

# Modelado y Simulación de controlador para horno de pintura electroestática del instituto CATDENAR. (Mayo 2022)

Breiner A. Córdoba, Julian A. Morillo.

**Resumen** - El documento tiene como base la creación de un control, mediante automatización de un horno o cabina de pintura para el instituto técnico CATDENAR, logrando de esta manera la modernización y recuperación de esta herramienta mediante nuevos procesos de automatización, basado en la simulación en Matlab y Simulink, así mismo su interfaz con el usuario en la misma plataforma tecnológica, teniendo en cuenta todos los procesos en los cuales está involucrada la cabina de pintura. Para la implementación del sistema se plasma en este documento graficas de simulación y modelado matemático, así como también todos los elementos necesarios para su realización; además se plantea posibles alternativas en este documento, para una futura retoma de la investigación por parte de otros investigadores. Se tiene la automatización como eje principal para lograr los objetivos establecidos, obteniendo como producto final un protocolo a seguir para la fácil implementación en campo de la automatización del horno, mejorando drásticamente la relación entre hombre y máquina, y a su vez la optimización de recursos y la retoma de un elemento más que necesario en el instituto técnico CATDENAR. En torno a la optimización de recursos, se hace evidente en el documento como se reduce el tiempo empleado por el operario de la maquina ya que esta es autónoma en sus procesos de curado de pintura mediante el control de la temperatura en tiempo real, así como también el control de flujo de aire y tiempos óptimos necesarios para mejores resultados de calidad.

**Índice de Términos** – Automatización, cabina, horno, MatLab.

## I. INTRODUCCIÓN

La automatización ha constituido un cambio importante en la sociedad de las últimas décadas ayudando en la producción de bienes o servicios y mejorando abruptamente el entorno entre hombre y maquina reduciendo significativamente costos y facilitando labores cotidianas. Los hornos industriales junto con una gran cantidad de inventos fueron mejorando los procesos y calidad de vida de las personas y calidad en los productos finales de consumo convirtiéndose en parte importante de la industria.

CATDENAR como institución de enseñanza del proceso de pintura electrostática hace uso constante de la cabina de sellado desde hace ya varios años, quedando poco a poco en la obsolescencia, ya que todos los años los avances tecnológicos mejoran todo tipo de procesos, se determinó una modernización del control del horno de sellado lo cual constituye en una ventaja competitiva de la institución frente al mercado; para ello en este documento se plasma todas las variables que conlleva al proceso final de automatización del horno existente en el instituto.

El desperdicio de recursos es uno de los principales motivadores para la realización de este proyecto, desperdicios enmarcados en el fallo o daño de piezas por elevadas temperaturas de las cuales no se tiene control, tiempos no estandarizados y un flujo de temperatura regulado por uno o varios operarios son los factores principales por los cuales se hace totalmente necesaria la investigación y desarrollo de un control autónomo para este elemento que es de uso diario por estudiantes del instituto.

La solución del inconveniente expuesto anteriormente brindaría una optimización de recursos, así como también la reducción de tiempos y estandarización de este para una adecuada y continua formación de estudiantes del instituto CATDENAR.

Teniendo como resultado final una máquina herramienta automatizada en sus procesos, la cual aporta a la modernización de dicho establecimiento en el entorno educativo y de preparación de sus estudiantes.

## II. DESCRIPCION DEL PROBLEMA

CATDENAR, es un instituto de capacitación técnica que se encuentra en el departamento de Nariño, este instituto ofrece cursos técnicos en mecánica diésel, mecánica de motos, construcción, maquinaria pesada y pintura automotriz. En el curso de pintura automotriz se pueden observar dos tipos de proceso para el pintado, el proceso de pintura liquida y el proceso de pintura electroestática, para los cuales se utiliza una cabina de pintura en la cual se genera temperatura para el sellado y el operario debe estar pendiente todo el tiempo de la

variación de este proceso además de la ventilación adecuada, produciendo así demoras y baja efectividad durante el proceso de pintura, siendo la cabina de pintado obsoleta para realizar adecuadamente este proceso. (CATDENAR, institutocatdenar.principalwebsite, 2022).

Para contribuir al proceso de mejora del instituto CATDENAR se plantea la mejora en torno a la automatización del proceso de pintura interviniendo directamente en el control automatizado de una de sus máquinas más importantes en el área de pintura como lo es el horno de secado en el cual se pretenderá perfeccionar el proceso mediante el cual funciona dicha máquina ya que al momento de creación del documento, está ya se encuentra obsoleta demandando demasiado tiempo de operarios y gastos considerables en torno a la energía que se utiliza para el funcionamiento de este horno; la automatización se convirtió ya hace años en una de las principales herramientas en toda industria y el aporte que se puede dar es contribuir a que nuevas generaciones de estudiantes de CATDENAR encuentren en el instituto máquinas herramientas modernizadas o actualizadas para un adecuado desempeño de su aprendizaje.

Al automatizar el proceso que se genera en el horno de secado se reducen significativamente los consumos del gas utilizado para generar la temperatura necesaria para los procesos de secado de las diferentes pinturas aplicadas en este, así como también se previene los efectos de errores humanos en la temperatura utilizada en el horno evitando así el daño en piezas que luego deberían ser repintadas aumentando los costos y generando daños innecesarios en las piezas.

En lo que refiere al tiempo podemos contribuir a una significativa reducción ya que los procesos internos de la máquina serán manejados en automático y de una manera estable, lo que genera a su vez una estandarización de los tiempos y el proceso de curado de las pinturas, nuevamente eliminando todo tipo de errores humanos que desencadenan en mal lograr piezas de acabado final y por ende la utilización de tiempo imprevisto.

Como último aporte, el documento presenta una cotización presupuestal de las piezas necesarias para la implementación del proyecto en el instituto con gastos de envío y horas hombre para la adecuada implementación de dicho proyecto en la máquina presente en el instituto técnico CATDENAR.

