



# **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

## **SISTEMA DE INFERENCIA DIFUSO TIPO TAKAGI SUGENO KANG PARA EL DISEÑO DE UN CONTROLADOR DE TEMPERATURA EN UN HORNO INDUSTRIAL DE TRATAMIENTO TÉRMICO**

**INÉS PAULINA RÍOS CANDO**

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

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

Riobamba – Ecuador

Diciembre – 2019

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**CERTIFICACIÓN:**

EL TRIBUNAL DE TRABAJO DE TITULACIÓN CERTIFICA QUE:

El Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo, titulado: “SISTEMA DE INFERENCIA DIFUSO TIPO TAKAGI SUGENO KANG PARA EL DISEÑO DE UN CONTROLADOR DE TEMPERATURA EN UN HORNO INDUSTRIAL DE TRATAMIENTO TÉRMICO”, de responsabilidad de la Ing. Inés Paulina Ríos Cando, ha sido prolijamente revisado y se autoriza su presentación.

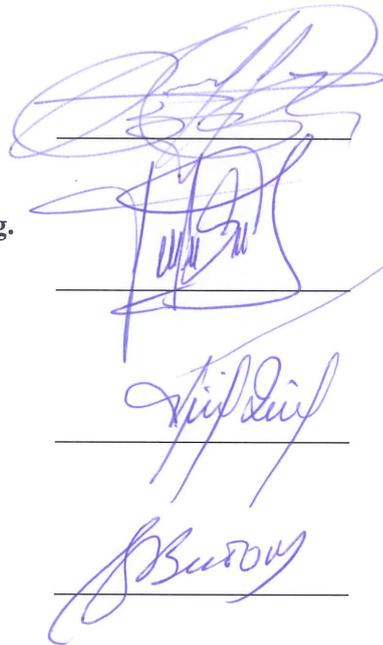
Tribunal:

**Ing. Marco Vinicio Ramos Valencia; Mag.  
PRESIDENTE**

**Ing. Franklin Wilfrido Salazar Logroño; Mag.  
TUTOR**

**Ing. Marcelo Vladimir García Sánchez; Ph.D  
MIEMBRO DEL TRIBUNAL**

**Ing. Geovanni Danilo Brito Moncayo; Mag.  
MIEMBRO DEL TRIBUNAL**



Riobamba, Diciembre 2019

©2019, Inés Paulina Ríos Cando

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

## DERECHOS INTELECTUALES

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

---

INÉS PAULINA RÍOS CANDO  
No. Cédula: 0603864992

## DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

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

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

Riobamba, diciembre de 2019.

---

INÉS PAULINA RÍOS CANDO  
No. Cédula: 0603864992

## **DEDICATORIA**

A mi fortaleza y guía:

Papito Luis Enrique y Mamita María Inés

A mis mejores amigos y vida entera:

Hermanitos Luis Enrique, María Auxiliadora y Luis Renato.

Con amor

Paulina

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco en primer lugar a Dios, nuestro protector, porque cada día nos ofrece una nueva oportunidad de ser felices, de vivir y caminar a su lado.

A mis maestros quienes en todo momento con mucha generosidad y conocimiento han estado impulsándome en la realización de este trabajo investigativo.

Finalmente mi gratitud imperecedera para Industria de Acero de los Andes y quienes conforman dicha empresa, por su apoyo incondicional en el desarrollo del proyecto y permitirme demostrar mis conocimientos en el área.

Con mucho afecto

Paulina.

## ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	xiii
SUMMARY .....	xiv

### CAPÍTULO I

1. <b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
1.1.    Situación Problemática.....	1
1.2.    Formulación del Problema .....	2
1.3.    Justificación .....	3
1.4.    Objetivos .....	4
1.4.1.    Objetivo General.....	4
1.4.2.    Objetivos Específicos .....	4
1.5.    Hipótesis General .....	4

### CAPÍTULO II

2. <b>MARCO TEÓRICO</b> .....	5
2.1.    Antecedentes del problema .....	5
2.2.    Bases Teóricas.....	7
2.2.1.    Tratamiento Térmico .....	7
2.2.2.    Modelos de Sistemas Dinámicos .....	8
2.2.3.    Controladores PID .....	11
2.2.4.    Modificaciones de los esquemas de control PID .....	11
2.2.5.    Lógica Difusa .....	13
2.2.6.    Sistema de Inferencia Difusa .....	16
2.2.7.    Modelo Takagi Sugeno Kang (TSK).....	18
2.2.8.    Identificación Difusa .....	20
2.2.9.    Controladores Difusos .....	22

### CAPÍTULO III

3. <b>METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN</b> .....	25
3.1.    Descripción Horno de Tratamiento Térmico .....	25
3.2.    Proceso de Tratamiento Térmico .....	26
3.3.    Sistema de Adquisición de Datos.....	27
3.3.1.    Selección de Equipos:.....	28
3.3.2.    Configuración de Equipos: .....	29

3.3.3.	Adquisición de Temperatura.....	30
3.3.4.	Adquisición de Apertura /Cierre de Válvula de Control Aire/GLP.....	30
3.3.5.	Registro de Valores de Temperatura y Porcentaje Regulación de la Válvula de Control..	31
3.3.6.	Visualización .....	31
3.4.	Identificación Convencional de la Planta.....	32
3.4.1.	Obtención de la Ganancia en Estado Estable (K).....	33
3.4.2.	Obtención de la Constante de Tiempo ( $\tau$ ).....	33
3.4.3.	Obtención de la Constante de Tiempo ( $\tau$ ) y Ganancia (K) Optimizados.....	33
3.5.	Identificación Difusa de la Planta .....	35
3.5.1.	Optimización de la Identificación de la Planta Difusa .....	38
3.6.	Diseño del Controlador Convencional .....	38
3.7.	Controlador de Seguimiento de Consigna.....	41
3.8.	Diseño del Controlador Difuso. ....	44
3.8.1.	Optimización del Controlador Difuso TSK.....	45

## **CAPÍTULO IV**

4.	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	48
4.1.	Identificación Convencional de la Planta.....	48
4.2.	Identificación Difusa de la Planta .....	50
4.3.	Diseño del Controlador Convencional .....	54
4.4.	Controlador Seguimiento de Consigna .....	56
4.5.	Diseño del Controlador Difuso TSK.....	59
4.6.	Optimización del Controlador Difuso TSK .....	60
4.7.	Análisis de Resultados para diferentes Curvas de Tratamiento Térmico.....	64
4.8.	Comprobación de la Hipótesis .....	70
4.8.1.	T-Student para dos muestras independientes.....	70

CONCLUSIONES .....	72
--------------------	----

RECOMENDACIONES .....	73
-----------------------	----

## **BIBLIOGRAFÍA**

## **ANEXOS**

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1-3.</b> Tiempos y Temperaturas del PWHT .....	27
<b>Tabla 2-3.</b> Equipos para Control y Visualización requeridos para el Sistema .....	29
<b>Tabla 1-4.</b> Singletones Iniciales de la Planta TSK .....	51
<b>Tabla 2-4.</b> Singletones Optimizados de la Planta TSK .....	53
<b>Tabla 3-4.</b> Singletones Iniciales del Controlador TSK.....	60
<b>Tabla 4-4.</b> Singletones Optimizados del Controlador TSK.....	61
<b>Tabla 5-4.</b> Tiempos de Proceso de los Controladores para Acero de 25.4 mm .....	65
<b>Tabla 6-4.</b> Tiempos de Proceso de los Controladores para Acero 32 mm .....	67
<b>Tabla 7-4.</b> Tiempos de Proceso de los Controladores para Acero 44.45 mm. ....	68
<b>Tabla 8-4.</b> Datos para la Comprobación de la Hipótesis.....	70
<b>Tabla 9-4.</b> Parámetros para Distribución T-Student.....	71

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1-2.</b> Diagrama de bloques de sistema de Primer Orden General y Simplificado .....	9
<b>Figura 2-2.</b> Curva de respuesta del Sistema de Primer Orden .....	10
<b>Figura 3-2.</b> Diagrama de Bloques de un control PID.....	12
<b>Figura 4-2.</b> Diagrama de Bloques Control PI+D .....	13
<b>Figura 5-2.</b> Partes de una Función de Pertenencia .....	15
<b>Figura 6-2.</b> Conceptos Básicos de Lógica Difusa .....	16
<b>Figura 7-2.</b> Sistema de Inferencia Difusa.....	17
<b>Figura 8-2.</b> Tipos de Sistemas de Inferencia Difusa .....	18
<b>Figura 9-2.</b> Particionado por Clustering.....	21
<b>Figura 10-2.</b> Estructura de un Controlador PI Difuso .....	23
<b>Figura 11-2.</b> Estructura de un Controlador PID Difuso .....	24
<b>Figura 1-3.</b> Horno de Tratamiento Térmico.....	25
<b>Figura 2-3.</b> Visualización de Temperaturas .....	26
<b>Figura 3-3.</b> Controlador de Quemadores.....	26
<b>Figura 4-3.</b> Curva de Tratamiento Térmico .....	27
<b>Figura 5-3.</b> Arquitectura Sistema de Adquisición de Datos .....	28
<b>Figura 6-3.</b> Configuración de la Red Profinet del Sistema de Adquisición de Datos .....	29
<b>Figura 7-3.</b> Disposición del PLC y módulos.....	30
<b>Figura 8-3.</b> Adquisición de Temperatura .....	30
<b>Figura 9-3.</b> Adquisición de valores Apertura/Cierre de la Válvula del Quemador.....	31
<b>Figura 10-3.</b> Registro de Valores de Temperatura y Regulación de la Válvula de Control.....	31
<b>Figura 11-3.</b> Diseño del HMI del Sistema de Adquisición de Datos. ....	32
<b>Figura 12-3.</b> Registro de Datos para Identificación de la Planta.....	33
<b>Figura 13-3.</b> Estructura del Modelo Difuso de la Planta.....	37
<b>Figura 14-3.</b> Estructura Controlador PI+D no interactuante.....	39
<b>Figura 15-3.</b> Reducción de Bloques Controlador y Planta.....	39
<b>Figura 16-3.</b> Estructura del Controlador ID en Paralelo .....	41
<b>Figura 17-3.</b> Estructura del Controlador Convencional Discreto y la Planta Difusa. ....	43
<b>Figura 18-3.</b> Estructura del Controlador Difuso TSK.....	45
<b>Figura 1-4.</b> Disposición del PLC implementado.....	48
<b>Figura 2-4.</b> HMI implementado.....	48

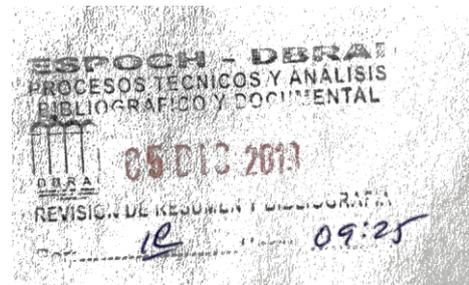
## ÍNDICE DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1-4.</b> Evolución de Aprendizaje Identificación de la Planta.....	49
<b>Gráfico 2-4.</b> Curva de Reacción del Proceso y Modelos Identificados.....	50
<b>Gráfico 3-4.</b> FP de la Regulación de Válvula.....	51
<b>Gráfico 4-4.</b> FP de la Temperatura Anterior .....	51
<b>Gráfico 5-4.</b> Superficie del Modelo de la Planta Difusa .....	52
<b>Gráfico 6-4.</b> Comparación Modelos de la Planta .....	52
<b>Gráfico 7-4.</b> Modificación de los Singletones del Modelo de la Planta.....	53
<b>Gráfico 8-4.</b> Identificación Difusa Optimizada de la Planta .....	54
<b>Gráfico 9-4.</b> Respuesta en Lazo Cerrado del Controlador ID .....	56
<b>Gráfico 10-4.</b> Seguimiento Consigna Curva de TT.....	58
<b>Gráfico 11-4.</b> Reacción de Controlador ID con la Planta Difusa.....	58
<b>Gráfico 12-4.</b> FP Variación del Error.....	59
<b>Gráfico 13-4.</b> FP Variación del Controlador.....	59
<b>Gráfico 14-4.</b> Superficie del Controlador Lineal TSK.....	60
<b>Gráfico 15-4.</b> Evolución de Aprendizaje Controlador TSK.....	61
<b>Gráfico 16-4.</b> Variación de los Singletones del Controlador TSK.....	62
<b>Gráfico 17-4.</b> Superficie de Control TSK no lineal.....	62
<b>Gráfico 18-4.</b> Comparación de Controladores para Seguimiento de Curva TT.....	63
<b>Gráfico 19-4.</b> Comparación de la Reacción de los Controladores ID y TSK.....	63
<b>Gráfico 20-4.</b> Seguimiento de Curva de TT-Diferentes Valores.....	64
<b>Gráfico 21-4.</b> Curva Tratamiento Térmico-Acero 25.4 mm .....	65
<b>Gráfico 22-4.</b> Comparación de Tiempos de Proceso de los Controladores-Acero 25.4 mm .....	66
<b>Gráfico 23-4.</b> Curva Tratamiento Térmico-Acero 32 mm .....	66
<b>Gráfico 24-4.</b> Comparación de Tiempos de Proceso de los Controladores-Acero 32 mm .....	67
<b>Gráfico 25-4.</b> Curva Tratamiento Térmico-Acero 44.5 mm. ....	68
<b>Gráfico 26-4.</b> Comparación de Tiempos de Proceso de los Controladores-Acero 44.45 mm ...	69
<b>Gráfico 27-4.</b> Comparación de Tiempos Operación de Tratamientos Térmicos.....	69

## RESUMEN

El presente trabajo describe el diseño de un controlador de temperatura tipo PI+D convencional, así como un controlador difuso TSK que permite la minimización del tiempo de operación del Tratamiento Térmico Pos Soldadura en un horno industrial. Actualmente, los sistemas de control de los hornos industriales están basados en un control manual o en técnicas de control convencional PID. Una de las limitaciones de éstos controladores es que al aumentar la velocidad de respuesta el controlador entrega salidas no realizables por el actuador. La investigación inicia con la adquisición de los datos con el uso de un PLC y un HMI. Mediante la curva de reacción del proceso se identifica el modelo difuso TSK de la planta, optimizado mediante mínimos cuadrados recursivos. La técnica de asignación de polos permite evidenciar el controlador PI+D y obtener los parámetros de sintonización para el seguimiento de la curva de Tratamiento Térmico. El controlador difuso TSK se inicializa a partir del controlador convencional y se optimiza mediante gradiente descendente. Para verificar el seguimiento de temperatura de los controladores diseñados se simulan en el software Matlab curvas de tratamiento térmico de diferentes espesores de acero. Los resultados muestran que el control manual del proceso tarda de 2 a 4 horas más que el tiempo establecido, aplicando el controlador convencional éste tiempo disminuye de 30 a 45 minutos y con el controlador difuso se logra una minimización de 15 minutos con respecto al tiempo del controlador convencional. Se recomienda inicializar un controlador difuso a partir de un controlador convencional previamente sintonizado para evitar daños y respuestas no deseadas en la implementación dentro de la industria.

**Palabras clave:** TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DE LA INGENIERÍA>, <CONTROL AUTOMÁTICO>, <CONTROL DIFUSO>, <TAKAGI SUGENO KANG (MÉTODO)>, <CONTROLADOR PID>, <FUNCIÓN DE COSTO>,<TRATAMIENTO TERMICO>,<GRADIENTE DESCENDENTE>



## SUMMARY

The present work describes the design of a conventional PI+D type temperature controller, as well as a diffuse TSK controller that allows the minimization of the operation time of the post welding heat treatment in an industrial furnace. Currently, industrial furnace control systems are based on manual control or conventional PID control techniques. One of the limitations of these controllers is that by increasing the response speed the controller delivers outputs not realizable by the actuator. The investigation begins with the acquisition of the data with the use of a PLC and an HMI. The diffuse model TSK of the plant is identified by the process reaction curve, optimized by recursive least squares. The pole assignment technique allows us to show the PI+D controller and obtain the tuning parameters for monitoring the heat treatment curve. The diffuse TSK controller is initialized from the conventional controller and optimized by a downward gradient. To verify the temperature monitoring of the designed controllers, heat treatment curves of different steel thicknesses were simulated in the Matlab software. The results showed that the manual control of the process takes from 2 to 4 hours longer than the established time applying the conventional controller, this time decreases from 30 to 45 minutes, and with the diffuse controller a minimization of 15 minutes is achieved concerning the time of the conventional controller. It is recommended to initialize a fuzzy controller from a previously tuned conventional controller to avoid damage and unwanted responses in the implementation within the industry.

**Keywords:** ENGINEERING TECHNOLOGY AND SCIENCES>, <AUTOMATIC CONTROL>, <DIFFUSIVE CONTROL>, <TAKAGI SUGGEN KANG (METHOD)>, <PID CONTROLLER>, <COST FUNCTION>, <THERMAL TREATMENT>, <DOWN GRADIENT>.



## **ABREVIATURAS**

FIS: Sistema de Inferencia Difusa (Fuzzy Inference System)

FP: Función de Pertenencia o Membresía

GLP: GLP Licuado del Petróleo

ID: Integral Derivativo

IAA: Industria Acero de los Andes

ISE: Integral del Error Cuadrático (Integral Squared Error)

J: función de costo

Kd: Constante Derivativa

Ki: Constante Integral

Kp: Constante Proporcional

PID: Proporcional, Integral y Derivativo

PI+D: Proporcional, Integral más Derivativo

PWHT: Tratamiento Térmico Post Soldadura

TSK: Takagi Sugeno Kang

TT: Tratamiento Térmico

# CAPÍTULO I

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Situación Problemática

En los procesos a nivel industrial, el control manual y los controladores proporcional, integral y derivativo (PID) y sus respectivas modificaciones PI+D, I-PD, han tomado una posición dominante debido a la simplicidad de su estructura y diseño. Sin embargo, éste tipo de control convencional presenta deficiencias al utilizarlos en procesos que cambian los parámetros del sistema y una compleja representación de la dinámica de la planta. (Gajate Martín, 2010)

Uno de los procesos industriales que poseen dichas características, es el Tratamiento Térmico el cual tiene como objetivo aliviar tensiones después de un proceso de soldadura, reduciendo la dureza y aumentando la ductilidad del material para evitar defectos de soldadura. (García Rodero, 2014)

El tratamiento térmico se realiza dentro de un horno intermitente. La mayoría de hornos son de construcción no comercial y de operación manual. La medición de temperatura es adquirida mediante termocuplas, que se encuentran soldadas directamente a las juntas de soldadura del cuerpo o pieza que se va a someter al tratamiento.

El proceso se divide en 3 etapas:

1. **Calentamiento** de la o piezas de acero a una temperatura y velocidad determinada.
2. **Sostenimiento** de temperatura durante un cierto tiempo hasta que se forme la estructura deseada.
3. **Enfriamiento** a la velocidad conveniente hasta una temperatura establecida.

En cada etapa del tratamiento se debe mantener una variación de temperatura máxima de 50° F (10 °C) entre todas las termocuplas.

El control del proceso depende de un operador humano, quien visualiza las temperaturas de las juntas de soldadura y el tiempo requerido del proceso y en base a estas variables regula la intensidad de la llama de los quemadores mediante el ajuste de la válvula de control aire-GLP. Las variaciones de temperatura son registradas y al final del proceso se emite un reporte.

El proceso demanda un alto consumo de recursos y horas hombre a consecuencia de la falta de automatización y del control manual por parte de un operador, provocando elevados tiempos de operación en el proceso.

Por lo expuesto, la problemática a resolver se engloba en dos aspectos importantes: Identificación de la planta y el Control de la misma.

El primero, requiere de un modelo aproximado que represente la dinámica del horno para realizar las pruebas deseadas, el mismo que se encuentra en un ambiente industrial y en operación por lo que exhibe un comportamiento fuertemente no lineal e inesperado, información incompleta y un conocimiento parcial obtenido por la experiencia operativa humana lo que dificulta la experimentación sobre el proceso y paros no deseados en la cadena de producción de la empresa.

Y en lo que respecta al control, mediante un controlador difuso basado en un Sistema de Inferencia Difusa Takagi Sugeno Kang de orden cero que será inicializado a partir de un controlador PI+D convencional y mejorado mediante técnicas de optimización, controlará el proceso de tratamiento térmico, sabiendo que los controladores convencionales presentan salidas no realizables en los actuadores al sintonizar los parámetros para aumentar la velocidad de respuesta del sistema.

Como consecuencia el tiempo de proceso de Tratamiento Térmico en el horno disminuirá sin saturar la salida del controlador, mejorando la calidad del proceso para alcanzar los niveles de competitividad y productividad requeridos por el mercado, así como la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> generadas por el Horno de Tratamiento Térmico hacia la atmosfera.

## **1.2. Formulación del Problema**

El proceso de tratamiento térmico en el horno a combustión de Industria Acero de los Andes, para alivio de tensiones en soldadura, no dispone de un sistema de control automático para la regulación de temperatura. A consecuencia de esto, el tiempo de operación de cada etapa del proceso es mayor al tiempo definido en el Manual de Control de Calidad, provocando un elevado consumo de GLP, alto índice de horas hombre y mayor cantidad de emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera.

Por tanto, se requiere de la caracterización de variables de control para el diseño de un regulador de temperatura en el horno industrial de tratamiento térmico mediante un Sistema de Inferencia Difuso tipo Takagi Sugeno Kang , que permitirá aumentar la velocidad de respuesta en el proceso, frente a un controlador PI+D convencional y el control manual.

### 1.3. Justificación

El control difuso ha tenido un rápido progreso motivado por el éxito práctico en equipos electrodomésticos y en procesos industriales. (Tremante & Brea, 2014). La ventaja de dichos sistemas es la capacidad de dividir el sistema global en sistemas locales para obtener una mejor aproximación al sistema real en comparación a las técnicas clásicas de control.

Es por ello que el presente trabajo demuestra las ventajas de los controladores diseñados bajo la técnica de inteligencia artificial frente a los controladores clásicos en un ámbito industrial, permitiendo a las empresas del país mejorar sus procesos de producción para alcanzar altos niveles de competitividad y eficiencia en el mercado.

El Tratamiento Térmico es un proceso de producción del sector metalmecánico. Maldonado (2017) afirma que: “La industria metalmecánica ha tenido una importante participación y crecimiento en la economía del país. Los resultados encontrados reflejan una actividad destacada, que en conjunto tuvo en 2015 un peso de 3,3% del PIB y 14,1% de la actividad manufacturera”.(p.107)

En razón de la importancia que tiene la industria metalmecánica en la cadena productiva del país, Industria Acero de los Andes, empresa Ecuatoriana especializada en el diseño y fabricación de Bienes de Capital y proyectos de contenido metalmecánico para los sectores petróleo, energético, industrial, minero y de infraestructura, busca implementar mejoras en sus procesos de producción para alcanzar los niveles de competitividad y productividad requeridos por el mercado.

El Tratamiento Térmico Post Soldadura (PWHT), es uno de sus procesos de producción que de acuerdo al Manual de Control de Calidad ASME (2013) establece: “Las reglas a seguir en el tratamiento térmico post soldadura de calderos, tubería externa de calderos, recipientes a presión y parte de ellos, desarrollados en equipos o partes manufacturadas por la Compañía”. (p.2)

Por ello, para llegar a una implementación automática del Tratamiento Térmico, es importante primero conocer el comportamiento dinámico del horno en razón de que el sistema es complejo y estocástico, es decir la información es reducida e incompleta lo que es muy común en ambientes reales de la industria. Para ello, se propone identificar el modelo mediante experimentación en la planta real, y de ésta manera estimar los parámetros de un sistema de orden nominal reducido que represente la dinámica de la planta.

Consecuentemente, en base a los parámetros obtenidos del modelo de orden reducido, mediante el Sistema de Inferencia Difusa TSK orden cero se encuentra el modelo difuso de la planta.

Posterior a la identificación, se sintoniza el controlador PI+D convencional, el mismo que se utiliza como base para el diseño del controlador difuso Takagi-Sugeno-Kang de orden cero

Una vez sintonizados y optimizados los controladores, se evalúa el desempeño de los mismos mediante simulación, obteniendo datos de las respuestas del sistema, para su respectiva comparación.

## **1.4. Objetivos**

### ***1.4.1. Objetivo General***

Diseñar un controlador de temperatura en un horno industrial para el proceso de tratamiento térmico, mediante un Sistema de Inferencia Difuso tipo Takagi Sugeno Kang, que permita minimizar el tiempo operación del proceso, frente a un controlador PI+D convencional.

### ***1.4.2. Objetivos Específicos***

- Determinar los parámetros de la función de transferencia de un modelo de orden nominal reducido que represente el comportamiento dinámico del horno.
- Identificar el modelo difuso de la planta a partir de los parámetros obtenidos del sistema de orden nominal reducido.
- Diseñar y sintonizar un controlador difuso en base a las ganancias del controlador convencional PI+D correctamente sintonizado y a las funciones de membresía y reglas establecidas.
- Comparar a través de simulación las respuestas del sistema de los controladores obtenidos para determinar el desempeño de cada uno de ellos.

## **1.5. Hipótesis General**

Los resultados de simulación demuestran que el controlador de temperatura para el horno industrial de tratamiento térmico, diseñado mediante un Sistema de Inferencia Difuso tipo Takagi-Sugeno-Kang, minimiza el tiempo de operación del proceso en comparación al controlador PI+D convencional.

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Antecedentes del problema

La investigación acerca de la identificación de modelos y el control automático en hornos se ha desarrollado para diferentes aplicaciones en la industria. Los mismos requieren de una simulación del comportamiento de la planta y la regulación de temperatura del material sometido al calor para alterar sus propiedades. Sin embargo, la mayoría de técnicas de identificación y control que se utiliza son clásicas y no basadas en inteligencia artificial.

Barreras, García y Díaz (2003), identifican y modelan un horno eléctrico industrial de 1 MW de potencia destinado al tratamiento térmico y curado de palas de aerogeneradores. Para la identificación de la planta, obtienen dos modelos: Analítico y Empírico. En el primero desarrollan un circuito eléctrico que represente a todo el horno como sistema multivariable para después describir un modelo en el que se establecen las ecuaciones que gobiernan el proceso mediante las leyes de transmisión de calor. La expresión resultante de éste método es muy compleja y difícil de operar por lo que es necesario emplear el modelo empírico que ayude a encontrar los valores de los parámetros de las ecuaciones mediante la adquisición de los datos experimentales de la planta, los mismos que son procesados con la herramienta Ident en Matlab. Una vez obtenido el modelo lo validan y concluyen que la identificación de la planta posee un error mínimo en algunas zonas del horno, pero también a causa de pérdidas de calor en algunas zonas, el modelo no se ajusta correctamente. (Barreras Carracedo, García-Sanz, & Díaz, 2003)

Un controlador predictivo basado en modelo (CPBM) con algoritmo GPC Experto para el control de la temperatura de laminación en el interior de un horno de recalentamiento de planchones de una empresa siderúrgica diseñado por Pérez, Rivas y Sotomayor (2009). Mediante la aplicación de las técnicas de identificación de sistemas se obtiene un modelo matemático lineal, con estructura ARMAX, de cuarto orden y retardo de tiempo de 210 s que caracteriza el comportamiento dinámico de la planta. A partir de dicho modelo matemático se diseña del sistema de control predictivo experto. Los resultados de la simulación del sistema de control desarrollado mostraron su efectividad frente a variaciones en la señal de referencia y diferentes tipos de

perturbaciones. La implementación práctica del sistema desarrollado posibilitará un funcionamiento efectivo de esta clase de plantas y una significativa disminución del consumo de combustible, así como una reducción de la contaminación del medio ambiente. (Pérez Zúñiga, Rivas Pérez, & Sotomayor Moriano, 2009)

Rivas, Castillo y Feliu (2011), desarrollan un controlador PI de orden fraccional para el control de la temperatura de laminación en un horno siderúrgico. La identificación emplea una señal escalón y posteriormente señales aleatorias SBSA en el flujo de combustible para encontrar la variación de la temperatura y adquirir los datos. Luego de realizar el análisis de la calidad de los datos recolectados, prueban mediante simulaciones diferentes estructuras de identificación para validar el modelo, donde el mejor resultado se obtienen con ARMAX de segundo orden. Para el control de temperatura diseñan un controlador PI clásico y un PI fraccional, donde éste último posee un comportamiento superior, ya que presenta oscilaciones de menor amplitud y menor tiempo de establecimiento. (Rivas-Pérez, Feliu, & Castillo García, 2011)

Murthy, Kuman y Kumari (2012), proponen dos estrategias de control de temperatura para un horno de caldera con quemador en la pared lateral, la primera un PID en cascada, y una segunda utilizando Lógica Difusa de tipo Mamdani. Los parámetros del controlador PID en cascada se obtienen y se ajustan con métodos diferentes, sin embargo la respuesta del sistema presenta sobre impulsos, las mismas que se corrigen con el controlador de Lógica Difusa reduciendo el error en estado estacionario y proporcionando rapidez, solidez y optimización en el desempeño dinámico. (Murthy, Kuman, & Kumari, 2012)

Guarochico, Morán, Martín (2013), identifican y diseñan un controlador para un sistema regulador de temperatura dentro de un horno industrial de resistencia usado en el secado de transformadores para la recuperación de las propiedades que perdieron al momento de su fabricación, el cual se modela virtualmente en base a ecuaciones dinámicas y de estado estacionario. En razón en que en el horno real no se puede tomar datos experimentales ni realizar ningún tipo de pruebas, la identificación del sistema se desarrolla en base al modelo matemático obtenido con balance de energía y una señal de excitación PRBS, que permite encontrar la función de transferencia aproximada de la planta. El controlador diseñado es de tipo PI, con el que se mantiene la temperatura constante dentro del horno industrial. (Guarochico Moreira & Morán Alvarado, 2013)

Hernández (2014), utiliza balance de energía y una identificación de orden fraccionario para modelar un sistema de combustión de un horno cementero rotatorio de proceso húmedo. Para el control de temperatura se diseña un controlador de orden fraccionario en combinación con un

método específico para hallar las ganancias proporcionales usando LQR Linear Quadratic Regulator. Se utilizaron las funciones ‘fotfid’ y ‘fpid’ de la toolbox FOMCOM de Matlab, para hallar un modelo fraccional para el proceso y diseñar un controlador fraccional robusto para optimizar el uso del combustible de tal forma que se aproveche al máximo el poder calorífico y se disminuyan las emisiones de GLP es de efecto invernadero. Los impactos a mediano plazo son: contribuir a la sostenibilidad de la compañía y disminuir la emisión de GLP es tipo invernadero, contribuyendo al medio ambiente y rebajando los agentes que generan el calentamiento global. (Hernández Arboleda, 2014)

Diferentes estrategias de control avanzado para hornos eléctricos de tratamientos térmicos compara Avella (2015), en donde, primero estudia características físicas, componentes y funcionamiento de la planta y la modela matemáticamente mediante la teoría de transferencia de calor, obteniendo ecuaciones diferenciales no lineales y sus puntos de equilibrio. Diseña cada uno de los controladores de tipo PID, Retroalimentación de estados, LMI y Métricas, que al analizar resultados y comparar las señales de control y la curva de temperatura de la pieza, concluye que el PID y métricas requieren de un menor consumo de energía para estabilizar el sistema y la variación de temperatura es la adecuada para el tratamiento térmico. (Avella Molano, 2015)

## **2.2. Bases Teóricas**

### **2.2.1. Tratamiento Térmico**

Combinación de operaciones de calentamiento y enfriamiento en tiempos determinados y aplicadas a una pieza en acero, o partes de la misma en un horno de tal forma que producirá propiedades deseadas.

