

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:
INGENIERO ELECTRÓNICO**

**TEMA:
AUTOMATIZACIÓN DE UN CALENTADOR PARA EL SISTEMA DE
FUNDICIÓN DE ACERO EN LA EMPRESA ADELCA UBICADO EN
ALOAG.**

**AUTOR:
MARCO JAVIER TAPIA CRUZ**

**TUTOR:
HAMILTON LEONARDO NÚÑEZ VERDEZOTO**

Quito, julio del 2020

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Marco Javier Tapia Cruz con documento de identificación N° 172132446-3, manifesté mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de grado titulado “AUTOMATIZACIÓN DE UN CALENTADOR PARA EL SISTEMA DE FUNDICIÓN DE ACERO EN LA EMPRESA ADELCA UBICADO EN ALOAG.”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Electrónico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



Marco Javier Tapia Cruz

C.I: 172132446-3

Quito, julio del 2020

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación, “AUTOMATIZACIÓN DE UN CALENTADOR PARA EL SISTEMA DE FUNDICIÓN DE ACERO EN LA EMPRESA ADELCA UBICADO EN ALOAG.”, realizado por Marco Javier Tapia Cruz, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerado como trabajo final de titulación.

Quito, julio del 2020



Hamilton Leonardo Núñez Verdezoto

C.I: 1712981487

DEDICATORIA

Dedico este proyecto de titulación, primeramente, a Dios quien me ha dado salud, vida y sabiduría para alcanzar mis metas. Es quien siempre ha estado presente en los momentos más difíciles de mi vida y por ello le dedico en primer lugar este trabajo; por consiguiente, dedico este merito a mis padres por todo el apoyo económico y emocional durante todo el período académico en la Universidad; y, finalmente, dedico este esfuerzo a esas personas que siempre han estado apoyándome y ayudándome en tiempos difíciles.

Marco Tapia

AGRADECIMIENTO

A la Empresa Adelca C.A. que me dio la oportunidad de desarrollar este proyecto técnico y al mismo tiempo me han permitido demostrar mis conocimientos y habilidades en su sistema de producción.

Un reconocimiento para el Ingeniero Hamilton Núñez, MSc. quien me ha guiado con paciencia y me ha apoyado durante la elaboración de todo este proyecto.

Además, agradezco a la Universidad Politécnica Salesiana y a los docentes Ingenieros que proporcionaron sus conocimientos e instrumentos necesarios para formarme profesionalmente.

Marco Tapia

ÍNDICE DE CONTENIDO

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR.....	i
DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO	iv
ÍNDICE.....	v
RESUMEN.....	x
ABSTRACT	xi
INTRODUCCIÓN	xii
CAPÍTULO 1	1
ANTECEDENTES	1
1.1. Planteamiento del problema.....	1
1.2. Justificación.....	1
1.3. Objetivos	2
1.3.1. Objetivo General	2
1.3.2. Objetivos Específicos	2
CAPÍTULO 2	3
MARCO CONCEPTUAL	3
2.1. GLP.....	3
2.2. Refractarios	3
2.3. HMI	3
2.4. Horno calentador industrial.....	4
2.5. Máquina de colada continua.....	4
2.6. PID Discreto.....	5
2.7. Curva de temperatura característica del calentador de TUNDISH	5
2.8. Función de transferencia del sistema.....	6

2.8.1. Ajuste de los valores k y τ	6
2.9. Flujograma del sistema de calentamiento de TUNDISH.....	8
2.10. Proyectos similares	9
2.10.1 Aplicación 1	9
2.10.2 Aplicación 2.....	10
2.10.3 Aplicación 3.....	11
CAPÍTULO 3	13
DESARROLLO	13
3.1. Descripción del hardware	13
3.1.1. Sistema Neumático.....	13
3.1.2. Sistema de generación de aire.....	14
3.1.3. Sistema de conducción de gas	14
3.1.4. Tapa.....	15
3.1.5. Tablero.....	15
3.2 Relación estequiométrica entre el aire Y GLP	16
3.3 Cálculo de proporcionalidad	17
3.4 Parámetros PID	18
3.5 PID Discreto.....	18
3.6. El PLC.....	19
3.6.1. Descripción	19
3.6.2. Flujograma del programa	20
3.7. Plano PI&D	21
3.7.1. Descripción	21
3.7 Diseño de HMI.....	22
3.7.1. Modo Automático	23
3.7.2. Opción Manual 1.....	24

3.7.3. Opción Manual 2.....	25
3.7.4. Monitoreo del sistema	26
CAPÍTULO 4	27
PRUEBAS Y RESULTADOS.....	27
4.1. Curva referencial de calentamiento	27
4.2. Curva real.....	28
4.3. Análisis del error en estado estable	29
4.3.1. Error en niveles estables	29
4.3.2. Error en rampas de subida	30
4.4. Tabla comparativa	31
4.5. Análisis del funcionamiento del sistema	31
CONCLUSIONES	33
RECOMENDACIONES	34
REFERENCIAS	35
ANEXOS	

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Proceso de colada continua	4
Figura 2.2 Curva de calentamiento de Temperatura vs Tiempo	6
Figura 2.3 Pantalla de la herramienta Solver	7
Figura 2.4 Curvas de Temperatura en función del tiempo	8
Figura 2.5 Modelo electrónico del controlador PID	9
Figura 2.6 Ajuste del control PID	10
Figura 2.7 Esquema de controlador PWM	11
Figura 2.8 Variación de la temperatura en la zona de igualación del horno objeto de estudio frente a un paso en el flujo de combustible	12
Figura 2.9 Respuestas temporales del sistema de control de temperatura con controladores FPI y PI con ganancia variable ($K=0.003$).	12
Figura 3.1 Calentador de Tundish.....	13
Figura 3.2 Cilindro neumático monoestable.....	14
Figura 3.3 Sistema de generación de Aire	14
Figura 3.4 Tapa superior del Tundish	15
Figura 3.5 Tablero de conexiones eléctricas.....	15
Figura 3.6 Curva de control PID.....	18
Figura 3.7 Interfaz del CPU 313C	19
Figura 3.8 Diagrama de Instrumentación PI&D	21
Figura 3.9 Pantalla de Inicio en HMI	22
Figura 3.10 Pantalla HMI modo Automático	23
Figura 3.11 Pantalla HMI modalidad Manual Opción 1	24
Figura 3.12 Pantalla HMI modalidad Manual Opción 2	25
Figura 3.13 Pantalla HMI opción Monitoreo del Sistema.....	26
Figura 4.1 Curva de Calentamiento para Tundish	27
Figura 4.2 Curva experimental de Temperatura vs Tiempo	28
Figura 4.3. Curva experimental y curva Real de Temperatura vs Tiempo	29
Figura 4.4 Control de flamas para el calentamiento del Tundish.....	32
Figura 4.5 Control de flamas para el calentamiento del Tundish.....	32

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1 Tabla de tiempos de calentamiento.....	28
Tabla 4.2 Comparación del sistema de calentamiento actual respecto al inicial	31

RESUMEN

En la industria Acerera, para la obtención de diferentes tipos de acero o sus aleaciones de alta calidad, se debe realizar procesos de fundición precisos, en los cuales interviene tiempos de calentamiento o enfriamiento al igual que temperaturas optimas, esto da como resultado la imperiosa necesidad de controlar tanto el tiempo de variación de temperatura como la temperatura misma, caso contrario el resultado termina siendo de baja calidad o de una vida útil por debajo de lo requerido. Este proyecto se enfocó en el control de estabilidad de temperatura y el tiempo de variación de la misma, ya que al repartir el control se tiene por un lado las estabilización de la temperatura y por el otro el escalamiento o cambio periódico del mismo para obtener una variación homogénea de la temperatura en el tiempo requerido por el proceso de calentamiento, por lo tanto se controló la temperatura para el calentamiento óptimo de los recipientes Tundish y el tiempo de secado para la masa refractaria ubicada dentro de los mismos, permitiendo así que el acero líquido, el cual es vertido en estos recipientes, fluya por cada canal de distribución del Tundish, dando como resultado un correcto desplazamiento del acero sin generar reacciones químicas innecesarias y un aumento en los controles tanto en precisión, rapidez y eficiencia respecto a un control manual, disminuyendo también el consumo de recursos con resultados de calidad, además de la flexibilidad de cambio de procesos e independencia de un operador permanente monitoreando el proceso en cuestión.

ABSTRACT

In the Steel Industry, to obtain different types of steel or its high quality alloys, precise smelting processes must be carried out, in which heating or cooling times are involved as well as optimal temperatures, this results in the imperative need to control both the temperature variation time and the temperature itself, otherwise the result ends up being of poor quality or of a useful life below what is required. This project focused on the control of temperature stability and the time of variation of the same, since when distributing the control one has on the one hand the stabilization of the temperature and on the other the scaling or periodic change of the same to obtain a homogeneous variation of the temperature in the time required by the heating process, therefore the temperature for the optimal heating of the Tundish vessels was controlled and the drying time for the refractory mass located therein, thus allowing the steel Liquid, which is poured into these containers, flows through each distribution channel of the Tundish, resulting in a correct displacement of the steel without generating unnecessary chemical reactions and an increase in controls both in accuracy, speed and efficiency with respect to a manual control , also reducing the consumption of resources with quality results, in addition to the flexibility of change of proce You are and independent of a permanent operator monitoring the process in question.

INTRODUCCIÓN

Las Acerías normalmente trabajan en la fundición de aleaciones de hierro a altas temperaturas ($1400^{\circ}\text{C} \sim 1800^{\circ}\text{C}$), para lo cual cuentan con hornos, secadores y calentadores, estos equipos actualmente son operados manualmente, por lo que los sistemas no poseen una secuencia temporizada precisa, provocando así una baja eficiencia y productividad, por lo tanto, incidiendo en los costes de producción.

Algunos estudios sobre refractarios muestran que es importante manejar una curva de calentamiento, donde la rampa de temperatura sea controlada, para así no deteriorar rápidamente su vida útil, sin embargo, muchas de estas industrias no cuentan con dicha curva de calentamiento que permita la conservación de los mismos.

Existe problema en mantener fija la combustión de la mezcla GLP y aire, ya que actualmente el proceso de control de combustión es manual por medio de un operario con los inconvenientes que ello implica, como: el inexistente monitoreo continuo de la mezcla, el cansancio del operador luego una larga jornada de trabajo, una mezcla pobre que produce humo y una mezcla rica que consume demasiado GLP.

Para este fin se desarrollará un control PID para la temperatura, en la cual se estudiará tanto las variables a ser controladas como las manipuladas con el fin de estabilizar de la mejor forma posible la temperatura y hacerlo en tiempos óptimos dando así flexibilidad en el control de la temperatura a los tiempos requeridos en cada proceso.

Finalmente, se realizara la programación para el procesamiento de los parámetros necesarios en los procesos ya que el control PID mantendrá estabilizada la temperatura mas no controlara el incremento escalonado de la misma lo cual se lograra con programación y temperación a base de los parámetros propios de cada proceso.

CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES

1.1. Planteamiento del problema

La empresa ADELCA ubicada en Aloag cuenta con recipientes industriales para un almacenamiento temporal del acero en estado líquido (colada), los cuales son expuestos a altas temperaturas mediante quemadores que operan bajo un control on/off, es decir, las válvulas que controlan la salida de GLP y aire del quemador se abren y se cierran dentro de un tiempo establecido por medio de un operario de forma manual.

Al no disponer de un control proporcional sobre las válvulas de apertura de GLP y aire para la combustión, no se puede controlar la variación de la temperatura de calentamiento o enfriamiento del sistema de acuerdo a la curva de temperatura requerida por la empresa, provocando así un deterioro rápido sobre los recipientes Tundish y un mal funcionamiento del mismo.

Este inconveniente se traduce en un consumo extra de combustible desperdiciando recursos, además del tiempo involucrado en el control manual por parte del operador.

1.2. Justificación

Los sistemas automatizados permitirán realizar actividades secuenciales, sincronizadas y con mayor precisión, por lo que al automatizar los calentadores y secadores se optimizará el tiempo de operación y se reducirá el desperdicio de los recursos, ya que habrá mayor sincronización en los procesos, adicionalmente, la automatización de los calentadores permitirá la implementación de una curva de calentamiento controlada para así preservar los materiales térmicos y la correcta operatividad de los mismos.

Los recipientes Industriales (Tundish) necesitan permanecer a una temperatura estable para poder interactuar con el acero líquido y la masa refractaria que lo recubre internamente debe estar completamente seca, ya que caso contrario se produce un desequilibrio en la composición química del acero, provocando así un producto en mal

estado, por lo tanto, es muy importante que se prevea un control de temperatura para el calentamiento y secado del Tundish.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Desarrollar la automatización de un calentador industrial del proceso de fundición de acero para que trabaje dentro de las condiciones de operación requeridas por la empresa Adelca ubicado en Alog.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar el proceso actual de temperatura del calentador industrial Tundish con combustión GLP y aire para el reconocimiento de las variables a ser controladas.
- Desarrollar un control en lazo cerrado por medio del PLC S7-300 para la estabilización de temperatura en el calentador por medio del control de la combustión.
- Implementar un HMI para ingreso de parámetros y monitoreo del sistema de calentamiento.
- Observar la productividad entre el proceso normal y el automatizado.

CAPÍTULO 2

MARCO CONCEPTUAL

2.1. GLP

El GLP conocido como gas licuado del petróleo, es fundamentalmente una combinación de moléculas de propano y butano, con trazas de otros compuestos los cuales son gases mientras están a temperatura ambiente y presión atmosférica, por eso se puede utilizar en el hogar en forma de gas. Cuando se somete a presiones moderadas o se enfría, se transforma en líquido. En estado líquido, se transporta y almacena con facilidad. Una vez enfriado o presurizado, el GLP suele almacenarse en contenedores de acero o aluminio.