### III. JUSTIFICACION

El proceso resultante de la automatización de la cabina de pintado, desencadenará una serie de reducciones en la cadena productiva, tanto en tiempo como en desperdicio de materiales, así como también se logrará una óptima utilización de los recursos térmicos y de pintura utilizados durante el proceso, ya que para el proceso de pintura se necesita un horno que eleve la temperatura del aire uniformemente, además mantenga una temperatura constante requerida y también es necesario que se apague a un determinado tiempo. Sin embargo, el horno que se encuentra en el instituto CATDENAR no cumple con los estos requerimientos, por tal motivo es necesario que un operario este siempre pendiente de la oscilación de la temperatura y la variación en el tiempo, además las piezas a pintar se deben ubicar a una distancia superior a 60 centímetros con respecto al

suelo ya que si se las deja más abajo la pintura no se va a adherir correctamente; se deberá cambiar todo el sistema con un controlador lógico programable, este estará complementado con un temporizador y un interruptor con el fin de monitorear el tiempo y controlar el apagado, también se implementará sensores térmicos para medir la temperatura en diferentes puntos del horno y con el interruptor apagar y prender el horno para así mantener la temperatura constante en el tiempo.

## IV. OBJETIVOS

### A. Objetivo General.

- Modelado y simulación de automatización de un horno para el proceso de pintura electrostática en el instituto CATDENAR.

### B. Objetivos específicos.

- Verificar el estado actual y componentes funcionales del horno.
- Modelar el sistema de horno.
- Diseñar el control con el cual se desea manipular el horno.
- Simular el control implementándolo sobre el horno.

## V. MARCO TEORICO

### A. Pintura electrostática.

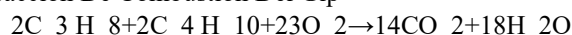
La pintura electrostática es la aplicación de un revestimiento epóxido a materiales ferrosos para proteger la superficie, y se lo realiza para tener un acabado más resistente que la pintura convencional. El proceso principal de pintura electrostática consiste en incrustar al producto una capa de pintura en polvo suficiente para cubrir toda su superficie, proporcionando una mayor resistencia a la corrosión, abrasión, impacto y a la deformación lenta, permitiendo obtener mejores acabados a costos más reducidos con una amplia gama de colores superiores a la pintura líquida y a costos reducidos, y una gran ventaja frente a la pintura líquida, que es el no ocupar solventes ni en su fabricación ni en su aplicación. Tecnológicamente se ha comprobado que este tipo de pintura es el sesenta por ciento más durable que la pintura convencional es por eso por lo que es recomendado para procesos industriales. (Quijia Gualoto, 2017).

### B. GLP

El gas licuado de petróleo (de ahí sus siglas GLP) es obtenido durante la refinación del petróleo crudo, como uno de los tantos subproductos derivados. También se puede obtener de la refinación del gas natural (en este caso otro producto de diferentes características). Es una mezcla de propano C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> y butano C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> -hidrocarburos livianos, que son compuestos orgánicos formados únicamente por carbono e hidrógeno, por lo general en una relación 70% - 30% - 40%, dependiendo del producto objetivo. El GLP se evapora temperaturas y presión

normales, por lo que se reparte o suministra en los clásicos balones o cilindros presurizados en estado líquido, de ahí su identidad de licuables. Es un derivado de petróleo de elevado poder calorífico y una densidad mayor que la del aire, utilizado en la cocción de alimentos, en la calefacción domiciliaria, como combustible para vehículos y refrigerante, como combustible en hornos, secadores y calderas de diferentes tipos de industrias, en motores de combustión interna y en turbinas de gas para la generación de energía eléctrica, entre otros. (Chaux, 2012).

#### Reacción De Combustión Del Glp



### C. Automatización

Según (Ponsa, 2009), La Real Academia de las Ciencias Físicas y Exactas define la automática como el conjunto de métodos y procedimientos para la sustitución del operario en tareas físicas y mentales previamente programadas. De esta definición original se desprende la definición de la automatización como la aplicación de la automática al control de procesos industriales.

Dentro del campo de la producción industrial, la automatización ha pasado de ser una herramienta de trabajo deseable a una herramienta indispensable para competir en el mercado globalizado. Ningún empresario toma a la ligera la automatización de sus procesos para aumentar la calidad de sus productos, reducir los tiempos de producción, realizar tareas complejas, reducir los desperdicios o las piezas mal fabricadas y sobre todo AUMENTAR LA RENTABILIDAD. La historia de la automatización comienza con la introducción de las máquinas (mecanización) para producir grandes cantidades, para lo cual era imprescindible dividir el trabajo en tareas más pequeñas y sencillas. La mecanización a gran escala dio lugar al comienzo de la automatización. (Ruedas, 2010). “

### D. Simulación

La simulación digital es una técnica que permite imitar o simular en un ordenador el comportamiento de un sistema físico o teórico según ciertas condiciones particulares de operación para analizar estudiar y mejorar el comportamiento de un sistema mediante las técnicas de simulación digitales es necesario primero desarrollar un modelo conceptual que describa las dinámicas de interés y luego implementarlo en un simulador para poder analizar los resultados.

Aunque la simulación digital es una técnica relativamente reciente y en constante evolución el uso de la simulación como metodología de trabajo es una actividad muy antigua y podría decirse que inherente al proceso de aprendizaje del ser humano el caso por ejemplo de un niño pequeño jugando con unos objetos que no son más que representaciones a escala de objetos reales para poder comprender la realidad y toda la complejidad que un sistema puede conllevar ha sido necesario construir eficientemente objetos y experimentar con ellos dinámicamente

antes de interactuar con el sistema real la simulación digital puede verse como el equivalente electrónico a este tipo de experimentación para ello será necesario construir objetos modelos que representen la realidad del de tal modo que pueda ser incorporados por un ordenador. (Alfonso, 2013).

### E. MATLAB

Según Fernández (2009), MATLAB, es el nombre abreviado de “MATRiz LABoratory”. Es un programa para realizar cálculos numéricos con vectores y matrices, y por tanto se puede trabajar también con números escalares (tanto reales como complejos), con cadenas de caracteres y con otras estructuras de información más complejas.