Entre estas propiedades se encuentran:

- **Resistencia al desgaste:** Es la resistencia que ofrece un material a dejarse erosionar cuando está en contacto de fricción con otro material.
- **Tenacidad:** Es la capacidad que tiene un material de absorber energía sin producir fisuras.
- **Maquinabilidad:** Es la facilidad que posee un material de permitir el proceso de mecanizado por arranque de viruta.
- **Dureza:** Es la resistencia que ofrece un acero para dejarse penetrar. Se mide en unidades BRINELL (HB) o unidades ROCKWEL C (HRC), mediante el test del mismo nombre.

El Tratamiento Térmico Post Soldadura, es requerido cuando se realiza la soldadura en las piezas de acero, en donde parte del material se funde y parte se dilata térmicamente al ser rellenada la junta.

Por tanto, el PWHT es un procedimiento para reducir las tensiones residuales, recocer la Zona Afectada Térmicamente (ZAT) y difundir el Hidrógeno de la zona soldada después de que la unión se ha realizado. Puede ser completo (todo el equipo a presión) o local (sólo la unión soldada y el material adyacente).

Existen 5 razones para realizar el PWHT.

1. Disminuye la dureza de la ZAT, metal de soldadura y material base. El resultado es una microestructura más dúctil y resistente a la fisuración.
2. Aumenta la resistencia a la corrosión y a la fisuración por Corrosión bajo Tensión (SCC).
3. Al reducir las tensiones residuales aumenta la estabilidad dimensional de estructuras soldadas y mecanizadas
4. Al Reducir las tensiones residuales aumenta la Tenacidad del material., por disminución de la Triaxialidad.
5. Al Reducir las tensiones residuales aumenta la Resistencia a la Fatiga. (Laufgang, 2004, p 21-32)

### 2.2.2. Modelos de Sistemas Dinámicos

Un modelo dinámico proporciona la relación entre la entrada y la salida durante el transitorio. Es más difícil capturar la conducta dinámica. Sin embargo, esto es, esencial cuando se trata con problemas de control. (Åström & Hägglund, 2009, p.15)

Son de interés aquellos modelos que pueden ser utilizados en la sintonización de controladores del tipo PID, por lo que se restringirá su orden y en particular se considerarán solamente modelos para sistemas cuya respuesta, a un cambio escalón en la entrada, sea monótona creciente y que alcance un nuevo punto de equilibrio.

Los modelos a considerar son:

- Primero orden:

$$G_P(s) = \frac{k_p e^{-t_m s}}{\tau s + 1} \quad (2.1)$$

- Segundo Orden (polo doble):

$$G_P(s) = \frac{k_p e^{-t_m s}}{(\tau s + 1)^2} \quad (2.2)$$

- Segundo Orden (sobreamortiguado):

$$G_P(s) = \frac{k_p e^{-t_m s}}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)} \quad (2.3)$$

Donde:

$k_p$ : Ganancia

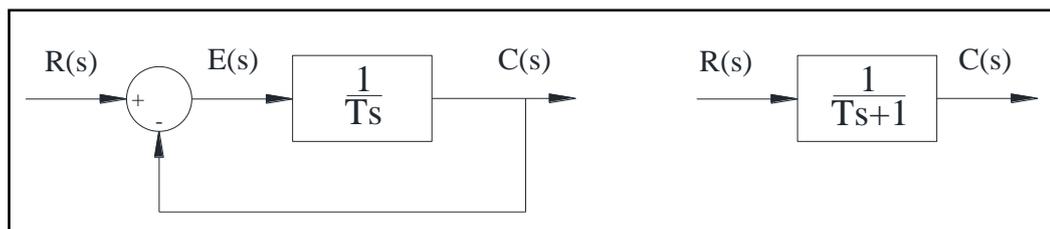
$t_m$ : Tiempo muerto

$\tau$ : Constante de tiempo

La identificación de los parámetros de estos modelos, puede hacerse a partir de la respuesta del proceso a un cambio escalón en la entrada, denominada curva de reacción del proceso. (Alfaro, 2006, p. 197-199)

### 2.2.2.1. Sistemas de Primer Orden

Físicamente, este sistema representa un circuito RC, un sistema térmico o algo similar. La figura 2.1 presenta el diagrama de bloques del sistema general y simplificado.



**Figura 1-2.** Diagrama de bloques de sistema de Primer Orden General y Simplificado

Fuente: Ríos Paulina, 2019

La relación entrada-salida se obtiene mediante:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1}{Ts + 1} \quad (2.4)$$

**Respuesta escalón unitario de sistemas de primer orden.** Dado que la transformada de Laplace de la función escalón unitario es  $1/s$ , sustituyendo  $R(s) = 1/s$ , en la ecuación 2.4, se obtiene:

$$C(s) = \frac{1}{Ts + 1} \cdot \frac{1}{s} \quad (2.5)$$

En fracciones parciales  $C(s)$  produce:

$$C(s) = \frac{1}{s} - \frac{T}{Ts + 1} = \frac{1}{s} - \frac{1}{s + (\frac{1}{T})} \quad (2.6)$$

Se aplica transformada inversa de Laplace de la ecuación 2.6, se obtiene:

$$c(t) = 1 - e^{-t/T}, \text{ para } t \geq 0 \quad (2.7)$$

La ecuación 2.7 plantea que la salida  $c(t)$  es inicialmente cero y al final se vuelve unitaria.

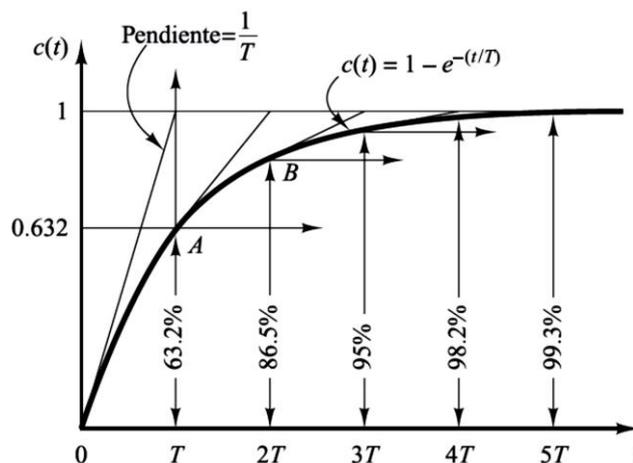
Mientras más pequeña es la constante de tiempo  $T$ , más rápida es la respuesta del sistema. Otra característica importante de la curva de respuesta exponencial es que la pendiente de la línea de tangente en  $t = 0$ , es  $1/T$ , dado que:

$$\frac{dc}{dt} = \frac{1}{T} e^{-t/T} \Big|_{t=0} = \frac{1}{T} \quad (2.8)$$

La respuesta alcanzaría el valor final en  $t = T$  si mantuviera su velocidad de respuesta inicial.

A partir de la ecuación 2.8 se muestra que la pendiente de la curva de respuesta  $c(t)$  disminuye en forma monótona de  $1/T$  en  $t = 0$  a cero en  $t = \infty$

La curva de respuesta exponencial  $c(t)$  obtenida mediante la ecuación 2.7 se muestra en la siguiente figura:



**Figura 2-2.** Curva de respuesta del Sistema de Primer Orden  
Fuente: (Ogata, 2010)

En una constante de tiempo, la curva de respuesta exponencial ha ido de 0 a 63.2% del valor final.

En dos constantes de tiempo, la respuesta alcanza 86.5% del valor final.

En  $t = 3T, 4T$  y  $5T$ , la respuesta alcanza 95,98.2 y 99.3%, respectivamente, del valor final.

Por tanto, para  $t \geq 4T$ , la respuesta permanece dentro del 2% del valor final. (Ogata, 2010, p. 161-162)

### 2.2.3. Controladores PID

El controlador PID es con mucho el algoritmo de control más común. La mayoría de los lazos de realimentación se controlan mediante este algoritmo u otro con pequeñas variaciones.

La ecuación 2.9 indica la estructura del PID:

$$\mathbf{u}(t) = K(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt}) \quad (2.9)$$

Dónde  $\mathbf{u}$  es la señal de control y  $e$  es el error de control ( $e = y_{sp} - y$ ).

Los parámetros del controlador son la ganancia proporcional  $\mathbf{K}$ , el tiempo integral  $T_i$ , y el tiempo derivativo  $T_d$ .

Las tres acciones en un control PID, son:

- **Acción proporcional.-** Es simplemente el proporcional al error de control. Se utiliza una variable de polarización o un reset. Cuando el error de control es cero, la señal de control toma el valor de la misma.
- **Acción integral.-** La función principal de la acción integral es asegurarse de que la salida del proceso coincide con el punto de consigna en estado estacionario. Con control proporcional, hay normalmente un error de control en estado estacionario. Con acción integral, un pequeño error positivo conduce siempre a una señal de control creciente, y un error negativo dará una señal de control decreciente sin tener en cuenta lo pequeño que sea el error.
- **Acción derivativa.-** El objetivo de la acción derivativa es mejorar la estabilidad en lazo cerrado. A causa de la dinámica del proceso, llevará algún tiempo antes de que un cambio en la variable de control sea detectable en la salida del proceso. Así, el sistema de control tardará en corregir un error. (Åström & Hägglund, 2009, p. 67-76)

### 2.2.4. Modificaciones de los esquemas de control PID

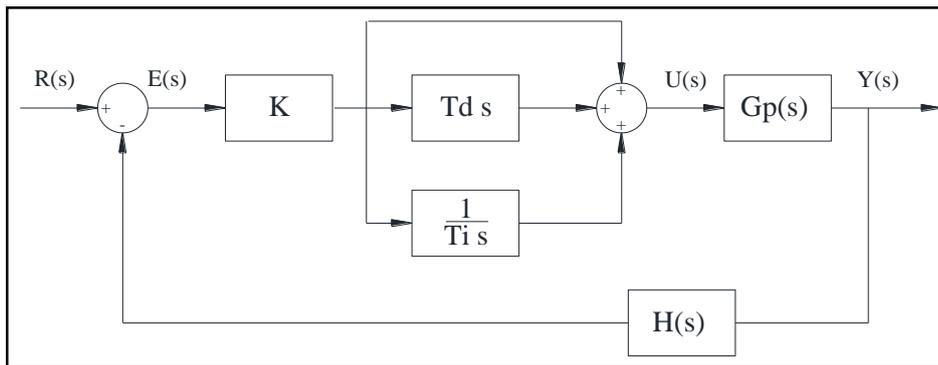
En el caso del PID convencional, la señal de control aplicada como función de transferencia se muestra en la Ecuación 2.10 y 2.11:

$$\mathbf{G}_{PID} = K + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (2.10)$$

$$G_{PID} = K\left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s\right) \quad (2.11)$$

Dónde  $K$  es la ganancia de la acción proporcional, y  $T_d = K_d/K$  y  $T_i = K/K_i$  las constantes de tiempo de la acción derivativa e integral, respectivamente.

La figura 3.2 muestra, el diagrama de bloques de un sistema en lazo cerrado con control PID.



**Figura 3-2.** Diagrama de Bloques de un control PID  
Fuente: Ríos Paulina, 2019

Éste controlador PID es ideal y da lugar a ciertos problemas de estabilidad, sensibilidad, excesivo ancho de banda en algunos casos, etc., y por ello es necesario en muchos casos modificarlo, suavizando sus efectos.

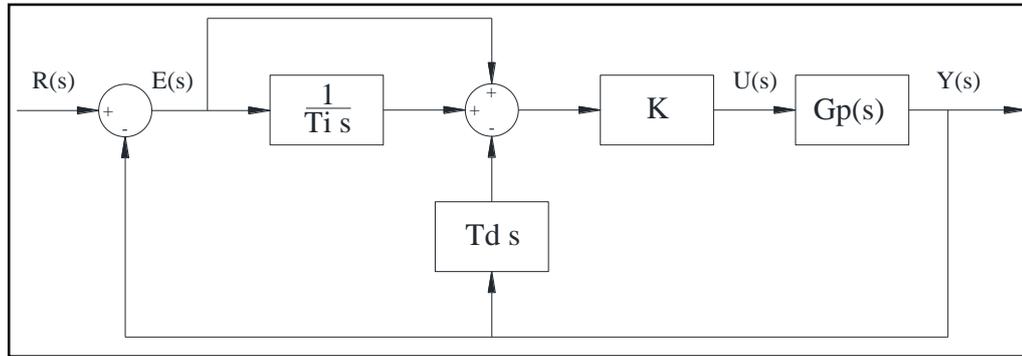
Si la entrada de referencia es una función escalón, debido a la presencia del término derivativo en la acción de control, la variable manipulada  $u(t)$  contendrá una función impulso (una función delta). En un controlador PID real, en lugar del término derivativo puro  $T_d s$  se emplea:

$$\frac{T_d s}{1 + \gamma T_d s} \quad (2.12)$$

Dónde el parámetro  $\gamma$  toma un valor alrededor de 0.1. Por tanto, cuando la entrada de referencia es una función escalón, la variable manipulada  $u(t)$  no contendrá una función impulso, sino una función en forma de un pulso estrecho. Tal fenómeno se denomina *patada en el punto de consigna*.

### 2.2.4.1. Control PI+D

Para evitar el fenómeno de la patada en el punto de consigna, se puede operar la acción derivativa sólo en el camino de realimentación, a fin de que la diferenciación ocurra únicamente en la señal de realimentación y no en la señal de referencia. La figura 4.2 se muestra el diagrama de bloques de dicho control.



**Figura 4-2.** Diagrama de Bloques Control PI+D  
Fuente: Ríos Paulina, 2019

De esta forma ya no se deriva la señal de referencia sino la salida, que en principio no sufre cambios excesivamente bruscos. La señal de control con esta nueva configuración, en la que el control derivativo no se aplica a la señal de referencia, es:

$$U(s) = K \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) R(s) - K \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) Y(s) \quad (2.13)$$

El control PID tiene un cero más que el PI+D, por tanto el control PID es más rápido en respuesta y presenta más rebose que el control modificado.

### 2.2.4.2. Control I-PD

Se considera otra vez el caso en el que la entrada de referencia es una función escalón. Tanto el control PID como el control PI-D implican una función escalón en la señal manipulada. En muchas ocasiones, tal cambio escalón en la señal manipulada puede no resultar conveniente. Por tanto, puede convenir mover la acción proporcional y la acción derivativa al camino de realimentación, a fin de que estas acciones sólo afecten a la señal de realimentación (Ogata, 2010, p. 590-591)

### 2.2.5. Lógica Difusa

Es un conjunto de principios matemáticos basados en grados de membresía o pertenencia, cuya función es modelar información. Este modelado se hace con base en reglas lingüísticas que

aproximan una función mediante la relación de entradas y salidas del sistema. (Ponce Cruz, 2010, p. 24)

### 2.2.5.1. Conjunto Difuso

Sea  $X$  un conjunto no vacío, un conjunto difuso  $A$  está caracterizado por:

$$\mu_A(x): X \rightarrow [0,1]$$

Dónde  $\mu_A(x)$  representa el grado de pertenencia del elemento  $x$  sobre el conjunto difuso  $A$  para cada  $x \in X$ .  $A$  está completamente determinado por el conjunto de pares: (Barragán Piña, 2009)

$$A = \{(x, \mu_A(x)), x \in X\}$$

Las operaciones de los conjuntos difusos son:

- **Intersección.-** Dado dos conjuntos difusos  $A$  y  $B$  en universo de discurso  $X$ . La intersección de  $A$  y  $B$  es un conjunto difuso  $C$ , denotado  $C = A \cap B$ , tal que para cada  $x \in X$  es:

$$\mu_C(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x))$$

- **Unión.-** Dado dos conjuntos difusos  $A$  y  $B$  en universo de discurso  $X$ . La unión de  $A$  y  $B$  es un conjunto difuso  $C$ , denotado  $C = A \cup B$ , tal que para cada  $x \in X$  es:

$$\mu_C(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x))$$

- **Complemento.-** Dado un conjunto difuso  $A$  en universo de discurso  $X$ . El complemento del conjunto difuso  $A$ , denotado  $\bar{A}$ , tal que para cada  $x \in X$  es: (Babuska, 1998, p. 227-230)

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x)$$

- **Normas Triangulares o T-normas:**
- **T-conorma o S-norma:**

### 2.2.5.2. Términos y Variables Lingüísticas

Los términos lingüísticos son valores cualitativos utilizados para describir una relación particular por reglas lingüísticas. Típicamente, un conjunto de  $N$  términos lingüísticos  $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$  está definido en el dominio de una variable escalar dada  $x$ . La variable que asume valores lingüísticos es llamada una variable lingüística. (Babuska, 1998, p. 11)

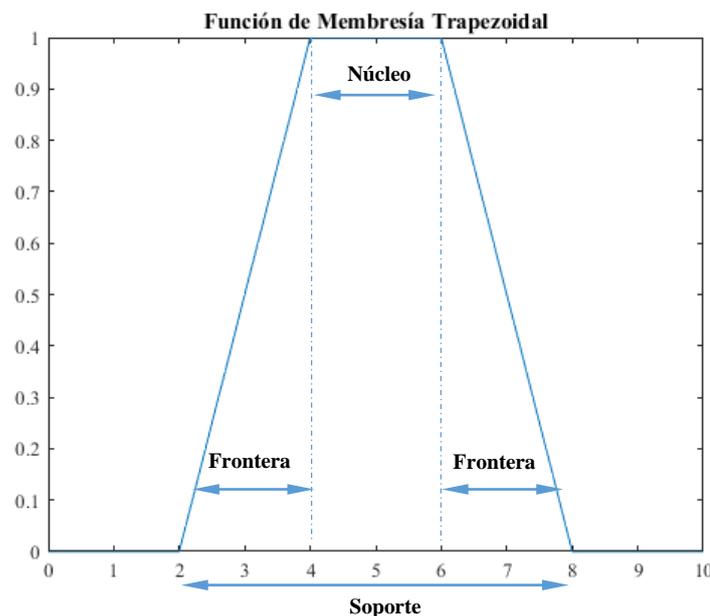
### 2.2.5.3. Funciones de membresía

Se utiliza para la representación de los grados de pertenencia de cada uno de los elementos que conforman el conjunto difuso.

Entre las funciones de membresía convencionales se tienen las siguientes:

- **Función Saturación.-** Tiene un valor de 0 hasta cierto punto y después crece con pendiente constante hasta alcanzar el valor de 1, en donde se estaciona.
- **Función Hombro.-** Se inicia en un valor unitario y se descende con constante pendiente hasta alcanzar el valor de 0.
- **Función Triangular.-** Consta de una parte de pendiente positiva constante hasta alcanzar la unidad, y una vez que lo ha logrado descende de manera uniforme.
- **Función Trapecio o PI.-** En dicha función no sólo se tiene un valor para el cual la pertenencia es unitaria, sino toda una franja que varía su ancho dependiendo del fenómeno observado.
- **Función “S” o Sigmoidal.-** La forma de esta función es similar a la de saturación. Sin embargo, el segmento de subida no es una línea recta, sino una curva de segundo orden. (Ponce Cruz, 2010, p. 49-52)

Las partes básicas de una función de membresía son:



**Figura 5-2.** Partes de una Función de Pertenencia

Fuente: Ríos Paulina, 2019

- **Núcleo:** elemento donde  $x \rightarrow \mu_{\tilde{A}}(x) = 1$
- **Soporte:**  $\mu_{\tilde{A}}(x) > 0$
- **Fronteras:**  $0 < \mu_{\tilde{A}}(x) < 1$

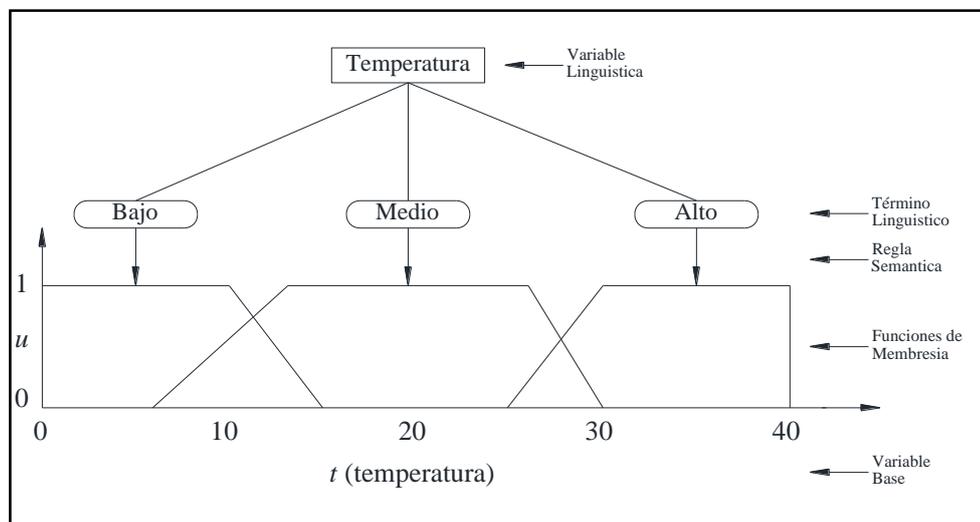
#### 2.2.5.4. Regla Difusa

Una regla difusa es una sentencia condicional que tiene la estructura Si-Entonces (If-Then), siendo el conjunto de reglas de un sistema difuso lo que se conoce como *base de reglas* o *base de conocimiento* del sistema y viene dada por la expresión:

***Si x es A entonces y es B***

La premisa de la regla, es decir, la condición, se conoce como ***antecedente***, mientras que la consecuencia se conoce como ***consecuente***. (Barragán Piña, 2009, p. 45)

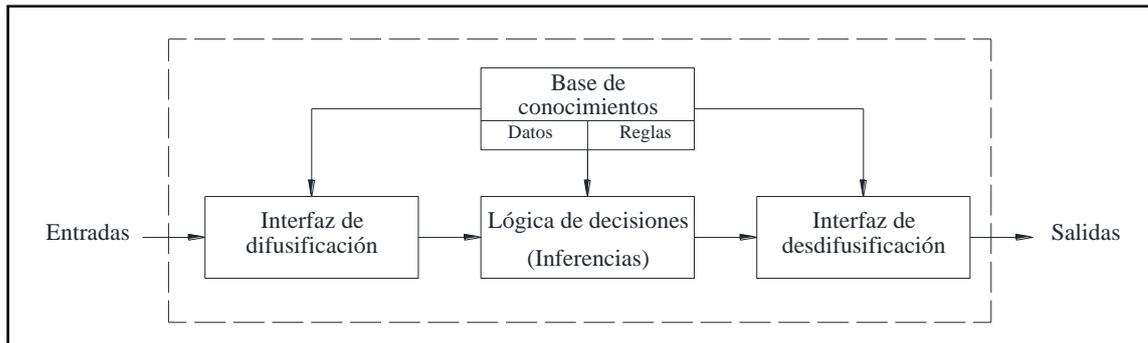
En la figura 6.2 se representa cada uno de los términos definidos.



**Figura 6-2.** Conceptos Básicos de Lógica Difusa  
Fuente: Ríos Paulina, 2019

#### 2.2.6. Sistema de Inferencia Difusa

Los sistemas de inferencia difusa son algoritmos basados en la lógica difusa y el razonamiento aproximado. En función de la aplicación a la que se destine el sistema de inferencia, éste puede denominarse de distintas formas: *modelo difuso*, *sistema experto difuso*, *controlador difuso* entre otros (Barragán Piña, 2009, p. 46). Los sistemas de inferencia difusa se componen de los elementos que se muestra en la figura 7.2:

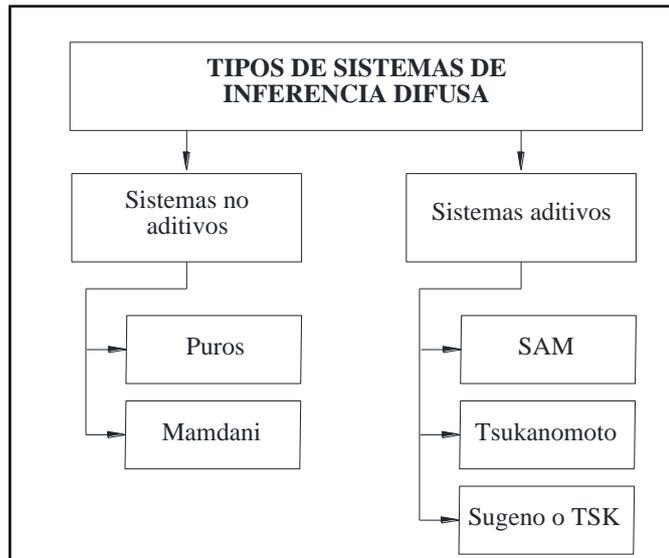


**Figura 7-2.** Sistema de Inferencia Difusa

Fuente: Ríos Paulina, 2019

1. **Interfaz de difusificación.-** Mide los valores de las variables de entrada para realizar un mapeo a escala que transfiere el rango de valores de las variables a un universo de discurso difuso. La difusificación convierte los datos de entrada en valores lingüísticos que son las etiquetas de las funciones de pertenencia o conjuntos difusos.
2. **Base de Conocimientos.-** La base de conocimientos contiene toda la información de la aplicación que se va a controlar o identificar, así como las metas del controlador. Consta de una base de datos y una base de reglas lingüísticas. La base de datos proporciona las definiciones para el establecimiento de reglas y la manipulación de datos difusos. La base de reglas caracteriza las metas de control y la política que utilizan los expertos para llevar a cabo el control, empleando proposiciones.
3. **Lógica de decisiones.-** La lógica utilizada para tomar decisiones dentro de un controlador difuso es el núcleo del mismo. A partir de la misma se simula la lógica que utilizan las personas para tomar decisiones, con base en conceptos difusos y en la inferencia de acciones de control, empleando implicaciones y las reglas establecidas según la base de conocimientos.
4. **Interfaz de desdifusificación.-** La interfaz de desdifusificación se encarga del mapeo a escala que convierte el rango de valores de las variables de salida a sus universos de discurso correspondientes. (Ponce Cruz, 2010, p. 71-74)

En función de la forma de las reglas, tipo de entradas y salidas, se distinguen cinco tipos de sistemas difusos:



**Figura 8-2.** Tipos de Sistemas de Inferencia Difusa  
 Fuente: Ríos Paulina, 2019

### 2.2.7. Modelo Takagi Sugeno Kang (TSK)

Los investigadores japoneses Takagi y Sugeno, con la posterior incorporación de Kang, propusieron un tipo de sistema difuso que en lugar de emplear reglas completamente lingüísticas, utiliza como consecuente una función de las variables de entrada del sistema. También conocido como Sugeno. (Barragán Piña, 2009, p. 53)

Es un modelo difuso basado en reglas, adecuado para la aproximación de una gran clase de sistemas que presentan no linealidades. En éste sistema, los consecuentes de la regla son funciones nítidas de las entradas del modelo:

$$R_i: \text{Si } x \text{ es } A_i \text{ entonces } y_i = f_i(x), \quad i = 1, 2, \dots, K$$

Dónde  $x \in \mathbb{R}^p$  es la variable de entrada o antecedente y  $y_i \in \mathbb{R}^q$  es la variable de salida o consecuente.  $R_i$  indica la  $i$ -ésima regla, y  $K$  es el número de reglas.  $A_i$  es el antecedente del conjunto difuso de la  $i$ -ésima regla, definido como una función de membresía

$$\mu_{A_i}(x): \mathbb{R}^p \rightarrow [0,1]$$

La proposición del antecedente " $x$  es  $A_i$ ", generalmente se expresa como una combinación lógica de proposiciones simples con conjuntos difusos univariados definidos por los componentes individuales de  $x$ , a menudo en la forma conjuntiva:

$$R_i: \text{Si } x_1 \text{ es } A_{i1} \text{ and } x_2 \text{ es } A_{i2} \text{ and } \dots \text{ and } x_p \text{ es } A_{ip}$$

$$\text{entonces } y_i = f_i(x), \quad i = 1, 2, \dots, K$$

Las funciones de los consecuentes  $f_i$  son típicamente seleccionadas como instancias de una función parametrizada adecuada, cuya estructura permanece igual en todas las reglas y solo varían los parámetros. Una parametrización simple y prácticamente útil es la forma lineal:

$$\mathbf{y}_i = \mathbf{a}_i^T \mathbf{x} + b_i(x), \quad (2.14)$$

Dónde  $\mathbf{a}_i$  es el vector de parámetros y  $b_i$  un escalar. (Babuska, 1998, p. 29)

La utilización de polinomios de órdenes mayores o funciones no polinómicas añaden complejidad al sistema y dificultan su interpretabilidad, por lo que no es muy común su utilización.

### 2.2.7.1. Modelo Singleton o de Tipo Solitario

Se presenta cuando el parámetro de la ecuación 2.14  $\mathbf{a}_i = \mathbf{0}$ . Los consecuentes de éste modelo se denominan funciones constantes o son números reales llamados singletons. También es conocido como Modelo Takagi Sugeno Kang de orden cero.

Contrario a los términos de los consecuentes, en un modelo lingüístico, el número de singletons diferentes en una regla base usualmente no está limitada, por ejemplo cada regla puede tener su propio consecuente singleton. Para el modelo singleton, el desfudificador de Centro de Gravedad se reduce a aplicar el método de Promedio-difuso:

$$\mathbf{y}_o = \frac{\sum_{i=1}^k \beta_i b_i}{\sum_{i=1}^k \beta_i} \quad (2.15)$$

Todas las  $K$  reglas contribuyen para la desfudificación. Este promedio (Fuzzy-means) indica que si dos reglas, las cuales tienen el mismo consecuente Singleton y está activo, este Singleton se cuenta dos veces en el promedio ponderado.

El modelo difuso singleton pertenece a la clase general de las funciones de aproximación general, llamadas Funciones Básicas de Expansión tomando la forma:

$$\mathbf{y} = \sum_{i=1}^K \varphi_i(x) b_i \quad (2.16)$$

En un modelo Singleton, la función básica  $\varphi_i(x)$  esta dada por el grado de cumplimiento (normalizado) de los antecedentes de la regla y las constantes  $b_i$  son los consecuentes. Este modelo tiene la propiedad de aproximación de función y puede representar una gran clase de sistemas no lineales. La interpolación multilineal entre los consecuentes puede darse si se mantiene las siguientes condiciones:

1. La función de membresía del antecedente son triangulares y forman la partición.
2. El producto t-norma es usado para representar la lógica y la conectividad.
3. Se utiliza la desdifusificación mediante promedio-difuso. (Ecuación 2.15)
4. Se cumple la regla de solapamiento entre las funciones de pertenencia triangulares

Dicho modelo difuso puede invertirse exactamente para proporcionar una ley de control basada en el modelo inverso del proceso. (Babuska, 1998, p. 24-25)

### **2.2.8. Identificación Difusa**

Una identificación difusa es un esquema de modelado cualitativo mediante el cual se describe el comportamiento del sistema empleando un lenguaje natural. De manera específica, es una descripción del sistema mediante cantidades difusas, que se expresan en términos de números difusos o conjuntos difusos asociados con una etiqueta lingüística. Dichos conjuntos son asociados mediante reglas difusas de control que se derivan a partir de la experiencia de un operador humano y/o conocimiento ingenieril, basándose en mayor parte en su conocimiento cualitativo de un sistema objetivo. Siendo esta aproximación denominada similar a sistema experto. (Sugeno & Yasukawa, 1993, p. 7-8)

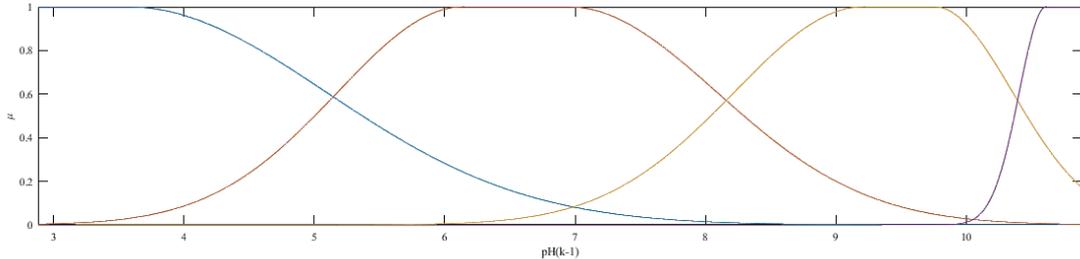
Los tres pasos básicos a tener en cuenta a la hora de obtener un modelo difuso son los siguientes:

- 1. Determinación de la estructura del modelo.** Implica la selección de las variables de entrada y salida, determinar el tipo específico del sistema borroso a utilizar (Mamdani, TSK, etc.), determinación del número de funciones de pertenencia del modelo para cada entrada y salida (para el modelo TSK, determinar el orden de la función del consecuente) y los valores iniciales de sus parámetros, diseñar la colección de reglas borrosas.

