



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

“DISEÑO Y ANÁLISIS COMPARATIVO DE UN SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA CON LÓGICA DIFUSA VS CONTROL PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO (PID) EN UN PROTOTIPO DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO EN UNA PLANTA DE PROCESOS”

TRABAJO DE TITULACIÓN

Previo a la obtención del Título de:

MAGISTER EN AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL INDUSTRIAL

Presentado por:

Ing. Jhonny Darwin Ortiz Mata

GUAYAQUIL - ECUADOR
AÑO: 2016

AGRADECIMIENTO

Al director del Trabajo de Titulación y amigo, Msc. Holger Cevallos por todo el apoyo, la paciencia, los consejos siempre tan valiosos y toda la enseñanza brindada por su parte.

Al profesor y amigo, el Msc. Aristides Reyes por su enseñanza, los consejos y guía sobre los detalles del control automático en torres de enfriamiento.

A la Universidad Estatal de Milagro por la facilidad brindada para la construcción de la planta y para el desarrollo de los experimentos.

DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico en especial a mi papá y mi mamá pues gracias a ellos he llegado hasta donde estoy y sé que con su apoyo incondicional, consejos y guía seguiré alcanzando muchos más logros tanto en lo personal como en lo profesional. A mi familia por el ánimo, el apoyo y por estar siempre conmigo, con su ayuda he logrado concluir con éxito esta meta. Este trabajo va por todos ustedes.

Ing. Jhonny Darwin Ortiz Mata

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

Msc. Sara Ríos Orellana

PRESIDENTE

Msc. Holger Cevallos

DIRECTOR

Msc. Arístides Reyes

MIEMBRO PRINCIPAL

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de este trabajo de titulación, nos corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma, a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

(Reglamento de Graduación de la ESPOL).

Ing. Jhonny Darwin Ortiz Mata

RESUMEN

El presente trabajo trata sobre el diseño y análisis del comportamiento de un sistema de control clásico PID vs un sistema de control con lógica difusa aplicado al control de temperatura de una torre de enfriamiento.

El estudio se va a realizar en una planta de procesos de tratamiento térmico de líquidos. Los controladores PID y Difuso están enfocados en la torre de enfriamiento, por ello es necesario conocer la teoría de funcionamiento de la misma, estos principios se basan en balances de masa, energía y como realizar dimensionamiento de la capacidad calorífica de una torre de enfriamiento.

En el primer capítulo se plantea el problema de la investigación, de donde nace la necesidad de llevar a cabo este trabajo. Se plantea la solución del problema y como se va a llevar a cabo el diseño de controladores de temperatura para la torre de enfriamiento, mediante el control convencional PID y el control mediante lógica difusa. También se explica la justificación que hace necesario que se lleve a cabo este estudio. Por último se plantea el objetivo general y los objetivos específicos.

En el segundo capítulo se realiza un repaso del estado del arte en las torres de enfriamiento, entre ello podemos mencionar la historia, los tipos de torres que existen y los elementos que la componen. Se estudian las ecuaciones de

balance de masa, energía y fundamentos termodinámicos. Se describe las distintas formas de operación de los intercambiadores de calor. Se repasa el estado del arte, del control automático y del modelado de las torres de enfriamiento. Por último se menciona el desarrollo en la industria de control difuso.

En el tercer capítulo se describen las condiciones para llevar a cabo el modelamiento de la torre de enfriamiento, se mencionan las variables del proceso y se plantea un sistema de ecuaciones diferenciales que permiten modelar matemáticamente la torre de enfriamiento. Se repasan conceptos sobre los controladores PID. Se mencionan conceptos del control difuso como por ejemplo, el uso de reglas y los métodos de defusificación, se explica cómo se lleva a cabo el procesamiento de un controlador difuso. Se describe el software que permitirá llevar a cabo la investigación. Se repasan conceptos del sensado de las variables de interés de la planta de tratamiento térmico.

En el cuarto capítulo se describe la construcción de la planta de procesos. Se realiza un mapeo de las conexiones que se van a realizar en las tarjetas de adquisición de datos. Se detallan las variables a controlar y manipular. Se muestran los proyectos creados para el tratamiento de datos en Labview y Matlab. Se realiza un análisis del aporte de enfriamiento de los actuadores mediante pruebas experimentales. Por último se encuentra un punto de operación en el que el comportamiento de la planta sea lineal.

En el quinto capítulo se encuentra una función de transferencia mediante técnicas de identificación, el modelo es hallado mediante estimación paramétrica. La función de transferencia identificada, permitirá diseñar el controlador PID convencional. Se diseñan controladores PID con algoritmo interactivo y no interactivo. Se realiza la representación del sistema en espacio de estados, para luego diseñar un servomecanismo. Luego se procede a diseñar el controlador difuso partiendo como base la respuesta obtenida con el PID. Para el controlador difuso se realizan dos experimentos, cuya diferencia es el número de reglas entre las variables de entrada y salida, por último se diseña un banco de pruebas para probar el desempeño de los controladores.

