado reclamaciones por parte de clientes que indican que la dureza de la lámina no es homogénea a lo largo de la superficie. Después de un análisis realizado al proceso, se encontró que el problema se genera en el horno de convección de la fase de post-curado. En esta planta de San Luis Potosí se cuenta con una sola línea de producción, el 100% de las láminas producidas pasan por mismos componentes del proceso de fabricación, como mezcladoras, moldes y horno, en donde se le dan las propiedades físicas requeridas. Debido a esto, es de vital importancia que los sub-procesos cumplan con los estándares definidos en los planes de calidad para que se logren las especificaciones de las láminas requeridas por los clientes.

1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

En Plastiglas de México, planta San Luis Potosí, se tienen problemas con la uniformidad de la dureza en la superficie de la lámina de acrílico, se generan dos grados de dureza en una misma lamina. El valor de mayor dureza regularmente cumple con la especificación del cliente. Este problema se ha detectado que se genera en la fase de post-curado. Las láminas recorren el horno en un tiempo determinado y son trasladadas mediante estructuras que son jaladas con una cadena de tracción. El horno de convección se divide en 10 zonas de diferentes temperaturas, 8 para calentamiento y 2 para enfriamiento.

En algunas zonas se detecta un calentamiento diferente dentro del horno, cuando la dureza en un extremo de la lámina cumple con la especificación está en el lado caliente del horno. Si la lámina no cumple con la dureza especificada es porque la parte de la lámina está en el lado frío del horno. El diferencial de temperatura en el perfil de post-curado entre el lado caliente y el lado frío genera láminas con diferentes propiedades fisicoquímicas afectando principalmente a la Temperatura de Deflexión al Calor. Este efecto se muestra en la lámina de la Figura 2.

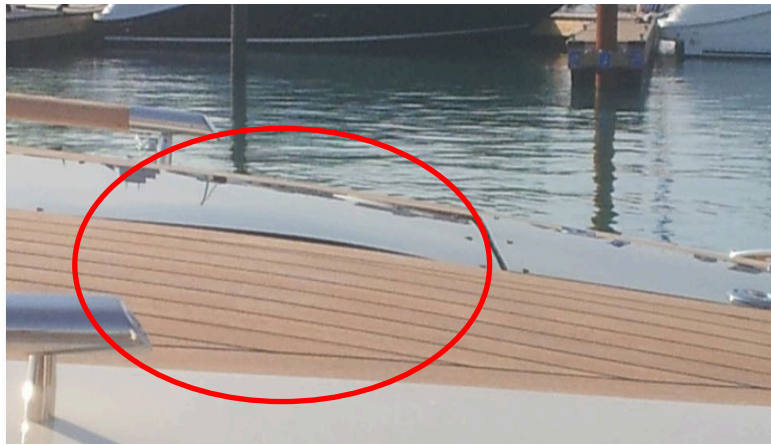


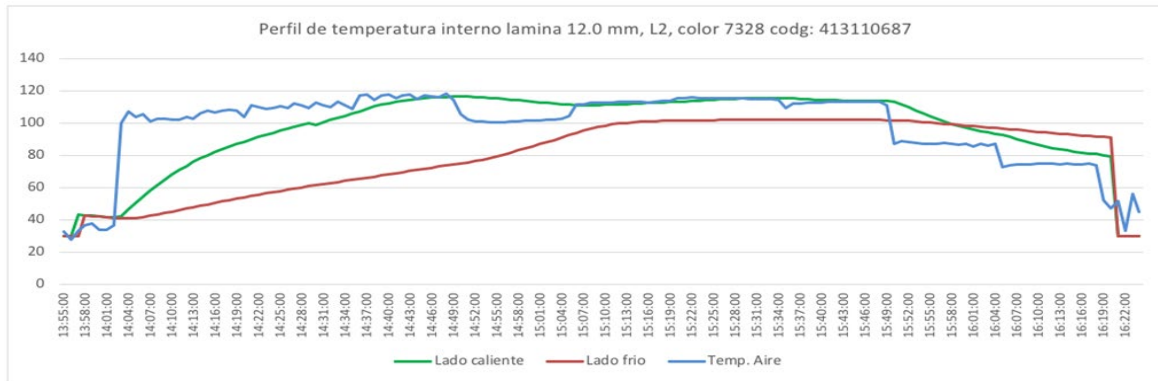
Figura 2. Deformación de la lámina con la exposición al calor.
Elaboración propia.

En un horno de convección el aire se calienta y es recirculado dentro del mismo horno. La inyección del aire caliente dentro del horno es del extremo derecho (lado caliente) y la extracción es por el lado izquierdo (lado frío). Esta configuración provoca diferentes valores de dureza en una misma lámina. En la Figura 3, se muestra la configuración de una zona de calentamiento del horno.



Figura 3. Configuración de la zona de calentamiento en un horno de convección.
Elaboración propia.

Se realizó un análisis de la temperatura interna de la lámina dentro del horno de post-curado, se requiere de 105°C durante 30 a 60 minutos para generar una dureza dentro de especificación. La Figura 4, muestra que este requerimiento no se cumple en el lado frío de la lámina.



Tiempo lado caliente arriba de 105°C = 62 min
Tiempo lado frío arriba de 105°C = 0 min

Figura 4. Perfil de temperatura interna de una lámina de 12.0 mm, tamaño L2.
 Elaboración propia.

De igual manera se realizó un análisis de la dureza en la superficie de la lámina de acrílico, donde la dureza requerida es de 90 HRM (Escala Rockwell) como mínimo. La Figura 5. muestra los resultados del análisis de dureza donde los valores en el lado caliente oscilan entre 94.5 y 100.5 HRM. En la Figura 6, se muestran que el valor de dureza del lado frío oscilan entre 88.7 y 94.4 HRM.

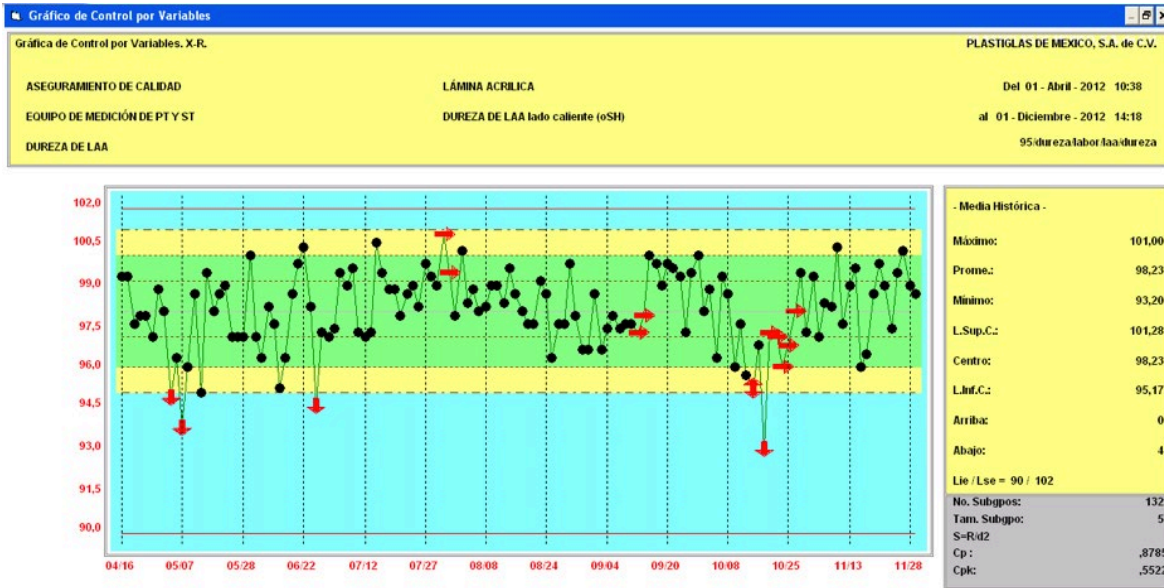


Figura 5. Análisis de dureza en el extremo caliente de la lámina.
Elaboración propia.

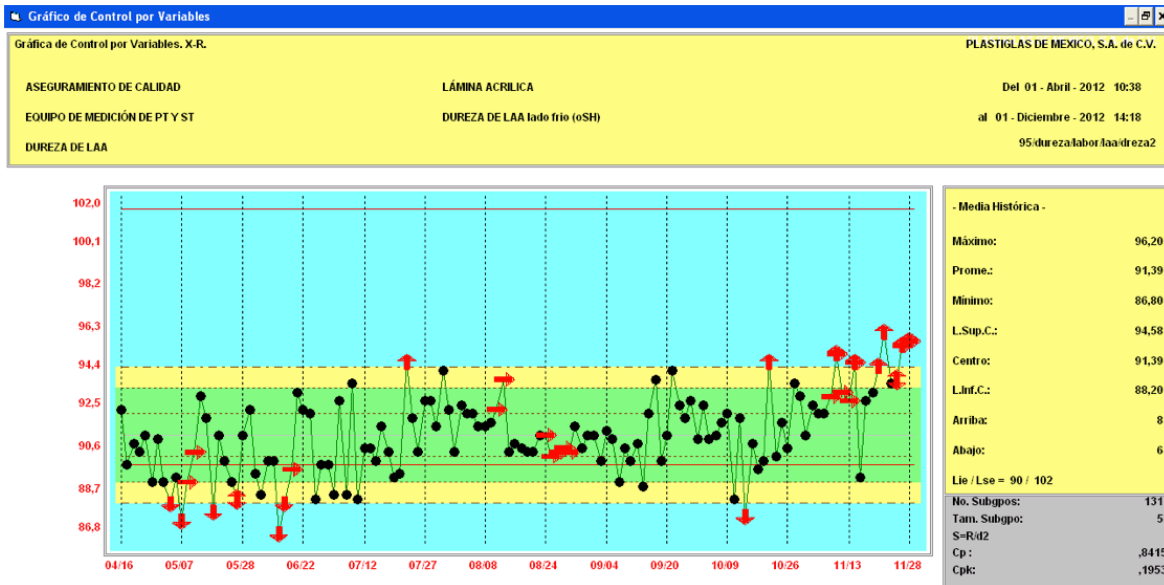


Figura 6. Análisis de dureza en el extremo frío de la lámina.
Elaboración propia.

Como observamos en el análisis de dureza de las Figuras 5 y 6, existe una diferencia considerable entre ambos extremos de la lámina, lo cual genera una lámina defectuosa lo que origina reclamaciones de los clientes y pérdidas económicas para la empresa.

En cuanto a la competitividad con diferentes fabricantes de láminas de acrílico, se comparó una lámina de 12.0 mm color cristal entre diferentes fabricantes y Plastiglas de México, se obtuvo que de la orilla izquierda (lado frío) se tienen valores de dureza al límite de la especificación, lo que genera desconfianza con nuestros clientes y limita las opciones de ampliación del mercado como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Comparativo de dureza Rockwell de láminas de diferentes fabricantes.

	MARGACIPTA	EVONIK	ARKEMA	PGM L3 OCO	PGM L4 SLP
Valor orilla izq.	90.94	88.39	97.40	92.17	90.08
Valor centro	96.26	96.98	99.66	96.46	95.38
Valor orilla der.	94.06	98.18	100.19	96.29	99.37
Promedio	93.75	94.51	99.08	94.97	99.94

Elaboración propia.

1.3. JUSTIFICACIÓN

El no cumplir con los estándares de dureza en la lámina de acrílico ha generado 5 reclamaciones por parte de nuestros clientes (1 en 2010, 1 en 2011, 2 en 2012, 1 en 2013), esto representó un costo de \$ 59,950.0 USD. Debido a que el 100% del producto que se fabrica en la planta de San Luis Potosí se procesa por este horno, el riesgo de continuar con la fabricación de lámina fuera de especificaciones de dureza es alto y están latentes las reclamaciones y pérdidas de clientes.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo general

Homogenizar la dureza de una lámina de acrílico en toda su superficie en el proceso de post-curado, para que cumpla con los valores definidos en los planes de fabricación.

1.4.2. Objetivos específicos

1.- Realizar un análisis del proceso de post-curado que indique las causas por lo que no se logran los valores de dureza en la lámina de acrílico.

- 2.- Determinar los cambios a realizar en la reconfiguración del horno de convección que asegure la conservación de los valores de temperatura el tiempo requerido.
- 3.- Sincronizar el tiempo de avance de la lámina de acrílico dentro del horno con la apertura y cierre de puertas de entrada, salida e intermedia.
- 4.- Implementar un control de temperatura independiente en cada zona de calentamiento del horno que permita alcanzar la temperatura interna deseada durante el tiempo predefinido.

1.5. HIPÓTESIS

Con la reconfiguración del proceso de post-curado, la sincronización del desplazamiento de la cadena de arrastre con la apertura y cierre de las puertas de entrada, intermedia y salida y la optimización del sistema de control de temperatura en el horno de convección, se logrará incrementar en al menos un 5% el tiempo donde la temperatura interna de una lámina de acrílico se mantiene en el valor predefinido, además se asegurará que el valor de la dureza requerida en los planes de fabricación de la lámina incrementen hasta en un 5 % en toda su superficie.

2. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se desarrollarán los temas teóricos base, se analizarán y describirán los hornos utilizados para el proceso del post-curado, los modelos de proceso y las estrategias de control más comunes en la industria.

2.1. HORNOS INDUSTRIALES

Los hornos industriales son los equipos o dispositivos utilizados en la industria, en los que se calientan los materiales y las piezas o elementos colocados en su interior por encima de la temperatura ambiente. El objeto de este calentamiento puede ser diverso, por ejemplo (Otto, 2015):

- Alcanzar la temperatura necesaria para que se produzcan reacciones químicas para la obtención de un determinado producto.
- Cambios de estado como la fusión de los metales y su vaporización.
- Ablandar material para su conformado.
- Tratamiento térmico para cambiar las propiedades físicas.
- Recubrimiento de materiales con otros elementos.
- Deshidratación o secado.

La energía calorífica requerida para el calentamiento de los hornos puede proceder de (Otto, 2015):

- Gases calientes (llama): producidos en la combustión de combustibles sólidos, líquidos o gaseosos que calientan las piezas por contacto directo entre ambos o indirectamente a través de intercambiadores de calor.
- Energía eléctrica en diversas formas:
 - Arco voltaico de corriente alterna o continua.
 - Inducción electromagnética.
 - Alta frecuencia en forma de dielectricidad o microondas.
 - Resistencia óhmica directa de las piezas.
 - Resistencias eléctricas que ceden calor por diversas formas de transmisión de calor.

Los principios de operación de los hornos más comúnmente usados en la industria son convección, radiación e inducción.

2.1.1. Hornos de convección

Las necesidades de la industria actual se enfocan en procesos que permitan la producción en masa rápida y económicamente, y sin tener que poner en riesgo la calidad del producto. En la industria es común encontrar procesos que necesiten calor, elevando la temperatura de forma progresiva hasta alcanzar los perfiles necesarios para su producto. Los hornos de convección forzada tienen la capacidad de operar sin perder su homogeneidad, incrementando la temperatura ambiente del aire hasta el nivel de calor necesario, y además pueden mantenerlo (POWDERTRONIC, 2022).

La transferencia de calor por movimiento de la masa es lo que conocemos como convección, mientras que la convección forzada es la transferencia de calor entre una superficie y la atmósfera de una cámara, con un movimiento que fluye alrededor de la pieza transfiriendo el calor con un patrón de recirculación predefinido, horizontal, vertical o combinado. En este tipo de hornos las paredes interiores son de acero, una capa interior de fibra aislante y la pared exterior puede ser acero u aluminio. Utilizan un gas (aire caliente) que fluye a través del interior del horno para transferir el calor. También pueden utilizar electricidad o vapor como fuente de energía para procesos a bajas temperaturas. Estos hornos deben de contar con suficiente aire que recircule al interior, por lo deben contar con ventiladores que se ubican en las cámaras internas de recirculación al exterior para evitar que la llama generada tenga contacto directo con el producto que va a curarse en el interior (POWDERTRONIC, 2022).

Los hornos de convección son comúnmente utilizados para el polimerizado de pinturas, curado de lámina de acrílico o para curados a temperaturas menores de 500°C. Al seleccionar un horno de convección forzada, es importante considerar el tipo de aplicación y las características del producto o materiales con los que se van a trabajar, con la finalidad de obtener los mejores resultados y ayude a reducir

los costos de transformación. En la figura 7 se muestra un horno industrial de convección forzada.



Figura 7. Horno de secado y/o curado.
(POWDERTRONIC, 2022).

2.1.2. Hornos de inducción

El horno de inducción es un horno eléctrico en el que el calor es generado por la inducción eléctrica de un medio conductor (un metal) en un crisol, alrededor del cual se encuentran enrolladas bobinas magnéticas.

El calor por inducción es un medio de calentamiento o de fundición de metal que usa corrientes eléctricas para calentar el material. Genera calor rápido y permanente a lo largo del horno y permite que el material se caliente de forma uniforme. El calor de inducción se basa en una bobina construida con un tubo de cobre. El agua fluye por las bobinas que trabajan junto a los elementos de calefacción de cobre y ayudan a enfriar el sistema. La forma y tamaño de la bobina se determina según la aplicación para la que se utilice el horno (SAS., Industrial Technologies, 2022).

Los hornos de inducción se pueden utilizar para fundir, soldar, tratar o ajustar por contracción cualquier material que pueda someterse a calor por inducción. El tratamiento puede incluir materiales de templado, endurecimiento o recocido. La inducción de calor puede ser utilizada para soldaduras fuertes o soldadura simple de cobre, bronce, acero o latón (SAS., Industrial Technologies, 2022). La Figura 8, muestra un horno de inducción de tipo industrial.



Figura 8. Horno de inducción industrial.
(SAS., Industrial Technologies, 2022).

2.1.3. Horno de radiación

Cuando un cuerpo se encuentra a una temperatura mayor al ambiente como por ejemplo el sol, éste emite una radiación. Básicamente el cuerpo caliente desprenderá calor y le transmitirá temperatura al cuerpo más frío. En el ejemplo del sol, este segundo cuerpo sería la Tierra, que recibe el calor del sol a través de los rayos. De la misma forma el horno emite rayos a las piezas a calentar.

La luz infrarroja es radiación donde las ondas están entre el espectro entre la luz visible y las ondas electromagnéticas. Este espectro electromagnético tiene una capacidad energética, y crece conforme la longitud de onda decrece. Las ondas llevan consigo la energía y al impactarse con la superficie de un cuerpo,

depositarán una gran parte de su energía en este. Al usar ondas de luz, éstas se comportarán de la misma manera que la luz visible, es decir, su capacidad de absorción estará directamente relacionada con el ángulo de incidencia, la capacidad reflectiva y refractiva del sustrato. Por lo tanto, mientras más opaco sea el producto y el ángulo de incidencia de la luz sea más recto, la cantidad de energía que absorberá será mayor (POWDERTRONIC, 2022). La Figura 9, muestra el efecto del ángulo de incidencia de los rayos infrarrojos sobre un objeto.