El GLP es incoloro e inodoro por lo que se le añade un agente fuertemente Odorizante para detectar con facilidad cualquier fuga, por pequeña que sea. (LPG, 2015) (Lara, 2012)

2.2. Refractarios

Son materiales cerámicos o no cerámicos, que se caracterizan por tener estabilidad química y resistencia mecánica a altas temperaturas, en general superior a 1400°C. Se utilizan como protección de estructuras expuestas a altas temperaturas. Son muy utilizadas en industrias fabricantes de acero, vidrio, cemento, entre otras. (Inoriza, 2018)

2.3. HMI

Las siglas *HMI* significan Interfaz Hombre Máquina, por la cual interactúa el hombre con un proceso dentro de una planta. Permite al operario supervisar y controlar sistemas industriales. (wonderware, 2019)

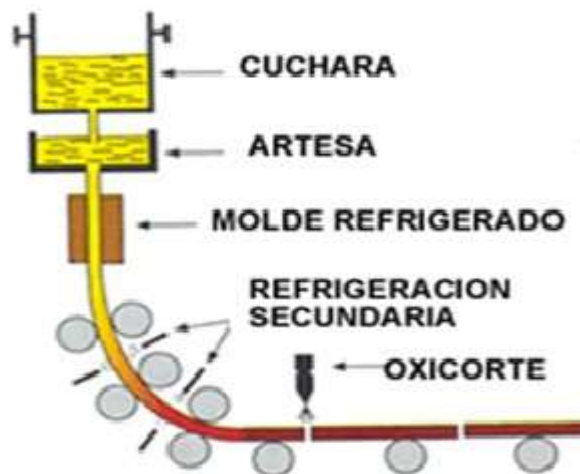
El término interfaz de usuario se define como "todas las partes de un sistema interactivo (software o hardware) que proporcionan la información y el control necesarios para que el usuario lleve a cabo una tarea con el sistema interactivo" (Cobo, 2017)

2.4. Horno calentador industrial

Los hornos industriales son equipos o dispositivos utilizados en la industria, en los que se calientan elementos colocados en su interior o su estructura misma por encima de la temperatura ambiente. La energía calorífica requerida para el calentamiento de los hornos se puede obtener de gases calientes producidos en la combustión de combustibles sólidos, líquidos o gaseosos. (emison, 2016)

2.5. Máquina de colada continua

Figura 2.1 Proceso de colada continua



Proceso de formación de acero, Fuente: (METALES FERROSOS, 2017)

El proceso de colada continua cuenta con una cuchara que permite transportar el acero líquido y es movilizada desde el horno de fundición hasta la parte superior del proceso de colada, también posee una artesa o también conocido como Tundish que sirve como recipiente que recibe el chorro de acero de la cuchara y lo distribuye por las diferentes líneas conectadas con las lingoteras, las cuales se encargan de crear la primera capa solidificada del acero. Dentro de las lingoteras se cuenta con un oscilador el cual genera un movimiento para que el acero no se pegue en las paredes de las lingoteras y así puedan ser dirigidas con normalidad hasta la etapa de refrigeración donde con chorros de agua el acero es solidificado. Y finalmente el sistema cuenta con una herramienta denominada oxicorte que corta las barras de acero según sea el

requerimiento de producción y luego son transportadas a través de unos rodillos. (METALES FERROSOS, 2017)

2.6. PID Discreto

Un PID analógico se define como:

$$PID = K_c \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt - t_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad \text{Ec. (2.1)}$$

La ecuación del PID analógico puede ser expresada en forma digital de la siguiente forma:

$$C[z] = e[z] \left(K_c + K_i \frac{T}{2} \frac{1+z^{-1}}{1-z^{-1}} + K_d \frac{1-z^{-1}}{T} \right) \quad \text{Ec. (2.2)}$$

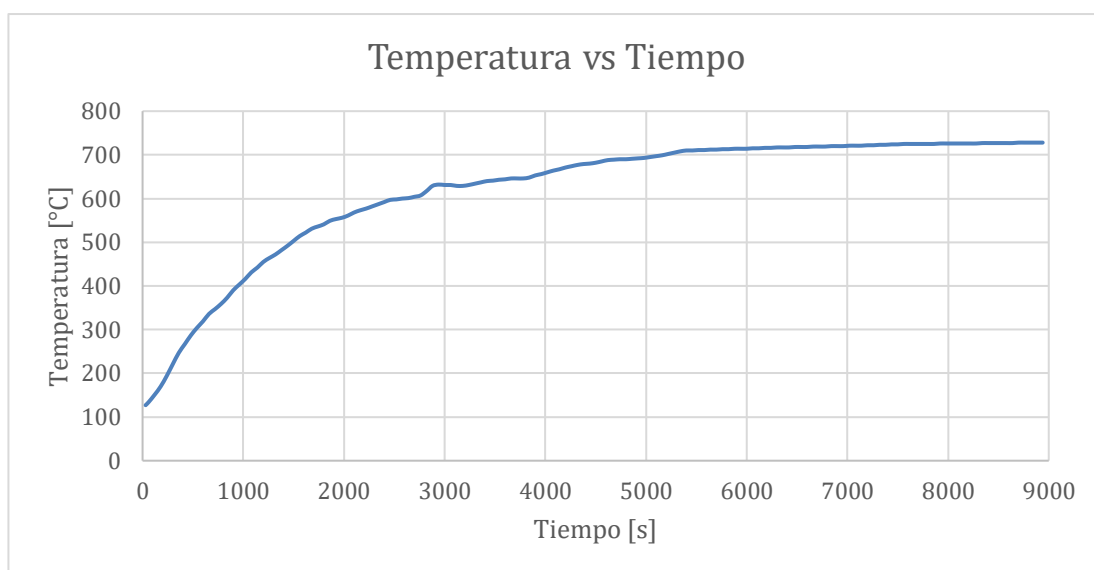
Para obtener el PID discreto se aplica la transformada Z inversa, posteriormente se discretiza y se expresa en términos de las muestras. (Balbin, 2015)

$$C[k] = c[k-1] + e[k] \left(K_c + \frac{K_i T}{2} + \frac{K_d}{T} \right) + e[k-1] \left(-K_c + \frac{K_i T}{2} - \frac{2K_d}{T} \right) + e[k-2] \left(\frac{K_d}{T} \right) \quad \text{Ec. (2.3)}$$

2.7. Curva de temperatura característica del calentador de TUNDISH

La curva de temperatura en función del tiempo describe el comportamiento del sistema y a través de ella se obtiene su función de transferencia, para lo cual se inició obteniendo datos experimentales a través de una respuesta dinámica del sistema a un cambio escalón. Las pruebas se realizaron con una flama al 31 % de intensidad, considerando que la flama puede variar entre 20-100% de intensidad. Los valores fueron registrados en la tabla colocada en ANEXO 1 y la gráfica que se obtuvo se la puede observar en la Figura 2.2.

Figura 2.2 Curva de calentamiento de Temperatura vs Tiempo



Curva experimental del calentamiento de un Tundish, Elaborado por: Marco Tapia

2.8. Función de transferencia del sistema

Partiendo de la curva de temperatura y haciendo uso de la ecuación 2.4 se calculó la ganancia y la constante de tiempo necesario para la obtención de la función de transferencia, en este caso se trabajó con una función de transferencia de primer orden.

$$y(t) = k(\Delta u)[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)]U(s) \quad \text{Ec. (2.4)}$$

Los cálculos están hechos mediante las herramientas de Excel y sus valores están registrados en la tabla de Anexo 1.

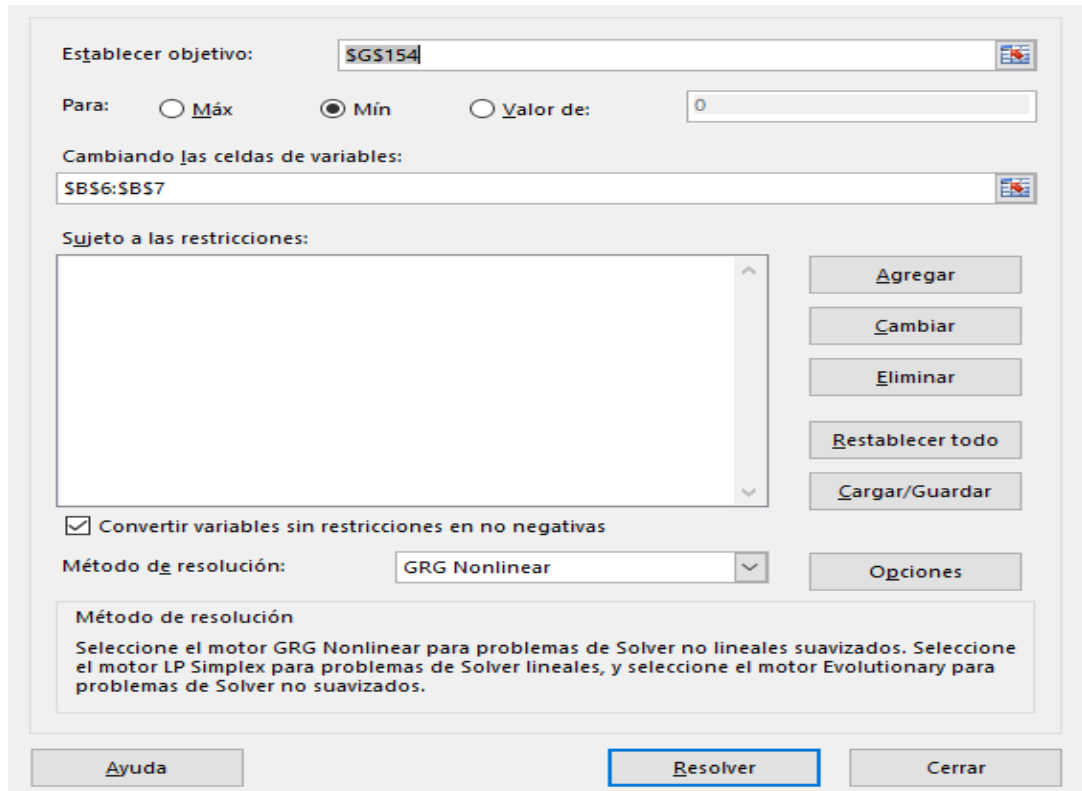
Para determinar los valores de $y(t)$ se consideró que Δu es 31 en representación a la intensidad de flama que se ocupó, el valor de la ganancia k es dado por el valor final de temperatura menos el valor inicial de temperatura y dividido por Δu y el valor de la constante de tiempo τ se consideró de 1000s como referencia, ya que luego es ajustado haciendo uso de la herramienta Solver mostrada en la Figura 2.3.

2.8.1. Ajuste de los valores k y τ

Para ajustar los parámetros de k y τ se utilizó la herramienta *Solver* de Excel, para lo cual se partió de la ecuación 2.5, ya que se requiere del error para ajustar los parámetros. Los resultados están registrados en la tabla de Anexo 1.

$$Error = \sum(y(t) - T)^2 \quad \text{Ec. (2.5)}$$

Figura 2.3 Pantalla de la herramienta Solver



Herramienta de Excel para ajustar parámetros, Elaborado por: Marco Tapia

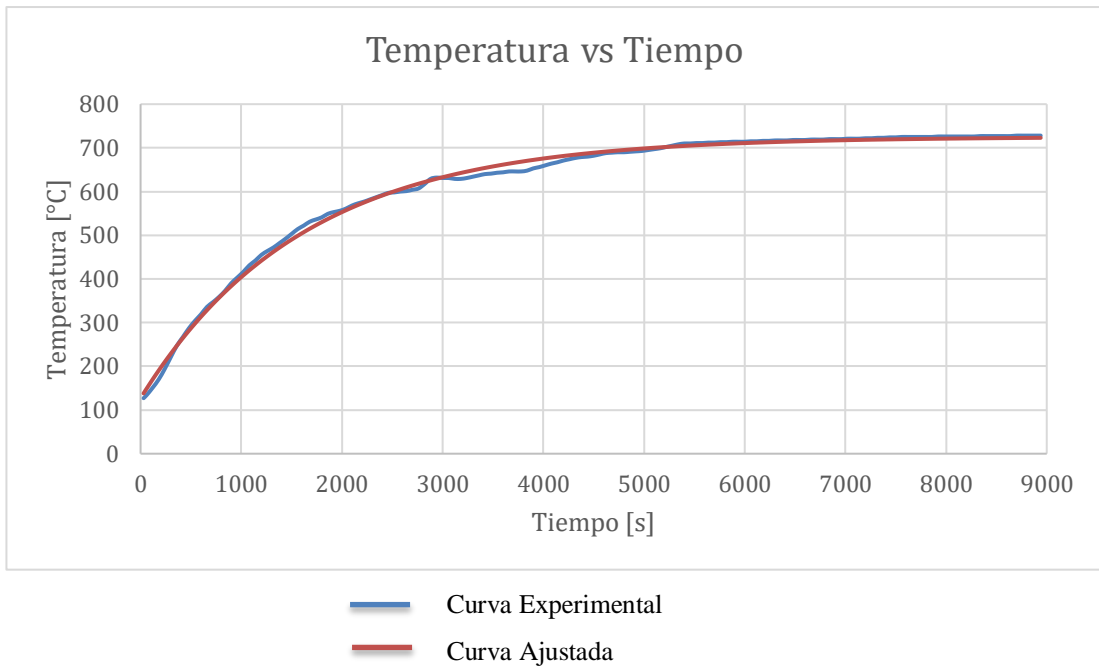
En el cuadro de *Establecer objetivo* se coloca el error y en el cuadro de *Cambiando las celdas de variables* se coloca la posición de las celdas que contienen los valores de ganancia k y constante de tiempo τ y finalmente se da clic en Resolver. De esta forma se obtiene los valores que serán reemplazados en la ecuación 2.6, dando como resultado la función de transferencia de primer orden del sistema de calentamiento.

