



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

“DISEÑO DE UN CONTROLADOR DIFUSO
MULTIVARIABLE PARA EL CONTROL DE UN
INTERCAMBIADOR DE CALOR EN UNA PLANTA
DIDÁCTICA”

TRABAJO DE TITULACIÓN

Previo a la obtención del Título de:

MAGISTER EN AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL INDUSTRIAL

ING. BYRONE ANTONIO ALMEIDA SALAZAR

ING. FERNANDO DANILO MORA VALVERDE

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO: 2018

AGRADECIMIENTOS

Nuestros más sinceros agradecimientos, a Dios el ser supremo que nos permite finalizar esta etapa de nuestra vida. A nuestros compañeros: Luis, Jhonny por el apoyo incondicional brindado en todo momento, a nuestro director Aristides, por su paciencia y tiempo dedicado, contribuyentes esenciales para culminar con éxito este proyecto.

DEDICATORIA

Esta tesis está dedicada a: A Dios quien ha sido mi guía, fortaleza y su mano de fidelidad y amor han estado conmigo hasta el día de hoy. A mi esposa Susana, mis hijos Gustavo, André y Sebastián quienes con su amor, paciencia y esfuerzo me han permitido llegar a cumplir hoy un sueño más. Finalmente quiero dedicar esta tesis a todos mis amigos (as), por apoyarme cuando más los necesite, por extender su mano en momentos difíciles, de verdad mil gracias.

Byrone Almeida

El presente proyecto lo dedico a mi familia, a mis padres y hermanos, pilar fundamental y razón de vida. A mi esposa Herminia por su comprensión incondicional, a mis hijos Anthony y Andrew por ser la inspiración, motivación e inyección de superación.

Fernando Mora

TRIBUNAL DE EVALUACIÓN

.....
Cesar Martín Moreno, Ph. D.

SUBDECANO DE LA FIEC

.....
Arístides Reyes Bacardí, M.Sc.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

.....
Dennys Cortez Alvarez, M.Sc.

MIEMBRO PRINCIPAL DEL TRIBUNAL

DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad y la autoría del contenido de este Trabajo de Titulación, me(nos) corresponde exclusivamente; y doy(damos) mi(nuestro) consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"

.....
Ing. Byrone Antonio Almeida Salazar

.....
Ing. Fernando Danilo Mora Valverde

RESUMEN

El problema de control que se plantea consiste en controlar la temperatura del fluido producto, que circula por el intercambiador de calor, a la vez que varía la viscosidad del fluido de trabajo, impulsado por bombas, por lo que surge una relación compleja entre temperatura, caudal y presión, requiriéndose además controlar esta última, la que varía al variar la viscosidad del fluido. Esto se debe a que la viscosidad de un fluido es variable con respecto a la temperatura y si se consideran las variaciones del punto de trabajo y la presencia de perturbaciones debido a la interdependencia no lineal entre las variables mencionadas se requiere de un controlador más complejo para lograr el desempeño deseado.

La estrategia que se propone aplicar para resolver el problema de control multivariable es la lógica difusa como controlador no lineal que encare los problemas de la multivariabilidad, la fase no mínima y las variaciones de los parámetros del sistema.

Los resultados obtenidos se explican con detalle en los últimos capítulos del presente Trabajo de Titulación. El desempeño de los controladores difusos desarrollados supera al desempeño de los controladores PID diseñados siguiendo las técnicas de diseño recomendadas por Ogunnaike [36]. La superioridad se pone de manifiesto en el rechazo a las perturbaciones y en la disminución del tiempo en que el control mantiene las bombas de impulsión trabajando en un régimen de grandes exigencias.

Como se evidencia de las pruebas por simulación presentadas en el Capítulo 4, es posible rechazar las perturbaciones con ambos controladores, sin embargo, las mejores prestaciones las proporciona el controlador difuso MIMO.

Cuando se aplica el control difuso al sistema MIMO las condiciones de trabajo de las bombas de impulsión del etilenglicol y glicerina son menos severas. Como conclusión el sistema MIMO controlador con la lógica difusa verifica los objetivos específicos.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	iii
TRIBUNAL DE EVALUACIÓN	iv
DECLARACIÓN EXPRESA	v
RESUMEN	vi
ÍNDICE GENERAL.....	1
ÍNDICE DE FIGURAS.....	3
ÍNDICE DE TABLAS	6
CAPÍTULO 1.....	8
1. ANTECEDENTES.....	8
1.1 Planteamiento del Problema.....	8
1.2 Solución Propuesta.	11
1.3 Objetivo General.....	12
1.4 Objetivos Específicos.	12
1.5 Metodología.....	13
1.6 Alcance del Trabajo.....	13
CAPÍTULO 2.....	15
2. ESTADO DEL ARTE DEL CONTROL DE LA PRESIÓN, TEMPERATURA EN LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR.	15
2.1 Introducción	15
2.2 Funcionamiento de la Planta Didáctica y Fluidos de Trabajo.	17
2.3 Estado del arte en el control de los intercambiadores de calor. ...	21
CAPÍTULO 3.....	31
2. MODELADO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR.....	31
3.1 Diseño del experimento de identificación de la planta.....	32
3.1.1. Rango de linealidad del proceso.	36
3.2. Identificación del modelo del intercambiador de calor y sus perturbaciones.....	42

3.3 Validación del modelo.	45
CAPÍTULO 4.....	46
4. DISEÑO DE LOS CONTROLADORES PARA EL INTERCAMBIADOR DE CALOR.	46
4.1 Determinación de los objetivos del control para el proceso de control de la temperatura y la presión de un intercambiador de calor.	46
4.2 Diseño del controlador clásico PID.....	46
4.1.1 Calculo del arreglo de ganancias relativas.....	46
4.1.2 Selección del apareamiento	47
4.1.3 Análisis del apareamiento seleccionado	48
4.1.4 Diseño del controlador PID multivariable.	49
4.3. Diseño del controlador difuso multivariable para el control de la temperatura y la presión en un intercambiador de calor.....	52
4.3.1. Diseño de la Base de Reglas	56
4.3.2. Escalamiento de las señales de entrada al controlador difuso..	61
4.4. Simulación de los controladores clásicos y difusos multivariables ante cambios en la referencia y perturbaciones	66
CAPÍTULO 5.....	69
5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES	69
5.1 Análisis de los resultados de las pruebas por simulación.....	69
5.2 Análisis comparativo del desempeño de los controladores diseñados.	71
5.3 Generalización de los Resultados.	73
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	75
BIBLIOGRAFÍA.....	77
ANEXOS.....	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Prensa Hidráulica para proceso de embutición. [1] [2]	9
Figura 1.2: Proceso de embutición metálica. [3].....	10
Figura 1.3: Esquema de la planta didáctica a utilizar. [4]	11
Figura 2.1: Intercambiador de calor de placas – PHE. [14]	16
Figura 2.2: Trayectoria de flujos en los Intercambiadores PHE.....	16
Figura 2.3: Diagrama P&ID de la planta didáctica a utilizar. [4]	17
Figura 2.4: Comportamiento de variables; presión, temperatura y caudal – Frecuencia 45 Hz. 18	
Figura 2.5: Sistema de inferencia difusa.	26
Figura 2.6: Ejemplo genérico de aplicación del conectivo AND como mínimo. (Reyes, 2005). 28	
Figura 2.7: Ejemplo genérico de aplicación del conectivo AND como producto.....	28
Figura 2.8: Componentes específicos del controlador difuso.....	29
Figura 2.9: Distribución irregular de 5 diferentes funciones de pertenencia por soporte y forma. 30	
Figura 3.1: Variables de estudio y relación entre ellas.....	33
Figura 3.2 Resultados del experimento de identificación del modelo del intercambiador de placas. 34	
Figura 3. 3. Frecuencia de la bomba de la Glicerina Constante.....	34
Figura 3. 4. Frecuencia de la bomba de Etilenglicol Constante	35
Figura 3.5. Frecuencia igual de las bombas de Etilenglicol y Glicerina.....	35
Figura 3.6: Rango lineal del aumento de presión vs temperatura.	36
Figura 3.7: Rango lineal de aumento de temperatura de la glicerina.	36
Figura 3.7: Respuesta al escalón de las variables del sistema.....	39
Figura 3.8: Respuesta al escalón y dinámica del sistema.	39
Figura 3.9: Respuesta en el tiempo de la temperatura de la glicerina con la función de transferencia (3.1)	43
Figura 3.10: Respuesta en el tiempo de la temperatura de la glicerina con la función de transferencia (3.2).....	43

Figura 3.11: Respuesta en el tiempo de la temperatura de la glicerina con la función de transferencia (3.3).....	44
Figura 3.12: Respuesta en el tiempo de la temperatura de la glicerina con la función de transferencia (3.4).....	44
Figura 3.13: Gráfico de los ajustes logrados en la identificación de los modelos. ...	45
Figura 4.1: Diagrama Simulink para el ajuste de controladores planta MIMO	50
Figura 4.2: Respuestas de la presión a la salida del intercambiador de placas a cambios en la referencia de la presión.....	51
Figura 4.3: Respuestas de la temperatura del producto en el dominio del tiempo a cambios en la referencia de temperatura.	52
Figura 4.4: Ejemplos de funciones de pertenencia de alta y baja resolución.....	53
Figura 4.5: Respuestas al cambio en la referencia que muestran la dinámica de la planta a controlar.....	54
Figura 4.6: Zonas y puntos característicos de la trayectoria en el espacio de estados de un sistema con respuesta oscilatoria.	55
Figura 4.7: Posible división de los universos de discurso de las variables de entrada en subconjuntos difusos.....	55
Figura 4.8: Tabla con la Base de Reglas	58
Figura 4.9: Editor de reglas del Sistema de Inferencias Difuso (fis)	59
Figura 4.10: Observador de las reglas del sistema de inferencias difuso.....	60
Figura 4.11: Observador de la superficie que conforma la Base de reglas del sistema de inferencias difuso.....	61
Figura 4.12: Diagrama Simulink para el ajuste por simulación del difuso MIMO.....	63
Figura 4.13: Respuestas de las variables controladas presión y temperatura de la glicerina	64
Figura 4.14: Rechazo a las perturbaciones por el sistema MIMO controlado con sendos PID.	66
Figura 4.15: Rechazo a las perturbaciones por el sistema MIMO controlado con controladores difusos con escalas de la primera columna Tabla 4.4.....	67
Figura 4.16: Rechazo a las perturbaciones por el sistema MIMO controlado con controladores difusos con escalas de la segunda columna Tabla 4.4	67
Figura 4.17: Rechazo a las perturbaciones por el sistema MIMO controlado con controladores difusos con escalas de la segunda columna Tabla 4.4	68

Figura 4.18: Rechazo a las perturbaciones por el sistema MIMO controlado con controladores difusos con escalas de la tercera columna	
Figura 5.1: Esfuerzo en el control del controlador difuso	70
Figura 5.2: Esfuerzo de los controladores PID en el control de la presión y temperatura de la glicerina.....	71
Figura 5.3: Esfuerzo de los controladores difusos en el control de la presión y temperatura de la glicerina.	72

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Variables de control en el intercambiador.	20
Tabla 3.1 características de la excitación y determinación de variables	37
Tabla 4.1 Resultados del primer experimento.....	64
Tabla 4.2 Resultados del segundo experimento	65
Tabla 4.3 Resultados del tercer experimento.....	65
Tabla 4.4 Valores de las escalas del controlador difuso	66
Tabla 5.1 Resultados de los experimentos.	69

INTRODUCCIÓN

La mayor parte de las empresas metal mecánicas que producen objetos huecos como guardafangos de automóviles, piezas de aviones, cubiertas de encendedoras, ruedas de carretillas, vasos, ollas, lavaderos, entre otros, se realizan mediante un proceso que se llama embutición profunda (Deep draw), en el cual una placa metálica normalmente de acero inoxidable, se deforma mediante una gran fuerza dentro de una matriz metálica, esta gran fuerza es producida por la presión que ejerce un cilindro oleo hidráulico de una prensa hidráulica. Debido a las presiones y fricciones a las que está sometido el fluido el mismo aumenta su temperatura y por tanto tiene variaciones sistemáticas de su viscosidad.

Para investigar los problemas que plantea este escenario en el control de las bombas impulsoras del fluido se ha construido una planta en el Laboratorio de Termofluidos de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería de la Universidad Estatal de Milagro.

Durante los últimos años, el control difuso ha surgido como una de las áreas más activas y fructíferas para la investigación en la aplicación de la teoría de conjuntos difusos. El tema propuesto se dirige a la investigación del diseño de controladores PID y difuso multivariable en presencia de cambios en la temperatura y presión en una planta didáctica. Esta planta utiliza intercambiadores de calor de placas; y en la cual la viscosidad del fluido es variable con respecto a la temperatura y presión, se consideran variaciones del punto de trabajo y presencia de perturbaciones entre sí de las variables a controlar. Utilizando el software Matlab se extraerán los datos necesarios. El estudio se lo realizará sólo al primer intercambiador de calor, mostrado en la Figura 2.3, con las variables temperatura y presión o caudal de los fluidos que intercambian calor.

Cuando se aplica el control difuso al sistema MIMO las condiciones de trabajo de las bombas de impulsión del etilenglicol y glicerina son menos severas. Como conclusión el sistema MIMO controlador con la lógica difusa verifica los objetivos específicos.

CAPÍTULO 1

1. ANTECEDENTES.

La mayor parte de empresas metalmeccánicas que realizan el proceso de embutición profunda (deep draw), la presión ejercida cilindro oleo hidráulico de una prensa hidráulica se debe al movimiento de un fluido que es aceite bombeado por una bomba de piñones y su motor eléctrico. La presión y por tanto la fuerza que deforma al metal debe ser constante, ya que, si ésta aumenta, en un momento dado en el proceso, se puede romper los objetos a fabricar, pero si la fuerza es menor que la adecuada, se producirán arrugas en el material, lo que es equivalente a decir daños en el producto final.

Según los informes del Banco Central del Ecuador, el sector de la industria manufacturera al año 2018, participa con un 13% en el PIB (Producto Interno Bruto), y dentro de este sector la industria metalmeccánica es uno de sus principales componentes. Así mismo la superintendencia de Compañías, Valores y Seguros, indica que un 5% de todas las actividades económicas del sector metal mecánico, corresponden a actividades de forja, prensado, estampado y laminado de metales. Esto nos da un indicio de que este sector importante de la economía ecuatoriana puede crecer en el futuro y reemplazar a la importación.

1.1 Planteamiento del Problema.

Las Empresas metalmeccánicas en Ecuador tienen las prensas hidráulicas como parte de su proceso productivo, sin embargo, se presentan paras y daños, en la mayoría de las ocasiones por las malas prácticas de mantenimiento tales como: mal cambio de filtros, no reemplazo de filtros, mala selección del aceite, creencias sobre auto lubricación y operación a temperaturas no adecuadas. Éste último problema es en el que nos centramos como objeto de estudio de este trabajo de titulación.

La Figura 1.1 muestra el esquema básico del funcionamiento de una prensa hidráulica que se acciona mediante una válvula control en donde el fluido, en este caso aceite, es bombeado hacia el cilindro de fuerza para el accionamiento del pistón principal que contiene la matriz troquel que tiene la forma del elemento a embutir. El cilindro principal tiene dos aberturas de ingreso y salida del aceite para producir el efecto de prensado, el aceite del punto de salida es retornado al tanque reservorio principal.

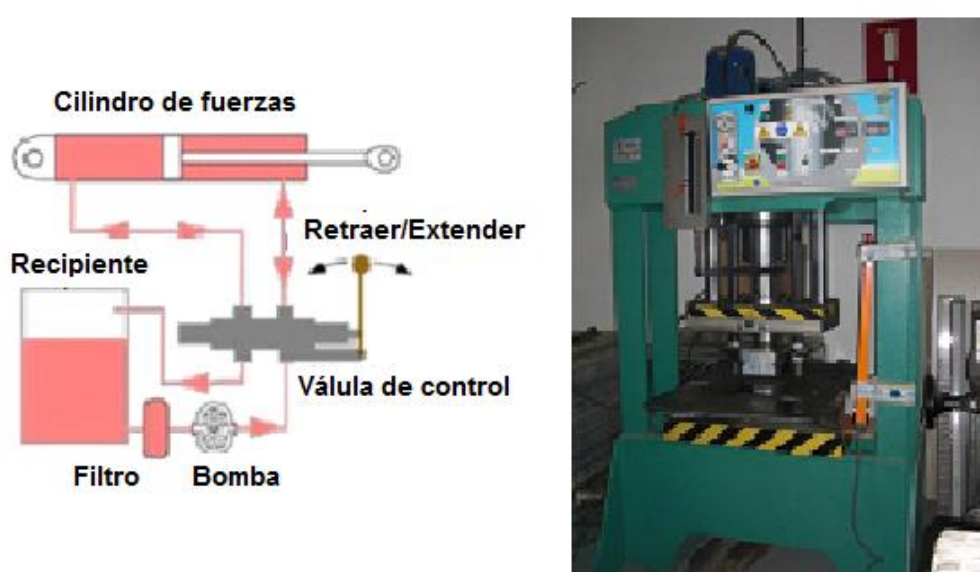


Figura 1.1: Prensa Hidráulica para proceso de embutición. [1] [2]

La Figura 1.2, muestra el proceso de embutido, que es utilizado en la elaboración de piezas de cierta forma, que generalmente provienen de una chapa metálica, láminas metálicas de hasta 1.5 mm de espesor, dependiendo del material. Para el caso de acero inoxidable espesores de hasta 0.8 mm. El proceso se efectúa colocando la chapa metálica en un troquel matriz, y luego se empuja con un punzón que generalmente es accionado por el pistón principal, hacia la cavidad y se conforma el material de acuerdo con la forma deseada.

Con el paso del tiempo en el proceso de fabricación y de acuerdo con las condiciones climáticas y la hora del día, también por el paso del aceite por las

válvulas y tuberías del sistema, se produce fricción y por ende este fluido comienza a aumentar su temperatura, de tal forma que su viscosidad comienza a reducirse, y por ende su presión; por tanto, la fuerza en el interior del cilindro disminuye, lo cual produce daños en la pieza que se desea fabricar. Si hablamos en términos de producción, este producto terminado no pasaría el control de calidad.

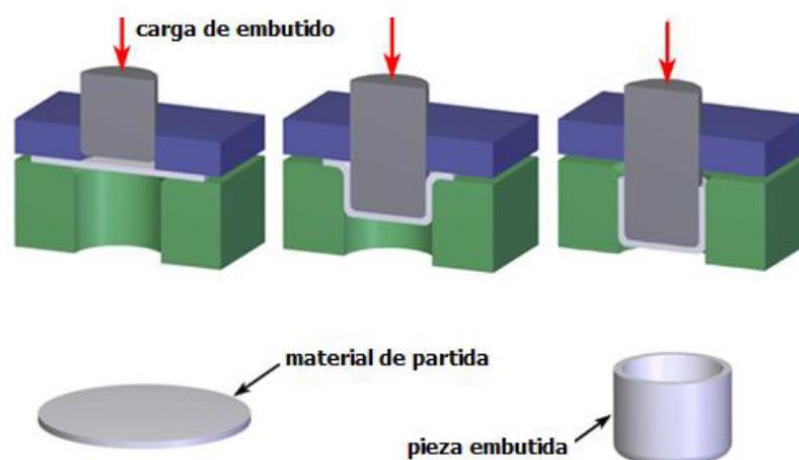


Figura 1.2: Proceso de embutición metálica. [3]

Para corregir el problema una solución podría ser que en este sistema normalmente se añade un intercambiador de calor que permite enfriar el fluido (aceite), de tal manera que, al no aumentar la temperatura del aceite, la prensa hidráulica pueda desempeñarse eficientemente.

Lo anteriormente descrito nos direcciona a que es necesario controlar la presión en el fluido oleo hidráulico generado por la bomba de alimentación en movimiento y por tanto la fuerza en el cilindro principal. También nos da un indicio de que para poder controlar el caudal de la bomba debemos tener un variador de frecuencia, así como el control da temperatura del fluido refrigerante.

1.2 Solución Propuesta.

Una vez expuesto el problema de la industria metalmecánica y descrito en forma detallada en el inciso 1.1, es necesario realizar pruebas de investigación en una planta didáctica que simule dichas variables a controlar, la planta debe contener de un intercambiador de calor y bombas centrífugas que bombeen un fluido a controlar, en nuestro caso el aceite, para lo cual se utilizará una mezcla de glicerina y parafina para simular su cambio de viscosidad con respecto al aumento de temperatura, y el fluido de calentamiento será etilenglicol, las bombas deberán ser controladas mediante variadores de frecuencia para realizar el cambio de velocidad, su caudal y su presión.

La Figura 1.3, muestra la planta didáctica que utilizaremos como herramienta para ejecutar las pruebas experimentales. Para la obtención de datos y diseño de nuestro controlador utilizaremos los subsistemas donde se involucre a la glicerina y al etilenglicol. El fluido análogo a simular comparándolo con el aceite es la mezcla de glicerina y parafina por la ventaja que se tiene en la caída de viscosidad se aprecia un rango mayor para el análisis.