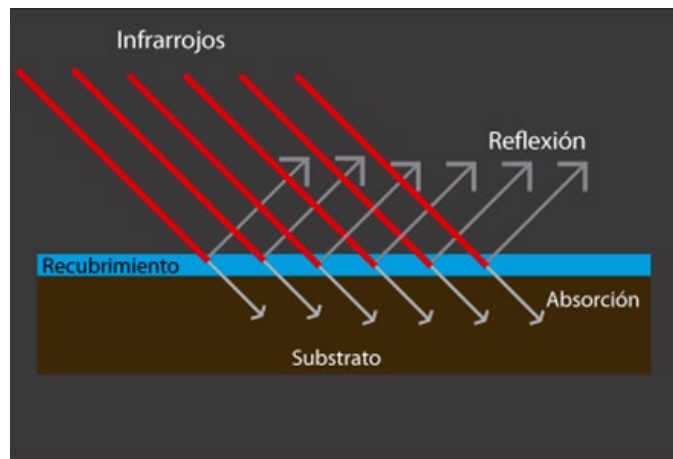


Figura 9. Efecto del ángulo de incidencia de rayos infrarrojos. (POWDERTRONIC, 2022).

Este tipo de hornos utilizan el espectro infrarrojo para calentar la superficie de los recubrimientos. Se pueden utilizar para curar recubrimientos en sustratos sensibles al calor como los plásticos o el MDF, se colocan previo a los hornos continuos para lograr que la pieza alcance la temperatura de curado más rápido, para curar pintura sobre piezas con geometrías simples y espesores grandes, y como hornos de secado para procesos de dos capas (POWDERTRONIC, 2022).

Para un buen curado infrarrojo los emisores de luz tienen que ver completamente todos los lados de la pieza. Cuando no existe una vista adecuada de la pieza los emisores no podrán calentar el área oculta. Alguna parte del calor es transmitido a estas partes ocultas debido a la conductividad térmica de los metales, lo que puede generar en un curado completo de la pintura. Sin embargo, el tiempo aumenta. Si la pieza a curar es brillante la cantidad de luz que reflejará será mayor

por lo que el tiempo del proceso será más lento. La Figura 10, muestra las paredes de un horno de radiación.



Figura 10. Interior de un horno de radiación.
(POWDERTRONIC, 2022).

2.2. LÁMINAS DE ACRÍLICO

Los acrílicos se producen en dos maneras: con formas definidas como láminas planas, varillas y tubos, y también como polvo de moldeo. Los polvos se obtienen por un proceso de polimerización en suspensión, la reacción se logra entre gotas del monómero suspendido en una solución de agua y catalizador dando como resultado granos de polímero con peso molecular controlado para usarse en un proceso de moldeo o extrusión. Las formas de acrílico se obtienen mediante polimerización en masa. En este proceso, el monómero y el catalizador se vierten en un molde donde tiene lugar la reacción. En los años 30's se desarrolló industrialmente la primera lamina acrílica fabricada de poli metacrilato de metilo, y fue llamado como el primer "vidrio orgánico". Sus notables propiedades ópticas, rigidez, peso ligero, resistencia mecánica y a la intemperie, capacidad para termo formarse y ser producido en diferentes colores y transparencias, hizo que este material fuera adecuado para aplicaciones como cabinas de avión, techos, letreros luminosos, por citar algunos ejemplos (Babo, y otros, 2020).

Las láminas de acrílico se pueden moldear o extruir. Las láminas extruidas solo estuvieron disponibles hasta 1970, desde entonces el proceso de producción cambio al moldeo, debido a que se obtenía una mejor calidad. En el moldeo se introduce un monómero (o un jarabe prepolimerizado de monómero), un iniciador y otros aditivos en moldes de vidrio. Los moldes se calientan a temperaturas controladas para la polimerización del metacrilato de metilo (PMMA). El PMMA o acrílico es un material resistente y ligero. La densidad del acrílico oscila entre 1,17 y 1,20 g/cm³, que es menos que la mitad del vidrio. La resistencia al impacto del PMMA es mayor que la del vidrio y el poliestireno. El acrílico transmite hasta el 92% de la luz visible y refleja hasta un 4% con 3 mm de espesor y un índice de refracción de 1,4905 a 589,3 nm. Debido a la mejor estabilidad ambiental del acrílico en comparación con el poliestireno y el polietileno, se considera para la mayoría de las aplicaciones al aire libre en la industria del plástico (Pawar, 2016). La Figura 11 muestra láminas de acrílico en una amplia gama de colores.



Figura 11. Láminas de acrílico en diferentes colores.
(PLASTIGLAS, 2022).

Se pueden usar dos métodos de polimerización en masa: celda discontinua o continua. El método de celdas discontinuas usar para formar varillas y tubos. El método continuo es más rápido e implica menos trabajo. Se utiliza para hacer láminas de espesores más delgados y anchos más pequeños, en espesores de 0.16-15 cm y anchos desde 0.9 m hasta varios cientos de metros. El método continuo es más rápido e implica menos trabajo. Los procesos de polimerización en masa en

celdas continuas ofrecen una elevada pureza de producto, un alto rendimiento del reactor y unos costes reducidos de separación (PLASTIGLAS, 2022). La Figura 12, muestra un lote de producción de lámina acrílica transparente.



Figura 12. Láminas de acrílico en lote de producción.
(PLASTIGLAS, 2022).

2.3. MODELACIÓN MATEMÁTICA DEL SISTEMA

Los sistemas de control deben ser modelados como sistemas dinámicos y analizar las características dinámicas. Un modelo matemático de un sistema dinámico refiere a un conjunto de ecuaciones que representan la dinámica del sistema con precisión. Sin embargo, un sistema puede representarse formas diferentes, dependiendo de la perspectiva. Dichas ecuaciones se obtienen a partir de leyes físicas que gobiernan un sistema determinado, como las leyes de Newton para sistemas mecánicos y las leyes de Kirchhoff para sistemas eléctricos.

Las ecuaciones diferenciales describen el comportamiento de los sistemas físicos y de los sistemas de control. Por ejemplo, en los circuitos eléctricos y electrónicos, resolviendo las ecuaciones diferenciales correspondientes se puede contar con una descripción cuantitativa y cualitativa de las corrientes en los inductores y los voltajes en los capacitores. A partir de estos valores se pueden calcular otras variables importantes como la potencia y la energía. Un proceso industrial con

variables a controlar como flujo, presión y temperatura puede ser modelada como un sistema matemático de primer o segundo.

2.3.1. Modelo matemático de un sistema térmico

Los sistemas térmicos son los que transfieren calor de un cuerpo a otro y se analizan matemáticamente en términos de resistencia y capacitancia. Para simplificar el análisis se supondrá que un sistema térmico se representa mediante un modelo de parámetros concentrados, que las sustancias que se caracterizan por una resistencia al flujo de calor tienen una capacitancia térmica insignificante y que las sustancias que se caracterizan por una capacitancia térmica tienen una resistencia insignificante al flujo de calor (Ogata, 2010).

El calor fluye de una sustancia a otra de tres formas diferentes: por conducción, por convección y por radiación. En este trabajo se considerarán la convección por la naturaleza del problema.

Para representar la transferencia de calor por convección se tiene la siguiente ecuación:

$$q = K\Delta\theta \quad (\text{Ec. 2.1})$$

donde:

q	es el flujo de calor, kcal/seg
$\Delta\theta$	es la diferencia de temperatura, °C
K	es el coeficiente, kcal/seg °C

el coeficiente K se obtiene mediante:

$$K = HA \quad (\text{Ec. 2.2})$$

donde:

H	es el coeficiente de convección, kcal/m ² seg °C
A	es el área normal para flujo de calor, m ²

La resistencia térmica R para la transferencia de calor entre dos fluidos se define como:

$$R = \frac{d(\Delta\theta)}{dq} = \frac{1}{K} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

donde:

$d(\Delta\theta)$ es el cambio en la diferencia de temperatura, °C
 dq es el cambio en el flujo de calor, kcal/seg

Como los coeficientes de convección térmica son casi constantes, la resistencia térmica para la convección es constante.

La capacitancia térmica C se define mediante:

$$C = mc \quad (\text{Ec. 2.4})$$

donde:

m masa del fluido considerado, Kg
 c calor específico del fluido, Kcal/Kg °C

Se considera que un horno de convección está aislado para eliminar las pérdidas de calor hacia el aire del exterior. También se supone que no hay almacenamiento de calor en el muro de aislamiento y que el fluido del horno es homogéneo, por lo que tiene una temperatura estable. De este modo, se emplea una sola temperatura para describir al interior del horno y la del fluido que sale.

Así:

$\bar{\theta}_i$ = temperatura en estado estable del fluido que entra, °C
 $\bar{\theta}_o$ = temperatura en estado estable del fluido que sale, °C
 G = velocidad de flujo del fluido en estado estable, Kg/seg
 M = masa del fluido en estado estable, Kg
 c = calor específico del fluido, Kcal/Kg °C
 R = Resistencia térmica, °C seg/Kcal

C = Capacitancia térmica, Kcal/°C

\bar{H} = entrada del flujo de calor en estado estable, kcal/seg

Se asienta que la temperatura del fluido que entra al horno se mantiene constante y que el flujo de calor al sistema cambia repentinamente de \bar{H} a $\bar{H} + h_i$, donde h_i representa un cambio en el flujo de calor de entrada. Entonces, el flujo de calor de salida cambiara de forma gradual de \bar{H} a $\bar{H} + h_o$. La temperatura del fluido que sale también cambiara de $\bar{\theta}_o$ a $\bar{\theta}_o + \theta$. Para este caso h_o , C y R se obtienen respectivamente como (Ogata, 2010):

$$h_o = Gc\theta \quad (\text{Ec. 2.5})$$

$$C = Mc \quad (\text{Ec. 2.6})$$

$$R = \frac{\theta}{h_o} = \frac{1}{Gc} \quad (\text{Ec. 2.7})$$

La ecuación diferencial para este sistema es:

$$Cd\theta = (h_i - h_o)dt \quad (\text{Ec. 2.8})$$

o bien:

$$C \frac{d\theta}{dt} = h_i - h_o \quad (\text{Ec. 2.9})$$

$$RC \frac{d\theta}{dt} + \theta = R h_i \quad (\text{Ec. 2.10})$$

La función de transferencia que relaciona la temperatura θ del fluido de calentamiento en el horno con el flujo de calor en estado estable a la entrada h_i se obtiene mediante:

$$\frac{\Theta(s)}{H_i(s)} = \frac{R}{RCs+1} \quad (\text{Ec. 2.11})$$

La temperatura del fluido que entra puede cambiar y actuar como una perturbación. Si se desea una temperatura de salida constante se debe controlar el flujo del fluido a la entrada para compensar las fluctuaciones. Si la temperatura

del fluido que entra cambia de $\bar{\theta}_i$ a $\bar{\theta}_i + \theta_o$, mientras que el flujo de calor de entrada H y el flujo del fluido G se conservan constantes, el flujo de salida cambiara de \bar{H} a $\bar{H} + h_o$ y la temperatura del fluido que sale cambiara de $\bar{\theta}_o$ a $\bar{\theta}_o + \theta$. La ecuación diferencial para este caso es:

$$Cd\theta = (Gc\theta_i - h_o)dt \quad (\text{Ec. 2.12})$$

o bien:

$$C \frac{d\theta}{dt} = Gc\theta_i - h_o \quad (\text{Ec. 2.13})$$

$$RC \frac{d\theta}{dt} + \theta = \theta_i \quad (\text{Ec. 2.14})$$

La ecuación de transferencia que relaciona la temperatura interna θ con la temperatura de entrada θ_i se obtiene mediante:

$$\frac{\theta(s)}{\theta_i(s)} = \frac{1}{RCs+1} \quad (\text{Ec. 2.15})$$

La Figura 13, muestra un diagrama de bloques que corresponde a este caso.

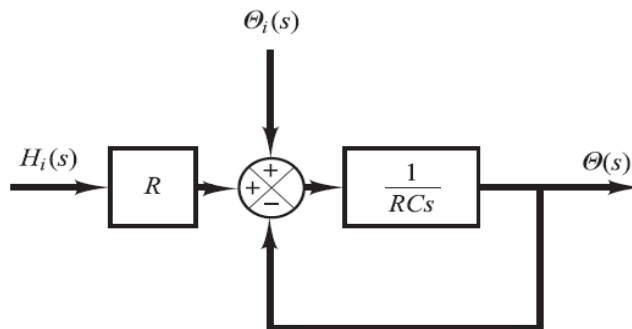


Figura 13. Diagrama de bloques del sistema de horno de convección.
(Ogata, 2010)

2.4. TEORÍA DE CONTROL

Un sistema de control compara el valor real de la variable controlada contra el valor deseado para esa variable, determina la desviación entre ambos valores y genera una señal de control que reduce la desviación a cero. Se utiliza un sistema de control de lazo cerrado para mantener el valor de una variable o un proceso en valores definidos. Los controladores realizan las acciones basadas en un punto de control (*set point*) y la retroalimentación (*feedback*) que reciben de los sensores y transmisores, y que son los que cierran el lazo. Estos controladores tratan de mantener el valor del proceso medido en el *set point* deseado basados en eventos pasados (Wade, 2017). La Figura 14, es un diagrama de bloques de un sistema de control industrial que consiste en el sistema de control, un actuador, un proceso y un elemento de medición.

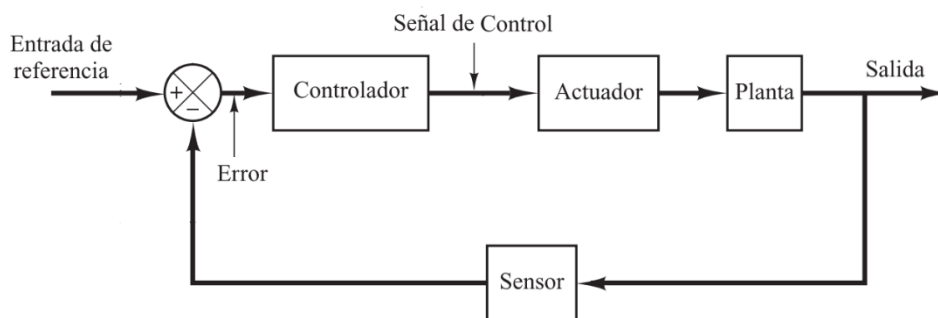


Figura 14. Diagrama de bloques de un sistema de control.
Elaboración propia.

Los sistemas de control se clasifican, de acuerdo con sus acciones de control, como:

1. De dos posiciones o controladores on-off
2. Controladores proporcionales
3. Controladores integrales
4. Controladores proporcionales-integrales
5. Controladores proporcionales-derivativos
6. Controladores proporcionales-integrales-derivativos

Los controladores industriales emplean como fuente de energía la electricidad o un fluido presurizado, como el aire o el aceite, por lo que también pueden clasificarse como neumáticos, hidráulicos o electrónicos. El tipo de controlador que se use debe seleccionarse de acuerdo con las condiciones de operación como seguridad, costo, disponibilidad, fiabilidad, precisión, peso y tamaño.

2.4.1. Controlador PID

Desde los años cuarenta y cincuenta los sistemas de control industrial utilizan controladores PID para el control de presión, temperatura, y cualquier variable física. Resultan muy útiles cuando no se pueden emplear métodos de diseño analíticos del proceso, aunque tal vez en situaciones puntuales no aporten un control óptimo. Más del 50% de los controladores usados en la industria son controladores PID.

Un controlador PID consiste en tres parámetros: ganancia proporcional, ganancia integral y ganancia derivativa. La respuesta de un controlador PID depende de la magnitud de cada uno de estos parámetros, la determinación de estas magnitudes se denomina sintonía de los controladores PID. Desde 1942 se han propuesto numerosas reglas de sintonía, hoy en día cada fabricante de controladores PID tiene sus propias reglas de sintonía que permiten llevar a cabo una sintonización fina en el sitio y con el proceso real.

La parte proporcional (P) trata de detener el error haciendo correcciones basados en el tamaño del error. La parte integral (I) se asegura de eliminar el error haciendo correcciones basados en cuanto tiempo ha estado presente el error. La parte derivativa (D) hace más lenta la rapidez con que cambia el error, haciendo correcciones ahora, basados en predicciones de cómo será el error (Lipták, 2006).

- **Controlador proporcional.**

Esta estrategia de control permite al elemento final de control ser posicionado en algún lugar entre on y off. El lugar es definido por la ganancia proporcional K_p . Por ejemplo, considere un ventilador de techo de velocidad variable. La velocidad del

ventilador es puesta basada en la cantidad de aire que se desea circular. La velocidad del ventilador se incrementa cuando más cantidad de aire es necesaria y decrementa cuando menos circulación es necesaria. En este ejemplo, el proceso es la circulación del aire, el ventilador es el actuador y tú actúas como el sensor, el control proporcional y el que establece el set point. Tú estableces el set point decidiendo cual es la circulación del aire óptima dentro de la habitación. Basado en la circulación de aire y en tu desea de circulación, tomas la decisión de incrementar o decrementar la velocidad del ventilador. El cambio de velocidad depende de dos factores: el tamaño del ventilador y tu decisión. Si no hay circulación de aire y tú quieres cambiar la velocidad del ventilador para alcanzar la circulación de aire que desees, tú sabes que tienes que aumentar la velocidad del ventilador para alcanzar la circulación de aire que desees. Lo que tú no sabes es cuánto debe cambiar la velocidad del ventilador. Esto depende completamente del tamaño del ventilador. Si el ventilador es de tipo industrial grande instalado en una habitación pequeña, requerirás de un cambio muy ligero en la velocidad del ventilador. Al contrario, si el ventilador es de tamaño pequeño y está instalado en una habitación grande, la cantidad de cambio en la velocidad que necesitaras será más grande (Starr, 2015).

El ejemplo del ventilador muestra el concepto básico de un controlador proporcional con ganancia K_p . En la Figura 15, se muestra un diagrama de bloques que incluye un controlador proporcional.