En el sexto capítulo se realizan las pruebas para observar el desempeño de los controladores PID y difuso. Se muestran los resultados y análisis de las pruebas. Por último se generalizan los resultados.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|-------------------------------------|-------|
| AGRADECIMIENTO | I |
| DEDICATORIA | II |
| TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN | III |
| DECLARACIÓN EXPRESA | IV |
| RESUMEN | V |
| ÍNDICE GENERAL..... | VIII |
| ABREVIATURAS | XIV |
| SIMBOLOGÍA | XVII |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | XVIII |
| ÍNDICE DE TABLAS | XXV |
| INTRODUCCIÓN..... | XXVI |
| | |
| CAPÍTULO I..... | 1 |
| ANTECEDENTES..... | 1 |
| 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... | 1 |
| 1.2 SOLUCIÓN PROPUESTA..... | 2 |
| 1.3 JUSTIFICACIÓN..... | 3 |
| 1.4 OBJETIVO GENERAL..... | 4 |
| 1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 4 |

| | |
|--|----|
| CAPÍTULO II | 5 |
| ESTADO DEL ARTE DE LAS TORRES DE ENFRIAMIENTO | 5 |
| 2.1 HISTORIA DE LAS TORRES DE ENFRIAMIENTO. | 6 |
| 2.2 TIPOS DE TORRES DE ENFRIAMIENTO. | 8 |
| 2.2.1 TORRES DE CIRCULACIÓN NATURAL. | 8 |
| 2.2.2 TORRES DE TIRO MECÁNICO..... | 9 |
| 2.3 COMPONENTES DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO..... | 11 |
| 2.4 INFLUENCIAS EXTERNAS SOBRE EL FUNCIONAMIENTO DE LA TORRE. | 14 |
| 2.5 BALANCE DE MASA Y ENERGÍA..... | 15 |
| 2.5.1 BALANCES DE MASA..... | 16 |
| 2.5.2 BALANCE DE ENERGÍA. | 16 |
| 2.5.3 FUNDAMENTOS TERMODINÁMICOS..... | 17 |
| 2.6 INTERCAMBIADORES DE CALOR DE PLACAS. | 18 |
| 2.6.1 CLASIFICACIÓN DE INTERCAMBIADORES SEGÚN LA DISTRIBUCIÓN DE FLUJO. | 19 |
| 2.6.2 CLASIFICACIÓN DE INTERCAMBIADORES SEGÚN SU CONTACTO ENTRE FLUIDOS. | 21 |
| 2.7 ESTADO DEL ARTE DEL CONTROL AUTOMÁTICO. | 22 |
| 2.8 ESTADO DEL ARTE EN EL MODELADO DE LAS TORRES DE ENFRIAMIENTO..... | 23 |
| 2.9 DESARROLLO EN LA INDUSTRIA DEL CONTROL CON LÓGICA DIFUSA..... | 25 |

| | |
|--|----|
| CAPÍTULO III | 27 |
| MODELADO DE LAS TORRES DE ENFRIAMIENTO | 27 |
| 3.1 MODELO MATEMÁTICO DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO..... | 27 |
| 3.1.1 VARIABLES DEL PROCESO..... | 28 |
| 3.1.2 SUPOSICIONES PARA EL MODELADO DINÁMICO DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO..... | 30 |
| 3.1.3 SISTEMA DE ECUACIONES DIFERENCIALES..... | 31 |
| 3.2 CONCEPTOS DE CONTROL EN TORRES DE ENFRIAMIENTO..... | 33 |
| 3.2.1 CONTROLADORES PID..... | 33 |
| 3.2.2 CONTROL CON LÓGICA DIFUSA..... | 36 |
| 3.3 ESTRATEGIA DE CONTROL DIFUSO..... | 40 |
| 3.3.1 PROCESAMIENTO DE UN CONTROLADOR DIFUSO..... | 40 |
| 3.3.2 FORTALEZAS DEL CONTROL DIFUSO..... | 41 |
| 3.4 CONCEPTOS DE SENSADO..... | 43 |
| 3.4.1 ELEMENTOS DE MEDICIÓN Y TRANSMISIÓN..... | 43 |
| 3.4.2 SENSADO DE TEMPERATURA..... | 44 |
| 3.4.3 SENSADO DE CAUDAL..... | 46 |
| 3.4.4 SENSADO DE HUMEDAD..... | 47 |
| 3.5 ADQUISICIÓN DE DATOS..... | 48 |
| 3.5.1 COMPONENTES DE MEDIDAS PARA UN SISTEMA DAQ..... | 49 |
| 3.5.2 TARJETAS DE ADQUISICIÓN DE DATOS..... | 50 |
| 3.7 DIMENSIONAMIENTO DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO..... | 52 |

| | |
|---|----|
| CAPITULO IV..... | 56 |
| BOSQUEJO DE LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA | 56 |
| 4.1 CARACTERÍSTICAS DE LA PLANTA..... | 57 |
| 4.2 SISTEMA DE MEDICIÓN Y ADQUISICIÓN DE DATOS..... | 63 |
| 4.3 VARIABLES A CONTROLAR Y MANIPULAR..... | 66 |
| 4.3.1 VÁLVULA REGULADORA DE FLUJO..... | 67 |
| 4.3.2 CONTROL DE VELOCIDAD PWM..... | 69 |
| 4.3.3 MEDICIÓN DE TEMPERATURA..... | 72 |
| 4.3.4 MEDICIÓN DE FLUJO..... | 74 |
| 4.4 TRATAMIENTO DE DATOS EN EL ORDENADOR..... | 77 |
| 4.4.1 TRATAMIENTO DE DATOS MEDIANTE LABVIEW..... | 77 |
| 4.4.2 TRATAMIENTO DE DATOS MEDIANTE MATLAB..... | 82 |
| 4.5 ANÁLISIS DEL APOORTE DE ENFRIAMIENTO DE LOS ACTUADORES..... | 83 |
| 4.6 OPERACIÓN LINEAL DE LA PLANTA..... | 86 |
| | |
| CAPÍTULO V..... | 90 |
| DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL PARA LA TORRE DE ENFRIAMIENTO DE LA PLANTA DE PROCESOS | 90 |
| 5.1 IDENTIFICACIÓN DEL SISTEMA A PARTIR DE LOS DATOS ENTRADA- SALIDA..... | 91 |
| 5.1.1 IDENTIFICACIÓN EXPERIMENTAL DE SISTEMA DE PRIMER ORDEN..... | 92 |