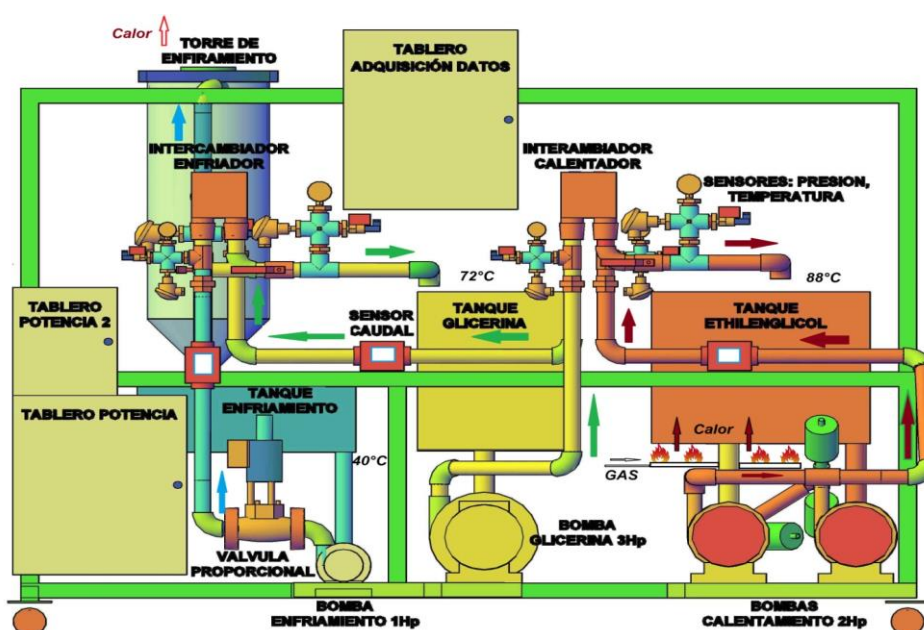


Figura 1.3: Esquema de la planta didáctica a utilizar. [4]

La Planta contiene los elementos necesarios para la obtención de datos experimentalmente como intercambiador de calor, bombas centrífugas que recirculan los fluidos a controlar con variadores de frecuencia, así como sensores de caudal, presión y temperatura.

En resumen, el tema propuesto se dirige a la investigación del diseño de controladores PID y difuso multivariable en presencia de cambios en la temperatura y presión en una planta didáctica. Esta planta utiliza intercambiadores de calor de placas; y en la cual la viscosidad del fluido es variable con respecto a la temperatura y presión, considerando variaciones del punto de trabajo y presencia de perturbaciones entre si de las variables a controlar, de tal manera que se aprecie el control de dichas variables. Utilizando el software Matlab se extraerán los datos necesarios. El estudio se lo realizará sólo al intercambiador en la Zona de Calentamiento con las variables temperatura y presión o caudal de los fluidos que intercambian calor como por ejemplo se realiza en [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12]. La zona de enfriamiento no forma parte del análisis del estudio propuesto, sin embargo, en el proceso de funcionamiento de la planta ésta debe funcionar.

1.3 Objetivo General.

Diseñar un controlador difuso multivariable para el control de la presión y la temperatura de un fluido con viscosidad variable en una planta didáctica.

1.4 Objetivos Específicos.

1. Identificar el modelo para control de la temperatura y la presión en un intercambiador de calor mediante experimentación.
2. Diseñar un controlador clásico PID y un controlador difuso multivariable para el control de la presión y la temperatura.
3. Comparar el funcionamiento del control clásico PID y el controlador difuso multivariable para control de la temperatura y la presión en un intercambiador de calor ante cambios de referencia y perturbaciones.

1.5 Metodología.

Se utilizó la técnica experimental y de análisis de datos. Los datos fueron extraídos de la planta didáctica utilizando el software Matlab. Se compararon técnicas de control tales como el control clásico (PID) y el controlador difuso multivariable con su posterior análisis y comparación de resultados. El soporte programático para la solución de las estrategias de control se compone del programa MATLAB y su herramienta de simulación SIMULINK y para la adquisición de datos por medio de tarjeta NI-USB 6009 de National Instruments y LabView para la programación final del controlador difuso.

Durante los experimentos realizados para la identificación de los modelos matemáticos del proceso de regulación de la temperatura y presión de la planta se empleó la glicerina con esferas de parafina, con una temperatura máxima de 88°C, y otros elementos como el etilenglicol para aumentar la viscosidad del agua.

Se determinó un modelo matemático que se enfocará en hacer similitud dinámica de las variables de la planta didáctica y el funcionamiento de una prensa hidráulica.

Se realizó la revisión bibliográfica de temas relacionados con el estudio de los modelos matemáticos publicados y su programación que hagan referencia al tipo de sistema en estudio.

1.6 Alcance del Trabajo.

Este estudio de carácter experimental brinda información a las industrias que están relacionadas con prensas hidráulicas, y que tomen conciencia de la importancia del control de la temperatura, presión y caudal de los sistemas para evitar paradas innecesarias e ineficiencia productiva.

El operar con temperatura no adecuada (altas temperaturas) está entre los siete errores más comunes de las maquinarias hidráulicas. A estas temperaturas inadecuadas se producen daños en los sellos, mangueras, la viscosidad del aceite disminuye y se pierde fuerza en la operación, y por consecuencia fallas en

el producto terminado. De tal manera que el presente estudio sirve como información y recomendación de buenas prácticas para la operación dirigida a la industria nacional en esta área productiva.

Durante el desarrollo de la tesis, además, se dará respuesta a las siguientes preguntas

¿Es posible mantener las salidas del sistema en el punto de referencia?

¿Es posible controlar las salidas siguiendo algunas referencias?

¿Cuán grandes se requieren las acciones de control?

¿Hay algún riesgo de que aparezca alguna inestabilidad oculta en el modelo?

¿Existen problemas numéricos en el cálculo de las propiedades del sistema?

¿Qué incertidumbre en el modelo del proceso o en el conocimiento de la perturbación es tolerable para mantener algunas propiedades de control?

Los controladores requeridos ¿son teóricamente factibles?

¿Es posible rechazar la perturbación?

Para responder a estas preguntas se aplicarán diferentes enfoques de análisis de los sistemas multivariables en general.

CAPÍTULO 2

2. ESTADO DEL ARTE DEL CONTROL DE LA PRESIÓN, TEMPERATURA EN LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR.

En este capítulo se muestra el principio de funcionamiento del intercambiador de calor que se utiliza en la planta didáctica y su analogía con lo existente en la industria; también se define las variables a controlar en el modelo propuesto, fluidos de trabajo y componentes principales. De igual manera se compara los distintos trabajos publicados y su relación con el modelo a controlar propuesto en este trabajo de titulación.

2.1 Introducción

El fluido utilizado en las prensas hidráulicas comúnmente es el aceite mineral, éste es conducido por tuberías y mangueras a cierta presión y temperatura. Cada fluido trabaja a una determinada condición establecida por el fabricante. Cuando se produce un cambio en la temperatura del ambiente o del contorno de trabajo, entonces su viscosidad también cambia (Ver Anexo 1), y esto en esencia afecta su funcionalidad.

Con base en lo anteriormente expuesto, notamos que una de las variables principales a controlar es la Temperatura; y una de las técnicas más utilizadas en la industria es el uso de intercambiadores de calor.

Cengel [13] menciona que los intercambiadores de calor permiten transferir esta forma de energía a través de:

- a) Sus paredes (relación de áreas de transferencia de calor)
- b) Por su interacción o contacto de fluidos a los cuales se les puede controlar variables entre ellas la temperatura
- c) Según su servicio o por el tipo de construcción (tubo – coraza y superficies planas o placas).

En la planta didáctica que usamos para el análisis, tenemos un intercambiador de calor de placas o empacado. En este intercambiador las dos corrientes de los fluidos a controlar están separadas por placas o láminas delgadas y son los más apropiados para fluidos de alta viscosidad. (Ver Figura 2.1).

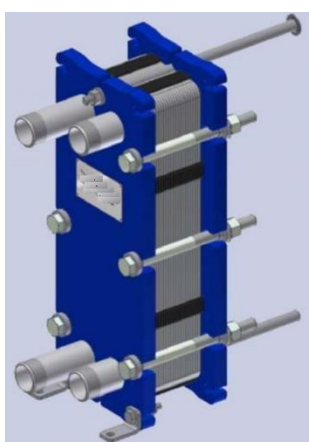


Figura 2.1 : Intercambiador de calor de placas – PHE. [14]

La trayectoria del flujo es un aspecto importante que considerar, ya que puede ser en paralelo (los fluidos fríos y caliente se desplazan en la misma dirección) o el de contracorriente (donde los fluidos se desplazan en direcciones opuestas). El intercambio se produce haciendo disminuir la temperatura de un fluido y aumentando la del otro, tratando de alcanzar el equilibrio térmico, esto para el intercambiador paralelo. En cambio, para el intercambiador contracorriente, la temperatura del fluido frío se aproxima a la temperatura del fluido caliente de entrada. (Ver Figura 2.2)

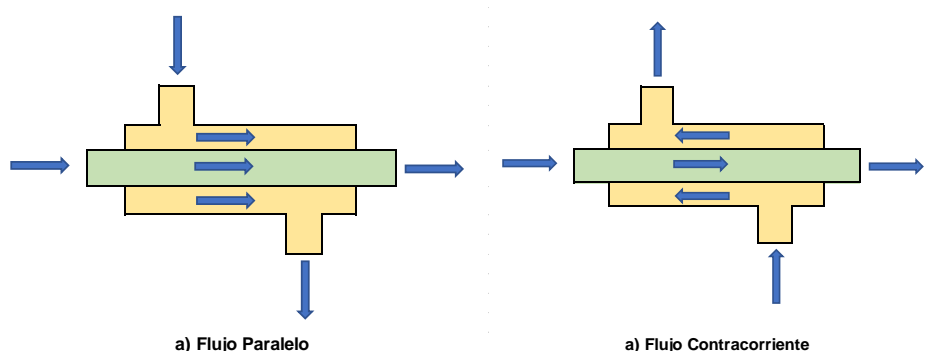


Figura 2.2 : Trayectoria de flujos en los Intercambiadores PHE.

2.2 Funcionamiento de la Planta Didáctica y Fluidos de Trabajo.

Para explicar el proceso de funcionamiento nos remitiremos a la Figura 2.3, donde se muestra un diagrama P&ID de la planta didáctica que utilizaremos como herramienta para ejecutar las pruebas experimentales. Para la obtención de datos y diseño de nuestro controlador utilizaremos las Zonas de Calentamiento y la Zona de control de presión y temperatura. Como ya se mencionó en el apartado 1.2 el fluido a ser analizado por similitud es el aceite mineral.

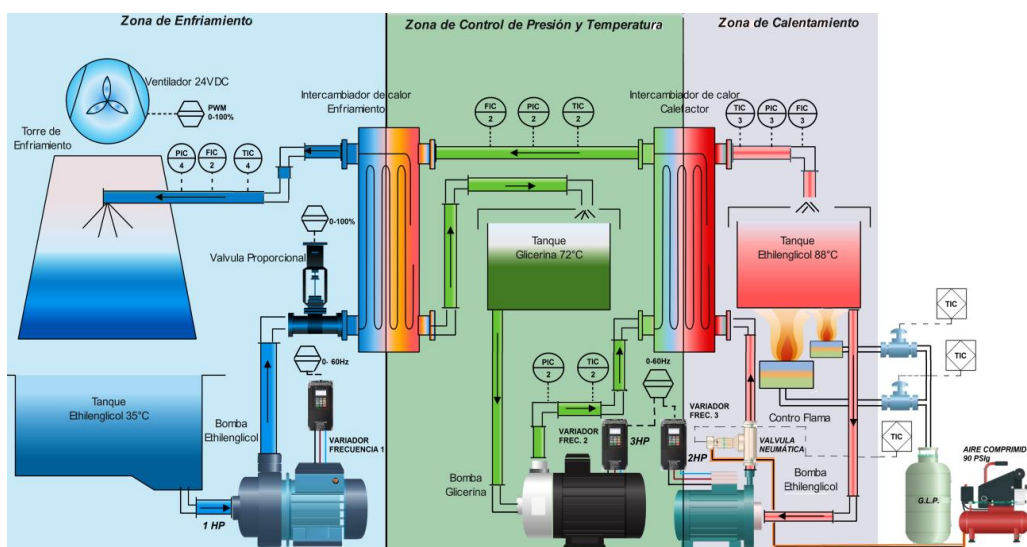


Figura 2.3: Diagrama P&ID de la planta didáctica a utilizar. [4]

El producto por utilizar para el análisis experimental en la planta didáctica es la glicerina con esferas de parafina, en un rango de operación previamente definido entre 70°C y 82°C, y en donde se trabajará en un punto de operación con temperatura controlada. En la sección de la Zona de Calentamiento se utilizará el fluido etilenglicol, a quien se le subirá la temperatura a 88°C con el sistema de control de llama y cuyo caudal será suministrado por una bomba de 2 HP. También existe otro intercambiador de calor en la zona de enfriamiento, pero el objetivo principal del sistema de control es que se mantenga la temperatura y presión constante controlando el sobrecalentamiento en el intercambiador de calor, cualquier aumento o modificación producirá resultados no deseados.

La variable por controlar es la temperatura del intercambiador de calor, y se lo realizó manipulando el caudal del fluido etilenglicol, mediante el cambio de la velocidad en bomba generada por el motor eléctrico, que a su vez es regulado por un variador de frecuencia 3 (0 -10 V). Como la viscosidad del fluido varía con la temperatura, entonces se necesitó controlar la presión por medio de otro variador de frecuencia 2 (Ver Figura 3) para regular la velocidad de la bomba de glicerina. Debe notarse que la temperatura y presión de la glicerina son afectadas entre sí, por lo que podría decirse que existen perturbaciones.

Para la extracción de datos se utilizó el LabView tarjeta NI-USB 6009 (ver Anexo 1), a un tiempo de muestreo de 0.25s. Así mismo se muestra en el Anexo 2, los esquemas de la adquisición de datos por medio de Simulink.

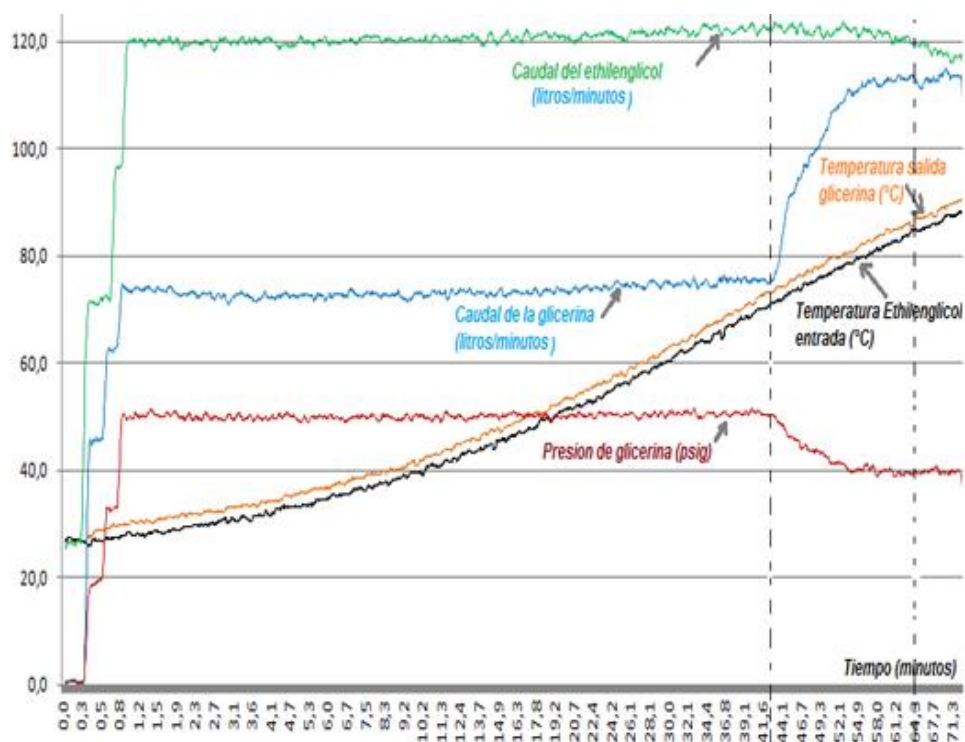


Figura 2.4: Comportamiento de variables; presión, temperatura y caudal – Frecuencia 45 Hz.

La Figura 2.4, muestra el comportamiento de las variables presión y caudal con los fluidos Etilenglicol y Glicerina, con el incremento de la temperatura, desde

temperatura ambiente, cuando el sistema de bombeo se mantiene a una frecuencia constante de 45 Hz. El tiempo de calentamiento es de 65 minutos, al minuto 42 se generan los cambios para luego establecerse al minuto 65. En este intervalo de tiempo se tienen: Presión (50 a 40 psi); caudal glicerina (68 a 112 l/min); caudal de etilenglicol (121 – 120 l/min); temperatura glicerina (67 a 83 °C); temperatura etilenglicol (65 a 82 °C).

El fluido de trabajo es una mezcla de glicerina con parafina, el cual tiene propiedades físicas de viscosidad variable con respecto a la temperatura, y que a la vez hace que el caudal del fluido dentro de la tubería aumente con respecto a la temperatura y su presión decaiga en el rango de experimentación.

2.2.1 Variables por controlar en el intercambiador de calor

Necesitamos encontrar el modelo matemático del intercambiador de calor para poder hacer nuestro análisis, debido a que no tenemos un espectro de la planta (datos históricos almacenados), y además de que la planta funciona solo en casos experimentales, entonces debemos conocer los procesos que involucran su operación. De acuerdo con el funcionamiento descrito en el inciso 2.2 existen dos tipos de procesos, el primer proceso involucra la Termodinámica donde se produce la transferencia de calor por medio de los dos fluidos con temperatura controlada en el intercambiador de calor y el segundo proceso donde se involucra a la hidrodinámica de los fluidos, es decir el estudio de los caudales en estudio.

En el intercambiador de calor en mención es necesario identificar las variables que se van a controlar y medir experimentalmente, cuáles serán las que se van a manipular, es decir las variables propias de la planta y que nos darán una directriz del modelo de control a seguir.

La Tabla 1, muestra las variables controladas y manipuladas de acuerdo con el tipo de fluido de interés que existe en el intercambiador de calor de la planta didáctica. Aquí se identifica claramente que como nuestro fluido

de interés es la glicerina nuestras variables controladas serán la temperatura y presión en la salida.

Fluido	Variable	Tipo	
Glicerina	Temperatura de salida	Variables Controladas	Variables de control medibles experimentalmente
	Presión de salida		
	Caudal	Variables Manipuladas	
	Caudal		

Tabla 1: Variables de control en el intercambiador.

El modelo matemático se puede aproximar al real pero jamás llega a igualarlo, con base en esto se tiene que hacer algunas hipótesis para poder desarrollarlo, a continuación, se las menciona:

1. No existe pérdidas de calor en las tuberías la distribución de calor es uniforme, ni en el intercambiador de calor hacia el entorno (proceso adiabático).
2. Las superficies de las secciones del intercambiador de calor son uniformes.
3. La transferencia de energía (masa y calor) suceden en una sola dirección. El coeficiente de transferencia de calor permanece invariante en el tiempo.
4. Las propiedades físicas de los fluidos como el calor específico son constantes.

Las ecuaciones 2.1 y 2.2 muestran los modelos matemáticos a seguir, una vez que se realiza el balance de energía:

Zona de absorción de calor – Fluido Glicerina.

$$V_{Gl} * \rho_{Gl} * c_{pGl} * \frac{dT_{Gl}}{dt} = \dot{m}_{Gl} * c_{pGl} * T_{Gl}^i - \dot{m}_{Gl} * c_{pEth} * T_{Gl}^o + U * A(T_{Gl}^i - T_{Eth}^o) \quad (2.1)$$

Zona de cedencia de calor – Fluido Etilenglicol.

$$V_{Eth} * \rho_{Eth} * c_{pEth} * \frac{dT_{Eth}}{dt} = \dot{m}_{Eth} * c_{pEth} * T_{Eth}^i - \dot{m}_{Eth} * c_{pEth} * T_{Eth}^o + U * A(T_{Gl}^o - T_{Eth}^i) \quad (2.2)$$

Dónde tenemos que para el fluido Etilenglicol:

T_{Eth}^i : Temperatura de entrada [°C]

T_{Eth}^o : Temperatura de salida [°C]

\dot{m}_{Eth} : Flujo másico [kg/s]

c_{pEth} : Calor específico [Kcal/K°C]

De igual manera para el fluido Glicerina:

T_{Gl}^i : Temperatura de entrada [°C]

T_{Gl}^o : Temperatura de salida [°C]

\dot{m}_{Gl} : Flujo másico [kg/s]

c_{pGl} : Calor específico [Kcal/K°C]

2.3 Estado del arte en el control de los intercambiadores de calor.

En [5] se diseña un control predictivo lineal para controlar un proceso de intercambio de calor. Desarrollan dos modelos matemáticos uno simplificado de primer orden para el intercambiador de placa y otro para otro proceso industrial con un intercambiador de placas soldadas. Los resultados informados indican que la tasa promedio de flujo del producto es mayor con el control PID-Fuzzy y se requirió de menos energía, el proceso se hizo más rápido a pesar de su inestabilidad y no linealidad y siguió estrategias de consignas variables. Se comenta que la lógica difusa debe usarse para desarrollar programas de control concentrándose en los objetivos funcionales y no en las matemáticas. Los controladores difusos requieren de una profundización de estudio en las plantas

a escala piloto para evaluar su potencial. Se menciona también que el rango de aplicabilidad de los controladores difusos en los procesos industriales va en aumento.

Takagi y Sugeno [15] en su artículo indican que es una herramienta matemática para construir un modelo difuso de un sistema, donde la premisa es la implicación de la descripción del subespacio difuso de entradas y su consecuencia es una relación de entrada-salida lineal. Sugieren el uso de una herramienta matemática para describir un sistema, que de una forma bastante simple representa relaciones altamente no lineales. Los algoritmos de identificación pueden ser utilizados en los procesos industriales y se puede proponer resultados en las mediciones difusas con premisas como “la temperatura es alta”.

En [16] realizan el estudio de controlar la temperatura de salida de un intercambiador de calor de tubo y coraza por medio de la presión de flujo, mencionan que esto en algunas ocasiones no es posible, debido a que la acción de control no es suficiente para la variabilidad de los coeficientes del sistema y debe ser modelado con precisión.