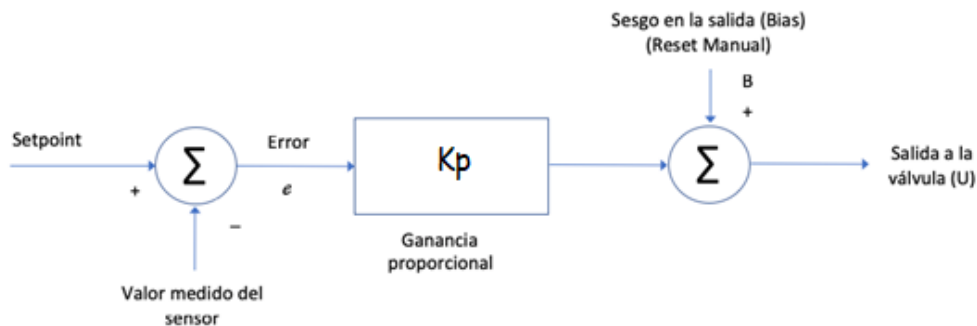


Figura 15. Diagrama de bloques de un controlador proporcional. (Starr, 2015).

La salida de la válvula U es una función de la ganancia del controlador K_p , el error e y el sesgo en la salida B . Como se describe en la siguiente ecuación:

$$U(t) = K_p e(t) + B \quad (2.16)$$

El sesgo (*bias*) en la salida B provee el valor de la salida del controlador cuando la medición y el *setpoint* son iguales. La mayoría de los controladores industriales proporcionales están contruidos con un sesgo ajustable. Esto es normalmente llamado *reset* manual. Si el *reset* manual es puesto al 50% y el error es cero, entonces la salida será igual al 50%.

La ganancia de control proporcional K_p debería ser ajustada con base en el efecto que tiene el actuador en el proceso. La salida U de la válvula cambiará solamente cuando el error cambie. Si el error no cambia, entonces la salida a la válvula permanecerá constante (Nise, 2011).

- **Controlador integral.**

El modo de control integral difiere del modo de control proporcional permitiendo al controlador ajustar la señal de salida basado en la duración del error, no solo la magnitud (Wade, 2017). La Figura 16, muestra el modelo a bloques de un controlador tipo integral.

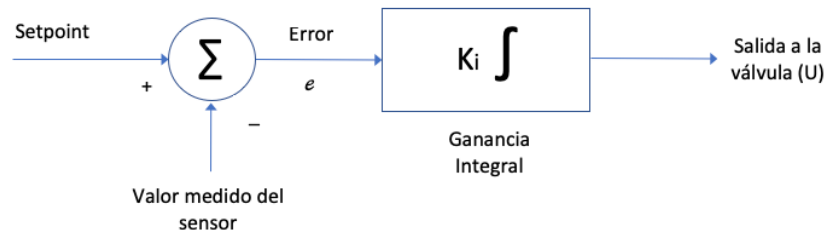


Figura 16. Diagrama de bloques del modelo de control integral. (Starr, 2015).

La salida de un controlador integral es una función solamente de la integración del error y la ganancia integral. En forma de ecuación, se detalla de la siguiente manera:

$$U(t) = K_i \int e(t) dt + B \quad (2.17)$$

Esto indica una función matemática que calcula el área bajo la curva sobre un periodo de tiempo. El área que es generada como resultado de un error es calculada respecto al tiempo. Esto puede analizarse en la Figura 17.

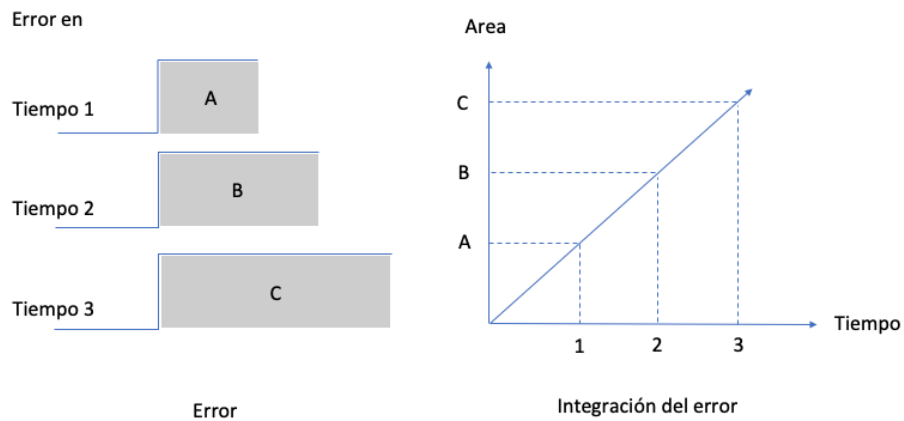


Figura 17. Área bajo la curva sobre un periodo de tiempo. (Starr, 2015).

En este ejemplo, el error no está cambiando, esto se puede ver por el aumento constante en la integración de la señal de error. Mientras esta integración está siendo calculada, está siendo convertida en una señal de salida U . Esto se hace multiplicando el resultado de la integración con la ganancia integral. El efecto neto del controlador integral es que cuando existe una señal de error (no cero), la función de integración producirá una señal de salida. Esto continuará hasta que el error sea cero. En este punto, no hay error y la integración detendrá el cálculo de una nueva señal de salida. Por lo tanto, mientras exista un error, la integración tratará de removerlo (Starr, 2015).

- **Controlador Proporcional + Integral.**

La combinación proporcional + integral combina lo mejor de ambos. El controlador PI es la combinación más usada en los procesos de control industriales. La razón es que la combinación PI puede eliminar el desplazamiento (*offset*) causado por el cambio en la carga. La parte proporcional corrige en cambio en el error mientras que la parte integral corrige la duración del error (Starr, 2015). La combinación PI tiene el efecto en la señal de error a un cambio escalón mostrado en la Figura 18.

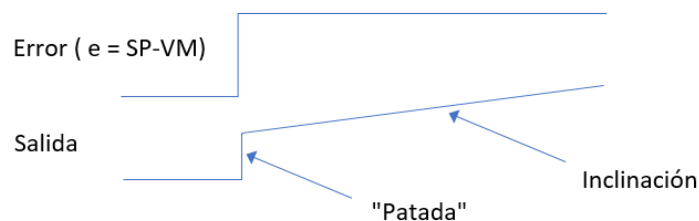


Figura 18. Combinación proporcional e integral.
(Starr, 2015).

La señal de salida muestra los dos componentes del controlador. La "Patada" es el cambio instantáneo que resulta el componente proporcional. La inclinación es el resultado del componente integral.

La ganancia T_i del proceso define el cambio a un estado estable en la variable de proceso. La ganancia del proceso es la simple relación entre el cambio en la salida del proceso y en cambio en la entrada del proceso. Por lo tanto, la ganancia de un proceso de primer orden está definida como la misma ganancia para un proceso de ganancia pura.

La constante de tiempo del proceso K_i define el tiempo transición dinámica. Este es la cantidad de tiempo que le toma al proceso ir de un valor en estado estable al próximo dado por el cambio en el actuador. La constante de tiempo es a menudo llamada "retraso". Esto es debido a que la respuesta del proceso se retrasa con respecto al cambio en la entrada (Starr, 2015). La Figura 19, muestra la respuesta de un controlador PI a un impulso del tipo escalón.

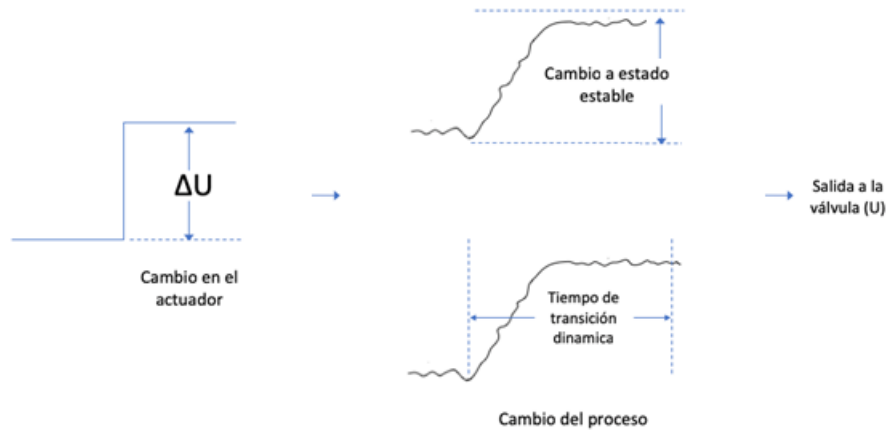


Figura 19. Respuesta de un controlador PI a un impulso escalón. (Starr, 2015).

Conforme la constante de tiempo incrementa, el tiempo que le toma al proceso para estabilizarse en una nueva posición en estado estable (cantidad de retraso) también incrementa. La cantidad de retraso es usualmente debido a la inercia del sistema. Si el sistema no tiene masa, el proceso cambiará instantáneamente con la entrada. La Figura 20, muestra diferentes tiempos de retraso conforme cambia la constante de tiempo.

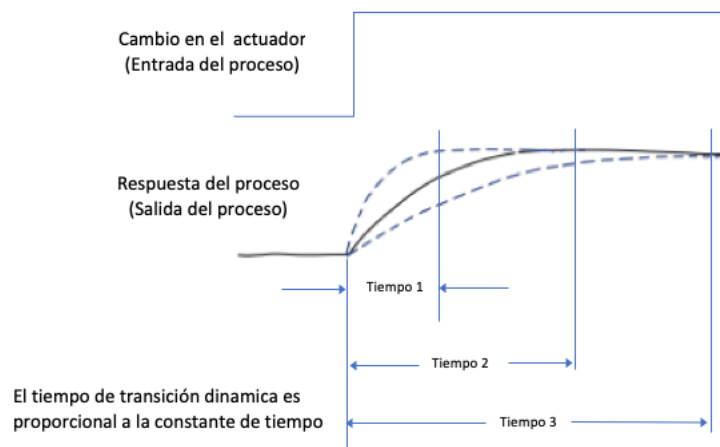


Figura 20. El tiempo de retraso cambia en proporción a la constante de tiempo. (Starr, 2015).

Ese caso sería un proceso de ganancia pura. La definición actual para la constante de tiempo es la cantidad de tiempo que le toma al proceso alcanzar el 63.2% de su valor final en estado estable. Este es el resultado del término exponencial encontrado en la solución matemática que define un proceso de primer orden. El término exponencial representa la parte dependiente del tiempo de un proceso de primer orden.

$$y(t) = U(t)K_p(1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}}) \quad (2.18)$$

El valor $e^{-\frac{t}{\tau_i}}$ se aproxima a cero a medida que el tiempo t se aproxima a infinito. Cuanto menor sea el valor de la constante de tiempo, más rápido este término tiende a cero y la respuesta de proceso alcanzará su nueva posición de estado estable.

- **Controlador derivativo.**

El modo derivativo es una mejora a la combinación PI. Los procesos que tienen grandes constantes de tiempo (retardos), tiempo muerto, o experimentan cambios súbitos en la carga necesita otro modo de control llamado acción derivativa. Este modo adiciona a la salida del controlador un valor que es proporcional a la tasa de cambio (derivativo) o velocidad del error. Este modo predice o anticipa el efecto de los cambios de carga en el valor medido basado en la derivación o tasa de cambio del proceso. La señal de salida es actualizada en una cantidad que es proporcional a la predicción. Todo esto es hecho para reducir la desviación del proceso respecto a su *set point* (Starr, 2015).

Un controlador de retroalimentación (*feedback*) debe tener un error antes de que una corrección en la salida sea hecha. El modo derivativo trata de ver el futuro basado en las condiciones actuales y entonces solucionar problemas que puedan presentarse. Si el proceso comienza a alejarse de su *set point* rápidamente, el modo derivativo asume que el proceso continuará de la misma manera en el futuro (Starr, 2015). La Figura 21, muestra la acción del control derivativo.

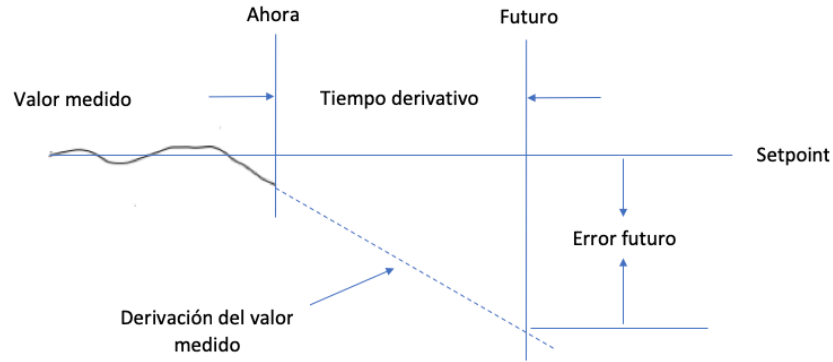


Figura 21. Modo derivativo de un proceso.
(Starr, 2015).

Si la acción derivativa del controlador calcula una tasa de cambio en la señal de error valor de/dt de 2.0%/s y el controlador tiene un tiempo derivativo de 2.0 segundos, entonces el modo derivativo predice que el error futuro será del 4.0% en 2.0 segundos ($2.0\%/seg * 2.0 seg = 4.0\%$). La Figura 22, muestra la diferencia entre la respuesta de salida de un controlador PI y un controlador PI+D.

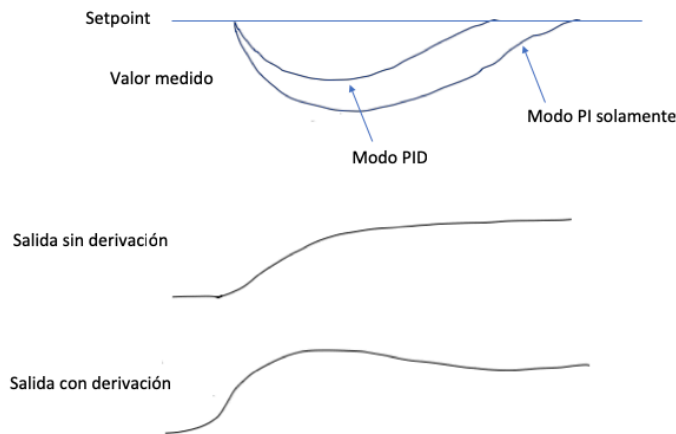


Figura 22. Salida del proceso con y sin derivación.
(Starr, 2015).

Los cambios de carga afectan a los controladores PI más que a los controladores de proceso PI+D porque el modo derivativo adiciona una cantidad adicional a la señal de salida que causa que el proceso detenga su desviación y comience a regresar a su *set point* más rápidamente. La acción derivativa (tasa de cambio) no

cambia la acción integral (*reset*). Sin embargo, temporalmente reduce la banda proporcional durante trastornos repentinos y rápidos. Esto tiene el efecto de incrementar la cantidad de corrección proporcional a la señal de salida (Starr, 2015).

La acción derivativa T_d es ajustable y es leída es unidades de tiempo. En forma de ecuación, la salida estándar de un controlador PID se ve de la siguiente manera:

$$U(t) = K_p(e + \frac{1}{T_i} \int edt + T_d \frac{de}{dt}) \quad (2.19)$$

Por lo tanto, el modo derivativo adiciona una cantidad a la señal de salida que está basada en la tasa de cambio de/dt de la señal de error multiplicada para la constante de sintonización derivativa. La tasa de cambio es esencialmente la inclinación de la curva de la señal de error cuando se grafica contra el tiempo (Starr, 2015).

- **Controlador PID.**

El diagrama de bloques de la forma estándar de un controlador PID se representa como se muestra en la Figura 23.

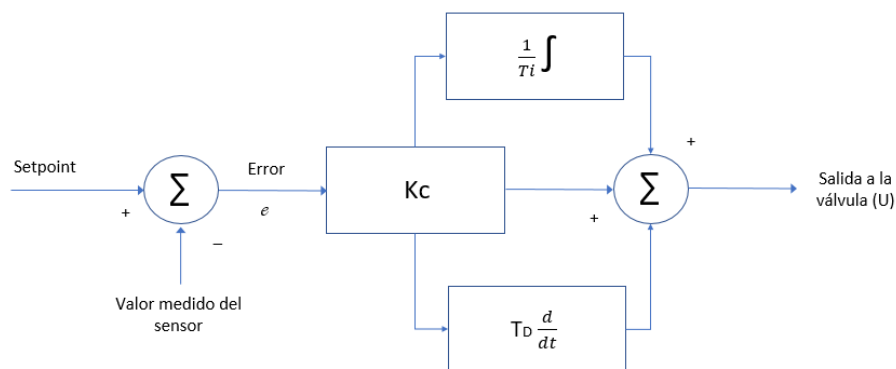


Figura 23. Forma estándar de un controlador PID.
(Trevathan, 2006)

Un tiempo largo derivativo puede causar excesivos cambios en un actuador, lo cual podría llevar a una oscilación del proceso, su ajuste debe hacerse con cuidado o se generará una señal de control con ruido aleatoria. La acción derivativa es una función de la pendiente de la línea, si la pendiente en cualquier punto de la señal es infinita, la acción derivativa calculará que el error futuro será infinito. Esta es la razón por lo que la acción derivativa no debería usarse en procesos que cambian rápidamente con constantes de tiempo pequeñas o en lazos de control con excesivo ruido. La acción derivativa debe usarse en procesos con lenta reacción, procesos estables con grandes constantes de tiempo y bajo ruido (Nise, 2011). El resultado de la acción derivativa con ruido puede verse como la Figura 24.

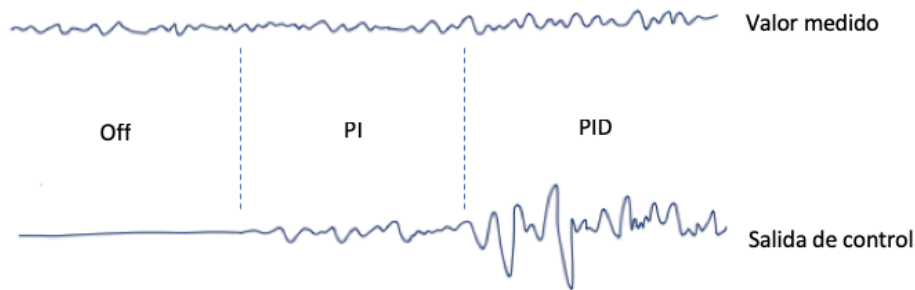


Figura 24. Acción derivativa en una señal con ruido.
(Starr, 2015).

El modo derivativo calculará la inclinación de la señal de paso. Si la definición de pendiente es aumento sobre ejecución y la señal de error es un escalón que se eleva sobre el tiempo cero. Esto produce una pendiente infinita. Esto podría causar que el elemento final de control vaya al 100% y regrese, esto es perjudicial para cualquier actuador (Nise, 2011).

2.4.2. Sintonización del controlador

El proceso de seleccionar los parámetros del controlador que cumplan con las especificaciones de comportamiento dadas se conoce como sintonía del controlador. Ziegler y Nichols sugirieron reglas para sintonizar los controladores PID

(esto significa dar valores a K_p , T_i y T_d) basándose en las respuestas escalón experimentales o en el valor de K_p que produce estabilidad marginal cuando sólo se usa la acción de control proporcional (Ogata, 2010).