$$Y(s) = \frac{k}{\tau s + 1} U(s) \quad \text{Ec. (2.6)}$$

$$Y(s) = \frac{19.3}{1606,9 s + 1} U(s)$$

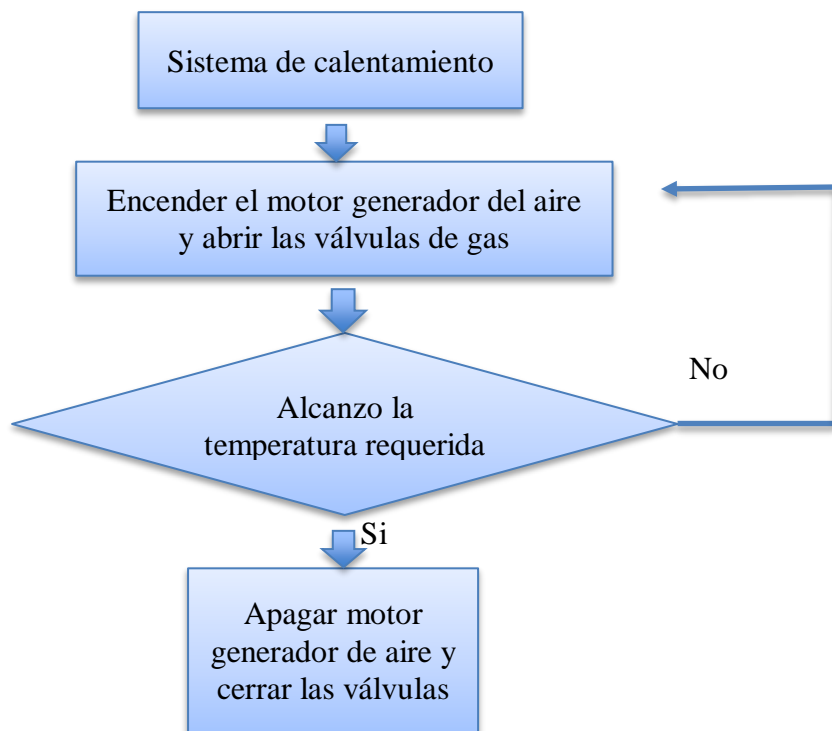
En la figura 2.4 se puede observar la curva ajustada respecto a la curva real, mostrando así los valores ajustados para la obtención de una curva ideal.

Figura 2.4 Curvas de Temperatura en función del tiempo



Relación de curvas de temperatura experimental y ajustada, Elaborado por: Marco Tapia

2.9. Flujograma del sistema de calentamiento de TUNDISH



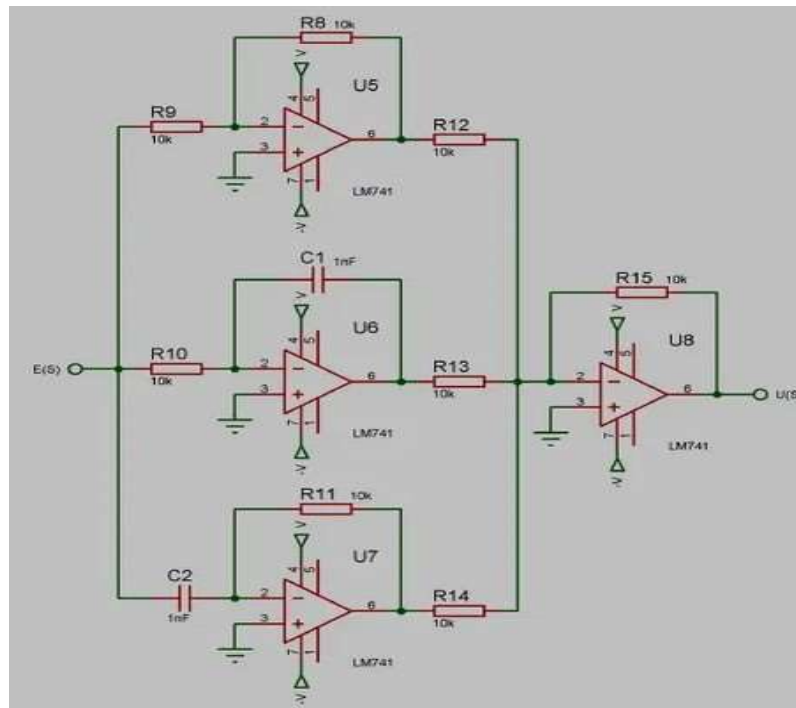
2.10. Proyectos similares

2.10.1 Aplicación 1

En el año 2015, en la Universidad Nacional de Piura, los Ing. Aponte Castro, Ing. Clavijo Correa e Ing. Salvador Rondoy, implementaron un controlador PID en un horno con el fin de controlar la temperatura. Como se sabe al conectar el sistema de control on/off, este activara o desactivara una acción ya sea para aumentar o disminuir la temperatura, en ambos casos existe la posibilidad de que el sistema se deteriore. No obstante, en gran parte del sector industrial existen procesos en los cuales se requiere del manejo adecuado, por lo cual se emplean dispositivos de control de parámetros tales como los que mantienen la temperatura en un rango estable sin cambios que puedan afectar al sistema o lo que contiene.

El siguiente modelo matemático corresponde a la función de transferencia del controlador PID la cual se controla a través de voltaje, este controlador está determinado por amplificadores operacionales y tanto el modelo como el diseño se muestran en la figura 2.5. (Aponte Castro, 2015)

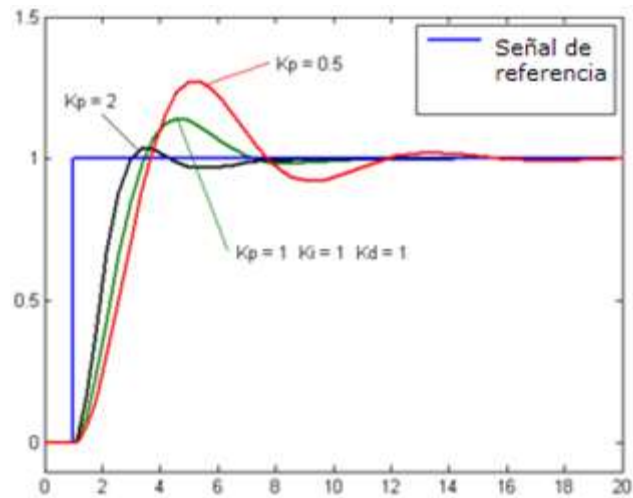
Figura 2.5 Modelo electrónico del controlador PID



Elaborado por: (Aponte Castro, 2015)

Las curvas del control resultante se muestran en la figura 2.6

Figura 2.6 Ajuste del control PID



Elaborado por: (Aponte Castro, 2015)

2.10.2 Aplicación 2

En el año 2017, en la Universidad Nacional del Antiplano en Perú, los autores: Ing. Saúl Condori e Ing. Javier Serpa, implementaron un control con modulación de ancho de pulso para un horno industrial. Para el desarrollo del control utilizaron un PLC el cual permite programar en números reales, trabaja a velocidades altas, maneja funciones complejas y se puede visualizar en varios tipos de esquemas.

Se usa la modulación de ancho de pulso para realizar un control efectivo de la temperatura del horno industrial, el PLC tiene un rango muy variado de esquemas que nos permite controlar de forma eficiente el proceso de funcionamiento del horno industrial. Utilizando controladores lógicos programables el proceso de controlar la temperatura se consigue con más facilidad y mayor precisión. (Saul Condori, 2017)

La transferencia del sistema es:

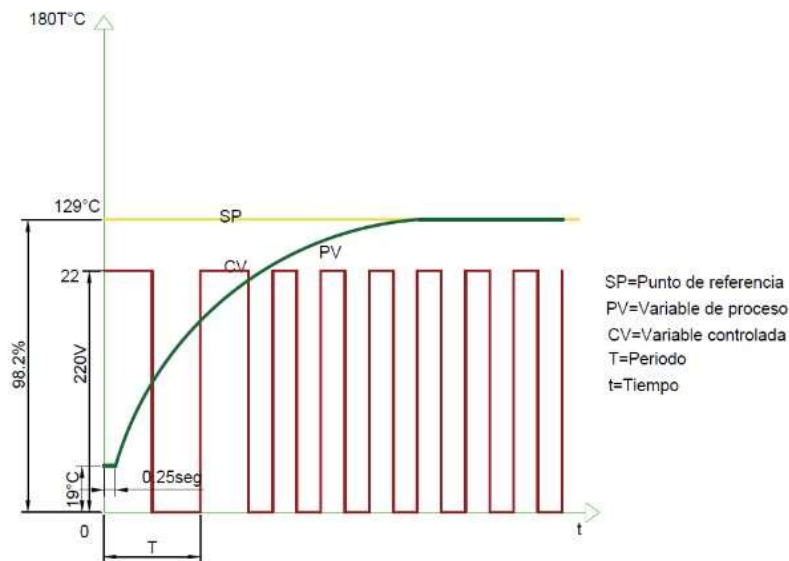
$$G(s) = \frac{0,5e^{-0,25s}}{359,938s + 1}$$

Y la función de transferencia del controlador es:

$$G_c(s) = 3455,405 \left(1 + \frac{1}{0,5s} + 0,125s \right)$$

Finalmente se tiene la modulación del ancho de pulso, la cual permitirá regular la temperatura. (Saul Condori, 2017)

Figura 2.7 Esquema de controlador PWM



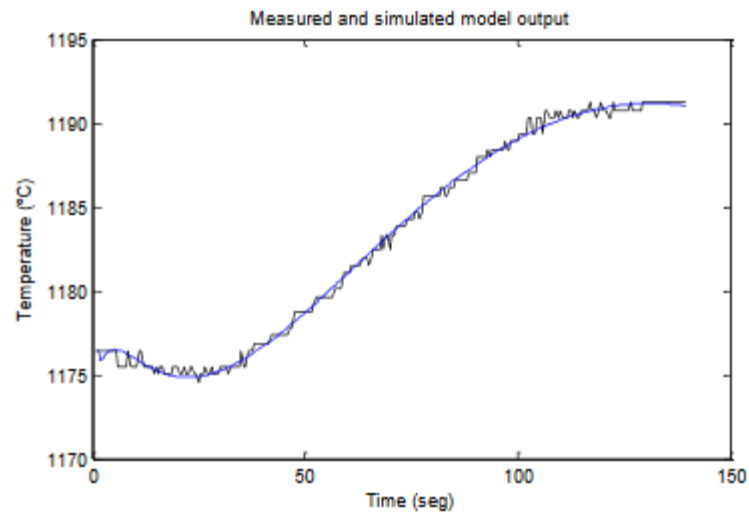
Fuente: (Saul Condori, 2017)

2.10.3 Aplicación 3

En el año 2009, en Cuba, los Ing. Mora Inchaustegui e Ing. Rivas Pérez, desarrollaron un control de temperatura para un horno de laminación de acero. El objetivo principal es estabilizar la temperatura dentro del horno de palanquillas. Para ello se caracterizó el sistema y se determinó un modelo característico del proceso. Los resultados de simulación mostraron la efectividad del controlador diseñado, así como su robustez frente a variaciones en la ganancia del proceso. El desarrollo de este proyecto permitirá reducir costos debido al poco uso de combustible y al mismo tiempo tendrá un impacto favorable sobre el ambiente.

En la Figura 2.8 se puede observar la variación de la temperatura tras modificar la cantidad de combustible en el sistema de laminación.

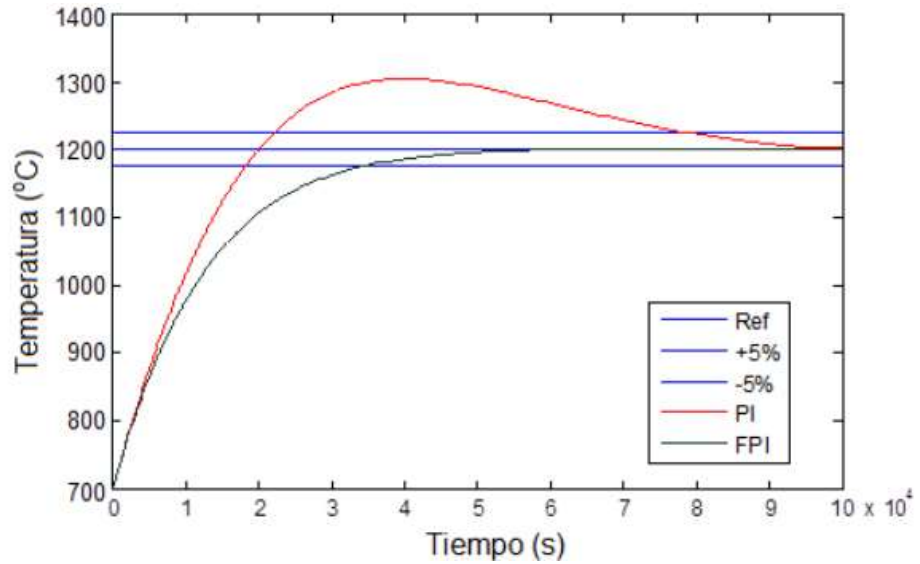
Figura 2.8 Cambio de temperatura en horno de laminación



Fuente: (Mora Inchaustegui, 2009)

Obteniendo el modelo matemático del sistema se implementó el sistema de control PI cuya respuesta temporal se ve reflejado en la figura 2.9. (Mora Inchaustegui, 2009)

Figura 2.9 Control PI de temperatura con ganancia $K=0.003$.



