

**SISTEMAS DE CONTROL BASADOS EN ALGORITMOS GENÉTICOS Y  
LÓGICA DIFUSA PARA LA APLICACIÓN EN PROCESOS  
INDUSTRIALES**



**JUAN CAMILO LÓPEZ HERNÁNDEZ**

**DIRECTOR**

**IVÁN FERNANDO MONDRAGÓN**

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA**

**BOGOTÁ D.C.**

**DICIEMBRE 2014**

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar doy gracias a Dios por bendecirme y darme la oportunidad de haber culminado esta fase de mi proceso académico, por ser mi apoyo en todo momento y darme la fortaleza y sabiduría para obtener este logro.

A mi familia y seres queridos; pues sin el apoyo de ellos, llegar a este punto no hubiese sido posible. Gracias por sus sacrificios y enseñanzas a lo largo de este camino.

Así mismo, quisiera agradecerle al Ingeniero Iván Mondragón por su interés en dirigir este trabajo de grado, por su confianza, colaboración y apoyo para que este proceso culminara de manera exitosa.

A los ingenieros Carlos Cotrino y Diego Patiño, por compartir sus conocimientos, ayudándome al desarrollo de este proyecto

Por último y no menos importante, a todos los miembros del Laboratorio del CTAI y a los miembros del grupo “*Visión Industrial Inteligente Aplicaciones a Sistemas de Manufactura Flexible y Vehículos Guiados*”, quienes me apoyaron a lo largo del proyecto, y facilitaron todo el equipo para la realización de esta tesis.

## CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN .....	9
2.	MARCO TEÓRICO.....	11
2.1.	Modelamiento de sistemas .....	11
2.1.1.	Modelamiento de un Sistema Térmico.....	11
2.2.	Teoría de control.....	13
2.2.1.	Acciones de Control.....	13
2.2.2.	Lógica Difusa .....	14
2.2.3.	Algoritmos Genéticos.....	16
3.	IDENTIFICACIÓN DE LA PLANTA.....	19
3.1.	Descripción de la Estación del Reactor del Sistema de Producción Modular de FESTO® 19	
3.1.1.	Configuración del PLC con ayuda de Simatic S7 configuración del controlador.....	21
3.1.2.	Relación de Temperatura en grados centígrados y la señal de salida del PLC .....	24
3.1.3.	Relación del Voltaje y la Señal de Salida del PLC .....	25
3.2.	Adquisición de Datos.....	25
3.3.	Análisis del Comportamiento y Caracterización de la Planta .....	27
3.4.	Verificación del modelo Planteado.....	28
4.	CONTROL .....	33
4.1.	Control Clásico.....	33
4.1.1.	Diseño del Control PI.....	33
4.1.2.	Resultados de Simulación.....	36
4.2.	Control con Lógica Difusa .....	37
4.2.1.	Diseño del Controlador Fuzzy Proporcional (FLP) .....	38

4.2.2.	Resultados de Simulación.....	40
4.2.3.	Diseño Controlador Fuzzy Proporcional Derivativo (FLPD).....	42
4.2.4.	Resultados de Simulación.....	44
4.3.	Controlador con Lógica Difusa Optimizado por medio de Algoritmos Genéticos.....	46
4.3.1.	Planteamiento del Problema de Optimización.....	46
4.3.2.	Diseño del Controlador Fuzzy Proporcional Optimizado por Algoritmos Genéticos.....	47
4.3.3.	Resultados de Simulación.....	49
5.	IMPLEMENTACIÓN DE LOS CONTROLADORES DISEÑADOS EN LA ESTACIÓN REACTOR DEL SISTEMA MODULAR DE PRODUCCIÓN .....	52
5.1.	Referencia igual a 35 °C .....	52
5.1.1.	Control PI.....	52
5.1.2.	Control Fuzzy Proporcional (FLP) .....	53
5.1.3.	Control Fuzzy Proporcional Derivativo (FLPD) .....	53
5.1.4.	Control Fuzzy Proporcional Optimizado por medio de Algoritmo Genéticos .....	54
5.2.	Referencia igual a 50 °C .....	55
5.2.1.	Control PI.....	55
5.2.2.	Control Fuzzy Proporcional (FLP) .....	55
5.2.3.	Control Fuzzy Proporcional Derivativo (FLPD) .....	56
5.2.4.	Control Fuzzy Proporcional Optimizado por medio de Algoritmo Genéticos (FLPGA).....	57
5.3.	Especificaciones de Robustez .....	59
5.3.1.	Rechazo a perturbaciones.....	59
6.	CONCLUSIONES .....	63
7.	BIBLIOGRAFÍA .....	65

## ANEXOS

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 2.1 Respuesta de un Sistema de Primer Orden a una entrada tipo paso [12].....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 2.2 Funciones de Pertenencia Triangular (ubicada el lado izquierdo) y Trapezoidal (ubicada al lado derecho) [15].....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 2.3 Funciones de Pertenencia Gaussiana. En el extremo izquierdo, se puede observar una función Gaussiana Simétrica, en el centro, se puede apreciar una función Gaussiana compuesta por dos funciones Gaussianas diferentes. Finalmente en el extremo derecho, se evidencia la función de Campana Generalizada [15].....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 2.4 Paso de la Implementación de un Algoritmo Genético [19].....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 3.1 Estación del Reactor del MPS-PA de FESTO ®[11].....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 3.2 Diagrama P&amp;ID de la estación Reactor [21].....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 3.3 Programa en Step7.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 3.4 Relación Temperatura y Constante de Salida del PLC.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 3.5 Relación Voltaje y Constante de Salida del PLC.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 3.6 Proceso de Comunicación del Protocolo OPC [24].....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 3.7 Perfil de Simulación de KEPServerEX.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 3.8 Temperatura del Líquido del Depósito a diferentes Voltajes.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 3.9 Comparación Modelo Teórico y Real para 3 V. Índice de FIT 93.29 %.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 3.10 Comparación Modelo Teórico y Real para 2.5 V. Índice de FIT 96.94 %.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 3.11 Comparación Modelo Teórico y Real para 2 V. Índice de FIT 91.15 %.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 3.12 Comparación Modelo Teórico y Real para 1.5 V. Índice de FIT 87.39 %.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 3.13 Comparación Modelo Teórico y Real para 9 V. Índice de FIT 92.60 %.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 3.14 Comparación Modelo Teórico y Real para 10 V. Índice de FIT 87.48 %.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 3.15 Comparación Índices de FIT.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 4.1 Respuesta Teórica del Sistema con el Control PI.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 4.2 Señal Bloque Signal Builder.....</i>	<i>37</i>

<i>Figura 4.3 Resultados de Simulación Control PI con cambio de Referencia .....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 4.4 Funciones de Pertenencia Señal de Entrada del controlador FD.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 4.5 Funciones de Pertenencia para la Señal de Salida Controlador FD.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 4.6 Gráfica de Control del Controlador FLP .....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 4.7 Respuesta Teórica del Sistema con el Controlador FLP .....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 4.8 Funciones de Pertenencia para la Señal de Entrada FLP corregida.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 4.9 Respuesta Teórica del Sistema con el nuevo Controlador FLP .....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 4.10 Resultados de Simulación Control FLP con cambio de Referencia .....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 4.11 Superficie de Control del FLPD.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 4.12 Funciones de Pertenencia Cambio del Error FLPD .....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 4.13 Respuesta Teórica del Sistema con el controlador FLPD 1 .....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 4.14 Corrección Funciones de Pertenencia Cambio del Error FLPD.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 4.15 Superficie de Control del Sistema Corregido.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 4.16 Respuesta Teórica del Sistema con el controlador FLPD corregido .....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 4.17 Progreso Generacional y mejor individuo del primer caso de Optimización.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 4.18 Progreso Generacional y mejor individuo del segundo caso de Optimización .....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 4.19 Respuesta Teórica del Sistema con el controlador FLP optimizado .....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 5.1 Implementación del Control PI en la Estación Reactor, Referencia igual a 35 °C .....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 5.2 Implementación del Control Difuso Proporcional en la Estación Reactor, Referencia igual a 35 °C .....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 5.3 Implementación del Control Difuso Proporcional Derivativo en la Estación Reactor, Referencia igual a 35 °C.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 5.4 Implementación del Control Difuso Proporcional Optimizado en la Estación Reactor, Referencia igual a 35 °C.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 5.5 Implementación del Control PI en la Estación Reactor, Referencia igual a 50 °C .....</i>	<i>55</i>

<i>Figura 5.6 Implementación del Control Difuso Proporcional en la Estación Reactor, Referencia igual a 50 °C</i> .....	56
<i>Figura 5.7 Implementación del Control Difuso Proporcional Derivativo en la Estación Reactor, Referencia igual a 50 °C</i> .....	56
<i>Figura 5.8 Implementación del Control Difuso Proporcional Optimizado en la Estación Reactor, Referencia igual a 50 °C</i> .....	57
<i>Figura 5.9 Respuesta del Control PI al cambio abrupto de Referencia</i> .....	59
<i>Figura 5.10 Respuesta del Control Difuso Proporcional al cambio abrupto de Referencia</i> .....	59
<i>Figura 5.11 Respuesta del Control Difuso Proporcional Derivativo al cambio abrupto de Referencia</i> .....	60
<i>Figura 5.12 Respuesta del Control Difuso Proporcional Optimizado al cambio abrupto de Referencia</i> .....	60
<i>Figura 5.13 Respuesta del Control PI al enfriamiento del Agua por Convección Natural</i> .....	61
<i>Figura 5.14 Respuesta del Control Difuso Proporcional al enfriamiento del Agua por Convección Natural</i> .....	61
<i>Figura 5.15 Respuesta del Control Difuso Proporcional Derivativo al enfriamiento del Agua por Convección Natural</i> .....	61
<i>Figura 5.16 Respuesta del Control Difuso Proporcional Optimizado al enfriamiento del Agua por Convección Natural</i> .....	61

## ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 2.1 Comportamiento de un Sistema Térmico a partir de los valores de <math>K_p</math>, <math>K_i</math> y <math>K_d</math> [13]</i> .....	14
<i>Tabla 3.1 Descripción de los Componentes de la estación Reactor</i> .....	21
<i>Tabla 3.2 Lista de Entrada del PLC</i> .....	23
<i>Tabla 3.3 Lista Salidas del PLC</i> .....	23
<i>Tabla 3.4 Propiedades del Dispositivo creado en KEPServerEX para la comunicación con la planta</i> .....	26
<i>Tabla 3.5 Funciones de Transferencia a partir de los Datos Experimentales</i> .....	28

*Tabla 4.1 Resumen del valor de los parámetros de la función ga de MATLAB®..... 48*

*Tabla 4.2 Recopilación de los Parámetros de Desempeño simulados para los Controladores Diseñados con Referencia igual a 50 °C..... 51*

*Tabla 4.3 Recopilación de los Parámetros de Desempeño simulados para los Controladores Diseñados con Referencia igual a 35 °C..... 51*

*Tabla 5.1 Recopilación de los Parámetros de Desempeño experimentales para los Controladores Diseñados con Referencia igual a 35 °C..... 57*

*Tabla 5.2 Recopilación de los Parámetros de Desempeño experimentales para los Controladores Diseñados con Referencia igual a 50 °C..... 58*

## 1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de los años, se han utilizado ampliamente controladores basados en leyes de control clásico como los Controladores Proporcional-Integral-Derivativo (PID). Este tipo de controladores tienen un buen desempeño cuando son aplicados a sistemas lineales, debido a la reducida información que se tiene de las variables del sistema.[1]

Por esta razón, se han desarrollado nuevas técnicas de control, especialmente aplicadas en procesos industriales, que permiten implementar controladores en situaciones donde no es posible obtener una descripción cualitativa completa tanto de las entradas como de las salidas del proceso[2]. Entre estas nuevas técnicas es posible destacar: *Lógica Difusa* y *Algoritmos Genéticos de Control*, las cuales se han implementado anteriormente en la universidad, por ejemplo[3], [4]. Estas técnicas se caracterizan por proporcionar una adaptación al lenguaje, permitiendo comprender los cuantificadores de cualidad para dar un valor a las inferencias, de esta manera se hace posible realizar una aproximación matemática a situaciones reales que no pueden ser definidas rigurosamente con la ayuda de esta ciencia.

Por otro lado, es importante señalar que hacer uso de las técnicas de control moderno para el diseño e implementación de sistemas de control, permite mejorar el desempeño alcanzado con las técnicas convencionales de control brindando la posibilidad de aprovechar de una mejor manera los recursos del planeta. A manera de ejemplo, es posible mencionar, que un lazo de control diseñado por medio de lógica difusa para un sistema de aire acondicionado, presenta un error en estado estacionario inferior al presentado en un controlador PID; adicionalmente, el coeficiente de desempeño (COP) del primer controlador es 0,44 puntos superior al obtenido por el segundo (Para mayor información, leer [5]). Por otro lado, en la Universidad Tecnológica PETRONAS de Malasia, se comparó el desempeño de un controlador de lógica difusa (FLC, por sus siglas en inglés) y un controlador PID, en el control de flujo de una planta. Con la ayuda de este trabajo, fue posible evidenciar que en este tipo de procesos, a pesar que los controladores PID presentan un buen desempeño, los controladores FLC, presentan una mejor estabilidad y un menor tiempo de establecimiento que los obtenidos con ayuda DE los primeros (Para mayor información leer,[6]).

Es así como en el presente trabajo se busca controlar las variables de proceso de la estación Reactor del sistema de producción modular de procesos automáticos (MPS-PA) de FESTO® [7] disponible en el CTAI mediante técnicas de control moderno a saber *Lógica Difusa* y *Optimización por medio de Algoritmos Genéticos*. Así mismo se busca implementar un control diseñado a través de técnicas de control clásico, para observar el desempeño dinámico de cada uno de los sistemas implementados.

Con el fin de desarrollar adecuadamente el objetivo propuesto, se proponen los siguientes objetivos específicos: Plantear, simular y verificar para una de las cuatro etapas del MPS-PA de FESTO®, un modelo matemático que la caracterice; diseñar algoritmos de control mediante técnicas clásicas y modernas de control para la estación seleccionada; por otro lado, se implementan cada uno de los sistemas de control diseñados en la estación seleccionada haciendo uso del protocolo OPC. Finalmente, se definen métricas para comparar el desempeño de cada uno de los controladores implementados.

Para poder cumplir con estos objetivos, en el *Capítulo 2* se realiza un breve resumen de los conceptos teóricos que son necesarios tener presentes para el desarrollo de las secciones posteriores. En el *Capítulo 3*, se efectúa un reconocimiento de la estación Reactor del sistema de producción modular de proceso automáticos de FESTO®, adicionalmente se presenta la configuración utilizada en el control lógico programable para poder caracterizar de una forma adecuada el sistema de interés.

Adicionalmente, en este capítulo se presenta un modelo matemático que describe el proceso principal realizado por esta estación.

Por su parte en el *Capítulo 4*, se presentan los diferentes procedimientos realizados para el diseño del controlador PI, los sistemas de control basados en Lógica Difusa con acción proporcional (FLP) y acciones tanto proporcional como derivativa (FLPD); y control basado en Lógica Difusa con acción proporcional optimizado por medio de Algoritmos Genéticos. Así mismo, en este capítulo, se presenta el resultado de las simulaciones de cada uno de estos controladores para dos referencias de temperatura.

Por otro lado, en el *Capítulo 5*, se presentan los resultados obtenidos al implementar los controladores en la estación Reactor, estableciendo como setpoint dos temperaturas diferentes; además en este capítulo, se presenta una comparación de los controladores diseñados por medio de algunos parámetros de desempeño (*tiempo de establecimiento, Máximo Sobrepico porcentual y Error en Estado Estacionario*) y por su rechazo a perturbaciones.

Finalmente, en el Anexo I se muestra la respuesta de la estación Reactor en lazo abierto sin sistema de control para diferentes valores de voltaje en el dispositivo encargado de elevar la temperatura del líquido del contenedor. Por su parte en el Anexo II, se presentan los diferentes diagramas de bloques de la aplicación de MATLAB® Simulink, utilizados a lo largo de este proyecto.

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, es importante resaltar

#### ❖ **Objetivo General**

Controlar las variables del proceso del sistema de producción modular (MPS) disponible en el CTAI mediante técnicas de control moderno y técnicas de control clásico, para observar el desempeño dinámico de cada uno de los algoritmos implementados.

#### ❖ **Objetivos Específicos**

- Plantear para una de las cuatro etapas del proceso de producción y embotellamiento de un líquido (Filtrado, Mezcla, Reacción y Embotellamiento) un modelo matemático que la caracterice.
- Diseñar algoritmos de control mediante técnicas modernas de control como lógica difusa y optimización por medio de algoritmos genéticos y técnicas clásicas de control como (PID) para la etapa seleccionada del proceso de producción.
- Simular y verificar el comportamiento y validez de los controladores diseñados.
- Implementar los algoritmos de control diseñados en la estación seleccionada del Sistema de Producción Modular (MPS), usando los Controladores Lógicos Programables (PLC) como puente de comunicación a través de un protocolo OPC.
- Definir las métricas (por ejemplo error estado estacionario) para la comparación del desempeño dinámico de los controladores, y aplicarlas para cada uno de los controladores desarrollados en la estación seleccionada.

## 2. MARCO TEÓRICO

**Resumen** *En esta sección se considera de una forma breve el Modelamiento de un Sistema Dinámico, el Modelo de primer orden de un Sistema Térmico, y el diseño de controladores por medio de técnicas clásicas y algunas técnicas modernas. Es importante señalar que debido a la extensión de algunos de estos temas, se referenciarán a textos especializados en los cuales se puede consultar el desarrollo de la teoría de una forma más detallada.*

### 2.1. Modelamiento de sistemas

El modelamiento de sistemas a través de expresiones matemáticas, se realiza para describir el sistema que es objeto de estudio de la forma más precisa, para poder comprender de una mejor manera la dinámica del mismo para así analizarlo y diseñar controladores cuyas directrices de diseño se adecuen correctamente al sistema. Es importante tener en cuenta que no existe un modelo matemático único que permita representar un sistema, ya que éste puede ser abordado desde diferentes perspectivas, permitiendo la formulación de diferentes modelos según sea el criterio de análisis.

Cuando se obtiene un modelo matemático, “en ocasiones resulta necesario ignorar ciertas propiedades físicas inherentes al sistema. En particular, si se desea obtener un modelo a partir de ecuaciones diferenciales, es necesario ignorar ciertas no linealidades y parámetros distribuidos que pueden estar presentes en el sistema dinámico”[8].

Una forma de representar un sistema lineal e invariante con el tiempo, consiste en determinar la Función de Transferencia del Sistema, la cual se define como la relación entre la transformada de Laplace de la señal de salida y la transformada de Laplace de la señal de entrada, asumiendo que las condiciones iniciales del sistema son iguales a cero. Por lo tanto en este tipo de representación no se tiene en cuenta información relacionada con la estructura interna del sistema. [9].

#### 2.1.1. Modelamiento de un Sistema Térmico

Cuando se analiza un sistema, es necesario identificar los parámetros y las variables que afectan la dinámica del sistema que es objeto de análisis. Para el caso de un sistema térmico es posible identificar las siguientes variables: *la temperatura*  $T$  [°C], *el cambio de calor por unidad de tiempo*, el cual constituye la potencia transferida al sistema  $q = C * \dot{T}$ , y la *Capacitancia Térmica*  $C$  que se define como  $C = \rho * c * V$  donde  $\rho$  es la densidad del material,  $c$  es el calor específico del material y  $V$  el volumen. Así mismo en este proceso, influyen otros parámetros como lo son: *el calor específico del líquido*  $c$  [ $\frac{J}{kg * K}$ ] el cual hace referencia a la cantidad de calor que se debe suministrar a un cuerpo para elevar su temperatura en un grado centígrado; y la *resistencia Térmica* que se define como la relación entre el flujo de calor y el gradiente del vector de temperatura [10].