“Matlab es un lenguaje de alto rendimiento para cálculos técnicos” (Fernández, 2009), es al mismo tiempo un entorno y un lenguaje de programación. Uno de sus puntos fuertes es que permite construir al usuario sus propias herramientas reutilizables. Permite crear al usuario fácilmente sus propias funciones y programas especiales (conocidos como M-archivos) en código Matlab, se los puede agrupar en Toolbox (también llamadas librerías): colección especializada de M-archivos para trabajar en clases particulares de problemas. Matlab, a parte del cálculo matricial y álgebra lineal, también puede manejar polinomios, funciones, ecuaciones diferenciales ordinarias, gráficos, etc. (Fernández, 2009).

### F. SIMULINK

SIMULINK es una herramienta incluida en MATLAB para el modelado, simulación y análisis de sistemas dinámicos. El interfaz principal es una herramienta gráfica para la descripción del sistema mediante diagramas de bloques. Además, permite su extensión mediante la creación de librerías con nuevos tipos de bloques. Está altamente integrado con el resto de MATLAB. Es una herramienta muy usada en ingeniería de control y procesamiento de señal para la simulación de sistemas y el diseño basado en modelos. (automática, 2006).

También, según (Arellano, 2013), Simulink es un entorno de diagramas de bloque extensible para la simulación de sistemas y el diseño basado en modelos permite a los ingenieros simular y analizar una amplia gama de sistemas que incluyen controles señales y procesamiento de imágenes comunicaciones y sistemas físicos multidominio.

### G. GUIDE

La interfaz gráfica de usuario, conocida también como GUI (del inglés Graphical User Interfaz) es un tipo de interfaz de usuario que utiliza un conjunto de imágenes y objetos gráficos para representar la información y acciones disponibles en la interfaz. Como en una GUI las acciones se realizan mediante manipulación directa, el usuario no tiene que crear un script, digitar algún comando en la línea de comandos o comprender los detalles de cómo se realizan las tareas para poder hacer alguna actividad con la aplicación. Las GUIs surgen como

evolución de la línea de comandos de los primeros sistemas operativos y es pieza fundamental en un entorno gráfico.

Los investigadores del Stanford Research Institute, liderados por Douglas Engelbart (Universidad de Berkeley), desarrollaron en 1973 el Xerox Alto, el primer ordenador personal con una interfaz de hipervínculos en modo texto gobernado por mouse, que también inventaron (el primer prototipo en madera). Este concepto fue ampliado y trasladado al entorno gráfico por los investigadores del Xerox PARC (Palo Alto Research Center); en él se definieron los conceptos de ventanas, checkbox, botones de radio, menús y puntero del ratón. Fue implementado comercialmente en el Xerox start 8010 en 198s. (Arellano, 2013).

#### H. Modelado

Para entender si algo funcionara correctamente, en determinado momento tendremos que recurrir al diseño de un modelo matemático que nos ayude a limar esos imperfectos que puedan presentarse, a través de las matemáticas.

Hay que recalcar algo y es que, aunque un modelo matemático pueda ofrecerte resultados exactos teóricamente hablando, estará expuesto al error al ser aplicado en el mundo real, debido a factores externos.

Es uno de los tantos modelos científicos que nos va a permitir representar de forma gráfica o visual y a través de ecuaciones matemáticas, relaciones, hechos, variables, parámetros o comportamientos que son difíciles de observar en la realidad. Cumpliendo el objetivo de los modelos científicos el cual es en general, explorar, controlar y predecir.

Para obtener resultados correctos, es necesario decidir cuáles son las variables significativas y aquellas que no son tan importantes, distinguir cuales son las variables dependientes e independientes y definir correctamente las unidades de medida de nuestro modelo matemático. (Demeza, 2020).

#### I. Método de sintonía de Ziegler-Nichols

Alfaro (2005) menciona que en 1940 la compañía Taylor Instrument lanzó al mercado el primer controlador Proporcional-Integrativo-Derivativo (PID), el Fulscope modelo 100, no existía un procedimiento sistemático para la sintonización de los controladores industriales. Los controladores Proporcional (P), Proporcional Integrativo (PI) y Proporcional-Derivativo (PD) ya existentes se sintonizaban utilizando procedimientos de prueba y error. (Medina, 2009, pág. 12)

Ziegler and Nichols (1942) se menciona que, los ingenieros de la Taylor, Jhon Ziegler y Nathaniel Nichols, se dieron a la tarea de determinar una forma simple de sintonizar el nuevo regulador. El resultado de ese trabajo fue la regla de sintonización ampliamente conocida como método de Ziegler y Nichols. (Medina, 2009, pág. 12)

Alfaro (2005) menciona que este procedimiento produjo reacciones encontradas cuando fue presentado en la reunión anual de la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (ASME), en 1941. (Medina, 2009)

A pesar del tiempo transcurrido, el método de Ziegler y Nichols es ampliamente utilizado, ya sea en su versión original o con modificaciones. Sin embargo, se encuentra con mucha frecuencia en la literatura errores en su aplicación o controversias sobre para que tipo de controladores debe usarse.

Ziegler and Nichols (1942). Tuvieron como propósito examinar la acción de los tres efectos principales del control, Proporcional (P), Proporcional-Integrativo (PI) y Proporcional-Integrativo-Derivativo (PID), asignarle valores prácticos y ofrecer un método que permitiera obtener de una manera rápida y sencilla los ajustes óptimos de cada efecto del control. No exponen ningún trabajo matemático, ni ejemplo ilustrativo alguno que sustente la obtención del método. Para su estudio las reglas de sintonización propuestas por Ziegler y Nichols se dividen en dos variantes: la de lazo cerrado y la de lazo abierto. En relación con la variante de lazo cerrado sus ajustes se basan en la información última del sistema, obtenida utilizando solamente la acción proporcional. Para el caso de lazo abierto los autores obtuvieron la curva de reacción del sistema ante entrada paso, de donde encontraron las relaciones para sus fórmulas de ajustes. (Medina, 2009)

## VI. DESARROLLO PROYECTO

### A. Estado Actual

Durante el proceso de verificación en las instalaciones del instituto CATDENAR, se logró evidenciar una falencia en torno a lo análogo del horno y su control, se determina el valor de los elementos instalados mediante consulta en páginas web de elementos de similares características, entre ellos tenemos:

- Temporizador análogo
- Controlador temperatura entrada análogo
- Botones on/of
- Botón detención de emergencia
- Perillas reguladoras
- Cableado
- Tablero de control
- Timbre
- Luz indicador
- Contactores
- Relés térmicos

Algunos de estos elementos, tales como: botones on/off, switch de emergencia perillas reguladoras, tablero, cajilla, timbre e indicadores se pueden dar un segundo uso, el cableado se recomienda hacer una nueva instalación de acuerdo con la norma NTC 2050 para instalaciones eléctricas (ICONTEC, 2020).