Es importante establecer las divisiones del universo de discurso de las variables de entrada, y escoger las funciones de pertenencia que se utilizarán para la realización de dichas divisiones. Éste particionado dará lugar a las reglas que definirán el modelo difuso. Existen cuatro métodos de particionar el universo de discurso:

- **Particionado experto:** Consiste en dividir el universo de discurso en base al conocimiento que se posea sobre el sistema a modelar.
- **Particionado uniforme:** Divide el universo de discurso de las variables de entrada en partes iguales mediante funciones de pertenencia idéntica y simétrica. Cumpliendo la ley de solapamiento, es decir que las funciones se crucen solo con una. Esto facilita la interpretabilidad del modelo.

- **Particionado por clustering:** Facilitan el agrupamiento de los datos en entrada en torno a valores de salida que cumplan cierto patrón comportamiento, tal y como se observa en la Figura 9-2.
- **Particionado en línea:** Son especialmente útiles cuando se desea modificar un modelo en tiempo real o cuando existen restricciones temporales o de costo computacional.



**Figura 9-2.** Particionado por Clustering

Fuente: Ríos Paulina, 2019

- 2. Estimación de los parámetros del modelo.** Encuentra los valores óptimos de los parámetros ajustables del modelo difuso, para que éste se aproxime de la forma más exacta al sistema real que se pretende modelar. En un modelo difuso se distinguen dos tipos de parámetros ajustables: los parámetros de los antecedentes y de los consecuentes. Éstos parámetros se ajustan mediante la extracción de información y el conocimiento experto del sistema o utilizando técnicas de identificación de mínimos cuadrados. (Barragán Piña, 2009, p. 75-78)
- **Método de Identificación de Mínimos Cuadrados.-** Una ventaja del modelo Singleton sobre el modelo lingüístico (Mandami) es que los parámetros consecuentes  $b_i$ , pueden estimarse fácilmente desde un conjunto de datos, usando la técnica de mínimos cuadrados. Dónde  $X_k = [x_{1k}, x_{2k}, \dots, x_{pk}]^T$  indica la k-esima entrada del vector, para el cual el grado de cumplimiento  $\beta_i(x_k)$  de la i-esima regla está dada por:

$$\beta_i(x_k) = \mu_{A'_{i1}}(x_{1k}) \wedge \mu_{A'_{i2}}(x_{2k}) \wedge \dots \wedge \mu_{A'_{in}}(x_{pk}) \quad (2.17)$$

La salida  $y_k$  del modelo correspondiente a la entrada  $x_k$  es calculada por el método de defuzificación del promedio-difuso:

$$y_k = \frac{\sum_{i=1}^k \beta_i(x_k) b_i}{\sum_{i=1}^k \beta_i(x_k)} \quad (2.18)$$

Dónde  $\Gamma$  denota la matriz en  $\mathbb{R}^{N \times K}$  teniendo el grado de cumplimiento normalizado  $\gamma_{ki} = \beta_i(x_k) / \sum_{j=1}^k \beta_j(x_k)$  como el k-esimo elemento, dónde  $y$  denota el vector en  $\mathbb{R}^N$  teniendo  $y_k$  como el k-esimo componente y dónde  $b = [b_1, b_2, \dots, b_k]^T$  indica el vector que contiene los parámetros consecuentes. El problema de los mínimos cuadrados escrito en forma matricial  $y = \Gamma b + \varepsilon$ , tiene una solución:

$$\mathbf{b} = [\Gamma^T \Gamma]^{-1} \Gamma^T \mathbf{y} \quad (2.19)$$

El modelo singleton puede ser más preciso que el modelo TSK de primero orden, ya que reduce el error de aproximación del modelo TS. Debido a que se utiliza funciones de membresía triangulares en el antecedente de la regla, este modelo puede ser implementado como una tabla de consulta con los vectores de índice dados por los núcleos de los antecedentes del conjunto difuso. (Babuska, 1998, p. 147)

Ésta solución es válida si  $[\Gamma^T \Gamma]^{-1}$  es no singular, por lo que todas las reglas deben recibir suficiente excitación durante el entrenamiento. En la práctica esto no es siempre posible, por lo que es recomendable recurrir a la aplicación de mínimos cuadrados recursivos, buscando garantizar que la adaptación solo afectará las reglas excitadas. (Contreras, Murillo, Paz, & Sarabia, 2007, p. 6)

Los mínimos cuadrados recursivos queda definido de la siguiente manera:

$$\mathbf{b}_{i+1} = \mathbf{b}_i + S_{i+1} * \gamma_{i+1} * (\mathbf{y}_{i+1} - \gamma_{i+1} * \mathbf{b}_i) \quad (2.20)$$

$$\mathbf{S}_{i+1} = S_i - \frac{S_i * \gamma_i * \gamma_{i+1} * S_i}{1 + \gamma_{i+1} * S_i * \gamma_{i+1}^T} \quad (2.21)$$

Dónde  $\mathbf{b}_0 = 0$  y  $\mathbf{S}_0 = \alpha * I$ ;  $\alpha$ =Número Grande e  $I$ = Matriz Identidad

### 3. Validación del modelo. Se prueba la consistencia del modelo.

#### 2.2.9. Controladores Difusos

Fuzzy Control (FC) es una rama importante de la teoría de conjuntos difusos, constituyendo una aplicación a la automatización de procesos y pudiéndose considerar como una clase independiente y a su vez como una variedad de controladores no lineales.

La estructura típica de un controlador difuso se muestra en la figura 7-2.

Para diseñar un controlador difuso ya sea P, PI, PD o PID, se deben elegir las variables de entrada/salida y las reglas del controlador.

Los antecedentes de las reglas del controlador pueden ser:

- Señal del error, denotado por  $e$
- Cambio del error, denotado por  $\Delta e$
- Suma del error o la integral del error, denotado por  $\sum e$

La salida de control representa los consecuentes de las reglas difusas, y pueden ser:

- Cambio en la señal de control, denotado por  $\Delta u$
- Señal de control, denotado por  $u$  (Reznik, 1997, p. 78)

### 2.2.9.1. PI Difuso:

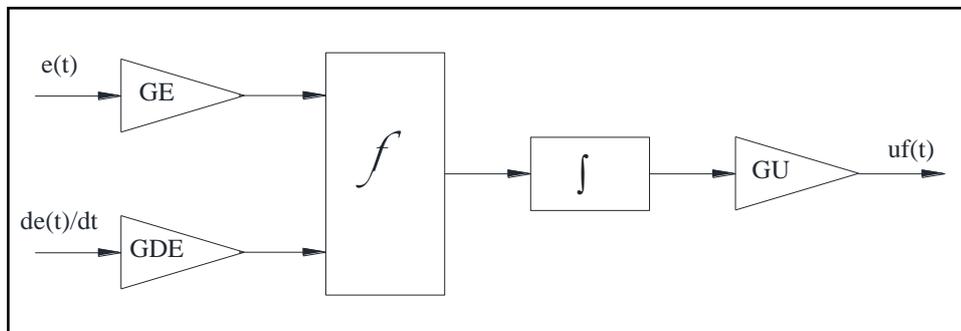
La respuesta del PI clásico ideal en tiempo continuo está dado por  $k_p$  la constante proporcional,  $k_i$  la constante integral,  $e(t)$  el error y  $u(t)$  la señal de control.

Las entradas son el error y la integral del error. Sin embargo, la experiencia dicta que es más difícil escribir las reglas para la acción integral, además de los problemas debidos al efecto windup del integrador.

Por lo tanto, para un controlador PI difuso se propone como solución que las entradas sean el error y su derivada y la salida la derivada de la señal de control, tal como se expresa en:

$$\frac{du(t)}{dt} = k_p \cdot \frac{de(t)}{dt} + k_i \cdot e(t) \quad (2.22)$$

Para obtener la señal de control se realiza la integral a la salida. La figura 10-2 muestra la estructura de un controlador PI difuso. (Betancor C. , 2015, p. 25-27)



**Figura 10-2.** Estructura de un Controlador PI Difuso  
Fuente: Ríos Paulina, 2019

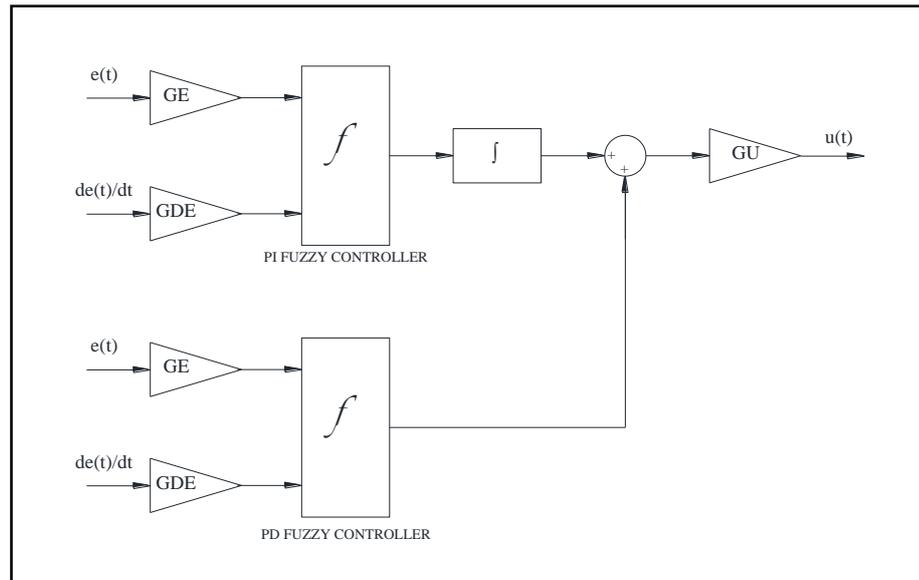
La salida del controlador de la figura está dada en la ecuación 2.23, donde  $f$  es una función no lineal.

$$u_f(t) = G_u \cdot \int f(e(t) \cdot G_e, \frac{de(t)}{dt} \cdot G_{de}) \quad (2.23)$$

### 2.2.9.2. PID Difuso:

Las variables de entrada son: el error, la derivada del error y la doble derivada del error. La salida es el cambio en la señal de control.

Por el número de entradas que posee dicho controlador, el número de reglas incrementa y también las funciones de transferencia. Es por ello que para construir este tipo de control, se combina en paralelo tanto la estructura PD con una PI. (Reznik, 1997, p. 78)



**Figura 11-2.** Estructura de un Controlador PID Difuso

Fuente: Ríos Paulina, 2019

## CAPÍTULO III

### 3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

#### 3.1. Descripción Horno de Tratamiento Térmico

El proceso de Tratamiento Térmico para el alivio de tensiones de soldadura forma parte de la cadena de producción del sector metalmecánico. Los equipos fabricados en acero al carbono, como: calderos, tubería externa de calderos, recipientes a presión y parte de ellos son ingresados a un horno donde se requiere manejar la temperatura y la aplicación de calor controlado sobre el acero para cambiar o alterar sus propiedades.

El horno a estudiar es el de la empresa metalmecánica Industria Acero de los Andes, ubicada en la ciudad de Quito.



**Figura 1-3.** Horno de Tratamiento Térmico

**Fuente:** Ríos Paulina, 2019

En dicho horno se realiza el tratamiento térmico después de un proceso de soldadura, sometiendo a las piezas hasta temperaturas de 1150 °F.

Las características del horno industrial a estudiar son las siguientes:

- Tipo de Horno: Combustión
- Dimensiones: 14000(L) x 4000(H) x 6000(W) mm
- Aislamiento Térmico: Lana de Vidrio
- Cantidad de quemadores: Dos
- Combustible: GLP Licuado del Petróleo

El nivel de automatización e instrumentación en el horno de tratamiento térmico es mínimo. En las figuras 2-3 y 3-3 se muestran los equipos instalados actualmente en el horno para visualización y control.

Los valores de temperatura se muestran en indicadores digitales, los mismos que no permiten el almacenamiento de los datos. Las válvulas de aire-GLP son controlados de forma manual mediante potenciómetros.

Es importante mencionar que los quemadores están controlados mediante un sistema dedicado, que se encarga de realizar una mezcla óptima GLP-aire, para una buena combustión.



**Figura 2-3.** Visualización de Temperaturas  
Fuente: Ríos Paulina, 2019



**Figura 3-3.** Controlador de Quemadores  
Fuente: Ríos Paulina, 2019

El operador visualiza las temperaturas adquiridas por las termocuplas tipo K y regula las válvulas de aire-GLP de los quemadores para cumplir con la curva de tratamiento térmico. Los valores de temperatura del proceso se registran mediante un sistema de impresión sobre papel.

### 3.2. Proceso de Tratamiento Térmico

El tratamiento térmico inicia cuando el equipo o piezas de acero ingresan al horno, se sueldan las termocuplas en las juntas de soldadura y se encienden los quemadores.

El proceso se divide en 5 etapas y en cada una de ellas se requiere **un seguimiento de temperatura a una velocidad y tiempo definida**, tal como se muestra en la siguiente tabla:

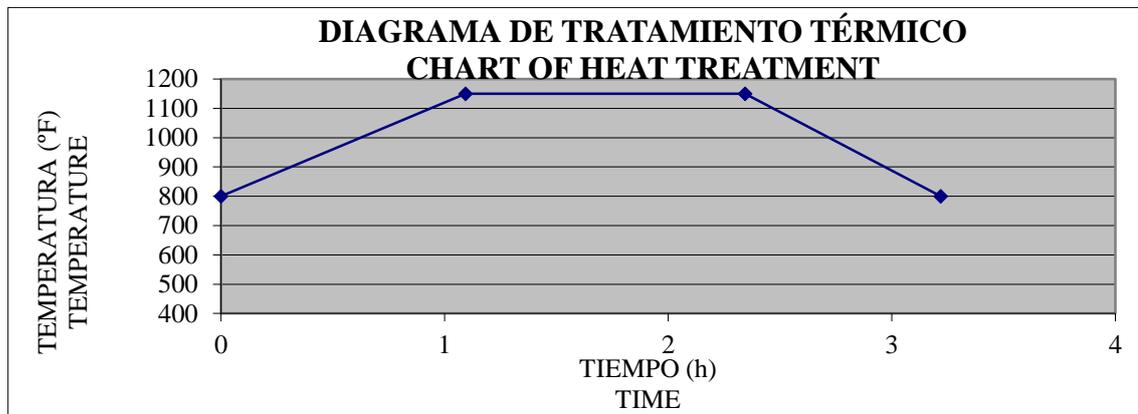
**Tabla 1-3.** Tiempos y Temperaturas del PWHT

ETAPAS					
	Pre-Calentamiento	Calentamiento	Sostenimiento	Enfriamiento	Finalización
Temp. Inicial (°F)	50	800	1150	1150	800
Temp. Final (°F)	800	1150	1150	800	50
Tiempo	1h 30 min	1h 15 min	1h 15 min	1h 10 min	2h 00 min
Velocidad	500 °F/h	320 °F/h	N/A	400 °F/h	375 °F/h

Fuente: (Manual de Control de Calidad ASME, 2013)

Realizado por: Ríos Paulina, 2019

A partir de los datos de la Tabla 1-3, se obtiene la curva de tratamiento térmico, como se muestra:



**Figura 4-3.** Curva de Tratamiento Térmico

Fuente: Ríos Paulina, 2019

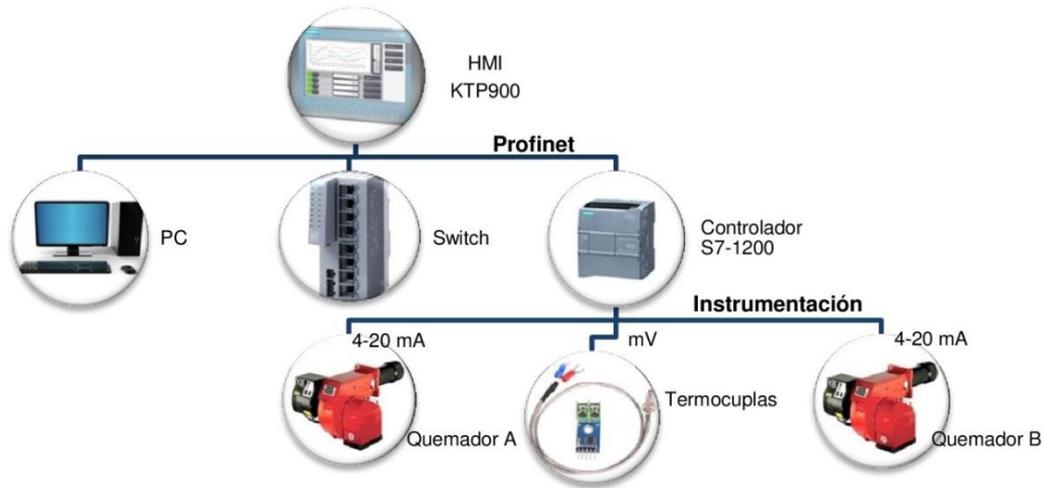
### 3.3. Sistema de Adquisición de Datos

El estudio del presente proyecto requiere de la experimentación y pruebas en el horno para entender su comportamiento dinámico. Como se ha mencionado en párrafos anteriores, el horno no dispone de automatización en el proceso. En tal razón se propone la automatización parcial del sistema que permita adquirir los valores de temperatura como respuesta a una entrada escalón, para la identificación de la planta. La arquitectura para la adquisición de los datos de temperatura se muestra en la figura 5-3.

Para la automatización parcial del horno, es importante conocer sobre los requerimientos del proceso, que a continuación se detallan:

1. Visualización, registro y gráficas de los valores de temperatura del tratamiento térmico.
2. Control manual/automático porcentual de las válvulas de aire-GLP de los quemadores.
3. Control de usuarios y accesos.
4. Alarmas.
5. Históricos.

6. Cálculo automático de la velocidad de cada etapa del proceso.



**Figura 5.3.** Arquitectura Sistema de Adquisición de Datos  
Fuente: Ríos Paulina, 2019

### 3.3.1. Selección de Equipos:

De acuerdo a los requerimientos del proceso, se seleccionan los sensores y actuadores que serán instalados en el proceso.

#### 3.3.1.1. Instrumentación

- Termocuplas tipo K
- Conversor I-V para la válvula de control del quemador.

#### 3.3.1.2. Control y Visualización

Los equipos requeridos para la adquisición de temperatura se describen en la Tabla 2-3. En la misma se detallan las características y modelos.

**Tabla 2-3.** Equipos para Control y Visualización requeridos para el Sistema

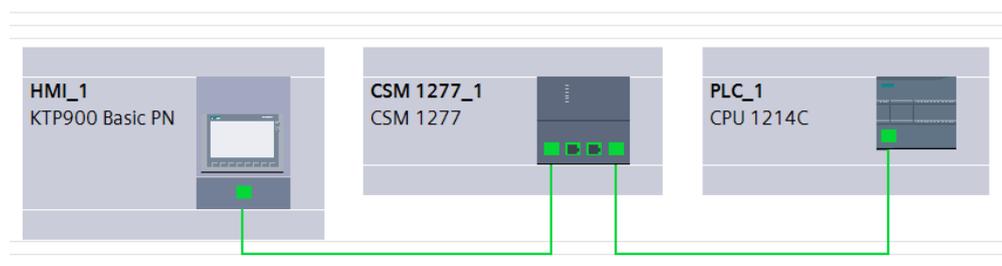
Ítem	Cant.	Descripción	Características	Modelo
1	1	Controlador Lógico Programable	CPU Compacto, AC/DC/RLY, 14 DI 24 VDC, 10 DO RLY 2A, 2 AI 0-10 V DC, Alimentación: AC 85 - 264 V AC a 47-63Hz. Memoria 100 KB	Siemens S7-1200, 6ES7214-1HG31-0XB0
2	1	Módulo de Entradas Digitales	Módulo SM1221, 24 VDC	Siemens 6ES7221-1BF30-0XB0
3	1	Módulo de Salidas Analógicas	Módulo SM1332, 4 AO +/-10V, Resolución: 14 Bit 0-20mA / 4-20 mA, 13 Bit Resolución	Siemens 6ES7232-4HD30-0XB0
4	1	Módulo Salidas Digitales	Módulo SM1222, 8 DO, Relay 2A	Siemens 6ES7222-1HF32-0XB0
5	2	Módulo de Termocuplas	Módulo SM1231, TC, 8 AI Termocuplas.	Siemens 6ES7231-5QF30-0XB0
6	1	Fuente de Alimentación	Módulo:PM1207 Alimentación de Entrada: 120/230 VAC, Salida: 24 V DC/ 2.5 A	Siemens 6EP1332-1SH71
7	1	HMI	Panel Básico, Operación con Teclas y Touch, 9" TFT display, 65536 colores, Interface: Profinet.	Siemens KTP900, 6AV2123-2JB03-0AX0
8	1	Switch	Módulo CSM 1277, 4 Puertos.	Siemens 6GK7277-1AA10-0AA0

Realizado por: Ríos Paulina, 2019

### 3.3.2. Configuración de Equipos:

Los equipos seleccionados se han configurado y programado en el software Tía Portal V.13.

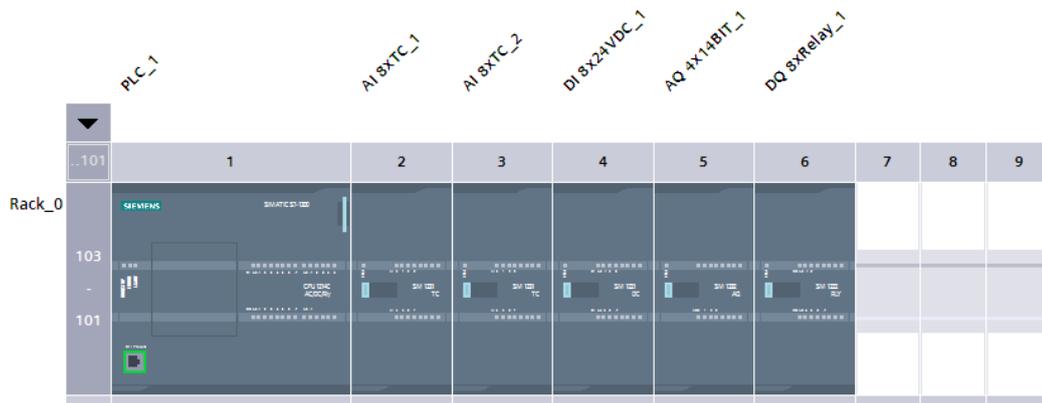
Para interconexión del PLC y HMI, se configura una red tipo Profinet y un switch. Se asignan las direcciones IP en cada uno de los dispositivos de la red.



**Figura 6-3.** Configuración de la Red Profinet del Sistema de Adquisición de Datos

Fuente: Ríos Paulina, 2019

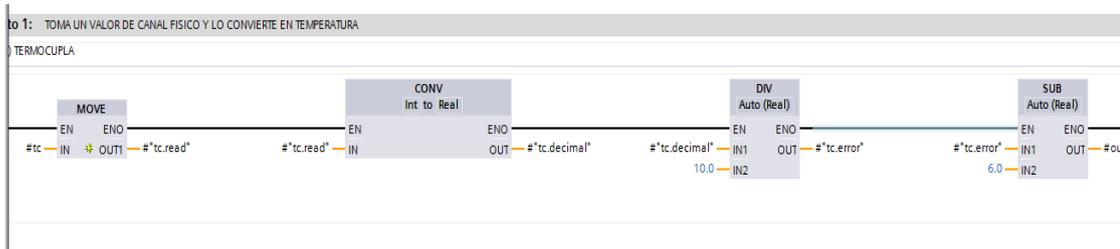
La disposición del PLC y los módulos de entradas/ salidas analógicas y digitales, se muestran en la figura 7-3.



**Figura 7-3.** Disposición del PLC y módulos  
**Fuente:** Ríos Paulina, 2019

### 3.3.3. Adquisición de Temperatura.

Para adquirir la temperatura de las termocuplas soldadas en el cuerpo de acero a dar el tratamiento térmico, se toma del canal físico en los módulos analógicos de entrada y se convierte en temperatura mediante operaciones aritméticas, tal y como se muestra en la siguiente figura:

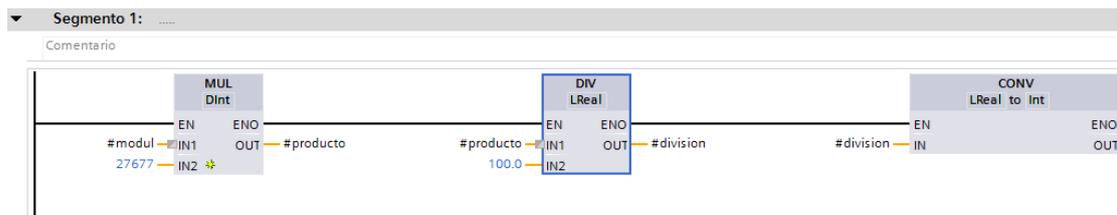


**Figura 8-3.** Adquisición de Temperatura  
**Fuente:** Ríos Paulina, 2019

El segmento de programación creado se lo define como una función %FC1, la misma que sirve para adquirir el valor de cada una de las termocuplas en el programa principal.

### 3.3.4. Adquisición de Apertura /Cierre de Válvula de Control Aire/GLP

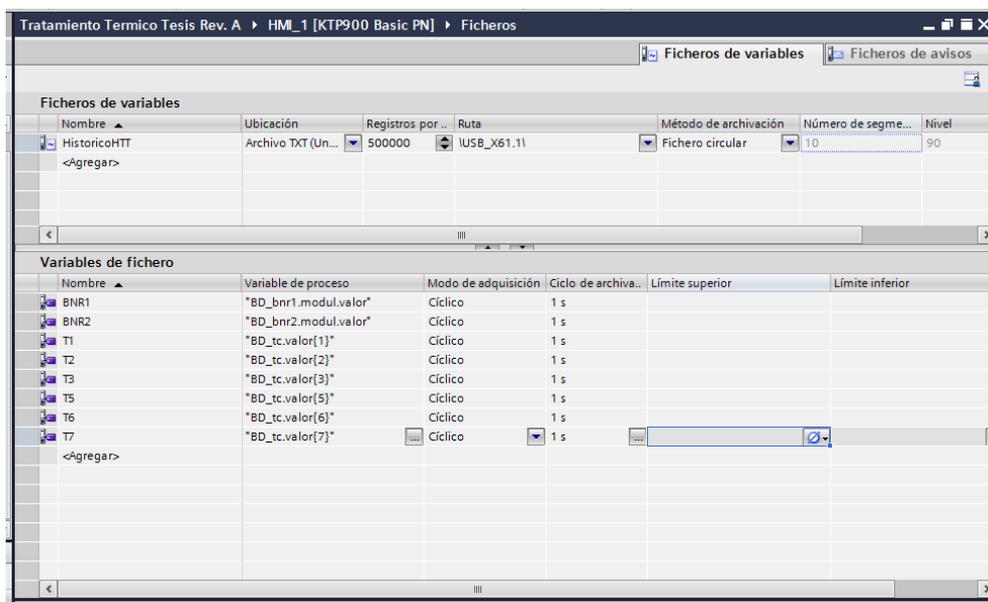
Para la adquisición de este valor, se linealiza una salida de 4-20 mA en función a la regulación de la válvula de 0 al 100%, como se indica en la figura 9-3:



**Figura 9-3.** Adquisición de valores Apertura/Cierre de la Válvula del Quemador  
Fuente: Ríos Paulina, 2019

### 3.3.5. Registro de Valores de Temperatura y Porcentaje Regulación de la Válvula de Control.

Una vez adquirido el dato, se almacena en un fichero las variables de temperatura y la válvula de control. El ciclo de archivado será de 1 s. Se almacena en un dispositivo USB, conectado al HMI. El archivo a generar será de extensión .txt.



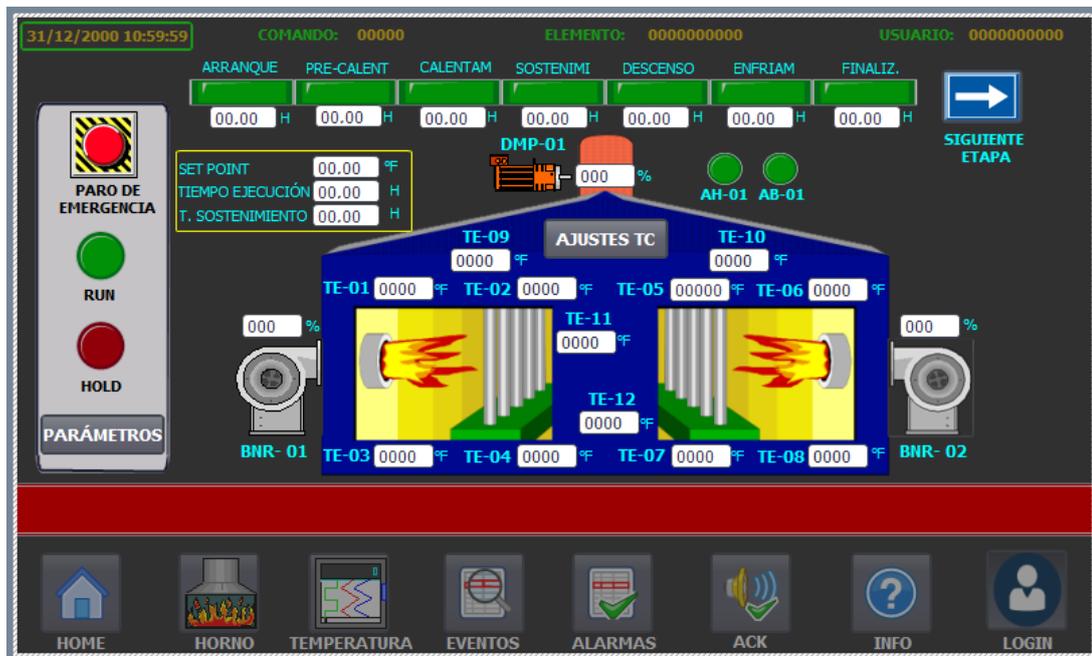
**Figura 10-3.** Registro de Valores de Temperatura y Regulación de la Válvula de Control  
Fuente: Ríos Paulina, 2019

### 3.3.6. Visualización

Para una mejor interacción con el proceso, se diseña un HMI basado en la norma ISA 101, en donde se visualiza las variables que intervienen en el proceso. Las principales variables y de interés para dicho proyecto de investigación son detalladas a continuación:

1. Visualización de valores de las termocuplas
2. Control Porcentual de las válvulas de control de aire/GLP
3. Control porcentual del damper

4. Indicadores de las Etapas del Tratamiento Térmico.
5. Indicadores de Set Point, Tiempo de Ejecución, y Tiempo de Sostenimiento.
6. Gráficas de valores de Temperatura.
7. Control de Usuarios.
8. Paro de Emergencia.