Fuente: (Mora Inchaustegui, 2009)

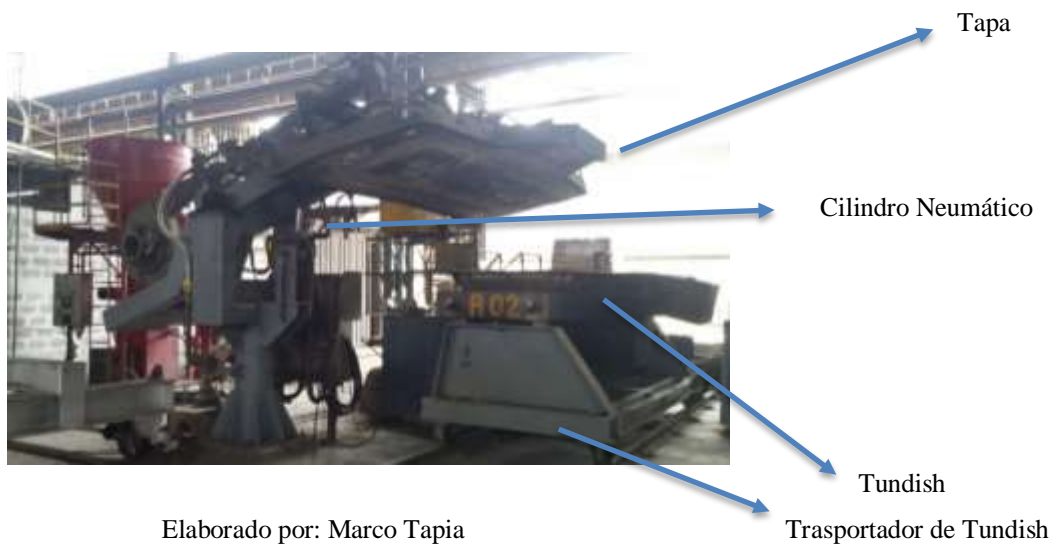
CAPÍTULO 3 DESARROLLO

En este capítulo se detalla tanto el desarrollo del hardware como el software del Sistema de Calentamiento.

3.1. Descripción del hardware

El calentador de Tundish perteneciente a la fábrica Adelca C.A. consta de la siguiente estructura mostrada en la figura 3.1.

Figura 3.1 Calentador de Tundish



3.1.1. Sistema Neumático

El sistema cuenta con una tapa, la cual debe bajar y subir, por lo que opera mediante un cilindro neumático monoestable como se muestra en la figura 3.2, la cual trabaja a 2 bares de presión. Para operar el cilindro neumático se requiere de una electroválvula, la cual es controlada con el Plc ubicado en el tablero de conexiones eléctricas.

Figura 3.2 Cilindro neumático monoestable



Elaborado por: Marco Tapia

3.1.2. Sistema de generación de aire

Posee en su extremo un motor trifásico de 5 Hp a 1750rpm y una válvula proporcional con un actuador IC20 que controla el flujo de aire a la salida.

Figura 3.3 Sistema de generación de Aire



Elaborado por: Marco Tapia

3.1.3. Sistema de conducción de gas

Contiene una válvula de paso general tipo mariposa, una válvula diferencial que sirve para cerrar el paso de gas en caso de hacer una retroalimentación, una electroválvula de 110VAC para el control automático y una válvula proporcional con un actuador IC20 que permite el control de flujo de gas a la salida.

3.1.4. Tapa

La tapa consta de tres orificios de 20 cm de diámetro los cuales conectan con los quemadores del calentador y en su centro se encuentra ubicado un sensor de temperatura (Termocupla tipo S). Las dimensiones de la tapa son de 360cm de ancho, de 120cm de largo y 15cm de profundidad.

Figura 3.4 Tapa superior del Tundish



Elaborado por: Marco Tapia

3.1.5. Tablero

Las dimensiones son de 135cm x 80cm, en su interior se encuentran ubicadas las conexiones eléctricas y dispositivos como el PLC, fusibles, borneras, un transformador, una fuente AC-DC, una pantalla HMI.

La línea principal de alimentación es trifásica de 440V, la cual es distribuida para el motor que genera el aire y para un transformador reductor el cual generara energía para los demás dispositivos como el pc, bobinas y sensores.

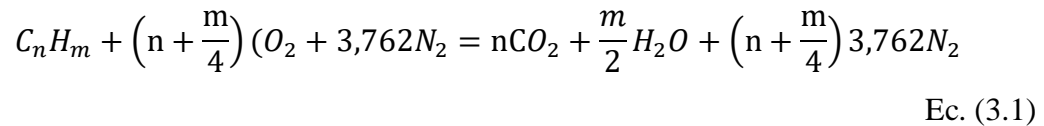
Figura 3.5 Tablero de conexiones eléctricas



Elaborado por: Marco Tapia

3.2 Relación estequiométrica entre el aire Y GLP

Para calcular la relación de aire/gas podemos utilizar la reacción estequiométrica general de un hidrocarburo. (THE INDUSTRIAL AUTOMATION GUIDE, 2017)



En este caso calcularemos la reacción estequiométrica del GLP que se compone de un 60% de propano (C₃H₈) y un 40% de butano (C₄H₁₀):

Masa molar del propano

$$C_3H_8 = 12 \times 3 + 1 \times 8 = 44 \text{ Kg/mol}$$

Masa molar del butano

$$C_4H_{10} = 12 \times 4 + 1 \times 10 = 58 \text{ Kg/mol}$$

La proporción molar del LPG:

$$C_3H_8 + C_4H_{10} = 102 \text{ Kg/mol}$$
$$PROPANO_{60\%} = \frac{102 \text{ Kg/mol} \times 0,6}{44 \text{ Kg/mol}} = 1,364$$
$$BUTANO_{40\%} = \frac{102 \text{ Kg/mol} \times 0,4}{58 \text{ Kg/mol}} = 0,689$$

Sabiendo las proporciones del GLP podemos calcular su atomicidad:

$$Carbono = 3 \text{ atm} + 1,364 + 4 \text{ atm} \times 0,689 = 6,85 \text{ átomos}$$
$$Hidrógeno = 8 \text{ atm} + 1,364 + 10 \text{ atm} \times 0,689 = 17,804 \text{ átomos}$$
$$Glp = C_{6,85}H_{17,804}$$

Con el resultado anterior, tenemos que la reacción estequiométrica del GLP es:

$$\frac{GLP}{C_{6,85}H_{17,804}} + \frac{AIRE}{11,301(O_2 + 3,762N_2)}$$
$$= 6,85CO_2 + 8,9H_2O + (11,301) * (3,762N_2)$$

De los 2 términos de la izquierda de la reacción estequiométrica podemos calcular la relación de aire/combustible:

$$\frac{AIRE}{GLP} = \frac{11,301 \text{ mol} \left(2 * 16 \frac{g}{mol} \right) + 42,51 \text{ mol} \left(2 * 14 \frac{g}{mol} \right)}{1 \text{ mol} \left(6,85 * 12 \frac{g}{mol} \right) + 1 \text{ mol} \left(17,804 * 1 \frac{g}{mol} \right)}$$

$$\frac{AIRE}{GLP} = 15,5$$

Para garantizar que la combustión de gas sea completa, suele considerarse un exceso de aire del 10% en la relación. (THE INDUSTRIAL AUTOMATION GUIDE, 2017)

3.3 Cálculo de proporcionalidad

En base a la relación estequiométrica antes calculada podemos hallar la relación de apertura de la válvula proporcional de gas y la válvula proporcional de aire, para lo cual tenemos los siguientes datos: (Niño, 2004)

$$\text{Área de la Válvula de Aire} = 79 \text{ cm}^2$$

$$\text{Área de la Válvula de GAs} = 19 \text{ cm}^2$$

$$\text{Presión de Aire} = 2 \text{ bares}$$

$$\text{Presión de Gas} = 0,5 \text{ bares}$$

$$\text{Presion Aire} = \frac{\text{Fuerrza Aire}}{\text{Área Aire}}$$

Ec (3.2)

$$FAire = \text{Presion Aire} \times \text{Area Aire} = 2\text{bar} \times 79 \text{ cm}^2$$

$$FGas = \text{Presion Gas} \times \text{Area Gas} = 0,5\text{bar} \times 19 \text{ cm}^2$$

Relación de Fuerzas de Aire y Gas

$$\frac{FAire}{FGas} = \frac{2\text{bar} \times 79 \text{ cm}^2}{0,5 \text{ bar} \times 19 \text{ cm}^2} = 18,5$$

Tomando en consideración la relación estequiométrica y la relación de fuerzas se llega a la relación de porcentajes de apertura de las válvulas de Aire y GLP

$$\frac{\text{Relación de Fuerzas}}{\text{Relacién estequiométrica}} = \frac{18,5}{15,5} = 1,19$$

Por lo tanto, se tiene que:

$$\%AIRE = 1,19 \%GAS$$

3.4 Parámetros PID

Para obtener los parámetros PID se utilizó la herramienta de Matlab *PID Tuner*, la cual, permite regular los parámetros de sobre impulso y estabilidad a partir de la función de transferencia del sistema. Para hacer uso de esta herramienta debemos colocar la función de transferencia Ec.2.7 en el Workspace de Matlab y por consiguiente importa al PID Tuner.

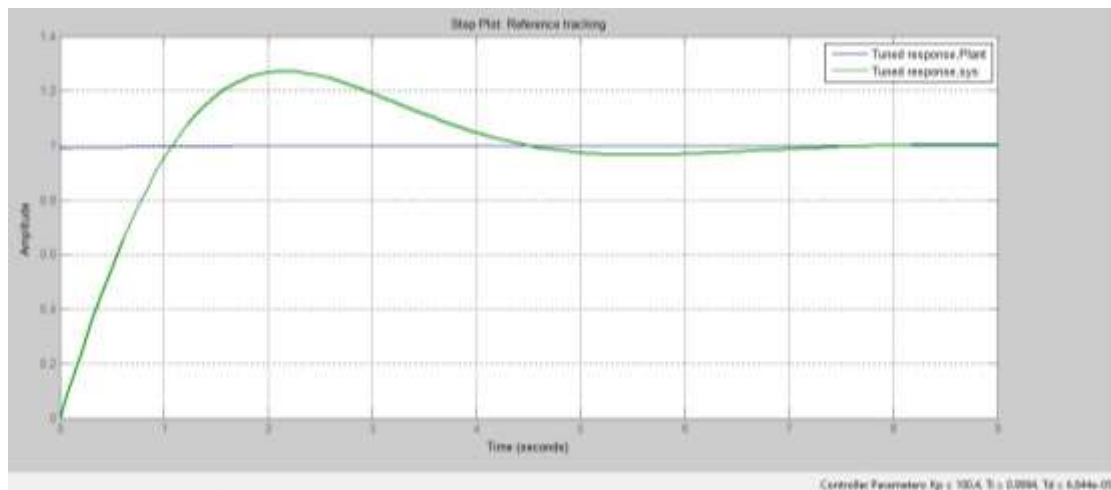
Aquí se ajustó el tiempo de respuesta y la robustez, considerando 1,369s, para el tiempo de respuesta y 0,556 la robustez, dando como parámetros:

$$K_p = 200$$

$$T_i = 49$$

$$T_d = 8,5$$

Figura 3.6 Curva de control PID



Elaborado por: Marco Tapia

3.5 PID Discreto

Para poder ocupar el PID en el controlador PLC es necesario trabajar de forma digital, para lo cual se empleó la ecuación 2.3. Considerando $T=5$ y los valores K_p , T_i , T_d antes obtenidos. (Balbin, 2015)

$$C[k] = C[k - 1] + e[k]q_0 + e[k - 1]q_1 + e[k - 2]q_2$$

Dónde:

$$q_0 = kp \left[1 + \frac{T}{2Ti} + \frac{td}{T} \right]$$

$$q_1 = -kp \left[1 - \frac{T}{2Ti} + \frac{2td}{T} \right]$$

$$q_2 = \frac{kp \, td}{T}$$

Reemplazando los valores y calculando mediante Excel se tiene:

$$C[k] = C[k - 1] + e[k][550,20] + e[k - 1][-869,79] + e[k - 2][340]$$

Estos valores pueden ser utilizados por el PLC para determinar el control de la temperatura.