| | |
|--|-----|
| 5.1.2 IDENTIFICACIÓN DE DATOS ENTRADA-SALIDA USANDO LA HERRAMIENTA IDENT DE MATLAB. | 94 |
| 5.1.3 MODELO ARX. | 99 |
| 5.1.4 MODELO ARMAX. | 102 |
| 5.1.5 MODELO BOX JENKIN. | 104 |
| 5.2 SELECCIÓN DEL MODELO. | 108 |
| 5.2.1 COMPROBACIÓN DEL MODELO BJ:2,2,3,2,1. | 108 |
| 5.2.2 COEFICIENTES DEL MODELO BJ:2,2,3,2,1. | 109 |
| 5.2.3 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL MODELO BJ:2,2,3,2,1. | 110 |
| 5.3 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL CLÁSICO PID. | 110 |
| 5.3.1 IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR PID INTERACTIVO. | 111 |
| 5.3.2 IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR PID NO INTERACTIVO. | 117 |
| 5.3.3 IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR PID ANTI WINDUP. | 121 |
| 5.3.4 DISEÑO DE UN SERVOMECANISMO EN ESPACIO DE ESTADOS. | 126 |
| 5.4 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL CON LÓGICA DIFUSA. | 131 |
| 5.4.1 DISEÑO DEL CONTROLADOR DIFUSO PARA LA TORRE DE ENFRIAMIENTO. | 131 |
| 5.4.2 PRIMER CASO DE ESTUDIO. | 132 |
| 5.4.3 SEGUNDO CASO DE ESTUDIO. | 136 |
| 5.4.4 IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR DIFUSO MEDIANTE SIMULINK. | 143 |
| 5.5 DISEÑO DE PRUEBAS. | 148 |

| | |
|---|-----|
| CAPITULO VI..... | 150 |
| ANÁLISIS DE RESULTADOS..... | 150 |
| 6.1 PRUEBAS DEL DESEMPEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL CLASICO (PID) VS. CONTROL CON LÓGICA DIFUSA EN LA TORRE DE ENFRIAMIENTO DE LA PLANTA DE PROCESOS. | 150 |
| 6.1.1 CONTROLADOR PID. | 151 |
| 6.2.2 CONTROLADOR DIFUSO..... | 156 |
| 6.2 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LAS PRUEBAS. | 160 |
| 6.3 GENERALIZACIÓN DE LOS RESULTADOS..... | 162 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 164 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 170 |

ABREVIATURAS

| | |
|----------|--|
| ADC: | Convertidor analógico-digital. |
| AIGND: | Tierra de la entrada analógica. |
| ARMAX: | Autoregressive moving average with exogeneous input. |
| ARX: | Autoregressive with exogeneous input. |
| BJ: | Box-Jenkins. |
| Ci(s): | Función de transferencia controlador integral. |
| Cp(s): | Función de transferencia controlador proporcional. |
| Cpd(s): | Función de transferencia controlador proporcional derivativo. |
| Cpi(s): | Función de transferencia controlador proporcional integral. |
| Cpid(s): | Función de transferencia controlador proporcional integral derivativo. |
| DAQ: | Data acquisition. |
| e(t): | Error entre salida y referencia. |
| Fem: | Fuerza electromotriz. |
| G(s): | Función de transferencia de la planta (Método experimental sistema de primer orden). |
| Gbj(s): | Función de transferencia de la planta (Box Jenkin). |
| K: | Ganancia. |
| KB: | Constante de Boltzman. |
| KD: | Ganancia derivativa. |
| KI: | Ganancia integral. |

| | |
|--------|--|
| KP: | Ganancia proporcional. |
| MIMO: | Multiple input multiple output. |
| P: | Controlador proporcional. |
| PC: | Computador. |
| PD: | Controlador proporcional derivativo. |
| PI: | Controlador proporcional integral. |
| PID: | Controlador proporcional integral derivativo. |
| Pt100: | RTD de platino con 100Ω a 0°C . |
| PWM: | Modulación de ancho de pulso. |
| RSE: | Medida referenciada. |
| RTD: | Resistance Temperature Detector. |
| s: | Variable compleja de Laplace. |
| SISO: | Single input single output. |
| ss: | State Space. |
| t: | Tiempo. |
| t0: | Tiempo de retardo. |
| Td: | Tiempo derivativo. |
| tf: | Transfer function. |
| Ti: | Tiempo integral. |
| Tp: | Periodo promedio de duración. |
| tp: | Ancho de pulso del disparo. |
| Ts: | Tiempo de muestreo. |

| | |
|----------------------|-----------------------------------|
| tss: | Tiempo de estabilización. |
| u(t): | Entrada a la planta. |
| V: | Voltios. |
| Vdc: | Voltaje de corriente directa. |
| VI: | Virtual Instrument. |
| y(t): | Salida de la planta. |
| z: | Variable discreta z. |
| ΔT : | Variación de temperatura. |
| ΔV_i : | Variación de voltajes de entrada. |
| ΔV_o : | Variación de voltajes de salida. |
| $\mu_A(x)$: | Función de pertenencia. |
| τ : | Constante de tiempo. |
| $^{\circ}\text{C}$: | Grado centígrado. |