Los dos métodos de sintonía de Ziegler-Nichols sugieren un conjunto de valores de K_p , T_i y T_d que darán una operación estable al sistema. Sin embargo, la respuesta resultante puede presentar sobre elongación de forma que resulte no conveniente. En tal caso se ajustará hasta obtener el resultado deseado. Por lo tanto, las reglas de sintonía de Ziegler-Nichols solo dan una estimación razonable de los parámetros del controlador y son un punto de partida para una sintonía fina.

- **Primer método.**

Este primer método se aplica si la respuesta a una entrada escalón muestra una curva con forma de S, ya que se caracteriza por dos parámetros: el tiempo de retardo L y la constante de tiempo T . Ambos parámetros se determinan dibujando una recta tangente en el punto de inflexión de la curva y determinando las intersecciones de esta tangente con el eje del tiempo y con la línea $c(t) = K$, tal como se muestra en la Figura 25.

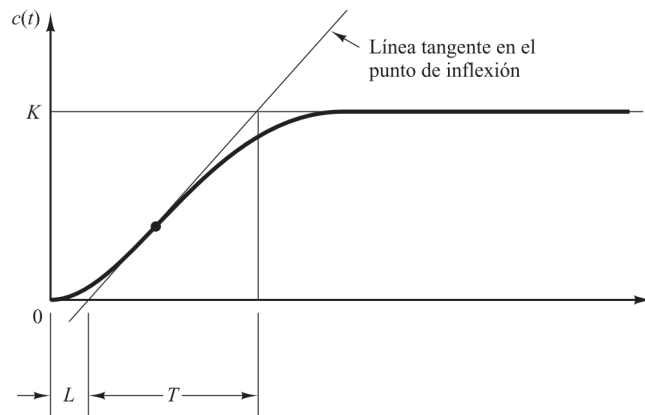


Figura 25. Curva de respuesta del sistema en forma de S. (Ogata, 2010).

Ziegler y Nichols establecieron los valores de K_p , T_i y T_d de acuerdo con la fórmula que se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Regla de sintonía de Ziegler-Nichols basada en la respuesta escalón de la planta (primer método).

Topo de controlador	Kp	Ti	Td
P	$\frac{T}{L}$	α	0
PI	$0.9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PD	$1.2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

(Ogata, 2010).

El controlador PID sintonizado mediante este método se simplifica de la siguiente manera (Ogata, 2010):

$$G_c(S) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i S} + T_d S \right) \quad (2.20)$$

$$G_c(S) = 1.2 \frac{T}{L} \left(1 + \frac{1}{2LS} + 0.5LS \right) \quad (2.21)$$

$$G_c(S) = 0.6T \frac{\left(s + \frac{1}{L} \right)^2}{s} \quad (2.22)$$

• **Segundo método.**

En este método se fija $Ti=a$ y $Td=0$, y la acción de control proporcional Kp se incrementa desde 0 hasta un valor crítico Kcr hasta que la salida presente oscilaciones sostenidas. Si la salida no presenta oscilaciones sostenidas para cualquier valor que pueda tomar Kp , entonces este método no se puede aplicar. De este modo, la ganancia crítica Kcr y el periodo Pcr (medido en segundos) correspondiente se determinan experimentalmente como se muestra en la Figura 26.

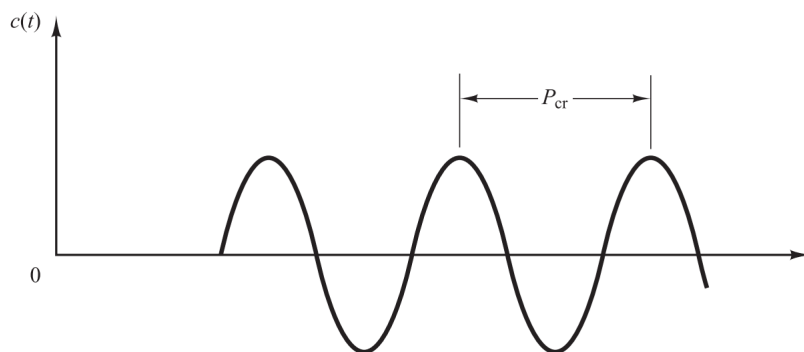


Figura 26. Oscilación sostenida con periodo Pcr . (Ogata, 2010).

Ziegler-Nichols sugirieron que se establecieran los valores de los parámetros K_p , T_i y T_d de acuerdo con la Tabla 3.

Tabla 3. Regla de sintonía de Ziegler-Nichols basada en la ganancia crítica K_{cr} y periodo crítico P_{cr} (segundo método).

Topo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	$0.5 K_{cr}$	α	0
PI	$0.45 K_{cr}$	$\frac{1}{1.2} P_{cr}$	0
PD	$0.6 K_{cr}$	$0.5 P_{cr}$	$0.125 P_{cr}$

(Ogata, 2010).

El controlador PID sintonizado mediante el segundo método de las reglas de Ziegler-Nichols se simplifica como:

$$G_c(S) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i S} + T_d S \right) \quad (2.23)$$

$$G_c(S) = 0.6 K_{cr} \left(1 + \frac{1}{0.5 P_{cr} S} + 0.125 P_{cr} S \right) \quad (2.24)$$

$$G_c(S) = 0.075 K_{cr} P_{cr} \frac{\left(S + \frac{4}{P_{cr}} \right)^2}{S} \quad (2.25)$$

2.5. CONTROLADORES LÓGICOS PROGRAMABLES

Un controlador lógico programable (PLC) es un equipo electrónico industrial que realiza operaciones binarias discretas o matemáticas continuas. En sus inicios fue pensado como equipo de reemplazo de relevadores eléctricos en la industria automotriz, sin embargo, ahora se usa en prácticamente en todo tipo de industria. Aunque eran comúnmente conocidos como PC antes de 1980, PLC se convirtió en la abreviatura aceptada para controladores lógicos programables (Lipták, 2006).

El PLC recibe distintas señales del proceso como: sensores, botones, instrumentos de medición, válvulas; y de acuerdo con su lógica programada, envía señales a actuadores como: motores, válvulas, luces piloto, electroválvulas, alarmas, etc. Además, puede recibir señales eléctricas de comandos de operadores y generar reportes o historial de las variables de proceso.

Los PLC se pueden encontrar hoy en día en diferentes tamaños que dependen de su capacidad de procesamiento o por sus características de supervisión integrada y habilidades de comunicación industrial. La Figura 27, muestra un ejemplo de un PLC comercial de la marca Allen Bradley, de la familia 1769.



Figura 27. PLC 1769-L33ER de Allen Bradley.
(Rockwell Automation, 2022).

Los componentes principales de un PLC son: el CPU, fuente de alimentación, memoria interna, bus de campo, módulos de entrada y/o salida y el software necesario para su programación como lo muestra la Figura 28.

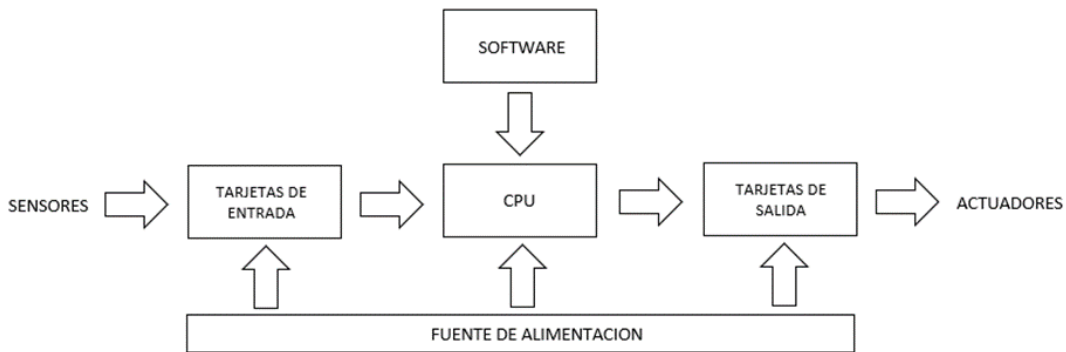


Figura 28. Estructura interna de un PLC.
Elaboración propia.

PLC's especializados cuentan con redundancia es su procesador, fuente de alimentación de voltaje para entradas y salidas. Estos PLC's de seguridad se utilizan en procesos críticos donde un paro en su funcionamiento ocasionaría accidentes.

Los PLC pueden ser fijos, con entradas y salidas embebidas sin posibilidad de expansión, además de PLC modulares que se pueden ampliar sus características conforme el proceso lo necesite. En los sistemas modulares se tienen módulos de diversas cantidades de entrada o salida, con señales discretas o analógicas, además de módulos de diferentes protocolos de comunicación y módulos de alta velocidad para variables críticas, entre otros (QuimiNet.com, 2022).

Algunas de las ventajas que ofrecen los PLC's son:

- Menor tiempo en la elaboración de proyectos
- No es necesario dibujar el diagrama eléctrico
- Posibilidad de modificar secuencias sin modificar cableado
- Mínimos espacios de instalación.
- Menor costo de mano de obra
- Rápida resolución de fallas
- Posibilidad de operar varias máquinas a la vez.
- Mayor rapidez en la instalación

La normativa internacional IEC 61131 define los siguientes lenguajes de programación para PLC (International Electrotechnical Commission, 2013):

- **Lista de instrucciones (IL).**

Es el más antiguo de los lenguajes y fue creado en Europa. Es un lenguaje de manera textual y de bajo nivel, y se asemeja a los programas de ensamblador. IL es el que está más cerca de la máquina y por tanto no está pensado para expertos en instalaciones y dispositivos de control sino para personas con formación en informática y electrónica digital.

IL está formado por una serie de instrucciones, cada instrucción comienza en una línea nueva, contiene un operador y uno o más operandos separados por comas. Cada valor se carga en un acumulador, se ejecutan las operaciones extrayendo valores del acumulador y almacenando los nuevos valores.

- **Diagramas de escalera (LD).**

El lenguaje de escalera creado en Estados Unidos es un lenguaje de programación gráfico basado en esquemas de control eléctrico de relevadores. En un diagrama de escalera la energía se desplaza de izquierda a derecha, en un circuito típico los contactos o entradas se colocan en la parte izquierda y una bobina (que simula un relevador) o salidas se colocan en la parte derecha. La lógica de control que representan estos circuitos puede verse como una inferencia lógica que tiene como antecedente la lógica booleana.

Las desventajas de este lenguaje es que solo es adecuado para variables discretas, ya que es difícil manipular variables analógicas y realizar operaciones aritméticas, es un lenguaje limitado para operar matrices y bucles por lo que es común la duplicación de código. Para programar algoritmos de control en un PLC con diagramas de escalera, además de estar familiarizado con las reglas de los circuitos de conmutación, es necesario conocer cada uno de los elementos de que consta este lenguaje.

- **Diagramas de bloques de funciones (FBD).**

Es un lenguaje gráfico que describe una función entre las variables de entrada y salida, como un conjunto de bloques elementales que están conectados por líneas de conexión. Es común en la industria ya que se representa mediante un conjunto de bloques de funciones a la manera de los diagramas de circuitos de electrónica. Lo que quiere decir que el sistema se programa en términos de flujo de señales entre elementos de procesamiento.

Las entradas y salidas de los bloques están conectadas mediante enlaces y pueden usarse para conectar dos o más puntos lógicos del diagrama, ya sea una variable de entrada con una entrada del bloque, una salida de un bloque con una entrada de otro bloque, o una salida de un bloque con una variable de salida.

- **Texto estructurado (ST).**

Es un lenguaje textual de alto nivel basado en PASCAL ó C++, se compone de dos tipos de declaraciones: de asignación, para asignar un valor a una variable y de control, como sentencias de selección y sentencias de repetición. Cada declaración se compone de: Variables, Constantes, Operadores y Funciones.

Contiene todos los elementos esenciales de un lenguaje de programación moderno, incluyendo selección del flujo de ejecución condicional (IF-THENELSE y CASE OF) y lazos de iteración (FOR, WHILE y REPEAT), que pueden ser anidados. Soporta además instrucciones aritméticas complejas por lo que son excelentes para ser usados a la par de cualquier otro lenguaje.

- **Bloques de funciones secuenciales (SFC).**

El lenguaje de diagrama funcional secuencial está orientado gráficamente a describir el orden cronológico de acciones concretas en un programa. Estas acciones se asignan a elementos de paso y los elementos de transición controlan la secuencia de procesamiento y se usan ampliamente para presentar algoritmos, flujos de trabajo o flujos de procesos.

Un programa en SFC consta de Pasos (Etapas), Transiciones y acciones. El proceso se divide en etapas, que se activarán o desactivarán secuencialmente por lo que sólo algunas de las etapas se pueden encontrar activas en cada ciclo del proceso. Cada etapa se identifica con un número que debe ser único y no necesariamente debe guardar un orden acorde con la secuencia del proceso.

Una transición se representa por una línea horizontal a través de una línea vertical entre dos etapas. Una transición no solo puede tener un paso de entrada y un paso de salida, también puede tener dos o más pasos de entrada y dos o más pasos de salida, conectados por los enlaces dirigidos.

Una transición contiene la condición lógica de variables de entrada y del sistema interno que permite la transferencia de un paso a otro al ser verdadera, lo que

significa la desactivación de todos sus pasos de entrada y la activación de todos sus pasos de salida.

Una o más acciones están asociadas a cada etapa. Estas acciones solo estarán activas cuando la etapa esté activa. La activación de una condición de transición indica la activación de la etapa siguiente y la desactivación de la etapa anterior.

Las ventajas de los gráficos de funciones secuenciales es que proporciona una representación esquemática de secuencias de control en un programa, similar a un diagrama de flujo, es útil para operaciones de control secuencial. Muestra los principales estados de un sistema y todos los posibles cambios de estado.

2.5.1. Lógica de escalera

En la lógica de escalera, dos líneas verticales representan líneas eléctricas virtuales, y la corriente eléctrica real se reemplaza por una ruta lógica. Una línea horizontal representa un peldaño lógico. Las entradas se muestran cerca de la línea vertical izquierda y las salidas se muestran cerca de la línea vertical derecha en un peldaño. Cuando las entradas tienen el estado lógico 1 o VERDADERO, la ruta lógica a las salidas se completa, y las salidas obtienen el estado lógico 1 o VERDADERO (Lipták, 2006).

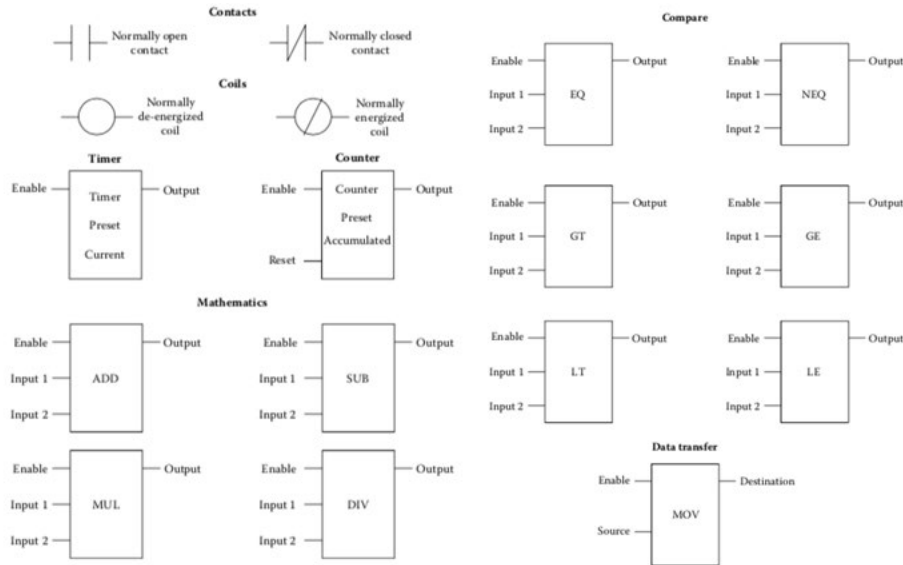


Figura 29. Símbolos gráficos de instrucciones de lógica de escalera. (Lipták, 2006)

A continuación, se describe el funcionamiento de las instrucciones básicas en lógica de escalera (Lipták, 2006).

- **Contacto.**

Esta es una instrucción de entrada. Puede utilizarse para representar una entrada digital externa o una memoria interna. Hay dos tipos básicos de contactos: Normalmente abierto (NO), se usa para representar una señal de entrada que normalmente está apagada y se activará cuando se opere; y Normalmente cerrado (NC), se usa para representar una señal de entrada que normalmente está encendida y se apagará cuando se opere.

- **Bobina.**

Esta es una instrucción de salida. Puede utilizarse para representar una salida digital externa o una memoria interna. Se activará o desactivará cuando todas los contactos o entradas del renglón donde se ubica estén activadas.

- **Temporizador.**

Esta es una instrucción de tiempo y se utiliza para retrasar un evento o para cronometrar un evento. Generalmente, una instrucción de temporizador tiene

entrada de habilitación, valor de tiempo preestablecido, valor de tiempo transcurrido y una señal de salida. Los tiempos preestablecidos y transcurridos se almacenan en los registros de la memoria del PLC.

Hay dos tipos básicos de temporizadores: El temporizador de retardo (*on-delay*) se utiliza para retrasar la activación de una salida. Cuando se activa la condición de habilitación, el temporizador comienza a cronometrar y una vez que alcanza el valor de tiempo preestablecido, la salida del temporizador se activa. La salida permanece activada mientras la señal de entrada de habilitación esté activada. El temporizador de retardo a la desconexión (*off-delay*) se utiliza para retrasar la desactivación de una salida. Cuando se activa la habilitación, se activa la salida y el temporizador comienza a cronometrar, la salida del temporizador permanece activa hasta que se alcanza el valor de tiempo preestablecido.

En la Figura 30, se muestra el diagrama de funcionamiento de acuerdo con el tiempo para estos temporizadores.