3.6. El PLC

3.6.1. Descripción

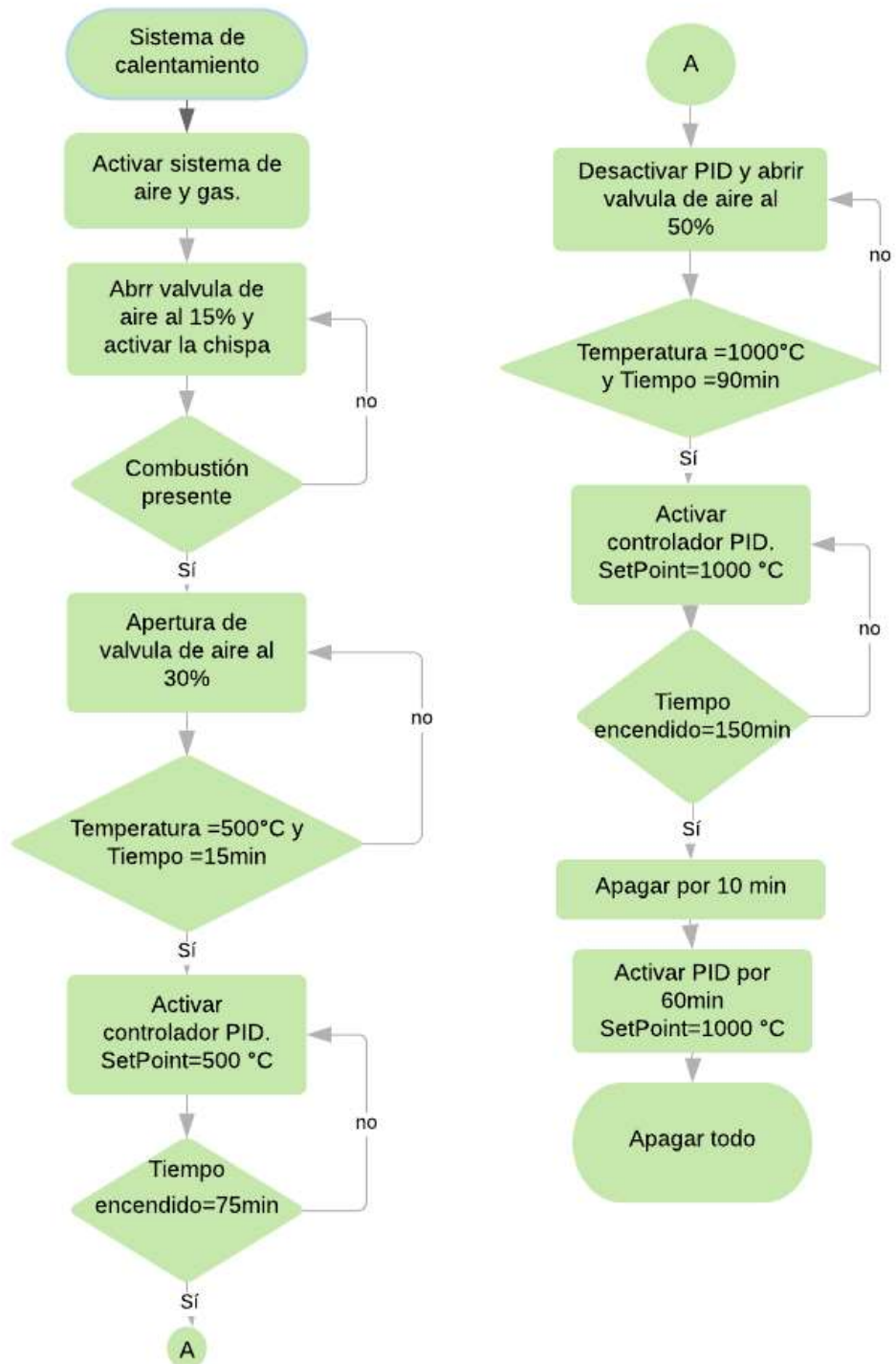
Para controlar el proceso se utilizó un CPU 313C, también conocido como PLC 300 compact, el cual posee 24 entradas digitales, 16 salidas digitales, 4 entradas analógicas, 2 salidas analógicas y una memoria central de 128 Kbyte. AL no poseer un módulo de conexión Ethernet, se adiciono un módulo CP 343-1 el cual posee una interfaz Ethernet y permite una conexión entre el PLC y la Pantalla HMI.

Figura 3.7 Interfaz del CPU 313C



Elaborado por: Marco Tapia

3.6.2. Flujograma del programa

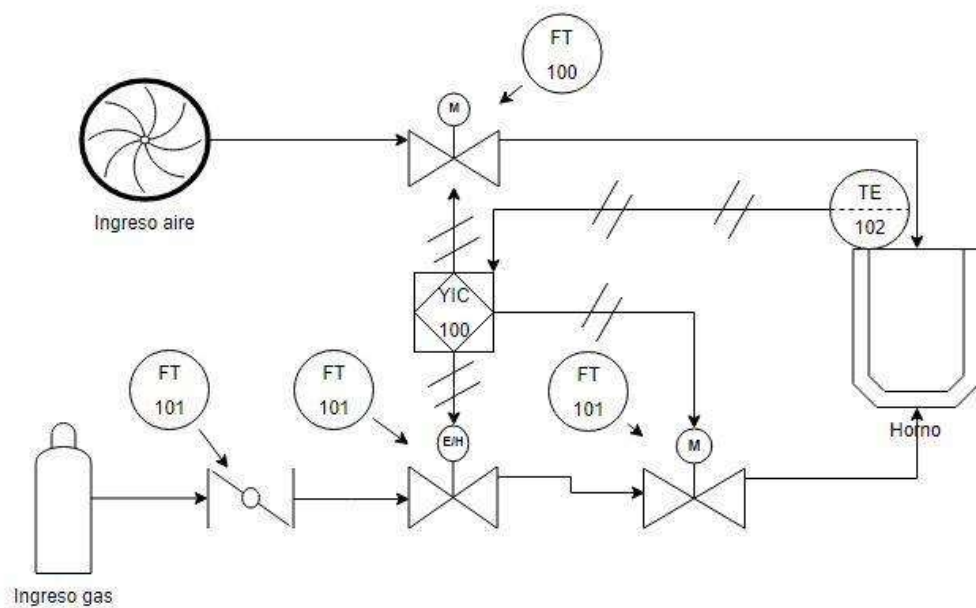


Elaborado por: Marco Tapia

3.7. Plano PI&D

Para automatizar la máquina de calentamiento se implementó ciertos actuadores como válvulas proporcionales y electroválvulas, así como un sensor de temperatura, los cuales están conectados al PLC y están ubicados como se muestra en el diagrama de instrumentación de la figura 3.8

Figura 3.8 Diagrama de Instrumentación PI&D



Elaborado por: Marco Tapia

3.7.1. Descripción

El sistema posee un conducto de aire, el cual está compuesto de un motor generador, una válvula proporcional con actuador IC20 el cual se conecta al PLC para ser controlado. También posee un conducto de GLP el cual contiene un tanque de gas como fuente y está conectado mediante una tubería de media pulgada hacia una válvula manual mariposa, por consiguiente, se conecta a una válvula proporcional la cual se controla con el PLC y finalmente tiene una electroválvula a la salida para protección emergente.

Para el control de las válvulas proporcionales el PLC requiere una medición de temperatura, por lo cual se tiene una termocupla tipo S ubicada en el centro de la tapa del Tundish.

3.7 Diseño de HMI

El sistema cuenta con una pantalla HMI KTP700, la cual posee conectividad Ethernet, MPI y Profibus y permite el monitoreo y operatividad del sistema. Cada una de las configuraciones programadas está descrita a continuación.

Figura 3.9 Pantalla de Inicio en HMI

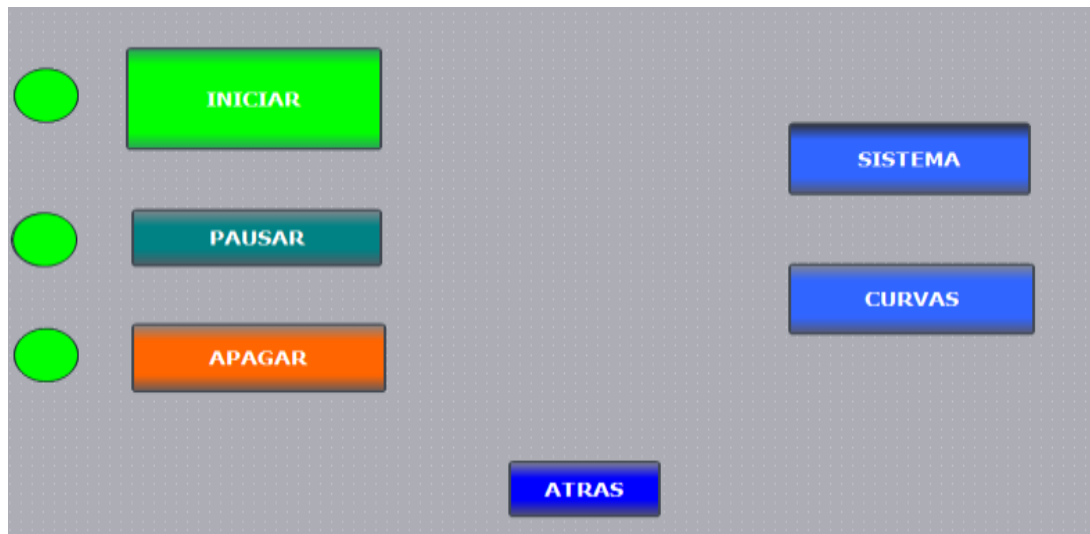


Elaborado por: Marco Tapia

- a. AUTOMÁTICO: Esta permite acceder al sistema automático, donde todo el proceso es accionado sin ningún tipo de parametrización.
- b. MANUAL_OPCIÓN 1: Aquí se ingresa al sistema manual 1, donde deberán ingresarse parámetros de porcentaje de aire y tiempo de encendido.
- c. MANUAL_OPCIÓN 2: Aquí se ingresa al sistema manual 2, donde deberán ingresarse parámetros de set point de temperatura y el tiempo de encendido.
- d. SUBIR: Permite subir la tapa del Tundish
- e. BAJAR: Permite bajar la tapa de Tundish
- f. Chispa: Permite observar si la chispa del sistema de encendido automático funciona correctamente. Al pulsarla se deberá generar una chispa en cada uno de los quemadores.

3.7.1. Modo Automático

Figura 3.10 Pantalla HMI modo Automático



Elaborado por: Marco Tapia

El modo automático cuenta con tres botones para realizar acciones en el sistema y cuenta con dos botones para observar el proceso. Lo único que se requiere para trabajar en modo automático es dar clic en INICIO.

- a. **INICIAR:** Permite dar inicio al sistema automático sin necesidad de ingresar ningún parámetro.
- b. **PAUSAR:** En caso de emergencia permite pausar el proceso durante el tiempo que sea necesario por el operador. Para continuar con el proceso se debe dar en INICIO una vez más.
- c. **APAGAR:** Permite dar por terminado el proceso.
- d. **SISTEMA:** Contiene la descripción del sistema y sus operaciones
- e. **CURVAS:** Contiene la descripción grafica de la temperatura vs tiempo

3.7.2. Opción Manual 1

Figura 3.11 Pantalla HMI modalidad Manual Opción 1



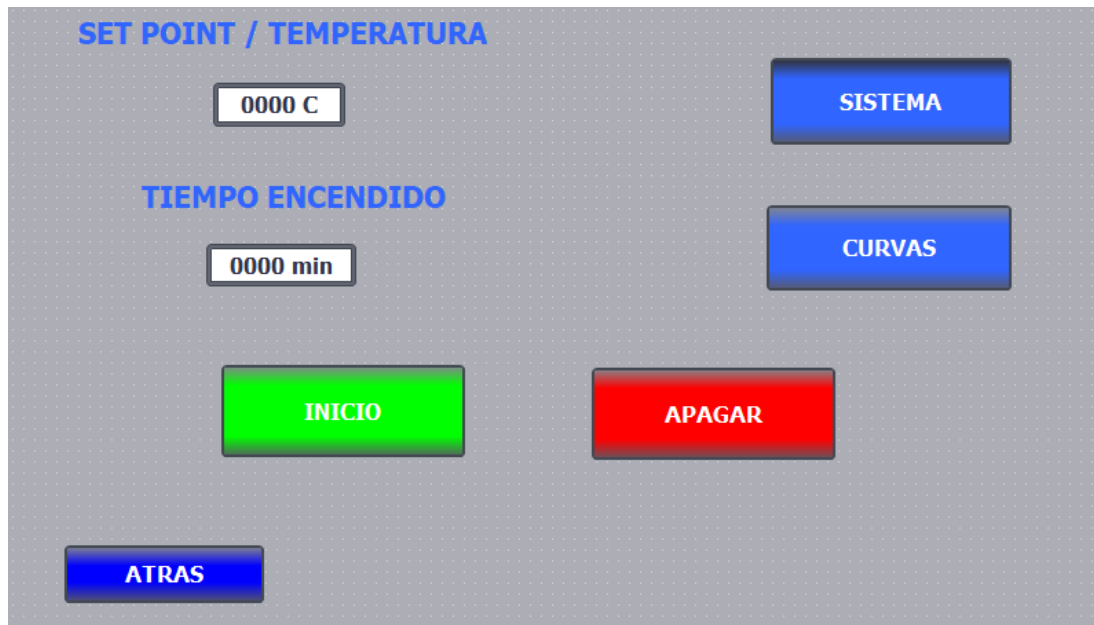
Elaborado por: Marco Tapia

Para trabajar en esta modalidad se requiere colocar un valor de porcentaje para la apertura del aire e ingresar el tiempo en minutos que permanecerá encendido el sistema y por consiguiente dar clic en el botón INICIO.

- Bajar: Permite bajar el porcentaje de apertura de la válvula de aire.
- Subir: Permite subir el porcentaje de apertura de la válvula de aire.
- TIEMPO ENCENDIDO: Permite ingresar los minutos que permanecerá encendido el sistema

3.7.3. Opción Manual 2

Figura 3.12 Pantalla HMI modalidad Manual Opción 2



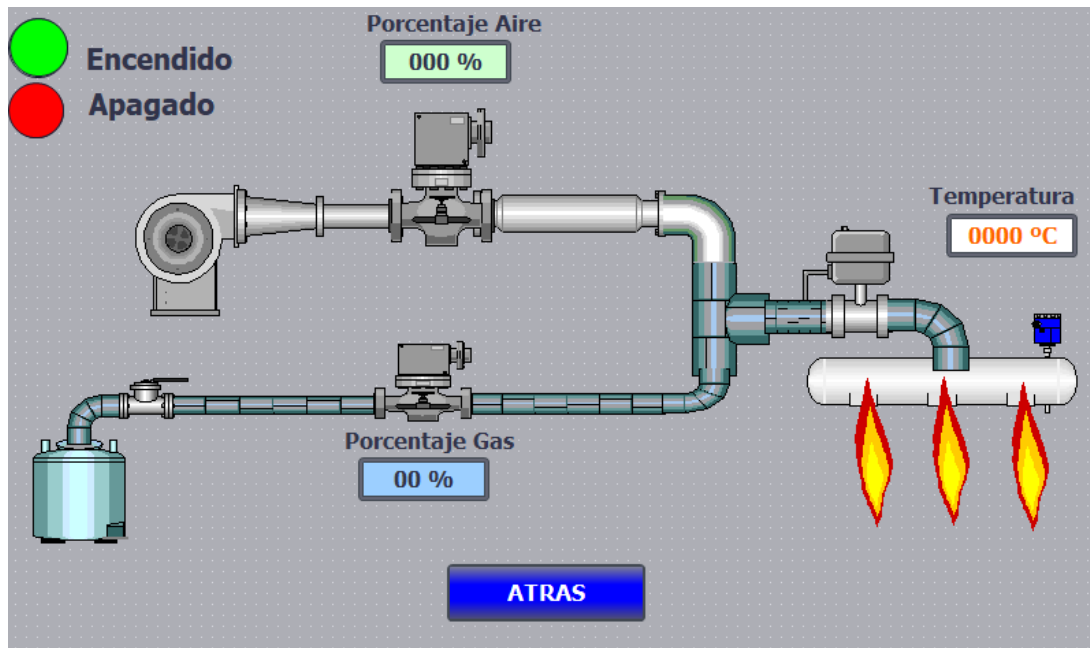
Elaborado por: Marco Tapia

Para trabajar en esta modalidad se debe colocar un valor de temperatura a la cual se requiere someter el Tundish de forma estable e ingresar el tiempo en minutos que permanecerá encendido el sistema y por consiguiente dar clic en el botón INICIO.