SIMBOLOGÍA

| | |
|------------------------------|---|
| <i>A</i> | Área de sección transversal de la torre (m^2) |
| <i>a</i> | Superficie de transferencia por unidad de volumen (m^2/m^3) |
| <i>C_G</i> | Calor específico del aire seco (KJ/Kg °C) |
| <i>C_h</i> | Calor húmedo (KJ/Kg °C) |
| <i>C_L</i> | Calor específico del agua (KJ/Kg °C) |
| <i>C_v</i> | Calor específico del vapor de agua (KJ/Kg °C) |
| <i>G</i> | Flujo de aire seco (kg/s) |
| <i>ha</i> | Coeficiente global de transferencia de calor por unidad de volumen (KJ/ m^3 °C s) |
| <i>h_{fg}</i> | Calor latente de vaporización (KJ/Kg) |
| <i>H_G</i> | Entalpía del aire (KJ/Kg) |
| <i>H_{Gs}</i> | Entalpía del aire saturado (KJ/Kg) |
| <i>L̇</i> | Flujo de agua (kg/s) |
| <i>Q̇_L</i> | Flujo de calor latente (KJ/s) |
| <i>Q̇_S</i> | Flujo de calor sensible (KJ/s) |
| <i>T_L</i> | Temperatura del agua °C |
| <i>T_G</i> | Temperatura del aire °C |
| <i>Y</i> | Humedad absoluta del aire (kg agua/kg gas seco) |
| <i>Y_S</i> | Humedad absoluta del aire saturado (kg agua/kg gas seco) |
| <i>Z</i> | Altura de la torre (m) |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 2.1: Torre de enfriamiento atmosférica. | 8 |
| Figura 2.2: Circulación natural de flujo contador. | 9 |
| Figura 2.3: Torre de enfriamiento tiro inducido. | 10 |
| Figura 2.4: Torre de enfriamiento tiro forzado. | 11 |
| Figura 2.5: Esquema de componentes de una torre de tiro mecánico. | 12 |
| Figura 2.6: Distribución de flujo en paralelo y curva de equilibrio térmico. ... | 19 |
| Figura 2.7: Distribución en contraflujo y curva de equilibrio térmico. | 20 |
| Figura 2.8: Distribución en flujo cruzado de un solo paso. | 20 |
| Figura 2.9: Distribución en flujo cruzado de paso múltiple. | 21 |
| Figura 3.1: Nomenclatura para una torre de enfriamiento. | 32 |
| Figura 3.2: Ejemplo de subconjuntos borrosos para el conjunto velocidad. . | 38 |
| Figura 3.3: Lazo de control difuso. | 40 |
| Figura 3.4: Elementos de medición y transmisión. | 44 |
| Figura 3.5: Sensores de temperatura. | 45 |
| Figura 3.6: Sensores de caudal KEYENCE. | 46 |
| Figura 3.7: Partes de un sistema DAQ. | 48 |
| Figura 3.8: Componentes de medidas DAQ. | 49 |
| Figura 3.9: Tarjetas de adquisición de datos NI Compact DAQ. | 50 |
| Figura 3.10: Etapas de la planta de procesos. | 51 |
| Figura 4.1: Planta de tratamiento térmico. | 57 |
| Figura 4.2: Esquema de la planta de tratamiento térmico. | 61 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.3: Panel de fuerza accionamiento de las bombas y centro de carga de 220V. | 61 |
| Figura 4.4: Panel de control alimentación de sensores y tarjetas de adquisición de datos. | 61 |
| Figura 4.5: Bomba y válvula reguladora de flujo a través de la torre de enfriamiento. | 62 |
| Figura 4.6: Intercambiador de calor etapa de enfriamiento, displays de temperatura y manómetros. | 62 |
| Figura 4.7: Torre de enfriamiento, ventilador y tanque de agua a enfriar. | 62 |
| Figura 4.8: Tarjetas electrónicas de acondicionamiento de señal para las tarjetas DAQ USB 6009. | 63 |
| Figura 4.9: Tarjeta DAQ USB-6009 de National Instruments. | 64 |
| Figura 4.10: Asignaciones de canales Tarjeta DAQ USB-6009. | 65 |
| Figura 4.11: Válvula de control de flujo SIEMENS M2H50FYN. | 67 |
| Figura 4.12: Relación entre la apertura de la válvula y el voltaje de control. | 68 |
| Figura 4.13: Relación entre el flujo y la apertura de la válvula. | 69 |
| Figura 4.14: Señal PWM con distintos ciclos de trabajo. | 70 |
| Figura 4.15: Tarjeta electrónica RioRand de control de velocidad de motor DC. | 71 |
| Figura 4.16: Relación entre el porcentaje del ciclo de trabajo del PWM y el Voltaje de salida. | 71 |
| Figura 4.17: Sensor de temperatura Pt100. | 72 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.18: Transmisor de temperatura para sensor Pt100. | 73 |
| Figura 4.19: Escala de temperatura en función del voltaje. | 74 |
| Figura 4.20: Sensor de flujo electromagnético KEYENCE FD-M. | 75 |
| Figura 4.21: Escala de flujo en función de voltaje. | 77 |
| Figura 4.22: Proyecto en Labview para la planta de tratamiento térmico. | 78 |
| Figura 4.23: Interfaz con el usuario para las variables de temperatura del fluido a enfriar y el agua en la torre de enfriamiento. | 78 |
| Figura 4.24: Interfaz con el usuario para monitoreo de las variables de flujo y controlar los accionamiento de los actuadores. | 79 |
| Figura 4.25: Diagrama de bloques de Enfriamiento_Agua1.vi con DAQ Assistant. | 80 |
| Figura 4.26: Diagrama de bloques de Enfriamiento_Agua2.vi con DAQmx.. | 81 |
| Figura 4.27: Diagrama de bloques en Simulink de la planta de tratamiento térmico. | 83 |
| Figura 4.28: Pruebas del aporte de enfriamiento al sistema de la válvula y el ventilador. | 84 |
| Figura 4.29: Temperatura de la glicerina realizada en la prueba 7. | 85 |
| Figura 4.30: Prueba realizada con apertura de válvula fija en 30 %. | 87 |
| Figura 4.31: Prueba realizada con apertura de válvula multipasos. | 88 |
| Figura 5.1: Sistema dinámico con entrada, salida y perturbaciones. | 92 |
| Figura 5.2: Variación de temperatura con ventilación máxima y mínima. | 93 |
| Figura 5.3: Datos de entrada-salida para la identificación de la planta. | 95 |