De acuerdo con lo anterior se determina que el estado actual del horno es aún operativo, pero se hace supremamente necesaria su modernización, controlando la principal variable como lo es la temperatura; así mismo presenta algunos componentes de un costo elevado pero que aún se conservan en

buen estado y pueden ser reutilizados en un porcentaje que se estima del 80%.

En la fig. 1, se evidencia el panel de control con todos sus componentes actuales, en el podemos observar un desorden primordialmente del cableado, así como también los indicadores, se observa un sensor y controlador de temperatura, también un temporizador, de los cuales algunos elementos podrán ser reutilizados con el controlador que se llegue a determinar para manejar este proceso.

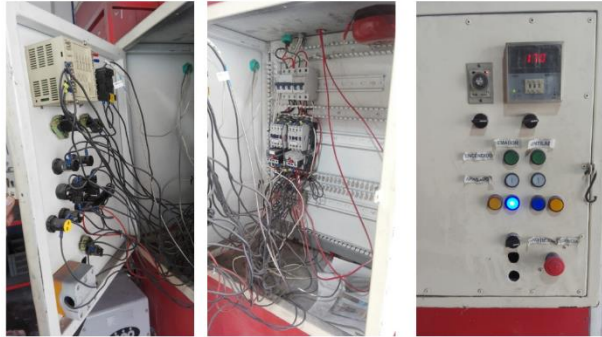


Fig. 1

En la fig. 2 observamos el horno, el cual solamente necesita ser reacondicionada su parte estética, pero principalmente nos centraremos en controlar sus variables térmicas, sus medidas y forma, nos serán de utilidad en el proceso de simulación en SolidWorks.

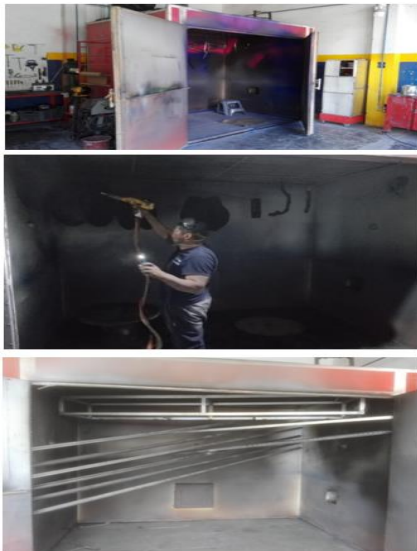


Fig. 2

## B. Modelado

Una vez realizado el inventario de piezas, así como también la revisión del estado físico y de operación del horno se determinó iniciar con un modelado matemático concerniente a la variación de temperatura dentro del horno,

para con estos datos asegurar el funcionamiento adecuado del control del proceso a voluntad del usuario.

Para el presente modelado matemático se utilizó todas las energías caloríficas de entrada y salida del sistema, teniendo en cuenta las pérdidas por conducción, convección y radiación, así como también las pérdidas del fluido en régimen transitorio, también se tuvo en cuenta que, para la ganancia de calor se utilizó la masa y poder calorífico del GLP.

Como resultado de este modelado se obtuvo la ecuación siguiente:

$$\frac{d(T)}{dt} = - \frac{(\dot{m} * C_p * (T_2 - T_1))}{(m * C_p)} + \frac{m_{glp} * P_c}{(m * C_p)} - \frac{\frac{AK(T_2 - t_1)}{l} + hA(T_2 - T_1) + E\sigma A(T_2^4 - T_1^4)}{(m * C_p)}$$

**Ecuación 1**

Con el resultado de la ecuación diferencial obtenido en el actual proceso de modelado matemático podemos proceder con el siguiente paso del desarrollo del controlador, ya que es la base fundamental de la recolección de datos para ingresar en los programas que corresponden a Matlab y Simulink. Con el objetivo de realizar el control PID correspondiente al sistema que deseamos controlar.

Para tener una idea más general y esquematizada del horno se procedió a realizar un esquema sencillo en el programa de diseño de inventor, el cual se muestra en la fig. 3, en él se observa las partes involucradas en el sistema, como lo son: el horno, para el cual está dispuesto una línea de escape, un quemador, un panel de control y un suministro de Gas GLP, lo que contribuye al lector a hacerse una idea más clara y concisa del proceso el cual se desea manipular.

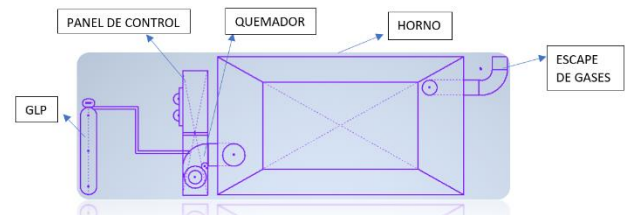


Fig. 3

## C. Diseño de Control

Por medio del diseño y ejecución de un PID (controlador proporcional, integral y derivativo) podemos variar con facilidad la apertura y cierre de la electroválvula encargada de dar paso al flujo de gas, necesario para aumentar y mantener la temperatura, para dicho diseño se hace necesario el uso de los resultados del modelado, como lo es la ecuación diferencial resultante, la cual fue ingresada en Matlab y nos arroja en primera medida la fig. 4, para, a partir de ahí proceder con las medidas y cálculos necesarios para desarrollar adecuadamente el PID mediante el método de Ziegler-Nichols.