Por otro lado es importante considerar que existen diferentes formas para producir un intercambio de temperatura a saber: conducción, convección y radiación.

En el caso de la Planta del Reactor del Sistema de Producción Modular de FESTO® [11], la mayor transferencia de potencia se realiza por medio de convección, la cual se caracteriza porque el líquido

se expone a la superficie de un sólido. Para este tipo de transferencia de calor, la tasa de flujo de calor se define como

$$q = hA\Delta T$$

*Ecuación 2.1*

Donde

- ❖  $h$  es el coeficiente de transferencia de calor por convección.
- ❖  $A$  es el área de contacto
- ❖  $\Delta T$  es el diferencia de temperatura entre la superficie del sólido y el líquido

De esta manera teniendo en cuenta la Ecuación 2.1 y la definición realizada al inicio de la Sección 2.1.1 sobre la tasa de flujo de calor, haciendo algunas manipulaciones algebraicas, es posible afirmar que un sistema térmico puede ser descrito por la siguiente función de transferencia [12]

$$H(s) = \frac{k}{\tau * s + 1} * e^{-T0*s}$$

*Ecuación 2.2*

Donde

- ❖  $k$  es una ganancia del sistema
- ❖  $\tau$  la constante de tiempo del sistema
- ❖  $T0$  es el tiempo muerto.

Teniendo en cuenta la Ecuación 2.2, es posible afirmar que un Sistema Térmico puede ser modelado como un Sistema de Primer Orden. La gráfica de este tipo de sistemas se describe a continuación

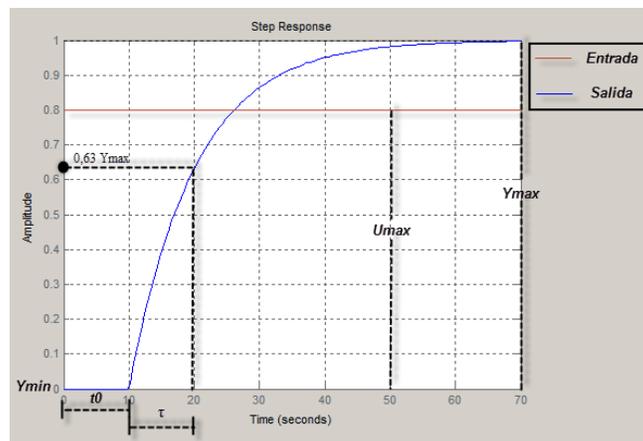


Figura 2.1 Respuesta de un Sistema de Primer Orden a una entrada tipo paso [12]

A partir de la gráfica anterior, los parámetros de la Ecuación 2.2, se definen de la siguiente manera

- ❖  $T_0$  se define como el tiempo en que se demora el sistema en reaccionar al excitación inicial.
- ❖  $\Delta Y$  se define como  $Y_{max}-Y_{min}$ .  $Y_{max}$  corresponde a la amplitud en la cual la salida del sistema alcanza un estado estable. Por su parte  $Y_{min}$  es la salida inicial del sistema.
- ❖  $\Delta U$  se define como  $U_{max}-U_{min}$ .  $U_{max}$  corresponde a la amplitud de la entrada del sistema. Por su parte  $U_{min}$  es la amplitud inicial de la señal de entrada al sistema.
- ❖  $\tau$  se define como el tiempo en el cual la amplitud del sistema es aproximadamente igual al 63% de la amplitud máxima una vez que el sistema ha reaccionado a la excitación inicial.
- ❖  $k = \frac{\Delta Y}{\Delta U}$

## 2.2. Teoría de control

El diseño de un sistema de control tiene como objetivo determinar la configuración, las especificaciones y la identificación de los parámetros importantes de un sistema cualquiera con el fin de satisfacer una necesidad determinada.

De esta manera, en el proceso de diseño de un sistema de control es posible identificar las siguientes etapas [9]

### 1. Definición

- I. Establecer los objetivos que se desean alcanzar con el controlador.
- II. Identificar las variables que se van a controlar.
- III. Definir las métricas que se utilizarán como parámetros para medir el desempeño del Sistema diseñado.

### 2. Modelamiento

- I. Definir el Sistema.
- II. Encontrar un modelo Matemático que represente al Sistema.

### 3. Diseño y Comprobación

- I. Diseñar el Sistema de Control, teniendo en cuenta los objetivos planteados.
- II. Simular el Controlador diseñado.
- III. Realizar los ajustes pertinentes en caso de ser necesario.
- IV. Implementar el Sistema de Control modificado en el Sistema Real.
- V. Analizar los resultados obtenidos.

#### 2.2.1. Acciones de Control

A lo largo de los años, se han considerado tres tipos de acciones para la realización de un sistema de control a saber: Acción Proporcional, Acción Derivativa y Acción Integral [12].

En la primera de ellas, la salida del control es proporcional a la entrada del controlador, de esta manera se transforma en un amplificador de entrada variable. Este tipo de acciones de control resultan ser de fácil implementación pero no corrigen el error en estado estacionario.

En la Acción Derivativa la respuesta del control se basa en la velocidad de cambio del error. Por esta razón, este tipo de acción se caracteriza porque tiene un comportamiento eficaz durante periodos transitorios, sin embargo amplifica las señales de ruido y puede provocar un efecto de saturación en los actuadores del sistema.

Finalmente en la Acción Integral la salida del sistema de control, se basa en la acumulación del error. Este tipo de acción permite corregir el error en estado estacionario.

De esta manera un controlador PID integra todas las propiedades de los tres tipos de Acciones. La función de transferencia de este tipo de controlador se encuentra dada por la siguiente expresión

$$C(s) = Kp + \frac{Ki}{s} + sKd$$

*Ecuación 2.3*

Donde

- ❖  $Kp$  es la constante Proporcional.
- ❖  $Kd$  es la constante Derivativa.
- ❖  $Ki$  es la constante Integral.

La Ecuación 2.3 puede ser rescrita de la siguiente manera

$$C(s) = \frac{s^2Kd + sKp + Ki}{s}$$

*Ecuación 2.4*

Adicionalmente es importante tener en cuenta que a partir de los valores de cada una de las constantes correspondientes a las acciones de control, se van a tener diferentes comportamientos, como se muestra en la Tabla 2.1

Constante	Pequeño	Adecuado	Grande
<b>Kd</b>	Inestabilidad	Corrige Perturbación	Corrección Lenta de la Perturbación
<b>Ki</b>	Offset	Corrige Offset	Oscilación
<b>Kp</b>	Offset Alcance a SP lento	Corrige Picos y Oscilaciones	Pico y Oscilación

*Tabla 2.1 Comportamiento de un Sistema Térmico a partir de los valores de  $Kp$ ,  $Ki$  y  $Kd$  [13]*

### 2.2.2. Lógica Difusa

Durante muchos años, se han diseñado algoritmos computacionales, que sólo permiten tomar decisiones basadas en dos posibles valores lógicos a saber: Verdadero/Falso, Uno Lógico/ Cero Lógico o simplemente Si/No. Por su parte, los algoritmos basados en Lógica Difusa tienen su fundamento en los conjuntos difusos, los cuales se caracterizan porque la pertenencia de un objeto a

un conjunto es gradual, es decir puede no pertenecer, pertenecer completamente o pertenecer parcialmente; es así como este tipo de algoritmos permiten tomar decisiones en todo el rango de valores entre cero (No pertenece) y uno (Pertenece completamente). [14]

### 2.2.2.1. Funciones de Pertenencia

Las funciones de pertenencia son una traza que define cómo un determinado objeto es mapeado a un grado de pertenencia entre cero y uno. Este tipo de curvas son definidas por el diseñador y no tienen restricción de forma. No obstante las más usadas se muestran a en la Figura 2.2 y la Figura 2.3.

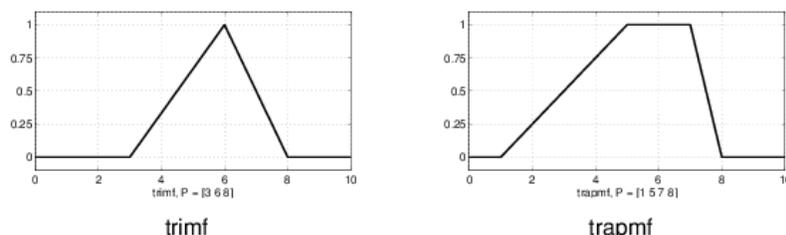


Figura 2.2 Funciones de Pertenencia Triangular (ubicada el lado izquierdo) y Trapezoidal (ubicada al lado derecho) [15]

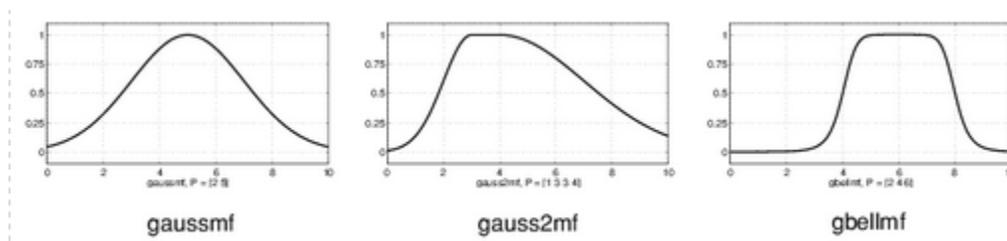


Figura 2.3 Funciones de Pertenencia Gaussiana. En el extremo izquierdo, se puede observar una función Gaussiana Simétrica, en el centro, se puede apreciar una función Gaussiana compuesta por dos funciones Gaussianas diferentes. Finalmente en el extremo derecho, se evidencia la función de Campana Generalizada [15]

### 2.2.2.2. Operaciones Lógicas

Cuando se comparan dos elementos pertenecientes a un conjunto Difuso, éstos pueden tener cualquier valor entre cero y uno. Por esta razón no es válido aplicar las Operaciones Lógicas convencionales.

Para poder operar dos elementos de este tipo, se definen las operaciones de *Unión*, *Intersección* y *Complemento* como se muestra a continuación

- ❖ *La Unión entre A y B*, se define como el Máximo entre el grado de pertenencia de A y el grado de pertenencia de B.
- ❖ *La Intersección entre A y B*, se entiende como el Mínimo entre el grado de pertenencia de A y el grado de pertenencia de B.
- ❖ *El Complemento de A*, se define como uno menos el grado de pertenencia de A [16].

### 2.2.2.3. Reglas Difusas

Los controladores basados en Lógica Difusa son construidos por medio de reglas que relacionan las funciones de pertenencia de la señal de entrada con un conjunto independiente de funciones de pertenencia de la señal de salida. Estas reglas se ejecutan en paralelo, y son escritas bajo el siguiente formato

*If x is A then y is B*

Donde

- ❖  $x$  es una entrada al controlador.
- ❖  $A$  es un Conjunto Difuso definido para la Variable de Entrada  $x$ .
- ❖  $y$  es la salida del controlador.
- ❖  $B$  es un conjunto Difuso definido para la Variable de Salida  $y$ .

La parte izquierda, es decir “ $x$  is  $A$ ” de esta expresión recibe el nombre de antecedente o premisa y la parte derecha, “ $y$  is  $B$ ”, se conoce como consecuencia [16].

### 2.2.3. Algoritmos Genéticos

Se han desarrollado nuevos métodos de optimización que son conceptualmente diferentes a las técnicas de programación matemática tradicional. Este conjunto de métodos recibe el nombre de Técnicas Modernas o No tradicionales de optimización.

Éstos se caracterizan porque son inspirados en algunas propiedades y comportamientos biológicos y/o moleculares, sistemas neurológicos y los enjambres de insectos.

Una de estas técnicas modernas, son los Algoritmos Genéticos los cuales se basan en los principios de genética humana y el proceso de Selección Natural[17].

Este tipo de método difiere de los algoritmos tradicionales por cuanto

- ❖ Usan los valores de la función objetivo, pero no utilizan las derivadas en el proceso de búsqueda de la solución óptima.
- ❖ Las variables de diseño se representan en una cadena de caracteres, lo cual permite que este tipo de método sea aplicable tanto a problemas en el dominio discreto como problemas en el dominio continuo.
- ❖ Estos algoritmos usan técnicas aleatorias de búsqueda y la información de la generación actual para encontrar el mínimo de la función objetivo [18].

#### 2.2.3.1. Representación de la Población

Para representar cada una de las variables de diseño del problema de optimización, se han creado diferentes formas de realizar este procedimiento, las más usadas son la *Codificación Binaria* y la *Combinación de Valores*.

En la primera de ellas, se modelan los estados de las variables de diseño como un uno lógico o un cero lógico. Por su parte en la *Codificación de Valores*, se asigna un número real a los diferentes estados de las variables de decisión. A estos valores se le denomina *Genes*.

De esta manera, un *Cromosoma* constituye la unión de diferentes *Genes*, estos últimos son determinados por la cantidad de variables de diseño que tenga un problema dado, dicho en otras palabras, si el problema que se desea optimizar tiene cuatro variables de decisión, entonces un *Cromosoma*, se encuentra constituido por cuatro *Genes*.

Ahora bien, la *Población* se define como la unión de un número determinado de *Cromosomas*. Normalmente el tamaño de la *Población* se selecciona de tal forma que sea entre el doble y el cuádruple de *Genes* que tiene un *Cromosoma*.

### 2.2.3.2. Operadores Genéticos

#### Selección

Este operador genético, se encarga de seleccionar los *Cromosomas* de la población actual y copiarlos a un conjunto que utilizará el operador genético denominado *cruce*. Para el proceso de selección de los *Cromosomas*, no existe un criterio único de escogencia, sin embargo usualmente éstos son clasificados de acuerdo con el valor de la función objetivo (*fitness*), al ser evaluada en cada uno de los cromosomas, este valor le da a los *Cromosomas* una probabilidad de ser escogidos, así un *Cromosoma* cuyo valor de *fitness* sea menor, tendrá mayor probabilidad de ser escogido que uno cuyo *fitness* asociado sea mayor.

#### Cruce

Una vez acabado el proceso de *Selección*, se realiza el *cruce*. El objetivo de este operador genético, consiste en intercambiar información entre los individuos del conjunto seleccionado. Es así como, normalmente se escogen al azar dos miembros de dicho conjunto y algunos *Genes* son intercambiados entre los dos *Cromosomas* escogidos. El resultado de este intercambio de formación genética se conoce como *Hijo*. De esta manera al realizar el *cruce* entre diferentes *Cromosomas*, se crean nuevos *Hijos* los cuales crearán la nueva *Generación* de *Cromosomas* del problema.

Es importante tener en cuenta que el proceso de *cruce* se realiza de forma aleatoria, por esta razón, no es posible conocer de antemano su resultado, dicho en otras palabras, existe la probabilidad que el *Hijo*, tenga un valor de *fitness* más bajo que el de sus padres (*el objetivo que se desea*), como también puede ocurrir que tenga un valor de *fitness* más alto. Ahora bien aquellos miembros de la nueva *Generación* que tengan un valor de *fitness* más bajo, son los que tendrán una mayor probabilidad de sobrevivir y pasar a la siguiente *Generación*. [18].

#### Mutación

Al finalizar el proceso de *cruce*, si puede realizar la operación de *Mutación*. Este operador, tiene como propósito cambiar al azar uno o varios *Genes* de cada uno de los *Hijos* de la nueva *Generación*. Es así como en la *Mutación*, primero se elige algún valor dentro del espacio de diseño de las variables de decisión, posteriormente se escoge el *Gen* o los *Genes* que van a ser

sustituido(s) por el valor (los valores) determinado en el paso inicial. Finalmente el *Gen* (los *Genes*) es (son) cambiado(s) siguiendo una probabilidad definida a priori a la implementación del método de optimización.

### 2.2.3.3. Algoritmo

El proceso que se realiza en una iteración del Algoritmo Genético para optimizar una función objetivo se puede resumir en la Figura 2.4

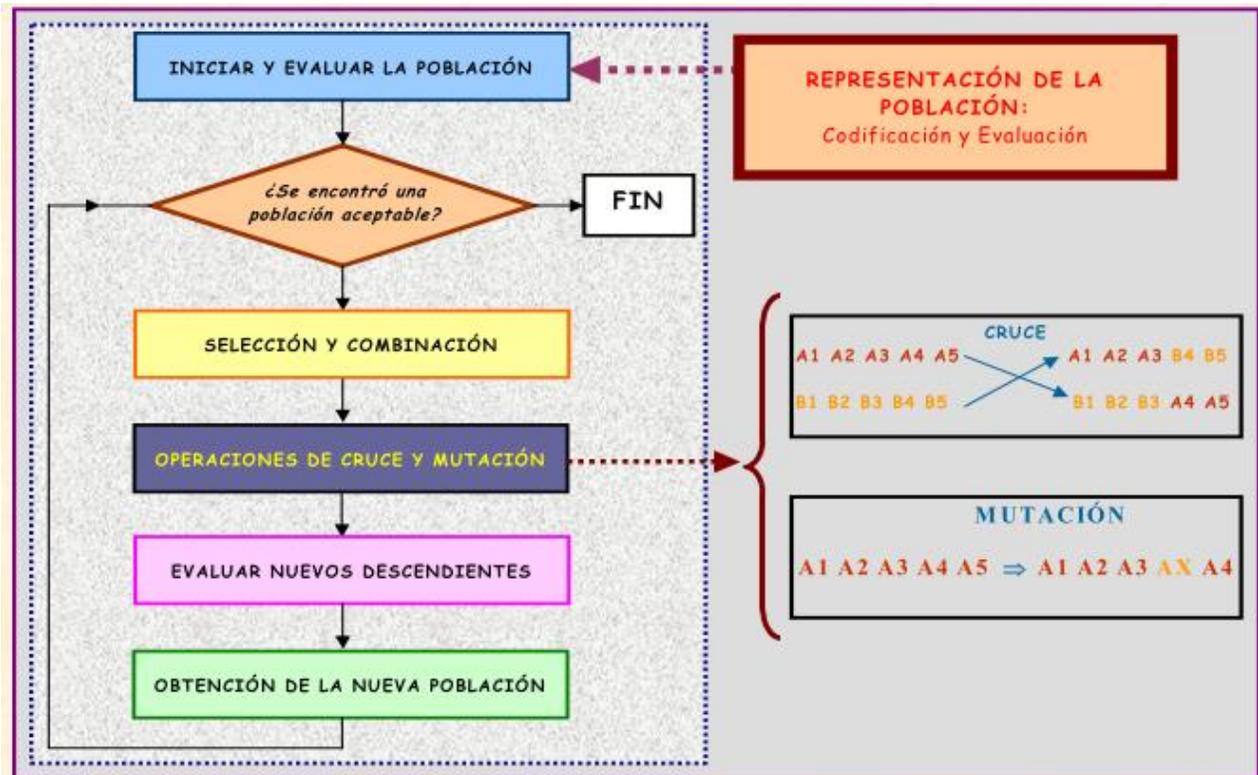


Figura 2.4 Paso de la Implementación de un Algoritmo Genético [19]

- ❖ *Paso Inicial* Codificar la *Población* y definir una *Población inicial*, definir la tasa de cruce y reproducción; establecer la cantidad máxima de la población y de las Generaciones que se desean; definir la tolerancia que permite considerar una *Población* como aceptable.
- ❖ *Paso 1* Evaluar el valor de *fitness* de la *Población* inicial. Si esta es aceptable se detiene el Algoritmo, en caso de no ser así, ir al *Paso 2*.
- ❖ *Paso 2* se realiza el proceso de *Reproducción* (Selección y Combinación)
- ❖ *Paso 3* Se realizan las operaciones de *Cruce* y *Mutación*.
- ❖ *Paso 4* Se evalúan el valor de *fitness* de cada uno de los nuevos descendientes o *Hijos*.
- ❖ *Paso 5* Se obtiene la nueva *Población*. Si esta es aceptable se detiene el Algoritmo, en caso de no ser así, se devuelve al *Paso 2*.