Fu [11], en su artículo, construye un modelo que describe el comportamiento dinámico del fluido en un intercambiador de placas y lo simula en un software controlando el tiempo. Por su parte en [10] se menciona que los intercambiadores de calor de placas PHE se utilizaron exclusivamente transferir calor de líquido a líquido por su fácil limpieza. Este autor investigó experimentalmente la caída de presión y los coeficientes de transferencia de calor.

King y Stathaki [16] en su publicación sobre el diseño de un controlador fuzzy multivariable, muestran el desafío en los controles de los procesos industriales multivariables y cómo la lógica difusa hizo un progreso enorme al ponerla en práctica. Además, describen que parámetros del controlador son efectivos estableciendo reglas claras por las cuales los operadores humanos controlan un proceso.

El diseño de un controlador PID difuso auto-adaptativo para un intercambiador de calor es presentado en el artículo de Trikha [17], donde el controlador difuso se combina con un controlador PID por lo que se hace un sistema control

inteligente con precisión de los parámetros. Se simula en un entorno de Matlab donde se muestran en resultados su factibilidad de aplicación.

[18], en su publicación muestra un modelo matemático dinámico utilizando parámetros reales del intercambiador de calor. Muestra las respuestas de la simulación con una tendencia casi similar con el resultado experimental, lo que indica la validez del diseño para su uso.

Sivakumar [19] en su artículo indica que el control de temperatura en un intercambiador de calor de tubo y coraza es no lineal y sus parámetros varían en el tiempo. También menciona que el controlador PID no puede satisfacer una serie de requisitos de precisión, aquí se combina la estrategia PID con las técnicas difusas, y se demuestra que la estrategia difusa PID mejora eficazmente el desempeño del intercambiador de calor.

En [20], desarrollaron un modelo matemático para un intercambiador de calor de placas y muestra una tendencia no lineal. Este autor linealiza las ecuaciones y transforma en el dominio de Laplace deduce que la función de transferencia tiene un atraso de primer orden y de segundo orden. Utilizando los datos experimentales con la técnica de respuesta a la frecuencia, resulta una función de transferencia con inercia de primer orden con tiempo muerto. Los niveles de ajuste muestran respuestas experimentales aceptables, con lo cual se justifica el modelo propuesto. Se concluye también que el controlador difuso se desempeña mejor que uno convencional.

El trabajo que expone [21], un intercambiador de calor de tubo y coraza, donde la temperatura de salida debe ser mantenida en un punto de operación. Aquí se propone un controlador PI con retroalimentación donde presenta alta sobrerregulación, para minimizarla se diseña un controlador difuso y otro por modelo interno para eliminar el error en estado estacionario.

En [22], plantean el control de un intercambiador de calor sin considera la transferencia de calor, y mencionan que es robusto frente a cambios en el suministro de refrigerante. El modelo se basa en la energía térmica total almacenada en los fluidos como variable de control en lugar de la temperatura de salida, utilizando métodos para estimar la energía como el filtro de Kalman, y en

consideraciones cuasi estáticas. Sus estrategias de control, simulación y medición son realizadas en un intercambiador de calor de placas industrial.

Los controladores lógicos difusos, utilizan la misma función que los PID, pero a diferencia de éstos utilizan la estrategia heurística, ya que los convencionales utilizan los modelos matemáticos proporcionados por las ecuaciones diferenciales [23].

Con base en lo anteriormente mencionado podemos decir que los sistemas de control difuso son útiles para aquellos modelos matemáticos no lineales o cuando no se tiene algún modelo matemático para estudio. La mayoría de los autores menciona que son una especie de imitaciones de leyes de control creadas por el ser humano. Esto nos da una gran ventaja en situaciones de diseño complejas y donde no se tiene modelos matemáticos, es tratar de formalizar la experiencia y el conocimiento empírico de las personas en un proceso determinado, de tal manera que pueden aplicarse con resultados similares.

[24], desarrolló los llamados conjuntos difusos para los controladores del mismo nombre.

Algunos autores como [23], [25], [26] describen varios tipos de funciones de pertenencia:

- Triangular
- Trapezoidal
- En forma de S
- Singleton
- De Gauss , $\mu(x) = e^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}}$

Los métodos de des difusificación pueden ser varios. En PID and Fuzzy Logic Toolkit, (2009) se señalan los siguientes:

- Centro del área o de gravedad
- Centro del área modificado
- Centro de las sumas
- Centro de los máximos

- Media de los máximos

Como objetivo de la des difusificación se busca un valor numérico real que sea representativo de las conclusiones difusas (conjuntos difusos implicados). Existen hoy en día muchos enfoques para la des difusificación que pueden consultarse en [26]

En la práctica [25] y [26] se recomienda no tener funciones de pertenencia de salida en los extremos del universo de discurso que tengan un área bajo la curva infinita ya que aunque ellas pueden estar truncadas para la implicación en la operación de mínimo (o escalada para el producto) todavía pueden terminar con un área infinita.

En el campo del control automático ha encontrado aplicación a lazo cerrado siendo parte esencial de los controladores similares a los controladores PID (llamados en inglés fuzzy controllers PID-like)

Debido a su carácter multidisciplinar, los sistemas de inferencia difusos se asocian con una serie de nombres, Fuzzy Logic Toolbox™ User's Guide, (2014) como son: sistemas basados en lógica difusa, en reglas, sistemas expertos difusos, modelado difuso, memoria asociativa difusa, controladores de lógica difusa, o simplemente, de manera ambigua sistemas difusos.

1.1. Metodología

El controlador difuso generalmente se compone de cuatro componentes:

1. Base de Reglas, para una condición hay una acción.
2. Máquina de inferencias, simulación del conocimiento de un experto en base a reglas, con entradas y salidas borrosas y funciones de pertenencia.
3. Fusificación, toma la información real y la convierte en información difusa.
4. Defusificación, convierte las acciones de la máquina de inferencia en una acción, devuelve a un valor real y preciso.

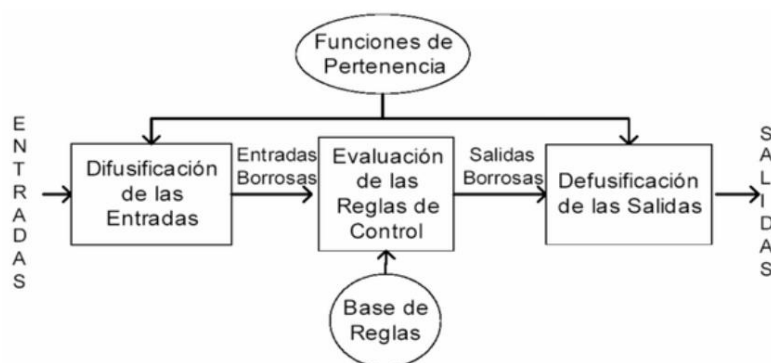


Figura 2.5: Sistema de inferencia difusa.

La Figura 2.5 muestra el sistema de inferencia difusa, siguiendo los cuatro componentes mencionados anteriormente. El controlador difuso se compone de un conjunto de operaciones lógicas difusas sobre valores reales transformados a valores lingüísticos (difusificación), luego se produce la inferencia difusa, para después tomar la decisión con base en reglas y nuevamente convertirlo en valores reales para una acción (desdifusificación). Aquí no existe una dinámica dada por ecuaciones diferenciales ordinarias en tiempo continuo, de lo que se trata es que una regla proporciona una acción (consecuente de la regla) en base a la pertenencia a cierto rango de valores reales de las entradas (antecedentes).

El dominio de cada variable real es un universo de discurso, el cual se granula o divide en subconjuntos difusos, los mismos que son etiquetados mediante palabras. La pertenencia de los valores reales a los subconjuntos difusos se determina por cierto grado de pertenencia, calculado mediante la función de pertenencia.

Según el número de variables de entrada y de salida tenemos la denominación del tipo de sistema de inferencia difuso, desde el tipo SISO, pasando por las diferentes combinaciones entrada/salida, hasta el sistema difuso MIMO.

Así, un antecedente compuesto de dos o más variables de entrada caracteriza al formalismo difuso como de formalismo con múltiples entradas. Si la regla en cuestión tiene múltiples entradas y el consecuente está definido por una sola

variable, entonces se dice que el formalismo es de múltiples entradas y simple salida, que en inglés se designa como MISO.

Si los consecuentes de cada regla tuvieran múltiples variables de salida entonces se dice que es un formalismo difuso de múltiples entradas y salidas, lo que en inglés se designa como MIMO.

Por tanto, la base de reglas o en su conjunto, el mecanismo de inferencia difuso establece un mapeo entre las variables del antecedente (entradas) y las variables del consecuente (salidas).

En la teoría de control difuso, se necesitan formas útiles para combinar los subconjuntos difusos. Estas formas de combinar coinciden con los métodos clásicos conocidos para los conjuntos ordinarios. En otras palabras, los métodos de combinar los conjuntos difusos generalizan los métodos comunes para los conjuntos ordinarios.

Los operadores utilizados para combinar los conjuntos difusos son llamados conectivos difusos u operadores de agregación.

Si la regla tiene más de un antecedente se debe especificar el conectivo difuso para determinar cómo calcular el valor verdadero del antecedente de la regla.

Los conectivos más empleados son:

AND (como mínimo) $\mu A \cdot B = \min(\mu A, \mu B)$

AND (como producto) $\mu A \cdot B = (\mu A, \mu B)$

OR (como máximo) $\mu A + B = \max(\mu A, \mu B)$

OR (como relación probabilística) $A + B = ((A + B) - (AB))$

Este último conectivo para los antecedentes especifica el empleo de la suma probabilística como grado de pertenencia de los antecedentes.

En la Figura 2.6 se muestra la operación AND como mínimo para un caso genérico de valor de las variables de entrada y el disparo de dos reglas, por lo que se analiza la operación indicada en dos antecedentes múltiples.

Las reglas que genéricamente se disparan son:

R_i - IF A_1 is Z AND A_2 is Z THEN B is Z

R_j - IF A_1 is Z AND A_2 is PM THEN B is NM

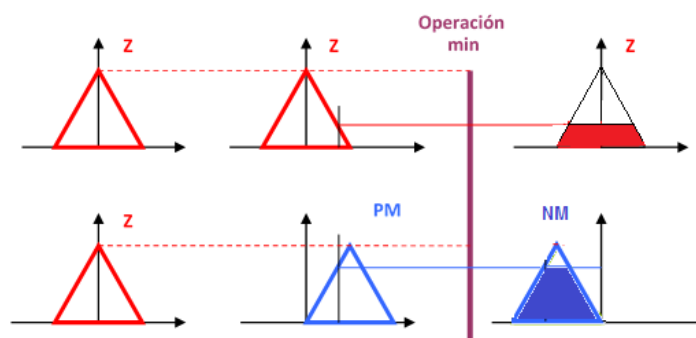


Figura 2.6: Ejemplo genérico de aplicación del conectivo AND como mínimo. (Reyes, 2005).

Si la implicación para el consecuente es también del tipo AND como mínimo entonces las funciones de pertenencia de cada variable lingüística de salida definida por la regla disparada se trunca al valor del mínimo calculado y definido por la operación de mínimo del antecedente, como se muestra a la derecha de la Figura 2.6.

Bajo el supuesto que la operación definida para el consecuente es la operación AND como implicación producto con las mismas reglas disparadas se tiene el resultado como muestra la Figura 2.7.

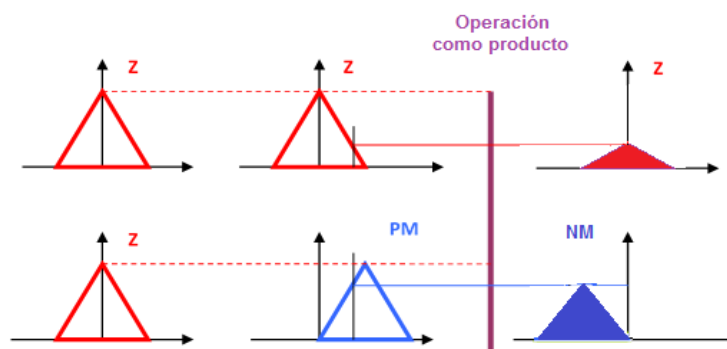


Figura 2.7: Ejemplo genérico de aplicación del conectivo AND como producto.

Un controlador difuso requiere por lo menos una variable lingüística de entrada y una variable lingüística de salida. Los términos lingüísticos representan en palabras las categorías para los valores de las variables lingüísticas.

Las Reglas describen, en palabras, las relaciones entre las variables lingüísticas de entrada y de salida basadas en sus términos lingüísticos. Así, un controlador difuso típico se desarrolla mediante reglas.

Ejemplos de estas reglas se muestran a continuación:

- Si el error es Neg y el cambio en el error es Neg entonces la salida es NB
- Si el error es Neg y el cambio en el error es Zero, entonces la salida es NM

El conjunto de reglas se denomina una base de reglas. Las reglas están en el formato conocido si-entonces (if-then), y formalmente el lado if se llama condición y el lado then se llama conclusión (con más frecuencia, el par se llama antecedente-consecuente o premisa-conclusión).

Siguiendo el ejemplo anterior el valor de entrada "Neg" es un término lingüístico abreviado de la palabra negativo, el valor de salida "NB" significa negativo grande y "NM" negativo medio.

En un controlador basado en reglas la estrategia de control se almacena en un lenguaje más o menos natural y se almacena en una base de reglas en oposición a una descripción basada en ecuaciones. Un controlador basado en reglas es fácil de entender y fácil de mantener por un usuario final no especializado.

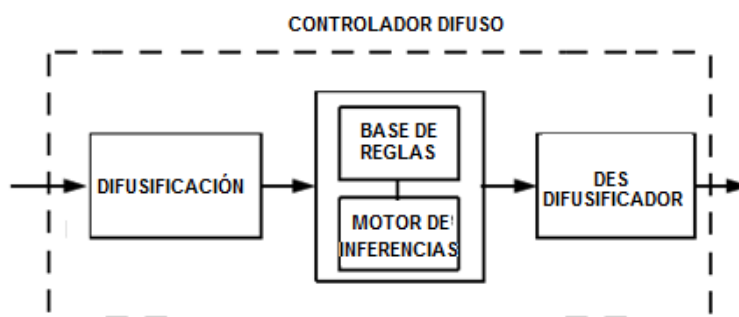


Figura 2.8 Componentes específicos del controlador difuso.

El controlador difuso presenta generalmente la estructura mostrada en la Figura 2.8. Los componentes específicos de este controlador son un bloque de difusificación de los valores reales de entrada, el conjunto de reglas o base de reglas y el motor de inferencias. Para trasladar los resultados difusos a valores reales se tiene el bloque de desdifusificación.

El empleo de diferentes funciones de pertenencia para una misma variable de entrada está permitido. Por ejemplo, como se muestra en la Figura 2.9 se emplean dos formas de funciones de pertenencia, la triangular y la trapezoidal. En las triangulares no necesariamente tienen que tener iguales soportes e incluso su distribución en el universo de discurso no tiene que ser uniforme.

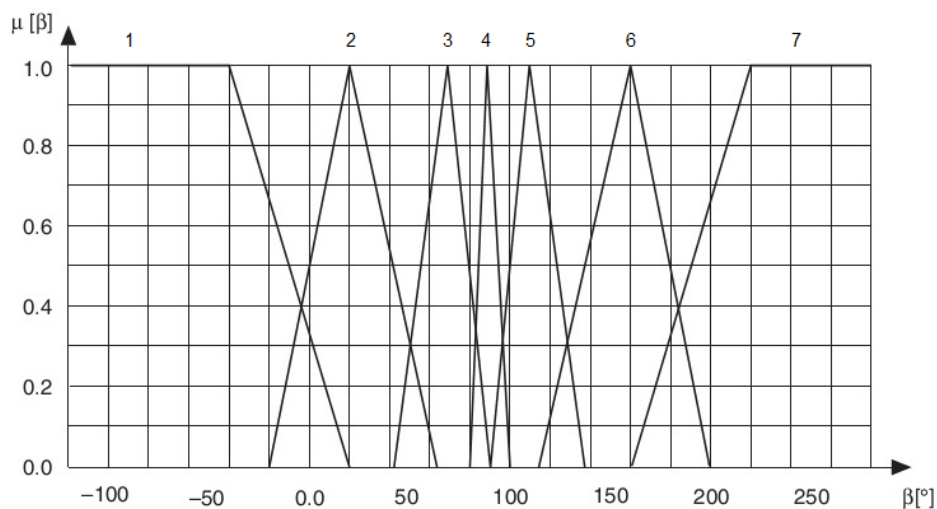


Figura 2.9 Distribución irregular de 5 diferentes funciones de pertenencia por soporte y forma.

CAPÍTULO 3

3. MODELADO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR

El modelo dinámico que se desea determinar mediante la identificación es una descripción matemática del comportamiento en el tiempo del sistema o en el dominio de la frecuencia.

En lo que respecta de la señal de entrada, para llevar a cabo el proceso de identificación se deben considerar las siguientes especificaciones [27]:

- Que la relación señal ruido durante el experimento sea lo suficientemente grande.
- Que la señal de entrada empleada como prueba no sea demasiado grande para garantizar la linealidad restringida a un punto de funcionamiento.
- Que la señal de entrada excite fuertemente al sistema en toda la banda de bajas frecuencias, medias y altas, de manera que la respuesta a los estímulos contenga un contenido de información suficiente. A partir de la identificación se obtiene un modelo como instrumento metodológico.

A decir de Ljung, [27] la identificación de sistemas cubre el problema de construir modelos dinámicos en los casos en que existe insignificante información a priori, y las pocas propiedades que se conocen del sistema son unos cuantos parámetros físicos

Según los objetivos de la investigación el modelo matemático puede emplearse como parte del algoritmo de control, haciendo las veces de predictor de salidas futuras, o para el ajuste del controlador. En el primer caso la exactitud del modelo debe ser muy alta. Según los recursos, las informaciones disponibles y los objetivos planteados a la identificación, se emplean diferentes métodos Ljung [27], ellos son:

- La Identificación Analítica,
- La Identificación Experimental mediante Señales Especiales
- La Identificación Recursiva.

El primer método requiere de un conocimiento muy especializado sobre la tecnología del proceso, el cual no siempre está disponible. El segundo produce resultados a corto

plazo y se usan señales del tipo escalón, PRBS o del tipo staircase. La identificación recursiva, con alguna modificación del método de los mínimos cuadrados, es en la actualidad el método más popular.

En nuestro caso se realizan las observaciones periódicas de las variables online, pero el procesamiento de los datos se realiza fuera de línea.

De [27] se ha tomado el siguiente orden de realización de la identificación.

- ✓ Diseño del experimento, que involucra el plan del experimento,
- ✓ Toma de los datos de entrada y salida del proceso
- ✓ Identificación no Paramétrica, que involucra su procesamiento primario para determinar el orden y la estructura del modelo,
- ✓ Identificación Paramétrica, que involucra el cálculo de los parámetros del modelo definido por orden y estructura,
- ✓ Validación del modelo obtenido, que involucra la verificación del grado de coincidencia del modelo (de su comportamiento) con el proceso a modelar (el comportamiento del proceso real).

3.1 Diseño del experimento de identificación de la planta.

El experimento se planificó considerando que en la planta existen varios sensores de presión, flujo y temperatura instalados. Esto permitió realizar la planificación del experimento.

La planificación del experimento fue:

- ✓ Determinar los puntos de conexión a proceso para el muestreo de las variables que participan en la transferencia de calor desde el flujo del etilenglicol hasta el flujo de salida de glicerina.
- ✓ Realizar un experimento inicial mediante un paso escalón en la velocidad de las bombas impulsoras de los flujos implicados determinando los valores máximos y mínimos permisibles de velocidad de las bombas,
- ✓ Considerar los posibles rangos de variación de las variables de interés,
- ✓ Revisión de la base de datos muestreados grabados para determinar posibles tendencias, datos fuera de rangos, etc., que afecten la identificación de los parámetros del modelo candidato,

- ✓ Selección del modelo candidato entre los posibles a emplear,
- ✓ Identificación del modelo.
- ✓ Validación del modelo.

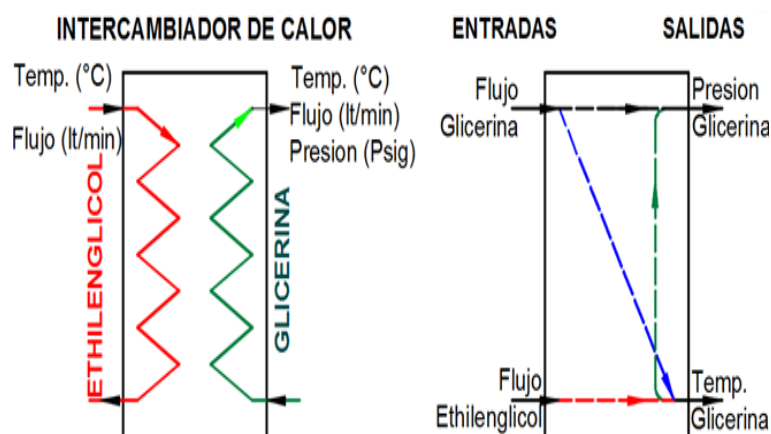


Figura 3.1. Variables de estudio y relación entre ellas.

En la Figura 3.1, [28] a la izquierda, se muestran las variables de estudio en las cuales se harán las tomas de datos mediante la conexión a proceso con los sensores de flujo, presión y temperatura. A la derecha se muestra la interacción buscada entre las variables de proceso.

Los experimentos se llevaron a efecto directamente en la planta de termo fluidos y la extracción de los datos se ejecutó mediante las tarjetas de la National Instrument Tarjeta NI-USB-6009 y el software Matlab. Para la Adquisición de datos se utilizó la librería de Simulink (Anexo 2). Además, se crearon bloques de funciones para interactuar con las variables, filtrar las señales de entrada y guardar los datos en el Workspace (Anexo 3). El tiempo de muestreo que se utilizó es de 0.25 segundos para la medición de las variables.