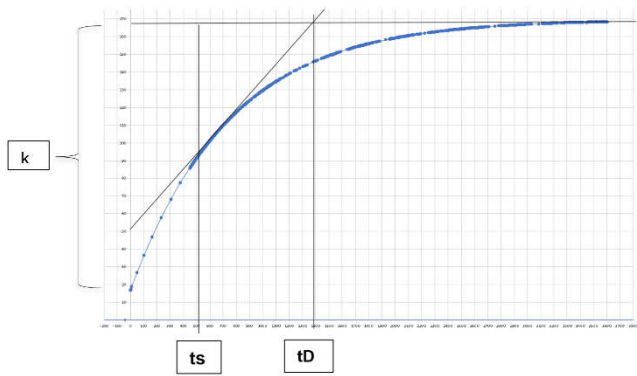


Fig. 4

La tabla 1 nos sirve de guía de parámetros utilizados para realizar el PID, estos cálculos son apropiados para poder variar un proceso lentamente y a voluntad, de manera que se pueda desarrollar un control de proceso acorde a las necesidades específicas de cada usuario.

Controlador	K	Ti	Td
P	$1/a$		
PI	$0.9/a$	$3L$	
PID	$1.2/a$	$2L$	$L/2$

Tabla 1 Parámetros de controladores según Ziegler-Nichols

Para realizar la sincronización por el método de Ziegler and Nichols se debe tomar unos parámetros, para eso se debe tomar la gráfica en lazo cerrado de la función de transferencia de la planta y graficar una tangente en el punto de inflexión de la función con respecto a esta.

#### D. GUIDE.

Para continuar adecuadamente con el proceso de diseño del controlador se hace necesario la implementación de un GUIDE el cual lo se lo denomina interfaz entre el usuario y la simulación, en la cual se puede variar en tiempo real el valor de temperatura y este disminuiría directamente en todos los parámetros donde se encuentra presente dicha información. Dado el caso de una implementación en planta de este proyecto se puede utilizar este guide para de manera remota poder variar la temperatura o dar valores diferentes de temperatura que se hacen necesarios en todo proceso de horneado de pintura. Esto se ve reflejado en la disminución de temperatura que se muestra en las figuras 5, 6, 7, y 8 donde se observa como al variar la altura del regulador, este varía la amplitud de la gráfica que demuestra el proceso controlado por el PID desarrollado con anterioridad.

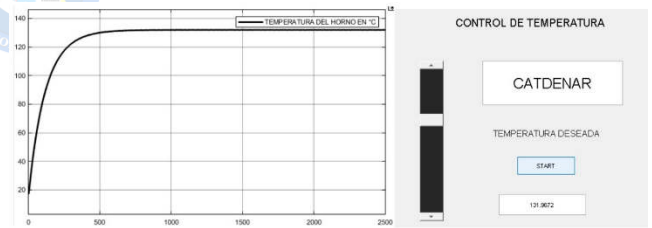
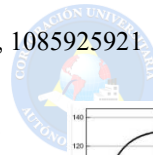


Fig. 5

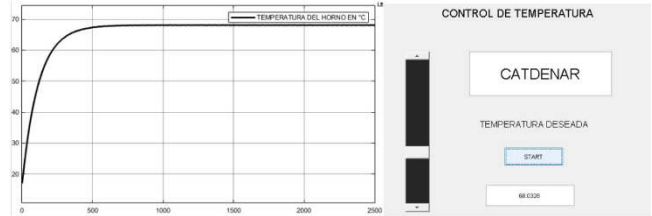


Fig. 6

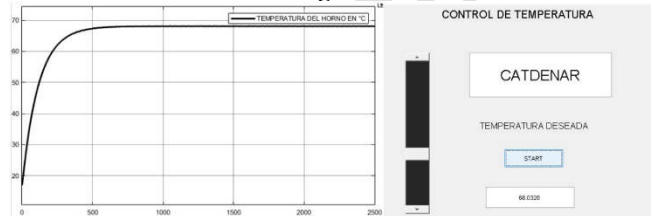


Fig. 7



Fig. 8

El proceso de creación del guide se considera de vital importancia en el proyecto, ya que este ofrece una visualización más adaptada al manejo de casi cualquier persona, que no tiene experiencia en el manejo de programas como Matlab y Simulink y sus variables, esta interfaz brinda comodidad para que casi cualquier persona pueda modificar las variables del proceso, en este caso en proceso térmico que ocurre dentro del horno.

#### E. simulación.

Para el proceso de simulación se utilizó el comportamiento de la temperatura teniendo en cuenta la ecuación diferencial obtenida en el proceso de modelado (Ecuación 1.), la cual describe el fenómeno. El resultado obtenido es una gráfica de aumento de temperatura respecto al tiempo mostrada en la fig. 9, también se tuvo en cuenta el área de apertura de la válvula para el GLP y el flujo masico de este con respecto a la abertura de la válvula.

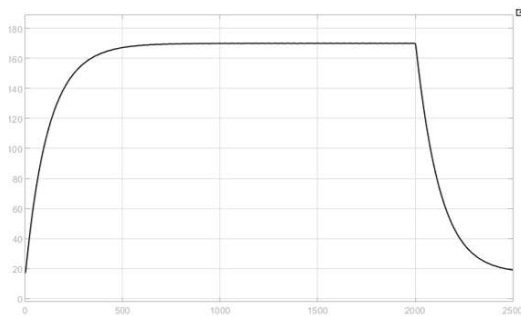


Fig. 9

## VII. RESULTADOS

### A. Resultado estado actual.

Como primer resultado obtenido, se determina que el punto de partida del proyecto en torno a la parte física de control se hace necesario el controlar el proceso térmico. Teniendo en cuenta esto, podemos identificar que la variable que deseamos controlar es la temperatura uniforme en el interior del horno, esto lo podemos realizar utilizando una válvula final de control la cual mediante una señal análoga poder manipular el porcentaje de apertura y cierre del área de la válvula, para de esta manera variar el paso del GLP de acuerdo con las necesidades que arroje el controlador.