| | |
|--|-----|
| Figura 5.4: Ventana principal de la interfaz gráfica “ident” | 96 |
| Figura 5.5: Procesamiento de señales de salida y entrada. | 97 |
| Figura 5.6: Modelo de salida para un modelo de 2 polos y un cero..... | 97 |
| Figura 5.7: Análisis residual para un modelo BJ:21111..... | 98 |
| Figura 5.8: Construcción del modelo ARX:4,4,1..... | 100 |
| Figura 5.9: Pruebas con algunos modelos ARX..... | 100 |
| Figura 5.10: Construcción del modelo ARMAX:2,2,2,1..... | 102 |
| Figura 5.11: Pruebas con algunos modelos ARMAX..... | 103 |
| Figura 5.12: Construcción del modelo BJ:2,2,2,2,1..... | 105 |
| Figura 5.13: Pruebas con algunos modelos BJ..... | 105 |
| Figura 5.14: Modelo BJ:2,2,3,2,1..... | 107 |
| Figura 5.15: Análisis residual del modelo BJ:2,2,3,2,1..... | 107 |
| Figura 5.16: Respuestas de la planta real e identificada..... | 109 |
| Figura 5.17: Diagrama de bloques de un sistema en lazo cerrado..... | 111 |
| Figura 5.18: Diagrama de bloques del controlador PID interactivo..... | 112 |
| Figura 5.19: Diagrama de bloques del controlador PID interactivo, y la planta identificada en lazo cerrado..... | 113 |
| Figura 5.20: Respuesta del controlador PID interactivo..... | 115 |
| Figura 5.21: Respuesta del controlador PID interactivo ante perturbaciones. | 115 |
| Figura 5.22: Salida del controlador PID interactivo..... | 116 |
| Figura 5.23: Diagrama de bloques del controlador PID no interactivo..... | 117 |

| | |
|---|-----|
| Figura 5.24: Diagrama de bloques del controlador PID no interactivo, y la planta identificada en lazo cerrado. | 118 |
| Figura 5.25: Respuesta del controlador PID No interactivo. | 119 |
| Figura 5.26: Respuesta del controlador PID no interactivo ante perturbaciones. | 120 |
| Figura 5.27: Salida del controlador PID no interactivo. | 121 |
| Figura 5.28: Diagrama de bloques del controlador PID con anti windup. ... | 123 |
| Figura 5.29: Respuesta del controlador PID con anti windup. | 124 |
| Figura 5.30: Salida del controlador PID anti windup. | 124 |
| Figura 5.31: Error del controlador PID con anti windup. | 125 |
| Figura 5.32: Respuesta al escalón en lazo cerrado mediante espacio de estados. | 127 |
| Figura 5.33: Esfuerzo del controlador con realimentación de estados..... | 127 |
| Figura 5.34: Diseño de un servomecanismo mediante espacio de estados. | 129 |
| Figura 5.35: Respuesta del servomecanismo..... | 130 |
| Figura 5.36: Reglas del primer caso de estudio..... | 133 |
| Figura 5.37: Reglas de control primer caso de estudio ante combinaciones en las variables de entrada..... | 134 |
| Figura 5.38: Salida del controlador en función de las variables de entrada para el primer caso de estudio..... | 134 |
| Figura 5.39: Función de pertenencia del error, segundo caso de estudio. . | 138 |

| | |
|---|-----|
| Figura 5.40: Función de pertenencia de la salida, segundo caso de estudio. | 138 |
| Figura 5.41: Reglas del segundo caso de estudio. | 139 |
| Figura 5.42: Reglas de control segundo caso de estudio ante combinaciones en las variables de entrada..... | 140 |
| Figura 5.43: Salida del controlador en función de las variables de entrada para el segundo caso de estudio. | 140 |
| Figura 5.44: Implementación del controlador difuso en Simulink..... | 144 |
| Figura 5.45: Respuestas del controlador difuso del primer caso de estudio. | 146 |
| Figura 5.46: Respuestas del controlador difuso del segundo caso de estudio. | 147 |
| Figura 6.1: Implementación mediante simulink del controlador PID en la planta real..... | 151 |
| Figura 6.2: Respuesta de la planta con el controlador PID no interactivo... | 153 |
| Figura 6.3: Error del controlador PID no interactivo en la planta real..... | 154 |
| Figura 6.4: Error absoluto medio PID..... | 154 |
| Figura 6.5: Valor medio de la señal de control u Controlador PID | 155 |
| Figura 6.6: Rapidez de variación de la señal de control u Controlador PID. | 155 |
| Figura 6.7: Implementación mediante simulink del controlador Difuso en la planta real. | 156 |
| Figura 6.8: Respuesta de la planta con el controlador Difuso..... | 157 |