Para la adquisición del conocimiento inicial sobre los procesos de transferencia de calor se analizó la respuesta al escalón en los flujos de etilenglicol y de la glicerina tomando datos tanto de la presión como la temperatura.

En la Figura 3.2 se muestran los resultados obtenidos en los experimentos llevados a cabo en la planta didáctica del Laboratorio de Termo fluidos.

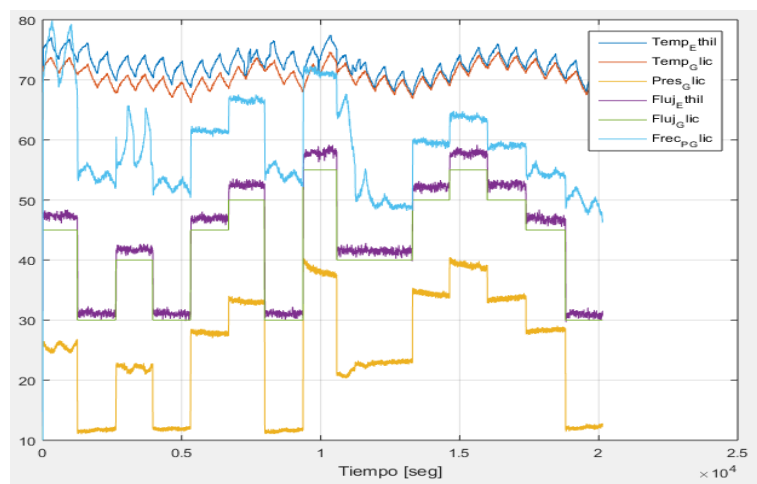


Figura 3.2 Resultados del experimento de identificación del modelo del intercambiador de placas.

Se realizaron tres experimentos. Se consideró como de mayor valor informativo el efectuado variando la frecuencia de la bomba de la glicerina, manteniendo la frecuencia de la bomba del etilenglicol constante a 40 Hz. Los resultados gráficos se muestran en la Figura 3.3.

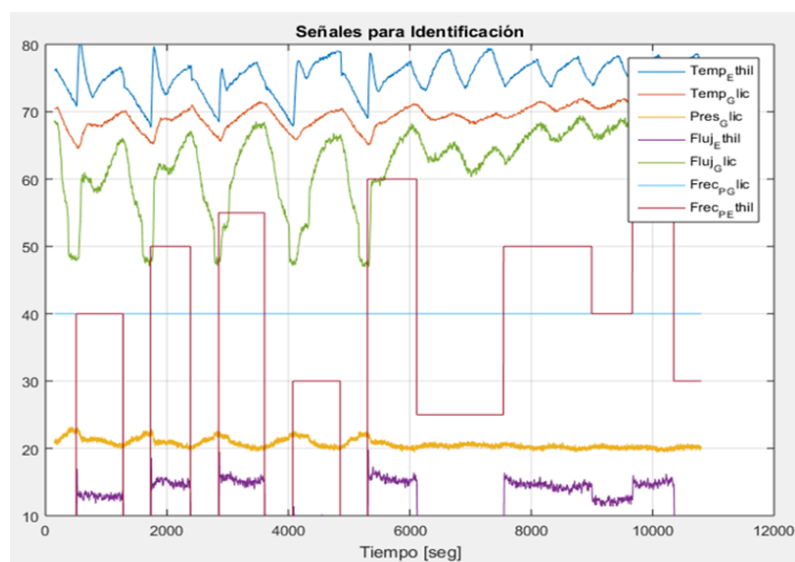


Figura 3. 3. Frecuencia de la bomba de la Glicerina Constante.

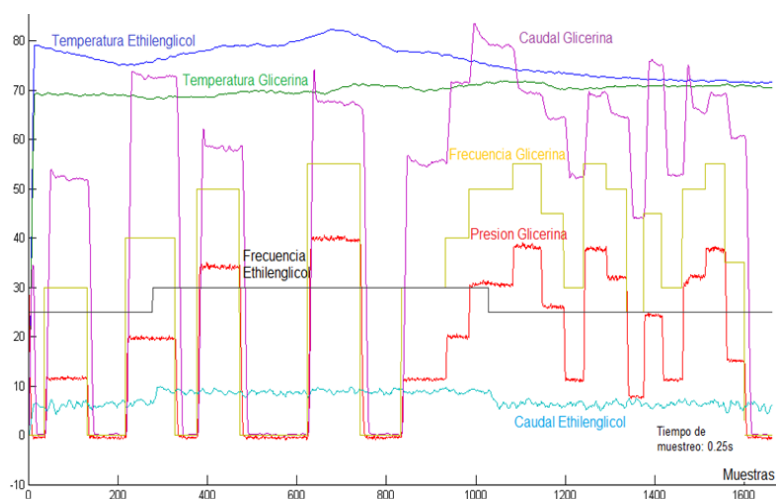


Figura 3. 4. Frecuencia de la bomba de Etilenglicol Constante

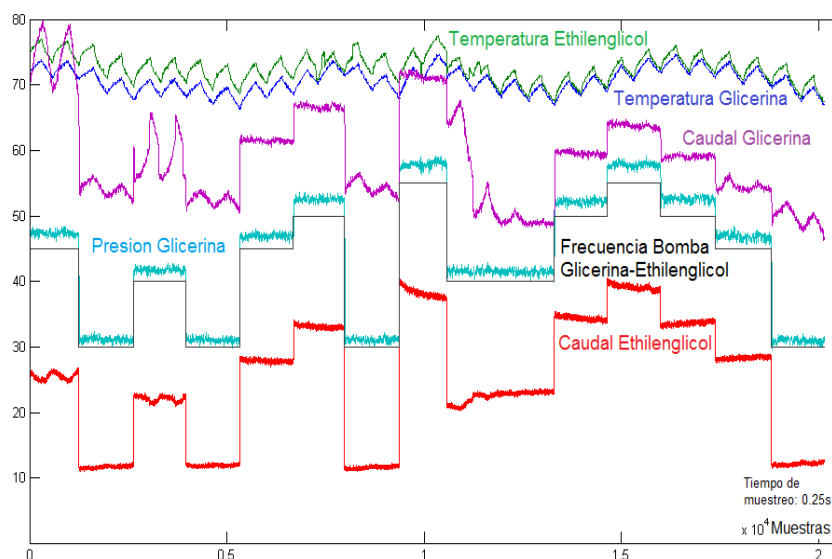


Figura 3.5. Frecuencia igual de las bombas de Etilenglicol y Glicerina

Otro experimento de valor informativo fue el realizado manteniendo constante la frecuencia de la bomba de la glicerina y variando la frecuencia de la bomba del etilenglicol. Los resultados de este se muestran en la Figura 3.4.

Se realizó otro experimento para acumular datos importantes adicionales variando las dos frecuencias de las bombas a la vez. Este resultado se muestra en la Figura 3.5.

Además, como situación general se consideró en todos los experimentos, la torre de enfriamiento para la dispersión de calor del agua, que involucra conjuntamente los fenómenos de transferencia de calor y de masa es decir la evaporación controlada por el contacto directo del agua con el aire, de tal manera que mantenga constante una temperatura de la glicerina al punto real de 72°C y presión de 25 psig, con una apertura adecuada de la válvula, y la temperatura del etilenglicol variando entre 80 y 84°C . Esta influencia del enfriamiento mediante la torre se consideró como una perturbación en el sistema.

3.1.1. Rango de linealidad del proceso.

Realizando una revisión en las Figuras 3.6 y 3.7, las variables a controlar son la temperatura y la presión de la glicerina, de tal manera que se puede notar, que la presión tiene la forma lineal en el intervalo de temperatura de 69°C a 77.1°C ; mientras que la temperatura es lineal entre los valores de 65°C y 82°C .

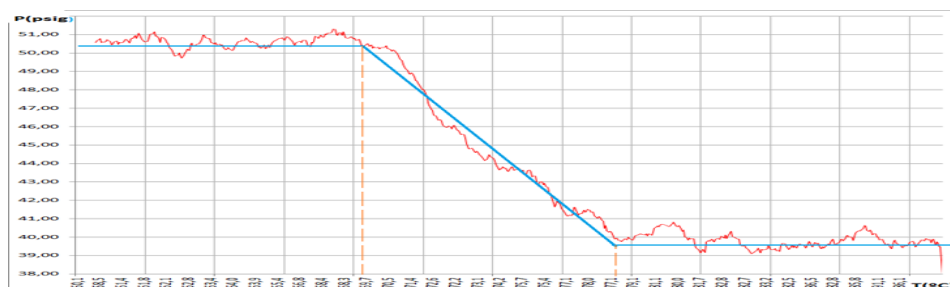


Figura 3.6: Rango lineal del aumento de presión vs temperatura.

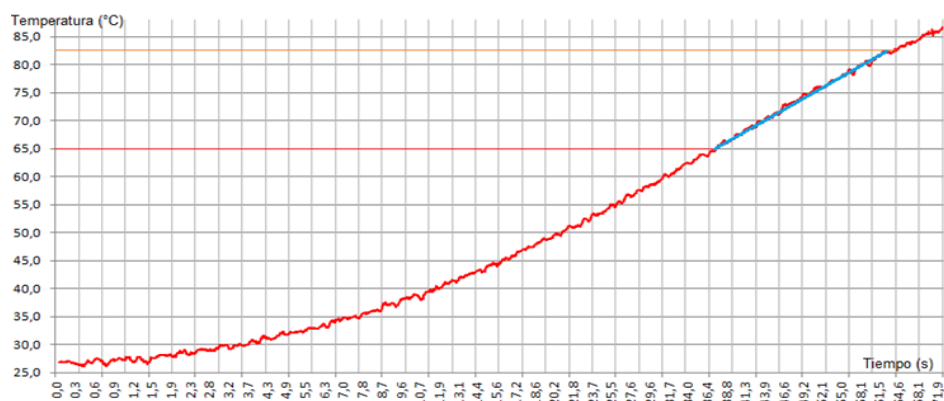


Figura 3.7: Rango lineal de aumento de temperatura de la glicerina.

Características	Glicerina	Etilenglicol
VARIABLES DE ENTRADA	Caudal	Caudal
VARIABLES DE SALIDA	Presión, Temperatura	Caudal, Temp.
Perturbaciones	Temperatura ambiente, incrustaciones, concentración	Temperatura, Ambiente, presión gas
Punto de operación	72°C y 25 psig	78°C
Válvula de enfriamiento	10%	
Ventilador de la Torre	0%	
Temp. del etilenglicol		Variable: 80 - 84°C, $y=0.0143*\cos(0.05*t)$
Forma señal de prueba	Señal escalonada	
Duración en alto, Temp.	Constante	656s
Duración en bajo, Temp.	Constante	450s
Duración alto, Presión	100s	constante
Duración bajo, Presión	80s	constante
Tiempo de estabilización	Presión:1.1psi;Temp:167 s	Temp: 167 s
Periodo de muestreo	0.25 s	0.25 s
Densidad espectral	0.1 Hz	0.1 Hz
Cantidad de muestras	11000	11000

Tabla 3. 1 características de la excitación y determinación de variables

Para realizar la identificación de la planta se considera el experimento 1 con la información de las Figura 3.3 y 3.4. La identificación con los datos del experimento 2, no da buenos resultados, obteniéndose valores que tienden al

infinito en el sistema de control y por lo tanto incontrolable, por exceso de datos. La forma de las señales de experimentación se muestra en la Figura 3.5.

Con todas estas pruebas preliminares permitieron deducir que las variables considerar la información descrita en la Tabla 3.1.

Una característica de la identificación realizada es que no se emplearon señales tales como la señales Pseudo Aleatorias Binarias (PRBS), suma de sinusoides, ruido blanco, y otros; ya que el proceso a identificar involucra dos escalas de tiempo evidentes, una determinada por la variación lenta de la temperatura y la otra por la variación rápida de la presión. Así las cosas, se empleó la señal startcase o señal en forma de escalera ascendente y descendente con valores que se correspondieran con el rango de variación permitido para el tipo de producto, el tipo de elemento calefactor y los actuadores instalados en la planta didáctica.

El tiempo de permanencia del valor binario “alto” se estimó considerando la apreciación de la constante de tiempo por la curva de reacción obtenida en los experimentos iniciales con la planta empleando el paso escalón.

```
PHE=iddata([Pres_Glic,Temp_Glic],[Fluj_Glic,Fluj_Ethil],0.25)%
Crea una matriz de dos entradas y dos salidas del sistema
PHE.InputName = {'Fluj_Glic';'Fluj_Ethil'};
PHE.OutputName = {'Pres_Glic';'Temp_Glic'};
figure(2)
subplot(2,2,1)
plot(PHE(:,1,1))%Flujo de la glicerina vs presión de la glicerina
subplot(2,2,2)
plot(PHE(:,1,2))%Flujo etilenglicol vs presión glicerina
subplot(2,2,3)
plot(PHE(:,2,1))%Flujo Temp vs temperatura glicerina
subplot(2,2,4)
plot(PHE(:,2,2))%Flujo Ethilen vs temperatura glicerina
```

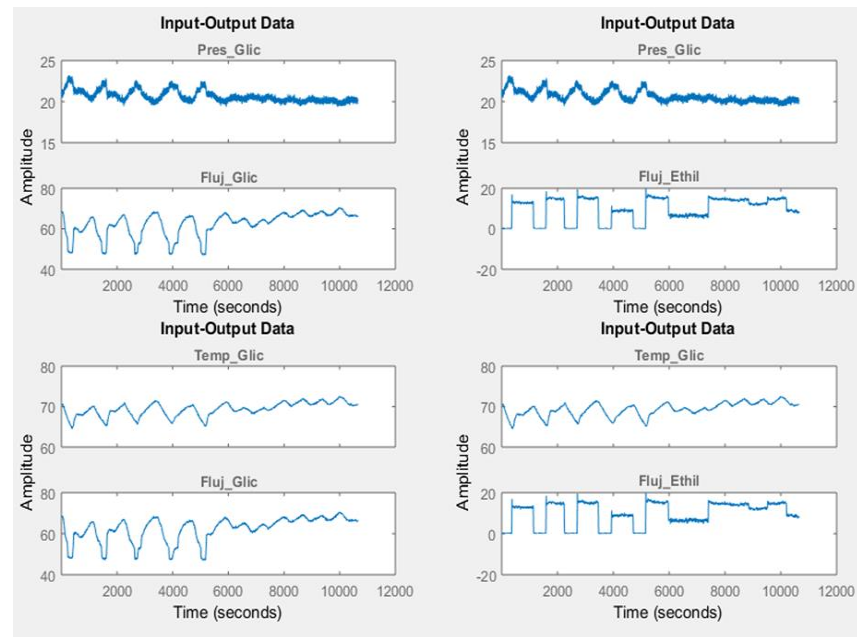


Figura 3.7: Respuesta al escalón de las variables del sistema.

```
mi=impulseest(PHE,50)
figure(3)
step(mi)
title('Respuesta al escalón')
grid on
```

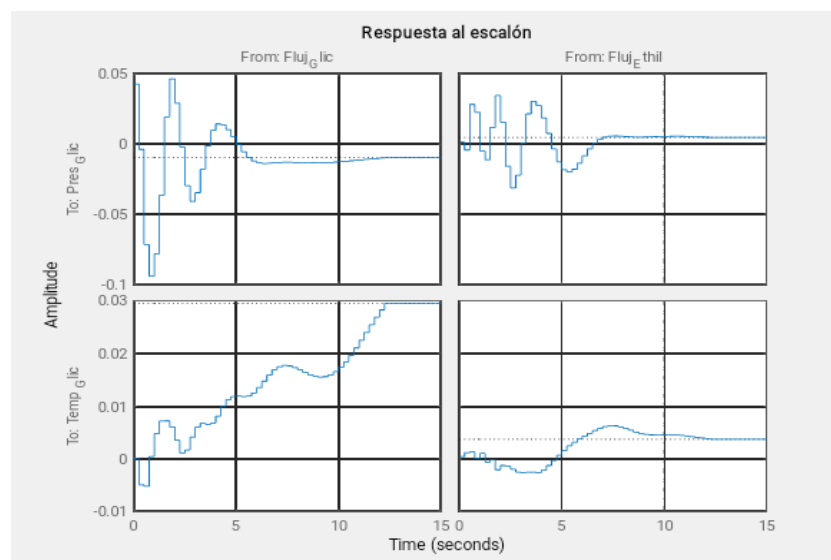


Figura 3.8: Respuesta al escalón y dinámica del sistema.

Un primer paso para tener una idea de la dinámica del sistema, es buscar en las respuestas a un escalón entre los diferentes canales estimados directamente de los datos, como se ve en la Figura 3.8, las variables que más se afectan entre sí, teniendo una gran dinámica son: primero, el flujo del etilenglicol en la temperatura de la glicerina; segundo, el flujo de la glicerina en la presión de la glicerina, también el flujo del etilenglicol en la presión de la glicerina, y sin dinámica prácticamente, la relación entre el flujo de la glicerina en la temperatura de la glicerina.

```
%Modelo de dos entradas y dos salidas, espacios de estados
```

```
mp=ssest(PHE(12000:18000))
```

```
%Validacion del modelo
```

```
compare(PHE(18100:20000),mp)
```

```
A= mp.a;
```

```
B= mp.b;
```

```
C= mp.c;
```

```
D= mp.d;
```

```
sys=ss(A,B,C,D)
```

```
[num1,den1]=ss2tf(A,B,C,D,1)
```

```
[num2,den2]=ss2tf(A,B,C,D,2)
```

```
sys111=tf(num1(1,:),den1(1,:))
```

```
sys121=tf(num1(2,:),den1(1,:))
```

```
sys211=tf(num2(1,:),den2(1,:))
```

```
sys221=tf(num2(2,:),den2(1,:))
```

```
mp=ssest(PHE(500:8600))
```

```
mp =
```

```
Continuous-time identified state-space model:
```

$$\frac{dx}{dt} = A x(t) + B u(t) + K e(t)$$

$$y(t) = C x(t) + D u(t) + e(t)$$

```
A =          x1          x2
```

```
x1  -0.0005997  -0.001004
```

```

x2 -3.918e-06 -0.08559
B =   Flujo_Glic Flujo_Ethil
x1 -7.472e-06 -2.653e-06
x2 -0.0005213  1.521e-05

C =           x1      x2
Pres_Glic   -201.5   39.31
Temp_Glic   -389.2   0.02814

D =           Flujo_Glic Flujo_Ethil
Pres_Glic           0         0
Temp_Glic           0         0

K =   Pres_Glic Temp_Glic
x1   1.05e-05   -0.0189
x2    0.1034   -0.01211

```

El resto de la información que proporciona el Toolbox de Identificación sobre el modelo identificado se da a continuación.

Parameterization:

FREE form (all coefficients in A, B, C free).

Feedthrough: none

Disturbance component: estimate

Number of free coefficients: 16

Use "idssdata", "getpvec", "getcov" for parameters and their uncertainties.

Status:

Estimated using SSEST on time domain data.

Fit to estimation data: [87.79;99.66]% (prediction focus)

FPE: 1.72e-07, MSE: 0.003592

Los resultados obtenidos en el formalismo de espacio de estados y su posterior transformación a función de transferencia se muestran a continuación.

```
A= mp.a;      B= mp.b;      C= mp.c;      D= mp.d;
```

```
[num1,den1]=ss2tf(A,B,C,D,1);
[num2,den2]=ss2tf(A,B,C,D,2)
sys111=tf(num1(1,:),den1(1,:));
sys121=tf(num1(2,:),den1(1,:))
sys211=tf(num2(1,:),den2(1,:));
sys221=tf(num2(2,:),den2(1,:))
```

```
num1 = 0   -0.0190   0.0000
       0   0.0029   0.0000
den1  = 1.0000   0.0862   0.0001
```

```
num2 = 0   0.0011   0.0000
       0   0.0010   0.0001
den2  = 1.0000   0.0862   0.0001
```

Las funciones de transferencia encontradas para el sistema se muestran a continuación.

$$\frac{y1(s)}{u1(s)} = \frac{-0.01899s + 1.116e - 05}{s^2 + 0.08619s + 5.1326e - 05}$$

$$\frac{y2(s)}{u1(s)} = \frac{0.002893 s + 4.527e - 05}{s^2 + 0.08619s + 5.1326e - 05}$$

$$\frac{y1(s)}{u2(s)} = \frac{0.001133 s + 4.92e - 05}{s^2 + 0.08619s + 5.1326e - 05}$$

$$\frac{y2(s)}{u2(s)} = \frac{0.001033 s + 9.431e - 05}{s^2 + 0.08619s + 5.1326e - 05}$$

3.2. Identificación del modelo del intercambiador de calor y sus perturbaciones.

La respuesta en el tiempo de cada una de las funciones de transferencia se muestra en las Figuras 3.9, 3.10, 3.11 y 3.12.

En la Figura 3.9 se muestra la respuesta temporal proporcionada por la excitación con un paso escalón unitario de la función de transferencia (3.1).

En la Figura 3.10 se muestra la respuesta temporal proporcionada por la excitación con un paso escalón unitario de la función de transferencia (3.2).