Como parte inicial de este proyecto es la revisión general y detallada del estado actual. Es de suma importancia, ya que es un proceso de actualización para el cual se debe tener una base sólida con la cual se pueda desarrollar el proyecto de investigación.

Se encontró que el horno actual posee controladores semiautomáticos, los cuales eran funcionales hace cerca de 10 años y este tiempo han funcionado de la mano de operarios los cuales pierden tiempo valioso al estar pendientes de dichos elementos de control. Por otra parte, se pudo observar que, al no tener un control real del horno, en ocasiones se presenta quemaduras en los elementos pintados, lo cual desencadenaba en una serie de problemas, los cuales generan sobrecostos para la persona que esté utilizando esta máquina, así como también la pérdida del tiempo de alistado de las piezas para nuevamente intentar regular la temperatura sin que la pieza se llegue a quemar.

Se partió desde la inoperancia de la maquina en torno a fallos de temperatura y condiciones de operación que la hacen un tanto difícil de operar, para con esa información poder desarrollar mediante modelado y simulación un proceso ideal que se pueda implementar en dicho horno.

Teniendo en cuenta el objetivo planteado de la verificación del estado actual se determina como primera medida el control de la válvula de Acceso de glp con la cual se desea controlar la temperatura.

En segunda medida se determina la reutilización de una gran cantidad de componentes como lo son: temporizador, sensor controlador de temperatura, contactores, relés térmicos, botones interruptores y gran parte de componentes físicos que componen la estructura de la máquina.

A partir de esto, el trabajo de desarrolla en torno a la variabilidad de la válvula que varía el caudal de glp para su respectivo control de la temperatura, así como también la simulación de flujo dentro del horno.

### B. Resultado de modelo matemático

En la ecuación 1, se contempla las pérdidas y ganancias de calor dentro de un sistema con el fin de observar el cambio de temperatura respecto al tiempo. Siendo esta una de las bases indispensables para el desarrollo adecuado del proyecto de simulación y modelado.

Podemos observar el flujo de salida, el poder calorífico y las pérdidas del sistema, todo esto enmarcado en el desarrollo del sistema involucrado. Se observa también que cuando el sistema gana más temperatura o energía, este se ve afectado directamente proporcional a dicho incremento, ya encontrando la ecuación que describe el funcionamiento de la planta se procedió a implementar un control PID, La finalidad de utilizar un control PID es con motivo de ir aumentando las variables de manera progresiva hasta llegar al punto de control o sea la variable deseada, de esta manera el aumento de temperatura no será de manera brusca, ya que al emplear un sistema que actúe de manera contraria podría causar quemaduras en las piezas a pintar .

### C. Resultado de diseño de control PID Y GUIDE.

Como resultado final del controlador PID nos brinda interfaz gráfica en la cual se evidencia los tres coeficientes de variación mostrados en las fig. 10, 11 y 12, en ellos se observa que cuando el control proporcional es muy agresivo, la subida de la temperatura que se genera es abrupta, aunque después se estabiliza y llega al valor deseado. Teniendo en cuenta este hecho podemos evidenciar que mediante el cálculo del PID y simulación en Simulink, podemos disminuir esa respuesta agresiva (lo que en la práctica significaría una apertura total e inmediata de la electroválvula), a una respuesta más armónica y progresiva que es el que se requiere para controlar de manera efectiva el flujo de glp que pasa por la electroválvula, aumentando y disminuyendo la generación de calor a voluntad del usuario, así como también solventando las necesidades de los operarios del instituto de poder tener la tranquilidad de que sus piezas no se van a mal lograr.

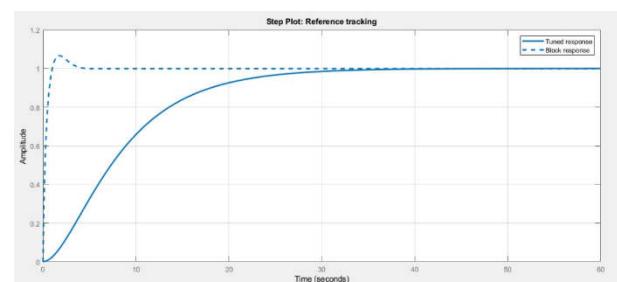


Fig. 10

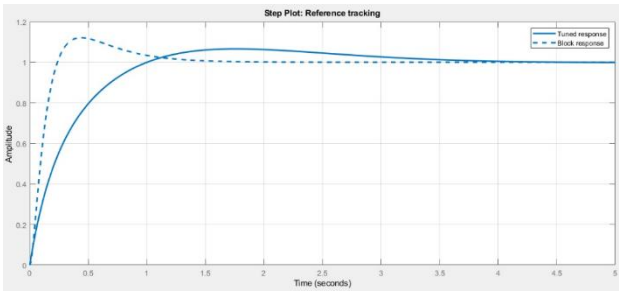


Fig. 11

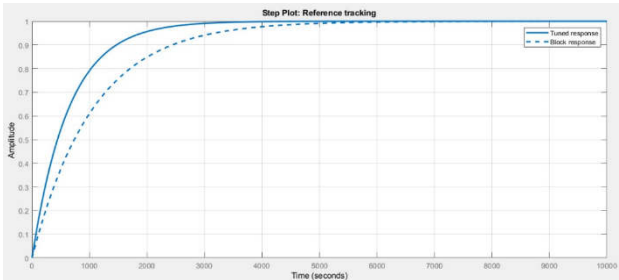


Fig. 12

En esta operación de controlar las variables y presentar una interfaz de usuario se logra efectivamente controlar las variables deseadas mediante la interfaz GUIDE en concordancia con los datos que se han obtenido a lo largo del proceso de este documento.

Se evidencia un control real de las variables que afectan el funcionamiento del horno y se determina que el proyecto es implementable en su totalidad, ya que sería de gran ayuda en el sitio donde se encuentra dispuesto el horno de pintura.