### 3. IDENTIFICACIÓN DE LA PLANTA

**Resumen** *En este capítulo se presentan las diferentes etapas que permitieron la adquisición de datos para poder realizar la caracterización de la Estación del Reactor del Sistema de Producción Modular de FESTO®, con el fin de plantear los sistemas de control del Capítulo 4. Es así como se exponen el programa que se instala en el PLC, los perfiles de Simulación del Servidor y Cliente OPC. Finalmente se presenta un modelo teórico de la planta, determinando el error de éste con la planta real para comprobar su validez.*

#### 3.1. Descripción de la Estación del Reactor del Sistema de Producción Modular de FESTO®

El Sistema de Producción Modular de Proceso Automáticos (MPS-PA) de FESTO® permite “la enseñanza de técnicas de automatización implementadas de la misma manera como se realiza en la industria hoy en día. Los procesos modernos de automatización utilizan un control en lazo cerrado, el cual recibe constantemente información de diferentes sensores para mantener un control preciso de un proceso de producción continuo y complejo” [20].

Una de las estaciones que hacen parte este sistema, es la estación del Reactor. En esta estación, se busca regular la temperatura del líquido almacenado en el depósito principal, para poder transportar este líquido a la siguiente estación del proceso.



Figura 3.1 Estación del Reactor del MPS-PA de FESTO ®[11]

El diagrama P&ID de esta planta se muestra en la Figura 3.2

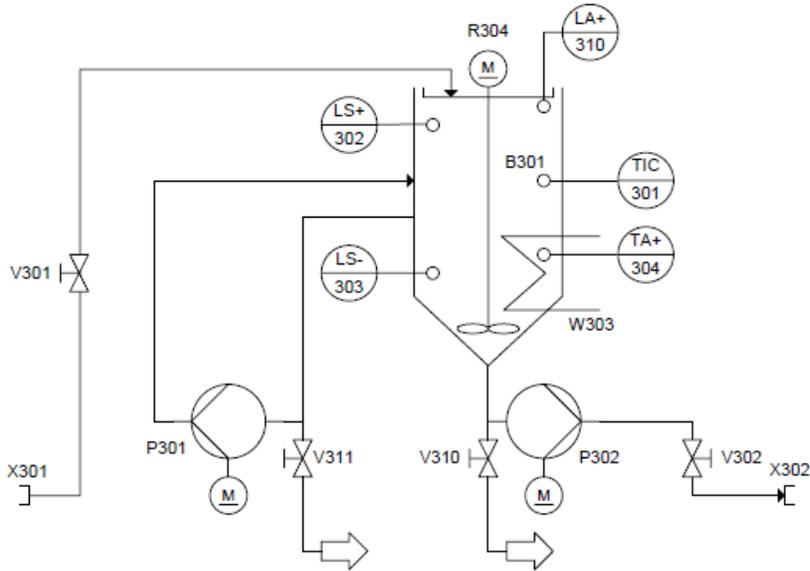


Figura 3.2 Diagrama P&ID de la estación Reactor [21]

A partir de la Figura 3.2, es posible identificar los siguientes componentes de la estación objeto de estudio

COMPONENTE	DESCRIPCIÓN
V311	❖ Válvula Manual
V301	
V302	
303	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Interruptor de Nivel que indica el nivel mínimo del depósito principal</li> <li>❖ Instrumento Instalado sobre la planta</li> <li>❖ Sensor Capacitivo</li> </ul>
302	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Interruptor de Nivel que indica el nivel máximo del depósito principal</li> <li>❖ Instrumento Instalado sobre la planta</li> <li>❖ Sensor Capacitivo</li> </ul>
310	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Alarma de Nivel, indica que el nivel del depósito principal es igual a 9,5 lts</li> <li>❖ Instrumento Instalado sobre la planta</li> <li>❖ Sensor de contacto tipo flotador</li> </ul>
301	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Controlador indicador de Temperatura, se encarga de determinar la Temperatura del líquido</li> <li>❖ Instrumento instalado sobre la planta</li> <li>❖ Resistencia Pt 100</li> </ul>

<b>P301</b>	❖ Bomba hidráulica controlada por un motor de corriente directa
<b>P302</b>	❖ Bomba hidráulica controlada por un motor de corriente directa
<b>R304</b>	❖ Mezclador en forma de Hélice controlado por un motor corriente directa
<b>304</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Resistencia controlada por voltaje encargada de elevar la temperatura del líquido <ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Instrumento instalado sobre la planta</li> </ul> </li> <li>❖ Este dispositivo puede operar con una entrada análoga o una entrada digital.</li> </ul>

*Tabla 3.1 Descripción de los Componentes de la estación Reactor*

### **3.1.1. Configuración del PLC con ayuda de Simatic S7 configuración del controlador**

Teniendo en cuenta que el programa pre-determinado de la MPS-PA Reactor, tiene bloques que no se pueden modificar ni observar su contenido, con ayuda de la herramienta computacional *Simatic S7* de SIEMENS®, se elimina este programa base, para evitar alguna acción de control por parte del Control Lógico Programable (PLC, por sus siglas en inglés) de la estación.

De esta manera, el nuevo programa escrito en el PLC, sólo tiene un bloque de configuración (OB1), éste en lenguaje ladder se muestra a continuación (es importante señalar que se utilizó la nomenclatura de acuerdo con la norma alemana).

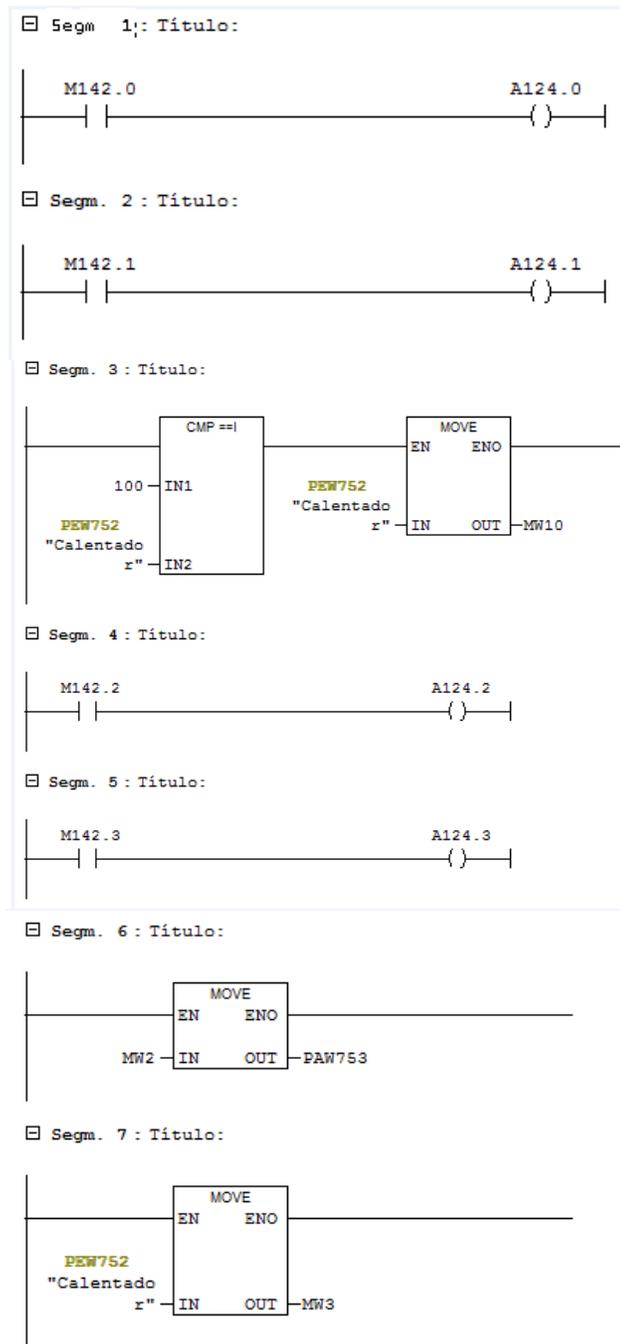


Figura 3.3 Programa en Step7

Teniendo en cuenta lo anterior, las Entradas y Salidas del programa con su respectivo elemento físico que controlan, se muestran en la Tabla 3.2 y la Tabla 3.3

<b>Elemento Físico que Opera</b>	<b>Dirección correspondiente en el PLC</b>	<b>Tipo de Dato</b>
Sensor de Nivel Mínimo	I124.2	Digital
Sensor de Nivel Máximo	I124.1	Digital
Activación del Calentador	M142.0	Digital
Bomba de Circulación del Líquido del Depósito	M142.1	Digital
Motor encargado de Llevar el líquido del Depósito a la siguiente estación	M142.2	Digital
Motor encargado de la Mezcla del Líquido del Depósito	M142.3	Digital
Voltaje en el Calentador	MW2	Análoga
Temperatura	PAQ752	Análoga

*Tabla 3.2 Lista de Entrada del PLC*

<b>Elemento Físico que Opera</b>	<b>Dirección correspondiente en el PLC</b>	<b>Tipo de Dato</b>
Activación del Calentador	E124.0	Digital
Bomba de Circulación del Líquido del Depósito	E124.1	Digital
Motor encargado de Llevar el líquido del Depósito a la siguiente estación	E124.2	Digital
Motor encargado de la Mezcla del Líquido del Depósito	E124.3	Digital
Voltaje en el Calentador	PEW753	Análoga
Temperatura	PEW752	Análoga

*Tabla 3.3 Lista Salidas del PLC*

### 3.1.2. Relación de Temperatura en grados centígrados y la señal de salida del PLC

A partir de las variables creadas en el nuevo programa del PLC, se procede a construir el perfil de simulación del OPC Server (en la Sección 3.2, se amplía el concepto de OPC) para verificar que las variables se encuentren relacionadas de una forma adecuada. En las pruebas realizadas, se observa que la salida del PLC encargada de indicar la temperatura del líquido en el depósito no era la misma que la lectura realizada de la variable temperatura del depósito desplegada en la pantalla (JUMO 500 [22]) ubicada en la parte superior de la planta. Esta pantalla en las condiciones predeterminadas de fábrica, es la encargada de realizar las diferentes acciones para controlar la temperatura del líquido al interior del contenedor, gracias al controlador PID que tienen.

Lo anterior tiene lugar por cuanto el programa predeterminado de la planta contiene unos bloques que convierten la señal de entrada del PLC (PAW752) a grados centígrados, retornando el resultado de esta transformación por medio de la señal (PEW752).

Por lo anterior, es necesario cargar el programa predeterminado de la estación del Reactor, con el fin de poder diseñar una función que permita convertir la señal que se está leyendo del PLC a grados centígrados.

De esta manera, fue posible encontrar la Ecuación 3.1 para describir la relación existente entre la constante del PLC y la temperatura en grados centígrados

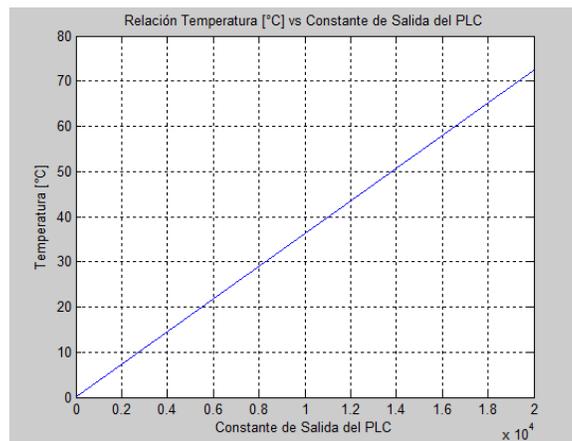
$$y = 0.0036168x + 0.00001748$$

*Ecuación 3.1*

Donde

- ❖  $y$  es la temperatura en grados centígrados.
- ❖  $x$  es la señal de salida del PLC.

A partir de la Ecuación 3.1



*Figura 3.4 Relación Temperatura y Constante de Salida del PLC*

### 3.1.3. Relación del Voltaje y la Señal de Salida del PLC

Una situación similar a la presentada en la Sección anterior, tuvo lugar en el momento de variar el voltaje del dispositivo encargado de elevar la temperatura del depósito. Por ello, fue necesario encontrar la relación que existía entre la constante que se escribía en la variable por medio del OPC Server y el voltaje que era aplicado al calentador.

A partir de los datos obtenidos, se deduce la siguiente relación.

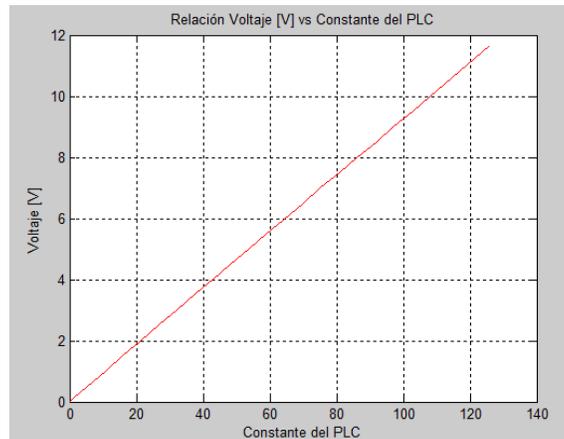


Figura 3.5 Relación Voltaje y Constante de Salida del PLC

Esta relación se encuentra descrita por la Ecuación 3.2 que se presenta a continuación

$$y = 10.828x - 0.3955$$

Ecuación 3.2

Es importante tener en cuenta que con el fin de evitar algún comportamiento indeseado por parte del sistema, las constantes inferiores a cero se suponen como cero.

### 3.2 Adquisición de Datos

El estándar de comunicación OPC es usado comúnmente por sistemas de información industrial para intercambiar datos de un proceso. Hoy en día este intercambio de datos se realiza usando SOAP (por sus siglas en inglés Simple Object Access Protocol), el cual es un protocolo que une dos tecnologías XML y HTTP (Protocolo de Transporte), permitiendo adquirir los datos a través de Ethernet. [23]

El proceso de comunicación se realiza de la siguiente manera



Figura 3.6 Proceso de Comunicación del Protocolo OPC [24]

Es así como el Servidor OPC, es el software encargado de convertir el protocolo de comunicación usado por el PLC en un protocolo OPC. Por su parte el Cliente OPC, usa el OPC Server para adquirir y enviar datos al Hardware involucrado en el proceso.

Para el desarrollo de los experimentos, el servidor OPC utilizado es el programa KEPServerEX® versión 5 con licenciamiento de prueba. En este programa, se siguen los siguientes pasos para poder realizar la comunicación deseada

1. Definir un nombre al Canal y el Driver que se va a utilizar para realizar al proceso de comunicación. Las otras propiedades se pueden dejar por defecto a menos que exista alguna consideración que lleve a su modificación. Para este caso el canal se denominó Reactor y el Driver escogido fue Siemens TCP/IP Ethernet.
2. Se crea un nuevo dispositivo y se definen cada una de las propiedades del mismo. Para este caso.

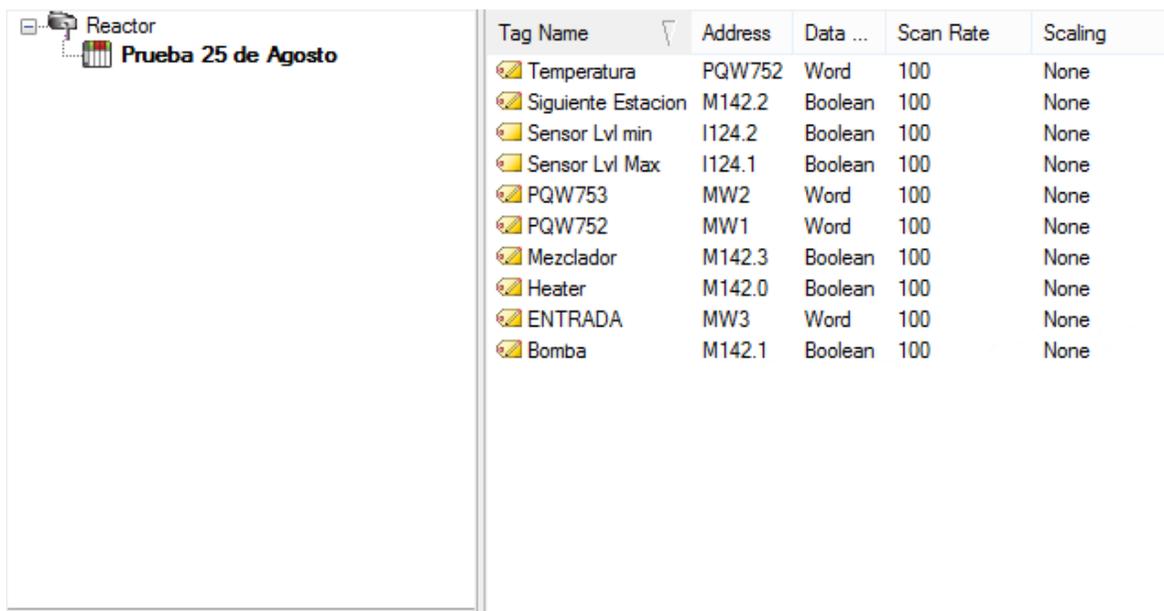
Propiedad	Característica
Nombre	Prueba 25 de Agosto
Modelo del Dispositivo	S7-300
ID del Dispositivo	10.1.124.68

Tabla 3.4 Propiedades del Dispositivo creado en KEPServerEX para la comunicación con la planta

En los parámetros restantes, se seleccionó la opción por defecto.

3. Se hace un listado de las entradas y salidas del sistema con su respectiva dirección en el PLC. Para este caso esta lista se crea con base en la Tabla 3.2 y la Tabla 3.3.

De esta manera, el perfil de simulación resultante se presenta en la Figura 3.7



Tag Name	Address	Data ...	Scan Rate	Scaling
Temperatura	PQW752	Word	100	None
Siguiente Estacion	M142.2	Boolean	100	None
Sensor Lvl min	I124.2	Boolean	100	None
Sensor Lvl Max	I124.1	Boolean	100	None
PQW753	MW2	Word	100	None
PQW752	MW1	Word	100	None
Mezclador	M142.3	Boolean	100	None
Heater	M142.0	Boolean	100	None
ENTRADA	MW3	Word	100	None
Bomba	M142.1	Boolean	100	None

Figura 3.7 Perfil de Simulación de KEPServerEX

Por su parte, el cliente OPC usado es la aplicación de MATLAB® Simulink, en donde se crea el diagrama en bloques que se presenta en la Sección A del Anexo II, para poder leer y almacenar los datos necesarios para las simulaciones que se desean realizar.

### 3.2.1 Datos Obtenidos

Teniendo en cuenta la configuración descrita en la Sección 3.4.1., se realizaron las pruebas correspondientes para una entrada equivalente a 1.5 V, 2 V, 2.5 V, 3 V, 4 V, 9 V, y 10 V cuando la cantidad del líquido en el depósito era igual a 3 lts de agua.

Es importante recordar que teniendo en cuenta lo enunciado en la Sección 2.1 y 2.2, el objetivo de las simulaciones es observar el tiempo en el cual con diferentes valores de voltaje y un mismo volumen de un solo tipo de líquido, se estabiliza la temperatura del sistema.