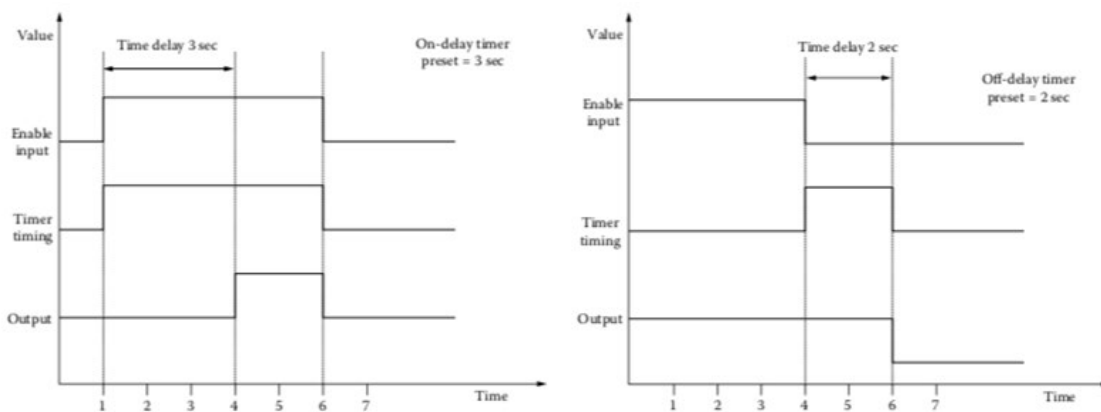


Figura 30. Diagrama de funcionamiento para temporizadores.
(Lipták, 2006)

- **Contador.**

Esta es una instrucción de conteo. El contador es usado para contabilizar el número de eventos de cierto suceso. Generalmente, una instrucción de contador tiene una entrada de habilitación, un valor de conteo preestablecido, un valor de conteo acumulado, una entrada de reinicio y una señal de salida.

Hay dos tipos básicos de contadores: El contador ascendente, cuando la condición de habilitación se activa, el valor acumulado del contador se incrementa en 1. Cada vez que se produce esta transición, el valor acumulado del contador aumenta en 1. El contador descendente, se utiliza para la cuenta regresiva. El valor acumulado se ajusta al valor preestablecido. Cuando la condición de habilitación se activa, el valor acumulado del contador disminuye en 1. Cada vez que se produce esta transición, el valor acumulado del contador disminuye en 1. Cuando el valor acumulado llega a 0, La salida del contador se enciende. La salida permanece activa hasta que se reinicia el contador.

La Figura 31, muestra un diagrama de tiempo de contadores.

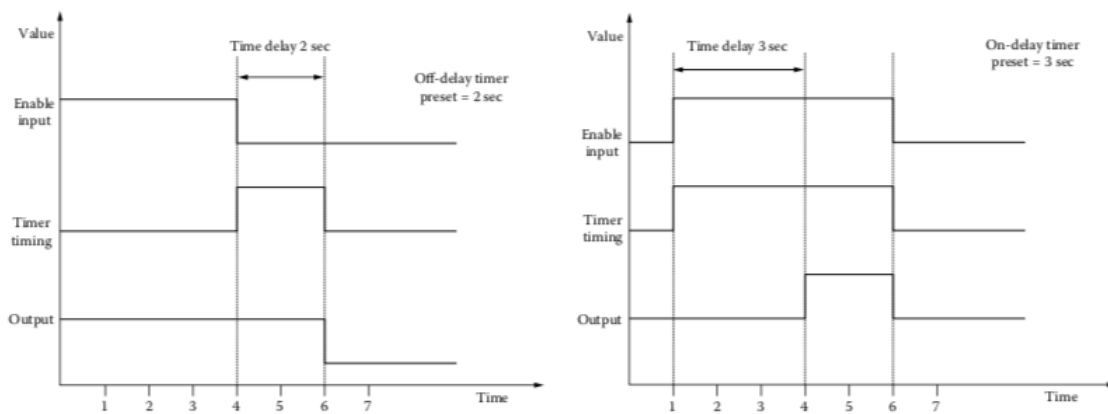


Figura 31. Diagrama de tiempo para instrucciones de conteo. (Lipták, 2006)

2.6. CONTROL ESTADÍSTICO DE PROCESO

No existen productos o servicios iguales porque los procesos de producción incluyen distintas fuentes de variación, incluso cuando los procesos se diseñan de forma adecuada. Por ejemplo, el control de temperatura de un horno puede ser afectado por la temperatura ambiente o la temperatura de procesos cercanos. La función de los ingenieros de procesos es eliminar o mantener dentro de tolerancias admisibles estas variaciones de los distintos procesos. La Figura 32, muestra tres tipos de salidas de un proceso: a) el proceso fuera de control, b) el proceso bajo control,

pero fuera de sus tolerancias, y c) el proceso bajo control dentro de sus tolerancias (Carro Paz & González Gómez, 2006).

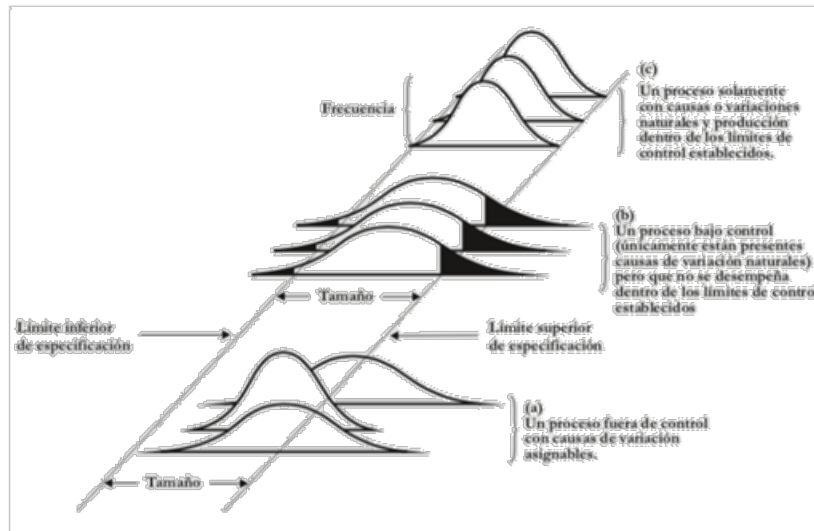


Figura 32. Tipos de salida de un proceso.
(Carro Paz & González Gómez, 2006).

Los métodos de control estadístico de procesos (CEP) se usan para medir la calidad de un producto o de un servicio, así como para detectar si el proceso ha cambiado de alguna forma que tenga como consecuencia la afectación de la calidad del producto final.

2.6.1. Gráficas de control por variables

Las gráficas de control por variables son utilizadas para monitorear la media y la variación de la distribución de un proceso. Los límites de control se utilizan para determinar si hay que hacer alguna acción correctiva o mejora al proceso. El valor más grande indica el límite de control superior (UCL) y el valor más pequeño indica el límite de control inferior (LCL) (Carro Paz & González Gómez, 2006).

- **Gráficas R.**

Una gráfica R, se usa para monitorear la variación de un proceso. Si necesita calcular el rango de un conjunto de datos, se resta la medición más pequeña a la

medición más grande obtenida en cada muestra. Si cualquier dato esta fuera de los límites de control, se dice que la variabilidad del proceso no está bajo control.

Los límites de control para la gráfica R son:

$$LCL_R = D_3\bar{R} \quad (2.26)$$

$$UCL_R = D_4\bar{R} \quad (2.27)$$

donde:

\bar{R} es el promedio de valores de R y la línea central de la gráfica de control.

D_3 y D_4 son las constantes que proporcionan tres acotamientos de desviación estándar (tres sigma) para un tamaño de muestra dado.

Los valores de las constantes D_3 y D_4 se cambian en función del tamaño de la muestra. Los valores de las constantes se muestran en la Tabla 2-3, y se puede analizar que la expansión entre los límites de control se reduce cuando incrementa el tamaño de la muestra. Esto es consecuencia de tener más datos como base para hacer un cálculo del rango del proceso (Carro Paz & González Gómez, 2006).

Tabla 4. Factores para estimar limites tres sigmas para la gráfica X y la gráfica R.

Tamaño de la muestra (n)	Factor para UCL y LCL para graficas X (A_2)	Factor para LCL para graficas R (D_3)	Factor para UCL para graficas R (D_4)
2	1,880	0	3,267
3	1,023	0	2,575
4	0,729	0	2,282
5	0,577	0	2,115
6	0,483	0	2,004
7	0,419	0,076	1,924
8	0,373	0,136	1,864
9	0,337	0,184	1,816
10	0,308	0,223	1,777

(Carro Paz & González Gómez, 2006).

- **Gráficas X.**

Para la medición de una media se usa una gráfica X. Cuando las causas de la variación de un proceso han sido identificadas y la variabilidad del proceso está dentro del control estadístico, se puede construir una gráfica X (Carro Paz & González Gómez, 2006).

Los límites de control para la gráfica X son:

$$UCL_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} + A_2\bar{R} \quad (2.28)$$

$$LCL_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} - A_2\bar{R} \quad (2.29)$$

donde:

$\bar{\bar{X}}$ es la línea central de la gráfica y el promedio de las medidas de una muestra pretérita o un valor establecido como objetivo para el proceso.

A_2 es la constante para proporcionar acotamientos tres sigma para una medida de la muestra.

Los valores de A_2 están dados en la Tabla 2-3. Se observa que en los límites de control se utiliza el valor de R ; por lo que, la gráfica X debe generarse después de que la variabilidad del proceso este bajo control.

2.6.2. Capacidad del proceso

Los métodos de control estadístico ayudan a mantener una distribución de procesos que no varía en su media y su varianza. Los límites de control indican cuándo cambia la media o la variabilidad del proceso. Sin embargo, un proceso que está bajo control estadístico no significa que siempre de como resultado productos o servicios de acuerdo con sus especificaciones de diseño porque los límites de control se basan en la media y en la variabilidad de la distribución de muestreo, no en las especificaciones del diseño.

La capacidad de un proceso es la capacidad cumplir las especificaciones de diseño de un producto o de un servicio. Es común que las especificaciones de diseño se expresen como un valor nominal, un objetivo, y como una tolerancia \pm del valor nominal. Por ejemplo, las especificaciones de diseño de la vida útil de una lámpara indican un valor nominal de 2000 horas con una tolerancia de ± 200 horas. Esta tolerancia indica una especificación superior de 2200 horas y una inferior de 1800 horas. El proceso de producción de las lámparas debe de fabricarlas dentro de esas especificaciones de diseño; de no ser así, habrá cierto porcentaje de lámparas de mala calidad. También es interés detectar los casos en que la vida útil de las lámparas rebasa las 2200 horas, para poder detectar mejoras en los procesos (Carro Paz & González Gómez, 2006).

En la Figura 33, se observa la relación entre las especificaciones superior e inferior y una distribución de procesos para el proceso de fabricación de lámparas, bajo dos condiciones diferentes. En a) el proceso es capaz debido a que los extremos de la distribución se encuentran dentro de las especificaciones superior e inferior y en b) el proceso no es capaz porque produce muchas lámparas de vida útil corta.

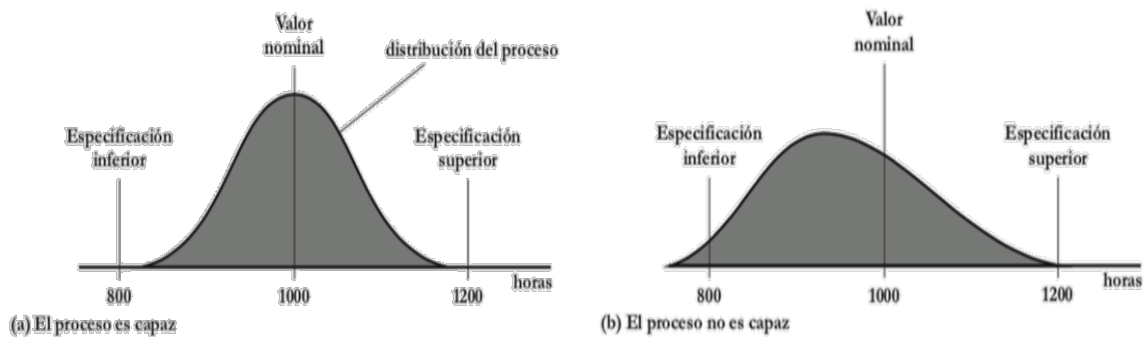


Figura 33. Relación entre las especificaciones y la distribución de un proceso. (Carro Paz & González Gómez, 2006).

En la Figura 34, se muestra que mientras menor sea la variabilidad (representada por desviaciones estándar más bajas), menor será la producción defectuosa. Se observa que si una empresa que tiene calidad 2 sigmas (los límites de tolerancia equivalentes a la media de la distribución del proceso, ± 2 desviaciones estándar) genera 4,56% de piezas de mala calidad; es decir, 45.600 piezas defectuosas por

millón. Una empresa que tiene calidad 4 sigmas genera sólo 0,0063% de piezas con defectos; es decir 63 partes defectuosas por millón. Por último, una empresa con calidad 6 sigma genera solo 0,0000002% de piezas defectuosas, es decir, 0,002 partes defectuosas por millón.

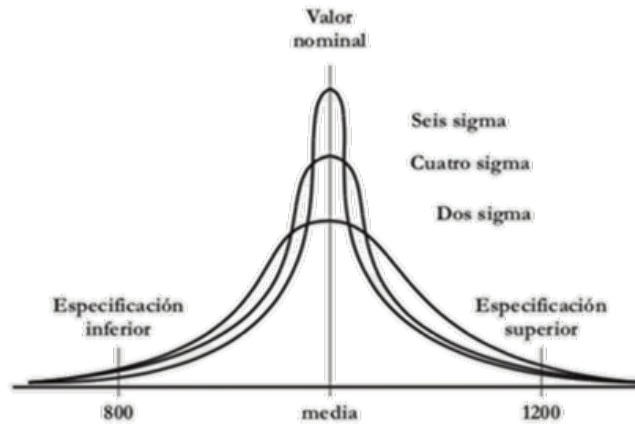


Figura 34. Efectos de la reducción de la variación sobre la capacidad del proceso. (Carro Paz & González Gómez, 2006).

Para determinar en forma cuantitativa si un proceso es capaz se usan dos medidas para valorar la capacidad de un proceso: el índice de capacidad de proceso y la razón de capacidad de proceso.

- **Razón de capacidad de proceso.**

Se dice que un proceso es capaz si tiene una distribución cuyos valores extremos se localizan dentro de las especificaciones superior e inferior. Generalmente la mayoría de los valores de una distribución se encuentran dentro de ± 3 desviaciones estándar de la media. En otras palabras, el rango de valores de la medición de calidad generados por el proceso es de 6 desviaciones estándar. Por lo que, si un proceso es capaz, la diferencia entre la especificación superior y la inferior debe ser mayor que 6 desviaciones estándar. La razón de proceso, C_{PK} , se define (Carro Paz & González Gómez, 2006):

$$C_{PK} = \text{Mínimo de} \left[\frac{\bar{X} - \text{Especificación inferior}}{3\delta} ; \frac{\text{Especificación superior} - \bar{X}}{3\delta} \right] \quad (2.30)$$

Se selecciona el valor mínimo de las 2 razones porque muestra la situación que ocurriría en el peor de los casos. Si C_{PK} es mayor que un valor crítico de 1.0 y la razón de la capacidad del proceso es mayor que su valor crítico, afirmaríamos que el proceso es capaz. Si C_{PK} es menor que 1.0, entonces el promedio del proceso estará cerca de los límites de tolerancia y se producirán piezas con muchos defectos.

- **El índice de capacidad.**

El índice de capacidad será menor o igual que la razón de capacidad. Cuando C_{PK} es igual a la razón de capacidad, este estará centrado entre las especificaciones superior e inferior, por lo que la media de la distribución está centrada en el valor nominal de las especificaciones (Carro Paz & González Gómez, 2006).

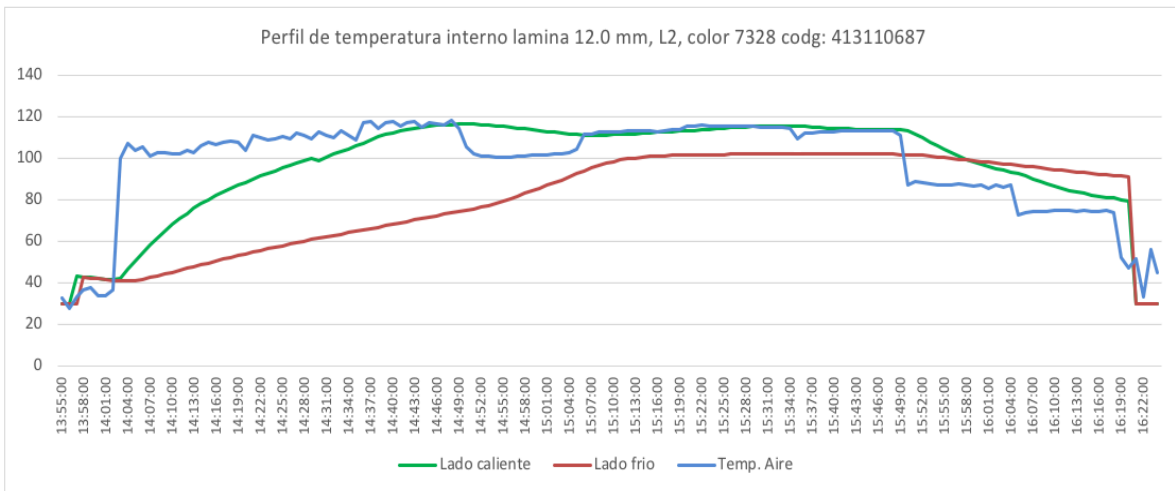
3. PROCEDIMIENTO

En esta unidad se muestra el desarrollo de la metodología para homogenizar la dureza de una lámina de acrílico en toda su superficie en el proceso de post-curado, para que cumpla con los valores definidos en los planes de fabricación.

3.1. ANÁLISIS DEL PROCESO ACTUAL DE POST-CURADO

Los planes de calidad indicados por la empresa Plastigas de México SA de CV para la fabricación de lámina acrílica indican que, para lograr una dureza del producto mínima de 90 HRM es necesario que la temperatura interna de la lámina durante el proceso de post-curado logre 105°C durante un mínimo de 30 minutos.

La Figura 35 muestra una gráfica con los valores de la medición de las temperaturas internas de la lámina durante el proceso de post-curado, estas muestran que solo el lado caliente (*línea verde en la gráfica*) logra cumplir con la especificación, el lado frío (*línea roja en la gráfica*) no logra llegar a la temperatura necesaria en ningún momento. La línea azul representa la temperatura del aire en cada zona.



Tiempo lado caliente arriba de 105°C = 62 min

Tiempo lado frío arriba de 105°C = 0 min

Figura 35. Perfil de temperatura interna de una lámina de 12.0 mm, tamaño L2. Elaboración propia.

El diferencial de temperatura en el perfil de post-curado entre el lado caliente y el lado frío genera láminas con diferentes propiedades fisicoquímicas afectando principalmente a la dureza y a la Temperatura de Deflexión al Calor. El perfil de temperatura interno de la lámina se debe a la manera en que se calienta por lo que las características del horno influyen en el diferencial de temperatura.