- a. SET POINT: Aquí se coloca el valor de la temperatura a la cual trabajara el sistema. Esta temperatura está dada en grados Celsius.
- b. TIEMPO ENCENDIDO: Permite ingresar los minutos que permanecerá encendido el sistema

3.7.4. Monitoreo del sistema

Figura 3.13 Pantalla HMI opción Monitoreo del Sistema



Elaborado por: Marco Tapia

Aquí podemos observar cómo está operando el sistema de calentamiento

- Porcentaje Aire: Se puede observar cual es el porcentaje de apertura de la válvula de aire.
- Porcentaje Gas: Se puede observar cual es el porcentaje de apertura de la válvula de gas.
- Temperatura: Permite observar cual es la temperatura dentro del TUNDISH.

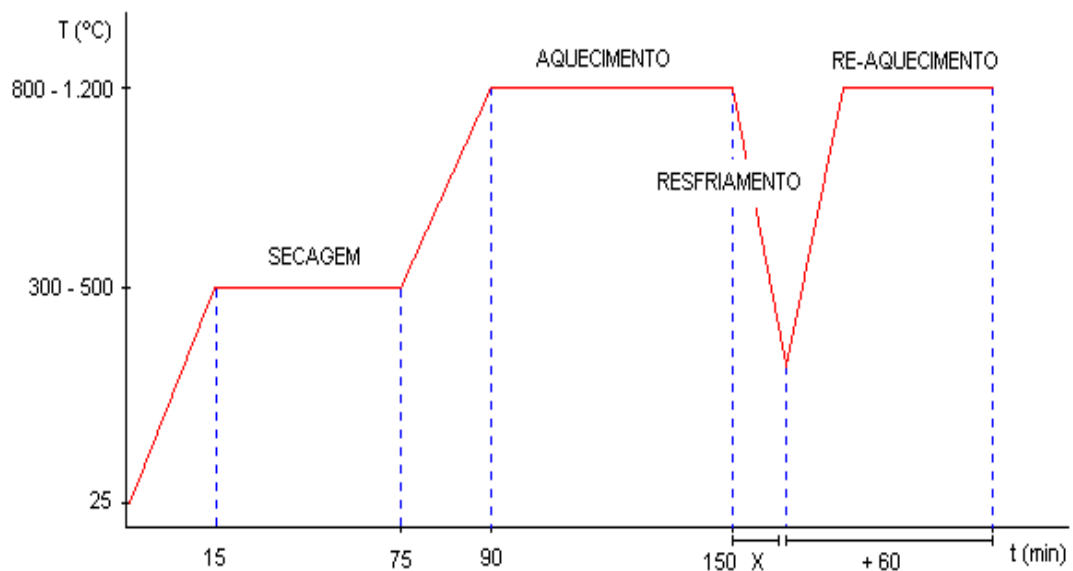
CAPÍTULO 4

PRUEBAS Y RESULTADOS

4.1. Curva referencial de calentamiento

Uno de los objetivos principales es obtener una curva de temperatura adecuada que permita el calentamiento ideal de los Tundish, por lo tanto, mediante la programación y el sistema de control adecuado se logró obtener la curva mostradas en la figura 4.1, donde la temperatura posee diferentes tipos de rampas.

Figura 4.1 Curva de Calentamiento para Tundish



Elaborado por: Marco Tapia

La curva muestra un precalentamiento del Tundish por un tiempo determinado y luego un calentamiento a temperaturas altas, por lo que para definir los tiempos de activación de cada rampa se determinó una relación de tiempo de calentamiento en función de la intensidad de flama registrados en la tabla 4.1.

Tabla 4.1 Tabla de tiempos de calentamiento

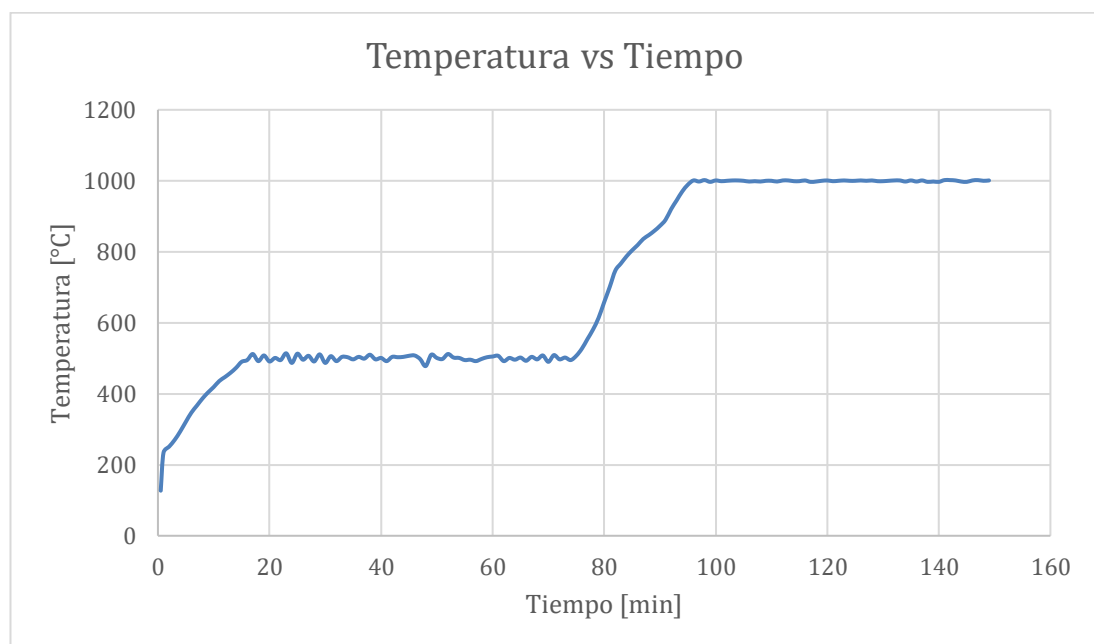
Flama [%]	Tiempo [min]	Temperatura alcanzada [°C]
30	15	500
40	12	500
50	10	500
60	8	500
70	7	500
80	6	500
90	5	500
100	4	500

Tabla experimental de tiempos en base al porcentaje de flama, Fuente: Marco Tapia

4.2. Curva real

Para obtener la curva del sistema automatizado se procedió a tomar los datos de temperatura por cada minuto hasta llegar a los 150 minutos, ya que hasta este punto se puede describir y analizar el proceso. Los valores están registrados en la Tabla de Anexo 3.

Figura 4.2 Curva experimental de Temperatura vs Tiempo

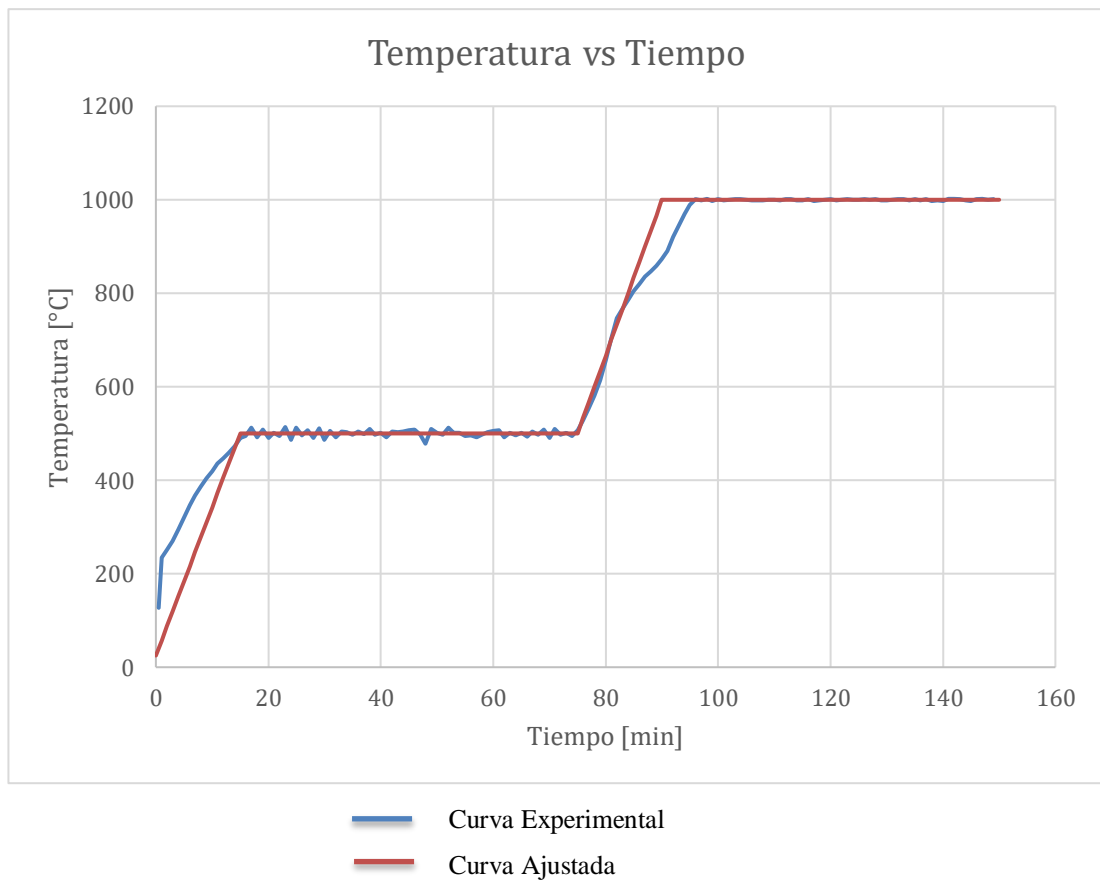


Elaborado por: Marco Tapia

4.3. Análisis del error en estado estable

Para determinar el error en cada nivel estable de temperatura se inició montando la gráfica real y la gráfica experimental como se muestra en la figura 4.3, para de allí sacar un valor promedio en cada nivel, considerando que el nivel estable 1 está referenciado a 500 °C y el nivel estable 2 está referenciado a 1000 °C y luego analizar las rampas en función de su ecuación.

Figura 4.3. Curva experimental y curva Real de Temperatura vs Tiempo



Elaborado por: Marco Tapia

4.3.1. Error en niveles estables

$$Temperatura\ promedio1 = \frac{\sum_{15}^{75} Temperatura}{60}$$

$$Temperatura\ promedio2 = \frac{\sum_{90}^{150} Temperatura}{60}$$

$$Temperatura\ promedio\ nivel\ estable\ 1 = 500,3\ ^\circ C$$

$$Temperatura\ promedio\ nivel\ estable\ 2 = 999,5\ ^\circ C$$

Por lo tanto, el error en cada nivel estable fue:

$$e1_{\%} = \frac{500 - 500,3}{500} = 0,067 \%$$
$$e2_{\%} = \frac{1000 - 999,5}{1000} = 0,048 \%$$

Hay que considerar que estos errores se obtuvieron en referencia al SetPoint establecido para el control, ya que la referencia que se muestra en la Figura 4.1 indica que para el nivel estable1 la temperatura puede variar entre 300-500°C y el nivel estable2 la temperatura puede variar entre 800-1200°C.

4.3.2. Error en rampas de subida

Ecuación de Rampa Real 1

$$y = 31,7x + 25$$

Ecuación de Rampa Real 2

$$y = 33,3x - 2000$$

Ecuación de Rampa Experimental 1

$$y = 25,03x + 25$$

Ecuación de Rampa Experimental 2

$$y = 24,4x - 2000$$

Considerando los valores de pendiente de cada una de las ecuaciones se determinó un error en la linealidad de las rampas de incremento de temperatura.

$$e1_{\%} = \frac{31,7 - 25,03}{31,7} = 21,04 \%$$
$$e2_{\%} = \frac{33,3 - 24,4}{33,3} = 26,7 \%$$

Los errores mostrados nos indican que las rampas de temperatura no presentan una linealidad tan exacta. Como se observa en la Figura 4.3 las rampas presentan ciertas curvas, sin embargo, esto no afecta al sistema de calentamiento del Tundish, ya que estos valores pueden variar considerablemente hasta alcanzar los niveles estables.

4.4. Tabla comparativa

Tras realizar desarrollar el sistema automatizado se obtuvieron varias mejoras, ya que al cumplir con las curvas propuestas por los fabricantes de recipientes Tundish se obtuvo los benéficos mostrados en la Tabla 4.2

Tabla 4.2 Comparación del sistema de calentamiento actual respecto al inicial

	Sistema anterior	Sistema actual
Duración de la masa refractaria	Una vez por colada	Dos veces por colada
Vida útil del Tundish	1 mes	3 meses
Consumo GLP	1 Tanque en el mes	1 Tanque al mes y medio
Tiempo de calentamiento	240 min	210 min

Tabla de beneficios prestados por el nuevo sistema automatizado, Elaborado por: Marco Tapia

El sistema no requiere de un operador que monitoree el proceso de calentamiento, por lo que se ve reflejado en un benéfico para la empresa, ya que el trabajador puede realizar otras tareas.