Los resultados obtenidos en grados centígrados se presentan a continuación

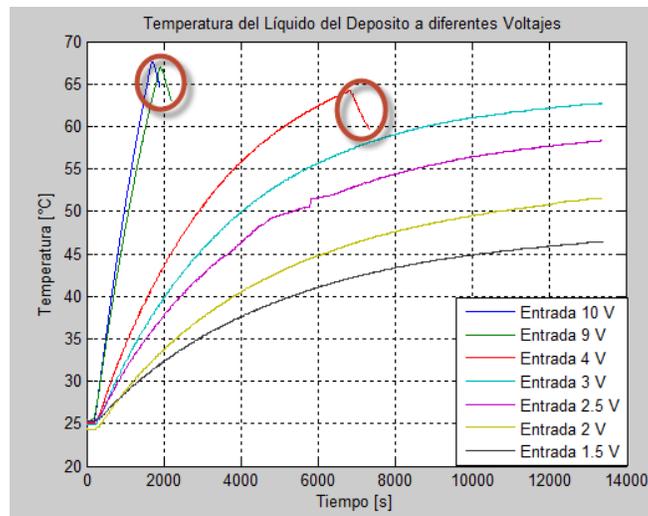


Figura 3.8 Temperatura del Líquido del Depósito a diferentes Voltajes

Los resultados de cada una de las gráficas por separado, se presentan en el Anexo I.

### 3.3 Análisis del Comportamiento y Caracterización de la Planta

De acuerdo con el comportamiento observado en la Figura 3.8, se puede apreciar que la planta tiene un sistema de protección cuando la temperatura es cercana a 67 °C que desactiva el dispositivo encargado de elevar la temperatura, lo cual genera que la temperatura del sistema comience a disminuir hasta que se desactiva el sistema de seguridad y el dispositivo vuelve a calentar el líquido (este comportamiento es señalado en estas gráficas por medio de un círculo de borde rojo).

Debido a lo anterior, no es conveniente determinar la función de transferencia con ayuda de las gráficas correspondientes a una entrada igual a 10 V, 9 V o 4 V, en razón a que no se conoce la temperatura y el tiempo en los cuales el sistema alcanza a estabilizarse en razón a que la protección del mismo actúa antes de llegar a este punto.

Por lo anterior, para determinar la función de transferencia del sistema se consideran los datos obtenidos cuando la entrada es inferior a 3 V, porque a pesar que no se observa una estabilización de la temperatura del sistema, para estos valores de entrada no se evidencia un cambio de temperatura superior a tres grados centígrados en la última hora de simulación. Por lo anterior, es posible afirmar que el sistema ha alcanzado un punto de equilibrio. Así a partir de lo expuesto la Sección 2.1.1. Se obtiene

Voltaje de Entrada [V]	Función de Transferencia
3	$Gp(s) = \frac{3493.33}{3473s + 1} e^{-213s}$
2.5	$Gp(s) = \frac{3667.2}{3743s + 1} e^{-210s}$
2	$Gp(s) = \frac{3815.32}{4205.5s + 1} e^{-235s}$
1.5	$Gp(s) = \frac{3872}{4293s + 1} e^{-244.5s}$

Tabla 3.5 Funciones de Transferencia a partir de los Datos Experimentales

Haciendo un promedio de cada uno de los parámetros encontrados con las funciones de transferencia presentadas en la Tabla 3.5, se obtiene la siguiente función de transferencia que caracteriza al sistema

$$Gp(s) = \frac{3711.955}{3928.625s + 1} e^{-225.625s}$$

Ecuación 3.3

### 3.4 Verificación del modelo Planteado

Para verificar que el modelo propuesto describe adecuadamente el sistema, se diseña el modelo expuesto en la Sección B del Anexo II.

Una vez realizados estos bloques, se ajusta el tiempo final de simulación de tal forma que éste sea igual al tiempo en que tardó la adquisición de datos para las señales cuya entrada era inferior a tres voltios. Así mismo es importante tener en cuenta que se ajustaron las muestras de simulación de tal forma que la cantidad de datos obtenidos a partir de la simulación fuese igual a la cantidad de datos adquirida con la ayuda del servidor OPC.

Ahora bien, para comprobar la calidad del modelo matemático propuesto se utiliza el índice de FIT. Este parámetro se encuentra dado por la siguiente expresión

$$FIT = 100 \left( 1 - \frac{\|\hat{y} - y\|}{\|y - \hat{y}\|} \right) \%$$

Ecuación 3.4

Es importante destacar que  $\hat{y}$  corresponde a los datos de proceso obtenidos por medio de la prueba en el laboratorio; por su parte,  $\tilde{y}$  hace referencia a los datos obtenidos a través del modelo matemático planteado. Por otro lado,  $\bar{y}$  corresponde al promedio de los datos obtenidos en el experimento realizado. Finalmente,  $\|*\|$  es la norma del argumento. [25]

Teniendo en cuenta la Ecuación 3.4, se realiza la verificación de la calidad del modelo propuesto

### Para una entrada igual a 3 V

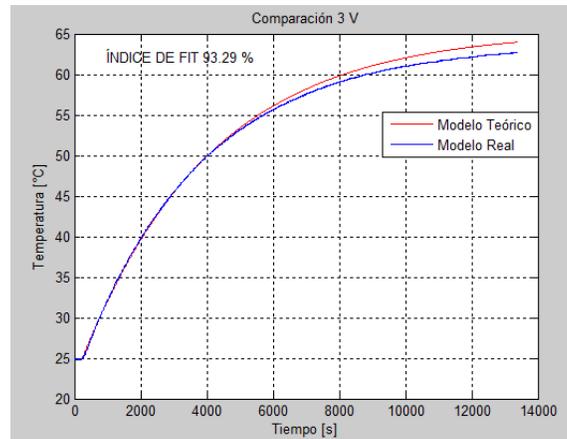


Figura 3.9 Comparación Modelo Teórico y Real para 3 V. Índice de FIT 93.29 %

### Para una entrada igual a 2.5 V

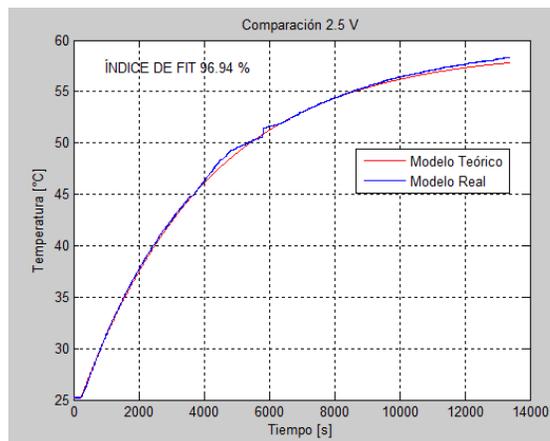


Figura 3.10 Comparación Modelo Teórico y Real para 2.5 V. Índice de FIT 96.94 %

### Para una entrada igual a 2 V

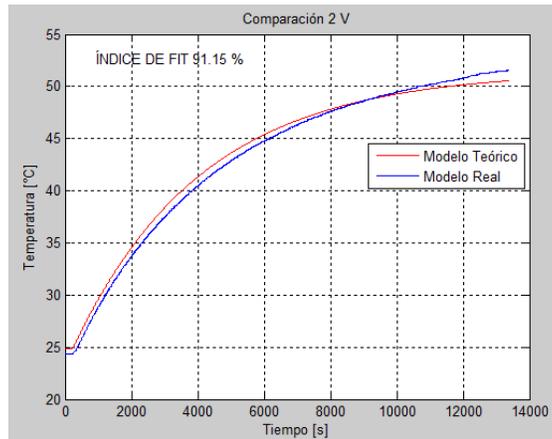


Figura 3.11 Comparación Modelo Teórico y Real para 2 V. Índice de FIT 91.15 %

### Para una entrada igual a 1.5 V

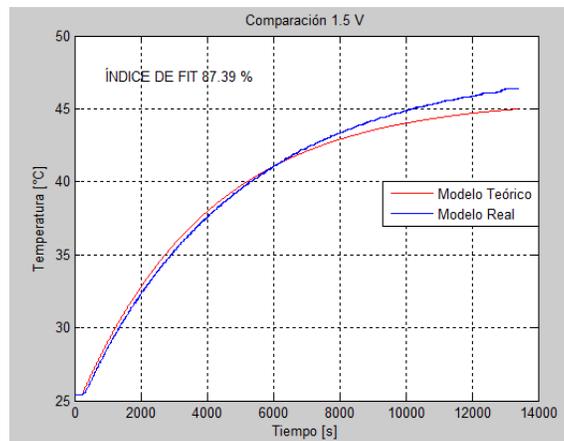


Figura 3.12 Comparación Modelo Teórico y Real para 1.5 V. Índice de FIT 87.39 %

Con base en los resultados presentados en la Figura 3.9, Figura 3.10, Figura 3.11, Figura 3.12 se puede apreciar que la calidad del modelo realizado, depende del voltaje aplicado al dispositivo encargado de elevar la temperatura del depósito. Así, para un voltaje de 1.5 V, el FIT es igual a 87.39 %, y para un voltaje de 3 V el FIT este parámetro es igual 93.29 %. Teniendo en cuenta estos resultados, es posible afirmar que el modelo planteado describe de una manera adecuada la estación MPS-PA Reactor de FESTO®.

A pesar de los resultados obtenidos, el rango de entrada definido, es inferior al 50 % del rango posible, por cuanto el máximo voltaje que se puede obtener debido a la tarjeta instalada en el PLC es aproximadamente igual a 11.1 V.

Por esta razón, es necesario definir un rango de temperatura en el cual el modelo matemático propuesto en la Ecuación 3.3 continúe siendo válido y además se incremente el rango de voltaje que

se le puede aplicar al dispositivo encargado de elevar la temperatura del líquido almacenado en el depósito.

Para lograr lo anterior, es posible evidenciar gracias a la Figura 3.8 que cuando la temperatura es inferior a 65 °C el sistema puede ser modelado como un sistema de primer orden porque el sistema de protección no ha empezado a actuar. De esta manera, un rango válido de operación para el modelo propuesto es un rango cuyo límite superior no sea mayor a 65 °C.

Es así como se plantea como hipótesis definir el rango de temperatura con un límite superior igual a 55 °C, con el fin que el rango de operación de la señal de entrada (voltaje), sea superior al 80 % del máximo valor permitido.

Para corroborar la hipótesis planteada, se considera como referencia la información suministrada por la Figura 3.8, considerándose los datos en los cuales la temperatura es inferior a 55 °C.

Siguiendo el mismo procedimiento descrito al inicio de esta Sección, se determinará el índice de FIT cuando la entrada es igual a 10 V y 9 V. Los resultados se presentan a continuación

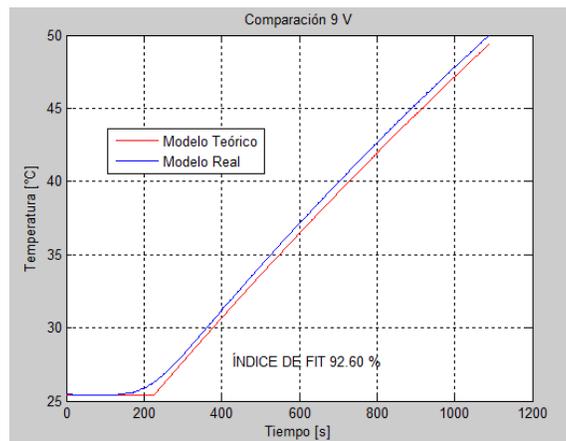


Figura 3.13 Comparación Modelo Teórico y Real para 9 V. Índice de FIT 92.60 %

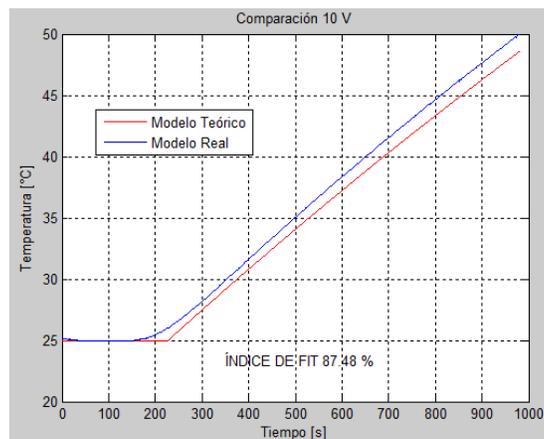


Figura 3.14 Comparación Modelo Teórico y Real para 10 V. Índice de FIT 87.48 %

Como se puede observar en la Figura 3.13 en el rango de temperatura definido el FIT obtenido es igual a 92.60 %. Por su parte en la Figura 3.14, se puede apreciar que para una entrada igual a 10 V, la calidad del modelo es igual al 87.48 %. Por lo anterior, se cumplen con los criterios de validez definidos previamente.

De esta manera, los índices de FIT obtenidos para las entradas consideradas, se presentan en la figura

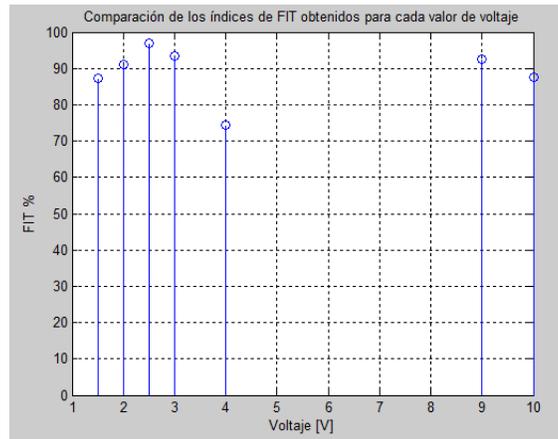


Figura 3.15 Comparación Índices de FIT

Por lo anterior, se puede afirmar que la hipótesis realizada es verdadera ya que para un rango de temperatura, en el cual el límite superior es igual a 55 °C, el rango de la señal de entrada es igual a 80 % del valor máximo y el modelo planteado continua siendo válido. Es así como para el desarrollo de las Secciones procedentes se tendrá en cuenta este rango de la variable de entrada y la variable de salida.

Teniendo en cuenta lo mencionado en el desarrollo de este capítulo, es importante mencionar que el modelo matemático de primer orden que representa adecuadamente la estación del Reactor, se encuentra dado por

$$Gp(s) = \frac{3711.955}{3928.625s + 1} e^{-225.625s}$$

Ecuación 3.5

Ahora bien, es conveniente recordar que para que este modelo sea válido, es necesario restringir la temperatura en la cual se desea trabajar, siendo la temperatura máxima permitida 55 °C

## 4. CONTROL

**Resumen** *En el Capítulo 4 se utiliza la Teoría de Control para diseñar un sistema de control PI. Así mismo se diseña un controlador Fuzzy Tipo P, así como un Controlador Fuzzy Tipo PD. Por otro lado, para mejorar el desempeño del controlador anterior, éste es optimizado por medio de Algoritmos Genéticos. Finalmente se presentarán los resultados obtenidos después de simular cada uno de los controladores con la ayuda de lo expuesto en el Capítulo 3, para observar el correcto comportamiento de cada uno de los sistemas diseñados*

### 4.1. Control Clásico

Para el diseño del controlador por medio de la Teoría Clásica de Control, se decide implementar un controlador PI por cuanto en un sistema de primer orden, las acciones proporcionales e integrales logran controlar la respuesta transitoria del sistema así como el error en estado estacionario del mismo.

#### 4.1.1. Diseño del Control PI

Para el diseño del controlador, es necesario tener en cuenta la función de transferencia que describe este tipo de sistemas, ésta se encuentra dada por la Ecuación 2.3, con  $K_d$  igual a cero. De esta manera la función de transferencia resultante es la siguiente

$$PI(s) = K_p + \frac{K_i}{s}$$

*Ecuación 4.1*

Esta expresión puede ser rescrita de la siguiente manera

$$PI(s) = \frac{K_p s + K_i}{s}$$

*Ecuación 4.2*

Así mismo es importante tener en cuenta que debido a que el tiempo de establecimiento del sistema en lazo abierto es mucho menor que el tiempo de estabilización en lazo cerrado, para este tipo de estrategia de control, la función de transferencia del sistema puede ser reducida como se muestra a continuación

$$G_p(s) = \frac{3711.955}{3928.625s + 1}$$

*Ecuación 4.3*

Por otro lado, de acuerdo con las relaciones calculadas en la Sección 3.1.2, es necesario colocar un sensor al lazo del control que permita convertir la salida de la Ecuación 4.3, equivalente a la constante

de salida del PLC, a su correspondiente temperatura en grados centígrados. La función de transferencia de este sensor, se puede aproximar a

$$H(s) = 0.0036168$$

*Ecuación 4.4*

De esta manera, la función de transferencia del sistema en lazo cerrado es

$$G_{CL} = \frac{H(s)Gp(s)PI(s)}{1 + H(s)Gp(s)PI(s)}$$

*Ecuación 4.5*

Al remplazar los valores correspondientes en la Ecuación 4.5, se obtiene

$$G_{CL} = \frac{0.0036168k (sKp + Ki)}{\tau s^2 + s(1 + 0.0036168kKp) + 0.0036168kKi}$$

*Ecuación 4.6*

Un método para poder establecer un criterio de diseño del controlador, consiste en definir el Sobrepico máximo porcentual y Tiempo de Establecimiento deseados para la respuesta del sistema.

Como se evidencia, la Ecuación 4.6, representa un sistema de segundo orden. Para este tipo de sistemas, el denominador de la función de transferencia puede ser escrito como

$$s^2 + 2\xi Wns + Wn^2$$

*Ecuación 4.7*

Para los sistemas de segundo, el Sobrepico máximo porcentual (MP%) y el Tiempo de Establecimiento (Ts), se pueden calcular con la ayuda de las siguientes expresiones

$$MP\% = e^{\frac{-\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}}$$

*Ecuación 4.8*

$$Ts = \frac{4}{\xi Wn}$$

*Ecuación 4.9*

A partir de la Ecuación 4.8 y la Ecuación 4.9, es posible calcular el factor de amortiguamiento del sistema  $\xi$  y la frecuencia natural no amortiguada  $Wn$  del sistema en función del Sobrepico porcentual y el Tiempo de Establecimiento. Estos parámetros se encuentran dados por

$$\xi = \sqrt{-\ln MP * \left(\frac{1}{(\ln MP)^2 + \pi^2}\right)}$$

*Ecuación 4.10*

$$Wn = \frac{4}{\xi Ts}$$

*Ecuación 4.11*

Teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente, se hace el denominador de la Ecuación 4.6 un polinomio mónico para poder igualar esta expresión a la Ecuación 4.7, así la función de transferencia del sistema en lazo cerrado queda rescrita como

$$G_{CL} = \frac{0.0036168k (sKp + Ki)}{s^2 + s \frac{\tau (1 + 0.0036168kKp)}{\tau} + \frac{0.0036168kKi}{\tau}}$$

*Ecuación 4.12*

De esta forma se deben cumplir las siguientes igualdades

$$1 = 1$$

*Ecuación 4.13*

$$\frac{(1 + 0.0036168kKp)}{\tau} = 2\xi Wn$$

*Ecuación 4.14*

$$\frac{0.0036168kKi}{\tau} = Wn^2$$

*Ecuación 4.15*

A partir de la Ecuación 4.14 y la Ecuación 4.15, es posible determinar los parámetros del controlador en función del Sobrepico porcentual, el Tiempo de Establecimiento y los parámetros de la planta

$$Ki = \frac{276.48750Wn^2\tau}{k}$$

*Ecuación 4.16*

$$Kp = \frac{276.48750(2\xi Wn\tau - 1)}{k}$$

Teniendo en cuenta que se desea el menor Sobrepico porcentual, sacrificando el Tiempo de Establecimiento del sistema con una banda de paso de 2%, se diseña el controlador de tal manera que el Sobrepico Porcentual sea igual al 1 % y el Tiempo de Establecimiento igual a 2600 s. Con estos valores los parámetros del controlador son iguales a  $K_i = 0.00101$  y  $K_p = 0.8258$ .