El horno de post-curado tiene la siguiente configuración: 8 zonas de calentamiento y dos zonas de enfriamiento, cuenta con 15 turbinas para la recirculación del aire caliente y frío dentro del túnel interno, cada turbina tiene un motor de 7.5 HP, la transferencia de calor se lleva a cabo con la circulación de vapor a través de intercambiadores de en cada zona, 2 intercambiadores por zona. La Figura 36 muestra la distribución de las turbinas por zona en un horno de convección.

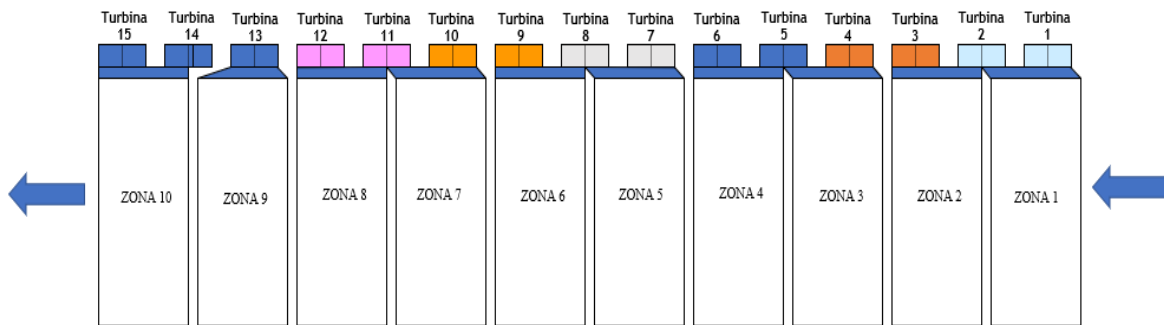


Figura 36. Distribución de turbinas por zona en horno de convección.
Elaboración propia.

La Figura 37 muestra el diseño del horno, se muestra las zonas de calentamiento y enfriamiento y como es el flujo del aire, entra por un extremo del horno (lado caliente) y sale por el otro extremo del horno (lado frío).

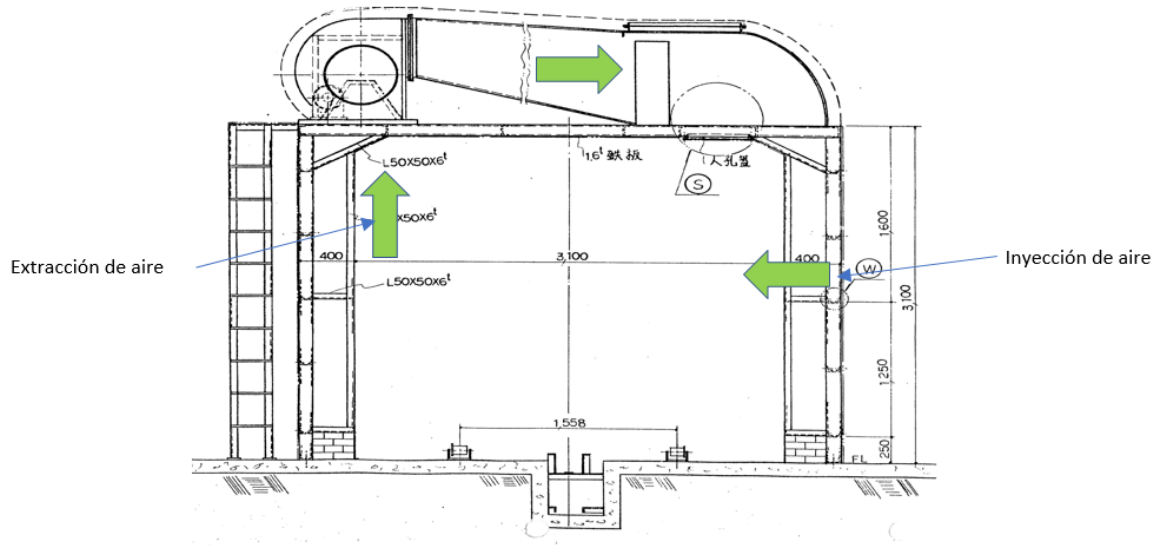


Figura 37. Configuración del horno de post-curado.
Elaboración propia.

La Figura 38 muestra el detalle de la inyección del aire al interior del horno por el lado caliente. La pared del horno cuenta con unas rejillas que direccionan el aire para cubrir la mayor cantidad de volumen posible al interior del horno.

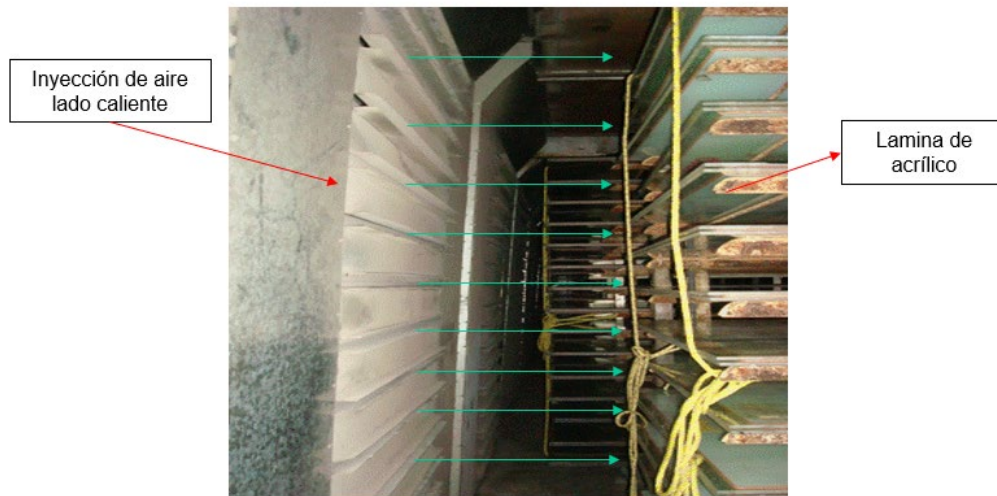


Figura 38. Detalle de inyección de aire caliente a lámina de acrílico.
Elaboración propia.

En la Figura 39, se muestra la parte superior del horno de convección, se observa el motor de 7.5 hp que mediante un sistema de transferencia mecánica banda-polea hace girar la turbina de aire para inyectar el aire. Se aprecia también la posición de los intercambiadores de calor donde el flujo de vapor de agua caliente en la tubería calienta el aire antes de ser inyectado al interior del horno.



Figura 39. Detalle del motor de turbina e intercambiadores de calor.
Elaboración propia.

En la Figura 40, se observa la configuración del horno de inducción, las 15 turbinas se ubican en una misma posición, esto quiere decir que a lo largo del horno el aire caliente siempre se inyecta desde el mismo extremo.



Figura 40. Vista superior del horno de inducción.
Elaboración propia.

De acuerdo con el análisis realizado se encontró que el tiempo de avance de la cadena de arrastre al interior del horno cambia en cada lote de producción, esto se debe a que la velocidad de la cadena de arrastre con que se traslada el lote de láminas en un estante metálico depende de los operadores. Esta variabilidad impacta directamente la temperatura interna del producto en la fase de post-curado y como consecuencia a la dureza de la lámina. En La Figura 41, se muestra un lote de láminas acrílicas a la entrada del horno de convección, las láminas se trasladan en un estante metálico y es trasladado mediante una cadena de arrastre situada en el piso a lo largo del horno.



Figura 41. Lote de material entrando al horno de post-curado.
Elaboración propia.

Otro aspecto crítico a considerar es que los lazos de control de temperatura de las zonas de calentamiento necesitan mejorar en su estabilidad. Los puntos de control de las diferentes zonas de calentamiento son: Zona 1 – 2 = 110°C, Zona 3-4 = 112°C, Zona 5-6 = 115°C, Zona 7-8 = 112°C. Se encontró que, en cada zona del horno, el tiempo en el que se llega a la temperatura de consigna no es el mismo en cada zona, por lo que la temperatura no permanece constante y se tiene una variabilidad de temperatura a lo largo del horno. Esto ocasiona que cuando el lote de láminas acrílicas transita a lo largo del horno, la lámina es expuesta a cambios de temperatura que afecta la homogeneidad del calentamiento y por consecuencia se tiene un impacto negativo en sus propiedades físicas como la dureza.

3.2. RECONFIGURACIÓN DEL HORNO DE POST-CURADO

Una vez realizado el análisis de la inestabilidad de la temperatura a lo largo del horno de post-curado, se concluye que con la configuración actual no es posible cumplir con el perfil de temperatura interno de la lámina durante el proceso por lo que se plantea intercambiar el flujo el aire caliente en dos zonas de calentamiento del horno, es decir, ahora el aire caliente entrara por al lado frio de la lámina.

Se seleccionaron las zonas de calentamiento 5 y 6 para hacer el cambio del flujo de aire ya que son zonas intermedias en la etapa de calentamiento. La Figura 42 muestra el trabajo realizado.



Figura 42. Modificación de la posición de las turbinas 5 y 6. a) Antes, b) Después. Elaboración propia.

Otra propuesta realizada fue modificar el diseño del interior del horno en las zonas 5 y 6, se acercaron las mamparas de inyección de aire caliente para que estén lo más cerca posible a la lámina de acrílico. Con esto, se pretende tener un mejor control en la temperatura interna del producto, ya que mientras menor sea la distancia entre la salida del aire caliente a temperatura controlada, menor son las pérdidas ocasionadas por el intercambio de calor con la temperatura al interior del horno.

En la Figura 43, se muestran los trabajos realizados en la pared lateral del horno. Al anexar las rejillas de inyección del aire caliente por el cambio de dirección del flujo de aire, estas se acercaron más al paso del estante con el lote las láminas de acrílico.



Figura 43. Modificaciones al Interior del horno en las zonas 5 y 6. a) Antes, b) Después.
Elaboración propia.

3.3. SINCRONIZACIÓN DEL AVANCE DE LA CADENA DEL HORNO

Para la automatización del avance de la cadena de arrastre al interior del horno, se utilizó el PLC de la marca *Allen Bradley* y de la familia *MicroLogix 1500* (Rockwell Automation, 2022). Esta automatización tiene como objetivo sincronizar la velocidad de avance del producto con la temperatura al interior del horno y la apertura y cierre de las puertas de entrada, intermedia y de salida del horno, de tal manera que la lámina de acrílico cumpla su perfil de calentamiento interno y se logren las especificaciones físicas deseadas.

Se realizaron pruebas específicas para laminas acrílicas donde se deseaban las mismas características físicas en diferentes lotes. El tiempo de proceso que se tenía inicialmente fue de 12 minutos por zona, con este tiempo se obtenía el perfil de temperatura en el lado frío de la lámina como lo muestra la Figura 44.

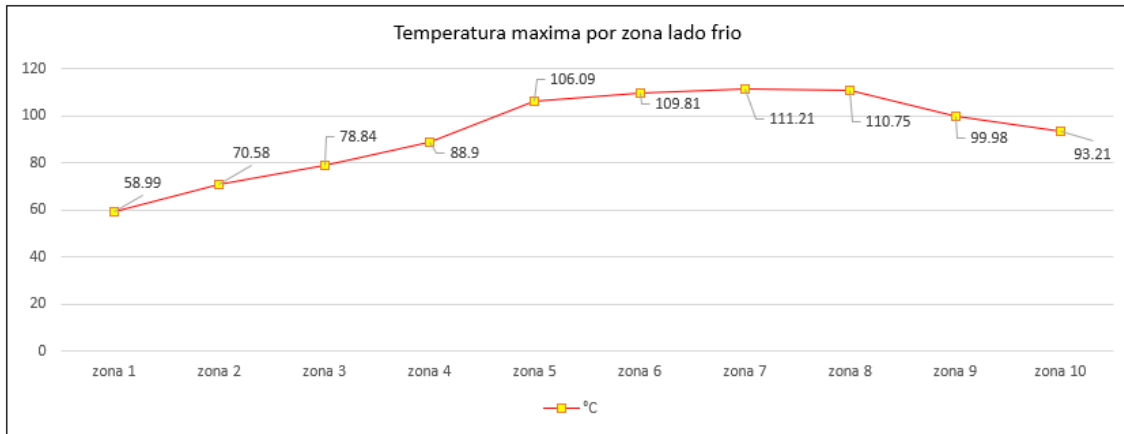


Figura 44. Temperatura máxima por zona en el lado frio con 12 minutos de recorrido. Elaboración propia.

Después de realizar varias pruebas se obtuvo un tiempo por cada una de las 8 zonas de calentamiento y dos de enfriamiento de 13.3 minutos. Con este tiempo de obtiene el perfil de temperatura que se muestra en la Figura 45. Se observa que no se afectan las fases anteriores y posteriores al post-curado y se logró un aumento de la temperatura promedio un 1.8% más en el pico de temperatura máxima por zona.

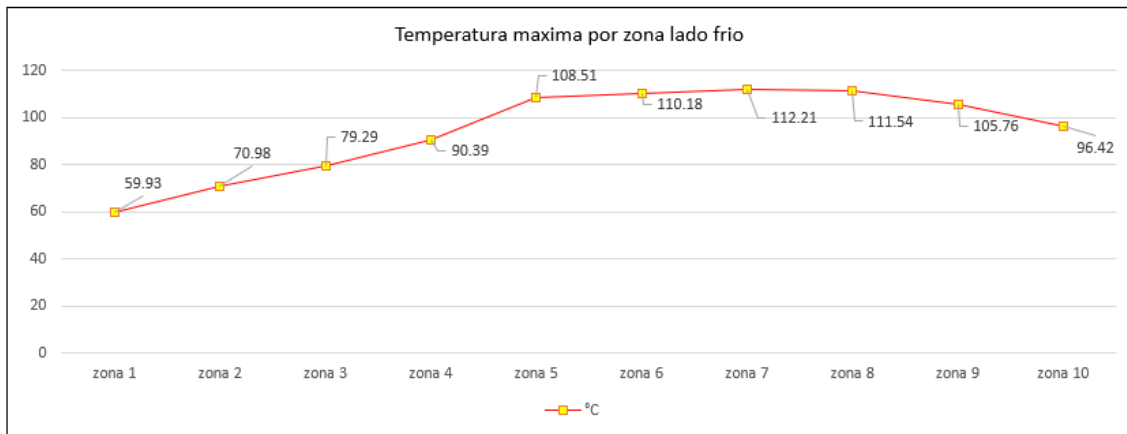


Figura 45. Temperatura máxima por zona en el lado frio con 13.3 minutos de recorrido. Elaboración propia.

En el Anexo A, se muestra el código en lenguaje de escalera de la programación tanto del avance de la cadena como del control de apertura y cierre de las puertas de entrada, intermedia y de salida del horno. El avance del material de

zona a zona se realiza por un tiempo de 69 segundos, con este tiempo el material queda al centro de cada zona de calentamiento y el aire caliente se distribuye con mayor eficiencia. Además, que con estos cambios el tiempo de post-curado ya no depende del operador.

3.4. CONTROL DE TEMPERATURA DE LAS ZONAS DE CALENTAMIENTO

Para la optimización de la sintonía de los lazos de control de temperatura de las zonas de calentamiento del horno de post-curado se utilizó el software *Matlab/Simulink* (MathWorks, 2018) para tener el modelo dinámico de la planta tomando como referencia datos experimentales. Se realizó un procedimiento con la herramienta *System Identification Toolbox* para obtener el modelo de la planta tanto para las zonas modificadas 5 y 6 como para el resto de las zonas. Se obtuvo como mejor aproximación para el calentamiento del horno un modelo representado con una ecuación de primer orden con un retardo. El comportamiento de la temperatura con los datos experimentales y con la ecuación obtenida excitada con una señal de entrada con un impulso escalón se muestra en la Figura 46.

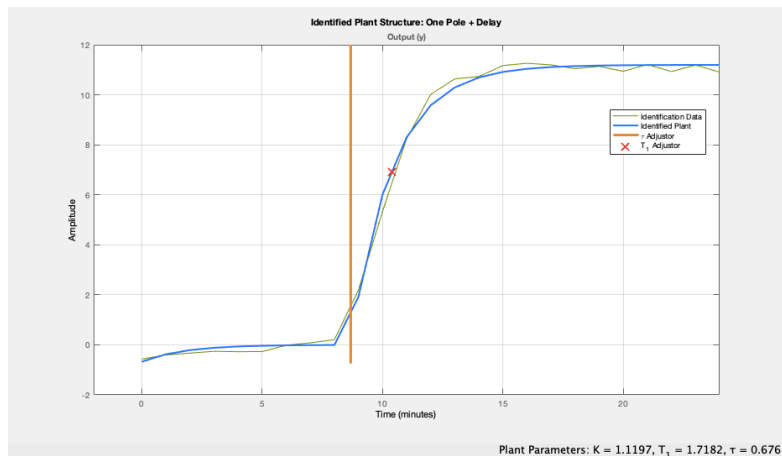


Figura 46. Modelo de planta de primer orden con retardo.
Elaboración propia.

La ecuación de transferencia del modelo matemático de primer orden con retardo de la planta que modela el comportamiento de la temperatura se muestra en la Figura 47. Esta figura es obtenida del software utilizado.

```
>> Plant1
Plant1 =
Process model with transfer function:
      Kp
      ----- * exp(-Td*s)
      1+Tp1*s

      Kp = 1.1116
      Tp1 = 1.2875
      Td = 1.17

Parameterization:
'PID'
Number of free coefficients: 3
Use "getpvec", "getcov" for parameters and their uncertainties.

Status:
Estimated using PROCEST on time domain data.
Fit to estimation data: 90.66%
FPE: 0.304, MSE: 0.2389
```

Figura 47. Modelo matemático de primer orden con retardo para el comportamiento de la temperatura.
Elaboración propia.

Se realizó también el controlador PID. Para la sintonización de las ganancias proporcional, integral y derivativa del controlador se realizó una aproximación de los valores con la librería *PID Tuner* del software *Matlab*. Se obtienen las ganancias con la mejor respuesta a una entrada escalón son: proporcional $K_P = 0.47648$, ganancia integral $K_i = 0.35187$ y ganancia derivativa $K_D = 0$. En la Figura 48, se tiene la respuesta del modelo matemático al controlador a una entrada de excitación tipo escalón.

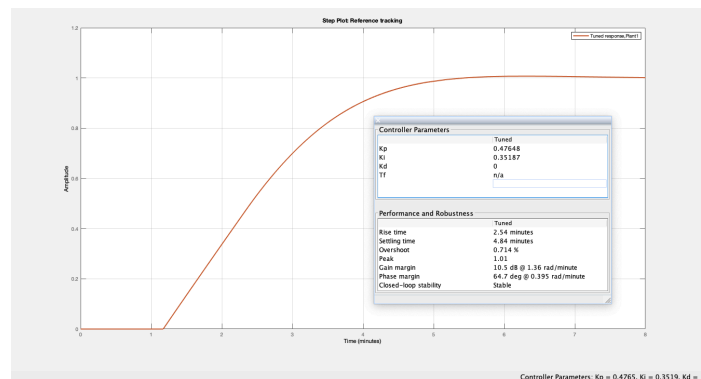


Figura 48. Respuesta del controlador propuesto a una entrada escalón.
Elaboración propia.