| | |
|--|-----|
| Figura 6.9: Error del controlador Fuzzy en la planta real | 158 |
| Figura 6.10: Error absoluto medio Fuzzy. | 158 |
| Figura 6.11: Valor medio de la señal de control u Controlador Fuzzy..... | 159 |
| Figura 6.12: Rapidez de variación de la señal de control Controlador Fuzzy. | 159 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|-----|
| Tabla 4.1: Asignación de Entradas/Salidas DAQ 1 USB 6009. | 65 |
| Tabla 4.2: Asignación de Entradas/Salidas DAQ 2 USB 6009. | 66 |
| Tabla 4.3: Condiciones de operación de la planta. | 86 |
| Tabla 4.4: Condiciones para operación lineal de la planta..... | 89 |
| Tabla 5.1: Resultados con modelos ARX. | 101 |
| Tabla 5.2: Resultados con modelos ARMAX. | 104 |
| Tabla 5.3: Resultados con modelos BJ..... | 106 |
| Tabla 5.4: Valores de parámetros de los controladores PID..... | 126 |
| Tabla 5.5: Respuesta de los controladores PID clásicos. | 130 |
| Tabla 5.6: Reglas de control primer caso de estudio. | 132 |
| Tabla 5.7: Reglas de control segundo caso de estudio. | 137 |
| Tabla 5.8: Respuestas del controlador difuso del primer y segundo caso de estudio. | 147 |
| Tabla 5.9: Banco de pruebas para el desempeño de los controladores PID y Fuzzy. | 149 |
| Tabla 6.1: Resultados de las pruebas de los controladores. | 160 |
| Tabla 6.2: Voltajes de operación de tarjeta de control PWM. | 163 |

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas se han desarrollado diversas teorías de control, los controladores proporcional, integral y derivativo (PID) se usan de forma muy frecuente en las industrias, de hecho actualmente se encuentran implementados el 98% de controladores de este tipo. Sin embargo existen otras alternativas que pueden suplir las necesidades del control de procesos en la industria, una de ellas son las técnicas de inteligencia artificial que permite utilizar los conocimientos del procesos, formulando algoritmos que convierten la experiencia del operador en reglas de control.

El diseño y estudio del comportamiento de los controladores PID y Difuso se llevará a cabo en la torre de enfriamiento de la planta de tratamiento térmico. Se pretende mantener controlada la temperatura de la glicerina para que esta pueda ser usada en la elaboración de un producto, de tal forma que se asemeje al control de procesos de tratamiento térmico de líquidos.

Para el diseño de los controladores, es necesario conocer la dinámica del sistema, por lo que es necesario representar el sistema ya sea mediante el modelo matemático o el modelo estimado mediante técnicas de identificación de sistemas. En vista de se tiene la instrumentación necesaria y porque resulta más sencillo que resolver un sistema de ecuaciones en función del espacio,

se utilizarán técnicas de identificación paramétrica para estimar un modelo que represente el proceso.

Con la planta identificada, se procede a diseñar el controlador PID, para que el sistema trabaje según los requerimientos del proceso. Se utilizan diversos algoritmos para representar un PID, como son los algoritmos interactivo y no interactivo, una forma adicional que se plantea es el de un PID con anti windup. Sin bien es cierto que los parámetros de los controladores se ajustan mediante simulación, sin embargo es necesario realizar el ajuste final del sistema al realizar la implementación del controlador en la planta.

Para el diseño del controlador difuso se parte de la respuesta obtenida con el PID y se pretende que al menos se logre igualar su funcionamiento. Las variables de entrada al controlador difuso son el error y su derivada, se utiliza el método de Mamdani para la defusificación, el diseño del controlador difuso se lo lleva a cabo en el (*Fuzzy logic toolbox*) de MATLAB. Las funciones de pertenencia son de tipo triangular y se analizan dos casos, el primero con tres funciones de pertenencia en la entrada y salida, dando como resultado nueve reglas de control. En el segundo caso se plantean cinco funciones de pertenencia a la entrada y siete a la salida, dando como resultado veinticinco reglas de control.

Las pruebas de desempeño de los controladores PID y Difuso, se realiza mediante cambios en la referencia de temperatura y perturbaciones en el sistema. Para evaluar el comportamiento del sistema de control de la torre de enfriamiento es necesario analizar indicadores de tal forma que cualitativamente se pueda tener idea de cómo se comporta el sistema de control.

CAPÍTULO I

ANTECEDENTES

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

Para la formación de estudiantes de ingeniería es necesario realizar prácticas experimentales sobre sistemas físicos reales, con el propósito de adquirir competencias básicas y profesionales que complementen los conocimientos teóricos. Una de las necesidades de la zona 5 donde se encuentra la Universidad Estatal de Milagro son las carreras de ingeniería en alimentos e industrial, por lo que se necesitan equipar los laboratorios con prototipos de plantas industriales. En vista de aquello se construyó una planta para el tratamiento térmico de líquidos, de tal forma que los estudiantes puedan conocer los diferentes equipos de instrumentación, como adquirir datos de una planta y como controlar un proceso. Ahora bien se requiere realizar un análisis

del funcionamiento de la planta y como poder llevar a cabo mediante la instrumentación necesaria, la medición de variables de gran interés en la mayoría de procesos industriales como son temperatura, flujo y presión. También se requiere diseñar controladores para las variables de procesos mencionadas, que sirvan como base para realizar prácticas experimentales y futuras investigaciones en el campo de control de procesos.

1.2 SOLUCIÓN PROPUESTA.

Para el desarrollo de prácticas experimentales en el campo de control de procesos de termo fluidos se requiere automatizar la planta instalando controladores, sensores, actuadores, tarjetas de adquisición de datos, etc.

La planta de procesos de tratamiento térmico tiene dos etapas una de calentamiento y otra de enfriamiento. El estudio a realizar se basa en la etapa de enfriamiento, para ello se utilizará un prototipo de una torre de enfriamiento y un intercambiador de calor de placas.

Una vez que se instalen las herramientas de automatización se diseñará un sistema de control de temperatura para la torre de enfriamiento. Para el control de temperatura se tendrán dos actuadores, un ventilador con velocidad variable y una válvula reguladora de flujo. Se analizará el aporte de enfriamiento de cada actuador.