#### 4.1.2. Resultados de Simulación

Con la ayuda de la información consignada en la Sección C del Anexo II, se realiza la simulación del sistema de control diseñado, para dos valores de referencia, 50 °C y 35 °C. Los resultados se presentan en la Figura 4.1

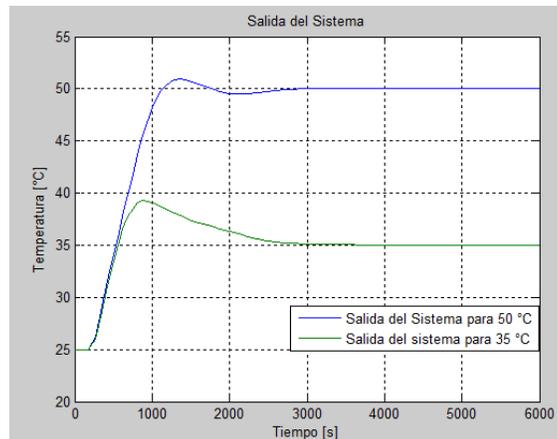


Figura 4.1 Respuesta Teórica del Sistema con el Control PI

De acuerdo con los resultados obtenidos, se puede afirmar que el Tiempo de Establecimiento del Sistema cuando la referencia es igual a 50 °C, es 2400 s, por su parte el máximo Sobrepico alcanzado por el sistema para este mismo valor de referencia es a 50.95 °C, es decir un 3.8 %. Ahora bien, cuando la referencia cambia a 35 °C el Tiempo de Establecimiento es a 2550 s, el Sobrepico máximo igual al 28.57%. Finalmente para ambos caso el Error en Estado Estacionario equivale a un 0 %.

Para observar que el comportamiento del sistema cuando se le modifica la temperatura de referencia, se crea la siguiente señal, por medio del bloque de la aplicación Simulink, *Signal Builder*

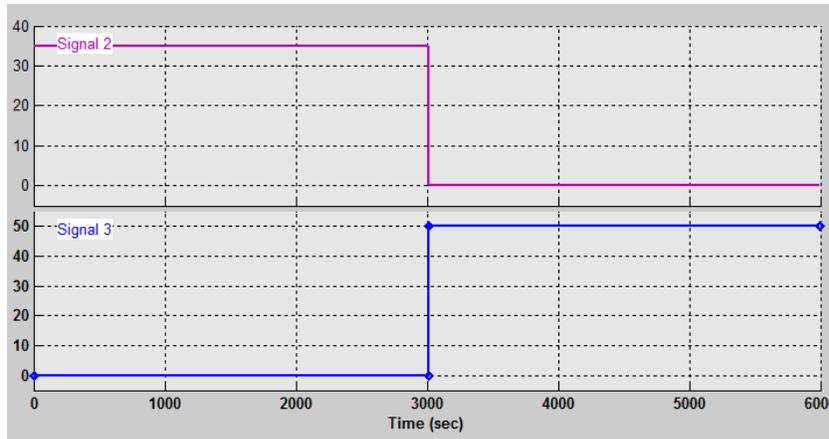


Figura 4.2 Señal Bloque Signal Builder

Para este caso, el bloque Step del diagrama presentado en la Sección C del Anexo II, es reemplazado por el Bloque *Signal Builder* que contiene la señal descrita por la Figura 4.2. Los resultados obtenidos son los siguientes

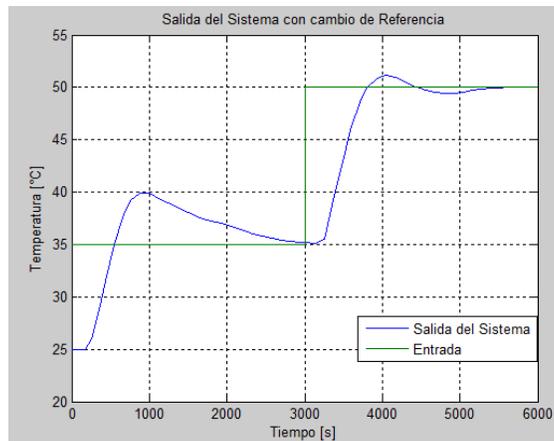


Figura 4.3 Resultados de Simulación Control PI con cambio de Referencia

Como se puede observar, el sistema se estabiliza al cambiar la temperatura en la cual se desea que se encuentre la salida de la planta. No obstante, es importante resaltar que de acuerdo con las simulaciones realizadas, el sistema tiene un comportamiento más lento y un mayor Sobrepico cuando se desea referenciar la salida del sistema a una temperatura baja

#### 4.2. Control con Lógica Difusa

Antes de empezar a Diseñar el Sistema de Control por medio de Lógica Difusa, es necesario definir el método del controlador que se va a realizar, así como los diferentes Métodos de Inferencia y Reglas para los Operadores Lógicos. Para el diseño del controlador se considerarán los siguientes parámetros los cuales son definidos con ayuda del Toolbox Fuzzy Logic de MATLAB®

- ❖ **Método:** Mamdani
- ❖ **Método AND:** Mínimo
- ❖ **Método OR:** Máximo
- ❖ **Agregación:** Mínimo
- ❖ **Método de Defuzzificación:** Centro de Masa (Centroide)
- ❖ **Número de Entradas:** 1
- ❖ **Nombre de la Entrada:** Error
- ❖ **Número de Salidas:** 1
- ❖ **Nombre de la Salida:** Voltaje

#### 4.2.1. Diseño del Controlador Fuzzy Proporcional (FLP)

En el Diseño de Sistemas de Control por medio de Lógica Difusa, el segundo paso consiste en realizar el controlador con base en el error actual, y observar el comportamiento de este controlador en el sistema.

Teniendo en cuenta lo anterior, se diseñan las siguientes funciones de pertenencia para la señal de entrada al controlador, que en este caso es el error, entendido como la diferencia entre la temperatura deseada y la temperatura actual del sistema, con la ayuda del software computacional MATLAB®.

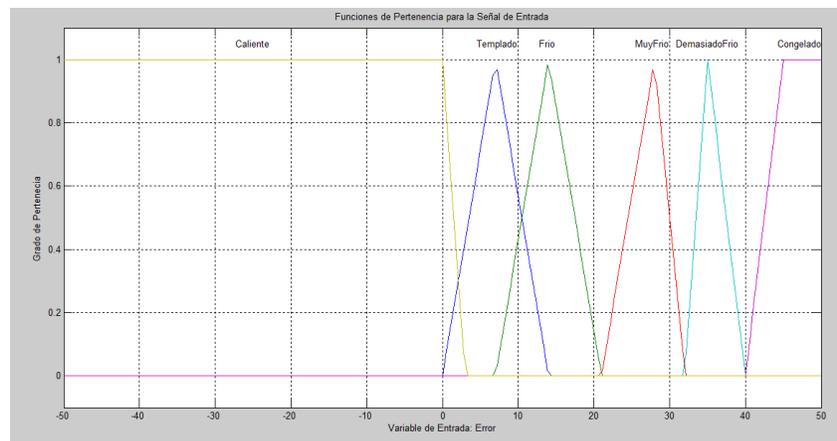


Figura 4.4 Funciones de Pertenencia Señal de Entrada del controlador FD

Teniendo en cuenta los conjuntos definidos para los diferentes valores de la entrada, se procede a diseñar las funciones de pertenencia para la señal de salida. Estas funciones de pertenencia se presentan en la siguiente figura

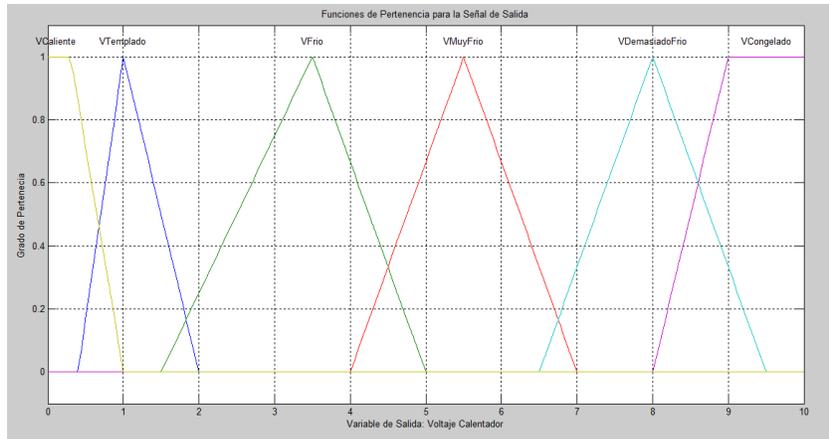


Figura 4.5 Funciones de Pertenencia para la Señal de Salida Controlador FD

Una vez definidas estas funciones con la ayuda de la herramienta computacional MATLAB®, se diseñan las reglas de control que van a regir el sistema que se desea diseñar

- ❖ **Regla 1**  
*If Error is Templado then Voltaje is Templado*
- ❖ **Regla 2**  
*If Error is Frio then Voltaje is Frio*
- ❖ **Regla 3**  
*If Error is MuyFrio then Voltaje is MuyFrio*
- ❖ **Regla 4**  
*If Error is Demasiado Frio then Voltaje is Demasiado Frio*
- ❖ **Regla 5**  
*If Error is Caliente then Voltaje is Caliente*
- ❖ **Regla 6**  
*If Error is Congelado then Voltaje is Congelado*

De esta manera, la gráfica de control para el Sistema diseñado se encuentra descrita por Figura 4.6

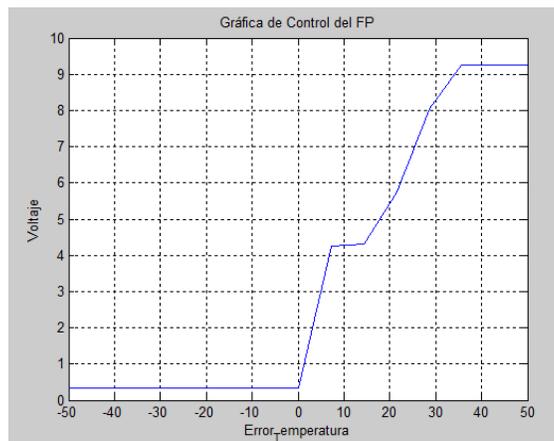


Figura 4.6 Gráfica de Control del Controlador FLP

#### 4.2.2. Resultados de Simulación

Al realizar la simulación de este controlador se obtiene el siguiente resultado

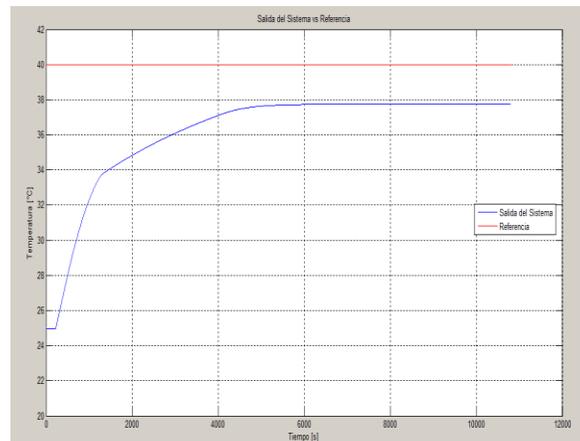


Figura 4.7 Respuesta Teórica del Sistema con el Controlador FLP

Como se puede apreciar, el sistema no alcanza la referencia deseada, lo anterior se debe a que el voltaje de salida no es el adecuado para que el sistema alcance la temperatura requerida. Para solucionar este problema, se pueden modificar las reglas, las funciones de pertenencia para la señal de entrada y/o los conjuntos definidos para la señal de salida. En este proyecto, se optó por modificar sólo los conjuntos definidos para la señal de entrada. Las nuevas funciones de pertenencia se muestran a continuación

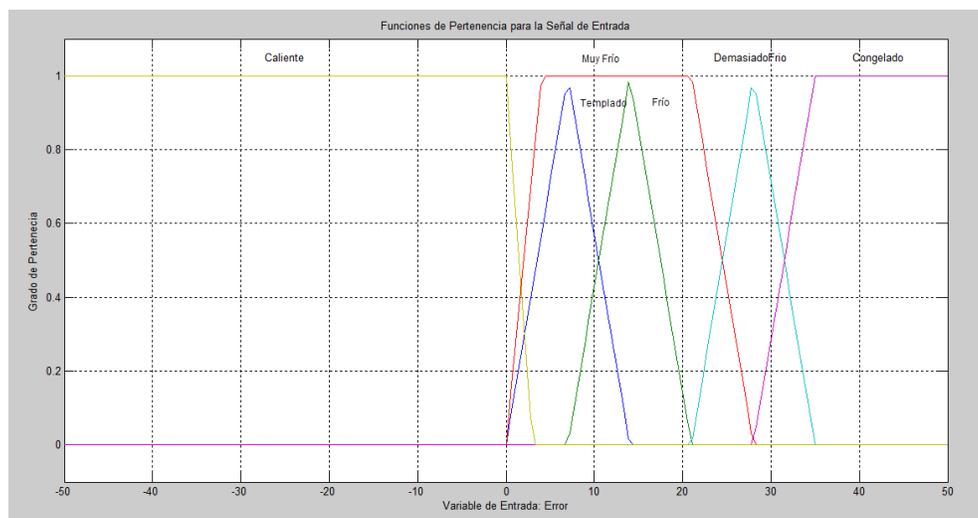


Figura 4.8 Funciones de Pertenencia para la Señal de Entrada FLP corregida

Después de realizar los cambios respectivos en el Control Fuzzy Proporcional, se vuelve a realizar la simulación anterior, obteniéndose los siguientes resultados

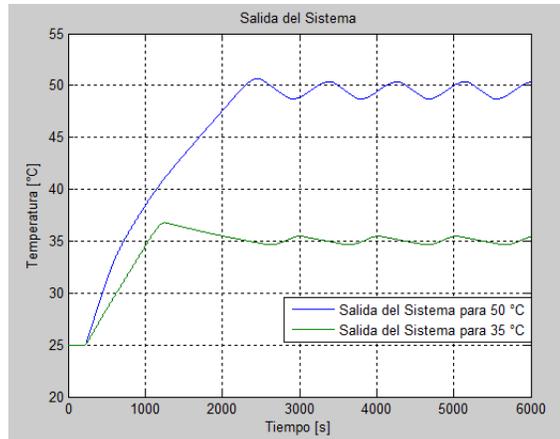


Figura 4.9 Respuesta Teórica del Sistema con el nuevo Controlador FLP

Se puede apreciar que cuando la referencia es 50 °C, la respuesta del sistema presenta un Tiempo de Estabilización de 2600 s y unas oscilaciones que tienen como eje central una temperatura aproximada de 49.5 °C. Por su parte cuando la referencia cambia a 35 °C, el Tiempo de Establecimiento aumenta en 100 s, el Sobrepico máximo es igual a 9.09 %.

Continuando con el mismo proceso de comparación que el realizado en la Sección 4.1, se crea el bloque Signal Builder en la aplicación Simulink, y se realiza la respectiva simulación. Los resultados se pueden evidenciar en el siguiente diagrama

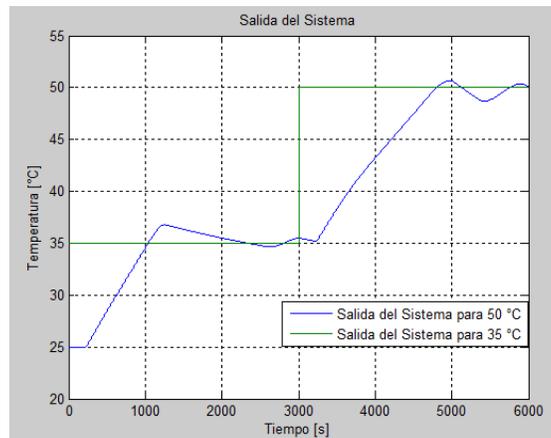


Figura 4.10 Resultados de Simulación Control FLP con cambio de Referencia

Como se puede observar en la Figura 4.10, con las modificaciones realizadas sobre las funciones de pertenencia de la señal de entrada, se obtiene el resultado esperado por cuanto se puede observar que el sistema alcanza la referencia. De acuerdo con [16] cuando un sistema de control difuso proporcional no cumple con las necesidades de un problema específico, es necesario cambiar el sistema de control por un controlador difuso con acciones proporcional y derivativa.

### 4.2.3. Diseño Controlador Fuzzy Proporcional Derivativo (FLPD)

Para implementar el equivalente a la acción derivativa, se añade otra entrada al controlador difuso, la velocidad del cambio del error. Este parámetro puede ser entendido de la siguiente manera

- ❖ Cuando este parámetro es muy negativo, el sistema se está alejando de la referencia por lo cual es necesario incrementar la acción realizada por el controlador.
- ❖ Cuando éste es muy positivo, el sistema se está acercando a la referencia, por lo tanto es pertinente disminuir la acción del controlador.
- ❖ Cuando este parámetro es pequeño, no es necesario realizar alguna corrección en la salida del controlador.