**Figura 11-3.** Diseño del HMI del Sistema de Adquisición de Datos.

Fuente: Ríos Paulina, 2019

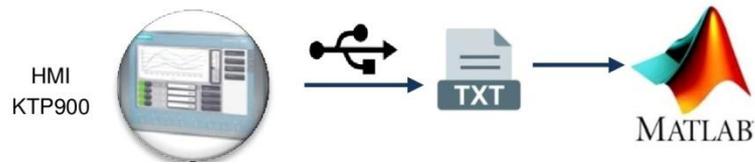
### 3.4. Identificación Convencional de la Planta

Para identificar la planta, se realiza la experimentación en el horno ante una respuesta a una entrada escalón. Se ingresa un cuerpo de acero al carbono en el horno y se sueldan las termocuplas en seis los puntos donde se toman los valores de temperatura

Cada quemador tiene incidencia en cada lado del horno donde está instalado. Por tanto tres termocuplas corresponden a un quemador y los restantes al otro.

El escalón es el 100% de apertura de la válvula de aire/GLP del quemador. Se registran los valores de temperatura de cada quemador.

Como se detalló en la sección anterior, los datos adquiridos se guardan en un dispositivo USB conectado directamente al HMI el cual genera un archivo .txt. Para el procesamiento de los datos obtenidos, se utiliza el software Matlab mediante scripts. (Ver Anexo B)



**Figura 12-3.** Registro de Datos para Identificación de la Planta  
Fuente: Ríos Paulina, 2019

La curva de reacción corresponde a un sistema de primer orden similar a la ecuación 2.4 La función de transferencia que corresponde al modelo está definido por:

$$G_p(s) = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (3.1)$$

Dónde:

*K*: Ganancia Estado Estable

*τ*: Constante de Tiempo.

#### 3.4.1. Obtención de la Ganancia en Estado Estable (*K*)

La ganancia en estado estable se obtiene mediante la razón entre la variación de la salida, en éste caso el valor de temperatura cuando alcanza el estado estacionario y la variación de la entrada, como es el porcentaje de regulación de la Válvula de Aire/GLP del Quemador.

#### 3.4.2. Obtención de la Constante de Tiempo (*τ*)

La constante de tiempo se obtiene mediante el procedimiento propuesto por Miller que es una variación del método de Ziegler & Nichols, y al igual que éste, el método de Miller requiere que se trace una recta tangente al punto de inflexión de la respuesta del sistema a la prueba de entrada tipo escalón.

La variación propuesta por Miller radica en el cálculo de la constante de tiempo del modelo, ésta se calcula como el tiempo requerido para que la respuesta alcance el 63.2% del cambio total a partir del tiempo muerto. (Alfaro, Identificación de procesos sobreamortiguados utilizando técnicas de lazo abierto, 2001, pág. 13).

#### 3.4.3. Obtención de la Constante de Tiempo (*τ*) y Ganancia (*K*) Optimizados

Para la optimización de los parámetros del modelo de la planta, se parte de la función del sistema de primer orden en el tiempo ecuación. 3.2 y el método del Gradiente Descendente.

$$y(t) = \rho \left(1 - e^{-t/\tau}\right) \quad (3.2)$$

Dónde  $y(t)$  es la temperatura el tiempo y  $\rho$  es la temperatura máxima a la que llega el sistema.

También se define la siguiente función de costo inicial:

$$J_{Planta} = \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (3.3)$$

Dónde:

$N$ =Número de Datos Adquiridos

$y_i$ =Datos de temperatura reales

$\hat{y}_i$ =Datos de temperatura predichos.

Para el cálculo del gradiente, se deriva la función de costo ecuación 3.3, con respecto a cada una de las variables a optimizar.

Para  $\tau$ , la ecuación de la derivada queda planteada de la siguiente manera:

$$\frac{\partial J}{\partial \tau} = 2 \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i) * (-1) * \frac{\partial \hat{y}_i}{\partial \tau} \quad (3.4)$$

Reemplazando la ecuación. 3.2 en 3.4 se obtiene el gradiente para Tao.

$$\begin{aligned} \frac{\partial J}{\partial \tau} &= -2 \sum_{i=1}^N (y_i - \rho + \rho e^{-t_i/\tau}) * \frac{\partial (\rho + \rho e^{-t_i/\tau})}{\partial \tau} \\ \frac{\partial J}{\partial \tau} &= 2 \sum_{i=1}^N (y_i - \rho + \rho e^{-t_i/\tau}) * (\rho e^{-t_i/\tau} * -t_i/\tau) \\ \nabla \tau &= 2 \sum_{i=1}^N (y_i - \rho + \rho e^{-t_i/\tau}) * (\rho e^{-t_i/\tau} * -t_i/\tau) \end{aligned} \quad (3.5)$$

De la misma manera, se obtiene el gradiente de la temperatura máxima  $\rho$

$$\frac{\partial J}{\partial \rho} = -2 \sum_{i=1}^N (y_i - \rho + \rho e^{-t_i/\tau}) * (1 + e^{-t_i/\tau})$$

$$\nabla \rho = -2 \sum_{i=1}^N (y_i - \rho + \rho e^{-t_i/\tau}) * (1 + e^{-t_i/\tau}) \quad (3.6)$$

Una vez obtenidos los gradientes, se aplica la técnica de optimización, donde se itera y se actualiza los parámetros hasta que la función de costo actual sea menor a la inicial, utilizando la siguiente ecuación:

$$\theta = \theta - \alpha * \nabla f \quad (3.7)$$

Dónde  $\theta$  es el vector que contiene las variables a optimizar,  $\alpha$  el valor de aprendizaje,  $\nabla f$  es el vector de los gradientes. Reemplazando 3.7 se obtiene la ecuación del algoritmo de gradiente descendente que permitirá encontrar los valores optimizados. El algoritmo es programado y ejecutado en un script de Matlab.

$$\begin{bmatrix} \tau_{opt} \\ \rho_{opt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_{opt} \\ \rho_{opt} \end{bmatrix} - \alpha * \begin{bmatrix} \nabla \tau \\ \nabla \rho \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Como en la ecuación se obtiene  $\rho_{opt}$  que es la temperatura máxima que alcanza el sistema, ésta se divide para la entrada al escalón y se encuentra la Ganancia en Estado Estable optimizado para el modelo de primer orden.

### 3.5. Identificación Difusa de la Planta

Una vez identificados los parámetros del modelo reducido de la planta, se procede con la identificación difusa. La misma parte de la función de transferencia del sistema de primer orden encontrado en la sección anterior. (Ecuación. 3.1) y se transforma a un sistema en tiempo discreto utilizando el método de Euler en adelante:

$$s = \frac{1 - z^{-1}}{T} \quad (3.9)$$

La selección del tiempo de muestreo  $T$  para un sistema de primer orden es de  $T = \tau/10$

A la ecuación. 3.1 se le divide para  $\tau$  y se obtiene:

$$G(s) = \frac{K/\tau}{s + 1/\tau} \quad (3.10)$$

Para una simplificación y mayor manejo de la función se utiliza las siguientes igualdades:

$$a = K/\tau$$

$$b = 1/\tau$$

Se reemplaza la ecuación. 3.9 en 3.10, obteniendo, la función de transferencia en transformada z

$$G(z) = \frac{a}{\left(\frac{1 - z^{-1}}{T}\right) + b}$$

$$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{aT}{1 - z^{-1} + bT} \quad (3.11)$$

Después se simplifica y se obtiene la ecuación en diferencias que representa el modelo de la planta.

$$Y(z) - z^{-1}Y(z) + bTY(z) = aTX(z)$$

$$(1 + bT)y_k - y_{k-1} = aTx_k$$

$$y_k = \frac{aTx_k + y_{k-1}}{(1 + bT)} \quad (3.12)$$

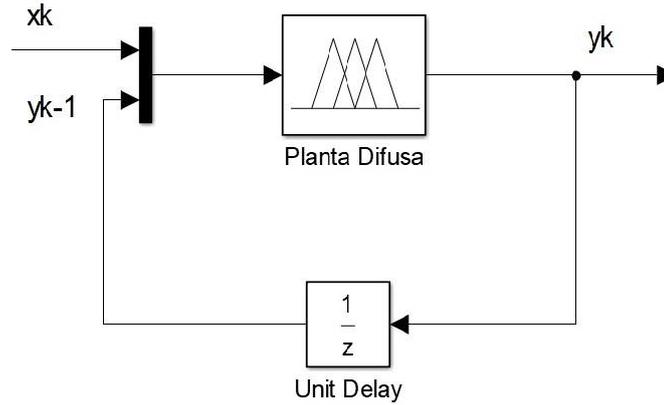
Mediante la ecuación en diferencias 3.12 se observa las entradas y salida del sistema, las mismas que serán utilizadas para el modelo difuso, definiéndolas de la siguiente manera:

$y_k$  = Temperatura en el tiempo actual

$y_{k-1}$  = Temperatura anterior

$x_k$  = Porcentaje de Regulación de la Válvula de Control del quemador.

En base a la ecuación encontrada se plantea la estructura del modelo difuso de la siguiente manera.



**Figura 13-3.** Estructura del Modelo Difuso de la Planta  
Fuente: Ríos Paulina, 2019

Una vez encontrado la estructura de la planta difusa, se definen los universos de discurso de las entradas las mismas que serán fusificadas. Las funciones de pertenencias son de forma triangular que cumplen con la ley de solapamiento. La ley de solapamiento permite que en un instante solo dos funciones de pertenencia se encuentren activadas e influyan para calcular el valor nítido.

El número de reglas del sistema se definen mediante el producto del número de FP de cada una de las entradas.

Para encontrar los singletones o consecuentes de las reglas se parte de la ecuación 3.12, que es la salida del modelo y se reemplaza los valores de  $a$  y  $b$ , obteniendo:

$$y_k = \frac{K\tau}{(\tau + T)} x_k + \frac{\tau}{(\tau + T)} y_{k-1} \quad (3.13)$$

Mediante la ecuación anterior los singletones iniciales se calcula a partir de:

$$\beta_{ij} = \frac{K\tau}{(\tau + T)} X_i + \frac{\tau}{(\tau + T)} Y'_j \quad (3.14)$$

Dónde:  $X_i$ = Valor del universo de Discurso del Quemador cuando el  $\mu_A(X_i) = 1$  y  $Y'_j$ = Valor del universo de Discurso de la Temperatura Anterior cuando el  $\mu_B(Y_j) = 1$ , de las  $i,j$ -ésimas reglas y  $A,B$  son los conjuntos difusos

La salida de temperatura se calcula a partir de :

$$y = \sum_{i,j=1}^{n,m} \varphi_{ij} \cdot \beta_{ij} \quad (3.15)$$

Dónde  $\varphi_{ij}$  depende de las señales del Quemador y de la Temperatura Anterior, expresadas en:

$$\varphi_{ij}(x_k, y_{k-1}) = \mu_{A_i}(x_k) \cdot \mu_{B_j}(y_{k-1}) \quad (3.16)$$

### 3.5.1. Optimización de la Identificación de la Planta Difusa

Una vez obtenido el modelo difuso se optimiza los consecuentes de las reglas. En éste caso los singletones.

Para ello se utiliza el algoritmo de los Mínimos Cuadrados Recursivos presentados en el capítulo anterior, ecuaciones 2.20 y 2.21.

En éste algoritmo se itera recursivamente, hasta los  $N$  datos que se adquirieron.

Se requiere de un vector  $P$  donde se guardan y actualizan los singletones optimizados del modelo,  $y$  es la matriz con los grados de pertenencia de cada una de las reglas, y  $y$  contiene los datos reales adquiridos.

El punto de inicio del algoritmo son los singletones encontrados a partir del modelo de la planta convencional. El algoritmo se ha desarrollado en un archivo .m de Matlab.

### 3.6. Diseño del Controlador Convencional

Después de identificar el sistema de orden reducido teórico de la planta, se calcula los parámetros para el controlador PI+D, a través del diseño de un polinomio de asignación de polos que considere el desempeño deseado al cerrar el lazo de control.

Para el mismo, se establecen las características temporales:

- Tiempo de Asentamiento:

$$t_{ss} = \frac{4}{\xi W_n} \quad (3.17)$$

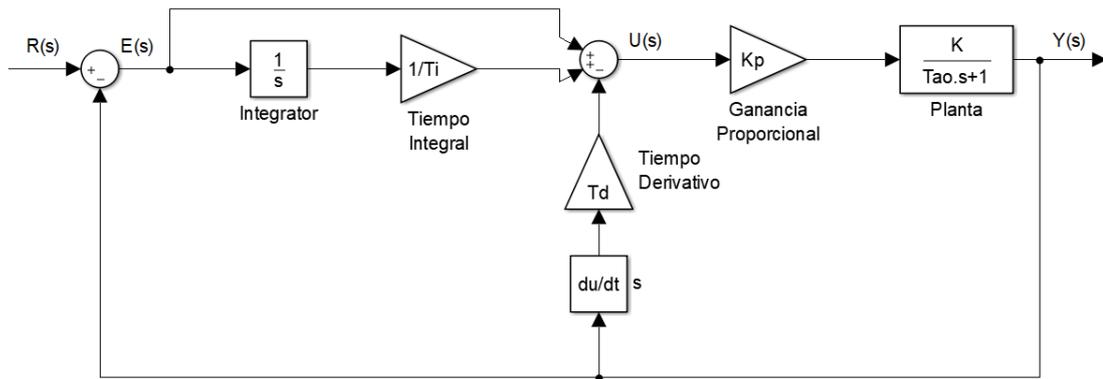
- Sobreelongación

$$M_p = e^{-\xi\pi / \sqrt{1-\xi^2}} \quad (3.18)$$

Dónde el Factor de Amortiguamiento  $\xi$  se encuentra dado por:

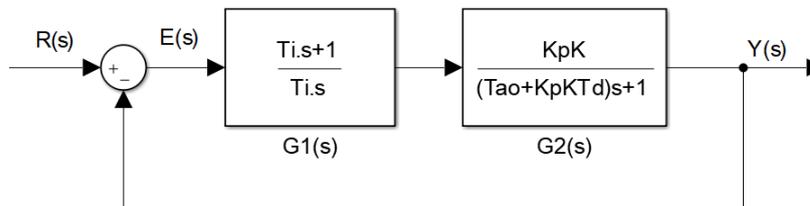
$$\xi = \frac{|\ln(M_p)|}{\sqrt{\pi^2 + \ln^2(M_p)}} \quad (3.19)$$

La estructura del controlador PI+D es:



**Figura 14-3.** Estructura Controlador PI+D no interactuante  
Fuente: Ríos Paulina, 2019

Para aplicar éste método de sintonización se utiliza la estructura del PID convencional no interactuante. Mediante la reducción de bloques del diagrama, se obtiene la función de transferencia del controlador en lazo cerrado con la planta.



**Figura 15-3.** Reducción de Bloques Controlador y Planta  
Fuente: Ríos Paulina, 2019

La función de transferencia en lazo cerrado queda expresado en:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{(T_i s + 1)(K_p K)}{T_i s(\tau s + 1 + K_p K T_d s) + (T_i s + 1)(K_p K)}$$

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{(T_i s + 1)(K_p K)}{T_i s(\tau s + 1 + K_p K T_d s) + (T_i s + 1)(K_p K)} \quad (3.20)$$

El denominador de la función de la transferencia en lazo cerrado del sistema es el polinomio característico  $P(s)$ .

$$P(s) = T_i \tau s^2 + T_i s + K_p K T_d T_i s^2 + T_i K_p K s + K_p K$$

$$P(s) = s^2(T_i\tau + K_pKT_dT_i) + s(T_i + T_iK_pK) + K_pK = 0 \quad (3.21)$$

La ecuación anterior se iguala a cero para encontrar las equivalencias término a término con respecto al denominador de un sistema de segundo orden.

$$G(s) = \frac{Wn^2}{s^2 + 2\xi Wns + Wn^2} \quad (3.22)$$

Las equivalencias quedan definidas de la siguiente manera y se despejan los tres parámetros del controlador.

Ganancia Proporcional  $K_p$ :

$$\begin{aligned} K_pK &= Wn^2 \\ K_p &= \frac{Wn^2}{K} \end{aligned} \quad (3.23)$$

Tiempo Integral  $T_i$ :

$$\begin{aligned} T_i + T_iK_pK &= 2\xi Wn \\ T_i &= \frac{2\xi Wn}{(1 + K_pK)} \end{aligned} \quad (3.24)$$

Tiempo Derivativo  $T_d$ :

$$\begin{aligned} T_i\tau + K_pKT_dT_i &= 1 \\ T_d &= \frac{1 - T_i\tau}{K_pKT_dT_i} \end{aligned} \quad (3.25)$$

Utilizando las siguientes ecuaciones, se transforma los parámetros encontrados a ganancias  $K_p, K_I, K_D$  del controlador, los mismos que sintonizan correctamente el controlador.

- Ganancia Proporcional:

$$K_p = K_p$$

- Ganancia Integral.

$$K_I = \frac{K_p}{T_i} \quad (3.26)$$

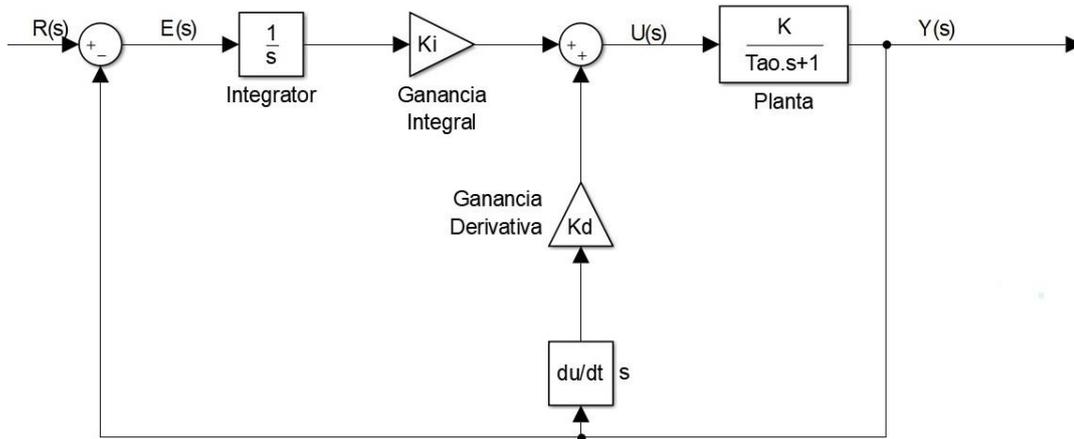
- Ganancia Derivativa

$$K_D = K_pT_d$$

### 3.7. Controlador de Seguimiento de Consigna

El objetivo del controlador diseñado, es el de seguir una Curva de Temperatura variante en el tiempo.

Una vez encontrado las ganancias de sintonización, se parte de la estructura del controlador PI+D convencional en paralelo y representada en el siguiente diagrama de bloques:



**Figura 16-3.** Estructura del Controlador ID en Paralelo

Fuente: Ríos Paulina, 2019

En la sección anterior, la ganancia  $K_p$  es cero, razón por la cual se elimina de la estructura del PI+D, quedando como un controlador tipo ID.

Se plantean las ecuaciones en base a la estructura del controlador para encontrar la función de transferencia de la señal de control  $U(s)$  con respecto al error  $E(s)$

La señal de control es:

$$U(s) = \frac{K_I}{s} E(s) + K_D s Y(s) \quad (3.27)$$

La ganancia de la planta es:

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (3.28)$$

Se despeja  $Y(s)$  de la ecuación.3.28, se reemplaza en 3.27 y se obtiene la ecuación. 3.29

$$U(s) = \frac{K_I}{s} E(s) + K_D s \frac{K}{\tau s + 1} U(s)$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_I/s}{1 - \frac{KK_D s}{\tau s + 1}} \quad (3.29)$$

Como el controlador va ser simulado en Matlab y en la etapa de implementación será programado en PLC, se requiere discretizar mediante el método de Euler la función de transferencia del controlador (Ecuación. 3.29)

Después de operar algebraicamente la ecuación, se obtiene:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_I \frac{(s + 1/\tau)}{s(s(1 - 1/\tau KK_D) + 1/\tau)} \quad (3.30)$$

En la ecuación. 3.30 se reemplaza a la variable  $s$  por ecuación. 3.8, se simplifica algebraicamente y se obtiene la función de transferencia discreta:

$$\frac{U(z)}{E(z)} = \frac{K_I T (1 - z^{-1} + T/\tau)}{(1 - z^{-1})(1 + T/\tau - KK_D/\tau - z^{-1} + KK_D/\tau z^{-1})} \quad (3.31)$$

$$\frac{U(z)}{E(z)} = \frac{-K_I T z^{-1} + K_I T^2/\tau + K_I T}{z^{-2} (1 - KK_D/\tau) + z^{-1} (-2 + 2 KK_D/\tau - T/\tau) + (1 + T/\tau - KK_D/\tau)} \quad (3.31)$$

Mediante 3.31, la ecuación en diferencias queda definida de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} (1 - KK_D/\tau) u_{k-2} + (-2 + 2 KK_D/\tau - T/\tau) u_{k-1} + (1 + T/\tau - KK_D/\tau) u_k = \\ -K_I T e_{k-1} + (K_I T^2/\tau + K_I T) e_k \end{aligned} \quad (3.32)$$

Se despeja la variable  $u_k$  definida como la señal de control en el instante de tiempo

$$u_k = \frac{(K_I T^2/\tau + K_I T) e_k - K_I T e_{k-1} - (-2 + 2 KK_D/\tau - T/\tau) u_{k-1} - (1 - KK_D/\tau) u_{k-2}}{(1 + T/\tau - KK_D/\tau)} \quad (3.33)$$

Para simplificar la ecuación anterior se realiza las siguientes asignaciones de variables:

$$\lambda_1 = \frac{(K_I T^2/\tau + K_I T)}{(1 + T/\tau - KK_D/\tau)} = \frac{K_I T \tau + K_I T^2}{\tau + T - KK_D}$$

$$\lambda_2 = \frac{K_I T}{(1 + T/\tau - KK_D/\tau)} = \frac{K_I T \tau}{\tau + T - KK_D}$$

$$\lambda_3 = \frac{(-2 + 2KK_D/\tau - T/\tau)}{(1 + T/\tau - KK_D/\tau)} = \frac{\tau - KK_D}{\tau + T - KK_D} \quad (3.34)$$

$$\lambda_4 = \frac{1 - KK_D/\tau}{(1 + T/\tau - KK_D/\tau)} = \frac{2KK_D - T - 2\tau}{\tau + T - KK_D}$$

Mediantes las asignaciones anteriores se reduce la ecuación en:

$$u_k = \lambda_1 e_k + \lambda_2 e_{k-1} + \lambda_3 u_{k-1} + \lambda_4 u_{k-2} \quad (3.35)$$

Se observa en la ecuación. 3.35 que la salida controlador  $u_k$  depende de 4 entradas:

$e_k$  =Error en el instante de tiempo

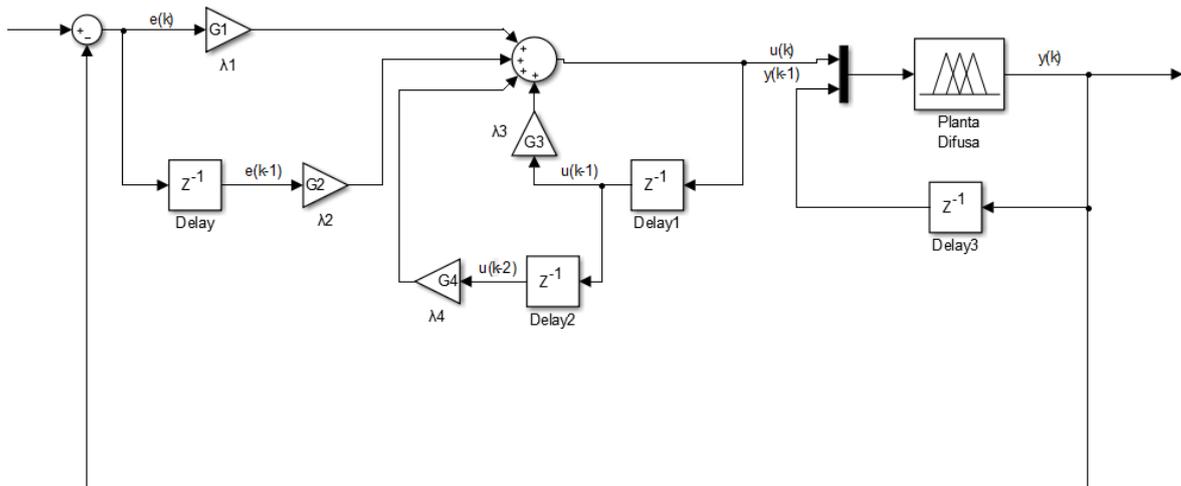
$e_{k-1}$  =Error en tiempo anterior

$u_{k-1}$  =Señal de control el en tiempo anterior

$u_{k-2}$  =Señal de control el en tiempo preanterior

La estructura del controlador discreto y la planta difusa se muestra en la figura. 17-3.

Con la ecuación 3.34 se programa el controlador en un script de Matlab, para que reaccione con la planta difusa obtenida en la sección anterior. Según la respuesta del controlador se modifican las Ganancias  $K_I, K_D$  para mejorar el seguimiento de la Curva de Tratamiento Térmico



**Figura 17-3.** Estructura del Controlador Convencional Discreto y la Planta Difusa.

Fuente: Ríos Paulina, 2019

### 3.8. Diseño del Controlador Difuso.

Una vez sintonizado el controlador convencional de seguimiento de consigna se sintoniza y optimiza el controlador difuso, para evaluar el desempeño de los mismos y compararlos

Tal como y como en el modelo difuso de la planta, se requiere de la función de transferencia discreta y su respectiva ecuación en diferencias 3.35 de la a sección anterior. La misma define la estructura, entradas y salidas del controlador difuso.

En un modelo difuso, el número de entradas es importante, ya que al momento de la fusificación mientras más entradas se tienen, los algoritmos se vuelven más complejos, razón por la cual en la ecuación. 3.35 se agrupa los errores y las señales de control para obtener tan sólo dos variables, de ésta manera:

$$u_k = \lambda_2 \left( \frac{\lambda_1}{\lambda_2} e_k + e_{k-1} \right) + \lambda_3 \left( \frac{\lambda_3}{\lambda_4} u_{k-1} + u_{k-2} \right) \quad (3.36)$$

Se agrupa los términos del error y las señales de control en los diferentes tiempos.

$$\Delta E_k = \left( \frac{\lambda_1}{\lambda_2} e_k + e_{k-1} \right) \quad (3.37)$$

$$\Delta U_k = \left( \frac{\lambda_3}{\lambda_4} u_{k-1} + u_{k-2} \right)$$

La ecuación en diferencias final, que define la estructura del controlador difuso se presenta a continuación y se representa en la figura. 18-3.

$$u_k = \lambda_2 \Delta E_k + \lambda_4 \Delta U_k \quad (3.38)$$

Dónde:

$u_k$ =Señal del Controlador en el instante de tiempo.

$\Delta E_k$ =Variación de la señal del error

$\Delta U_k$ =Variación de la señal de control

$\lambda_2, \lambda_4$ =Valores constantes.

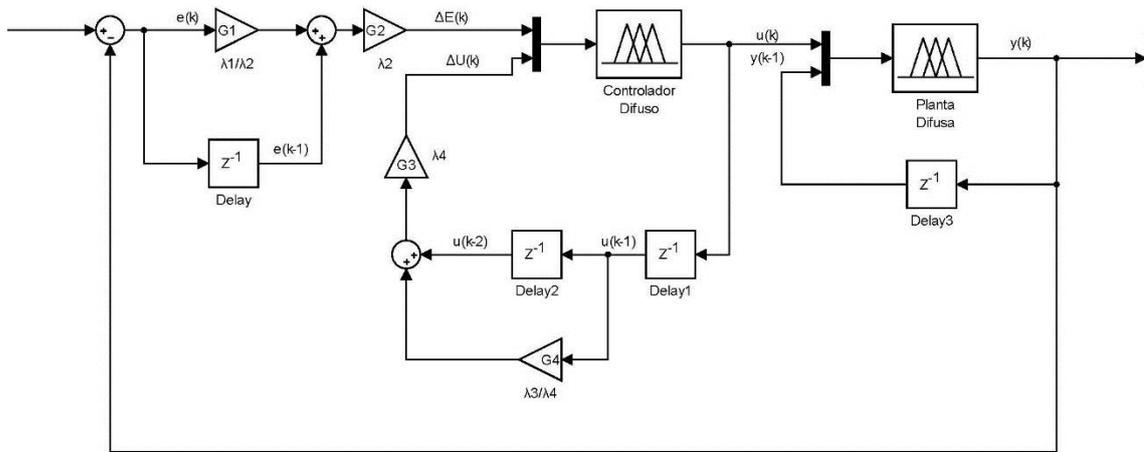
Las funciones de pertenencias de las entradas o antecedentes del controlador son de tipo triangular las mismas que facilitaran los cálculos en el proceso de optimización ya que cumplen con la ley de solapamiento.

El número de reglas del sistema se definen mediante el producto del número de FP de las entradas.

Los consecuentes del controlador, son de tipo singleton o solitario, los cuales son encontrados con la ecuación 3.39.

$$\theta_{pq} = \lambda_2 \Delta E_p + \lambda_4 \Delta U_q \quad (3.39)$$

Dónde:  $E_p$ = Valor del universo de Discurso de la Variación del Error cuando  $\mu_C(E_p) = 1$  y  $U_q$ = Valor del universo de Discurso de la Variación del Controlador cuando el  $\mu_D(U_q) = 1$ , de las p,q-ésimas reglas y  $C, D$  son los conjuntos difusos.



**Figura 18-3.** Estructura del Controlador Difuso TSK.

Fuente: Ríos Paulina, 2019

La salida del controlador difuso es:

$$u = \sum_{p,q=1}^{r,s} \psi_{pq} \cdot \theta_{pq} \quad (3.40)$$

Dónde  $\psi_{pq}$  depende de las señales de la variación del error y variación del quemador, expresadas en:

$$\psi_{pq}(\Delta E_k, \Delta U_k) = \mu_{C_p}(\Delta E_k) \cdot \mu_{D_q}(\Delta U_k) \quad (3.41)$$

### 3.8.1. Optimización del Controlador Difuso TSK

Una vez diseñado el controlador difuso con el Sistema de Inferencia Takagi Sugeno Kang, en donde se obtuvieron los singletons de cada una de las reglas del sistema, se optimizan los mismos mediante el algoritmo del gradiente decreciente.