#### D. Resultado de simulación.

Teniendo en cuenta que el proceso al que se le va a aplicar el control, es un proceso de pintado, este se debe realizar de manera precisa, delicada y armónica ya que los terminados de muchas de las piezas deben tener un acabado superficial de alta calidad, teniendo en cuenta esto se implementó un control PID, el cual para nuestro caso va aumentando el área con el fin de aumentar el flujo de manera progresiva para llegar a la temperatura deseada en un tiempo razonable sin afectar el acabado y estructura de los materiales, en contraste con el proceso anteriormente realizado por dicha maquina en el cual se realizaba un proceso de verificación de la operación física de la maquina cuando esta se encontraba en uso.

Mediante simulación de las operaciones en la fig. 9 podemos evidenciar como es el aumento de la temperatura respecto al tiempo variando mediante el control PID el área de apertura de la electroválvula y por ende el caudal de glp que ingresa al sistema. Es la gráfica que mejor representa la dinámica del proceso pues en ella se evidencia directamente el comportamiento de la temperatura con respecto al tiempo del horno en funcionamiento.

Todo el proceso matemático realizado en el diagrama de bloques tiene como resultado estas graficas en las cuales

evidenciamos un aumento controlado de la temperatura y también un comportamiento constante de la misma después de haber superado un punto, así mismo se determinó necesario la implementación en la simulación de un tiempo de espera razonable en el cual la temperatura vuelve a descender una vez finalizado el proceso de horneado y secado de los elementos en el interior, ya que la apertura inmediata del horno puede generar lesiones en los operarios y aprendices del instituto, esperando hasta que la temperatura vuelva a llegar como salida final la temperatura ambiente una vez finalizado todo el proceso.

En la fig.13 podemos evidenciar como el control PID aumenta el área de la válvula final de control con el fin de aumentar el flujo de glp, esto nos da como resultado que aumente el calor en el interior del horno y a su vez aumente la temperatura. En conclusión, podemos observar que el control PID manipula una sola variable, sin embargo, dicha variable controla tanto el calor medido en watts, y la temperatura medida en grados Celsius en el interior del horno para un adecuado funcionamiento de manera constante en el tiempo.

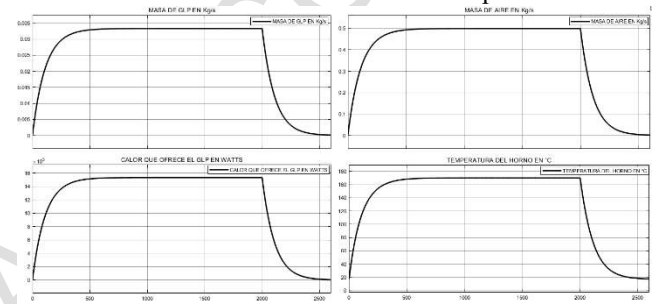


Fig. 13

Teniendo en cuenta el modelado anterior podemos graficar el comportamiento de todas las variables del sistema y como este se comporta en el tiempo, con estos resultados podemos tomar una variable y manipular casi cualquier variable deseada, en este caso la variable que controlamos es directamente el área y flujo masico para de esta manera obtener una temperatura constante en el tiempo.

Teniendo estas variables podemos manipular una válvula a voluntad por medio de casi cualquier controlador lógico programable con el fin de controlar la variable deseada de manera física. Acoplándose de una mejor manera la proposición implícita realizada en el documento de modernización del horno del instituto CATDENAR.

## VIII. CONCLUSIONES

- Al realizar una previa inspección sobre el estado actual de la máquina se logró observar todos los puntos donde existen falencias y la obsolescencia de alguna de sus partes, de ahí se logra determinar el punto de partida para el desarrollo del proyecto tomando esto como base fundamental para lograr un entorno de posibles mejoras.
- Gracias a la implementación de las matemáticas en los procesos industriales podemos



obtener datos precisos y reales del comportamiento de los procesos físicos de la industria, de esta manera se puede controlar y mejorar un proceso.

- Al simular un proceso en un programa de ordenador obtenemos resultados similares a los que ofrecería un prototipo a escala, con la gran diferencia es que utilizando una simulación disminuimos en gran cantidad los recursos necesarios para la obtención de dichos resultados.

- Se evidencio que, con cada avance tecnológico implementado en los procesos de la industria, sugiere un recorte en los recursos necesarios para llevar a cabo un resultado, beneficiando al sector industrial, lo que significa una disminución en los costos de reproducción de un bien o servicio.

#### IX. TRABAJOS FUTUROS

Como en cualquier proyecto de investigación, existen diversas líneas que quedan abiertas y en las cuales es posible continuar trabajando. Durante el desarrollo de este trabajo, han surgido algunas líneas futuras que se han dejado abiertas y que se espera puedan ser tomadas en cuenta en un futuro; algunas de ellas, están más directamente relacionadas con este trabajo de investigación y son el resultado de cuestiones que han ido surgiendo durante la realización de este trabajo. Otras, son líneas más generales que, sin embargo, no son objeto de este documento; estas líneas pueden servir para retomarlas posteriormente o como opción a trabajos futuros para otros investigadores. A continuación, se presentan algunos trabajos futuros que pueden desarrollarse como resultado de esta investigación o que, por exceder el alcance de este documento, no han podido ser tratados con la suficiente profundidad. Además, se sugieren algunos desarrollos específicos para apoyar y mejorar el modelo y metodología propuestos.

Entre los posibles trabajos futuros se destacan:

- Implementación y renovación física de un controlador en el horno presente en el instituto CATDENAR.
- Realizar un diseño de maquina con los requerimientos de transferencia de calor más adecuados para mejorar el funcionamiento del horno.
- Realizar un modelado matemático de los componentes electrónicos del sistema operacional del horno.
- Verificar una nueva alternativa en lo que concierne a mejores métodos de secado de pinturas.