A partir de lo anterior, se crea la nueva entrada del controlador, denominada “Cambio del Error” y las nuevas reglas a saber

- ❖ **Regla 1**  
*If Error is Congelado and Cambio Error is Positivo then Voltaje is VDemasiadoFrio.*
- ❖ **Regla 2**  
*If Error is Congelado and Cambio Error is No Cambio then Voltaje is VCongelado.*
- ❖ **Regla 3**  
*If Error is Congelado and Cambio Error is Negativo then Voltaje is VCongelado.*
- ❖ **Regla 4**  
*If Error is Caliente and Cambio Error is Positivo then Voltaje is VTemplado.*
- ❖ **Regla 5**  
*If Error is Caliente and Cambio Error is No Cambio then Voltaje is VCaliente.*
- ❖ **Regla 6**  
*If Error is Caliente and Cambio Error is Negativo then Voltaje is VCaliente.*
- ❖ **Regla 7**  
*If Error is DemasiadoFrio and Cambio Error is Positivo then Voltaje is VMuyFrio.*
- ❖ **Regla 8**  
*If Error is DemasiadoFrio and Cambio Error is No Cambio then Voltaje is VDemasiadoFrio.*
- ❖ **Regla 9**  
*If Error is DemasiadoFrio and Cambio Error is Negativo then Voltaje is VCongelado.*
- ❖ **Regla 10**  
*If Error is MuyFrio and Cambio Error is Positivo then Voltaje is VFrio.*
- ❖ **Regla 11**  
*If Error is MuyFrio and Cambio Error is No Cambio then Voltaje is VMuyFrio.*
- ❖ **Regla 12**  
*If Error is MuyFrio and Cambio Error is Negativo then Voltaje is VDemasiadoFrio.*
- ❖ **Regla 13**  
*If Error is Frio and Cambio Error is Positivo then Voltaje is VTemplado.*
- ❖ **Regla 14**  
*If Error is Frio and Cambio Error is No Cambio then Voltaje is VFrio.*

- ❖ **Regla 15**  
*If Error is Frio and Cambio Error is Negativo then Voltaje is VMuyFrio.*
- ❖ **Regla 16**  
*If Error is Templado and Cambio Error is Positivo then Voltaje is VCaliente.*
- ❖ **Regla 17**  
*If Error is Templado and Cambio Error is No Cambio then Voltaje is VTemplado.*
- ❖ **Regla 18**  
*If Error is Templado and Cambio Error is Negativo then Voltaje is VFrio.*

Teniendo en cuenta las reglas definidas, la superficie de control del controlador diseñado se encuentra dada por la Figura 4.11

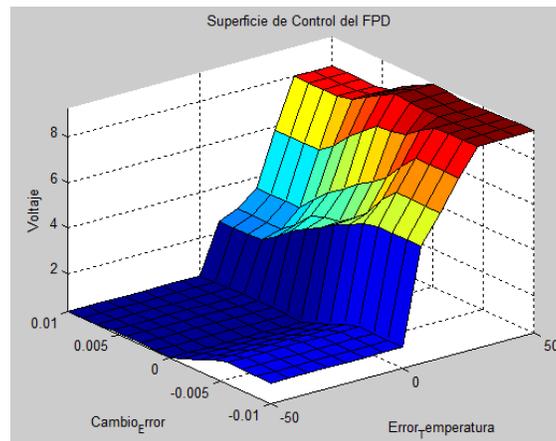


Figura 4.11 Superficie de Control del FLPD

Posteriormente, se diseñan las funciones de pertenencia para la nueva variable. Inicialmente, se diseñan las funciones que se muestran a continuación

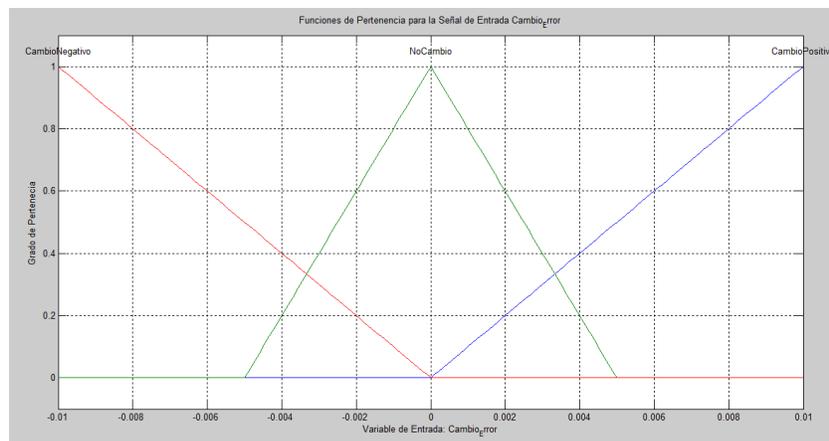


Figura 4.12 Funciones de Pertenencia Cambio del Error FLPD

#### 4.2.4. Resultados de Simulación

Posteriormente, se realiza la simulación del controlador diseñado, los resultados obtenidos se pueden apreciar en la Figura 4.13

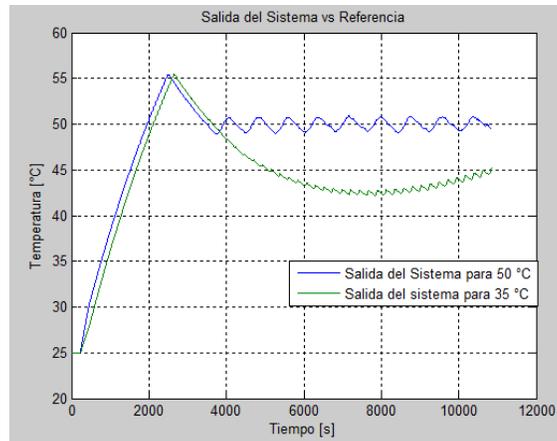


Figura 4.13 Respuesta Teórica del Sistema con el controlador FLPD 1

Como se puede evidenciar, las oscilaciones presentadas cuando la referencia es igual a 50 °C, no disminuyen en comparación con lo expuesto en la Figura 4.9 y además se presenta un aumento del Tiempo de Estabilización del Sistema. Por otro lado, se puede apreciar que el tiempo de estabilización del sistema cuando la referencia es igual a 35 °C, supera los diez mil segundos. Por lo anterior es necesario volver a plantear las funciones de pertenencia para el Cambio Error.

Los conjuntos Difusos para la nueva entrada del controlador por medio de los cuales, se lograba disminuir de la mejor forma posible las oscilaciones y el tiempo de establecimiento del sistema son los siguientes

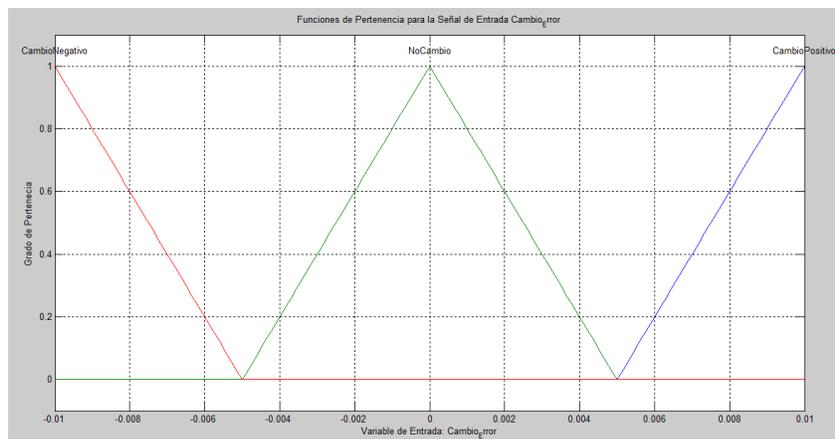


Figura 4.14 Corrección Funciones de Pertenencia Cambio del Error FLPD

Con los cambios implementados, la nueva Superficie de Control se presenta en la Figura 4.15

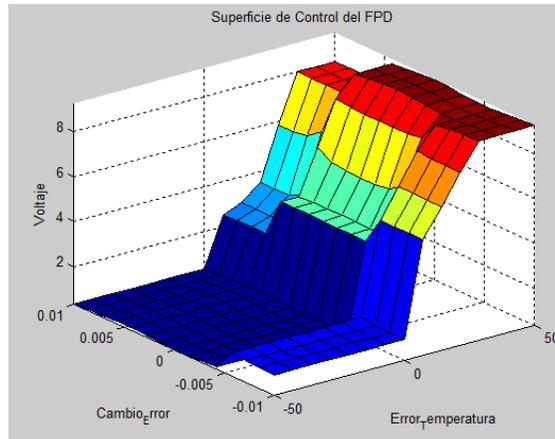


Figura 4.15 Superficie de Control del Sistema Corregido

Al realizar la simulación del nuevo controlador diseñado, se obtiene que la salida del sistema se encontraría descrita por la siguiente gráfica

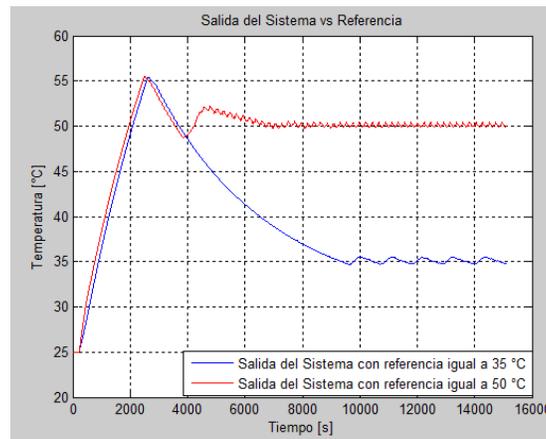


Figura 4.16 Respuesta Teórica del Sistema con el controlador FLPD corregido

De esta manera es posible evidenciar que cuando la referencia es igual a 50 °C se logra disminuir la amplitud de las oscilaciones del sistema, por cuanto éstas tienen una amplitud pico a pico aproximada de 0.4 °C. Sin embargo al disminuir este parámetro, se modifica el Sobrepico porcentual ya que se puede apreciar que el sistema tiene un pico máximo de 55.5 °C. Adicionalmente, el Tiempo de Establecimiento incrementa más de un 100 %, por cuanto el sistema se estabiliza aproximadamente en 6800 s. Finalmente es importante señalar que a diferencia de la respuesta generada por el controlador FLP, este nuevo sistema de control no sigue la referencia deseada, sino que ésta se ubica en el caso de 50 °C, 0,2 °C por encima de ésta. Por su parte, cuando la referencia es 35 °C, se mantiene el máximo Sobrepico del caso anterior y el Tiempo de Establecimiento es aproximadamente igual a diez mil segundos.

### 4.3. Controlador con Lógica Difusa Optimizado por medio de Algoritmos Genéticos

El método de Algoritmos Genéticos constituye una técnica de Optimización, por lo cual se hace iniciar el procedimiento planteando el problema de optimización. Para ello es necesario tener en cuenta

- ❖ Debido a la importancia del Error Cuadrático Medio, para el ajuste de datos a una determinada curva, el objetivo del problema de optimización consistirá en minimizar dicha función [26].
- ❖ Las Variables de decisión para este caso, se encuentran dadas por la Superficie de Inferencia.

#### 4.3.1. Planteamiento del Problema de Optimización

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, el problema de optimización para el controlador FLP se puede definir de la siguiente manera

##### 4.3.1.1. Variables de Diseño

Las variables de decisión, corresponden a cada uno de los antecedentes y consecuencias de las diferentes reglas que conforman el controlador difuso. Para este caso, debido a que en este controlador se tienen seis reglas en donde cada una tiene un antecedente (*Error*) y una consecuencia (*Voltaje*), es posible afirmar que en total existen doce variables de diseño.

##### 4.3.1.2. Espacio de Diseño

Cada una de las variables de diseño pertenecen al dominio de los enteros.

##### 4.3.1.3. Restricciones

- ❖ Teniendo en cuenta que existen seis funciones de pertenencia para las variables de *Error* y *Voltaje*, cada una de las variables de diseño, puede tomar cualquier valor entero entre uno y seis.
- ❖ Este problema se encuentra sujeto a un sistema representando por una función de primer orden con tiempo muerto de la forma

$$Gp(s) = \frac{k}{\tau s + 1} * e^{-t_0 s}$$

##### 4.3.1.4. Parámetros

- ❖  $k$  tiene un valor de 3711.955.
- ❖  $\tau$  tiene un valor de 3928.625.
- ❖  $t_0$  es igual a 225.625.
- ❖ Las Funciones de Pertenencia para la señal de *Error*, se encuentran dadas por la Figura 4.8 y las Funciones de Pertenencia para la señal de *Voltaje*, están definidas por la Figura 4.5.
- ❖  $Y_{ref}$  es la referencia utilizada por la función objetivo.
- ❖  $Y_{exp}$  es la señal obtenida para cada instante de tiempo al realizar la simulación del sistema con el controlador difuso con un conjunto de reglas determinado.
- ❖  $M$  es la cantidad de datos obtenidos en la simulación.

#### 4.3.1.5. Función Objetivo

La función costo del problema se define como

$$\min_x \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M (Y_{ref} - Y_{expi})^2}{M}}$$

#### 4.3.1.6. Clasificación

Teniendo en cuenta lo características expuestas, el problema se puede clasificar de la siguiente manera

- ❖ Con Restricciones.
- ❖ Control Óptimo.
- ❖ Programación Entera.
- ❖ Paramétrico.
- ❖ Programación No Lineal.
- ❖ Programación Estocástica.
- ❖ Mono Objetivo.

#### 4.3.2. Diseño del Controlador Fuzzy Proporcional Optimizado por Algoritmos Genéticos

Para el diseño del Controlador Fuzzy optimizado por Algoritmos Genéticos, se hace uso de la herramienta computacional MATLAB®. Este software por medio de la función *ga*, minimiza una función objetivo determinada, por medio del método de optimización deseado.

Para hacer uso de esta función de la herramienta computacional, es necesario definir los siguientes parámetros

- ❖ *Población.*
- ❖ *Número Total de Generaciones.*
- ❖ *Número de Variables de Diseño.*
- ❖ *Probabilidad de Cruce.*
- ❖ *Límite de Generaciones.*
- ❖ *Valor Mínimo que pueden tomar las variables de diseño.*
- ❖ *Valor Máximo que pueden tomar las variables de diseño.*
- ❖ *El número de Cromosomas que se garantiza que sobreviven en la nueva generación (EliteCount).*
- ❖ *El método por medio del cual se va a crear la Población Inicial.*
- ❖ *El Método por medio del cual se van a realizar las diferentes mutaciones.*
- ❖ *La forma de reproducción de una Generación.*

Para la implementación de la función de MATLAB®, se define una *población* de 50 cromosomas, atendiendo a las características mencionadas en [18]; se establece un total de 400 *generaciones* debido a que en la medida en que éste parámetro sea mayor es posible encontrar una mejor solución al problema de optimización; adicionalmente se establecen los *límites superior e inferior* de las dos variables de diseño, considerando las restricciones descritas en la Sección anterior; se selecciona que *el Elite Count* corresponda a un quinto de la población total de una generación. Por otro lado, se

define la *Adaptación factible* como *método de mutación*, debido a que por medio de esta estrategia de mutación, se genera un cambio que depende de la última generación exitosa o de la última generación no competente, lo cual presupone que el cambio realizado aportará un gen que ayudará a la minimización de la función objetivo; así mismo, se hace uso del método de la *ruleta* para el proceso de *selección*, dado que presenta una mayor frecuencia en su utilización. Finalmente, es importante señalar que para los parámetros restantes se recurre a los valores por defectos que de la función *ga* de MATLAB®.

Parámetro	Valor
<i>Tamaño de la Población</i>	50
<i>Generaciones</i>	400
<i>Variables de Diseño</i>	12
<i>Probabilidad de Cruce</i>	0.8
<i>Límite de Generaciones</i>	400
<i>Límite inferior de las variables de Diseño</i>	1
<i>Límite superior de las variables de Diseño</i>	6
<i>Elite Count</i>	10
<i>Método de Creación de la Población Inicial</i>	<i>Uniforme</i>
<i>Método de Mutación</i>	<i>Adaptación factible,</i>
<i>Selección</i>	<i>Ruleta</i>

Tabla 4.1 Resumen del valor de los parámetros de la función *ga* de MATLAB®

Es importante tener en cuenta que para el diseño de este controlador, se hizo el proceso de optimización dos veces. En un primer caso, se realizó la minimización teniendo como referencia una temperatura de 50 °C. El progreso generacional y el mejor individuo obtenido se presenta a continuación

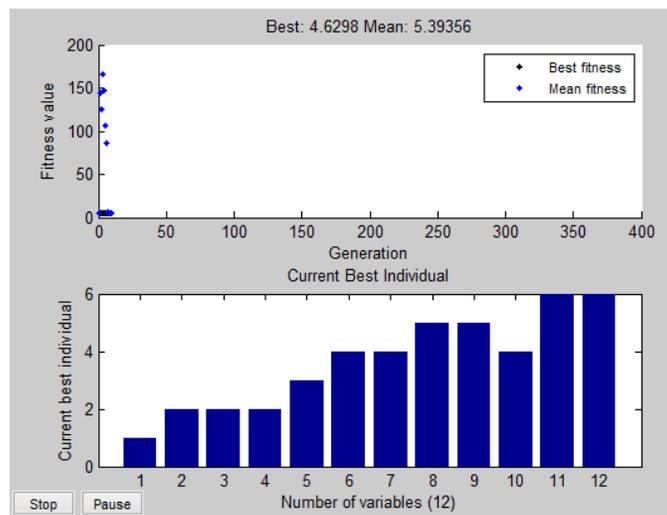


Figura 4.17 Progreso Generacional y mejor individuo del primer caso de Optimización

Posteriormente, se realiza la minimización de la función objetivo, con una temperatura de referencia de 35 °C. En este nuevo problema de optimización, el progreso generacional resultante es el siguiente

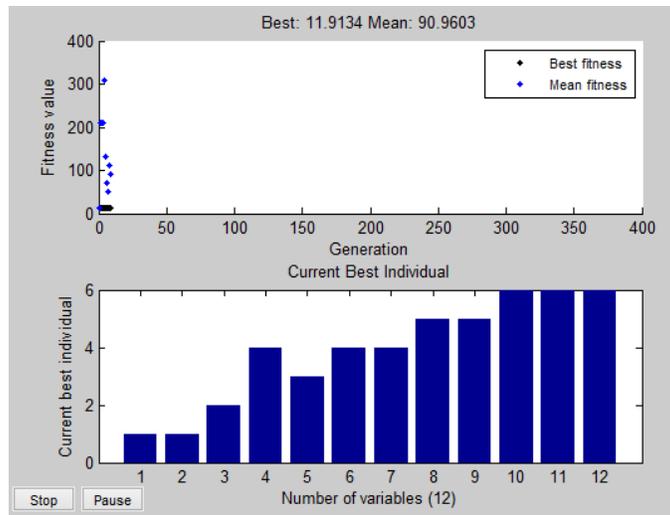


Figura 4.18 Progreso Generacional y mejor individuo del segundo caso de Optimización

Una vez finalizados estos dos procesos, el conjunto de reglas del controlador Fuzzy es el siguiente

- ❖ **Regla 1**  
*If Error is Templado then Voltaje is Templado.*
- ❖ **Regla 2**  
*If Error is Frio then Voltaje is Demasiado Frio.*
- ❖ **Regla 3**  
*If Error is MuyFrio then Voltaje is Demasiado Frio.*
- ❖ **Regla 4**  
*If Error is Demasiado Frio then Voltaje is Congelado.*
- ❖ **Regla 5**  
*If Error is Congelado then Voltaje is Caliente.*
- ❖ **Regla 6**  
*If Error is Caliente then Voltaje is Caliente.*

#### 4.3.3. Resultados de Simulación

Haciendo uso del diagrama de bloques, utilizado para verificar el comportamiento del controlador Fuzzy proporcional. Los resultados obtenidos al realizar la simulación del controlador Fuzzy optimizado, se muestran en la Figura 4.19

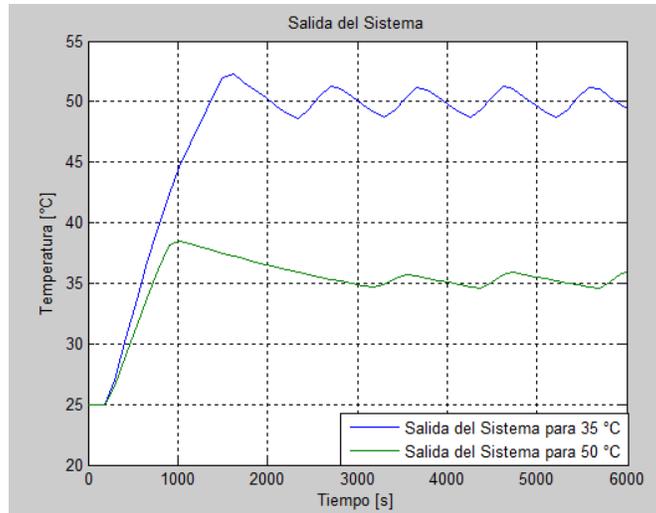


Figura 4.19 Respuesta Teórica del Sistema con el controlador FLP optimizado

A partir de la Figura 4.19, es posible evidenciar que cuando la referencia es igual a 50 °C, se mejora respecto del controlador sin optimizar, el tiempo de establecimiento en 600 s y el error en estado estacionario en un 0.75 %. No obstante, se produce un aumento en el Sobrepico porcentual al 10.71 %. Por su parte, cuando la referencia del sistema cambia a 35 °C, no se percibe ninguna mejora respecto del controlador Fuzzy Proporcional, por cuanto el tiempo de estabilización es aproximadamente igual a 3000 s, el Sobrepico porcentual aumenta al 16.67 % y el error estacionario es igual al 0.71 %.