Dicho algoritmo, evalúa una función de costo que indica como el aprendizaje evoluciona en el proceso de sintonización. La función de costo  $J$  para evaluar el desempeño del controlador difuso TSK, es el error cuadrático medio:

$$J = \frac{1}{2}(y_r - y_d)^2 \quad (3.42)$$

Dónde:

$y_r$ =Valores de la Curva de Tratamiento Térmico (Set Point)

$y_d$ =Valor de temperatura al reaccionar el controlador difuso y la planta difusa.

De la sección anterior se utilizan las ecuaciones 3.14 y 3.15 y se reemplazan en 3.42

$$J = \frac{1}{2} \left[ y_r - \sum_{i,j=1}^{n,m} \mu_{A_i}(x_k) \cdot \mu_{B_j}(y_{k-1}) \cdot \beta_{ij} \right]^2 \quad (3.43)$$

De la ecuación. 3.40 se obtiene el valor de  $x_k$  (señal de control) y se reemplaza en la 3.43 :

$$J = \frac{1}{2} \left[ y_r - \sum_{i,j=1}^{n,m} \mu_{A_i} \left( \sum_{p,q=1}^{r,s} \psi_{pq} \cdot \theta_{pq} \right) \cdot \mu_{B_j}(y_{k-1}) \cdot \beta_{ij} \right]^2 \quad (3.44)$$

$\psi_{pq}$  se reemplaza con la ecuación. 3.41 y se obtiene:

$$J = \frac{1}{2} \left[ y_r - \sum_{i,j=1}^{n,m} \mu_{A_i} \left( \sum_{p,q=1}^{r,s} \mu_{C_p}(\Delta E_k) \cdot \mu_{D_q}(\Delta U_k) \cdot \theta_{pq} \right) \cdot \mu_{B_j}(y_{k-1}) \cdot \beta_{ij} \right]^2 \quad (3.45)$$

Se deriva  $J$  con respecto a  $\theta_{pq}$  que son los singletones del controlador, y se obtiene el gradiente de la función, para de ésta manera iterar el algoritmo de aprendizaje.

$$\begin{aligned} \frac{\partial J}{\partial \theta_{pq}} &= (y_r - y_d) \left[ - \sum_{i,j=1}^{n,m} \mu_{A_i} \left( \sum_{p,q=1}^{r,s} \mu_{C_p}(\Delta E_k) \cdot \mu_{D_q}(\Delta U_k) \right) \cdot \mu_{B_j}(y_{k-1}) \cdot \beta_{ij} \right] \\ \nabla \theta_{pq} &= (y_r - y_d) \left[ - \sum_{i,j=1}^{n,m} \mu_{A_i} \left( \sum_{p,q=1}^{r,s} \mu_{C_p}(\Delta E_k) \cdot \mu_{D_q}(\Delta U_k) \right) \cdot \mu_{B_j}(y_{k-1}) \cdot \beta_{ij} \right] \end{aligned} \quad (3.46)$$

Para disminuir la cantidad de iteraciones se debe utilizar el Gradiente Descendente Conjugado, obteniendo la segunda deriva de la función de costo llamada: dirección del gradiente.

Y está definida por:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 J}{\partial \theta_{pq}^2} &= \left[ y_r - \sum_{i,j=1}^{n,m} \mu_{A_i} \left( \sum_{p,q=1}^{r,s} \mu_{C_p}(\Delta E_k) \cdot \mu_{D_q}(\Delta U_k) \right) \cdot \mu_{B_j}(y_{k-1}) \cdot \beta_{ij} \right] \cdot \\ &\quad \left[ - \sum_{i,j=1}^{n,m} \mu_{A_i} \left( \sum_{p,q=1}^{r,s} \mu_{C_p}(\Delta E_k) \cdot \mu_{D_q}(\Delta U_k) \right) \cdot \mu_{B_j}(y_{k-1}) \cdot \beta_{ij} \right] \\ \nabla^2 \theta_{pq} &= \left[ y_r - \sum_{i,j=1}^{n,m} \mu_{A_i} \left( \sum_{p,q=1}^{r,s} \mu_{C_p}(\Delta E_k) \cdot \mu_{D_q}(\Delta U_k) \right) \cdot \mu_{B_j}(y_{k-1}) \cdot \beta_{ij} \right] \cdot \\ &\quad \left[ - \sum_{i,j=1}^{n,m} \mu_{A_i} \left( \sum_{p,q=1}^{r,s} \mu_{C_p}(\Delta E_k) \cdot \mu_{D_q}(\Delta U_k) \right) \cdot \mu_{B_j}(y_{k-1}) \cdot \beta_{ij} \right] \end{aligned} \quad (3.47)$$

Una vez definida la función de costo para emplear el algoritmo de optimización, se evalúa las épocas de aprendizaje mediante la ecuación 3.48 para determinar la modificación de los singletons del controlador. El algoritmo es programado en archivo .m de Matlab.

$$\theta_{pq+1} = \theta_{pq} - \alpha \nabla \theta_{pq} \cdot \nabla^2 \theta_{pq} \quad (3.48)$$

Dónde:

$\theta_{pq+1}$ =Singletons del controlador optimizados

$\theta_{pq}$ =Singletons del controlador anteriores

$\alpha$ =Valor de Aprendizaje

$\nabla \theta_{pq}$ =Gradiente de la Función de Costo.

$\nabla^2 \theta_{pq}$ = Dirección del Gradiente de la Función de Costo

## CAPÍTULO IV

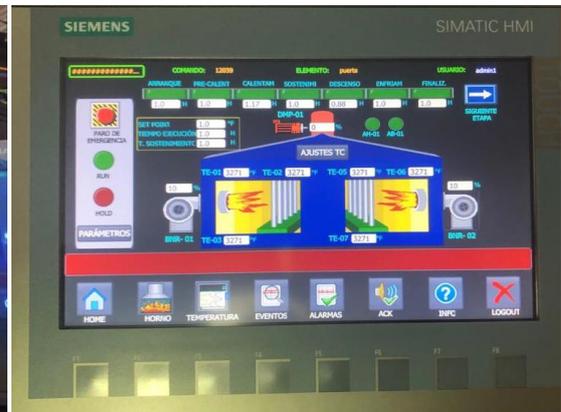
### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. Identificación Convencional de la Planta

El sistema de adquisición de datos implementado para la obtención de los valores de temperatura y quemadores en la prueba al escalón de la planta se muestra a continuación:



**Figura 1-4.** Disposición del PLC implementado  
Fuente: Ríos Paulina, 2019



**Figura 2-4.** HMI implementado  
Fuente: Ríos Paulina, 2019

En el Diagrama de Instrumentación y Tubería P&ID (Anexo A) del horno se muestra que el sistema incluyó, la instalación de válvulas de control de aire/GLP de los quemadores con convertidores I-V, programación del PLC, y diseño de un HMI para la visualización y registro de los datos.

Una vez implementado el sistema, se realizó la prueba al escalón en la planta, obteniendo las temperaturas de las seis juntas soldadas al cuerpo. Como se mencionó en el capítulo anterior cada uno de los quemadores tiene incidencia directa en tres juntas del cuerpo. Por lo tanto se toman los tres valores de temperatura que corresponden al quemador uno.

Los tres valores de temperatura se han promediado para obtener la curva de reacción del sistema de primer orden.

La temperatura se ha estabilizado aproximadamente en 1230 °F con una entrada del 100% de apertura en la válvula de aire/GLP del quemador. Por tanto la ganancia en estado de estable es:

$$K = \frac{1230}{100} = 12.3 \quad (4.1)$$

Se utilizó dos métodos para la encontrar la Constante de Tiempo  $\tau$ . El primero, el método gráfico de Miller, con el que se obtuvo el siguiente resultado.

$$\tau = 2355 \text{ seg} \quad (4.2)$$

Para la optimización del modelo, se utilizó el algoritmo del Gradiente Descendente. El valor de aprendizaje utilizado fue  $\alpha = 0.1$  Los valores del modelo de primero orden optimizados son:

$$K_{opt} = 12.4007241995804 \quad (4.3)$$

$$\tau_{opt} = 1975.09828967136 \text{ seg}$$

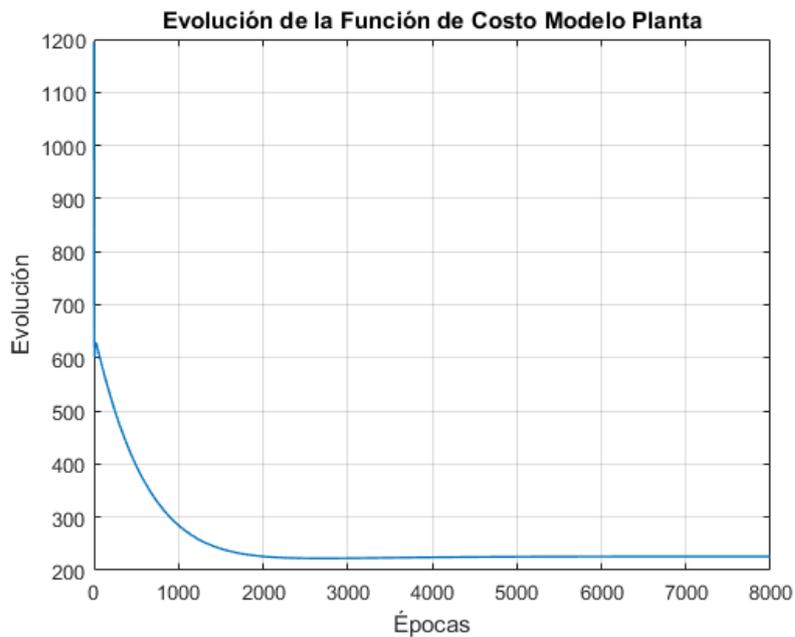
El valor de la función de costo inicial es:

$$J_{planta} = 1579.42211716568 \quad (4.4)$$

Y después de aplicar el algoritmo de optimización la función de costo final es:

$$J_{plantaOp} = 226.132030057421 \quad (4.5)$$

La evolución de la función de costo se muestra en el siguiente gráfico:

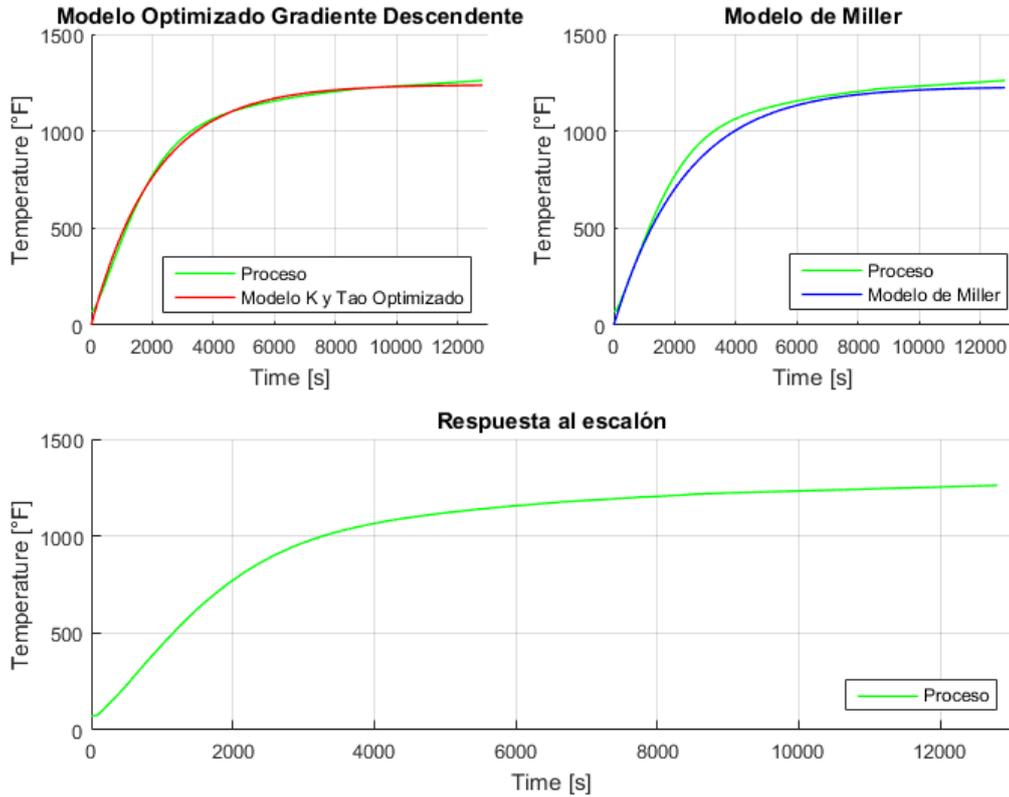


**Gráfico 1-4.** Evolución de Aprendizaje Identificación de la Planta  
Realizado por: Ríos Paulina, 2019

Con los parámetros de la ecuación. 4.3, se obtiene la función de transferencia del sistema de primer orden (Ecuación. 3.1), que representa el modelo de la planta convencional.

$$G_P(s) = \frac{12.4007241995804}{1975.09828967136 s + 1} \quad (4.6)$$

En el siguiente gráfico se observan los modelos obtenidos para la identificación de la planta y la curva de reacción del proceso. El modelo optimizado con gradiente descendente, se acerca mejor a la curva de reacción que el modelo obtenido mediante Miller.



**Gráfico 2-4.** Curva de Reacción del Proceso y Modelos Identificados  
Realizado por: Ríos Paulina, 2019

## 4.2. Identificación Difusa de la Planta

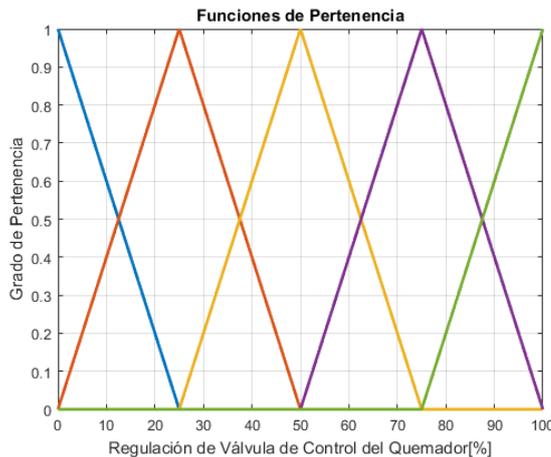
La estructura de la planta difusa quedó definida mediante la discretización de la función de transferencia de primer orden indicado en la ecuación. 4.6. El modelo discreto con tiempo de muestreo  $T = 210$  s, es:

$$G(z) = \frac{1.241331228087302z}{1.100101512467119z - 1} \quad (4.7)$$

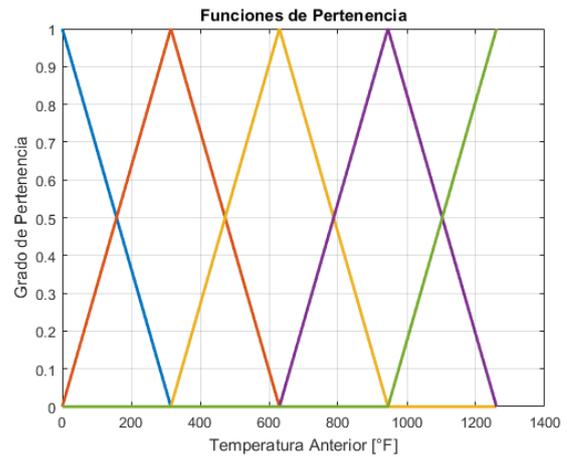
Y la ecuación en diferencias de la planta:

$$y_k = 1.128378803246491x_k + 0.909007022231404y_{k-1} \quad (4.8)$$

Como la ecuación 4.8 indica, las entradas al modelo difuso son  $y_{k-1}$  que es la Temperatura Anterior y  $x_k$  porcentaje de la regulación de la válvula de control del quemador. Para cada una de las entradas se definió el universo de discurso y se dividió con cinco funciones de pertenencia tipo triangular y con solapamiento, como se indican en los gráficos 3-4 y 4-4..



**Gráfico 3-4.** FP de la Regulación de Válvula  
Realizado por: Ríos Paulina, 2019



**Gráfico 4-4.** FP de la Temperatura Anterior  
Realizado por: Ríos Paulina, 2019

El sistema difuso consta de 25 reglas, definido por el número de entradas y sus funciones de pertenencia.

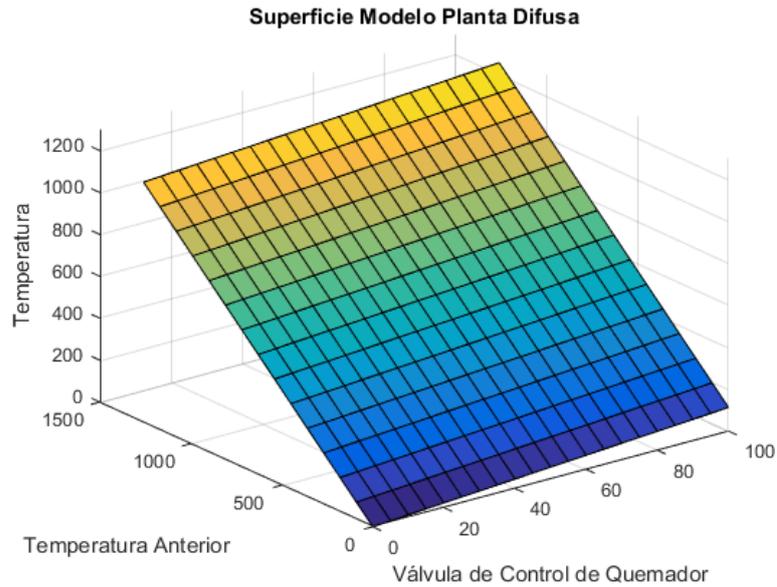
Los consecuentes de las reglas son de tipo singleton los cuales representan la temperatura y fueron obtenidos mediante la ecuación. 3.14. En la siguiente tabla, se presentan los singletons iniciales del modelo difuso de la planta.

**Tabla 1-4.** Singletons Iniciales de la Planta TSK

		Válvula de Control del Quemador				
		FP1	FP2	FP3	FP4	FP5
Temperatura Anterior	FP1	0	286.3372	572.6744	859.0116	1145.3389
	FP2	28.2095	314.5467	600.8839	887.2211	1173.5584
	FP3	56.4189	342.7562	629.0934	915.4306	1201.7678
	FP4	84.6284	370.9656	657.3028	943.6400	1229.9772
	FP5	112.8379	399.1751	685.5123	971.8495	1258.1867

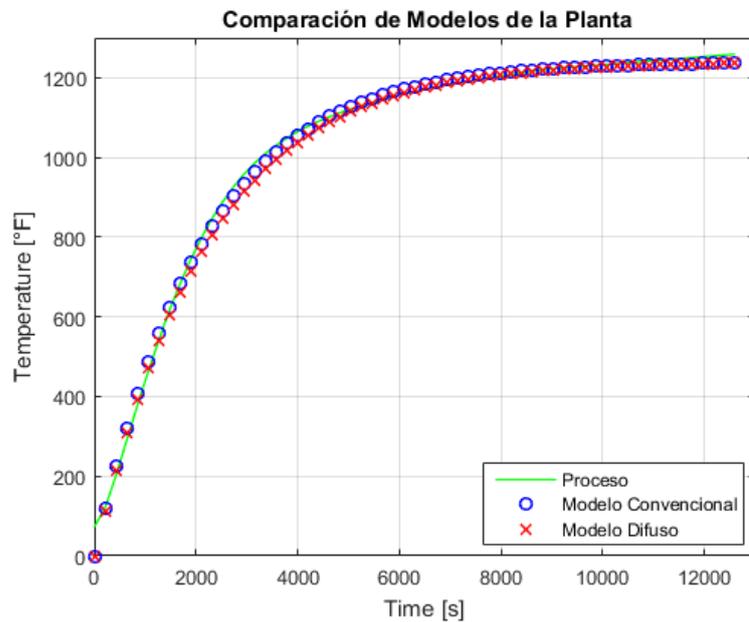
Realizado por: Ríos Paulina, 2019

Una vez fusificadas las entradas del modelo de la planta, se obtienen los grados de pertenencia de cada una de las reglas, se defusifica y se obtienen la salidas. Todos éstos cálculos fueron programados en un archivo .m de Matlab. La superficie del modelo difuso de la planta, se observa en el gráfico 5-4.



**Gráfico 5-4.** Superficie del Modelo de la Planta Difusa  
 Realizado por: Ríos Paulina, 2019

Como es de esperarse, la planta difusa tiene el mismo comportamiento que el modelo de la planta convencional como se observa en el gráfico 6-4, ya que su diseño está basado en los parámetros del modelo del primer orden encontrado.



**Gráfico 6-4.** Comparación Modelos de la Planta  
 Realizado por: Ríos Paulina, 2019

Una vez obtenido el modelo difuso de la planta, se implementó el algoritmo de aprendizaje para la optimización de consecuentes (singletons) de las reglas y mejorar el modelo. Se utilizó Mínimos Cuadrados Recursivos. Los datos de entrenamiento que se utilizaron y que dependen

del Tiempo de Muestreo, fueron 61, de un total de 12806 datos del proceso real. El punto inicio del algoritmo fueron los singletons iniciales de la Tabla 1-4.

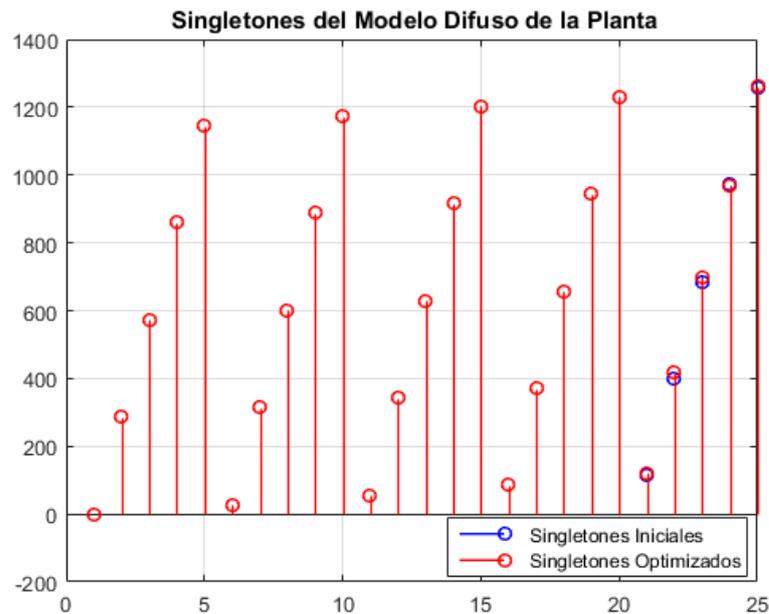
Luego de aplicar el algoritmo de aprendizaje, se observa que los singletons ubicados en las regiones de alta temperatura y apertura de la válvula máxima se modificaron.

**Tabla 2-4.** Singletons Optimizados de la Planta TSK

		Válvula de Control del Quemador				
		FP1	FP2	FP3	FP4	FP5
Temperatura Anterior	FP1	<b>-0.4153</b>	286.3372	572.6744	859.0116	1145.3488
	FP2	28.2095	314.5467	600.8839	887.211	1173.5583
	FP3	56.4189	342.7562	629.0934	915.4306	1201.7677
	FP4	84.6284	370.9656	657.3028	943.6400	1229.9792
	FP5	<b>120.0164</b>	<b>420.0579</b>	<b>700.0852</b>	<b>970.4709</b>	<b>1260.2607</b>

Realizado por: Ríos Paulina, 2019

En el siguiente gráfico, se observa la variación de los singletons del modelo de la planta difusa.



**Gráfico 7-4.** Modificación de los Singletons del Modelo de la Planta

Realizado por: Ríos Paulina, 2019

Como se mencionó anteriormente la modificación de los singletons se da tan sólo en las regiones donde se tienen datos del proceso real, es decir, como la identificación se realizó con una respuesta al 100% de regulación de la válvula de control del quemador, alcanzando el valor de temperatura máximo de la planta, los singletons modificaron a los últimos valores de temperatura la curva de reacción, tal y como se observa en el gráfico 8-4.

Para verificar y comparar los modelos obtenidos es importante calcular la desviación estándar, definida por:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{Y}_i - Y_i)^2} \quad (4.9)$$

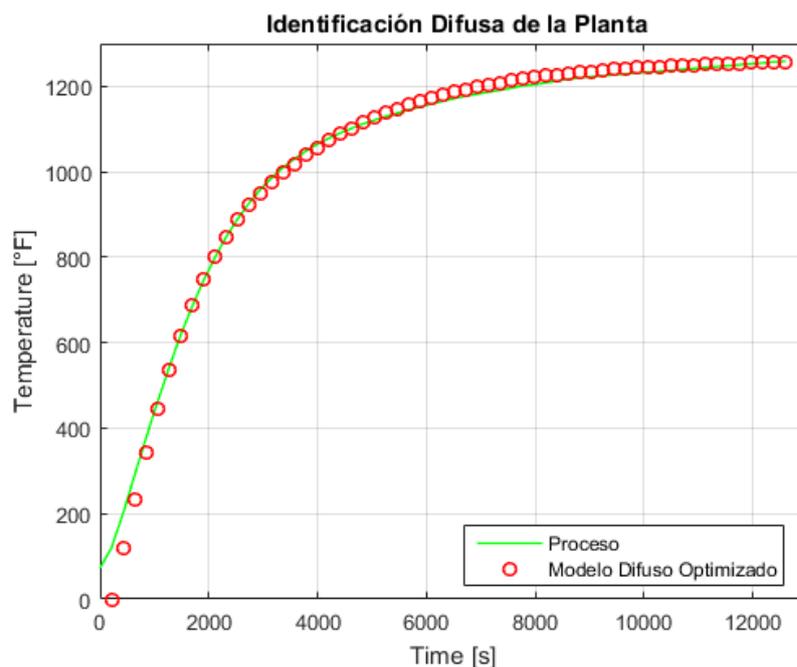
La desviación estándar para el modelo convencional es:

$$\sigma = 0.095985520400243 \quad (4.10)$$

Y para la identificación difusa:

$$\sigma_D = 2.977302781001339e^{-6} \quad (4.11)$$

La desviación estándar para la identificación difusa disminuyó notablemente en comparación a la convencional, por tanto tiene un mejor acercamiento al proceso real y se muestra en el siguiente gráfico.



**Gráfico 8-4.** Identificación Difusa Optimizada de la Planta  
Realizado por: Ríos Paulina, 2019

### 4.3. Diseño del Controlador Convencional

Para el diseño del controlador convencional se utilizó el polinomio característico en lazo cerrado del controlador y la planta, para consecuentemente encontrar su equivalente al denominador de la función de transferencia de un sistema de segundo orden.

Se estableció las características temporales siguientes:

- Tiempo de Asentamiento

$$\begin{aligned} t_{ss} &= 4\tau \\ t_{ss} &= 8391.481599999 \text{ seg} \end{aligned} \quad (4.12)$$

- Sobreelongación

$$\begin{aligned} M_p &= 1\% \\ M_p &= 0.01 \end{aligned} \quad (4.13)$$

Estos parámetros son utilizados para encontrar el factor de amortiguamiento  $\xi$  y la frecuencia natural no amortiguada  $Wn$  para la función de transferencia de un sistema de segundo orden dado por la ecuación 3.22.

El valor de  $\xi$  se encontró mediante la ecuación 3.18 y el valor de  $M_p$ , obteniendo lo siguiente:

$$\xi = 0.826085054613957 \quad (4.14)$$

Despejando la ecuación 3.17 y reemplazando el  $t_{ss}$  y  $\xi$ , se obtuvo la frecuencia natural no amortiguada, como se indica.

$$Wn = 0.0005770275908378471 \quad (4.15)$$

Mediante los parámetros calculados se encuentra la función de transferencia del sistema de segundo orden, la misma queda definida por:

$$G(s) = \frac{3.33e^{-7}}{s^2 + 9.54e^{-4}s + 3.336e^{-7}} \quad (4.16)$$

Con las equivalencias (Ecuaciones. 3.23, 3.24 y 3.25) del polinomio característico y el denominador de la ecuación de transferencia 4.16. , los parámetros del controlador encontrados son los siguientes:

$$\begin{aligned} K_p &= 2.685011299244543e^{-8} \\ T_i &= 9.533474203547277e^{-4} \\ T_d &= -3.150324971828080e^9 \end{aligned} \quad (4.17)$$

Se cambió la estructura del controlador PI+D a tipo paralelo, con las ecuaciones. 3.24. Los valores de las ganancias son:

$$K_P = 2.685011299244543e^{-8} \cong 0$$

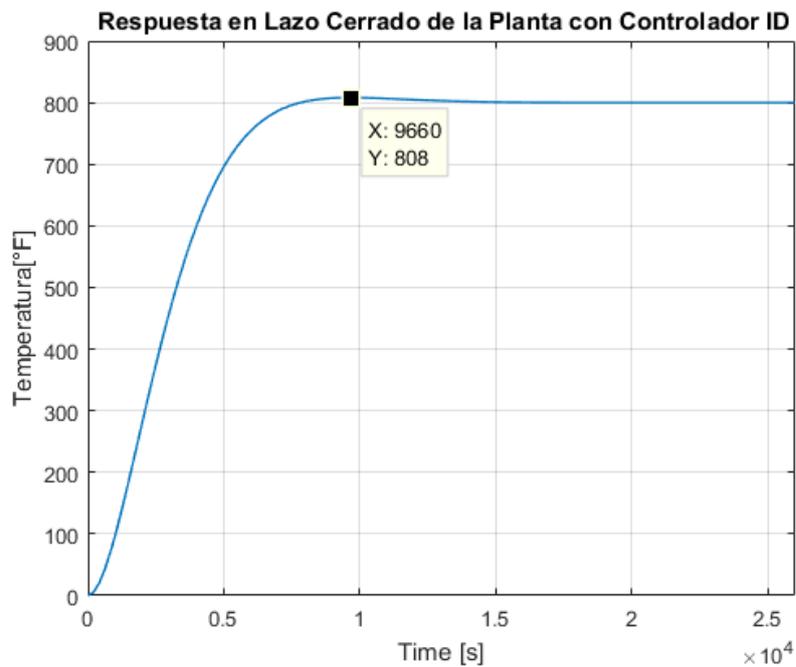
$$K_I = 2.816403801927200e^{-5} \quad (4.18)$$

$$K_D = 84.586581456506408$$

La función de transferencia del controlador y la planta en lazo cerrado es:

$$G_{LC}(s) = \frac{3.174e^{-10}s + 3.33e^{-7}}{s^2 + 0.0009533s + 3.33e^{-7}} \quad (4.19)$$

El control obtenido es de tipo **ID** ya que la ganancia proporcional tiene un valor que tiende a cero, por tanto no tiene ninguna afectación sobre el controlador. La ganancia integral  $K_I$  es el parámetro de sintonización para alcanzar la consigna requerida y aumentar la velocidad de respuesta, mientras que la ganancia derivativa  $K_D$  se encarga de la estabilidad del sistema.



**Gráfico 9-4.** Respuesta en Lazo Cerrado del Controlador ID  
Realizado por: Ríos Paulina, 2019

Se observa en el gráfico anterior que la respuesta del Controlador ID y la planta a un set point de 800 °F. El controlador alcanza el set cumpliendo con el  $M_p$  establecido.

#### 4.4. Controlador Seguimiento de Consigna

El objetivo del controlador ID es el **seguimiento de consigna** de la curva de tratamiento térmico descrita en la tabla 1-3.