Tras contar con sistemas de seguridad y alarmas, el sistema actual presenta una disminución de riesgo por accidentes de quemaduras y posibles explosiones, ya que el operador lo único que debe hacer es seleccionar un botón de la pantalla HMI y el proceso dará inicio de forma automática.

4.5. Análisis del funcionamiento del sistema

Tras realizar varias pruebas se observó un adecuado funcionamiento acorde a las curvas propuestas por el fabricante, sin embargo, uno de los inconvenientes fue el no poder observar de forma completa la curva de calentamiento en la pantalla HMI, ya que al ser un proceso de calentamiento que tarda varias horas, las curvas se muestran solo en intervalos cortos de tiempo. Véase la Figura 4.4.

Figura 4.4 Curva de calentamiento del Tundish



Elaborado por: Marco Tapia

La Figura 4.4 nos muestra un incremento ascendente de la temperatura y por lo tanto el calentamiento del Tundish en un intervalo de tiempo.

Se observó también una buena combustión entre el Aire y GLP, permitiendo así ahorrar los recursos de gas y al mismo tiempo generar flamas ideales que no generen ningún tipo de humo como se muestra en la Figura 4.5.

Figura 4.5 Control de flamas para el calentamiento del Tundish



Elaborado por: Marco Tapia

CONCLUSIONES

Se logró determinar las características del proceso de calentamiento partiendo de su estructuración y a su vez de su funcionamiento, permitiendo así realizar un análisis sobre la curva de temperatura que describió el comportamiento del sistema y en consecuencia se reconoció las variables a ser controladas, como lo fueron las válvulas proporcionales que controlan el caudal de GLP y Aire.

Una vez descubiertas las variables a ser controladas se determinó una relación de combustión adecuada, considerando que la relación de Aire/GLP es igual a 15.5, se determinó los porcentajes de apertura de Aire y GLP llegando a ser en una relación de 1% Aire = 1,19%GLP, para dicho cálculo se tomó en cuenta los niveles de presión y el área por donde circula el GLP y el aire.

Se desarrolló un control PID que permitió la estabilidad de la temperatura en cada nivel de las curvas de calentamiento del Tundish, donde la variable a ser controlada fue la temperatura, el actuador para el proceso fueron las válvulas proporcionales y el sensor una termocupla tipo S útil para medición de altas temperaturas. El control PID permitió obtener una respuesta rápida ante los cambios de temperatura, dándonos como resultado un error en estado estable para el primer nivel del 0,068% y un error para el segundo nivel del 0,048%, por lo tanto se obtuvo control eficaz.

Se implementó un HMI que permitió controlar y monitorear el proceso de calentamiento, en donde los porcentajes de apertura de las válvulas, la temperatura del sistema y el estado del proceso de calentamiento fueron visibles para el operador, así como también permitió conocer el estado de la maquina mediante alarmas y mensajes emergentes ante algún fallo. El uso del HMI permitió al operador el ingreso de parámetros de control según considere necesario.

Finalmente se realizó un análisis de los beneficios que presto la realización del proyecto, observando mejoras en la conservación de los materiales y la reducción de recursos que son utilizados en el proceso de calentamiento como se observó en la tabla.4.2, donde se puede también deducir que el tiempo de producción es mejorado en varios minutos.

RECOMENDACIONES

Una de las cosas que se puede mejorar es el sistema de medición de temperatura, ya que las termocuplas son muy delicadas para el medio industrial. Para ello se debería modificar los recipientes Tundish con el fin de tomar nuevos puntos de medición, como en su base, ya que ahí no se exponen al desplazamiento de la tapa. Por otra parte, su medición estaría basada en la transferencia de calor que tiene los recipientes Tundish y ya no sería necesaria la adquisición de un instrumento de medición para altas temperaturas.

Se podría implementar un sistema SCADA con todos los sistemas de calentamiento con los que cuenta el área de fundición con el fin de monitorear y controlar todos los procesos a través de un solo HMI

REFERENCIAS

- Alarcón, J. (2012). *www.uv.es*. Obtenido de <https://www.uv.es/uimcv/Castellano/ModuloMatCeramicos/Unidad%2010%20.pdf>
- Aponte Castro, C. C. (1 de Junio de 2015). *CADEMIA*. Obtenido de https://www.academia.edu/24427964/CONTROL_PID_PARA_EL_CONTR_OL_DE_TEMPERATURA
- Balbin, F. G. (15 de Mayo de 2015). *pdfs.semanticscholar.org*. Obtenido de <https://pdfs.semanticscholar.org/6066/7bad3405d4a50a87df087179e79013599981.pdf>
- Cobo, R. (16 de 11 de 2017). *EL ABC DE LA AUTOMOTIZACIÓN*. Obtenido de <http://www.aie.cl/files/file/comites/ca/abc/hmi.pdf>
- emison. (2016). *www.emison.es*. Obtenido de <https://www.emison.es/hornos/pdf/hornos%20industriales.pdf>
- Inoriza, R. (26 de 07 de 2018). *REYMA REOTIX*.
- Lara, G. (13 de 12 de 2012). *motorpasion*. Obtenido de motorpasion: <https://www.motorpasion.com/coches-hibridos-alternativos/glp-que-es-y-para-que-sirve>
- López, I. D. (2010). *U.T.N. F.R.M.*. Obtenido de http://www1.frm.utn.edu.ar/ing_electromecanica1/Archivos/SIDERURGIA_2010.pdf
- LPGA. (10 de 2015). *wlpga.org*. Obtenido de <https://www.wlpga.org/wp-content/uploads/2015/10/WLPGA-EE-PDF-ES.V1.pdf>
- METALES FERROSOS. (5 de Julio de 2017). *METALES FERROSOS*. Obtenido de <https://metalesferrosos.wordpress.com/2017/06/05/partes-de-una-maquina-de-colada-continua/>
- Mora Inchaustegui, R. P. (20 de Julio de 2009). *Researchgate.net*. Obtenido de https://www.researchgate.net/profile/Raul_Rivas-Perez/publication/322591589_Control_Fraccional_del_Proceso_de_Variacio

n_de_Temperatura_en_el_Horno_del_Laminador_300_de_Antillana_de_Ace
ro/links/5a6140bf0f7e9b6b8fd3eed4/Control-Fraccional-del-Proceso-de-Var

Niño, A. D. (2004). *Mecanica de fluidos*. Bogotá.

Saul Condori, J. S. (14 de Diciembre de 2017). *Tesis*. Obtenido de
[http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/6103/Condori_Chahua
ra_Saul.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/6103/Condori_Chahua_ra_Saul.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

THE INDUSTRIAL AUTOMATION GUIDE. (15 de Febrero de 2017). *THE
INDUSTRIAL AUTOMATION GUIDE*. Obtenido de
[http://guiaautomatizacionindustrial.blogspot.com/2017/02/control-
automatico-de-temperatura-de-un.html](http://guiaautomatizacionindustrial.blogspot.com/2017/02/control-
automatico-de-temperatura-de-un.html)

wonderware. (2019). *www.wonderware.com*. Obtenido de
<https://www.wonderware.com/es-es/hmi-scada/what-is-hmi/>

ANEXO 1

Tabla de datos experimentales de temperatura en función del tiempo y cálculo de la función de transferencia en función del tiempo

Tiempo [s]	Temperatura [°C]	y(t)	Ajuste de error
30	127	138,07	122,44
60	134	148,93	222,78
120	151	170,05	362,84
180	170	190,40	416,02
300	221	228,88	62,14
360	247	247,08	0,01
420	267	264,60	5,76
480	287	281,48	30,43
540	304	297,75	39,09
600	319	313,42	31,19
660	336	328,51	56,11
720	347	343,05	15,60
780	359	357,06	3,77
840	373	370,55	5,99
900	390	383,55	41,57
960	403	396,08	47,95
1020	416	408,14	61,78
1080	431	419,76	126,29
1140	442	430,96	121,91
1200	455	441,74	175,71
1260	464	452,14	140,77
1320	472	462,15	97,12
1380	482	471,79	104,28
1440	492	481,08	119,30
1500	503	490,03	168,31
1560	514	498,65	235,69
1620	522	506,95	226,41
1740	536	522,66	177,92
1800	541	530,09	119,10
1860	549	537,24	138,31
1920	553	544,13	78,67
1980	556	550,77	27,37
2040	561	557,16	14,72
2100	568	563,32	21,86
2160	573	569,26	14,00
2220	577	574,98	4,10
2280	582	580,48	2,30
2340	587	585,79	1,46
2460	597	595,83	1,38
2520	598	600,57	6,60
2580	600	605,14	26,41
2640	601	609,54	72,95

Tiempo [s]	Temperatura [°C]	y(t)	Ajuste de error
2700	604	613,78	95,69
2760	607	617,87	118,11
2820	617	621,80	23,07
2880	629	625,60	11,59
2940	632	629,25	7,58
3000	631	632,77	3,12
3060	631	636,16	26,59
3120	629	639,42	108,61
3180	629	642,57	184,08
3240	631	645,60	213,10
3300	634	648,52	210,76
3420	640	654,04	197,11
3480	641	656,65	244,91
3540	643	659,16	261,28
3600	644	661,59	309,28
3660	646	663,92	321,12
3720	646	666,17	406,74
3780	646	668,33	498,79
3900	653	672,43	377,51
3960	656	674,37	337,30
4020	660	676,23	263,44
4080	664	678,03	196,77
4140	667	679,76	162,78
4200	671	681,43	108,70
4260	674	683,03	81,59
4320	677	684,58	57,46
4380	679	686,07	50,00
4440	680	687,51	56,36
4500	682	688,89	47,48
4560	685	690,22	27,28
4620	688	691,51	12,30
4680	689	692,74	14,02
4740	690	693,94	15,49
4800	690	695,08	25,85
4920	692	697,26	27,62
4980	693	698,28	27,89
5040	695	699,27	18,23
5100	697	700,22	10,38
5160	699	701,14	4,58
5220	702	702,02	0,00
5280	705	702,88	4,51
5340	708	703,70	18,53

Tiempo [s]	Temperatura [°C]	y(t)	Ajuste de error
5400	710	704,49	30,41
5460	710	705,25	22,59
5520	711	705,98	25,20
5580	711	706,69	18,60
5640	712	707,37	21,46
5700	712	708,02	15,81
5760	713	708,65	18,88
5820	713	709,26	13,96
5880	714	709,85	17,23
5940	714	710,41	12,86
6000	714	710,96	9,25
6060	715	711,48	12,37
6120	715	711,99	9,08
6180	716	712,47	12,44
6240	716	712,94	9,35
6300	717	713,39	13,01
6360	717	713,83	10,06
6420	717	714,25	7,58
6480	718	714,65	11,22
6540	718	715,04	8,77
6600	718	715,41	6,69
6660	719	715,77	10,40
6720	719	716,12	8,28
6780	719	716,46	6,47
6840	720	716,78	10,37
6900	720	717,09	8,47
7020	721	717,68	11,04
7080	721	717,96	9,27
7140	721	718,22	7,71
7200	722	718,48	12,38

Tiempo [s]	Temperatura [°C]	y(t)	Ajuste de error
7260	722	718,73	10,70
7320	723	718,97	16,25
7380	723	719,20	14,45
7440	724	719,42	20,97
7500	724	719,64	19,05
7560	725	719,84	26,61
7620	725	720,04	24,60
7680	725	720,23	22,74
7740	725	720,42	21,02
7800	725	720,59	19,43
7860	725	720,76	17,95
7920	726	720,93	25,72
7980	726	721,09	24,14
8040	726	721,24	22,66
8100	726	721,39	21,28
8160	726	721,53	19,99
8220	726	721,67	18,79
8280	726	721,80	17,66
8340	727	721,92	25,77
8400	727	722,05	24,54
8460	727	722,16	23,39
8520	727	722,28	22,30
8580	727	722,39	21,28
8640	727	722,49	20,33
8700	728	722,59	29,24
8760	728	722,69	28,19
8820	728	722,78	27,20
8880	728	722,88	26,26
8940	728	722,96	25,37
Error			11221,48

ANEXO 2

Programación en Tía Portal

Segmento 1:

Comentario



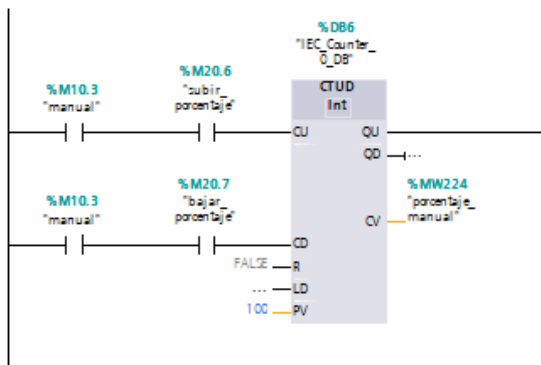
Segmento 2:

sistema opción 1_manual



Segmento 3:

ingreso del porcentaje de apertura de la valvula



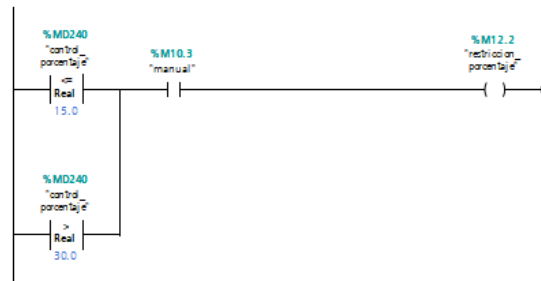
Segmento 4:

recibir datos manuales al porcentaje de valvula del sistema



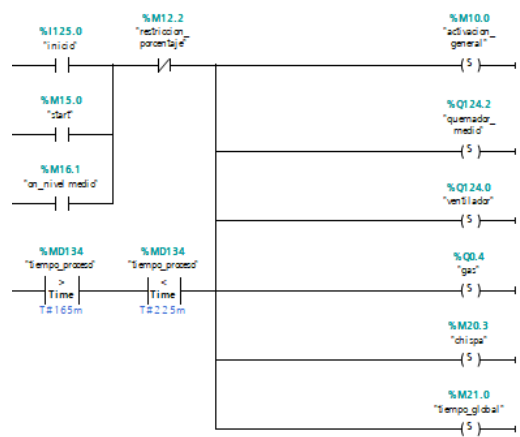
Segmento 5:

comparacion de porcentaje minimo de apertura de valvula



Segmento 6:

automatic start



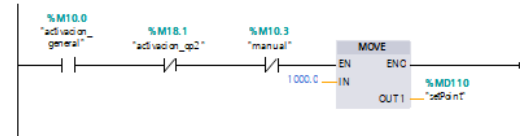
Segmento 7:

Comentario



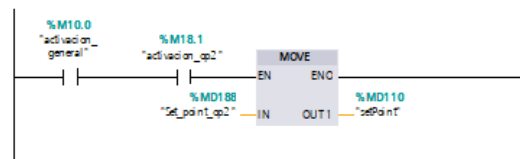
Segmento 8:

Set Point



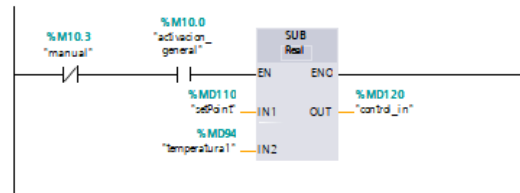
Segmento 9:

set point opcion 2

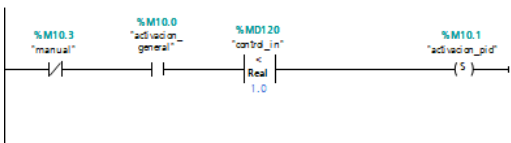


Segmento 10:

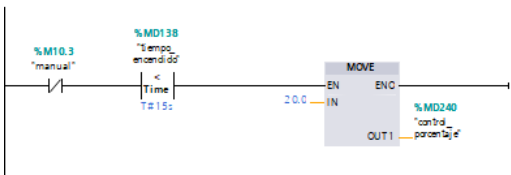
▶ rango de activacion PIDaire



Segmento 11:
condicion de activacion PID



Segmento 12:
condiciones iniciales modo automatico



Segmento 13:
Comentario



Segmento 14:
condiciones iniciales modo automatico



Segmento 15:
lectura valvula



Segmento 16:
lectura sensores



Segmento 17:
potencimetro porcentaje



Segmento 18:
Comentario



Segmento 19:
Comentario



Segmento 20:
control PID



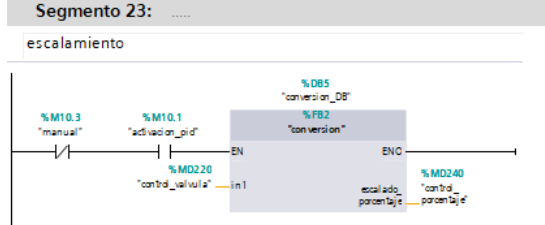
Segmento 21:
limite superior PID



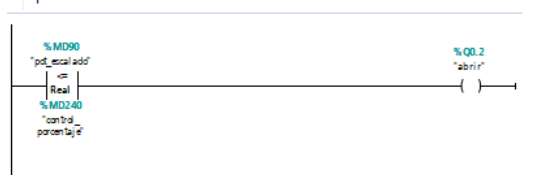
Segmento 22:
Limite inferior PID



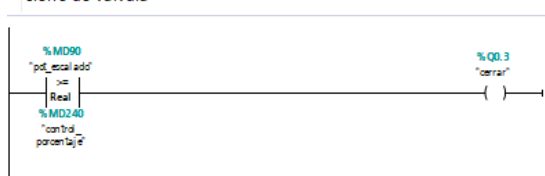
Segmento 23:
escalamiento



Segmento 24:
apertura de valvula

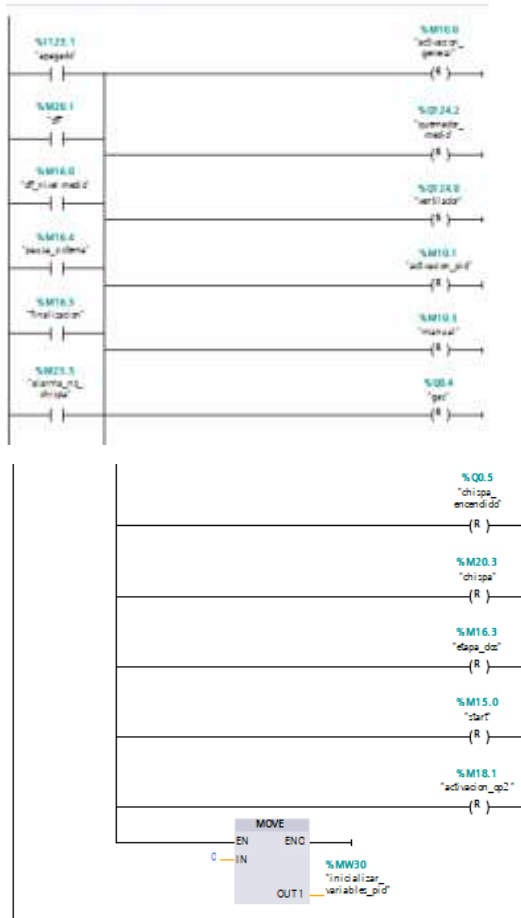


Segmento 25:
cierre de valvula



Segmento 26:

apagado general



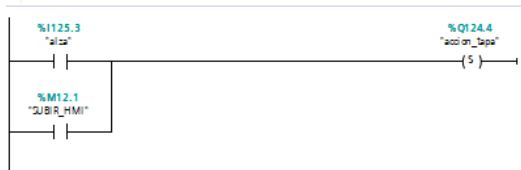
Segmento 27:

Comentario



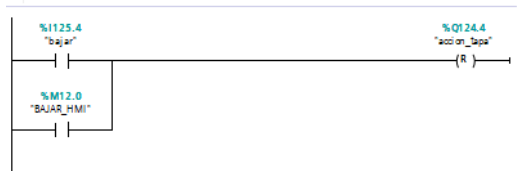
Segmento 28:

SUBIR TAPA



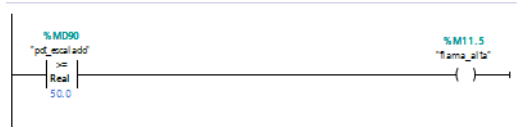
Segmento 29:

BAJAR TAPA



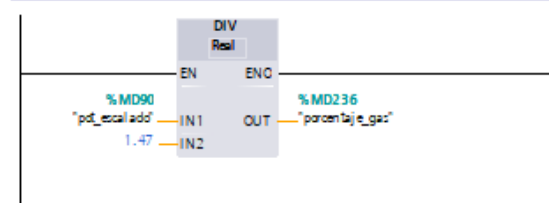
Segmento 30:

visibilidad de flama en HMI



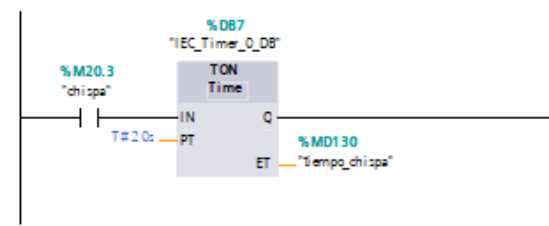
Segmento 31:

visualizacion valvula gas



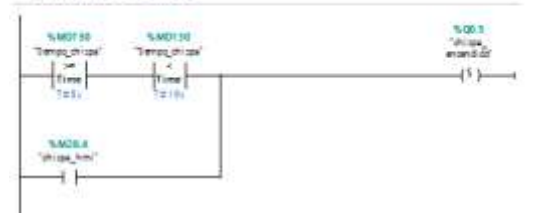
Segmento 32:

temporizador de la chispa



Segmento 33:

activacion de la chispa



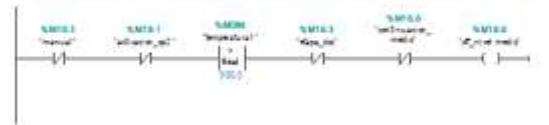
Segmento 34:

desactivacion de la chispa



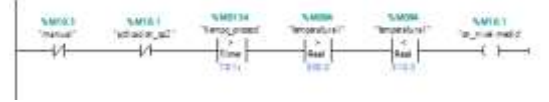
Segmento 35:

limite maximo de rampa 1



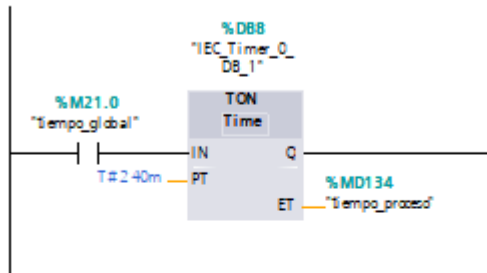
Segmento 36:

condiciones de encendido rampa 1



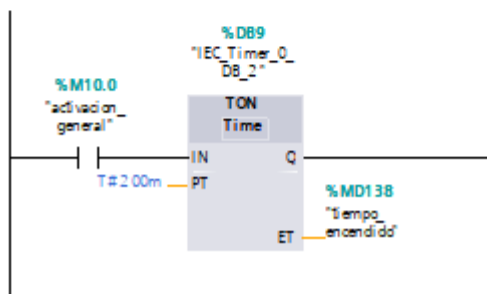
Segmento 37:

tiempo global del sistema



Segmento 38:

tiempo encendido



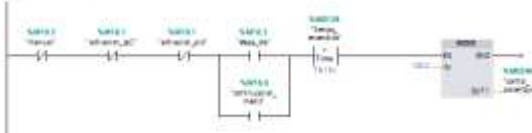
Segmento 39:

tiempo activación etapa 2



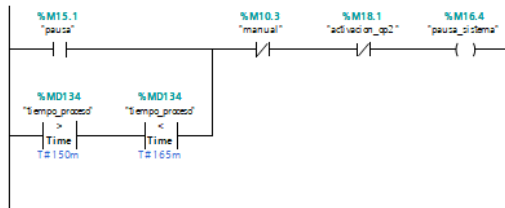
Segmento 40:

segunda rampa



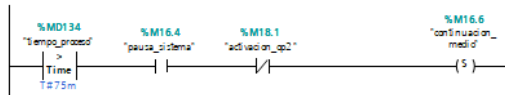
Segmento 41:

activacion pausa del sistema



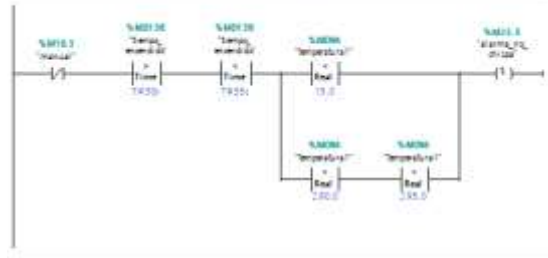
Segmento 42:

señal activación etapa 2



Segmento 43:

sistema de seguridad... "no enciende el sistema"



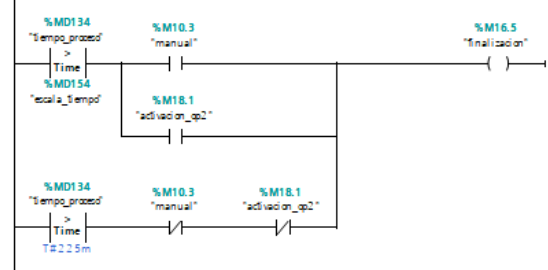
Segmento 44:

Comentario



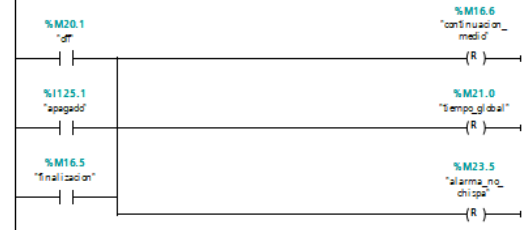
Segmento 45:

fin del proceso



Segmento 46:

desactivacion de variables globales



ANEXO 3

Tabla de datos experimentales de Temperatura vs Tiempo

Tiempo [min]	Temperatura [°C]
0,5	127
1	234
2	251
3	270
4	294
5	321
6	347
7	367
8	387
9	404
10	419
11	436
12	447
13	459
14	473
15	490
16	495
17	512
18	492
19	508
20	491
21	501
22	495
23	514
24	487
25	513
26	496
27	507
28	491
29	511
30	487
31	506
32	492
33	504
34	503
35	497
36	504
37	499
38	510
39	497
40	501
41	492
42	504
43	503

Tiempo [min]	Temperatura [°C]
44	504
45	507
46	508
47	498
48	478
49	510
50	501
51	498
52	512
53	502
54	501
55	495
56	496
57	492
58	498
59	503
60	505
61	507
62	492
63	501
64	496
65	502
66	493
67	504
68	497
69	508
70	490
71	509
72	497
73	502
74	495
75	507
76	527
77	554
78	581
79	614
80	658
81	701
82	747
83	767
84	787
85	804
86	819
87	836

Tiempo [min]	Temperatura [°C]
88	847
89	859
90	873
91	890
92	920
93	945
94	970
95	989
96	1001
97	998
98	1002
99	997
100	1001
101	999
102	1000
103	1001
104	1001
105	1000
106	998
107	999
108	998
109	1000
110	1000
111	998
112	1001
113	1001
114	999
115	999
116	1001
117	997
118	998
119	1000
120	1001
121	999
122	1000
123	1001
124	1000
125	1000
126	1001
127	1000
128	1001
129	999
130	999
131	1000
132	1001
133	1001
134	998
135	1001
136	998
137	1001

Tiempo [min]	Temperatura [°C]
138	997
139	998
140	997
141	1002
142	1002
143	1001
144	998
145	997
146	1001
147	1002
148	1000
149	1001
150	998