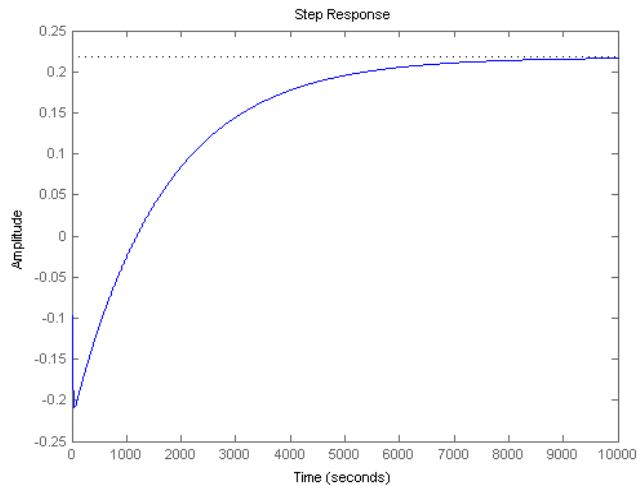


Figura 3.9: Respuesta en el tiempo de la temperatura de la glicerina con la función de transferencia (3.1)

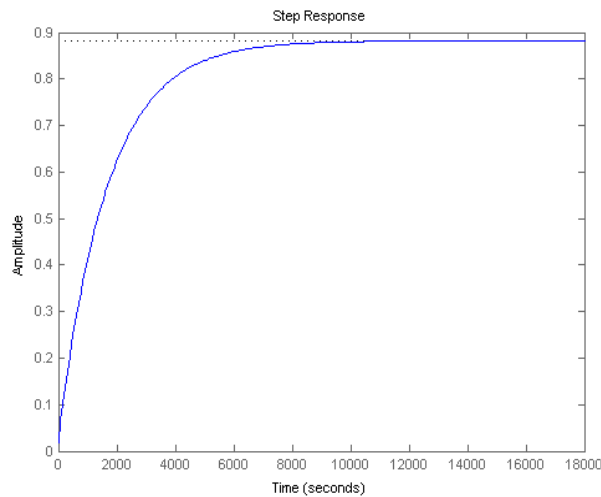


Figura 3.10: Respuesta en el tiempo de la temperatura de la glicerina con la función de transferencia (3.2)

En la Figura 3.11 se muestra la respuesta en el tiempo proporcionada por la excitación con un paso escalón de la función de transferencia (3.3).

En la Figura 3.12 se muestra la respuesta en el tiempo proporcionada por la excitación con un paso escalón de la función de transferencia (3.4).

Como se observa de las figuras expuestas solo la primera respuesta se corresponde con un sistema de fase no mínima, o sea un sistema el cual responde inicialmente de manera contraria al estímulo aplicado para posteriormente retornar y tener una respuesta en correspondencia con el sentido del estímulo.

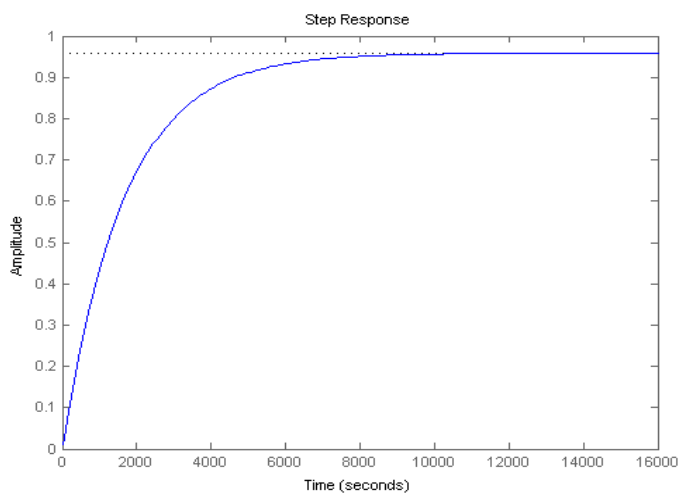


Figura 3.11: Respuesta en el tiempo de la temperatura de la glicerina con la función de transferencia (3.3)

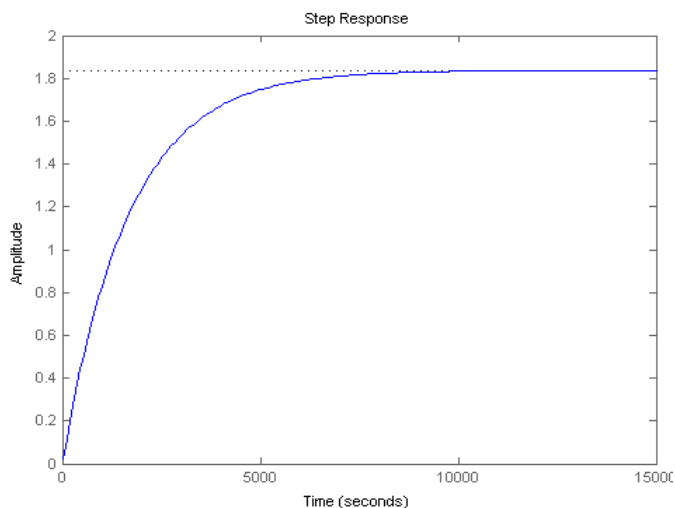


Figura 3.12: Respuesta en el tiempo de la temperatura de la glicerina con la función de transferencia (3.4)

El resto de las funciones de transferencia proporcionan una respuesta de primer orden, o sea exponencial.

3.3 Validación del modelo.

Como se muestra en la Figura 3.13 se realizó la validación del modelo matemático obtenido.

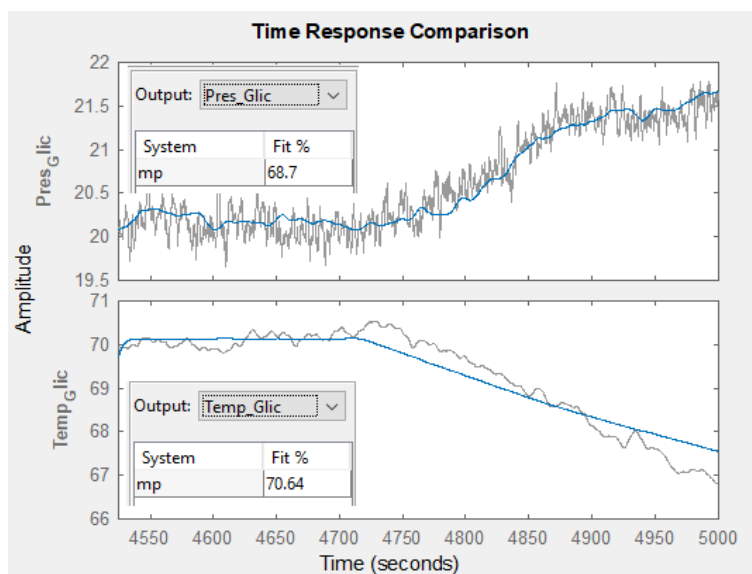


Figura 3.13: Gráfico de los ajustes logrados en la identificación de los modelos.

El ajuste proporcionado por el procesamiento indicado se logra de 68.7% para la reacción de la presión y de 70.64% para el modelo de la temperatura.

Los ajustes logrados, aunque bajos, se corresponden con los ajustes reales obtenidos en la práctica de los procesos químicos industriales.

CAPÍTULO 4

4. DISEÑO DE LOS CONTROLADORES PARA EL INTERCAMBIADOR DE CALOR.

4.1 Determinación de los objetivos del control para el proceso de control de la temperatura y la presión de un intercambiador de calor.

En este caso se pretende que el flujo frío mantenga la temperatura y el caudal de salida, a valores prefijados y que el sistema con su control adapte la velocidad del flujo de calefacción para mantenerlo en forma constante a pesar de las perturbaciones que pueda tener el sistema. Las perturbaciones deben ser rechazadas lo más rápido posible.

Las perturbaciones en el sistema se deben al cambio de presión que ocurre en la descarga de las bombas debido al cambio de viscosidad de los fluidos por variaciones de la temperatura de los fluidos.

En el funcionamiento de la planta no se esperan cambios bruscos de temperatura superiores a 10°C.

4.2 Diseño del controlador clásico PID

Para encarar el diseño de los controladores PID en sistemas MIMO nos fundamentaremos en [28]. Las ideas que subyacen en lo adelante son:

Calcular el arreglo de ganancias RGA (Relative Gain Array); Seleccionar el apareamiento más adecuado de variables manipuladas/controladas; Analizar el apareamiento seleccionado; Diseñar el controlador PID para el sistema MIMO. [30]

4.1.1 Cálculo del arreglo de ganancias relativas

Para el sistema TITO se requiere determinar el mejor apareamiento de variables manipuladas y variables a controlar. Para ello se determina la Matriz de Ganancias Relativas, en lo adelante MGR:

$$g = G(s) = \begin{bmatrix} \frac{0.002893s+4.527e-0.05}{s^2+0.08619s+5.132e-0.5} & \frac{-0.01899s+1.116e-0.5}{s^2+0.08619s+5.132e-0.5} & \frac{0.001033s+9.431e-05}{s^2+0.08619s+5.132e-0.5} & \frac{0.001133s+4.92e-05}{s^2+0.08619s+5.132e-0.5} \end{bmatrix}$$

$$g = \begin{bmatrix} \frac{4.527}{5.132} & \frac{1.116}{5.132} & \frac{9.431}{5.132} & \frac{4.92}{5.132} \end{bmatrix} = [0.8821 \ 0.2173 \ 1.8376 \ 0.9586] \quad (4.1)$$

Asignando las ganancias

$$[K_{11} \ K_{12} \ K_{21} \ K_{22}] = [0.8821 \ 0.2173 \ 1.8376 \ 0.9586] \quad (4.2)$$

Calcular los valores de las ganancias relativas λ_{ij} para i – número de fila; j

número de columna, por ejemplo para $i=j=1$ $\lambda_{ij} = \frac{\frac{\partial y_1}{\partial u_1} |_{u_2}}{\frac{\partial y_1}{\partial u_1} |_{y_2}}$ lo cual equivale a

encontrar la razón entre las ganancias de lazo abierto y de lazo cerrado.

La ecuación de partida para la solución de problema actual en estado estacionario es dada de forma matricial como

$$[y_1 \ y_2] = [K_{11} \ K_{12} \ K_{21} \ K_{22}] [u_1 \ u_2] = [K_{11}u_1 + K_{12}u_2 \ K_{21}u_1 + K_{22}u_2] \quad (4.3)$$

De (4.3) se calculan las derivadas parciales que restan.

Mediante códigos de programación de MATLAB se puede algoritmizar el procedimiento de cálculo de las ganancias relativas en base a la forma matricial expuesta en [29].

$$\Lambda(g) = (g^{-1})^T \times g \quad (4.4)$$

Donde \times – indica el producto de Hadamar (multiplicación elemento por elemento) de la manera siguiente:

```
>> g = [0.8821 1.8376; 0.2173 0.9586];
```

```
>> IN=inv(g);
```

```
>> lammda=(IN)' .* g
```

```
lammda2 =
```

```
    1.8948    -0.8948
```

```
   -0.8948    1.8948
```

4.1.2 Selección del apareamiento

En [29] se resumen las reglas de selección del apareamiento:

1. Tratar de hacer los lazos con aquellos pares de variables para las cuales el valor de la ganancia relativa es cercano a la unidad.
2. Evitar hacer los lazos de control con aquellos pares de variables que tienen valores negativos de ganancia relativa en estado estacionario.

De los resultados obtenidos es evidente que la mejor selección se corresponde con:

$$u_1 \rightarrow y_1$$

$$u_2 \rightarrow y_2$$

Los desacopladores pueden emplearse para el control de los sistemas multivariables. El uso de desacopladores se restringe a la planta lineal, esto se debe a que para el diseño de tales esquemas se utiliza un mecanismo de cancelación. Un cambio del punto de operación en una planta lineal causará que la cancelación no sea eficaz. Por otro lado, según [30] el diseño del desacoplador puede no ser deseado para plantas con comportamiento de fase no mínima cuando se incrementan los ceros del semiplano derecho (RHP zeros). La acción de desacoplamiento por realimentación no trabaja en este caso. Por otro lado, el desacoplamiento es muy sensible a los errores de modelado.

4.1.3 Análisis del apareamiento seleccionado

Por último, algo sobre las propiedades de la RGA y de los valores encontrados para la plata:

- La suma de los valores por columna o por fila deben ser iguales a la unidad, lo cual es evidente de la matriz RGA siguiente:

$$\Lambda(g) = [1.8948 \quad -0.8948 \quad -0.8948 \quad 1.8948 \quad]$$

- El arreglo $\Lambda(g)$ es una medida de la sensibilidad a la incertidumbre elemento por elemento en la matriz, o sea: $g'_{ij} = g_{ij} \left(1 - \frac{1}{\lambda_{ij}}\right)$, lo que significa [28] que la matriz se convierte en una matriz singular si el elemento sufre un cambio relativo dado por $-\frac{1}{\lambda_{ij}}$

4.1.4 Diseño del controlador PID multivariable.

En el caso cuando un sistema multivariable puede ser controlado como lazos independientes de control determinados por el pareo de variables manipuladas y variables controladas, empleando la MGR el ajuste de los controladores del tipo PID se realiza de manera independiente. En lo que sigue se explica el ajuste de controladores PID para un sistema TITO, tomado de [31]:

1. Se independizan los lazos de control de manera que sobre uno de los lazos no influya el otro lazo de control. En el diagrama Simulink de la Figura 4.1 esto se logra multiplicando por cero la influencia entre los lazos de control con un bloque Gain con una ganancia igual a cero en la interacción.
2. Se aplican las mismas reglas de sintonía empleadas para el ajuste de las ganancias de los controladores del tipo PID, tales como de “Ziegler and Nichols test” para lazo cerrado (de oscilaciones mantenidas) o abierto (por la Curva de Respuesta), “Cohen and Coon test” a lazo abierto, etc.
3. En nuestro caso y considerando que las reglas de sintonía no proporcionan valores exactos de tales ganancias ya que el modelo matemático que se empleó por los autores del test no coincide, en lo absoluto, con los modelos de las plantas a controlar en la planta del laboratorio de Termofluidos de la Universidad Estatal de Milagro – UNEMI, se procede por el Método de Prueba y Error iniciando el ajuste con un controlador PI en ambos lazos de control.
4. La ganancia integral inicial se iguala a cero y la ganancia proporcional inicial se escoge igual a la unidad (en los métodos mencionados se escoge de valor pequeño).
5. La ganancia proporcional se aumenta sistemáticamente hasta lograr disminuir lo más posible el valor del error a la entrada del controlador proporcional, cuando la disminución de este error no sea significativa, se mantiene el último valor de la ganancia

- proporcional y se procede a conectar la parte integradora del controlador paralelo PI.
6. La ganancia de la parte integradora se establece de tal manera que el error del sistema a lazo cerrado disminuya considerablemente. En este caso ha terminado la sintonía o ajuste del controlador PI.
 7. En el caso cuando se tienen oscilaciones alrededor del punto de operación se conecta la parte derivativa mediante la cual ajustando su ganancia se disminuye el carácter oscilante de la respuesta en el dominio del tiempo.
 8. De manera similar se procede para el ajuste del segundo lazo de control.
 9. En la Figura 4.1 se muestran los resultados de haber ajustado los controladores PID.

10

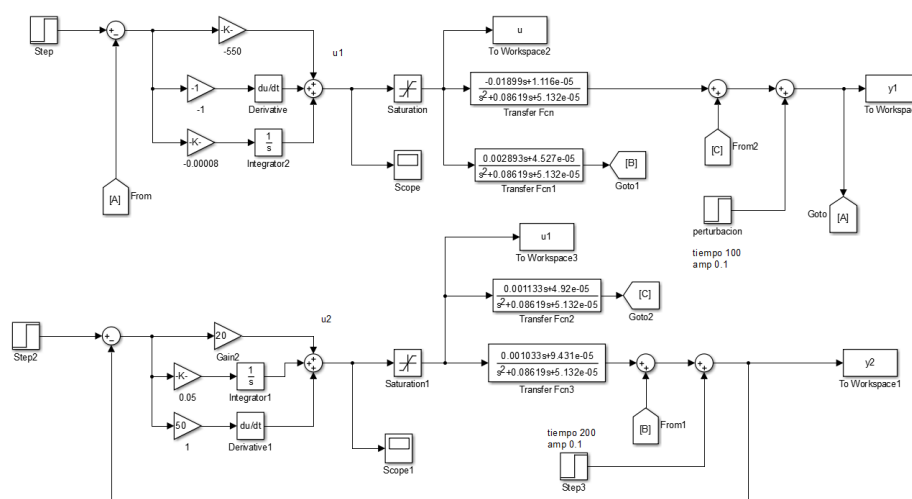


Figura 4.1 Diagrama Simulink para el ajuste de controladores planta MIMO

En las Figuras 4.2 y 4.3 se muestran las respuestas de cada lazo controlado con las ganancias de los controladores del tipo PID, para la presión y temperatura.

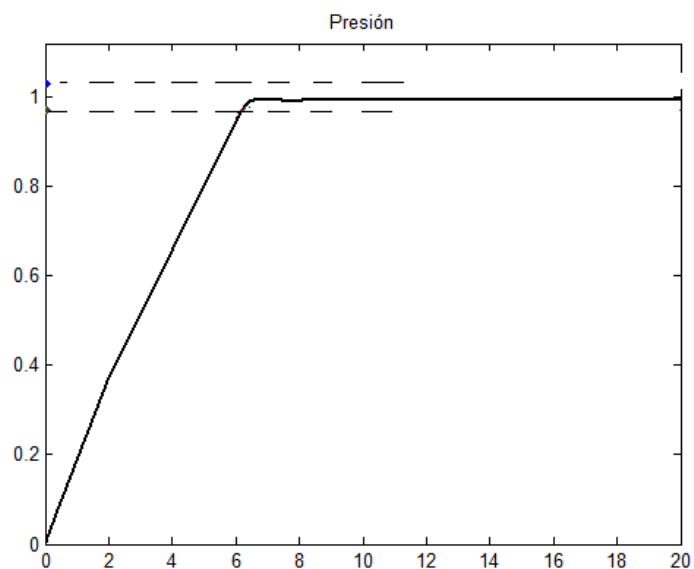


Figura 4.2 Respuestas de la presión a la salida del intercambiador de placas a cambios en la referencia de la presión.

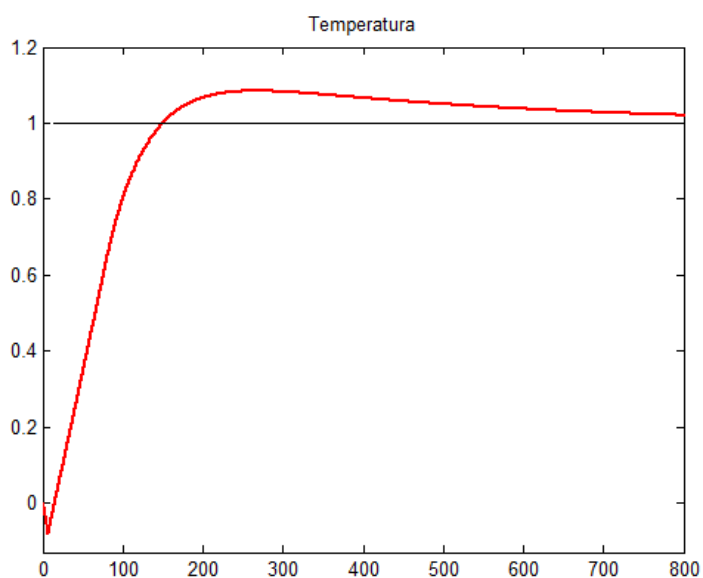


Figura 4.3 Respuestas de la temperatura del producto en el dominio del tiempo a cambios en la referencia de temperatura.

4.3. Diseño del controlador difuso multivariable para el control de la temperatura y la presión en un intercambiador de calor.

Los parámetros principales de diseño para el controlador difuso [33] son los siguientes:

- 1) estrategia de difusificación y la interpretación de los operadores difusos,
- 2) la base de datos
- 3) base de reglas
- 4) lógica de toma de decisión
- 5) estrategias de desdifusificación e interpretación del operador de desdifusificación

La difusificación involucra funciones tales como medir las variables de entrada, mapear y escalar las variables de entrada en el universo de discurso. También se requiere realizar la función de difusificación que convierte los datos de entrada en valores lingüísticos adecuados, que pueden ser vistos como etiquetas de los conjuntos difusos.

La difusificación aplica el operador de difusificación a las señales de entrada de manera conceptual convirtiendo un valor real numérico en un valor difuso dentro de cierto universo de discurso. Ella interpreta un valor numérico de entrada x determinístico como un conjunto difuso A con función de pertenencia $p_A(x)$ la cual toma valores iguales a cero excepto en el propio punto x , donde toma el valor igual a uno. Esta función de pertenencia se denomina "singleton".

Se ha propuesto considerar puntos de vista más reales como es el que toda medición involucra imprecisiones provocadas por factores casuales lo que puede ser representado funcionalmente por un proceso casual.

Las mediciones de las variables de entrada pueden ser más o menos precisas, lo cual se ha caracterizado en la Figura 4.4 con funciones de pertenencia μ estrechas (Alta resolución) o menos estrechas (Baja resolución), siempre considerando la necesidad de cubrir todo el rango de posibles valores de la variable en concreto [34].

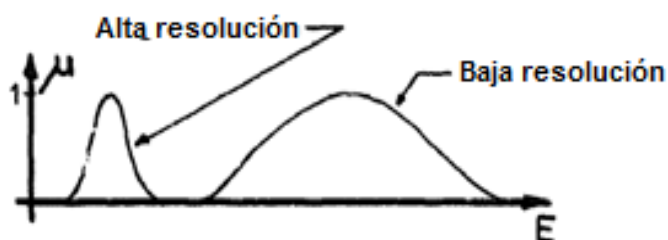


Figura 4.4 Ejemplos de funciones de pertenencia de alta y baja resolución.

La estimación del valor promedio de las mediciones y su desviación estándar es un criterio para seleccionar el ancho y la posición del valor central de la función de pertenencia de las señales de entrada. Con estos valores se selecciona la base del conjunto difuso asociado con una etiqueta lingüística.

Por otro lado, el dominio de la variable de salida del controlador también refleja los objetivos del diseño y no puede ser alterado con impunidad [34].

Como se sabe, el empleo de la lógica difusa como controlador no requiere de un modelo matemático, “siempre que se tenga un experto” el cual tiene en mente un modelo de actuación ante diferentes situaciones del proceso. Sin embargo, si no se tiene el experto o el proceso es un nuevo proceso del cual no hay experiencia de control se requiere un tener un modelo que permita conocer la dinámica de reacción del proceso ante cambios en su entrada. Un modelo de comportamiento se tiene de igual manera si se adquieren datos de experimentos que puedan ser graficados, como se muestra en la Figura 4.5, donde se muestra la respuesta de la variable de proceso al cambio en la referencia mostrando la dinámica de la planta a controlar.