Recopilando los datos obtenidos gracias a la aplicación Simulink de la herramienta computacional MATLAB®, es posible construir las siguientes tablas

<b>Controlador</b>	<b>Tiempo de Estabilización [s]</b>	<b>Máximo Sobrepico Porcentual</b>	<b>Error en Estado Estacionario</b>
<b>Controlador PI</b>	2400	3.84	0 %
<b>Controlador FLP</b>	2600	1.96	1 %
<b>Controlador FLPD</b>	6800	18.03	0.6 %
<b>Controlador FLPGA</b>	2000	10.71	0.25 %

*Tabla 4.2 Recopilación de los Parámetros de Desempeño simulados para los Controladores Diseñados con Referencia igual a 50 °C*

<b>Controlador</b>	<b>Tiempo de Estabilización [s]</b>	<b>Máximo Sobrepico Porcentual</b>	<b>Error en Estado Estacionario</b>
<b>Controlador PI</b>	2550	28.57	0%
<b>Controlador FLP</b>	2700	9.09	0.3%
<b>Controlador FLPD</b>	10000	67.21	0.3%
<b>Controlador FLPGA</b>	3000	16.67	0.71%

*Tabla 4.3 Recopilación de los Parámetros de Desempeño simulados para los Controladores Diseñados con Referencia igual a 35 °C*

## 5. IMPLEMENTACIÓN DE LOS CONTROLADORES DISEÑADOS EN LA ESTACIÓN REACTOR DEL SISTEMA MODULAR DE PRODUCCIÓN

*Resumen En el Capítulo que se presenta a continuación, se implementan los controladores diseñados en la Capítulo anterior en la estación del Reactor del Sistema de Producción Modular de Procesos Automáticos de FESTO®. De esta manera se presentan los resultados obtenidos para cada uno de los controladores cuando se la referencia es igual a 35 °C y 50 °C. Así mismo, se realiza un análisis del desempeño de cada controlador observando su respuesta frente a dos tipos de perturbaciones así como la señal de control para cada uno de los casos mencionados.*

Para evaluar el comportamiento de cada uno de los controladores diseñados, se realizan dos experimentos, cada uno con sistemas de referencia diferentes. Para este caso, teniendo en cuenta el rango permitido de temperatura definido en el Capítulo 3, se establecen que las dos referencias serán 35 °C y 50 °C.

### 5.1. Referencia igual a 35 °C

Para cada uno de los controladores diseñados, el experimento consiste en hacer que la temperatura inicial del líquido en el depósito de la planta se encuentre entre 24.5 °C y 25.5 °C. Posteriormente, con la ayuda del Servidor OPC KEPServerEX y el cliente OPC Simulink, utilizando el PLC como puente de comunicación, se implementa el control en la estación del Reactor. Teniendo en cuenta los criterios de diseño del controlador PI, se fija que la duración de la simulación fuese igual a tres mil segundos.

#### 5.1.1. Control PI

Al implementar este control en la estación del Reactor, se obtiene el siguiente resultado

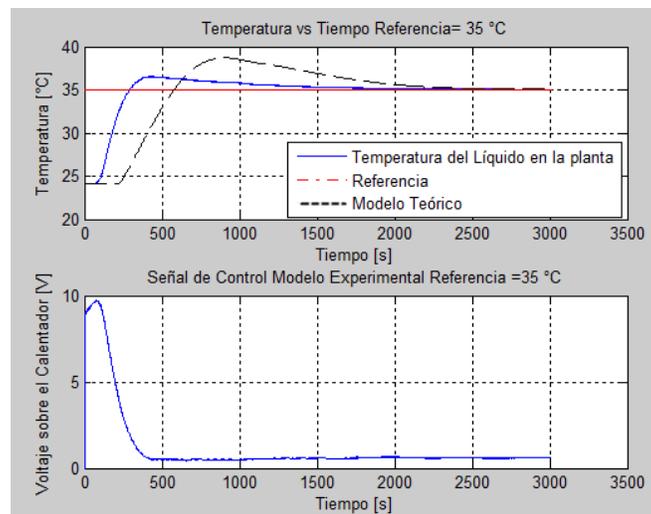


Figura 5.1 Implementación del Control PI en la Estación Reactor, Referencia igual a 35 °C

A partir de la información proporcionada por la Figura 5.1, se puede afirmar que el tiempo de establecimiento del sistema es aproximadamente igual a 2200 s, distanciándose aproximadamente 400 s del tiempo establecido como criterio de diseño de este tipo de controlador. Por otro lado, se puede apreciar como el sistema tiene un Sobrepico igual a 36.5731 °C, lo cual equivale al 13.58 %, superando el 1 % definido en el Capítulo 4. A pesar de estas diferencias en los parámetros de desempeño, es posible afirmar que el controlador PI, logra estabilizar el sistema, por cuanto el error de estado estacionario es inferior al 2 %, dicho en otras palabras, la respuesta del sistema se encuentra dentro de la banda de paso definida en el Capítulo anterior.

### 5.1.2. Control Fuzzy Proporcional (FLP)

Al poner en marcha la estación Reactor de las MPS-PA de FESTO®, con el controlador Difuso proporcional, los resultados son los siguientes

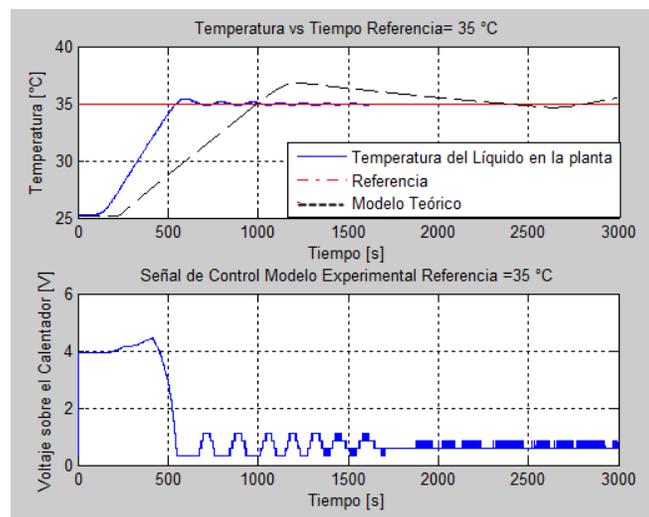


Figura 5.2 Implementación del Control Difuso Proporcional en la Estación Reactor, Referencia igual a 35 °C

Con ayuda de la Figura 5.2, es posible establecer que el Sobrepico porcentual de este tipo de controlador es igual al 3.38 %, y el tiempo de estabilización del sistema es aproximadamente igual a 1640 s. Para este caso, se evidencia que el error en estado estacionario del sistema es 0.13%.

### 5.1.3. Control Fuzzy Proporcional Derivativo (FLPD)

En la Figura 5.3, se evidencia el comportamiento de la temperatura del sistema cuando se utiliza el control Fuzzy con acciones proporcional y derivativa.

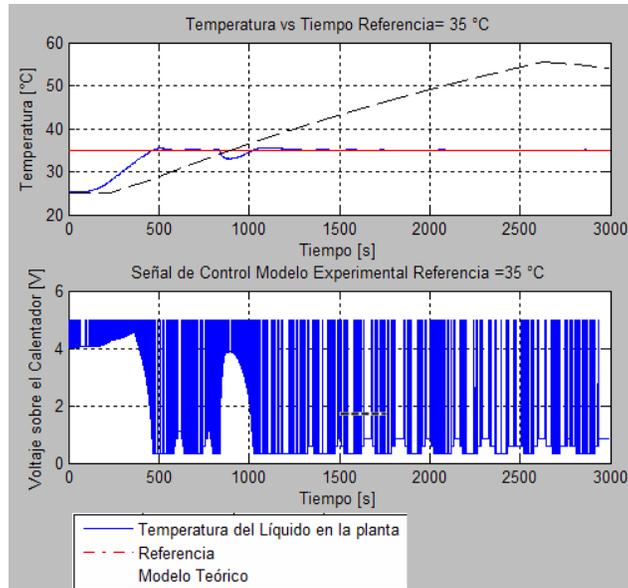


Figura 5.3 Implementación del Control Difuso Proporcional Derivativo en la Estación Reactor, Referencia igual a 35 °C

Teniendo en cuenta la información presentada en la figura anterior, se puede afirmar que el tiempo que tarda el sistema en llegar a un valor cercano a la referencia es igual a 1250 s. Por otra parte, se deja en evidencia que el máximo Sobrepico porcentual es igual a 6.05 % y que el error en estado estacionario es igual a 0.3 %.

#### 5.1.4. Control Fuzzy Proporcional Optimizado por medio de Algoritmo Genéticos

En la Figura 5.4, se presenta el comportamiento de la temperatura del sistema, al tener implementado un controlador Difuso optimizado por medio de *Algoritmos Genéticos*.

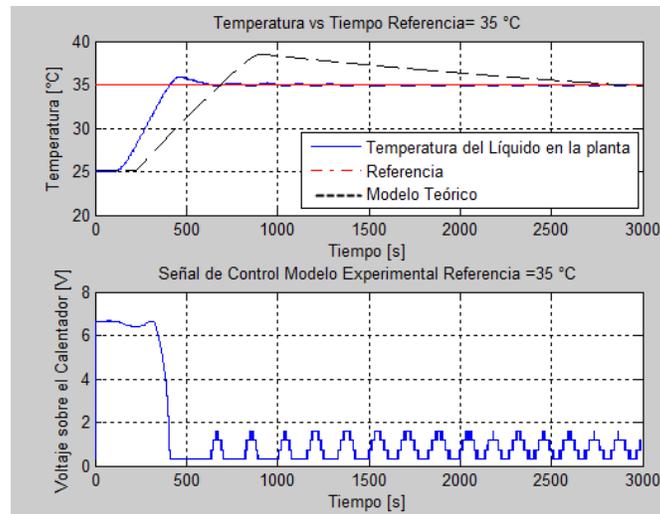


Figura 5.4 Implementación del Control Difuso Proporcional Optimizado en la Estación Reactor, Referencia igual a 35 °C

Gracias a la información suministrada por la figura anterior, es posible establecer que el error en estado estacionario del sistema es igual al 0.3 %. Adicionalmente, se puede apreciar que el tiempo de establecimiento del sistema es igual a 700 s, además el Sobrepico porcentual presentado es igual a 8.07 %.

## 5.2. Referencia igual a 50 °C

Siguiendo el mismo procedimiento descrito en la Sección anterior, se realizaron los diferentes experimentos para comprobar el desempeño de cada uno de los controladores, cuando la referencia era igual a 50 °C. Los resultados obtenidos, se presentan a continuación.

### 5.2.1. Control PI

Al realizar el mismo procedimiento de la Sección anterior, pero con una referencia 15 °C más grande que la anterior, los resultados se presentan en la Figura 5.5

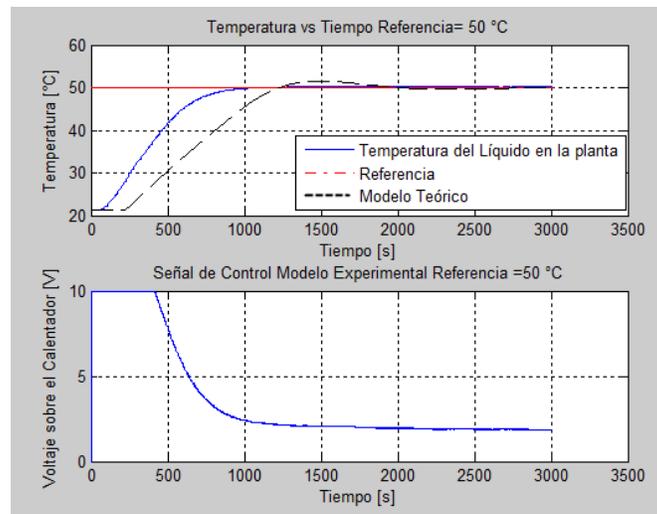


Figura 5.5 Implementación del Control PI en la Estación Reactor, Referencia igual a 50 °C

De esta manera, es posible afirmar que el tiempo de estabilización del sistema es aproximadamente igual a 1500 s, el máximo Sobrepico que presenta el sistema corresponde al 0.91 % de la referencia, y el error en estado estacionario, es igual a 0.23 %.

### 5.2.2. Control Fuzzy Proporcional (FLP)

Los resultados obtenidos, al implementar el controlador Fuzzy con acción proporcional en la estación Reactor, se ve reflejados en la Figura 5.6.

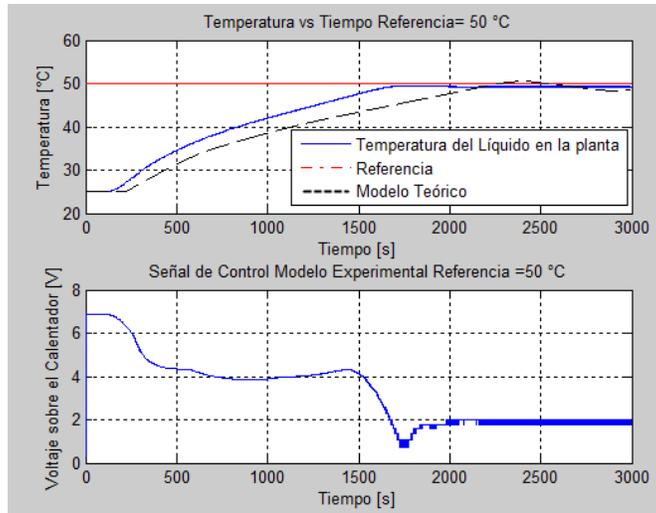


Figura 5.6 Implementación del Control Difuso Proporcional en la Estación Reactor, Referencia igual a 50 °C

Teniendo en cuenta la Figura 5.6, se puede concluir que el tiempo de estabilización es aproximadamente igual a 1850 s. Por su parte, el error en estado estacionario del sistema es igual a 1.4 %, y el máximo Sobrepico porcentual es igual a 1.96 % por debajo de la temperatura de referencia.

### 5.2.3. Control Fuzzy Proporcional Derivativo (FLPD)

Al realizar la implementación del controlador FLPD en la planta, con la referencia fija en 50 °C, los resultados son los siguientes.

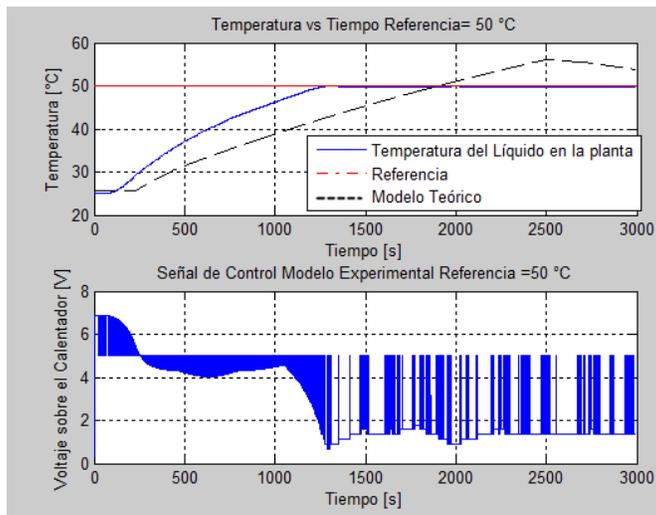


Figura 5.7 Implementación del Control Difuso Proporcional Derivativo en la Estación Reactor, Referencia igual a 50 °C

A partir de la Figura 5.7, se puede afirmar que algunos parámetros de desempeño de este tipo de controlador son: Tiempo de estabilización 1250 s; máximo Sobrepico porcentual 0.24 % por debajo de la referencia; y el error en estado estacionario es igual a 0.46 %.

#### 5.2.4. Control Fuzzy Proporcional Optimizado por medio de Algoritmo Genéticos (FLPGA)

Al poner en marcha la estación Reactor, implementando FLPGA la curva de temperatura obtenida se presenta en la Figura 5.8.

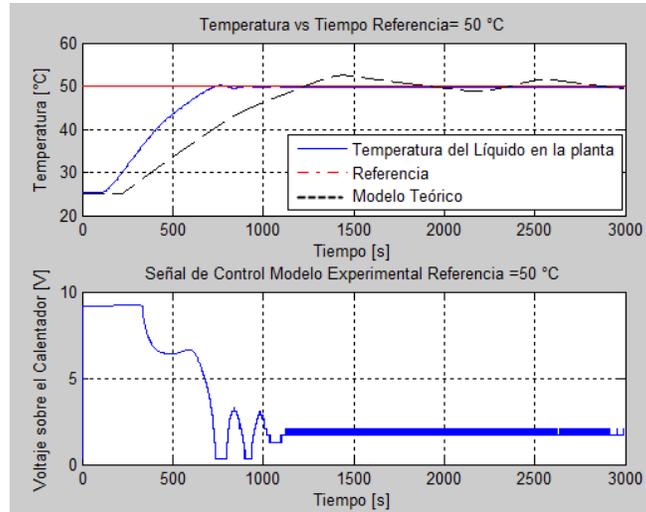


Figura 5.8 Implementación del Control Difuso Proporcional Optimizado en la Estación Reactor, Referencia igual a 50 °C

Es así como resulta válido afirmar que cuando se implementa un controlador Fuzzy con acción proporcional en la planta, el error estacionario es 0.35 %; por su parte el tiempo de establecimiento y el máximo Sobrepico porcentual son iguales a 1000 a y 0.67 % respectivamente.

Es así como es posible resumir los parámetros de desempeño de cada uno de los controladores presentados junto con el error cuadrático medio respectivo para una referencia igual a 35 °C, en la Tabla 5.1.

Controlador	Tiempo de Estabilización [s]	Máximo Sobrepico Porcentual	Error en Estado Estacionario	Error Cuadrático Medio
Controlador PI	2200	13.58	0.19	1.5786
Controlador FLP	1640	3.38	0.13	2.9322
Controlador FLPD	1250	6.05	0.3	2.8061
Controlador FLPGA	700	8.07	0.3	2.75

Tabla 5.1 Recopilación de los Parámetros de Desempeño experimentales para los Controladores Diseñados con Referencia igual a 35 °C

Por su parte, los parámetros de desempeño de los controladores cuando la referencia era igual a 50 °C y el error cuadrático medio, se pueden resumir en la Tabla 5.2.

<b>Controlador</b>	<b>Tiempo de Estabilización [s]</b>	<b>Máximo Sobrepico Porcentual</b>	<b>Error en Estado Estacionario</b>	<b>Error Cuadrático Medio</b>
<b>Controlador PI</b>	1500	0.91	0.23	8.3798
<b>Controlador FLP</b>	1850	1.96	1.4	10.2796
<b>Controlador FLPD</b>	1250	0.24	0.46	9.2046
<b>Controlador FLPGA</b>	1000	0.67	0.35	7.7040

*Tabla 5.2 Recopilación de los Parámetros de Desempeño experimentales para los Controladores Diseñados con Referencia igual a 50 °C*

Teniendo en cuenta los datos obtenidos, se puede observar en todos los casos presentados no se producían los mismos Sobrepicos que se esperaban de acuerdo con los resultados de las simulaciones. Lo anterior deja en evidencia que el actuador de la planta, tiene regímenes de entrada para los cuales no se produce un cambio perceptible en la temperatura del depósito principal; haciendo que los Sobrepicos se vean reducidos en comparación con los obtenidos a través de las simulaciones.

Por otra parte, se evidencia que las señales de control para los diferentes casos estudiados difieren en gran medida y por ello pueden constituir un criterio de decisión para escoger un control determinado. A manera de ejemplo, al usar el controlador PI, el actuador se satura por un intervalo de tiempo superior al resto de los controladores. Por su parte el controlador FLPGA a pesar que la señal de control no alcanza el valor de saturación del actuador, su nivel máximo de acción se encuentra cercano a este valor. Por otro lado, en el controlador FLP se presenta una señal de control más suave y con un valor máximo menor a las demás señales obtenidas. Finalmente, es importante mencionar que la acción de control del sistema FLPD, presenta cambios abruptos como se puede apreciar en la Figura 5.3 y Figura 5.7.

Por otro lado, se puede observar que el criterio de minimización escogido para optimizar al controlador Fuzzy proporcional, fue adecuado por cuanto se evidencia una mejora en todos los parámetros de desempeño del controlador, en el momento en que éste es implementado en la planta.