#### X. REFERENCIAS

- [1] ALFONSO, U. M. (2013). MODELADO Y SIMULACIÓN DE EVENTOS DISCRETOS. EDITORIAL UNED.
- [2] ARELLANO, M. (2013). *MATLAB Y SIMULINK PARA INGENIERIA*. PERU: UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y HUMANIDADES UCH.
- [3] AUTOMATICA, I. D. (2006). SIMULACIÓN DE SISTEMAS DE CONTROL CONTINUOS CON SIMULINK. UNIVERSIDAD DE OVIEDO.
- [4] CATDENAR. (2022). *INSTITUTOCATDENAR.PRINCIPALWEBSITE*. OBTENIDO DE [HTTPS://INSTITUTOCATDENAR.PRINCIPALWEBSITE.COM/](https://institutocatdenar.principalwebsite.com/)
- [5] CHAUX, F. J. (2012). LA RELACIÓN USUARIO/CILINDRO EN EL NUEVO ESQUEMA PARA LA PRESTACIÓN DEL SERVICIO PÚBLICO DOMICILIARIO DE GAS LICUADO DE PETRÓLEO" GLP". *VNIVERSITAS*, (124), 63-90.
- [6] COVA, W. J. (2005). *CONTROL PID UN ENFOQUE DESCRIPTIVO*. UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL.
- [7] DEMEZA, M. (28 DE ENERO DE 2020). *¿QUÉ ES Y PARA QUE SIRVE UN MODELO MATEMÁTICO?* OBTENIDO DE [HTTPS://WWW.DEMEZA.COM.MX/BLOG/EDUCACION/MODELO-MATEMATICO](https://www.demeza.com.mx/blog/educacion/modelo-matematico)
- [8] ESCAÑO GONZÁLEZ, J. U. (2019). *INTEGRACIÓN DE SISTEMAS DE AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL*. EDICIONES PARANINFO, SA.
- [9] FERNÁNDEZ, M. C. (2009). *MANUAL BASICO DE MATLAB*. MADRID: EDIT. COMPLUTENSE.
- [10] GIUDICE, C. A. (2009). *TECNOLOGÍA DE PINTURAS Y RECUBRIMIENTOS*. ARGENTINA: UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL.
- [11] HOBBSAWM, E. (1988). *EN TORNO A LOS ORIGENES DE LA REVOLUCION INDUSTRIAL*. ESPAÑA: SIGLO XXI DE ESPAÑA EDITORES.
- [12] ICONTEC. (2020). *PB 9 - CÓDIGO ELÉCTRICO COLOMBIANO NTC 2050 SEGUNDA ACTUALIZACIÓN*. OBTENIDO DE [HTTPS://TIENDA.ICONTEC.ORG/GPD-PB-9-CODIGO-ELECTRICO-COLOMBIANO-NTC-2050-SEGUNDA-ACTUALIZACION.HTML](https://tienda.icontec.org/gpd-pb-9-codigo-electrico-colombiano-ntc-2050-segunda-actualizacion.html)
- [13] INDUSTRIALES, C. H. (2022). *CICSA-MAXON*. OBTENIDO DE [HTTPS://CICSA-MAXON.COM.MX/HORNOS-INDUSTRIALES/#:~:TEXT=Un%20HORNO%20INDUSTRIAL%20](https://cicsa-maxon.com.mx/hornos-industriales/#:~:text=Un%20horno%20industrial%20)



s%20UN,CREAR%20NUEVOS%20MATERIALES%20o%20ALEACIONES.

- [14] LINKPARTS. (1 DE OCTUBRE DE 2020). *WWW.LINKPARTSCDMX.COM*. OBTENIDO DE [HTTPS://LINKPARTSCDMX.COM/CATEGORY/QUEMADORES-INDUSTRIALES/](https://linkpartscdmx.com/category/quemadores-industriales/)
- [15] LLOPIS, R. S. (2019). *AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL*. PUBLICACIONES DE LA UNIVERSITAT JAUME I. SERVEI DE COMUNICACIÓ I PUBLICACIONS.
- [16] MATHWORKS. (2022). *MATLAB APP DESIGNER*. OBTENIDO DE [HTTPS://LA.MATHWORKS.COM/PRODUCTS/MATLAB/APP-DESIGNER.HTML](https://la.mathworks.com/products/matlab/app-designer.html)
- [17] MEDINA, Y. V. (2009). *ANÁLISIS TEÓRICO DEL MÉTODO DE ZIEGLER-NICHOLS*. SANTA CLARA, CUBA: UN. CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS.
- [18] MERCADOLIBRE. (2022). *MERCADOLIBRE.COM.CO*. OBTENIDO DE [HTTPS://WWW.MERCADOLIBRE.COM.CO/#FROM=HOMECOM](https://www.mercadolibre.com.co/#from=homecom)
- [19] MERCHÁN CEDEÑO, M. Á. (2012). DISEÑO DE PROCESO PARA EL PRETRATAMIENTO DE LÁMINAS METÁLICAS PREVIO A LA APLICACIÓN DE PINTURA ELECTROSTÁTICA. BACHELOR'S THESIS.
- [20] PONSÀ, P. &. (2009). *DISEÑO Y AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL*. CATALUÑA : UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA.
- [21] QUIJIA GUALOTO, E. L. (2017). *ANÁLISIS DEL PROCESO DE PINTURA ELECTROSTÁTICA Y SU INCIDENCIA EN LA PRODUCTIVIDAD EN LA EMPRESA REYPEL*. QUIJIA GUALOTO, E. L. (2017). ANÁLISIS DEL PROCESO DE PINTURA (BACHELOR'S THESIS, UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA INDOAMÉRICA).
- [22] RUEDAS, C. (2010). AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL: ÁREAS DE APLICACIÓN EN LA INGENIERÍA. BOLETÍN ELECTRÓNICO, 10.
- [23] SANCHIS LLOPIS, R. R. (2010). *AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL*.
- [24] SANTOJA, J. A. (2004). LA INFORMACION Y LAS MAQUINAS. *HISTORIA ACTUAL ONLINE 2004, LA INFORMACION Y LAS MAQUINAS* (PÁG. VOL. 4). SEVILLA: MEMORIAS DE LA REAL ACADEMIA SEVILLANA DE CIENCIAS.