En la figura mencionada se han destacado diferentes puntos de interés, tales como a, b1, c1, b2 y c2, así como cuatro zonas, A1, A2, A3 y A4. (Ver figura 4.6)

Referido a estas cuatro zonas y puntos en [34] se han publicado las llamadas Metareglas. Empleando estas reglas generales se han propuesto el conjunto de reglas iniciales que pueden emplearse para conformar la Base de Reglas del sistema de inferencias difuso.

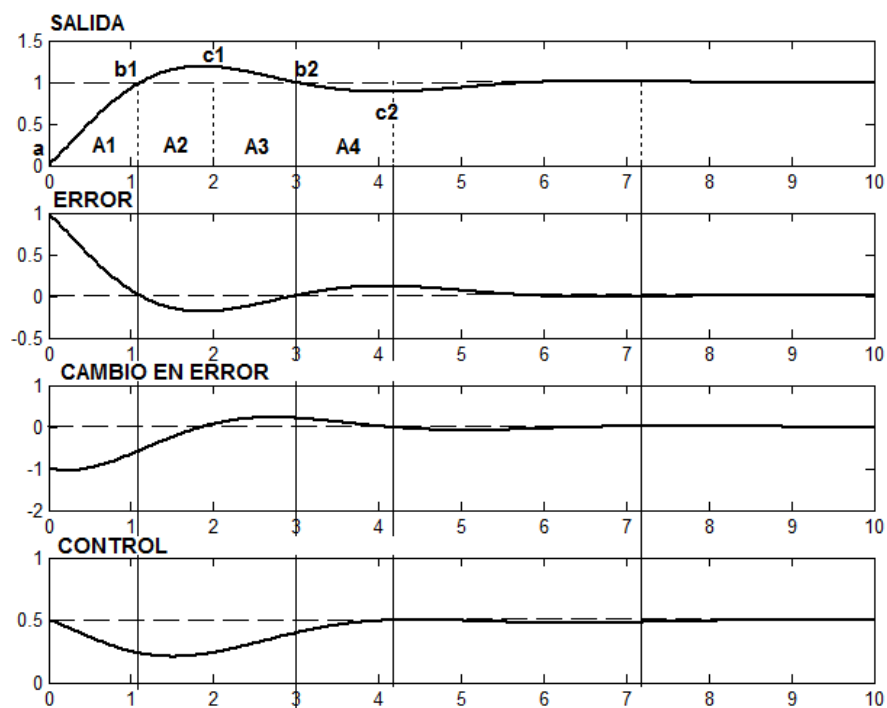


Figura 4.5 Respuestas al cambio en la referencia que muestran la dinámica de la planta a controlar.

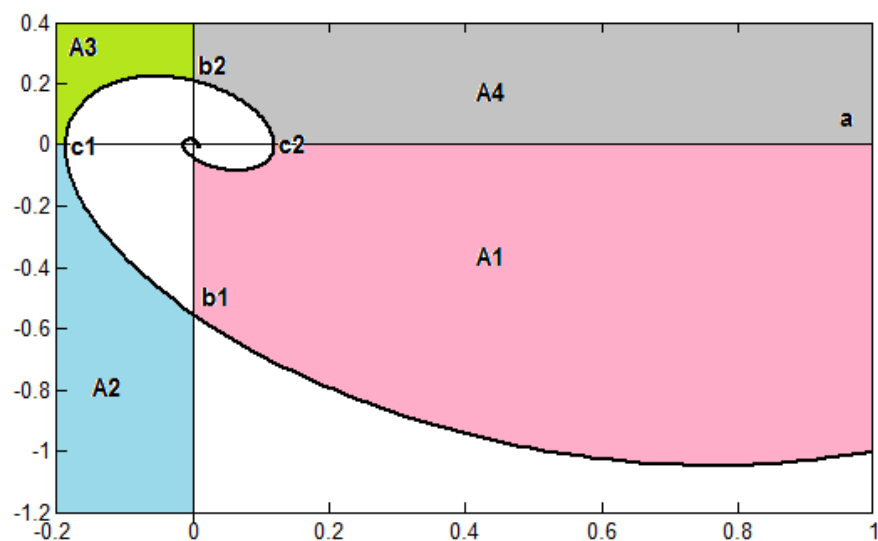


Figura 4.6 Zonas y puntos característicos de la trayectoria en el espacio de estados de un sistema con respuesta oscilatoria.

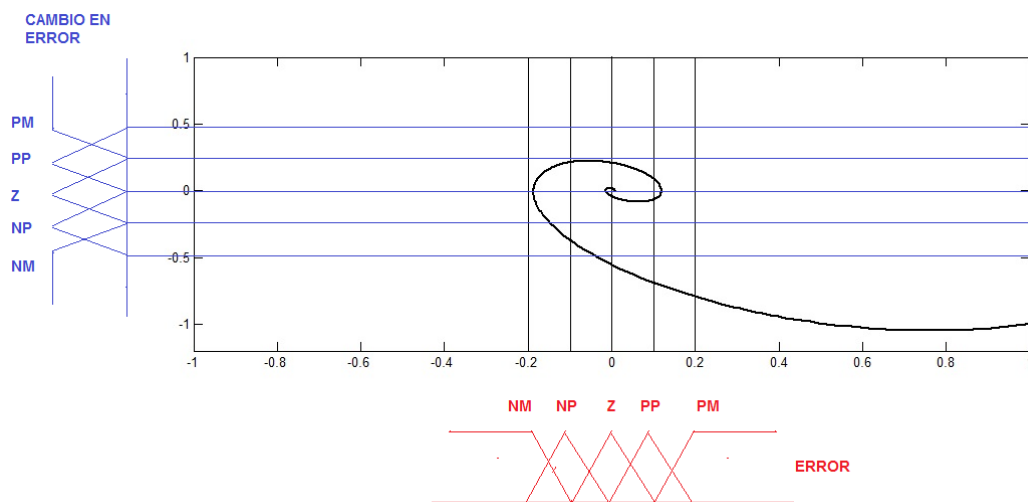


Figura 4.7 Posible división de los universos de discurso de las variables de entrada en subconjuntos difusos.

El espacio de estados del error puede servir como puente de conexión entre el comportamiento del proceso y la base de reglas difusas.

En [37] se han determinado la manera en que las zonas influyen sobre las dos partes del proceso de transito de un estado estacionario a otro. A la zona A1 pertenecerán las reglas que más influyen en el tiempo de levantamiento y se pregunta - ¿Cómo escoger los antecedentes de las reglas que pertenecen a esa zona?

En la zona A2 ocurre el valor máximo o pico de la respuesta. [32] considera que los consecuentes de las reglas de la zona A1 consideren que a la zona A2 se debe llegar “frenando”, o pasar de los máximos positivos (PL, PM) gradualmente a valores cercanos al cero, aplicar el cero y cambiar el signo con valores razonables. En la zona A2 se sigue aplicando el “freno” de manera tal que se retorne al punto de operación o valor de establecimiento. En la Figura 4.7 se muestra la posible división del universo discurso de las variables en entrada en subconjuntos difusos.

Las restantes zonas deben ser programadas de forma que los valores representen el reflejo especular de las zonas A1 (para la zona A3) y A2 (para la zona A4). Esto se muestra en la Figura 4.8

4.3.1. Diseño de la Base de Reglas

Como se conoce de [28] existen tres Metareglas, las cuales pueden ser listadas como sigue:

1. Si e y Δe son cero, mantener el valor del incremento de control igual a cero,
2. Si las condiciones son tales que el error tiende a cero de manera aceptable, mantener el valor actual del control,
3. Si e no se autocorrigie, entonces el incremento de control no es cero y su valor y signo dependen del signo y magnitud de e y Δe :
 - 3.1 Regla para los puntos b_1, b_2, \dots
 - El incremento del control tiene el mismo signo que el cambio en el error.
 - 3.2 Reglas para los valles c_1, c_2, \dots
 - El incremento del control tiene el mismo signo que el error
 - 3.3 Regla para el área A1 de manera que disminuya el tiempo de levantamiento de la respuesta temporal

- Los valores en esta área deben permitir disminuir el tiempo de levantamiento cuando el error es grande y prevenir el sobrepaso en el área A2 cuando el error esté cerca del valor cero. El incremento del control debe ser positivo mientras el error esté lejos del valor cero. Cuando el valor del error se acerca a los valores pequeños, el incremento de control debe transitar por cero hacia los valores negativos.
- 3.4 Regla para el área A2: debe disminuir el sobre paso alrededor del pico.
- El incremento de control es siempre negativo
- 3.5 Regla para el área A3: es el reflejo especular del área A1
- El incremento de control es negativo cuando $|e|$ tome valores lejos del cero. El incremento de control es positivo o cero cuando la respuesta se acerca al valor del set point.
- 3.6 Regla para el área A4: debe disminuir el sobre paso alrededor de los valles.
- El incremento de control es positivo.

Las Metareglas ayudan a determinar el signo de los incrementos del control. Con base en estas metareglas se diseña la base de reglas

En la Figura 4.8 se muestra una posible tabla de valores de antecedentes y consecuentes de las reglas difusas iniciales.

En la primera fila se tiene de izquierda a derecha las etiquetas lingüísticas para el error, que van desde los subconjuntos difusos representativos de valores negativos del error hasta los subconjuntos difusos representativos de valores positivos.

En la primera columna se tienen de abajo hacia arriba las etiquetas lingüísticas para el cambio en el error, que van desde los subconjuntos difusos representativos de valores negativos del cambio en el error hasta los subconjuntos difusos representativos de valores positivos.

c_e \ e	ng	np	z	pp	pg
pg	z	pp	pg	pg	pg
pp	np	z	pp	pg	pg
z	ng	np	z	pp	pg
np	ng	ng	np	z	pp
ng	ng	ng	ng	np	z

Figura 4.8 Tabla con la Base de Reglas

Para el ajuste de la Base de Reglas los cambios deben buscarse de la manera siguiente:

- ✓ Durante el ajuste no variar la primera letra correspondiente al consecuente de las reglas.
- ✓ Durante el ajuste se debe cambiar la tonalidad del consecuente la misma que viene dada por las segundas letras, o sea, (p) pequeño o (g) grande.
- ✓ Considerar que los cambios deben hacerse ante todo en la zona A1 para disminuir el tiempo de crecimiento y el porcentaje de sobre regulación.
- ✓ Si no mejora la respuesta en lo que respecta a la disminución del valor pico cambiar la tonalidad del consecuente en la zona A2.

Para diseñar el controlador difuso se forma la base de reglas inicial, la misma que se basa, en la tabla de la Figura 4.8.

En la Figura 4.9 se muestra el editor de reglas con las 25 reglas iniciales incluidas.

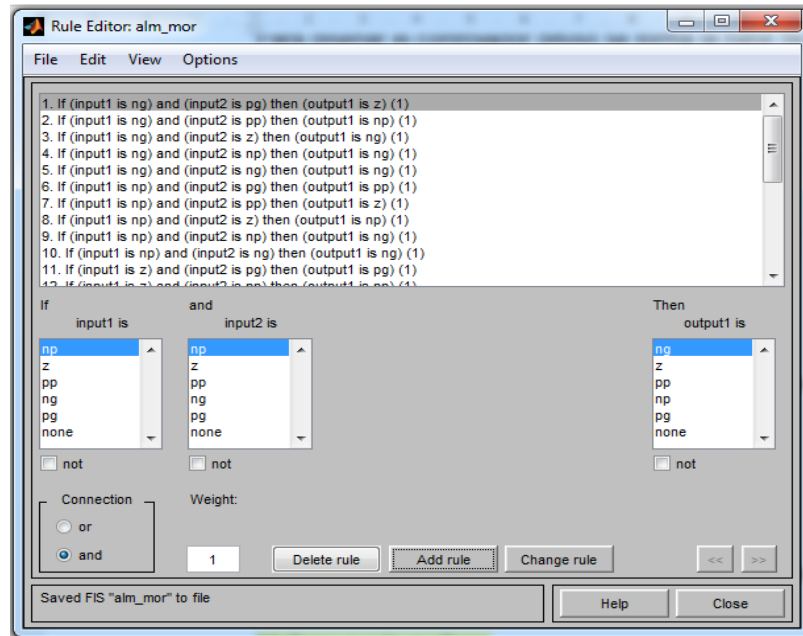


Figura 4.9. Editor de reglas del Sistema de Inferencias Difuso (fis)

En la Figura 4.10 se muestra el Rule Viewer del sistema de inferencias en el cual se puede verificar el mapeo de las entradas a la salida desplazando la línea vertical roja para comprobación del funcionamiento de la Base de Reglas.

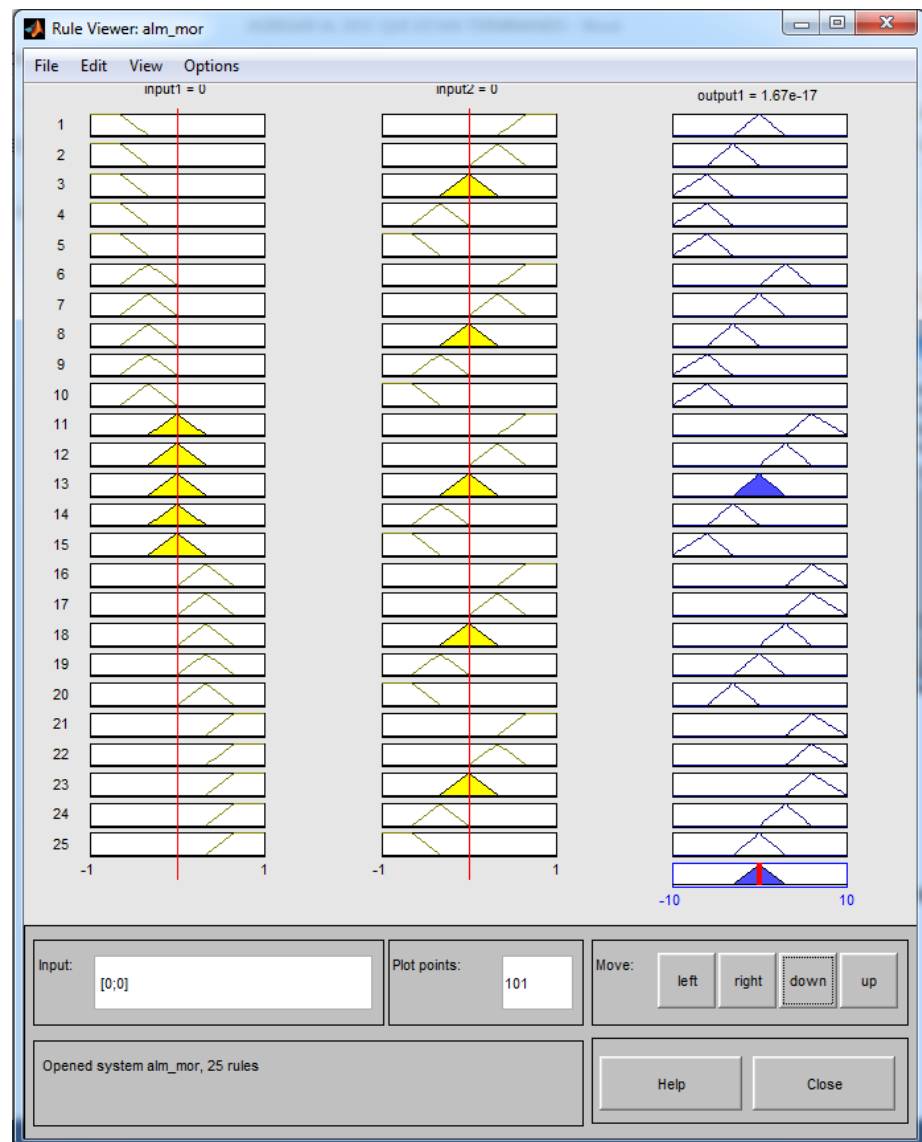


Figura 4.10 Observador de las reglas del sistema de inferencias difuso.

Finalmente, en la Figura 4.11 se muestra la superficie de mapeo de las entradas en la salida. Obsérvese la irregularidad de esta, que cambia sus pendientes en cada punto del plano de las entradas al sistema de inferencias.

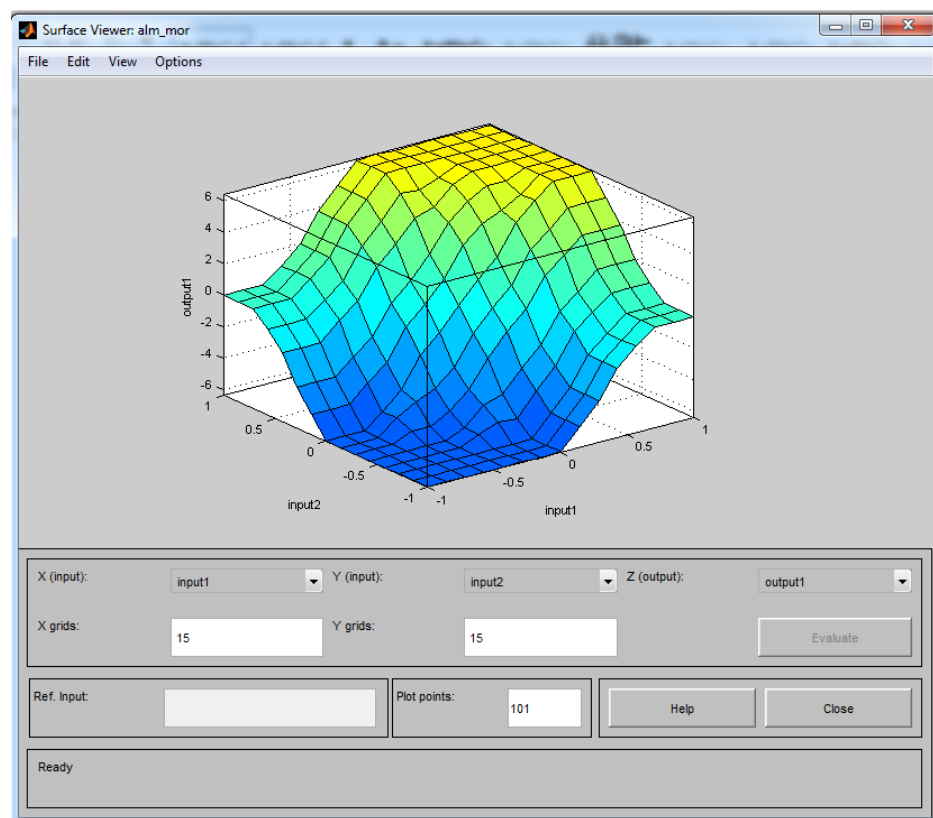


Figura 4.11 Observador de la superficie que conforma la Base de reglas del sistema de inferencias difuso

4.3.2. Escalamiento de las señales de entrada al controlador difuso

Como se puede observar del inciso 4.4.1 el sistema de inferencia difuso construido contempla que las señales de entrada están normadas, o sea sus valores están comprendidos entre los valores $\{-1,1\}$. Es por esto que cuando se acopla el sistema de inferencia difuso al resto del sistema MIMO puede que las señales de entrada estén fuera de este rango y por lo tanto al cerrar el lazo de control existirán valores de la entrada que no son mapeados a la salida por el sistema de inferencia. En **Fuente especificada no válida**, se expone la teoría del ajuste de los coeficientes a la entrada del sistema difuso.

La idea principal que subyace en esas ideas es lograr que todos los valores de las entradas caigan dentro del rango normado. Así, hemos

creado un diagrama Simulink con el cual ajustar las escalas de entrada del controlador difuso.

En la Figura 4.12 se muestra el diagrama BA_FM_control_MIMO_FUZZY.mdl en el cual se han realizado diferentes ajustes de las escalas. Se observa además que al controlador difuso se aplican las señales del error escalado y el cambio en el error, el cual también puede ser escalado.

Se ha configurado un sistema que contempla adicionar a la señal que sale del controlador difuso la integral escalada del error, con esta señal se disminuye el error off set del sistema a lazo cerrado.

En la Figura 4.13 se muestran diferentes curvas de reacción de las variables presión y temperatura de la glicerina obtenidas durante el ajuste.

Se realizaron tres experimentos para buscar el mejor ajuste de las escalas en las entradas del controlador difuso. Los resultados se muestran las respuestas de las variables controladas presión y temperatura de la glicerina.