La Figura 49 presenta el modelo matemático del controlador, en este caso es del tipo Proporcional + Integral (PI) debido a que la ganancia obtenida para el modo derivativo fue cero.

```
>> Ccontroller
Controller =
      1
Kp + Ki * ---
      s
with Kp = 0.476, Ki = 0.352
Continuous-time PI controller in parallel form.
```

Figura 49. Modelo matemático del controlador PI.
Elaboración propia.

Utilizando la herramienta *Simulink* se construyó el diagrama de control con la planta y controlador obtenidos para simular y validar su funcionamiento. El diagrama en *Simulink* se muestra en la Figura 50; y la respuesta del controlador + planta se muestra en la Figura 51.

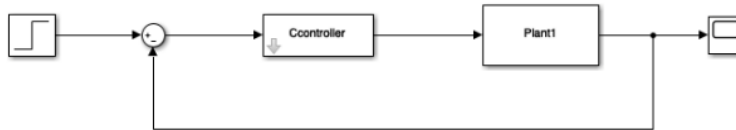


Figura 50. Sistema de control con la planta y controlador en Simulink.
Elaboración propia.

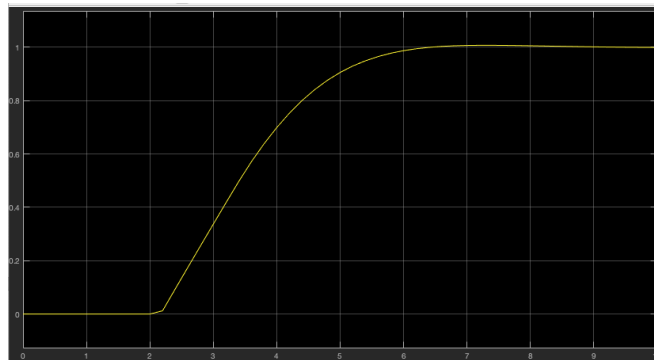


Figura 51. Respuesta a un impulso escalón de la planta + controlador en Simulink.
Elaboración propia.

Para el control de temperatura se utilizó el controlador híbrido HC900 y el *Process Control Designer software* de la marca Honeywell. La programación del lazo de control se realizó de manera gráfica y se muestra en la Figura 52.

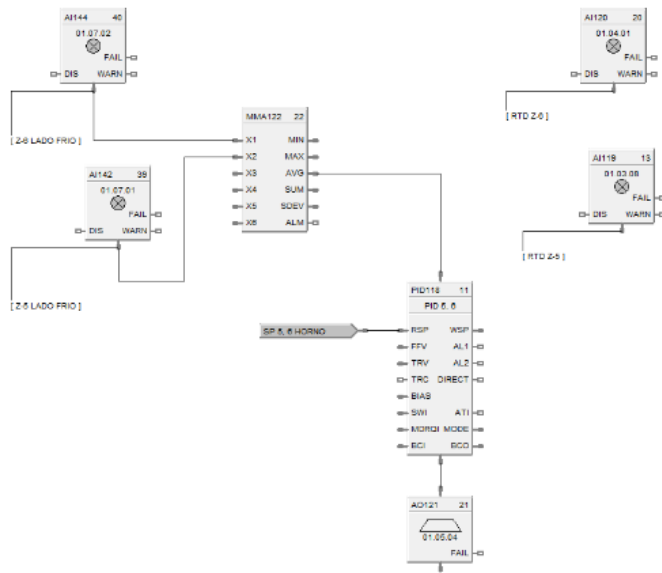


Figura 52. Programación del lazo de control en Process Control Designer.
Elaboración propia.

Para la programación del controlador HC900 se utilizaron las siguientes instrucciones:

- **Entrada analógica.**

Se utilizó un sensor tipo RTD Pt100 de 3 hilos para la medición de la temperatura. La Figura 53 muestra la configuración del bloque de función.



Figura 53. Configuración del bloque de función para entrada analógica.
Elaboración propia.

- **Promedio.**

Debido a que las zonas 5 y 6 comparten una sola válvula de control, se obtiene el promedio de la medición de cada zona para realizar el control. La Figura 54 muestra la configuración del bloque de función promedio.

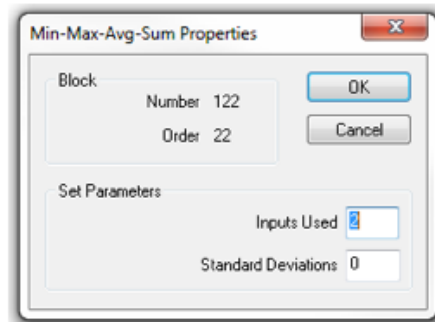
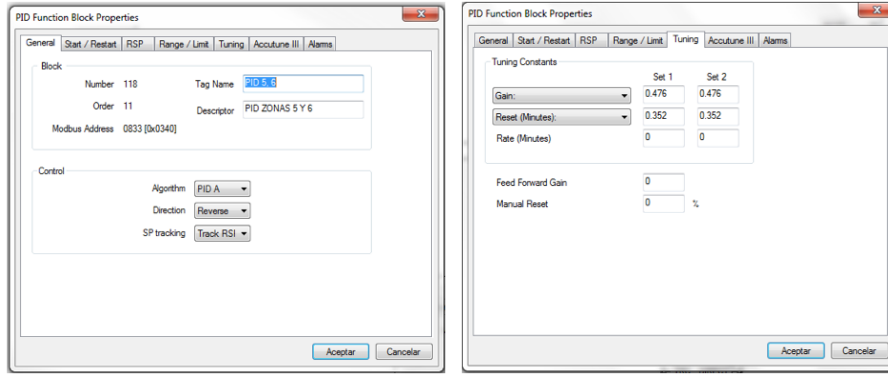


Figura 54. Configuración del bloque de función promedio.
Elaboración propia.

- **Bloque de función PID.**

Esta función se usa para el control en los tres modos Proporcional, Integral, y Derivativo. Esto significa que la salida se puede ajustar en algún lugar entre 0% y 100%. En esta función se cargan también los datos calculados para las ganancias del sistema de control PID simulado en Matlab. La Figura 55, muestra la configuración del bloque de función PID.



a)

b)

Figura 55. Configuración del bloque de función PID. a) Configuración, b) Sintonización. Elaboración propia.

- **Salida analógica.**

Se utilizó una salida analógica de 4 – 20 mA para apertura y cierre de válvula de control de flujo de vapor de agua. La Figura 56, muestra la configuración del bloque de salidas analógicas.

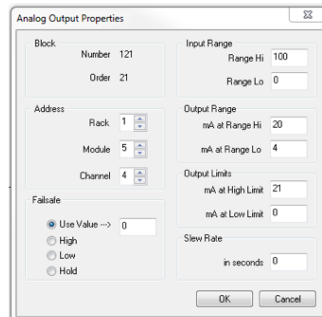


Figura 56. Configuración del bloque salida analógica. Elaboración propia.

4. RESULTADOS

Como resultado de la reconfiguración del horno de post-curado en las zonas 5 y 6, se logró obtener el perfil de temperatura interna de la lámina que se muestra en la Figura 57.

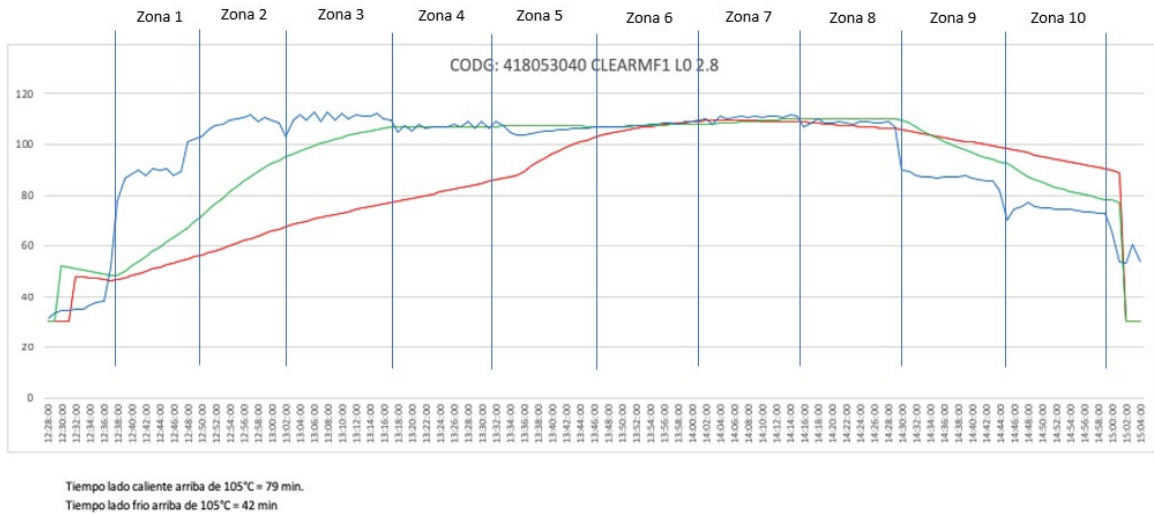
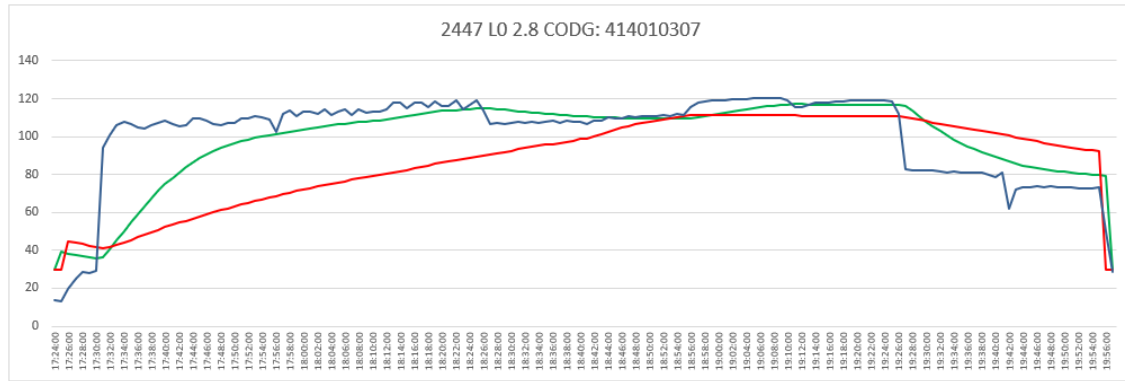


Figura 57. Perfil de temperatura interno de la lámina después de la reconfiguración del horno.
Elaboración propia.

Se observa que al llegar el producto a la zona 5 comienza a incrementar la temperatura del lado frío (línea roja) en forma más acelerada logrando llegar a 105°C durante un periodo de tiempo de 42 min.

Se realizó una segunda prueba esta vez después de realizar la sincronización del avance de la cadena y la optimización del control de temperatura de las zonas de calentamiento, también se decidió modificando el *sets point* de las diferentes zonas de calentamiento y validar si la metodología era aplicable en otra temperatura. Los *sets point* propuestos fueron: Zona 1 – 2 = 112°C, Zona 3 – 4 = 115°C, Zona 5- 6 = 118°C y Zona 7 – 8 = 112°C. El resultado de perfil de temperatura interna de la lámina de la segunda prueba de validación se muestra en la Figura 58.



Tiempo lado caliente arriba de 105°C = 89 min
 Tiempo lado frío arriba de 105°C = 48 min

Figura 58. Perfil de temperatura interno de la lámina para la 2da prueba de validación. Elaboración propia.

Se observa que el tiempo a 105°C en el interior de la lámina se conserva, incluso con un ligero incremento. El lado frío incrementa de 42 a 48 minutos con una temperatura de 105°C o mayor, y el lado caliente incrementa de 62 a 89 minutos arriba de 105°C, comprándolo con el perfil solo con la reconfiguración del horno.

La Tabla 5 muestra los tiempos en que se mantuvo la temperatura arriba de 105° en ambos lados arriba de la lámina, desde el último perfil realizado antes de las modificaciones el 7 de noviembre de 2013 y los años posteriores. Con los resultados obtenidos se demuestra que en todos los casos se cumple con el tiempo requerido en la especificación de proceso y que se ha mantenido funcional en todo este tiempo. Los resultados presentados son desde el año 2013 hasta 2022.

Para validar los resultados directamente en la variable de dureza para las láminas acrílicas, se utilizó el software de control estadístico de procesos *SuperCEP*. La Figura 59, indica la capacidad del proceso después de los cambios realizados, de una muestra de 123 datos de obtiene una media de 97.79 HRM con una habilidad del proceso de $C_{pK} = 1.49$.

Tabla 5. Resultados de perfil interno de temperatura de la lámina de acrílico.

Fecha	UTEC	Tiempo lado caliente a 105°C (minutos)	Tiempo lado frío a 105°C (minutos)	Cumple
07/11/2013	LO 12.0 mm	62	0	NO
19/11/2013	LO 5.4 mm	89	43	SI
22/11/2013	RO 12.0 mm	95	46	SI
03/01/2014	LO 2.8 mm	89	48	SI
25/11/2014	LO 2.8 mm	78	40	SI
16/04/2015	LO 2.8 mm	87	46	SI
08/07/2015	LO 2.8 mm	80	44	SI
23/02/2016	LO 2.8 mm	82	48	SI
16/12/2016	LO 2.8 mm	85	47	SI
23/01/2017	LO 2.8 mm	80	51	SI
22/08/2017	LO 4.3 mm	87	47	SI
26/04/2018	LO 4.3 mm	72	40	SI
26/07/2018	LO 2.8 mm	74	43	SI
30/01/2019	LO 5.4 mm	74	45	SI
23/05/2019	LO 2.6 mm	78	50	SI
19/08/2020	LO 5.4 mm	80	44	SI
15/10/2020	LO 5.4 mm	85	45	SI
18/03/2021	LO 2.8 mm	86	46	SI
25/11/2011	LO 5.4 mm	90	63	SI
28/04/2022	LO 5.4 mm	102	60	SI

Elaboración propia.

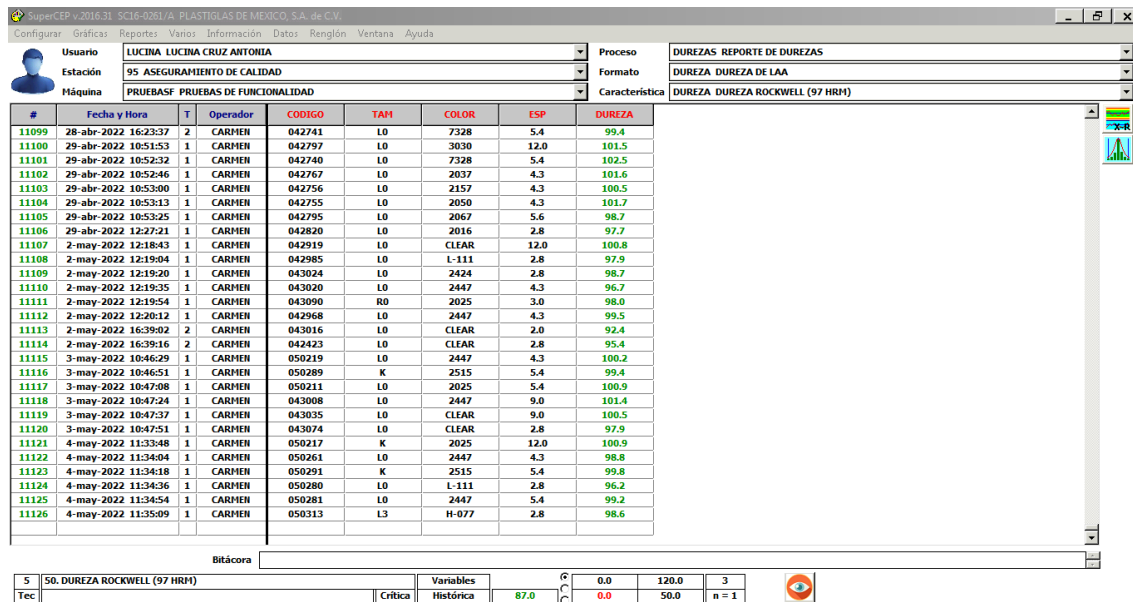


Figura 59. Muestreo de durezas de la lámina de acrílico utilizando el software SuperCEP. Elaboración propia.

Para validar los resultados obtenidos, se presentan de la Figura 60 a la Figura 64, las gráficas de dureza en las láminas de acrílico. Estas graficas demuestran la homogeneidad de la dureza en toda la superficie de la lámina de acrílico.

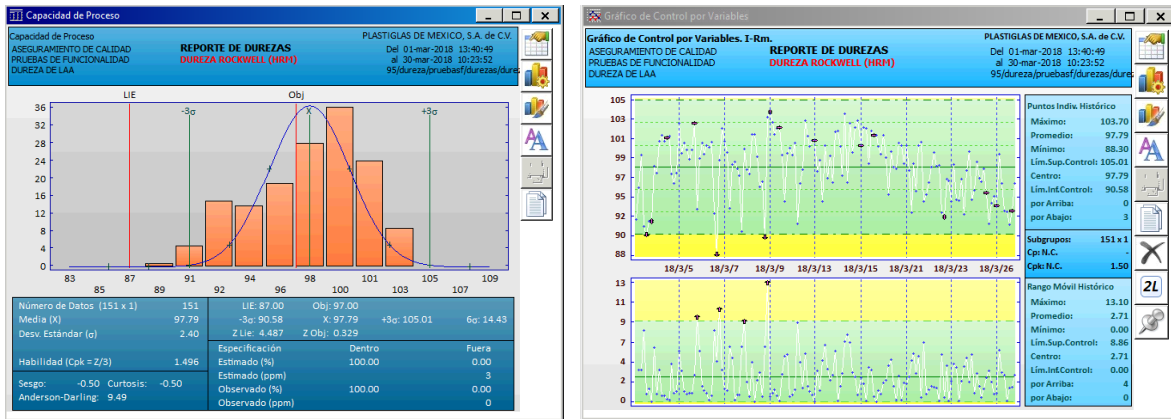


Figura 60. Capacidad del proceso y grafico de control por variables, marzo 2018. Elaboración propia.