Para ello, se requirió de la programación y simulación en el software Matlab del controlador diseñado con la planta difusa.

Con la simulación del controlador, se pudo evidenciar el seguimiento de temperatura.

Se sintonizó el controlador ID, modificando manualmente sus ganancias, y a la vez verificando que la salida del controlador no se sature. Los nuevos valores encontrados son:

$$\begin{aligned} K_I &= 6.196088364239840e^{-5} \\ K_D &= 134.4926645158452 \end{aligned} \tag{4.20}$$

De los valores de sintonización en el apartado anterior, se incrementó el efecto integral para que alcance los valores de temperatura deseados y también el efecto derivativo para eliminar los sobre impulsos en la respuesta generados por  $K_I$  . Dichos valores encontrados son los máximos permitidos para éste controlador , evitando la saturación del mismo y daño en los actuadores.

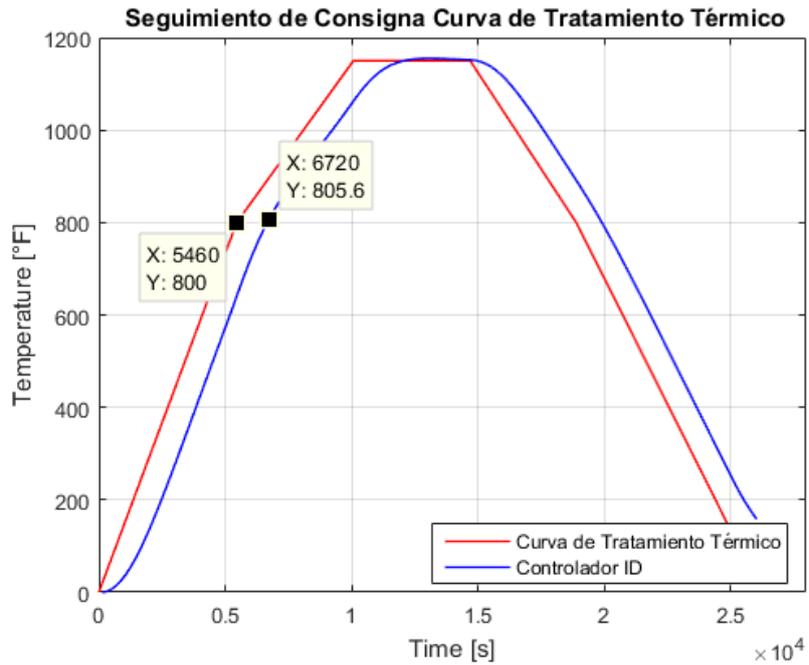
Los valores de landa encontrados mediante la ecuación. 3.34 y que dependen de los parámetros del modelo de primer orden  $K, \tau$ , las ganancias de sintonización del controlador  $K_I, K_D$ , y el tiempo de muestreo  $T = 210$  s, son:

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= 0.046916426094189 \\ \lambda_2 &= -0.042647360777619 \\ \lambda_3 &= 1.671907802716536 \\ \lambda_4 &= -0.671907802716536 \end{aligned} \tag{4.21}$$

Reemplazando los valores de la ecuación 4.21 en 3.35 , se obtiene:

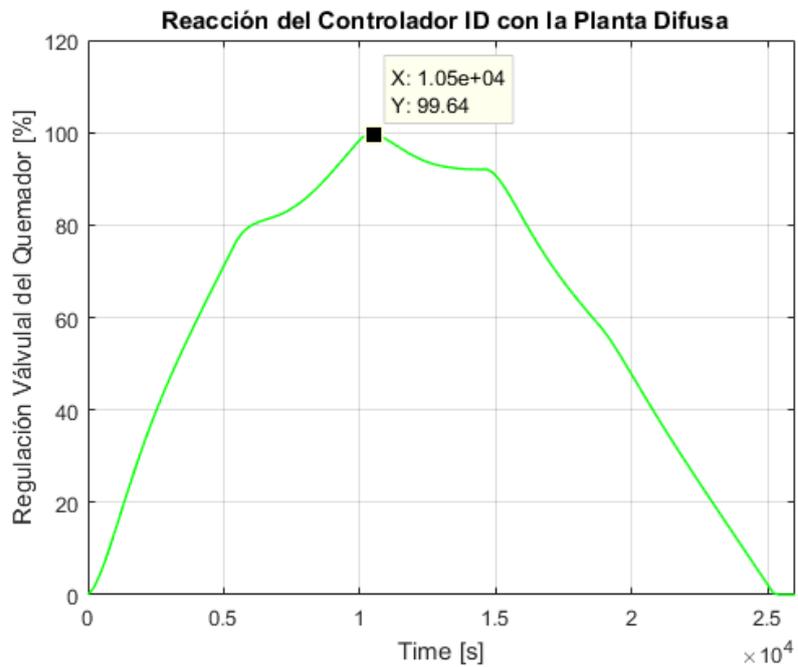
$$u_k = 0.0470e_k - 0.0427e_{k-1} + 1.672u_{k-1} - 0.6719u_{k-2} \tag{4.22}$$

Con los valores recalculados, la respuesta del controlador ID con la planta convencional, sigue la curva de tratamiento térmico definida en cada una de sus etapas cumpliendo con las velocidades y tiempos establecidos, como se observa en el gráfico 10-4.



**Gráfico 10-4.** Seguimiento Consigna Curva de TT  
 Realizado por: Ríos Paulina, 2019

El controlador diseñado entrega una señal de control realizable en el rango de la válvula de control del quemador, tal como se muestra en el siguiente gráfico. El valor máximo es el 99.64% .



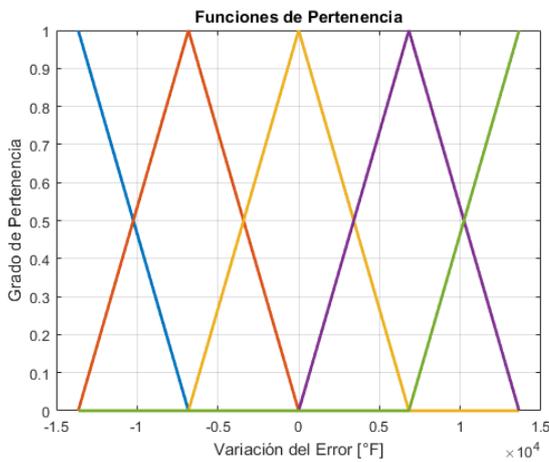
**Gráfico 11-4.** Reacción de Controlador ID con la Planta Difusa  
 Realizado por: Ríos Paulina, 2019

#### 4.5. Diseño del Controlador Difuso TSK

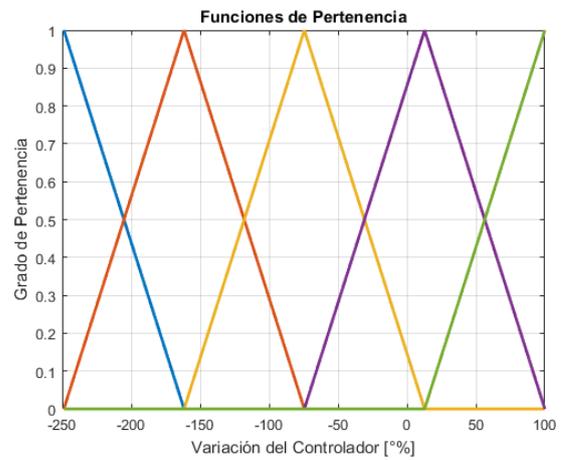
El controlador difuso se diseñó a partir de la simulación del controlador ID discreto y la ecuación en diferencias 3.36. El sistema de inferencia utilizado es el de Sugeno o Takagi Sugeno Kang de orden cero.

Las entradas al controlador difuso son la variación del error y la variación de la señal de control. La salida es la señal de control en el instante de tiempo.

El universo de discurso de cada una de las entradas a ser fusificadas se definió mediante la simulación del controlador convencional discreto. En los gráficos 12-4 y 13-4 se observan sus valores y las funciones de pertenencia.



**Gráfico 12-4.** FP Variación del Error  
Realizado por: Ríos Paulina, 2019



**Gráfico 13-4.** FP Variación del Controlador  
Realizado por: Ríos Paulina, 2019

Se definieron cinco de funciones de pertenencia tipo triangular que cumplen la ley de solapamiento para cada entrada del controlador TSK. Las reglas del sistema difuso son 25. Con ello, se minimizó el costo computacional que requiere el algoritmo de optimización.

Los singletons iniciales o consecuentes de las reglas se encontraron mediante la ecuación. 3.39, y se indican en la Tabla 3-4.

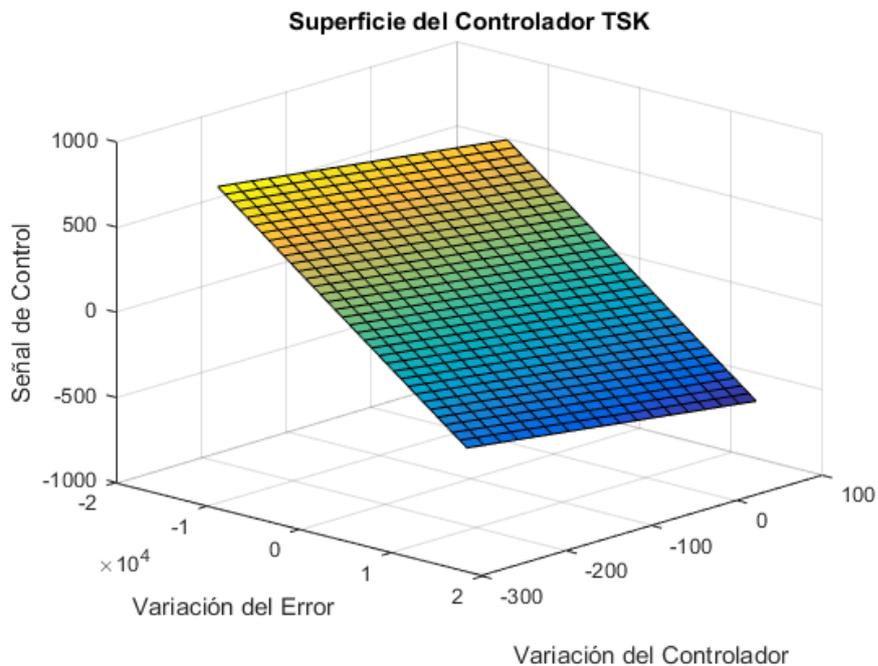
La salida nítida del controlador o defusificada se calcula mediante la ecuación. 3.40. La respuesta del controlador TSK es idéntica a la del convencional, esto se debe a que el diseño del controlador difuso se basa en el control convencional.

**Tabla 3-4.** Singletones Iniciales del Controlador TSK

		Variación del Error				
		FP1	FP2	FP3	FP4	FP5
Variación del Controlador	FP1	748.9884	690.3930	631.7977	573.2023	514.6069
	FP2	458.0896	399.4942	340.8988	282.3034	223.7080
	FP3	167.1908	108.5954	50.0000	-8.5954	-67.1908
	FP4	-123.7080	-182.3034	-240.8988	-299.4942	-358.0896
	FP5	-414.6069	-473.2023	-531.7977	-590.3930	-648.9884

Realizado por: Ríos Paulina, 2019

La superficie del controlador TSK es plana en razón de que el controlador es de tipo lineal y se observa en el siguiente gráfico.



**Gráfico 14-4.** Superficie del Controlador Lineal TSK

Realizado por: Ríos Paulina, 2019

Para que la respuesta del control difuso sea superior a la del convencional se optimiza los consecuentes de las reglas (singletones).

#### 4.6. Optimización del Controlador Difuso TSK

Una vez programado el algoritmo de Gradiente Descendente en Matlab, para la optimización de los consecuentes de las reglas, se obtuvo los nuevos valores de los singletones como se muestra la siguiente tabla:

**Tabla 4-4.** Singletones Optimizados del Controlador TSK

		Variación del Error				
		FP1	FP2	FP3	FP4	FP5
Variación del Controlador	FP1	748.9884	690.3930	631.7977	573.2023	514.6069
	FP2	458.0896	<b>2655.1274</b>	<b>3482.7209</b>	<b>353.4964</b>	223.7080
	FP3	167.1908	<b>110.1294</b>	<b>50.5570</b>	<b>-10.5127</b>	-67.1908
	FP4	-123.7080	<b>-4973.4768</b>	<b>-6344.0090</b>	<b>-362.8041</b>	-358.0896
	FP5	-414.6069	-473.2023	-531.7977	-590.3930	-648.9884

Realizado por: Ríos Paulina, 2019

El punto de inicio del algoritmo son los 25 singletones obtenidos con la ecuación. 3.39. El valor inicial de la función de costo definida es: (4.23)

$$J = 1304.008698812647$$

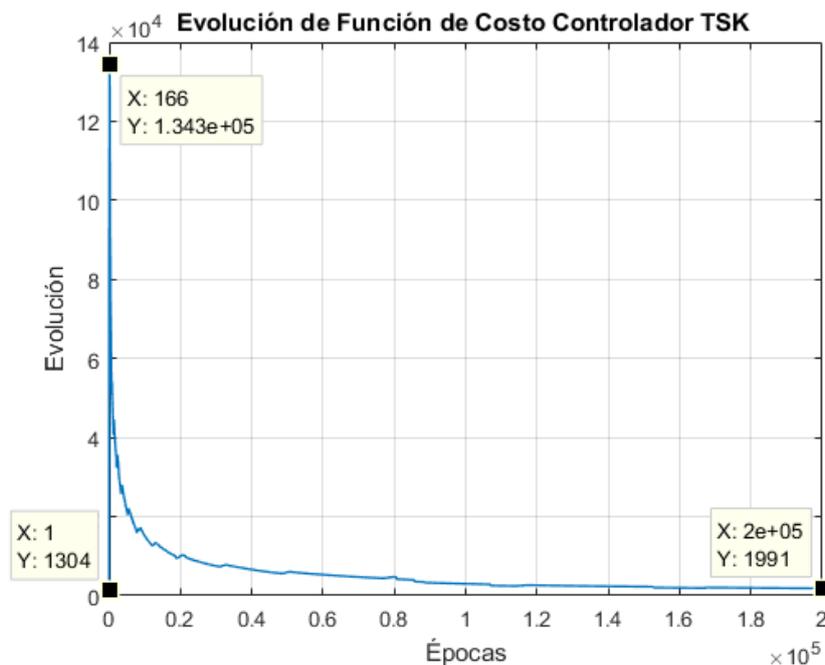
Pero mientras el algoritmo de aprendizaje se ejecuta, en las primeras 166 iteraciones la función de costo empieza a incrementar hasta un valor de:

$$J_{1166} = 134253.56280e^4 \quad (4.24)$$

A partir de dicha iteración, la función de costo desciende hasta las 200000 iteraciones y llega a un valor de:

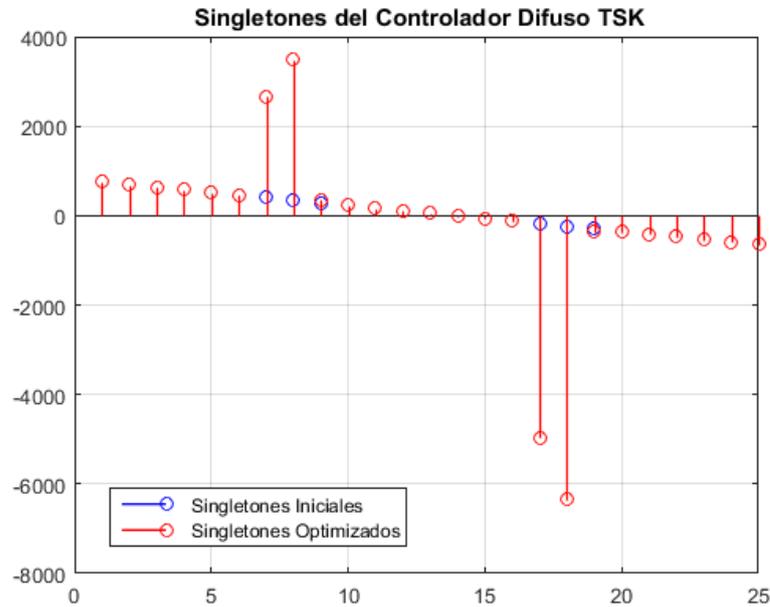
$$J_{op} = 1961.488335210303 \quad (4.25)$$

La evolución de la función de costo se observa en el gráfico 15-4.



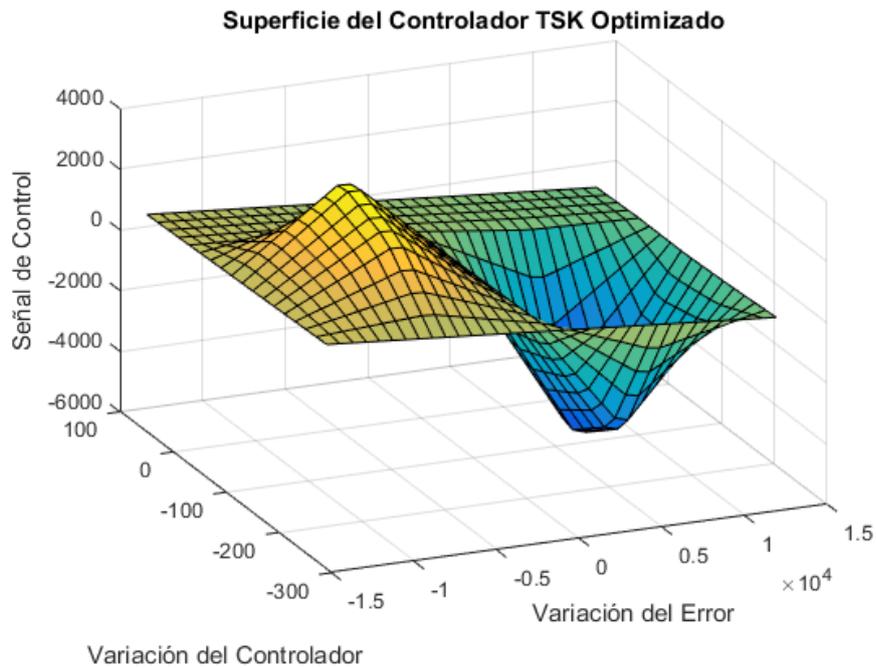
**Gráfico 15-4.** Evolución de Aprendizaje Controlador TSK  
Realizado por: Ríos Paulina, 2019

Se observa en el gráfico. 16-4 que los singletons de las reglas del controlador difuso modificados son los que se encuentran en la zona central.



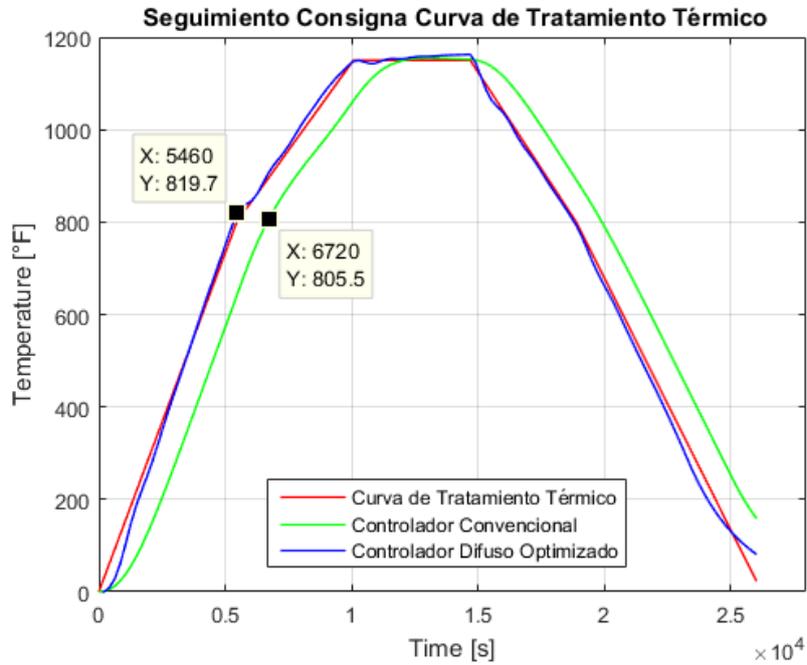
**Gráfico 16-4.** Variación de los Singletones del Controlador TSK  
Realizado por: Ríos Paulina, 2019

En el gráfico 17-4 se observa que con la modificación de los singletones, la superficie de control también fue modificada, ya que presenta no linealidades en su superficie.



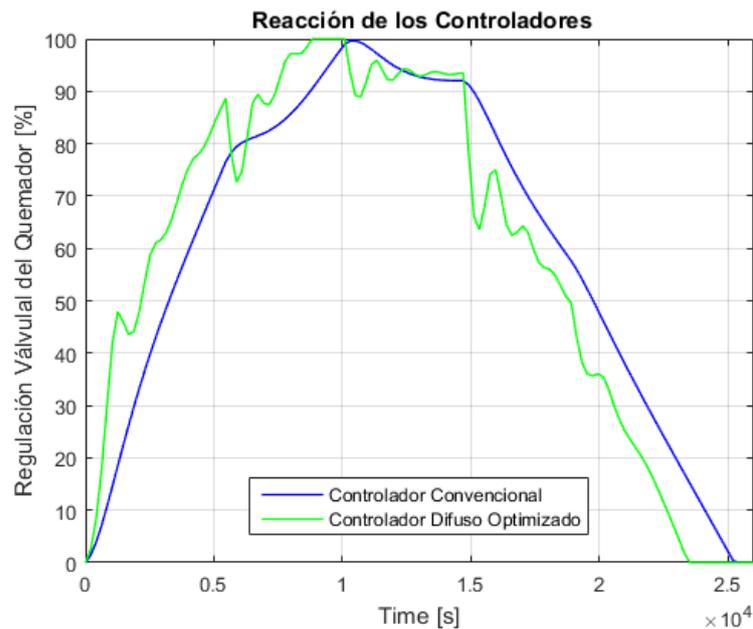
**Gráfico 17-4.** Superficie de Control TSK no lineal  
Realizado por: Ríos Paulina, 2019

Con el controlador difuso optimizado, el seguimiento de la curva de temperatura es superior al convencional en las etapas del proceso, cumpliendo con los tiempos y velocidades requeridos. El gráfico 18-4 se muestra la comparación del seguimiento de los controladores diseñados.



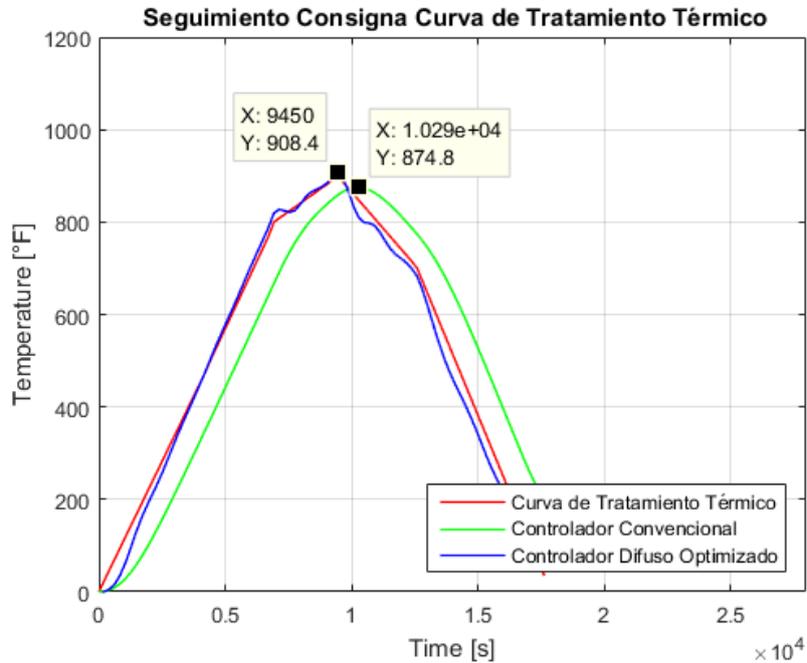
**Gráfico 18-4.** Comparación de Controladores para Seguimiento de Curva TT  
Realizado por: Ríos Paulina, 2019

En el gráfico 19-4 se observa que la reacción de los controladores es realizable, pero el controlador difuso presenta cambios de mayor velocidad en comparación al convencional.



**Gráfico 19-4.** Comparación de la Reacción de los Controladores ID y TSK  
Realizado por: Ríos Paulina, 2019

También en el gráfico 20-4 se observa que mediante el aprendizaje, el controlador difuso TSK, es capaz de seguir cualquier curva de temperatura en diferentes tiempos a diferencia del controlador convencional, que no llega a la temperatura deseada.



**Gráfico 20-4.** Seguimiento de Curva de TT-Diferentes Valores  
**Realizado por:** Ríos Paulina, 2019

#### 4.7. Análisis de Resultados para diferentes Curvas de Tratamiento Térmico.

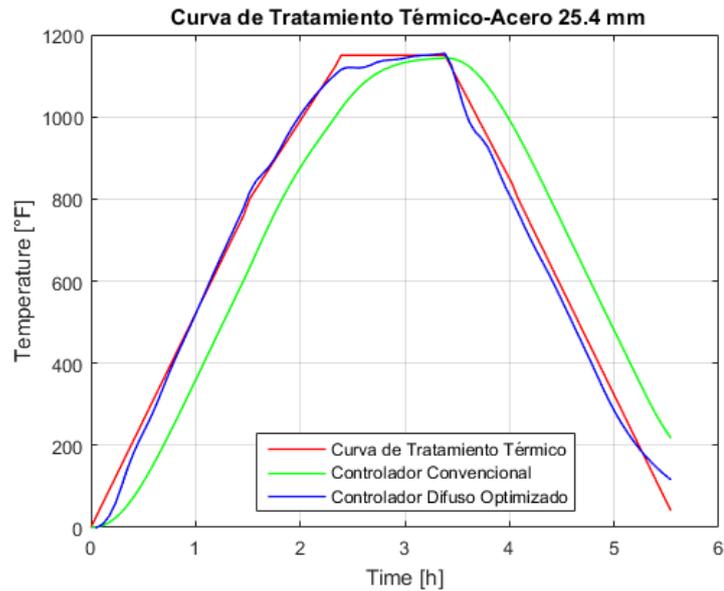
Se ingresaron curvas de tratamiento térmico de diferentes espesores de acero para verificar y evaluar el comportamiento de los controladores. Es importante mencionar que las curvas de tratamiento térmico después de un proceso de soldadura, tan sólo varía el tiempo en cada una de las etapas, más no los valores temperatura.

Se analizaron los tiempos que demoran en las etapas del proceso, obteniendo al final el tiempo total de ejecución con los controladores. Se analizan tanto los controladores estudiados, así como también el controlador manual que se utiliza al momento en el horno. Los resultados se observan a continuación.

**CURVA TT 1: PUERTA DE LIMPIEZA DE ACERO EN A-36 DE UN TANQUE 16K BBLs.**  
**ESPEJOR DEL ACERO: 25.4 mm**

El seguimiento de temperatura de los diferentes controladores se muestra en la gráfica 21-4. Se observa que el controlador difuso TSK presenta una mayor velocidad de seguimiento de temperatura en comparación al controlador convencional. El controlador ID presenta en la etapa

de sostenimiento valores de temperatura inferiores a los requeridos pero son aceptados ya que el procedimiento permite una tolerancia  $\pm 50$  °F.



**Gráfico 21-4.** Curva Tratamiento Térmico-Acero 25.4 mm  
Realizado por: Ríos Paulina, 2019

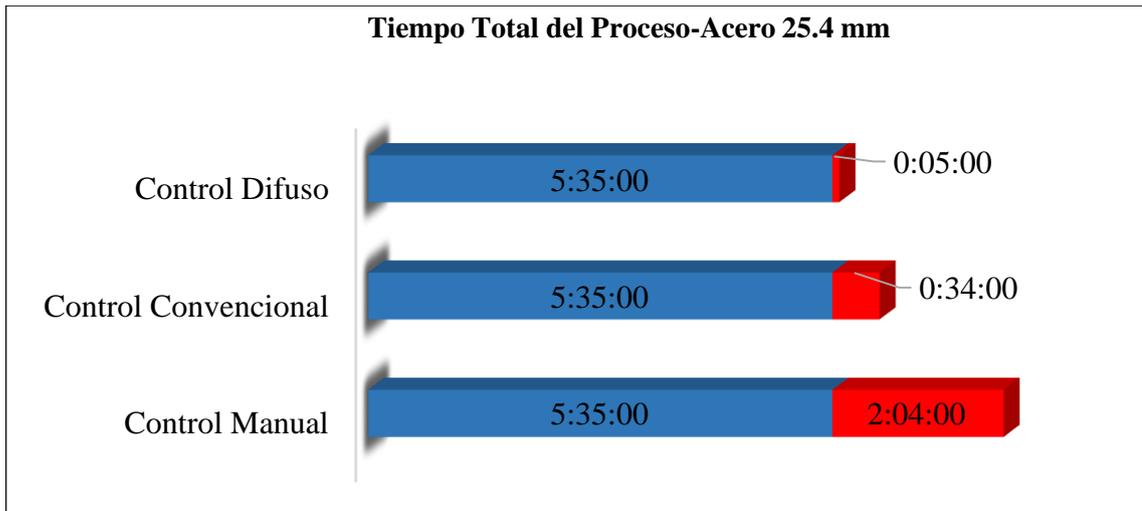
En la siguiente tabla, se muestra el tiempo de las etapas del proceso de los controladores diseñados y el control manual.

**Tabla 5-4.** Tiempos de Proceso de los Controladores para Acero de 25.4 mm

	Curva TT Requerida	Control Manual	Controlador ID Convencional	Controlador Difuso TSK
ETAPAS	Tiempo [h]	Tiempo [h]	Tiempo [h]	Tiempo [h]
Pre calentamiento	1.5	2	1.87	1.52
Calentamiento	0.87	1.7	0.88	0.88
Sostenimiento	1.02	1	0.99	0.99
Enfriamiento	0.7	0.95	0.79	0.74
Finalización	1.5	2	1.63	1.52
<b>Tiempo Total</b>	<b>5.58 h</b>	<b>7.65 h</b>	<b>6.15 h</b>	<b>5.64 h</b>
	<b>5h35min</b>	<b>7h38min</b>	<b>6h09min</b>	<b>5h39min</b>

Realizado por: Ríos Paulina, 2019

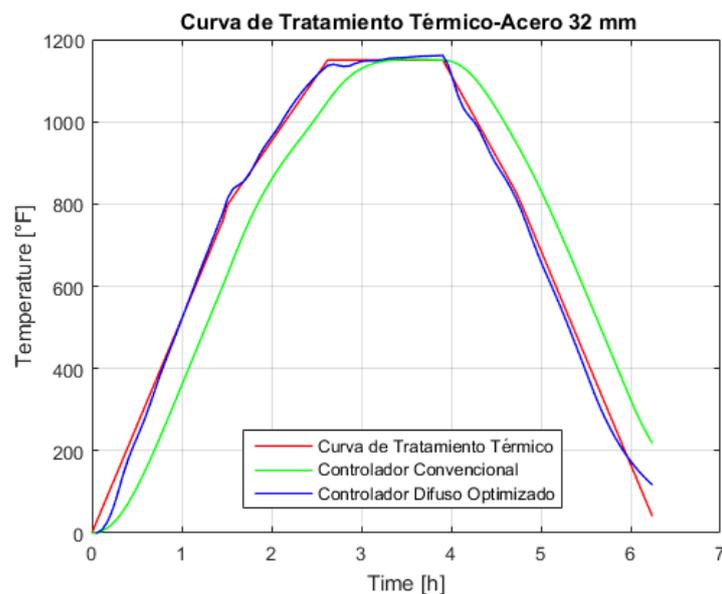
El tiempo teórico requerido para el proceso es de 5 horas 35 minutos. Es evidente que el control manual es el que más tiempo requiere para la ejecución del proceso. Los controladores diseñados demoran aproximadamente entre 5 y 30 minutos más. Los resultados se presentan en el siguiente gráfico.