El diseño del sistema de control de temperatura se realizará mediante dos métodos, el primero es un controlador convencional PID y el segundo es un controlador difuso. Mediante un banco de pruebas se analizará el comportamiento de cada uno de los controladores, ajustando primero el controlador PID, luego la información obtenida de dicho controlador servirá para ajustar el controlador difuso.

1.3 JUSTIFICACIÓN.

Al realizar experimentos en el campo de control de procesos se contribuirá a la formación de los estudiantes de la Facultad de Ingeniería Industrial de la UNEMI. Además los docentes y estudiantes podrán realizar trabajos académicos e investigativos.

Es importante resaltar que para el enfriamiento del fluido caliente se utiliza agua que es un recurso natural, una vez que ha sido utilizada esta suele ser desechada, lo que ocasiona la pérdida de materia, energía y daño ambiental. Por ello la importancia de diseñar sistemas de recuperación de calor y reutilización del agua a los procesos a una temperatura requerida para operación. Sumando a esto la reducción del consumo de energía eléctrica al tener un control de velocidad de ventilación, que trabajará según el proceso lo requiera.

1.4 OBJETIVO GENERAL.

Diseñar y analizar el comportamiento de un sistema de control clásico PID vs un sistema de control con lógica difusa aplicado al control de temperatura en una torre de enfriamiento.

1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

1. Analizar la influencia en la temperatura del agua de la torre de enfriamiento al variar la velocidad del ventilador y la apertura de la válvula de circulación de flujo.
2. Modelar el conjunto de la torre de enfriamiento y del intercambiador de calor de la planta de procesos.
3. Diseñar una interfaz gráfica de usuario para monitorear las variables del proceso a controlar.
4. Mantener el circuito de enfriamiento de agua principal en especificaciones de rendimiento a fin de reducir la temperatura de un fluido. Variando la velocidad del ventilador poder además reducir el consumo energético.
5. Diseñar un sistema de control con lógica difusa y control convencional PID, que permita regular la temperatura de un líquido según los requerimientos del proceso ante perturbaciones.
6. Construir un banco de pruebas que permita realizar un análisis comparativo entre el controlador PID y el controlador difuso.

CAPÍTULO II

ESTADO DEL ARTE DE LAS TORRES DE ENFRIAMIENTO

La instrumentación, diseño y simulación de dispositivos de enfriamiento de agua ha constituido a lo largo de las operaciones unitarias un marco de referencia en el estudio, comprensión y aplicación de la fenomenología de los mecanismos de transferencia de masa, energía y cantidad de movimiento [1].

En la industria cada día se emplean más equipos donde se usa agua como medio de enfriamiento, por ser esta relativamente barata y con una gran capacidad de absorber calor. Aun así a ninguna industria le conviene desechar esa agua que se ha calentado, ni tampoco almacenarla esperando a que se enfríe, puesto que provocaría almacenar volúmenes enormes de agua.

Las torres de enfriamiento tienen como objetivo enfriar el agua en un proceso, esto se logra por medios mecánicos para disipar calor del agua proveniente de condensadores, enfriadores, intercambiadores de calor, etc.

2.1 HISTORIA DE LAS TORRES DE ENFRIAMIENTO.

Las torres de enfriamiento se originaron a partir del siglo 19 con el desarrollo de condensadores para las máquinas de vapor. Por el siglo 20, estaban en uso varios métodos de evaporación de reciclaje de agua de refrigeración en áreas que no tenían un suministro de agua adecuado, tal como lugares urbanos. En las zonas de tierra disponible, los sistemas tomaron la forma de estanques de enfriamiento. Las fábricas tomaban agua de un río o lago cercano, lo utilizaba para enfriar algo y lo regresaban, este método era totalmente impráctico porque causaba incrementos de temperatura en los cuerpos de agua cercanos a las fábricas destruyendo el equilibrio ecológico del área.

El siguiente paso fue la invención de lagos artificiales con mecanismos de aspersión del agua de enfriamiento. Al lanzar el agua hacia arriba, se lograba enfriarla por medio de evaporación. Este método aumentó considerablemente la eficiencia del proceso de enfriamiento pero seguía presentado el problema de utilizar extensiones de tierra relativamente grandes y por lo tanto caras.

La creación de la primera torre de enfriamiento solucionó el costo de tener un lago artificial. Al elevar el sistema de aspersión de agua, se permitió que el

agua interactuara con aire por un período más largo de tiempo antes de caer en el depósito de agua fría en el fondo de la torre [2].

Las primeras torres de enfriamiento hiperbólicas fueron construidas en el año 1918 cerca de Heerlen. Sin embargo, estas torres de tiro natural eran muy poco eficientes y necesitaban ser de un gran tamaño.

Actualmente, para mejorar la eficiencia de las torres se introdujeron dos nuevos elementos:

1. Ventiladores eléctricos para incrementar el flujo de aire dentro de la torre.
2. Rellenos interiores para aumentar la superficie expuesta de agua y por ende, la cantidad de evaporación.

La implementación de estos componentes permitió aumentar y maximizar la interacción del agua caliente con el aire que entra a la torre. Durante este contacto extendido del agua con el aire se efectúa el enfriamiento por evaporación. A más área de agua expuesta, mayor tiempo y mejor eficiencia de interacción, logrando más enfriamiento del agua [2].

2.2 TIPOS DE TORRES DE ENFRIAMIENTO.

2.2.1 TORRES DE CIRCULACIÓN NATURAL.

Las torres de circulación natural, se caracterizan porque el flujo de aire a través de la misma se debe a la densidad entre el aire a la entrada y el aire a la salida, lo cual hace que el aire expulsado por la columna se dirija al ambiente, creando el efecto de tiro forzado y en consecuencia eliminando el uso de ventiladores mecánicos [3].