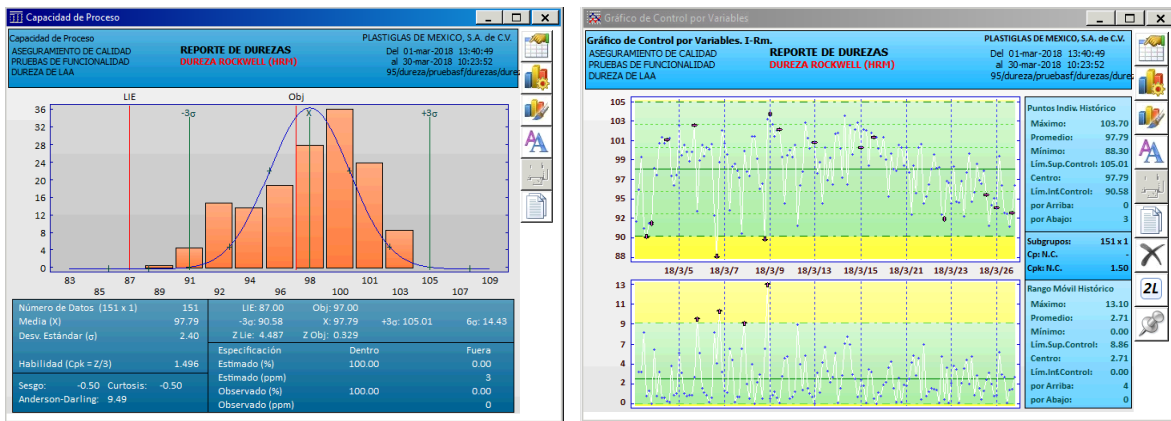


Figura 61. Capacidad del proceso y grafico de control por variables, marzo 2019. Elaboración propia.

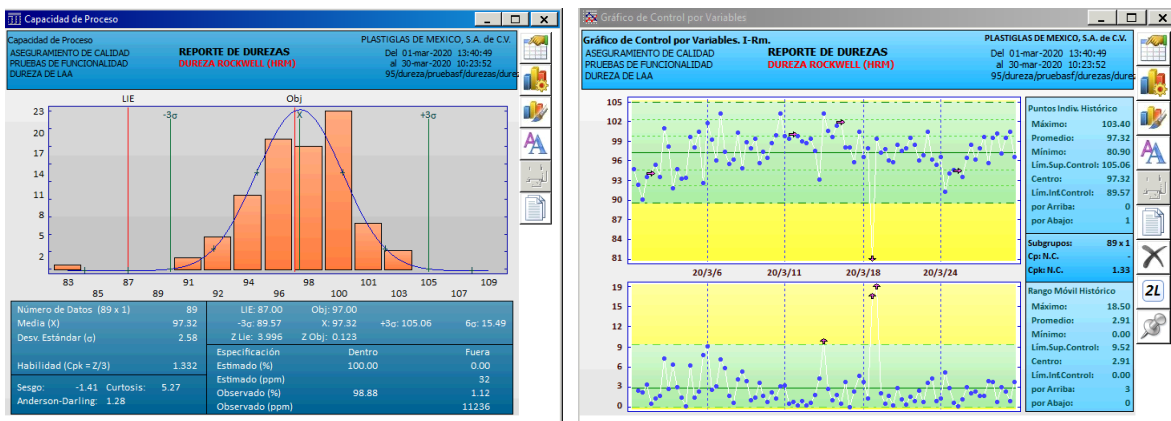


Figura 62. Capacidad del proceso y grafico de control por variables, marzo 2020. Elaboración propia.

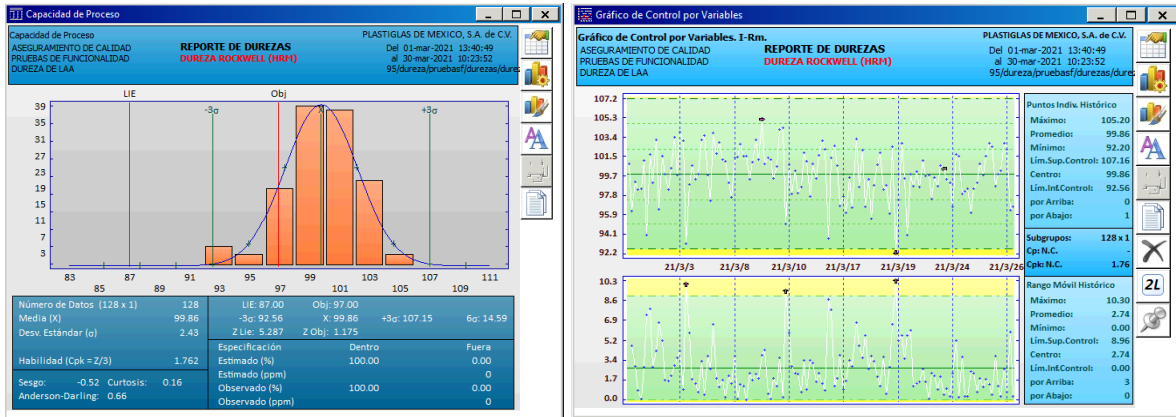


Figura 63. Capacidad del proceso y gráfico de control por variables, marzo 2021.
Elaboración propia.

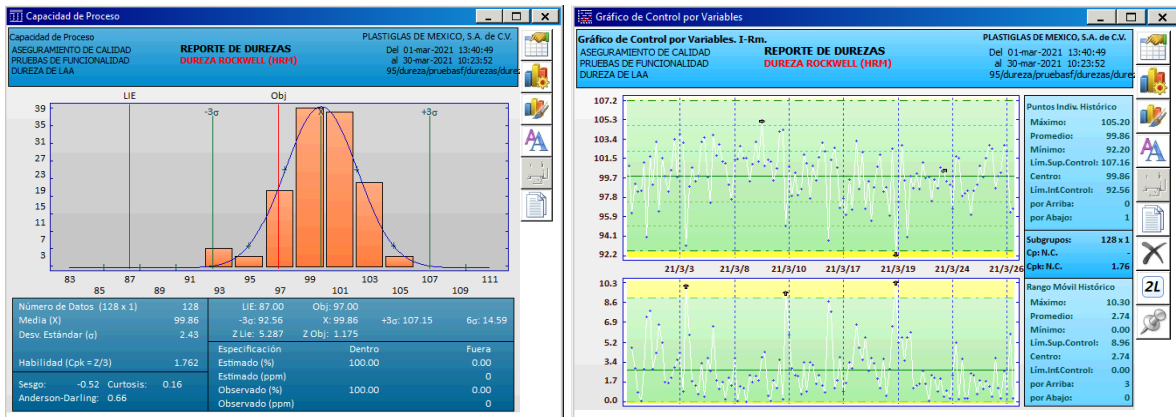


Figura 64. Capacidad del proceso y gráfico de control por variables, marzo 2022.
Elaboración propia.

Respecto a las quejas y reclamaciones de los clientes por defectos de dureza del producto se redujeron a cero a partir de las modificaciones realizadas. La Figura 65, muestra una gráfica de barras con el histórico de defectos anuales a partir de 2010.

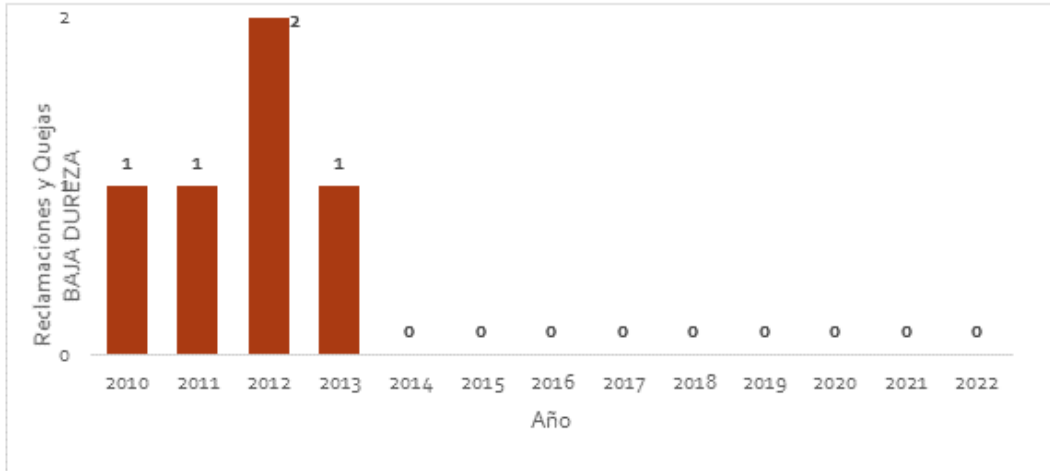


Figura 65. Quejas y reclamaciones de clientes por defectos de dureza.
Elaboración propia.

Como resultado de la implementación de esta metodología se tienen los siguientes puntos:

- Se tuvo un incremento en el tiempo donde la temperatura interna de la lámina permaneció en un valor de 105°C o superior un 12.5 % en el lado frío y un 30.3 % del lado caliente. Se supero con mucho el 5 % planteado en la hipótesis de este trabajo.
- Se presenta una mejora en la dureza del 9.7 % en la lámina de acrílico y se logró una dureza homogénea en toda la superficie. Se supero el 5 % objetivo de la hipótesis de este trabajo
- Debido a los puntos anteriores, el cumplimiento de las especificaciones en la fabricación de la lámina de acrílico desde la implementación de este trabajo se llevó a un 100 %, por lo que se redujo a cero el rechazo de los clientes y por lo tanto las pérdidas económicas por este defecto.

CONCLUSIONES

- Con los resultados anteriores se demuestra que, con la reconfiguración del horno de post-curado, la sincronización del tiempo de avance del producto dentro del proceso y la optimización del control de temperatura de las zonas de calentamiento se obtiene una lámina de acrílico con una mejor y más homogénea dureza. El lado frío mejora de un promedio que oscilaba entre 88.7 a 94.4 HRM a un promedio de 97.35 HRM en toda la superficie de la lámina lo que representa un 9.7% de mejora como lo muestran las figuras 3.20, 3.21, 3.22 y 3.23 comparado con la especificación (mínimo 90 HRM).
- Con lo anterior mencionado se logran cumplir los requisitos generales y específicos planteados en el capítulo 1 de este trabajo de tesis.
- Como resultado adicional se logró ahorrar \$350,000.00 USD al realizar este trabajo con personal de Ingeniería de la propia empresa.
- Se evitan reclamaciones de clientes por un monto de \$ 59,950.0 USD.
- Como punto de mejora a futuro se planea intercambiar dos zonas de calentamiento más e implementar las mismas acciones de control que se realizaron en este trabajo para mejorar aún más la homogenización de la dureza de la lámina. Al hacer esto se pretende que el material logre obtener sus propiedades en un menor tiempo y así poder reducir el tiempo de ciclo del proceso de post-curado. (Babo, y otros, 2020).

RECOMENDACIONES

Es importante monitorear la operación del horno en forma frecuente para asegurar que el perfil de temperatura se mantenga y por consiguiente la dureza de la lámina de acrílico, se recomienda realizar la prueba en forma mensual para detectar con tiempo cualquier variable fuera de especificación.

Además, para mejorar aún más la dureza de la lámina se recomienda intercambiar las zonas de calentamiento 7 y 8 e implementar las mismas acciones de control que se realizaron en este trabajo, con esto, los tiempos tanto del lado frío y lado caliente arriba de la especificación serían casi los mismos. Esto permitiría que el producto alcance sus las propiedades necesarias en un menor tiempo y se podría aumentar la producción, es decir, se fabricarían más láminas en menor tiempo.

También se recomienda evaluar la posibilidad de aumentar los sets points de las diferentes zonas de calentamiento y enfriamiento del horno esto para reducir aún más el tiempo de proceso dentro del horno de post-curado y poder aumentar la producción de lámina de acrílico.

APORTACIÓN DE LA TESIS

La contribución de este trabajo de tesis a la ciencia es el de haber logrado la mejora en la homogenización de la dureza en la lámina de acrílico optimizando el proceso de post-curado utilizando las herramientas de teoría de control, los controladores lógicos programables tanto para el control de temperatura como para la sintonización del avance de la cadena del horno, herramientas de control estadístico de procesos todo esto para lograr tener un proceso confiable, flexible y robusto. Este trabajo se realizó con personal técnico y de Ingeniería de la misma empresa, logrando ahorrar alrededor de \$350,000.00 USD que fue el costo propuesto por una compañía externa para solucionar del mismo problema en la cual proponía consumos más elevados de gas natural. Aporta las bases para los diferentes fabricantes de lámina de acrílico que necesiten optimizar las propiedades de su producto.

APORTACIÓN SOCIAL DE LA TESIS

El gas natural utilizado en las calderas para generar vapor y enviarlo a los intercambiadores de calor en el horno para el post-curado de la lámina de acrílico es un fuente de energía no renovable y su combustión emite gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono (CO_2) o el metano entre otros que se acumulan en la atmosfera y contribuyen al calentamiento global, si bien la combustión del gas natural produce menos dióxido de carbono que el petróleo también libera otros gases contaminantes como el mercurio y óxidos de nitrógeno y azufre que son los causantes de la lluvia acida y el smog; además durante si extracción y transporte también se puede conminar el agua y el suelo. El este horno es el principal consumidor de gas natural en la empresa, al optimizarlo se reduce el consumo de gas natural y se produce con una mejor calidad de la lámina de acrílico, lo que hace más eficiente el proceso, con esto no reduce la emisión de gases de efecto invernadero y contribuye a la reducción de la contaminación del medio ambiente. (Babo, y otros, 2020).

REFERENCIAS

- Babo, S., Ferreira, J. L., Ramos, A. M., Micheluz, A., Pamplona, M., Casimiro, M. H., . . . Melo, M. J. (3 de septiembre de 2020). Characterization and long-term stability of historical PMMA: Impact of additives and acrylic sheet industrial production processes. *Polymers*, 12(10), 1-4. doi:<https://doi.org/10.3390/polym12102198>
- Carro Paz, R., & González Gómez, D. (2006). *Control estadístico de procesos*. Universidad Nacional de Mar de Plata.
- International Electrotechnical Commission;. (February de 2013). *IEC 61131-3 Programmable controllers - Part 3: Programming languages*. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission.
- Lipták, B. G. (2006). *Process control and optimization. instrument engineer's handbook* (4 ed., Vol. II). Boca Raton, FL: Taylor & Francis Group.
- MathWorks. (2018). *Matlab*. Natick, MA, USA: The MathWorks Inc.
- Nise, N. S. (2011). *Control system engineering*. John Wiley & Sons, Inc.
- Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna* (5 ed.). Madrid, España: Pearson Education.
- Otto, E. (15 de Marzo de 2015). *Diseño e implementación de un horno autónomo para el secado de guantes de latex*. (Tesis de Licenciatura. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica), Guatemala, Guatemala. Obtenido de Repositorio del sistema bibliotecario Universidad de San Carlos: <http://biblioteca.ingenieria.usac.edu.gt/>
- Pawar, E. (4 de 2016). A review article on Acrylic PMMA. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 13(2), 1-4. Obtenido de <https://www.iosrjournals.org/iosr-jmce/papers/vol13-issue2/Version-1/A1302010104.pdf>
- PLASTIGLAS. (17 de May de 2022). *PLASTIGLAS*. Obtenido de PLASTIGLAS: https://www.plastiglas.com.mx/uploads/uso_general/1625074437_5359a43c44c11989d0de.pdf

- POWDERTRONIC. (11 de 05 de 2022). *POWDERTRONIC Liquid and powder coating systems*. Obtenido de Horno de convección: <https://powdertronic.com/horno-de-conveccion/>
- POWDETTRONIC. (11 de 05 de 2022). *POWDETTRONIC*. Obtenido de POWDETTRONIC liquid and powder coating systems: <https://powdertronic.com/hornos-infrarrojos/>
- QuimiNet.com. (19 de May de 2022). *QuimiNet.com Información y negocios segundo a segundo*. Obtenido de Características de PLCs: <https://www.quiminet.com/articulos/caracteristicas-de-plcs-2671303.htm>
- Rockwell Automation. (20 de May de 2022). *Literatura Rockwell Automation*. Obtenido de Rockwell Automation: https://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/gr/lg500-gr002_-en-e.pdf
- Rockwell Automation. (19 de 05 de 2022). *Rockwell Automation*. Obtenido de Rockwell Automation: <https://www.rockwellautomation.com/es-mx/products/details.1769-L33ER.html>
- SAS., Industrial Technologies. (11 de 05 de 2022). *INDUTECSA*. Obtenido de INDUCTESA Industrial Technologies SAS: <https://www.indutecsa.com/index.php/noticias/15-hornos-de-induccion-como-funcionan>
- Starr, K. D. (2015). *Single loop control methods*. Ohio, USA: ABB Inc.
- Trevathan, V. L. (2006). *A guide to the automation body of knowledge*. USA: ISA.
- Wade, H. L. (2017). *Basic and advanced regulatory control: system desing and applications*. USA: ISA.

ANEXOS

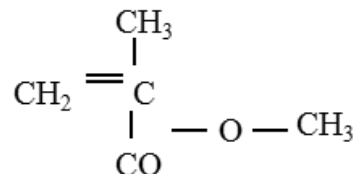
ANEXO A. Propiedades del acrílico.

Propiedades físico-químicas de Monómero de Metil Metacrilato (MMA)

Nombre comercial: Monómero de Metil Metacrilato

Familia química: Esteres

Formula:



IDENTIFICACION

Sinónimos	: MMA, METILMETACRILATO DE METILO, ESTER DE ACIDO METACRILICO
Fórmula	: CH ₂ :C(CH ₃)COOOCH ₃
Composición	: METILMETACRILATO: >=99.5%; <=100%
Número Interno	:
Número CAS	: 80-62-6
Número UN	: 1247
Clases UN	: 3.1
Usos	: Monomero para resinas de polimetacrilato, tubos de vacio, lamparas incandescentes, agente de despolvamiento, preservador contra el moho, cosmeticos, caucho, lubricante, ventanas de aviones, adhesivos, lentes de contacto, pinturas acrilicas, aditivo para aceites y lubricantes, instrumentos quirurgicos, plastificantes, acabados textiles y de cuero, fabricación de planchas.

PROPIEDADES FISICAS Y QUIMICAS

Apariencia	Líquido, incoloro con olor característico.
Gravedad Específica (Agua=1)	0.94 a 20°C
Punto de Ebullición (°C)	100.3°C
Punto de Fusión (°C)	-48°C
Densidad Relativa del Vapor (Aire=1)	>1 a 20°C
Presión de Vapor (mm Hg)	40 hPa a 20°C
Viscosidad (cp)	0.6 mPas a 20°C
pH	no aplicable
Solubilidad	Soluble en la mayoría de componentes orgánicos.

ANEXO B. Programa de PLC en lenguaje escalera.