**Gráfico 22-4.** Comparación de Tiempos de Proceso de los Controladores-Acero 25.4 mm  
 Realizado por: Ríos Paulina, 2019

**CURVA TT 2: PUERTA DE LIMPIEZA DE ACERO EN A-36 DE UN TANQUE 8000 BBLs-  
 ESPESOR DEL ACERO 32 mm**

A continuación se ingresan los valores de temperatura y los tiempos requeridos para el tratamiento térmico de un acero de espesor de 32 mm. En la gráfica 23-4 se observa que el seguimiento de temperatura del controlador difuso TSK es más fino en comparación al controlador convencional.



**Gráfico 23-4.** Curva Tratamiento Térmico-Acero 32 mm  
 Realizado por: Ríos Paulina, 2019

Los tiempos que utiliza cada controlador en las etapas del proceso se observa en la Tabla 6-4.

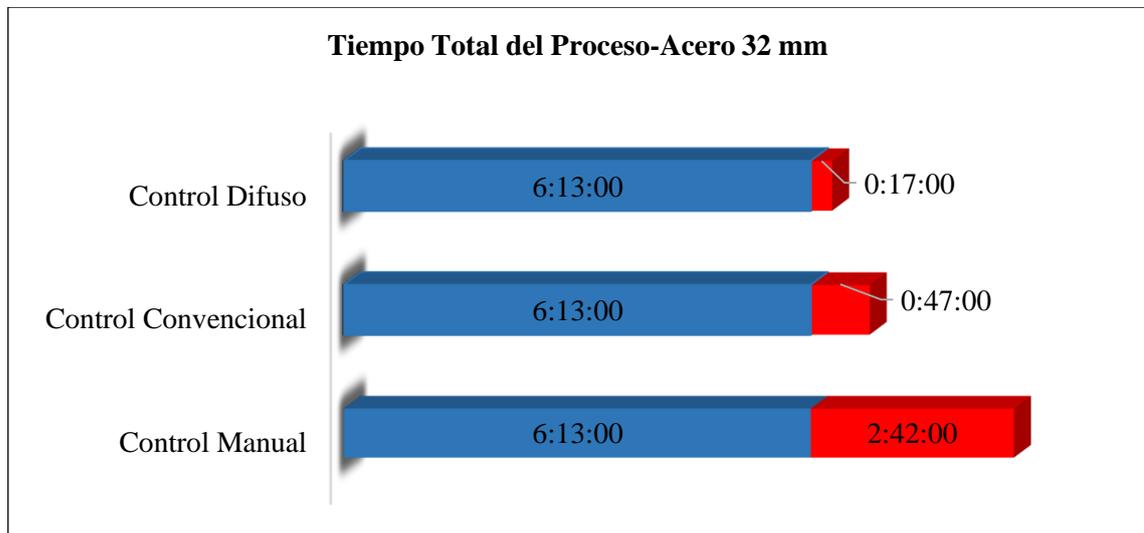
**Tabla 6-4.** Tiempos de Proceso de los Controladores para Acero 32 mm

	<b>Curva TT Requerida</b>	<b>Control Manual</b>	<b>Controlador ID Convencional</b>	<b>Controlador Difuso TSK</b>
<b>ETAPAS</b>	<b>Tiempo [h]</b>	<b>Tiempo [h]</b>	<b>Tiempo [h]</b>	<b>Tiempo [h]</b>
Pre calentamiento	1.5	2	1.87	1.52
Calentamiento	1.08	2.41	0.99	1.17
Sostenimiento	1.26	1.27	1.40	1.23
Enfriamiento	0.88	1.23	0.82	0.88
Finalización	1.5	2	1.93	1.72
<b>Tiempo Total</b>	<b>6.22 h</b>	<b>8.91 h</b>	<b>7 h</b>	<b>6.5 h</b>
	<b>6h14min</b>	<b>8h55min</b>	<b>7h00min</b>	<b>6h30min</b>

Realizado por: Ríos Paulina, 2019

La comparación de los tiempos que utilizan los controladores diseñados se muestran en el gráfico 24-4. El tiempo requerido del proceso es de 6 horas y 13 minutos. El menor tiempo adicional al tiempo de proceso corresponde al controlador difuso, con tan solo 17 minutos.

Es notable que el control manual toma el mayor tiempo con alrededor 3 horas más adicional al tiempo de proceso, consumiendo de ésta manera mayor recursos de la empresa y mano de obra.



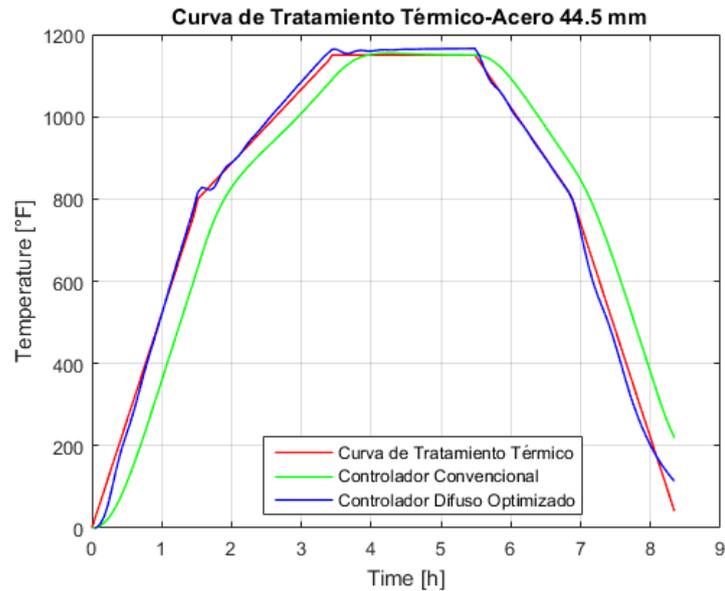
**Gráfico 24-4.** Comparación de Tiempos de Proceso de los Controladores-Acero 32 mm

Realizado por: Ríos Paulina, 2019

**CURVA TT 3:** PUERTA DE LIMPIEZA DE ACERO EN A-36 DE UN TANQUE 11000 BBLs- ESPESOR DEL ACERO 44.45 mm

A continuación se simula el tratamiento térmico para un acero de mayor espesor a los análisis anteriores. El espesor del acero corresponde a 44.45 mm.

Se observa en el gráfico 25-4 que los controladores diseñados tienen una regulación de la temperatura de acuerdo al procedimiento. En razón de que el espesor del acero es grande el tiempo de operación del proceso aumenta.



**Gráfico 25-4.** Curva Tratamiento Térmico-Acero 44.5 mm.  
Realizado por: Ríos Paulina, 2019

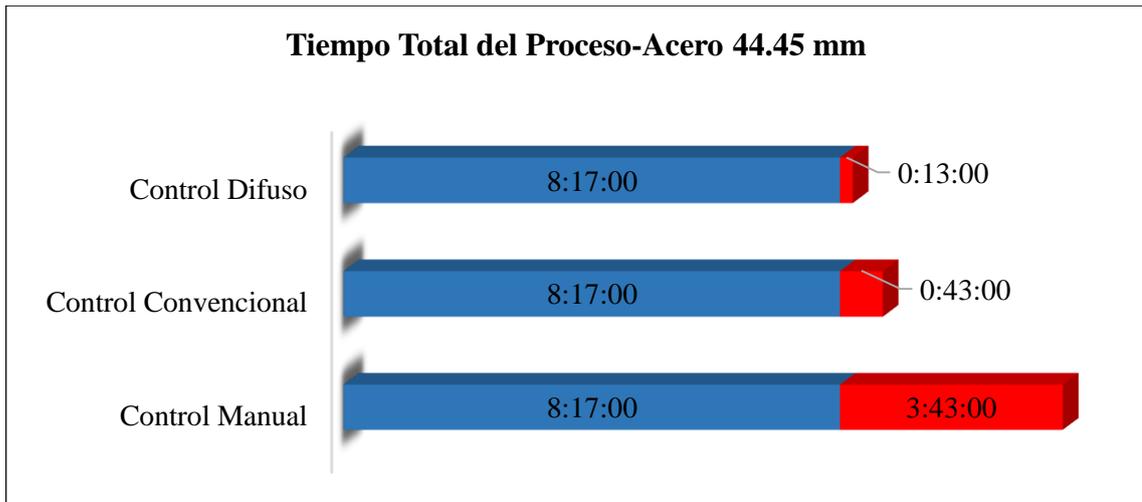
Los tiempos empleados por cada controlador, se detalla en la Tabla 7-4.

**Tabla 7-4.** Tiempos de Proceso de los Controladores para Acero 44.45 mm.

	<b>Curva TT Requerida</b>	<b>Control Manual</b>	<b>Controlador ID Convencional</b>	<b>Controlador Difuso TSK</b>
<b>ETAPAS</b>	<b>Tiempo [h]</b>	<b>Tiempo [h]</b>	<b>Tiempo [h]</b>	<b>Tiempo [h]</b>
Precalentamiento	1.5	2.5	1.93	1.52
Calentamiento	1.9	3	2.04	1.98
Sostenimiento	2	2	2.04	1.98
Enfriamiento	1.38	2	1.17	1.40
Finalización	1.5	2.5	1.83	1.62
<b>Tiempo Total</b>	<b>8.28 h</b>	<b>12 h</b>	<b>9 h</b>	<b>8.50 h</b>
	<b>8h17min</b>	<b>12h00min</b>	<b>9h00min</b>	<b>8h30min</b>

Realizado por: Ríos Paulina, 2019

Se observa en el gráfico 26-4 la minimización de tiempo adicional utilizando los controladores adicionales. El tiempo teórico del procedimiento es de 8 horas y 17 minutos. Aplicando el controlador difuso se obtiene una minimización de 13 minutos con respecto a 4 horas que utiliza el control manual.

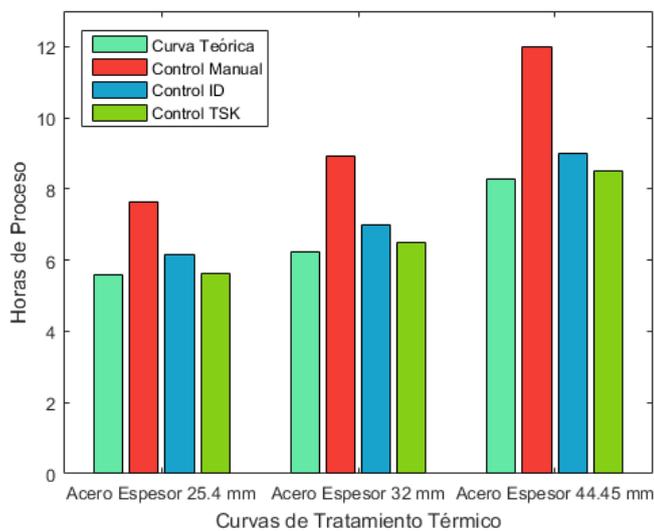


**Gráfico 26-4.** Comparación de Tiempos de Proceso de los Controladores-Acero 44.45 mm  
 Realizado por: Ríos Paulina, 2019

En resumen, los resultados del análisis de las curvas obtenidas de los diferentes controladores, dependen directamente del espesor del acero.

En el gráfico 27-4 se observa que el tiempo más alto de ejecución del proceso de tratamiento térmico es el del Control Manual actualmente utilizado con **4 horas más** que el tiempo requerido con un espesor de acero grande. Para espesores menores de acero el tiempo utilizado por el control manual es de **2 horas más** que el solicitado.

Con el diseño del controlador convencional el tiempo de operación del proceso se minimiza en **30 a 45 minutos** del tiempo ideal. Y con el controlador difuso TSK la minimización de dicho valor es de aproximadamente **15 minutos**. Comprobando una vez más que la velocidad de respuesta de éste último controlador es superior a los demás.



**Gráfico 27-4.** Comparación de Tiempos Operación de Tratamientos Térmicos  
 Realizado por: Ríos Paulina, 2019

## 4.8. Comprobación de la Hipótesis

### 4.8.1. T-Student para dos muestras independientes

Para la comprobación de la hipótesis se utilizó T-Student para dos muestras independientes. Se analizaron diferentes respuestas mediante simulación de las curvas de tratamiento térmico como en el ítem anterior.

La muestra son 16 de curvas de TT con el tiempo de operación total del proceso de cada controlador. Los datos que se utilizaron para la comprobación de la hipótesis son las diferencias de tiempos de operación total de los controladores con respecto al tiempo requerido. Se muestra en la siguiente tabla.

**Tabla 8-4.** Datos para la Comprobación de la Hipótesis

Muestra (Curva de TT)	Tiempos de Operación del Proceso [hh:mm]			Diferencia de Tiempo con Respecto al Real [hh:mm]	
	Real	Controlador ID	Controlador TSK	Controlador ID	Controlador TSK
1	5:34	6:08	5:38	0:33	0:03
2	8:16	9:00	8:29	0:43	0:13
3	6:13	7:00	6:30	0:46	0:16
4	6:31	7:28	6:46	0:56	0:14
5	5:46	6:42	5:57	0:55	0:10
6	6:21	7:13	6:35	0:52	0:13
7	6:14	7:10	6:28	0:55	0:13
8	6:28	7:17	6:39	0:48	0:10
9	8:52	9:48	9:06	0:55	0:13
10	8:13	9:09	8:27	0:56	0:14
11	7:42	8:27	7:49	0:45	0:07
12	5:04	5:57	5:25	0:53	0:21
13	7:46	8:24	7:49	0:37	0:02
14	5:11	6:08	5:43	0:57	0:31
15	7:03	7:53	7:24	0:50	0:21
16	7:51	8:21	7:57	0:30	0:06

Realizado por: Ríos Paulina, 2019

Se definen las siguientes hipótesis:

#### Hipótesis alternativa (H<sub>i</sub>):

“Los resultados de simulación demuestran que el controlador de temperatura para el horno industrial de tratamiento térmico, diseñado mediante un Sistema de Inferencia Difuso tipo Takagi-Sugeno-Kang, minimiza el tiempo de operación del proceso en comparación al controlador PI+D convencional.”

### Hipótesis nula (Ho):

“Los resultados de simulación demuestran que el controlador de temperatura para el horno industrial de tratamiento térmico, diseñado mediante un Sistema de Inferencia Difuso tipo Takagi-Sugeno-Kang, no minimiza el tiempo de operación del proceso en comparación al controlador PI+D convencional.”

Se utiliza el software Excel para calcular los parámetros de T-Student para dos muestras independientes, con un nivel de significancia de 0.05. Los mismos se presentan en la siguiente tabla:

**Tabla 9-4.** Parámetros para Distribución T-Student

	<b>Controlador Convencional ID</b>	<b>Controlador Difuso TSK</b>
<b>Media</b>	0.81096	0.22253
<b>Varianza</b>	0.02014	0.01440
<b>Observaciones</b>	16	16
<b>Diferencia hipotética de las medias</b>	0	
<b>Grados de libertad</b>	15	
<b>Estadístico t</b>	21.58121	
<b>P(T&lt;=t) una cola</b>	<b>5.22390E-13</b>	
<b>Valor crítico de t (una cola)</b>	1.75305	
<b>P(T&lt;=t) dos colas</b>	<b>1.04478E-12</b>	
<b>Valor crítico de t (dos colas)</b>	2.13144	

Realizado por: Ríos Paulina, 2019

Las condiciones para ésta distribución son:

1. Valor  $P \leq$  Nivel Significancia, se rechaza la hipótesis nula.
2. Valor  $P >$  Nivel Significancia, se acepta hipótesis nula.

Para el presente proyecto los datos se reflejan de la siguiente manera:

$$5.2239e^{-13} \leq 0.05$$

$$1.0448e^{-12} \leq 0.05$$

Se rechaza la hipótesis nula y se acepta la alternativa, ya que los dos valores son menores al nivel de significancia.

## CONCLUSIONES

- La constante de tiempo ( $T_{ao}$ ) y la ganancia en estado estable ( $K$ ) del modelo de orden reducido de la planta obtenida mediante la optimización con Gradiente Descendente tiene una mayor aproximación a la curva de reacción real del proceso en comparación al del modelo tradicional de Miller.
- El modelo difuso de la planta, inicialmente presenta el mismo comportamiento del modelo convencional. Después de aplicar el algoritmo de mínimos cuadrados recursivos los singletons de las reglas se optimizan, obteniendo un mayor ajuste del modelo difuso a la planta real.
- La estructura del controlador PI+D para una planta de primer orden es equivalente a un controlador de tipo ID, donde la constante integral ( $K_i$ ) es la encargada de alcanzar la consigna requerida y aumentar la velocidad de respuesta y la constante derivativa ( $K_d$ ) ayuda en la estabilidad del sistema.
- El controlador Difuso TSK se inicializa a partir del controlador convencional correctamente sintonizado, por lo que ambos presentan una misma dinámica, pero, mediante la optimización de los singletons del controlador difuso con la técnica del gradiente descendente y una función de costo definida se obtiene un mejor desempeño en el tiempo de respuesta y una salida realizable por el elemento final de regulación
- El control manual del proceso tarda un 45 % más que el tiempo establecido, dependiendo del espesor del acero. Aplicando el controlador convencional éste tiempo disminuye a 9% y con el controlador difuso TSK optimizado, logra una minimización al 4%.
- La reducción del tiempo aplicando un controlador difuso diseñado para la regulación de temperatura en el Horno de tratamiento térmico implica una reducción de consumo de GLP y otros recursos asociados al proceso que ayuda con la minimización de costos para la empresa y bajas emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmosfera.

## RECOMENDACIONES

- Para el diseño de controladores en el área industrial es importante que se utilice la estructura PI+D, por las ventajas que se tiene con respecto al PID. Una de ellas y la más importante es que cuida la integridad física del elemento final de regulación entregando señales de control realizables y eliminando las saturaciones del mismo.
- Se debe tener en cuenta el tiempo de muestreo en función del proceso a identificar y controlar, ya que de ello depende el obtener una mejor aproximación del comportamiento del sistema.
- El rango de los universos de discurso para las entradas de los sistemas difusos se debe definir mediante una simulación previa de los sistemas convencionales, ya que al momento de fusificar las entradas se pueden producir valores incorrectos que afectan al modelo difuso.
- Para disminuir el costo computacional asociado al procesamiento de los modelos difusos TSK se recomienda partir de un modelo en tiempo discreto, tener el menor número de entradas posibles y variar el número de funciones de pertenencia entre 5 y 7.
- En el ámbito industrial, se debe diseñar siempre un controlador difuso a partir de un controlador convencional instalado o simulado, dado de que los dos tendrán el mismo comportamiento.

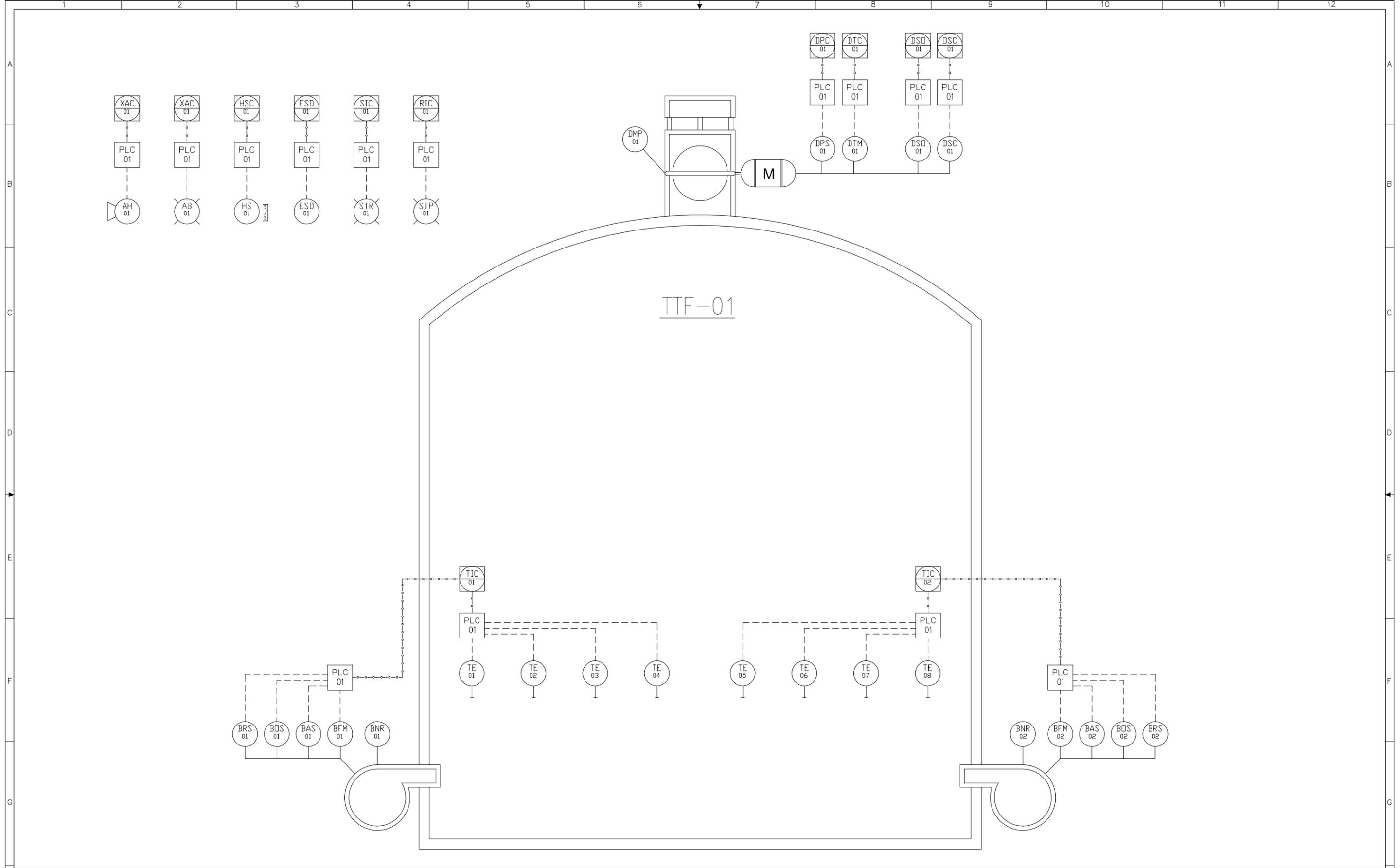
## BIBLIOGRAFÍA

- Alfaro, V. (2001). Identificación de procesos sobreamortiguados utilizando técnicas de lazo abierto. *Ingeniería*(11), 11-25.
- Alfaro, V. (21 de Septiembre de 2006). Identificación de Modelos de Orden Reducido a partir de la curva de reacción del proceso. 197-199. Costa Rica: Departamento de Automática, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Costa Rica.
- Åström, K., & Hägglund, T. (2009). *Control PID avanzado*. Madrid: PEARSON EDUCACIÓN, S.A.
- Åström, K., & Hägglund, T. (2009). *Control PID avanzado*. Madrid: PEARSON EDUCACIÓN, S.A.
- Avella Molano, N. L. (2015). Modelado y diseño de estrategias de control avanzado para hornos eléctricos de tratamientos térmicos. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
- Babuska, R. (1998). *Fuzzy Modeling for Control*. New York: Kluwer Academic Publishers.
- Barragán Piña, A. J. (Mayo de 2009). Síntesis de Sistemas de Control Borroso Estable por Diseño. Universidad de Huelva.
- Barreras Carracedo, M., García-Sanz, M., & Díaz, S. (2003). Modelado y Simulación de un horno eléctrico industrial de 1 MW de potencia. *Modelado y Simulación de un horno eléctrico industrial de 1 MW de potencia*. XXIV Jornadas de Automática León.
- Betancor, C. (Marzo de 2015). Aportaciones al control inverso con modelo de referencia basado en lógica borrosa, redes neuronales y algoritmos genéticos. Las Palmas de Gran Canaria, España: Universidad de las Palmas de Gran Canaria.
- Contreras, J., Murillo, L., Paz, J., & Sarabia, J. (2007). Identificación Borrosa, Eficiente Basada en Error de Inferencia. *Tecnologías Avanzadas*, 1(9), 6.
- Gajate Martín, A. (Junio de 2010). Modelado y Control Neuroborroso de Sistemas Complejos. Aplicación a Procesos de Mecanizado del Alto Rendimiento. 2-3. España.
- García Rodero, G. (Septiembre de 2014). Alivio de Tensiones residuales: Tratamiento Térmico vs. Vibración. 44-45.
- Guarochico Moreira, V. H., & Morán Alvarado, M. S. (2013). Identificación y diseño del controlador para un sistema regulador de Temperatura dentro de un horno industrial de resistencia . Guayaquil, Ecuador: Escuela Superior Politécnica de Litoral.
- Hernández Arboleda, O. D. (Agosto de 2014). Metodología para modelar y controlar un sistema de combustion uiltizando calculo fraccional. Instituto Tecnologico Metropolitano.
- Laufgang, S. (2004). Tratamiento Térmico de Soldadura. *Tratamiento Térmico de Soldadura*, 21-32. Curso de Inspectores de Soldadura-IAS.
- Maldonado, F. (2017). Sector Metalmecánico Pilar Fundamental para el Desarrollo del País. *EKOS*, 107.
- Maldonado, F. (2017). Sector Metalmecánico Pilar Fundamental para el Desarrollo del País. *EKOS*, 6.

- Manual de Control de Calidad ASME. (Agosto de 2013). Procedimiento para Tratamiento Térmico Pos Soldadura. Quito.
- Murthy, V., Kuman, P., & Kumari, R. (Agosto de 2012). Fuzzy logic intelligent controlling concepts in industrial furnace temperature process control. In *Advanced Communication Control and Computing Technologies (ICACCCT)*, 2012 IEEE International Conference on (pp. 353-358). IEEE.
- Ogata, K. (2010). *Ingeniería de Control Moderna*. Madrid: Pearson Educación.
- Ogata, K. (2010). *Ingeniería de Control Moderna*. Madrid: Pearson Educación.
- Pérez Zúñiga, R., Rivas Pérez, R., & Sotomayor Moriano, J. (2009). Control predictivo generalizado de la temperatura de laminación de un horno . Perú: Departamento de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Ponce Cruz, P. (2010). *Inteligencia Artificial con Aplicaciones a la Ingeniería*. México: Alfaomega.
- Reznik, L. (1997). *Fuzzy Controllers*. Melbourne: Newnes.
- Rivas-Pérez, R., Feliu, V., & Castillo García, F. (Febrero de 2011). Identificación y control de orden fraccional del proceso de variación de temperatura en un horno siderúrgico. *Identificación y control de orden fraccional del proceso de variación de temperatura en un horno siderúrgico*.
- Sugeno, T., & Yasukawa, T. (1993). A fuzzy-logic-based approach to qualitative modeling. 7-13. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*.