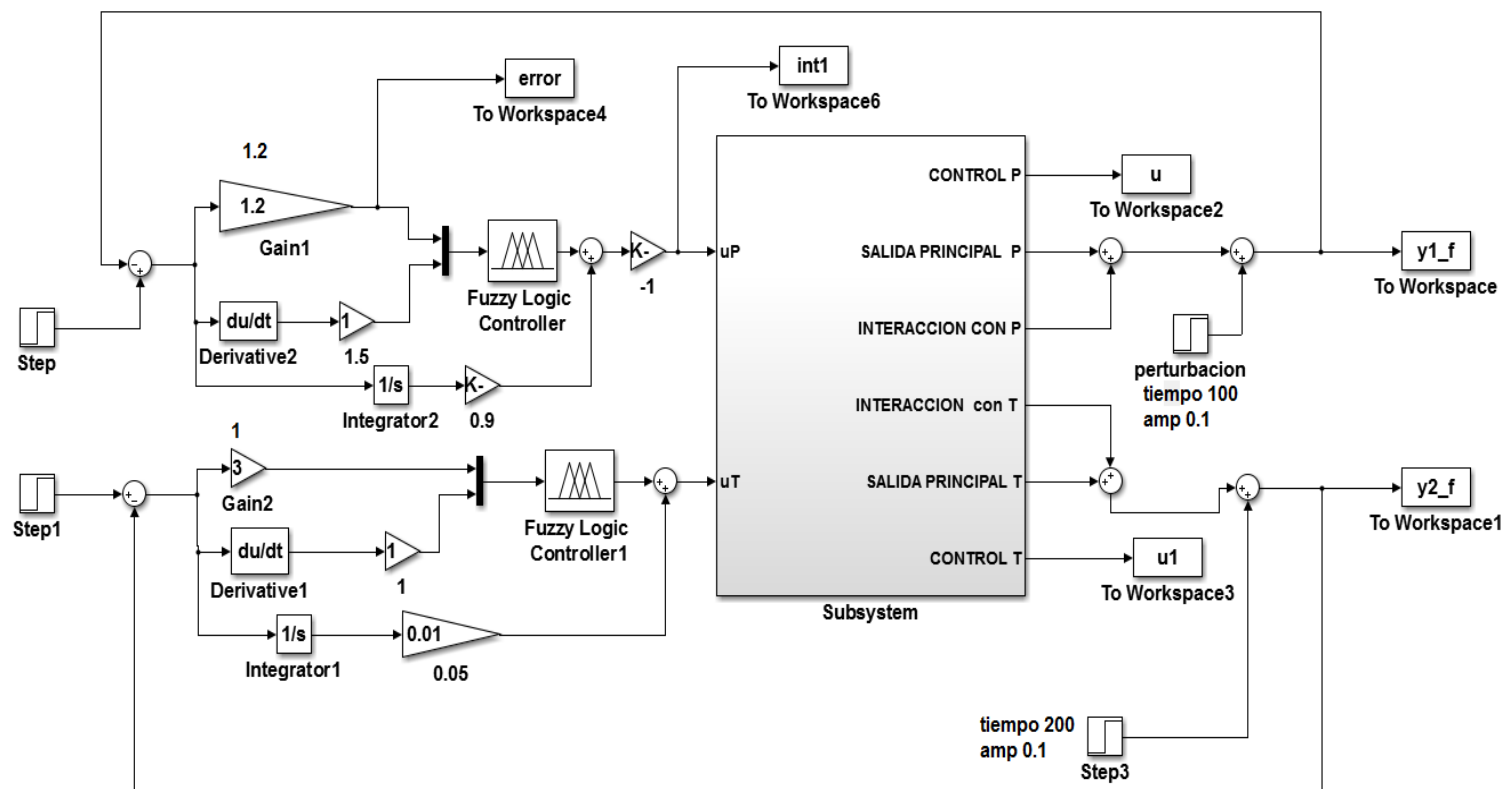


Figura 4.12 Diagrama Simulink para el ajuste por simulación del difuso MIMO

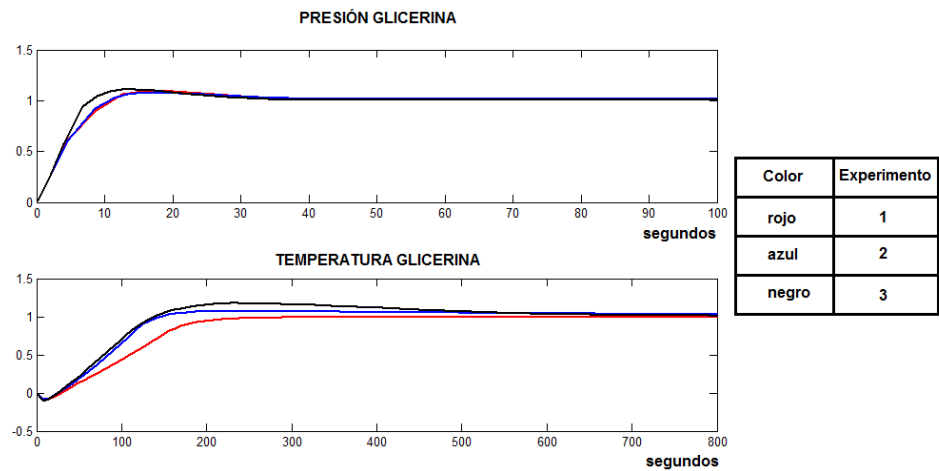


Figura 4.13 Respuestas de las variables controladas presión y temperatura de la glicerina

Los resultados de medir las especificaciones de respuesta transitoria del proceso para los tres experimentos realizados se muestran en las Tablas 4.1, 4.2 y 4.3. En todas se muestran cuatro especificaciones de la respuesta en el tiempo, tiempo de crecimiento, tiempo de pico, tiempo de establecimiento, valor del pico inverso y el porcentaje de sobre regulación para ambas variables de control.

Especificación	Presión de la glicerina	Temperatura de la glicerina
t_crecimiento	8.066 segundos	178.7 segundos
t_pico	16.44 segundos	-0.08375 pico respuesta inversa
t_establecimiento	33.88 segundos	227.8 segundos
M%	9.5%	0%

Tabla 4.1 Resultados del primer experimento

Los resultados de medir las especificaciones de respuesta transitoria del proceso para los tres experimentos realizados se muestran en las Tablas

4.1, 4.2 y 4.3. En todas se muestran cuatro especificaciones de la respuesta en el tiempo, tiempo de crecimiento, tiempo de pico, tiempo de establecimiento, valor del pico inverso y el porcentaje de sobre regulación para ambas variables de control.

Especificación	Presión de la glicerina	Temperatura de la glicerina
t_crecimiento	8.066 segundos	137.7 segundos
t_pico	16.44 segundos	-0.08132 pico respuesta inversa
t_establecimiento	33.88 segundos	636.8 segundos
M%	9.5%	0%

Tabla 4.2 Resultados del segundo experimento

Especificación	Presión de la glicerina	Temperatura de la glicerina
t_crecimiento	6.819 segundos	137.7 segundos
t_pico	14.51 segundos	-0.097 pico respuesta inversa
t_establecimiento	27.99 segundos	590.6 segundos
M%	11.2%	17.6%

Tabla 4.3 Resultados del tercer experimento

En la Tabla 4.4 se muestran los valores de las escalas empleados durante la experimentación por simulación del controlador difuso MIMO.

		Número de experimento		
		I exp	II exp	III exp
Presión	g0	1.2	1.5	1.8
	g1	1	1	1
	h	1.5	1.5	2
Temperatura	g0	3	4	2
	g1	1	1	1
	h	0.01	0.05	0.07

Tabla 4.4 Valores de las escalas del controlador difuso

4.4. Simulación de los controladores clásicos y difusos multivariables ante cambios en la referencia y perturbaciones

Se exponen a continuación varias gráficas que muestran el rechazo de perturbaciones por el controlador PID y por el controlador difuso MIMO. (Ver Figura 4.14). Se presta atención al tiempo que demora el sistema MIMO a lazo cerrado eliminando los efectos de las perturbaciones sobre las variables controladas.

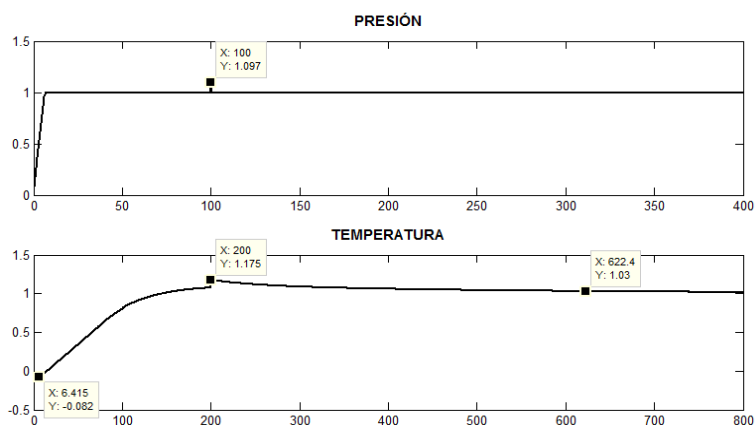


Figura 4.14 Rechazo a las perturbaciones por el sistema MIMO controlado con sendos PID.

En la Figura 4.15 se muestra el rechazo a la perturbación del sistema MIMO a lazo cerrado controlado con el controlador difuso diseñado con los parámetros dados en la Tabla 4.4 primera columna.

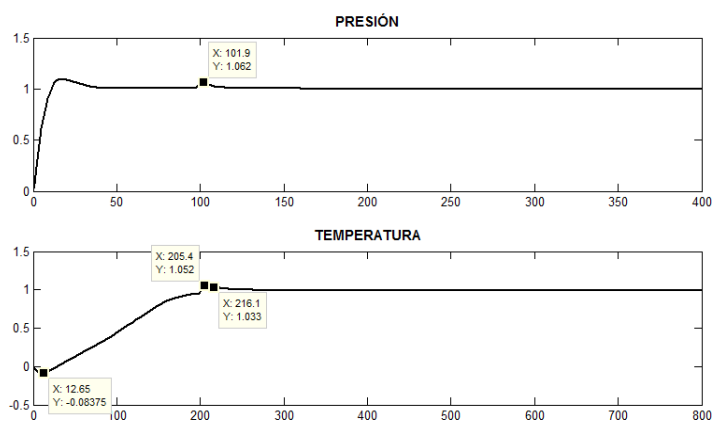


Figura 4.15. Rechazo a las perturbaciones por el sistema MIMO controlado con controladores difusos con escalas de la primera columna Tabla 4.4.

En las Figuras 4.16 y 4.17 se muestra el rechazo a la perturbación del sistema MIMO a lazo cerrado controlado con el controlador difuso diseñado con los parámetros dados en la Tabla 4.4 segunda columna.

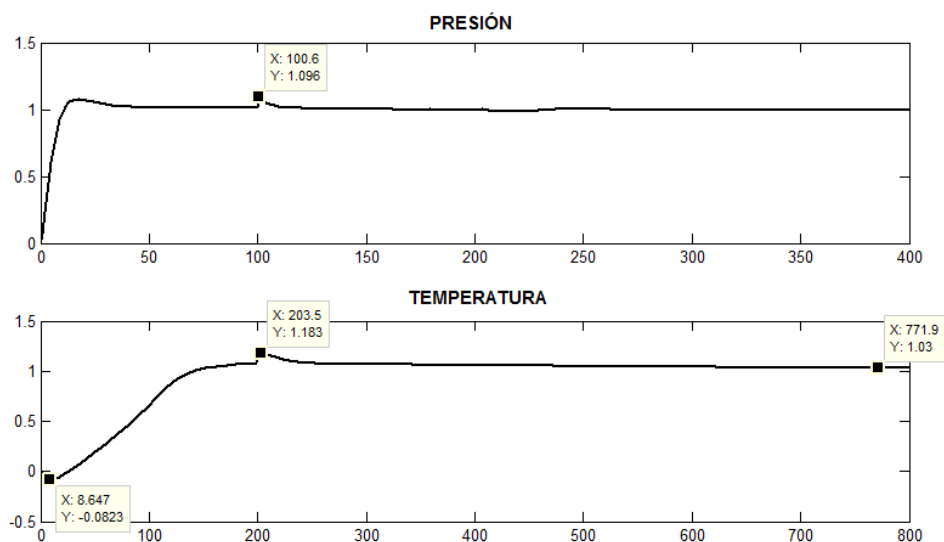


Figura 4.16 Rechazo a las perturbaciones por el sistema MIMO controlado con controladores difusos con escalas de la segunda columna Tabla 4.4

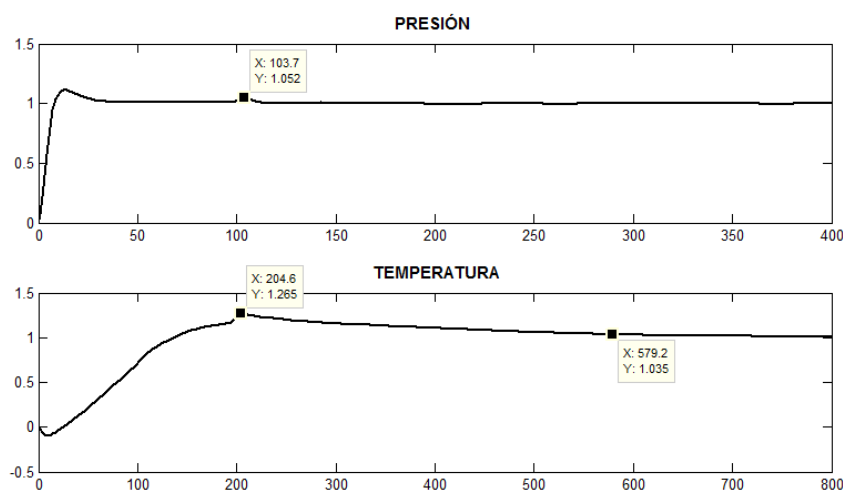


Figura 4.17 Rechazo a las perturbaciones por el sistema MIMO controlado con controladores difusos con escalas de la segunda columna Tabla 4.4

En la Figura 4.18 se muestra el rechazo a la perturbación del sistema MIMO a lazo cerrado controlado con el controlador difuso diseñado con los parámetros dados en la Tabla 4.4 tercera columna.

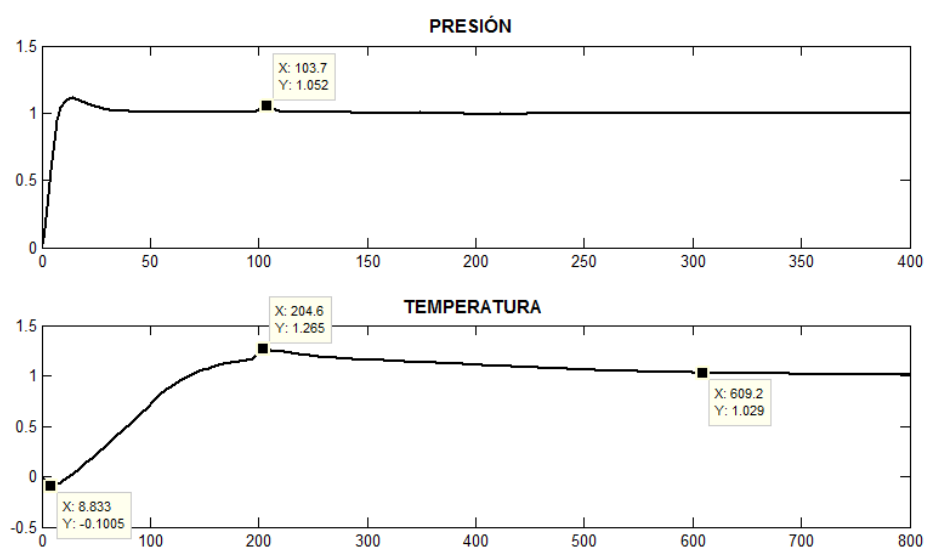


Figura 4.18 Rechazo a las perturbaciones por el sistema MIMO controlado con controladores difusos con escalas de la tercera columna Tabla 4.4

CAPÍTULO 5

5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES

5.1 Análisis de los resultados de las pruebas por simulación.

Varias pruebas fueron realizadas con diferentes valores de las escalas hasta obtener el valor final considerado aceptable dados los valores de tiempo de crecimiento, tiempo de pico, de establecimiento, valor de mínimo de la reacción de fase no mínima y el rechazo a las perturbaciones.

Para la variable presión los valores mínimos más significativos en tiempo se obtuvieron en el tercer experimento, o sea con los valores de las escalas:

$$g_0 = 1.8$$

$$g_1 = 1$$

$$h = 2$$

Para la variable temperatura de la glicerina el mismo análisis no proporciona un trio ganador de valores por experimento. Sin embargo, si se analiza el tiempo de rechazo a la perturbación en la variable temperatura, que es la variable más lenta, se observa que nuevamente las escalas del tercer experimento son las ganadoras.

Número	Duración del rechazo
Experimento 1	$\Delta T_{R1} = 771.9 - 203.5 = 568.4 \text{ s}$
Experimento 2	$\Delta T_{R2} = 609.2 - 204.6 = 404.4 \text{ s}$
Experimento 3	$\Delta T_{R3} = 579.2 - 204.6 = 374.6 \text{ s}$

Tabla 5.1 Resultados de los experimentos.

En la Tabla 5.1 se muestra el cálculo del tiempo necesario para rechazar la perturbación, entendiéndose como el tiempo que se requiere para disminuir la influencia de la perturbación hasta el valor fijo de 1.03, este valor está entre el +5% y el +2% del valor final o estacionario.

En la Figura 5.1 se muestra el esfuerzo en el control que realizan los controladores difusos para controlar la presión y la temperatura respectivamente. Obsérvese que en el caso de la presión el desarrollo de la variable de control presenta un cambio rápido inicialmente, tocando el valor de saturación por muy poco tiempo, lo cual es conveniente para que el trabajo de la bomba no sea forzado al máximo de sus posibilidades durante gran tiempo.

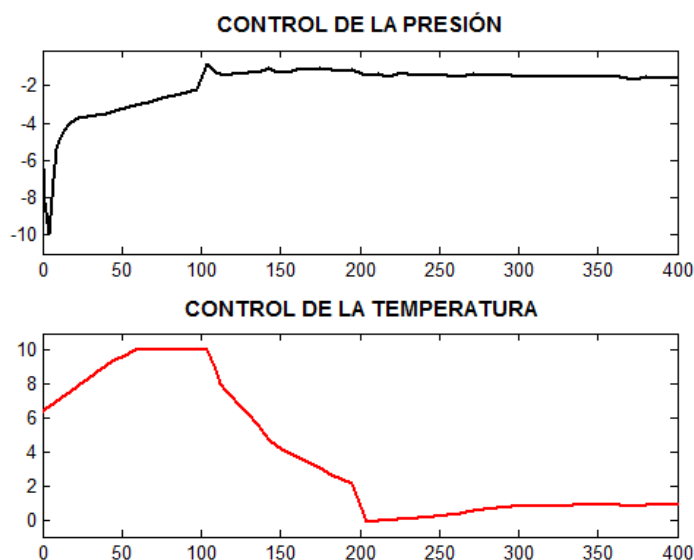


Figura 5.1 Esfuerzo en el control del controlador difuso

Por otro lado, en el caso de la temperatura para lograr su control desde los instantes 50 hasta aproximadamente los 110 segundos la bomba se mantiene trabajando en un régimen extremo, de mucha exigencia y esfuerzo mecánico. Posteriormente los valores del control disminuyen, lo que mejora los esfuerzos mecánicos y energéticos de la bomba.

5.2 Análisis comparativo del desempeño de los controladores diseñados.

En las Figuras 5.2 y 5.3 se muestran las magnitudes de los esfuerzos de control para mantener las variables de presión y temperatura en sus valores de referencia en presencia de cambios en la referencia y de perturbaciones al control de las variables de proceso.

En la Figura 5.2 se observan cómo se esfuerza el controlador PID para mantener dichas variables de proceso en sus valores de referencia.

En el gráfico superior observamos que el control parte del estado saturado y salta a valores cercanos a -4.8 unidades creciendo la demanda de velocidad de la bomba. Al ocurrir la perturbación, en el segundo 100, el control sufre un cambio brusco de velocidad y en muy corto tiempo disminuye hasta el valor de -1.035 aproximadamente, hasta aceleración y desaceleración requerida para rechazar la perturbación provoca un régimen de trabajo estresante para la bomba.

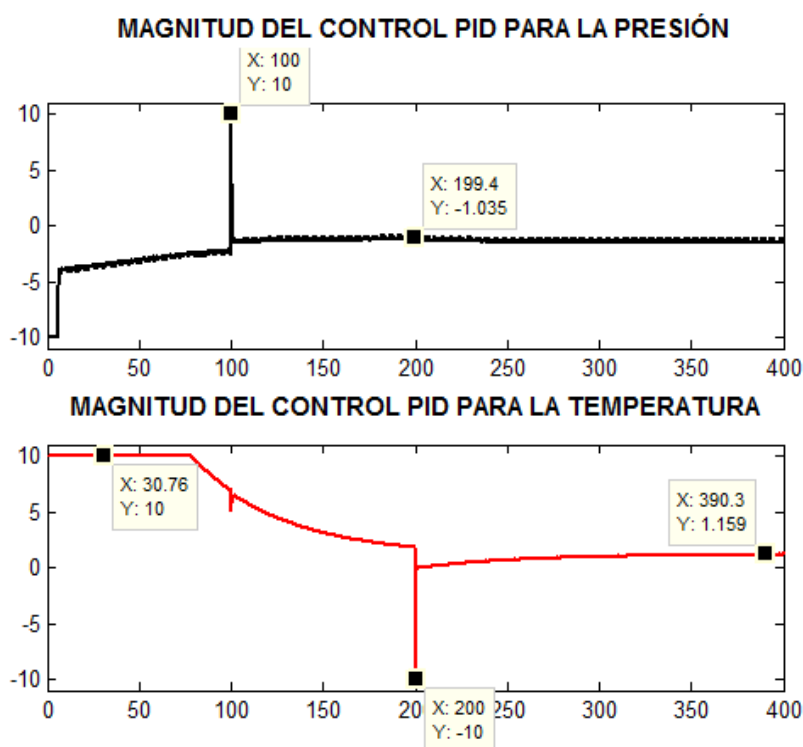


Figura 5.2 Esfuerzo de los controladores PID en el control de la presión y temperatura de la glicerina.

En el gráfico inferior observamos que el control permanece saturado durante los 80 segundos iniciales del proceso de control. Esto provoca un régimen de trabajo estresante para la bomba del etilenglicol. Posteriormente la disminución del control se realiza de forma exponencial tendiendo a su valor de establecimiento. Las interrupciones en la trayectoria mencionada se deben a la ocurrencia de las perturbaciones primero a los 100 segundos y después a los 200 segundos.

La primera perturbación es rechazada rápidamente, sin embargo, la segunda demanda un cambio brusco de velocidad en muy corto tiempo para poder rechazarla y llevar el valor de la temperatura de la glicerina a la salida del intercambiador al valor de referencia.