Adicionalmente, es importante mencionar que sí se desea que el sistema alcance un punto estable en la mayor brevedad de tiempo, es recomendable implementar el control optimizado. No obstante, en caso de querer tener el menor Sobrepico porcentual y minimizar el error en estado estacionario, resulta conveniente implementar en la estación el control clásico.

Es así como a partir de los parámetros de diseño establecidos, no es posible afirmar que un controlador es mejor en todos los criterios de comparación que otro, ya que en cada uno de ellos se puede observar que alguno tiene un mejor desempeño en alguna característica, sin embargo éste se ve superado por otro sistema de control en otro de los criterios de comparación establecidos. Por lo anterior, sí se desea implementar un único controlador es necesario definir a qué criterio se desea darle mayor importancia para poder escoger un sistema de control.

### 5.3. Especificaciones de Robustez

Adicionalmente, es importante analizar la robustez de cada uno de los controladores implementados. Para lograr lo anterior, se analizará principalmente el rechazo a perturbaciones de cada uno de los sistemas diseñados.

#### 5.3.1. Rechazo a perturbaciones

Con el fin de determinar cómo la planta reacciona a una perturbación, se van a realizar dos pruebas: *Cambio Abrupto de Referencia* y *Enfriamiento del Agua por Convección Natural*.

##### 5.3.1.1. Cambio Abrupto de Referencia

Esta prueba consiste en elevar la temperatura del depósito desde una temperatura inicial igual a 25 °C hasta una referencia de 35 °C, durante 3000 s. Una vez finalizado este tiempo, se cambiará abruptamente la referencia, y se elevará 15 °C. Los resultados obtenidos para cada uno de los controladores se presentan a continuación.

#### Control PI

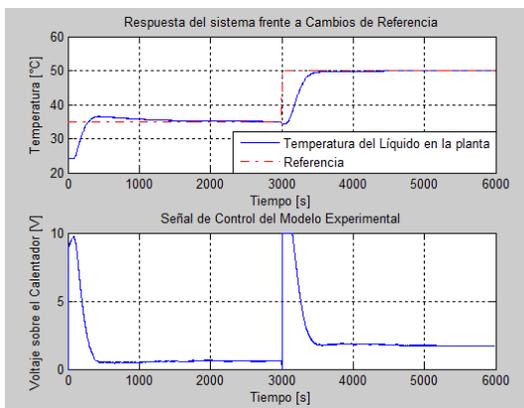


Figura 5.9 Respuesta del Control PI al cambio abrupto de Referencia

#### Control FLP

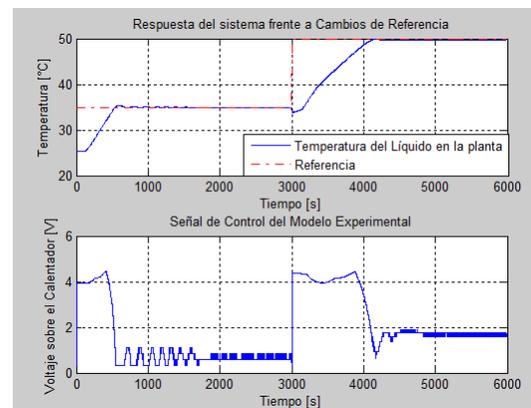


Figura 5.10 Respuesta del Control Difuso Proporcional al cambio abrupto de Referencia

### Control FLPD

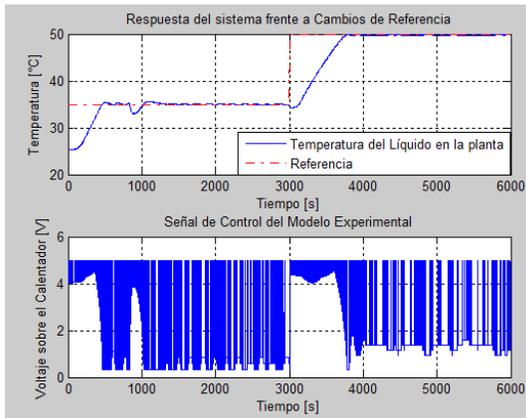


Figura 5.11 Respuesta del Control Difuso Proporcional Derivativo al cambio abrupto de Referencia

### Control FLPGA

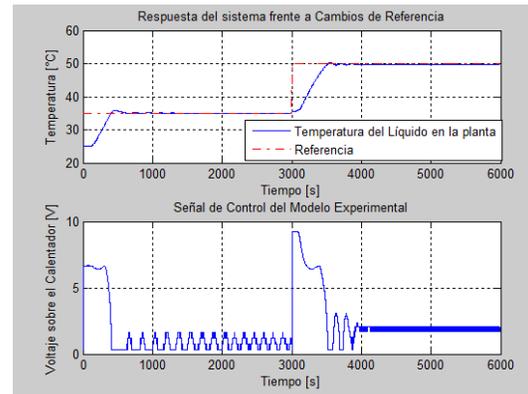


Figura 5.12 Respuesta del Control Difuso Proporcional Optimizado al cambio abrupto de Referencia

Como se puede apreciar, todos los controladores siguen las diferentes referencias a pesar del cambio abrupto que se produce en éstas. No obstante, es necesario precisar que la señal de control difiere en gran medida en cada uno de los sistemas como era de esperarse. En el control PI, se produce una saturación del actuador por un corto lapso, y posteriormente decae de forma exponencial. Por otro lado, en el control FLP esta señal continúa siendo la más suave de todas a pesar que presenta algunas oscilaciones cuando el sistema ha alcanzado el estado estable. Por su parte el sistema FLPD, presenta cambios bruscos en la señal, pasando de un voltaje alto a un voltaje bajo en un tiempo muy corto. Finalmente, en el FLPGA, se alcanza una pico máximo muy cercano a la saturación del actuador, sin embargo éste valor se reduce rápidamente a un valor cercano a la mitad del rango dinámico de la señal.

#### 5.3.1.2. Enfriamiento del Agua por Convección Natural

En esta prueba se busca elevar la temperatura del líquido del depósito, desde 25 °C hasta una referencia igual a 40 °C, durante dos mil segundos. Una vez transcurrido este tiempo, se encenderá la bomba de recirculación de la estación Reactor, manteniendo la misma temperatura como referencia.

En los resultados que se presentan a continuación, es importante tener en cuenta que las líneas segmentadas de color verde, indican el tiempo en el cual permanece encendida la bomba de recirculación de la planta.

### Control PI

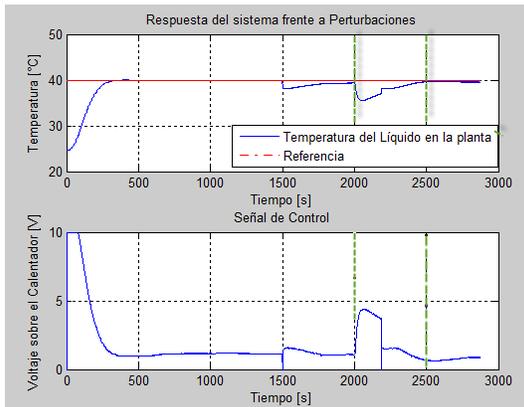


Figura 5.13 Respuesta del Control PI al enfriamiento del Agua por Convección Natural

### Control FLPD

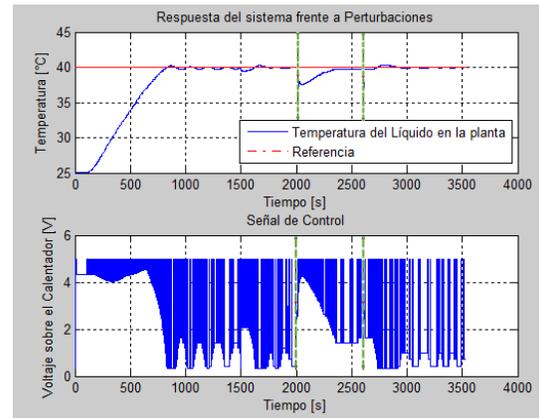


Figura 5.15 Respuesta del Control Difuso Proporcional Derivativo al enfriamiento del Agua por Convección Natural

### Control FLP

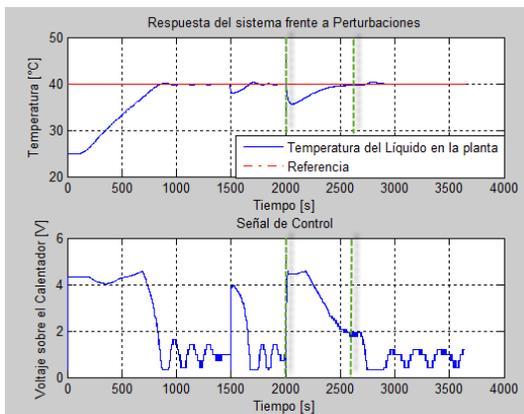


Figura 5.14 Respuesta del Control Difuso Proporcional al enfriamiento del Agua por Convección Natural

### Control FLPGA

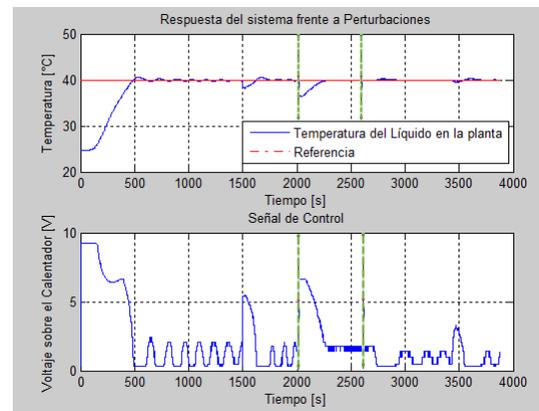


Figura 5.16 Respuesta del Control Difuso Proporcional Optimizado al enfriamiento del Agua por Convección Natural

De acuerdo con la Figura 5.13, Figura 5.14, Figura 5.15 y Figura 5.16, se puede apreciar que todos los sistemas diseñados responden de una forma adecuada al disturbio generado cuando se enciende el actuador que facilita la recirculación de agua, por cuanto se observa que cada uno de ellos después de un determinado tiempo estabilizan la temperatura al nivel de referencia que en este caso es igual a 40 °C.

Así mismo, es conveniente señalar que el controlador que responde de una forma más rápida a este tipo de perturbación es el sistema Difuso optimizado por Algoritmos Genéticos. En este sistema, se corrige rápidamente la disminución del nivel de temperatura por medio de un incremento abrupto de la señal de control, permitiendo que la temperatura se estabilice en el valor deseado a pesar que la bomba de recirculación permanecía encendida.

Por otro lado, se puede apreciar que la respuesta a la perturbación por parte de los controladores PI y Difuso con acción proporcional, tiene una respuesta similar, por cuanto se evidencia que la temperatura se regula justo en el momento en que ya no existe el disturbio. Adicionalmente es importante señalar, que la señal de control para el caso de PI, tiene una magnitud más pequeña con relación a la señal del controlador FLP.

Finalmente, es importante resaltar que el controlador FLPD, es el controlador que presenta la segunda magnitud más grande de la señal de control. Lo anterior, lo permite a este sistema ubicarse como el segundo controlador que tarda menos tiempo en alcanzar el estado estable, superando las acciones correctivas realizadas por el control PI y al control Fuzzy con acción proporcional.

## 6. CONCLUSIONES

A lo largo del desarrollo de este proyecto, se lograron cumplir los objetivos planteados, por cuanto fue posible modelar matemáticamente el proceso que caracteriza a una de las plantas del Sistema de Producción de Modular de Procesos Automáticos de FESTO®, el cual para este caso, consistió en el planteamiento del modelo de la Estación del Reactor. Para lo anterior se utilizó el standard OPC, en el cual el Control Lógico Programable que tiene la estación, hace el rol de puente de comunicación entre el Hardware de la estación y el Servidor OPC. Los datos del servidor fueron interpretados por la aplicación de MATLAB® Simulink.

Por otro lado, se diseñaron cuatro controladores. Uno de ellos (*Control PI*) fue diseñado con base en las leyes clásicas del control. Adicionalmente, dos de los controladores (*Fuzzy con Acción Proporcional* y *Fuzzy con Acción Proporcional y Derivativa*) restantes fueron planteados por medio de Lógica Difusa. Finalmente, se optimizó por medio de *Algoritmos Genéticos*, el controlador Fuzzy Proporcional previamente diseñado.

Adicionalmente, cada uno de los controladores fue implementado en la estación Reactor de las MPS-PA, por medio del protocolo OPC. Se establecieron los parámetros de desempeño como *tiempo de establecimiento*, *máximo Sobrepico porcentual* y *error en estado estacionario*, y el rechazo a perturbaciones como métricas para comparar los resultados obtenidos.

Por otra parte, es conveniente resaltar que no es posible afirmar que algún método de diseño de sistema de control resulta ser mejor que el otro, por cuanto cada uno presenta algunas características que aventajan al otro método.

Por ejemplo, los sistemas basados en lógica difusa, presentan una característica que aporta grandes beneficios al diseño de controladores, y es que este método no necesita del modelo matemático del sistema para ser implementado, por cuanto el diseñador puede variar las funciones de pertenencia y las reglas de inferencia en cada experimento hasta obtener la respuesta deseada por parte del sistema. No obstante, esta característica puede no resultar ser una ventaja para aquellos sistemas (por ejemplo el sistema modelado a lo largo de este documento) que tardan una gran cantidad de tiempo en estabilizarse en el valor deseado, haciendo que la relación costo/beneficio de esperar a que termine el proceso no sea viable y convenga determinar el modelo matemático que describa el proceso del sistema.

Además, los sistemas basados en lógica difusa presentan otra característica que puede, al igual que la anterior, generar consecuencias muy positivas o producir efectos poco deseados, *la flexibilidad*. Los controles basados en este método moderno, se caracterizan porque sí es necesario cambiar algún parámetro del sistema de control debido a que no se obtiene la respuesta deseada, a diferencia de los controladores diseñados por métodos clásicos, no es necesario volver a diseñar el controlador completamente, sólo basta con cambiar las funciones de pertenencia o las reglas de inferencia del sistema. Ahora bien, el problema radica en que esta propiedad no presenta ningún tipo de reglas que la rijan, razón por la cual, puede resultar de gran dificultad sintonizar un controlador de este tipo en sistemas con múltiples entradas y salidas.

Por su parte, a pesar que los sistemas de control basados en los métodos tradicionales requieren de un modelo matemático para poder ser implementados, la complejidad en el diseño de los mismos puede verse reducida a un conjunto de expresiones matemáticas que permiten determinar los parámetros del controlador y a una selección de la topología adecuada.

Por otro lado, la optimización por medio de Algoritmos Genéticos resulta de gran utilidad para la minimización de las funciones objetivo no lineales por cuanto este método, a diferencia de los tradicionales, no utiliza las derivadas de la función. Así mismo, este método al permitir representar las variables de diseño como cadenas de caracteres puede ser implementado tanto para la realización de sistemas de control en el dominio discreto o en el dominio continuo.

Sin embargo, este método heurístico presenta una característica poco deseada, sí se busca implementar en sistema de múltiples entradas y salidas, y es que implica un gasto computacional elevado y un tiempo de ejecución superior a muchas técnicas de programación matemática tradicional.

Si bien en el presente documento se han diseñado cuatro tipos de controladores por medio de diferentes técnicas, es posible implementarlas en las otras estaciones del Sistema de Producción Modular de Procesos Automáticos como la estación de mezcla, la estación de llenado o la estación de filtrado, ya que en estas estaciones las variables de control y de salida son diferentes a las variables implementadas en la estación del reactor.

Por otro lado, sería conveniente implementar un algoritmo de optimización, a un Control basado en Lógica de Difusa que tenga tanto acción proporcional como acción derivativa, que permita minimizar la función objetivo propuesta en el Capítulo 4.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Kaur, “Comparison between Conventional PID and Fuzzy Logic Controller for Liquid Flow Control : Performance Evaluation of Fuzzy Logic and PID Controller by Using MATLAB / Simulink,” *IJITEE*, vol. 1, no. 1, pp. 84–88, 2012.
- [2] L. De Microinformatique and J. Godjevac, “Comparison between PID and fuzzy control,” Lausanne, 2007.
- [3] J. P. Camacho Duarte, “Control de un péndulo invertido empleando lógica difusa y algoritmos genéticos,” Pontificia Universidad Javeriana, 2006.
- [4] A. F. Caro, F. J. López, and J. J. Ortíz, “Control Multivariable para un Helicóptero de dos grados de libertad utilizando Algoritmos Genéticos de Control,” Pontificia Universidad Javeriana, 2005.
- [5] J. Y. M. Cheung and A. S. Kamal, “Fuzzy Logic Control of Refrigerant Flow,” in *UKACC International Conference on CONTROL*, 1996, no. 427, pp. 2–5.
- [6] E. Pathmanathan and R. Ibrahim, “Development and implementation of Fuzzy Logic Controller for Flow Control Application,” *2010 Int. Conf. Intell. Adv. Syst.*, pp. 1–6, Jun. 2010.
- [7] FESTO®, “No Title.” [Online]. Available: <http://www.festo-didactic.com/int-en/?fbid=aW50LmVuLjU1Ny4xNy4xMi4zNDU2>.
- [8] K. Ogata, *Modern Control Engineering*. Prentice Hall, 2009, p. 912.
- [9] R. Dorf and R. Bishop, *Modern Control System*, Eleventh. Pearson Prentice Hall, 2008.
- [10] H. Reyes and F. Montaña, “Modelamiento y Control Digital de Temperatura para Horno Eléctrico,” Pontificia Universidad Javeriana, 2010.
- [11] B. Schellmann, J. Helmich, D. Schwarzenberger, A. Sigel, M. Bellenberg, and E. Terzi, “Manual Estación Reactor.” Denkendorf, p. 100, 2006.
- [12] F. Golnaraghi and B. Kuo, *Automatic Control Systems*, Ninth. Wiley, 2009, p. 800.
- [13] OmronElectronics®, “Curso Control de Temperatura,” p. 73.
- [14] M. McNeill and T. Ellen, *Fuzzy Logic A Practical Approach*. 1994, p. 350.
- [15] MathWorks®, “Foundations of Fuzzy Logic.” .
- [16] J. Jantzen, *Foundations of Fuzzy Control: A Practical Approach*. John Wiley & Sons, 2013, p. 346.

- [17] M. Obitko, "Introduction to Genetic Algorithms," 1998. [Online]. Available: <http://www.obitko.com/tutorials/genetic-algorithms/index.php>. [Accessed: 04-Nov-2014].
- [18] S. S. Rao, *Engineering Optimization*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2009, p. 840.
- [19] J. de D. Sanz Bobi, "Introducción a los Algoritmos Genéticos." Madrid, p. 71, 2002.
- [20] FESTO®, "Festo Learning Systems Overview." p. 8, 2012.
- [21] B. Schellmann, J. Helmich, D. Schwarzenberger, A. Sigel, M. Bellenberg, and E. Terzi, "P&ID diagram." p. 1, 2006.
- [22] T. Bank and E. Syracuse, "JUMO IMAGO 500 Multi-channel Process and Program Controller." Fulda, p. 12, 2013.
- [23] L. Zheng and H. Nakagawa, "OPC ( OLE for Process Control ) Specification and its Developments," pp. 917–920, 2002.
- [24] Congent Real-Time Systems, "What is OPC?," 2010. .
- [25] A. M. Lopez, H. Piquet, D. Patino, R. Diez, and X. Bonnin, "Parameters identification and gas behavior characterization of DBD systems," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 41, no. 8, pp. 2335–2342, 2013.
- [26] J. L. Pérez and A. C. Méndez, "Investigación Mínimos cuadrados generalizados para funciones vectoriales en la Geofísica Espacial," *G.I.E Pensam. Matemático*, no. Mc, pp. 1–21, 2012.