## **ANEXOS**

**ANEXO A: DIAGRAMA DE INSTRUMENTACIÓN Y TUBERÍA DEL HORNO DE TRATAMIENTO TÉRMICO (P&ID)**



NOTAS GENERALES		DIBUJOS DE REFERENCIA		REVISIONES				INGENIERIA / REGISTRO DISEÑO		FIRMA	FECHA
NUMERO	DESCRIPCION	REV.	DESCRIPCION	FECHA	DIBUJO	REVISO	APROBO	DIBUJANTE :			
		A	FOR REVIEW	12/06/18	PR	PR	MC	P. RIOS		12/06/18	
		0	FOR CONSTRUCTION	25/01/19	PR	PR	MC	P. RIOS		12/06/18	
								M. CEDEÑO		12/06/18	

ESTE PLANO CONTIENE INFORMACION CONFIDENCIAL, PROPIEDAD DE IAA. QUEDA EXPRESAMENTE PROHIBIDA SU DIFUSION, COPIA O USO SIN AUTORIZACION ESCRITA POR IAA.		TAMAÑO : A3		DIBUJO N°:	
THIS DRAWING CONTAINS PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL INFORMATION. ANY DISCLOSURE OR USE OF IS THEREFORE EXPRESSLY PROHIBITED WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF IAA.		ESCALA : S/E		20767-01-001	
				HOJA : 1 DE 1	
				REV. 0	



CLIENTE : **INDUSTRIA ACERO DE LOS ANDES**  
 PROYECTO : **AUTOMATIZACION HORNO DE TRATAMIENTO TERMICO**  
 DESCRIPCION : **PIPING & INSTRUMENT DIAGRAM  
THERMAL TREATMENT FURNACE**  
 DIBUJO N°: **20767-01-001**

## ANEXO B: CÓDIGO MATLAB DE PROGRAMAS EMPLEADOS PARA EL CONTROLADOR Y LA PLANTA

### IDENTIFICACIÓN DE LA PLANTA CONVENCIONAL

```
close all; clear all; format long g; clc;
%%IDENTIFICACION DEL SISTEMA DE PRIMER ORDEN METODO MILLER
%% lectura de datos
A=load('tempfiltradafinalA.txt');
t=A(:,1);           %tiempo
T=A(:,2);           %Temperatura
Q=A(:,3);           %Quemador

pin=T(1);

K=1230/(100-0); %Cálculo ganancia
p63=find(T>=1237*0.6321+pin,1); %Busca valor del 63.21%
TAO=t(p63); %Cálculo constante de tiempo tao
gp2=tf([K],[TAO 1]); %Generación de la función de transferencia
t2=[1:1:12806]';
y2=step(gp2,t2); %Obtención de datos aplicando función escalón
y2=y2.*100;

save('VAR_MILLER.txt','K','TAO','-ascii');

%%gradiente en descenso para Tao y K de un sistema de primer orden.
close all; clear; format long g;
%%OBTENCION DE DATOS REALES
A=load('tempfiltradafinalA.txt');
t=A(:,1);           %tiempo
T=A(:,2);           %Temperatura
Q=A(:,3);           %Quemador

VARIABLES=load('VAR_MILLER.txt')
K=VARIABLES(1)*100;
TAO=VARIABLES(2);
%GP=tf([K],[TAO 1]); %Generación de la función de transferencia
%t1=[1:1:12806]';
%y1=lsim(GP,Q,t);

%FUNCION DE SISTEMA DE PRIMER ORDEN EN EL TIEMPO
N=length(T);
for k=1:N
    y(k)=K*(1-exp(-t(k)/TAO));
end
y=y';

%DEFINO LA FUNCIÓN DE COSTO INICIAL
J=sum((T-y).^2,1)/N;

%%INICIA EL ALGORITMO DEL GRADIENTE EN DESCENSO
%%DEFINO CONDICIONES INICIALES
REPETICION=1;
REP_MAX=8000;
PASO=0.1;
K_OP=K;
TAO_OP=TAO;
VAL_OP=[TAO_OP K_OP];
GR_JOP=0;
```

```

GR_GRAD=0;
GR_MOV=0;
%%SE EJECUTA EL BUCLE DEL ALGORITMO
while (REPETICION<=REP_MAX)
    %J_OP=0;
    y_op=0;
    %DEFINO EL GRADIENTE DE LA FUNCION DE COSTO;
    D_TAO=2*(sum((T-VAL_OP(2)+(VAL_OP(2)*exp(-
t/VAL_OP(1))))*(VAL_OP(2)*exp(-t/VAL_OP(1)))*(t/VAL_OP(1)^2)))/N;
    D_K=-2*(sum((T-VAL_OP(2)+(VAL_OP(2)*exp(-t/VAL_OP(1))))*(1+exp(-
t/VAL_OP(1)))))/N;

    GRAD=[D_TAO D_K];

    MOVIMIENTO=PASO*GRAD;
    VAL_OP=VAL_OP-MOVIMIENTO;
    %EVALUAR EL TAO_OP EN LA FUNCION
    for k=1:N
        y_op(k)=VAL_OP(2)*(1-exp(-t(k)/VAL_OP(1)));
    end
    y_op=y_op';
    %EVALUO LA FUNCION DE COSTO
    J_OP=sum((T-y_op).^2,1)/N;
    GR_JOP(REPETICION)=J_OP;
    REPETICION=REPETICION+1;
end %% fin del bucle del descenso
J_OP
K_OP=VAL_OP(2)/100;
TAO_OP=VAL_OP(1);

save('VAR_GRAD_KTAO.txt','K_OP','TAO_OP','-ascii');

```

## PLANTA DIFUSA Y OPTIMIZACION

```

clear all; clc; format long

disp('PROGRAMA DE OPTIMIZACION DE LA PLANTA DIFUSA');
disp('UTILIZANDO MINIMOS CUADRADOS')
disp('DESARROLLADO POR PAULINA RIOS')

%% Set de parametros de la planta convencional
VARIABLES=load('VAR_GRAD_KTAO.txt');
VALOR_TAO= VARIABLES(2); %parametro de la planta convencional.
VALOR_K= VARIABLES(1); %parametro de la planta convencional.
VALOR_TIEMPO_SAMPLEO=round(VALOR_TAO/10); %parametro calculador
VALOR_TAO/10.

A=load('tempfiltradafinalA.txt');
VALORES_TEMP_REAL=A(:,2); %valores de temperatura real.
VALOR_DATOS_SAMPLEADO=length(VALORES_TEMP_REAL)/VALOR_TIEMPO_SAMPLEO;
VALOR_DATOS_SAMPLEADO=round(VALOR_DATOS_SAMPLEADO);

VALORES_TEMP_REAL_SAMPLEADO(1)=VALORES_TEMP_REAL(1)
for i=1:VALOR_DATOS_SAMPLEADO-1

VALORES_TEMP_REAL_SAMPLEADO(i+1)=VALORES_TEMP_REAL((i)*VALOR_TIEMPO_SA
MPLEO);
end
for i=1:VALOR_DATOS_SAMPLEADO

```

```

    TIEMPO(i)=(i-1)*VALOR_TIEMPO_SAMPLEO;
end
VALOR_BNR=ones(size(TIEMPO))*100;
GANANCIA_PLANTA_CONV=tf([VALOR_K],[VALOR_TAO 1]); %funcion de
transferencia del modelo convencional en tiempo continuo.
VALORES_TEMP_MODELO_CONV=lsim(GANANCIA_PLANTA_CONV,VALOR_BNR,TIEMPO);
%valores de temperatura del modelo convencional en tiempo continuo.
GANANCIA_PLANTA_CONV_DISCRETO=c2d(GANANCIA_PLANTA_CONV,VALOR_TIEMPO_SAMPLEO)
VALORES_TEMP_MODELO_DISCRETO=step(GANANCIA_PLANTA_CONV_DISCRETO,TIEMPO
);
VALORES_TEMP_MODELO_DISCRETO=VALORES_TEMP_MODELO_DISCRETO.*100;
%% CALCULO DE LOS PARAMETROS DE LA PLANTA DIFUSA
%% para determinar el modelo de la planta difusa se parte de la
ecuacion en diferencias
%%  $Y(k)=Landa1P*X(k)+Landa2P*Y(k-1)$  obtenida desde el modelo de la
planta convencional en
%% tiempo discreto.

VALOR_LANDA1_PLANTA=(VALOR_K*VALOR_TIEMPO_SAMPLEO)/(VALOR_TAO+VALOR_TIEMPO_SAMPLEO);
VALOR_LANDA2_PLANTA=(VALOR_TAO)/(VALOR_TAO+VALOR_TIEMPO_SAMPLEO);

UNIVERSO_BNR=[0 100];
UNIVERSO_TEMP_ANTERIOR=[0 1260];

NUM_FM_BNR=5;
NUM_FM_TEMP_ANTERIOR=5;

PUNTOS_MAX_PERTENENCIA_BNR=PARTICION_UNIVERSO(UNIVERSO_BNR,NUM_FM_BNR)
;
PUNTOS_MAX_PERTENENCIA_TEMP_ANT=PARTICION_UNIVERSO(UNIVERSO_TEMP_ANTERIOR,NUM_FM_TEMP_ANTERIOR);

SINGLETONES_PLANTA=SINGLETONES(VALOR_LANDA1_PLANTA,VALOR_LANDA2_PLANTA
,PUNTOS_MAX_PERTENENCIA_BNR,PUNTOS_MAX_PERTENENCIA_TEMP_ANT);
%% Inicializar variables

VALOR_ACTUAL_BNR=0;
VALOR_TEMP_ANTERIOR=0;

%%%%PLANTA DIFUSA%%

CURVA_SALIDA_TEMP=zeros(1,VALOR_DATOS_SAMPLEADO);
MATRIZ_CUMPL_REGLAS_PLANTA=[];

for i=1:VALOR_DATOS_SAMPLEADO
if i>1
    VALOR_ACTUAL_BNR=100;
end
VALOR_FUZZY_BNR=FUZIFICACION(VALOR_ACTUAL_BNR,PUNTOS_MAX_PERTENENCIA_BNR);
VALOR_FUZZY_TEMP_ANTERIOR=FUZIFICACION(VALOR_TEMP_ANTERIOR,PUNTOS_MAX_PERTENENCIA_TEMP_ANT);
CUMPLIMIENTO_REGLAS_PLANTA=CUMPLIMIENTO(VALOR_FUZZY_BNR,VALOR_FUZZY_TEMP_ANTERIOR);
MATRIZ_CUMPL_REGLAS_PLANTA=[MATRIZ_CUMPL_REGLAS_PLANTA;CUMPLIMIENTO_REGLAS_PLANTA];

```

```

%COMPRO_PLANTA=sum(CUMPLIMIENTO_REGLAS_PLANTA',1);
VALOR_ACTUAL_TEMP=DEFUZIFICACION(CUMPLIMIENTO_REGLAS_PLANTA,SINGLETONES_PLANTA);
CURVA_SALIDA_TEMP(i)=VALOR_ACTUAL_TEMP;
VALOR_TEMP_ANTERIOR=VALOR_ACTUAL_TEMP;
end

```

```

%%OPTIMIZACIÓN DEL MODELO DIFUSO UTILIZANDO MINIMOS CUADRADOS RECURSIVOS%%

```

```

NUM_REGLAS=NUM_FM_BNR*NUM_FM_TEMP_ANTERIOR;
m=0;
NUM_DATOS_REALES=length(VALORES_TEMP_REAL_SAMPLEADO)
s_ini=eye(NUM_REGLAS*(m+1));
s_ini=6.14016e-2*s_ini;
p_opt=SINGLETONES_PLANTA';
for i=1:NUM_DATOS_REALES-1

    fx=MATRIZ_CUMPL_REGLAS_PLANTA(i,:);
    fx1=MATRIZ_CUMPL_REGLAS_PLANTA(i+1,:);
    num=s_ini*fx'*fx1*s_ini;
    den=1+(fx1*s_ini*fx1');
    out=num/den;
    s_ini=s_ini-(num/den);
    aux=s_ini*(fx1.*(-VALORES_TEMP_REAL_SAMPLEADO(i)+fx1*p_opt))';
    p_opt=p_opt+aux;
    %p_opt=p_opt+s_ini*fx1*(Y(i)-fx1*p_opt);
    %s_ini*fx'*fx1*s_ini/(1+(fx1*s_ini*fx1'))

end
SINGLETONES_PLANTA_OPTIMIZADOS=p_opt';

```

```

%%%%%%%%%%PLANTA DIFUSA OPTIMIZADA%%%%%%%%%%

```

```

VALOR_ACTUAL_BNR=0;
VALOR_TEMP_ANTERIOR_OP=0;
CURVA_SALIDA_TEMP_OPT=zeros(1,VALOR_DATOS_SAMPLEADO);

for i=1:VALOR_DATOS_SAMPLEADO
if i>1
    VALOR_ACTUAL_BNR=100;
end
VALOR_FUZZY_BNR=FUZIFICACION(VALOR_ACTUAL_BNR,PUNTOS_MAX_PERTENENCIA_BNR);
VALOR_FUZZY_TEMP_ANTERIOR=FUZIFICACION(VALOR_TEMP_ANTERIOR_OP,PUNTOS_MAX_PERTENENCIA_TEMP_ANT);
CUMPLIMIENTO_REGLAS_PLANTA=CUMPLIMIENTO(VALOR_FUZZY_BNR,VALOR_FUZZY_TEMP_ANTERIOR);
%COMPRO_PLANTA=sum(CUMPLIMIENTO_REGLAS_PLANTA',1);
VALOR_ACTUAL_TEMP_OPT=DEFUZIFICACION(CUMPLIMIENTO_REGLAS_PLANTA,SINGLETONES_PLANTA_OPTIMIZADOS);
CURVA_SALIDA_TEMP_OPT(i)=VALOR_ACTUAL_TEMP_OPT;
VALOR_TEMP_ANTERIOR_OP=VALOR_ACTUAL_TEMP_OPT;
end

```

```

%%GRAFICAS DE LOS MODELOS Y VALORES REALES%%

```

```

figure;
plot(TIEMPO, VALORES_TEMP_REAL_SAMPLEADO, 'g-
', TIEMPO, VALORES_TEMP_MODELO_CONV, 'bo', TIEMPO, CURVA_SALIDA_TEMP, 'rx', '
linewidth', 1)
legend('Proceso', 'Modelo Convencional', 'Modelo Difuso');
title(' Comparación de Modelos de la Planta');
xlabel('Time [s]');
ylabel('Temperature [°F]');
xlim([0 13000]);
ylim([0 1300]);
grid;
%fin del programa

```

```

%fin del programa

```

```

save('VAR_OPT_PLANTA.mat', 'VALOR_TIEMPO_SAMPLEO', 'SINGLETONES_PLANTA_O
PTIMIZADOS', 'PUNTOS_MAX PERTENENCIA_TEMP_ANT', 'PUNTOS_MAX PERTENENCIA_
BNR', 'VALOR_DATOS_SAMPLEADO');

```

## CONTROLADOR DIFUSO Y OPTIMIZACION

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%PROGRAMA DE MODELO PLANTA DIFUSA + CONTROLADOR CONV Y
DIFUSO%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

clear all;
clc; format long

```

```

%VALOR_APRENDIZAJE=1e-5;

```

```

VALOR_APRENDIZAJE=3e-11;

```

```

REPETICIONES=1;

```

```

disp('PROGRAMA DE MODELO DE PRIMER ORDEN DIFUSO + CONTROLADOR CONV Y
DIFUSO');

```

```

disp('DESARROLLADO POR PAULINA RIOS')

```

```

disp('EJECUTANDOSE...')

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

VARIABLES=load('VAR_OPT_PLANTA.mat');

```

```

VARIABLES_MODELO=load('VAR_GRAD_KTAAO.txt');

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

%% VALORES DE LA PLANTA CONVENCIONAL%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

VALOR_TAO= VARIABLES_MODELO(2); %parametro de la planta convencional.

```

```

VALOR_K= VARIABLES_MODELO(1); %parametro de la planta convencional.

```

```

%%VALORES PARA EL CALCULO DE LA PLANTA DIFUSA%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%5

```

```

VALOR_TIEMPO_SAMPLEO=VARIABLES.VALOR_TIEMPO_SAMPLEO;

```

```

SINGLETONES_PLANTA_OPTIMIZADOS=VARIABLES.SINGLETONES_PLANTA_OPTIMIZADO
S;

```

```

PUNTOS_MAX PERTENENCIA_TEMP_ANT=VARIABLES.PUNTOS_MAX PERTENENCIA_TEMP_
ANT;

```

```

PUNTOS_MAX PERTENENCIA_BNR=VARIABLES.PUNTOS_MAX PERTENENCIA_BNR;

```

```

VALOR_DATOS_SAMPLEADO=VARIABLES.VALOR_DATOS_SAMPLEADO;

```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%% Calculo de parametros para el controlador convencional
```

```
VALOR_TIEMPO_ESTABILIZACION=4*VALOR_TAO;
VALOR_SOBREIMPULSO=0.01;
VALOR_FACTOR_AMORTIGUAMIENTO=abs(log(VALOR_SOBREIMPULSO)/sqrt(pi^2+(log(VALOR_SOBREIMPULSO))^2));
VALOR_FREQ_NOAMORTIGUADA=4/(VALOR_FACTOR_AMORTIGUAMIENTO*VALOR_TIEMPO_ESTABILIZACION);
VALOR_KP=VALOR_FREQ_NOAMORTIGUADA^2/VALOR_K;
VALOR_TI=(2*VALOR_FACTOR_AMORTIGUAMIENTO*VALOR_FREQ_NOAMORTIGUADA)/(1+VALOR_KP*VALOR_K);
VALOR_KI=VALOR_KP/VALOR_TI*2.2;
VALOR_TD=(1-VALOR_TI*VALOR_TAO)/(VALOR_KP*VALOR_K*VALOR_TI);
VALOR_KD=-(VALOR_KP*VALOR_TD)*1.59; %%EL SIGNO SE REEMPLAZA EN EL PUNTO DE SUMA DEL CONTROLADOR
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%% CALCULO DE LOS PARAMETROS DEL CONTROLADOR DIFUSO
%% Para determinar el modelo difuso del controlador se parte de la ecuacion en diferencias
%%  $Y(k) = \text{Landa2C} * \text{VARIACION\_ERROR}(k) + \text{Landa4C} * \text{VARIACION\_BNR}(k)$  obtenida desde el modelo del controlador convencional en
%% tiempo discreto
```

```
VALOR_LANDA1_CTRL=((VALOR_KI*VALOR_TIEMPO_SAMPLEO*VALOR_TAO)+(VALOR_KI)*VALOR_TIEMPO_SAMPLEO^2)/((VALOR_TAO+VALOR_TIEMPO_SAMPLEO)-(VALOR_K*VALOR_KD));
VALOR_LANDA2_CTRL=-
(VALOR_KI*VALOR_TIEMPO_SAMPLEO*VALOR_TAO)/((VALOR_TAO+VALOR_TIEMPO_SAMPLEO)-(VALOR_K*VALOR_KD));
VALOR_LANDA3_CTRL=-((2*VALOR_K*VALOR_KD)-VALOR_TIEMPO_SAMPLEO-(2*VALOR_TAO))/((VALOR_TAO+VALOR_TIEMPO_SAMPLEO)-(VALOR_K*VALOR_KD));
VALOR_LANDA4_CTRL=-
(VALOR_TAO-(VALOR_K*VALOR_KD))/((VALOR_TAO+VALOR_TIEMPO_SAMPLEO)-(VALOR_K*VALOR_KD));
```

```
VALOR_ALFA1_CTRL=VALOR_LANDA1_CTRL/VALOR_LANDA2_CTRL;
VALOR_ALFA2_CTRL=VALOR_LANDA3_CTRL/VALOR_LANDA4_CTRL;
```

```
UNIVERSO_VARIACION_ERROR=[-VALOR_ALFA1_CTRL*VALOR_K
VALOR_ALFA1_CTRL*VALOR_K]*-1000;
UNIVERSO_VARIACION_BNR=[VALOR_ALFA2_CTRL*100 100];
```

```
%UNIVERSO_VARIACION_ERROR=[-200 100];
%UNIVERSO_VARIACION_BNR=[-50 50];
```

```
NUM_FM_VARIACION_ERROR=5;
NUM_FM_VARIACION_BNR=5;
```

```
INICIO=1;
FIN=2;
```

```
PUNTOS_MAX PERTENENCIA_VARIACION_ERROR=PARTICION_UNIVERSO(UNIVERSO_VARIACION_ERROR,NUM_FM_VARIACION_ERROR);
```

```
PUNTOS_MAX_PERTENENCIA_VARIACION_BNR=PARTICION_UNIVERSO (UNIVERSO_VARIA  
CION_BNR,NUM_FM_VARIACION_BNR) ;
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
% Generacion de la curva de tratamiento termico o curva deseada
```

```
TEMP_CTRL_DESEADA=[800 1150 1150 800 0];  
%TEMP_CTRL_DESEADA=[500 800 900 700 0];  
TIEMPOS_EJECUCION=[5330 4510 4510 4100 7175];  
%TIEMPOS_EJECUCION=[4330 2510 2510 3100 5175];  
CURVA_TEMP_DESEADA=GENERADOR_CURVA (TEMP_CTRL_DESEADA, TIEMPOS_EJECUCION  
);  
VALOR_TIEMPO_EJECUCION=length (CURVA_TEMP_DESEADA) ;
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
SINGLETONES_CTRL=SINGLETONES (VALOR_LANDA2_CTRL, VALOR_LANDA4_CTRL, PUNTO  
S_MAX_PERTENENCIA_VARIACION_ERROR, PUNTOS_MAX_PERTENENCIA_VARIACION_BNR  
);  
SINGLETONES_CTRL_INI=SINGLETONES_CTRL;  
OPTIMIZACION=1;  
PRUEBA=0;  
MATRIZ_GRADIENTES=zeros (REPETICIONES, NUM_FM_VARIACION_ERROR*NUM_FM_VA  
RIACION_BNR) ;  
MATRIZ_DIRECCIONES=zeros (REPETICIONES, NUM_FM_VARIACION_ERROR*NUM_FM_VA  
RIACION_BNR) ;  
MATRIZ_VARIACION_BNR=zeros (REPETICIONES, VALOR_TIEMPO_EJECUCION) ;  
MATRIZ_SINGLETONES_CTRL=zeros (REPETICIONES, NUM_FM_VARIACION_ERROR*NUM_  
FM_VARIACION_BNR) ;
```

```
J=zeros (1, REPETICIONES) ;
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%INICIO DEL BUCLE PRINCIPAL
```

```
%while 1  
for OPTIMIZACION=1:REPETICIONES  
    PRUEBA=PRUEBA+1;
```

```
    %% Inicializar variables
```

```
    VALOR_ACTUAL_ERROR=0;  
    VALOR_ANTERIOR_ERROR=0;
```

```
    VALOR_ANTERIOR_BNR=0;  
    VALOR_PREANTERIOR_BNR=0;
```

```
    VALOR_ACTUAL_TEMP=0;  
    VALOR_TEMP_ANTERIOR=0;
```

```
    VALOR_CTRL_ANT=0;
```

```
    CURVA_SALIDA_TEMP=zeros (1, VALOR_TIEMPO_EJECUCION) ;  
    CURVA_VARIACION_ERROR=zeros (1, VALOR_TIEMPO_EJECUCION) ;  
    CURVA_VARIACION_BNR=zeros (1, VALOR_TIEMPO_EJECUCION) ;  
    CURVA_BNR=zeros (1, VALOR_TIEMPO_EJECUCION) ;  
    CURVA_ERROR=zeros (1, VALOR_TIEMPO_EJECUCION) ;
```

```

VARIACION_BNR=zeros(1,VALOR_TIEMPO_EJECUCION);

TIEMPO=zeros(1,VALOR_TIEMPO_EJECUCION);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%CONTROLADOR DIFUSO%%%
%% Inicio del bucle del seguimiento de la curva de TT

for i=1:VALOR_TIEMPO_EJECUCION

    VALOR_ACTUAL_ERROR=CURVA_TEMP_DESEADA(i)-VALOR_ACTUAL_TEMP;

    VALOR_ACTUAL_VARIACION_ERROR=VALOR_ALFA1_CTRL*VALOR_ACTUAL_ERROR+VALOR_
    _ANTERIOR_ERROR;
    CURVA_VARIACION_ERROR(i)=VALOR_ACTUAL_VARIACION_ERROR;

    VALOR_ACTUAL_VARIACION_BNR=VALOR_ALFA2_CTRL*VALOR_ANTERIOR_BNR+VALOR_P
    REANTERIOR_BNR;
    CURVA_VARIACION_BNR(i)=VALOR_ACTUAL_VARIACION_BNR;

    VALOR_FUZZY_VARIACION_ERROR=FUZIFICACION(VALOR_ACTUAL_VARIACION_ERROR,
    PUNTOS_MAX PERTENENCIA_VARIACION_ERROR);

    VALOR_FUZZY_VARIACION_BNR=FUZIFICACION(VALOR_ACTUAL_VARIACION_BNR, PUNT
    OS_MAX PERTENENCIA_VARIACION_BNR);

    CUMPLIMIENTO_REGLAS_CTRL=CUMPLIMIENTO(VALOR_FUZZY_VARIACION_ERROR, VALO
    R_FUZZY_VARIACION_BNR);

    VALOR_ACTUAL_CTRL=DEFUZIFICACION(CUMPLIMIENTO_REGLAS_CTRL, SINGLETONES_
    CTRL);

    VALOR_ACTUAL_CTRL=SATURACION(VALOR_ACTUAL_CTRL,0,100);

    CURVA_BNR(i)=VALOR_ACTUAL_CTRL;
    CURVA_ERROR(i)=VALOR_ACTUAL_ERROR;
    VALOR_ACTUAL_BNR=VALOR_ACTUAL_CTRL;
    VARIACION_BNR(i)=VALOR_ACTUAL_BNR-VALOR_ANTERIOR_BNR;
    MATRIZ_VARIACION_BNR(OPTIMIZACION,i)=VARIACION_BNR(i);

    VALOR_ACTUAL_TEMP=PLANTA_DIFUSA_OPTIMIZADA(VALOR_ACTUAL_BNR,VALOR_TEMP_
    _ANTERIOR,PUNTOS_MAX PERTENENCIA_BNR,PUNTOS_MAX PERTENENCIA_TEMP_ANT,S
    INGLETONES_PLANTA_OPTIMIZADOS);
    VALOR_ACTUAL_TEMP=SATURACION(VALOR_ACTUAL_TEMP,0,1260);
    CURVA_SALIDA_TEMP(i)=VALOR_ACTUAL_TEMP;

    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    %% Carga de los valores en las diferentes variables
    VALOR_ANTERIOR_ERROR=VALOR_ACTUAL_ERROR;
    VALOR_PREANTERIOR_BNR=VALOR_ANTERIOR_BNR;
    VALOR_ANTERIOR_BNR=VALOR_ACTUAL_BNR;
    VALOR_TEMP_ANTERIOR=VALOR_ACTUAL_TEMP;
    TIEMPO(i)=(i-1)*VALOR_TIEMPO_SAMPLEO;

end %fin del for del seguimiento

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% Guardo la curva de temperatura con los singletones iniciales
if PRUEBA ==1
    CURVA_SALIDA_TEMP1=CURVA_SALIDA_TEMP;
    CURVA_BNR1=CURVA_BNR;
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%DEFINO FUNCION DE COSTO INICIAL

J(OPTIMIZACION)=1/2*sum(CURVA_ERROR)^2/VALOR_TIEMPO_EJECUCION;
if OPTIMIZACION>30
    if J(OPTIMIZACION)>J(OPTIMIZACION-1)
        %break;
    end
end

VALOR_GRADIENTE=zeros(1,length(SINGLETONES_CTRL));
VALOR_DIRECCION=zeros(1,length(SINGLETONES_CTRL));
VALOR_GRADIENTE_UK=zeros(1,length(SINGLETONES_CTRL));

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%Calculo del Gradiente
for i=1:VALOR_TIEMPO_EJECUCION
    for j=1:length(SINGLETONES_CTRL)
        %SINGLETONES_CTRL_TEMPORAL=SINGLETONES_CTRL;

        SINGLETONES_CTRL_TEMPORAL=zeros(1,length(SINGLETONES_CTRL));
        SINGLETONES_CTRL_TEMPORAL(j)=1;

        VALOR_FUZZY_VARIACION_ERROR=FUZIFICACION(CURVA_VARIACION_ERROR(i),PUNTO
        S_MAX_PERTENENCIA_VARIACION_ERROR);

        VALOR_FUZZY_VARIACION_BNR=FUZIFICACION(CURVA_VARIACION_BNR(i),PUNTOS_M
        AX_PERTENENCIA_VARIACION_BNR);

        CUMPLIMIENTO_REGLAS_CTRL=CUMPLIMIENTO(VALOR_FUZZY_VARIACION_ERROR,VALO
        R_FUZZY_VARIACION_BNR);

        VALOR_ACTUAL_CTRL=DEFUZIFICACION(CUMPLIMIENTO_REGLAS_CTRL,SINGLETONES_
        CTRL_TEMPORAL);

        %MATRIZ_CTRL(i,j)=VALOR_ACTUAL_CTRL; %%% MATRIZ DE LAS
        PERTENENCIAS PARA CADA SINGLETONES
        VALOR_ACTUAL_BNR=VALOR_ACTUAL_CTRL;

        VALOR_FUZZY_BNR=FUZIFICACION(VALOR_ACTUAL_BNR,PUNTOS_MAX_PERTENENCIA_B
        NR);

        VALOR_FUZZY_TEMP_ANTERIOR=FUZIFICACION(CURVA_SALIDA_TEMP(i),PUNTOS_MAX
        _PERTENENCIA_TEMP_ANT);

        CUMPLIMIENTO_REGLAS_PLANTA=CUMPLIMIENTO(VALOR_FUZZY_BNR,VALOR_FUZZY_TE
        MP_ANTERIOR);

```

```

TEMPERATURA=DEFUZIFICACION(CUMPLIMIENTO_REGLAS_PLANTA,SINGLETONES_PLAN
TA_OPTIMIZADOS);

    if(VALOR_ACTUAL_BNR>0)
        VALOR_GRADIENTE(j)=
VALOR_GRADIENTE(j)+(TEMPERATURA*CURVA_ERROR(i));
        VALOR_DIRECCION(j)= VALOR_DIRECCION(j)+TEMPERATURA^2;
    end

end

end

VALOR_GRADIENTE=(-VALOR_GRADIENTE/VALOR_TIEMPO_EJECUCION);
VALOR_DIRECCION=VALOR_DIRECCION/VALOR_TIEMPO_EJECUCION;
%iteracion=OPTIMIZACION;

MATRIZ_GRADIENTES(OPTIMIZACION,:)=VALOR_GRADIENTE;
MATRIZ_SINGLETONES_CTRL(OPTIMIZACION,:)=SINGLETONES_CTRL;
MATRIZ_DIRECCIONES(OPTIMIZACION,:)=VALOR_DIRECCION;

SINGLETONES_CTRL_OPTIMIZADOS=SINGLETONES_CTRL;
for i=1:length(SINGLETONES_CTRL)
    %SINGLETONES_CTRL(i)=SINGLETONES_CTRL(i)-
VALOR_APRENDIZAJE*VALOR_GRADIENTE(i);
    SINGLETONES_CTRL(i)=SINGLETONES_CTRL(i)-
VALOR_APRENDIZAJE*VALOR_GRADIENTE(i)*VALOR_DIRECCION(i);
end

    OPTIMIZACION=OPTIMIZACION+1;
end

%CON 200000 ITERACIONES CONJ
SINGLETONES_CTRL_OPTIMIZADOS=[748.988431332090,690.393041196263,631.79
7651060436,573.202260924609,514.606870788782,458.089605801872,2655.127
44102214,3482.72093121618,353.496413923103,223.708045258564,167.190780
271654,110.129427656456,50.5569965590880,-10.5127173027324,-
67.1907802716536,-123.708045258564,-4973.47682210917,-
6344.00905061319,-362.804131445140,-358.089605801872,-
414.606870788782,-473.202260924609,-531.797651060436,-
590.393041196263,-648.988431332090]
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%% Calculo de la curva de temperatura con los singletones del ctrl
%%% optimizados
    %% Inicializar variables
VALOR_ACTUAL_ERROR=0;
VALOR_ANTERIOR_ERROR=0;

VALOR_ANTERIOR_BNR=0;
VALOR_PREANTERIOR_BNR=0;

VALOR_ACTUAL_TEMP=0;
VALOR_TEMP_ANTERIOR=0;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% Inicio del bucle

for i=1:VALOR_TIEMPO_EJECUCION

```

```

VALOR_ACTUAL_ERROR=CURVA_TEMP_DESEADA(i)-VALOR_ACTUAL_TEMP;

VALOR_ACTUAL_VARIACION_ERROR=VALOR_ALFA1_CTRL*VALOR_ACTUAL_ERROR+VALOR
_ANTERIOR_ERROR;
CURVA_VARIACION_ERROR(i)=VALOR_ACTUAL_VARIACION_ERROR;
VALOR_ACTUAL_VARIACION_BNR=VALOR_ALFA2_CTRL*VALOR_ANTERIOR_BNR+VALOR_P
REANTERIOR_BNR;
CURVA_VARIACION_BNR(i)=VALOR_ACTUAL_VARIACION_BNR;

VALOR_FUZZY_VARIACION_ERROR=FUZIFICACION(VALOR_ACTUAL_VARIACION_ERROR,
PUNTOS_MAX_PERTENENCIA_VARIACION_ERROR);
VALOR_FUZZY_VARIACION_BNR=FUZIFICACION(VALOR_ACTUAL_VARIACION_BNR,PUNT
OS_MAX_PERTENENCIA_VARIACION_BNR);

CUMPLIMIENTO_REGLAS_CTRL=CUMPLIMIENTO(VALOR_FUZZY_VARIACION_ERROR,VALO
R_FUZZY_VARIACION_BNR);

VALOR_ACTUAL_CTRL=DEFUZIFICACION(CUMPLIMIENTO_REGLAS_CTRL,SINGLETONES_
CTRL_OPTIMIZADOS);

VALOR_ACTUAL_CTRL=SATURACION(VALOR_ACTUAL_CTRL,0,100);
CURVA_BNR(i)=VALOR_ACTUAL_CTRL;
CURVA_ERROROP(i)=VALOR_ACTUAL_ERROR;
VALOR_ACTUAL_BNR=VALOR_ACTUAL_CTRL;

VALOR_ACTUAL_TEMP=PLANTA_DIFUSA_OPTIMIZADA(VALOR_ACTUAL_BNR,VALOR_TEMP
_ANTERIOR,PUNTOS_MAX_PERTENENCIA_BNR,PUNTOS_MAX_PERTENENCIA_TEMP_ANT,S
INGLETONES_PLANTA_OPTIMIZADOS);
CURVA_SALIDA_TEMP_OPTIMIZADA(i)=VALOR_ACTUAL_TEMP;
VALOR_TEMP_ANTERIOR=VALOR_ACTUAL_TEMP;

%% Carga de los valores en las diferentes variables
VALOR_ANTERIOR_ERROR=VALOR_ACTUAL_ERROR;
VALOR_PREANTERIOR_BNR=VALOR_ANTERIOR_BNR;
VALOR_ANTERIOR_BNR=VALOR_ACTUAL_CTRL;
VALOR_TEMP_ANTERIOR=VALOR_ACTUAL_TEMP;
TIEMPO(i)=(i-1)*VALOR_TIEMPO_SAMPLEO;

end %fin del for principal

disp('FIN DE EJECUCION')

%fin del programa

```