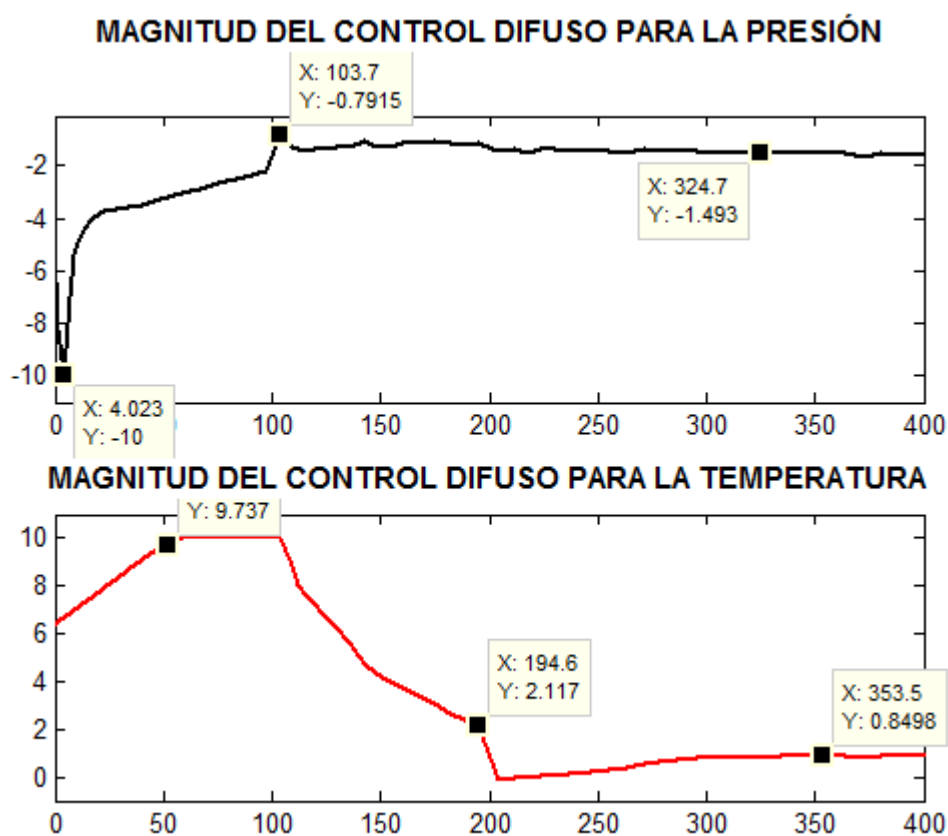


Figura 5.3 Esfuerzo de los controladores difusos en el control de la presión y temperatura de la glicerina.

Cuando se aplica el control difuso al sistema MIMO las condiciones de trabajo de las bombas de impulsión del etilenglicol y glicerina son menos severas. Esto se puede afirmar observando que las magnitudes del control son, aunque irregulares, no presentan cambios bruscos. Por otro lado, en el control difuso de la temperatura se observa un intervalo de tiempo donde se mantiene la saturación en el control. Esto por supuesto también plantea exigencias al consumo de energía para la bomba y a desgaste sistemático.

La irregularidad que presenta la forma del control difuso se debe precisamente a la irregularidad de la superficie de mapeo de las entradas en la salida, que es el control.

Finalmente, en el control difuso MIMO los rechazos que realizan los controladores difusos para evitar o disminuir los efectos de las perturbaciones son menores que los que realizan los controladores PID difusos, de lo cual dan fe los gráficos de las Figuras 5.2 y 5.3.

5.3 Generalización de los Resultados.

Analizando los resultados obtenidos en los capítulos 3 y 4 se resume que:

- La identificación de la planta con carácter de multivariabilidad puede realizarse aplicando las señales de prueba a una de las variables de entrada del proceso, manteniendo invariables el resto de las señales de entrada y realizando el grabado de las señales de salida de manera periódica.
- Generalmente, las señales obtenidas de los sensores de presión y flujo son señales ruidosas, las mismas que requieren ser filtradas para su posterior procesamiento por el software de identificación de los modelos. Se recomienda emplear un filtro de media móvil, el mismo que puede ser programado en la subrutina de adquisición de datos.
- El procesamiento de la información obtenida como matriz de funciones de transferencia para obtener el arreglo de ganancias RGA, también puede hacerse como parte del mismo software.

- La manera de ajustar los controladores PID en los sistemas MIMO indicada en [32] es amigable y puede aplicarse durante el ajuste de los controladores por simulación.
- El diseño del controlador difuso debe realizarse en dos partes, primero, empleando las Meta reglas conformar la Base de Reglas iniciales del sistema de inferencia. Luego, adicionar la parte externa del controlador en dependencia de que señales de entrada y que tipo de señal de salida se han previsto.
- El ajuste de las escalas del controlador se puede realizar igual que lo propuesto en [32], desconectando las interacciones y las perturbaciones, ajustar las escalas (coeficientes de escalas) para cambios en la referencia,
- Una vez terminado el ajuste conectar las interacciones entre las variables y reajustar si es necesario.
- Finalmente conectar las perturbaciones y verificar el comportamiento del sistema perturbado. Reajustar si es necesario.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

1. Como conclusión se responde a las preguntas formuladas con anterioridad, en el Capítulo 1.
2. Las salidas del sistema pueden mantenerse o regularse a los valores de referencia sin dificultad con ambos controladores. Las señales de control pueden alcanzar y superar los valores máximos y mínimos permisibles. Los controladores que se requieren teóricamente son factibles de realizar ya sea empleando una computadora robusta o un controlador lógico programable. En el caso de los controladores difusos los mismos ya están introducidos en diferentes PLC de firmas reconocimiento internacional en la industria.
3. Como se evidencia de las pruebas por simulación presentadas en el capítulo 4, es posible rechazar las perturbaciones con ambos controladores, sin embargo, las mejores prestaciones las proporciona el controlador difuso MIMO.
4. Cuando se aplica el control difuso al sistema MIMO las condiciones de trabajo de las bombas de impulsión del etilenglicol y glicerina son menos severas. Como conclusión el sistema MIMO controlador con la lógica difusa verifica los objetivos específicos.

RECOMENDACIONES

1. Considerar que el control difuso MIMO para sistemas donde se puede realizar el control descentralizado se muestra como un candidato a tener en cuenta para aquellos sistemas de intercambio de calor con fluidos viscosos.
2. Se recomienda la implementación del controlador difuso para el sistema MIMO y verificar en la práctica las bondades que ha demostrado poseer por simulación.
3. Se recomienda continuar las investigaciones en la planta con intercambio de calor en presencia de fluidos viscosos considerando la posibilidad de diseñar otros controladores, como por ejemplo controladores predictivos, adaptativos difusos, etc.

4. Continuar la experimentación en la Planta de Termofluidos para dar respuestas a preguntas tales como:
 - ¿Puede la temperatura de la glicerina alcanzar valores superiores a la temperatura de salida del etilenglicol?
 - ¿Hay algún riesgo de que aparezcan alguna inestabilidad oculta en el modelo?
 - ¿Existen problemas numéricos en el cálculo de las propiedades del sistema?

BIBLIOGRAFÍA

- [1] V. Vilaboy, «Prensa hidráulica trabajo de mantenimiento,» 12 Marzo 2012.[Enlínea].Available:<https://es.slideshare.net/vimanvi46/prensa-hidralica-trabajo-de-mantenimiento>. [Último acceso: 11 09 2018].
- [2] «MECALUX EL DIRECTORIO INDUSTRIAL,» 2017. [En línea]. Available: <https://www.logismarket.pe/pilman-maquinaria/prensa-hidraulica/5364998357-5260959215-p.html>. [Último acceso: 12 05 2018].
- [3] «06-MPM-Cap3-Final. CONFORMADO MECÁNICO DE LOS METALES,» 13 01 2018. [En línea]. Available: www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/2548/06-MPM-Cap3-Final.pdf?sequence=6. [Último acceso: 12 05 2018].
- [4] L. A. BUCHELLI CARPIO, «“DISEÑO DE UN CONTROL INTELIGENTE EN BASE A REDES,» 2016. [En línea]. Available: https://drive.google.com/file/d/0B4rZ_eS8XQUmT1dHX25MZFA1aHRmZ1IQVXZGZThnTk5ZcjR/view. [Último acceso: 12 06 2018].
- [5] M. Khadir, «Eprints,» 2003. [En línea]. Available: http://eprints.maynoothuniversity.ie/6905/1/JR_linear%20and%20non%202003.pdf. [Último acceso: 05 2016].
- [6] A dynamic model for milk fouling in a plate heat exchanger, Youcef Mahdi, Abdelkader Mouheb, Lounes Oufer, Centre Universitaire de Medea, Institut des Sciences et de la Technologie, Quartier, 27 November 2007.
- [7] Heat Exchanger System Controlled by Fuzzy Self-adapting PID Controller, Manish Trikha, Neha Sharma E, E&I Department Moradabad Institute of Technology Moradabad (U.P.) MIT International Journal of Electrical and Instrumentation Engineering, Vol. 2, No. 1, Jan. 2012, pp. (31-36).
- [8] Model Based Control of Compact Heat Exchangers Independent of the Heat Transfer Behavior, A. Michel and A. Kugi, Automation and Control Institute (ACIN), Vienna University of Technology Journal of Process Control, vol. 50, no. 11-12, pp. 1859–1868, 2014.
- [9] Modelado, simulación y control automático de la etapa de evaporación en el proceso de producción de leche en polvo en la empresa proleca

Ltda., Vanessa Cristina Caraballo Zabaleta, Rodolfo Antonio Herrera Maza, Xiorelly Yesenia Sierra González, Universidad de Cartagena facultad de ingeniería química Cartagena de Indias d. t. y c. octubre de 2011.

- [10] The Characteristics of Brazed Plate Heat Exchangers with Different Chevron Angles, S. Muthuraman, Higher College of Technology, Oman. Global Journal of researches in engineering Mechanical and mechanics engineering, December 2011.
- [11] J. FU, «Modelling, Optimization and control of a plate heat exchanger.,» Engineering Department of Chemical Engineering and Chemical Technology Imperial College London , London, 2009.
- [12] D. S. A. A.-N. Afraa H. Al-Tae, «Comparative Study of Temperature Control in a Heat Exchanger Process,» *Eng. & Tech. Journal*, 2012.
- [13] Y. Cengel, Termodinamica., New York: Mc Grauw Hill, 2014.
- [14] Intercom, Grupo, «SoloStocks,» 2005. [En línea]. Available: <https://www.solostocks.com/venta-productos/energia-solar/recambios-piezas-equipos-energia-solar/intercambiador-de-placas-m3-de-alfa-laval-10095104>. [Último acceso: 2018 05 17].
- [15] T. Takagi y M. Sugeno, «Fuzzy Identification of Systems and its Applications to Modeling and Control,» *IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN AND CYBERNETICS*, 1985
- [16] R. King, G. Magoulas y A. Stathaki, «MULTIVARIABLE FUZZY CONTROLLER DESIGN,» *ControlEag. Practice*, vol. 2, nº 3, pp. 431-437, 1994.
- [18] A. Emhemed, «Eprints,» 2012. [En línea]. Available: http://eprints.uthm.edu.my/6135/1/Mathematical_Modeling_of_Industrial_Heat_Exchanger_System.pdf.
- [19] K. S. M. R. Sivakumar, «IJCEA,» 06 2010. [En línea]. Available: <http://ijcea.org/papers/7-A507.pdf>. [Último acceso: 04 05 2016].
- [20] A. M. A. K. M. Salam Al-Dawery, «Dynamic modeling and control of plate heat exchanger,»2012. [En línea]. Available:

https://www.researchgate.net/publication/256718722_Dynamic_modeling_and_control_of_plate_heat_exchanger. [Último acceso: 05 2016].

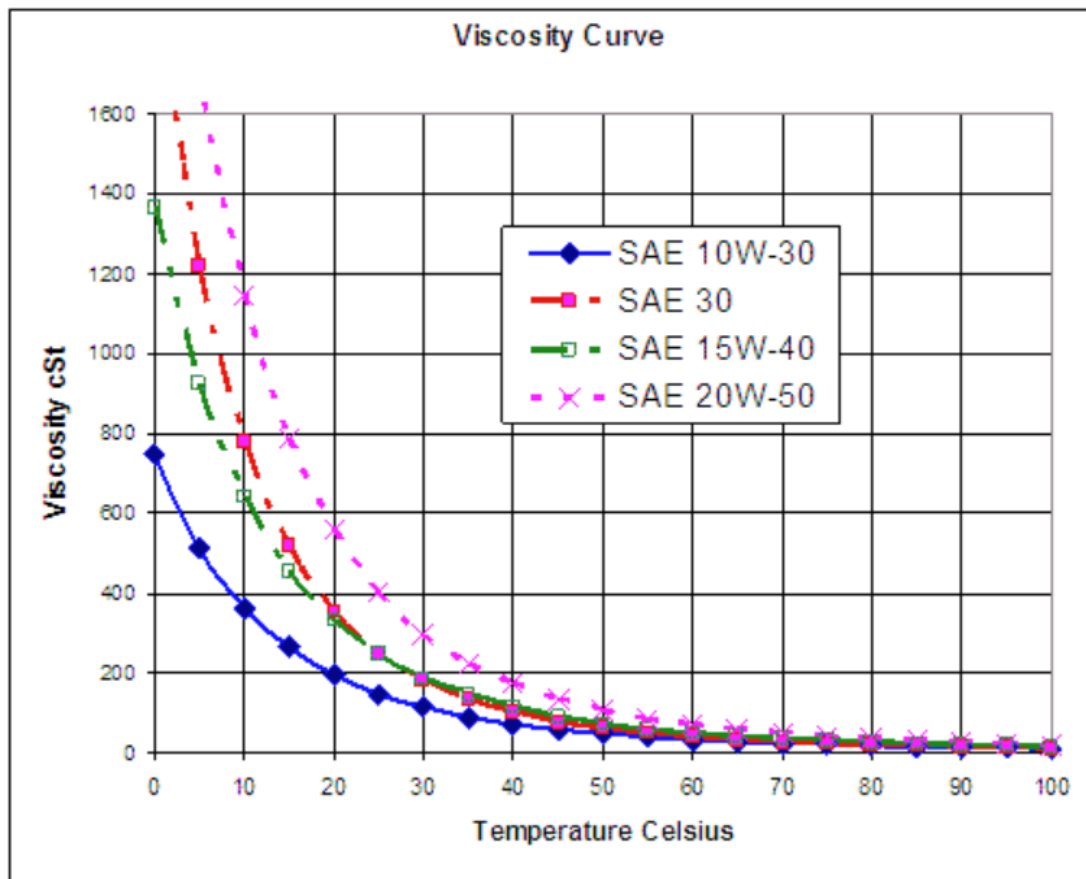
- [21] M. K. Rajalakshmi, «IOSRJEN,» 07 2013. [En línea]. Available: [http://www.iosrjen.org/Papers/vol3_issue7%20\(part-1\)/B03710915.pdf](http://www.iosrjen.org/Papers/vol3_issue7%20(part-1)/B03710915.pdf). [Último acceso: 10 06 2016].
- [22] A. Michel y A. Kugi, «Researchgate,» 02 2013. [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/publication/260806502_Model_based_control_of_compact_heat_exchangers_independent_of_the_heat_transfer_behavior. [Último acceso: 05 2016].
- [23] H. T. Nguyen y otros, A First Course in Fuzzy and Neural Control, Chapman & Hall/CRC, 2003.
- [24] L. A. Zadeh, Information and Control, vol. 8, Elsevier, 1965, pp. 338-353.
- [25] K. M. Passino y S. Yurkovich, Fuzzy Control, Menlo Park, California: Addison-Wesley Longman, Inc., 1998.
- [26] L. Reznik, Fuzzy Controllers, Oxford: Butterworth-Heinemann Newnes, 1997.
- [27] L. Ljung, System Identification, Linkopings: Linkopings Universitet, 2007.
- [28] Skogestad, Multivariable Feedback Control: Analysis and Design, Wiley, 2005.
- [29] Liu, Industrial process Identification and Control Design, London: Springer, 2012.
- [30] P. Albertos, Multivariable Control Systems: An Engineering Approach, London: Springer, 2004.
- [31] B. Ogunnaike, Process Dynamic: Modeling and control, New York: Oxford Press, 1994.
- [32] R. a. Braae, «Selections of parameters for a Fuzzy Logic controller,» *Fuzzy Sets and Systems*, pp. 185-199, 1979.

- [33] D. a. Prade, «Fuzzy logics and the generalized modus ponens revisited,» *Cybernetics and Systems*, pp. 3-4, 1984.
- [34] J. Mosquera, «Elección de los parámetros de los controladores difusos del tipo PID para el control de modelos de plantas con dinámicas complejas,» ESPOL, Guayaquil, 2018.
- [35] Widman International SRL (2018). Mantenimiento proactivo, efecto de la viscosidad en el motor [Online]. Disponible en: <https://www.widman.biz/Seleccion/efecto.html>

ANEXOS

ANEXO 1

COMPORTAMIENTO DE LA VISCOSIDAD EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA EN LOS ACEITES MINERALES. [35]

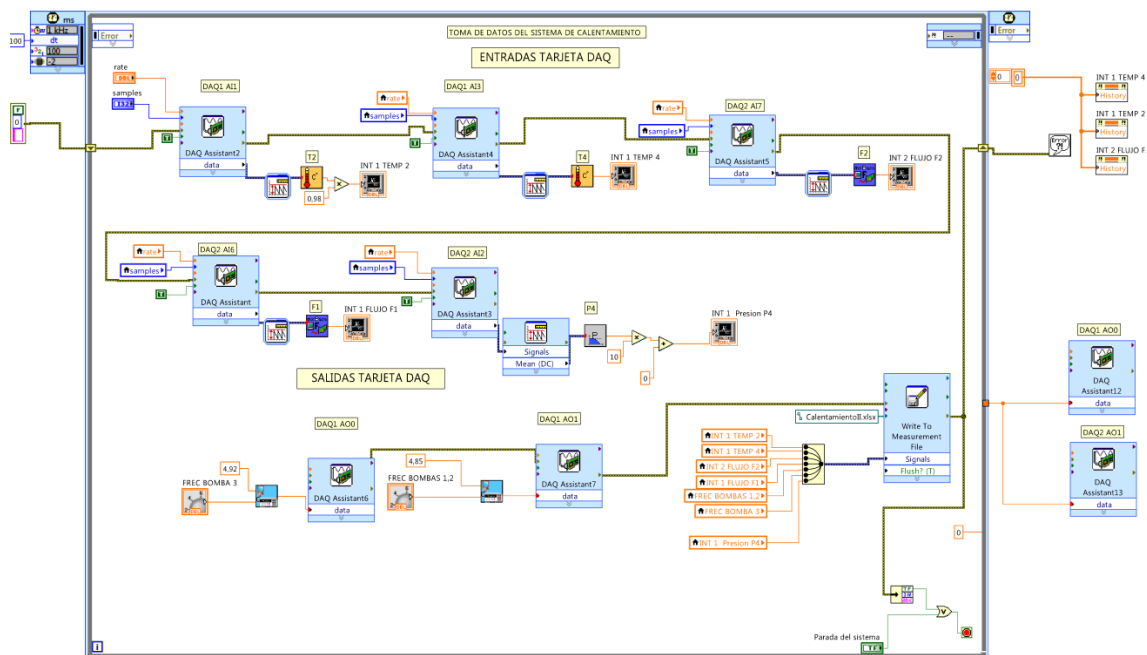


Viscosidad del aceite a temperaturas operacionales (100° C) requeridas por el diseño del motor	Viscosidades SAE para escoger
5.6 cSt – 9.6 cSt	0W-20, 5W-20, 20
9.3 cSt – 12.5 cSt	0W-30, 5W-30, 10W-30, 30
12.5 cSt – 16.3 cSt	0W-40, 5W-40, 10W-40, 15W-40, 40
16.3 cSt – 21.9 cSt	0W-50, 5W-50, 10W-50, 15W-50, 20W-50, 25W-50, 50

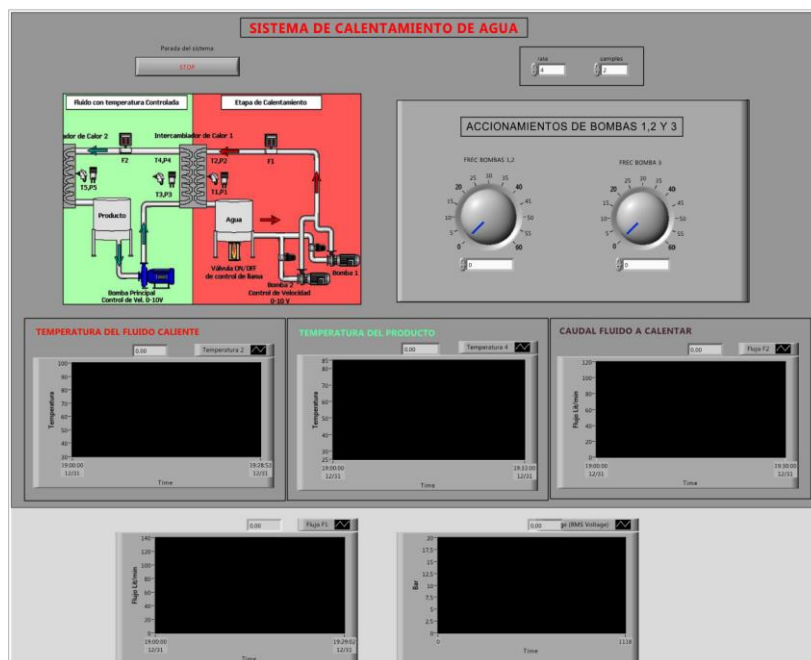
ANEXO 2

PROGRAMACIÓN EN LABVIEW PARA LA ADQUISICION DE DATOS

ZONA DE CALENTAMIENTO.



PANEL FRONTAL EN LABVIEW – ZONA DE CALENTAMIENTO



ANEXO 3

ADQUISICIÓN DE DATOS MEDIANTE SIMULINK