TORRE ATMOSFÉRICA.

Consiste en una cámara rectangular grande con dos paredes de lamas opuestas. El aire atmosférico entra en la torre a través de las rejillas impulsadas por su propia velocidad.

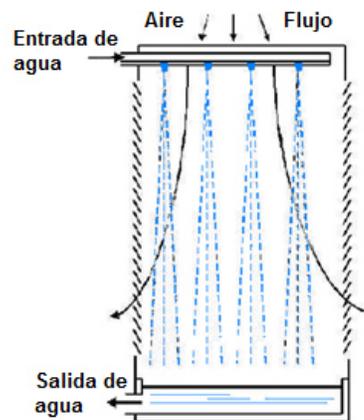


Figura 2.1: Torre de enfriamiento atmosférica.

TORRE DE ENFRIAMIENTO HIPERBÓLICA.

Hace uso de la diferencia de temperatura entre el aire del ambiente y el aire caliente al interior de la torre. Cuando el aire caliente se mueve hacia arriba a través de la torre, el aire fresco se introduce en la torre a través de una entrada de aire en la parte inferior. Debido a la disposición de la torre, no se requiere ventilador y casi no hay circulación de aire caliente que podría afectar al rendimiento.

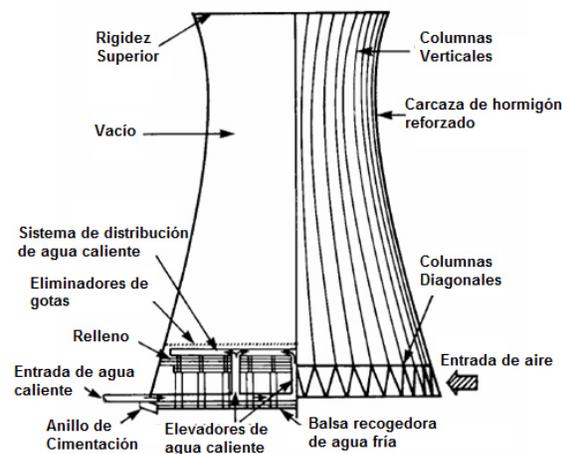


Figura 2.2: *Circulación natural de flujo contador.*

2.2.2 TORRES DE TIRO MECÁNICO.

Las torres de tiro mecánico proporcionan un control total sobre el caudal de aire suministrado, en estas torres se puede controlar de forma precisa la temperatura de agua de salida, debido que el diseño es más

elaborado. Las torres de tiro mecánico pueden variar su diseño y operación de acuerdo a la ubicación del ventilador [4].

TIRO INDUCIDO.

Las torres de tiro inducido descargan aire caliente directo a la atmósfera. El aire puede entrar en una o más paredes de la torre, con lo cual se consigue reducir en gran medida la altura de la entrada de aire [5].

Particularmente, las torres de tiro inducido son de flujo cruzado, por lo que el aire circula en dirección perpendicular respecto al agua que descende, tal como muestra la figura 2.3. El ventilador se encuentra ubicado en la entrada de aire.

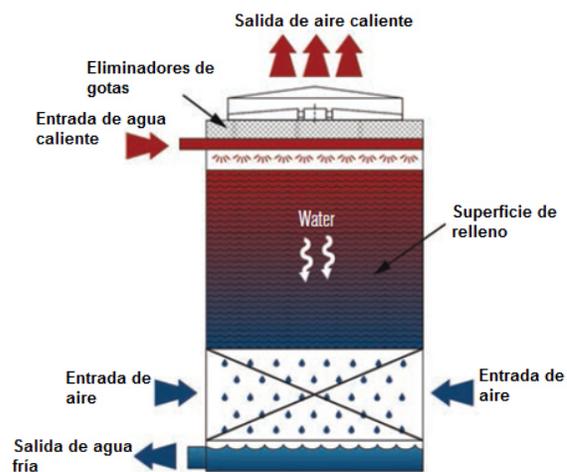


Figura 2.3: Torre de enfriamiento tiro inducido.

TIRO FORZADO.

La torre de tiro forzado manda aire horizontalmente a través del empaque y hacia arriba contra las gotas de agua que caen. El agua que entra es removida por eliminadores de corriente en la parte superior. Estas torres son generalmente de flujo contracorriente [5].

En este tipo de torre, los ventiladores se encuentran instalados en la parte inferior, impulsando el aire hacia adentro de la torre tal como se muestra en la figura 2.4.

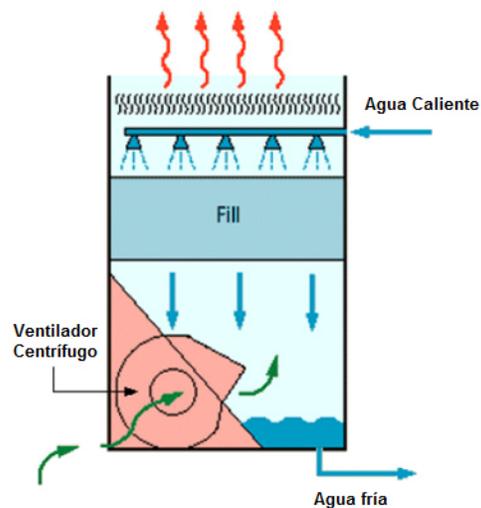


Figura 2.4: Torre de enfriamiento tiro forzado.

2.3 COMPONENTES DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO.

A continuación podemos observar un esquema de una torre de tiro mecánico con sus diferentes partes:

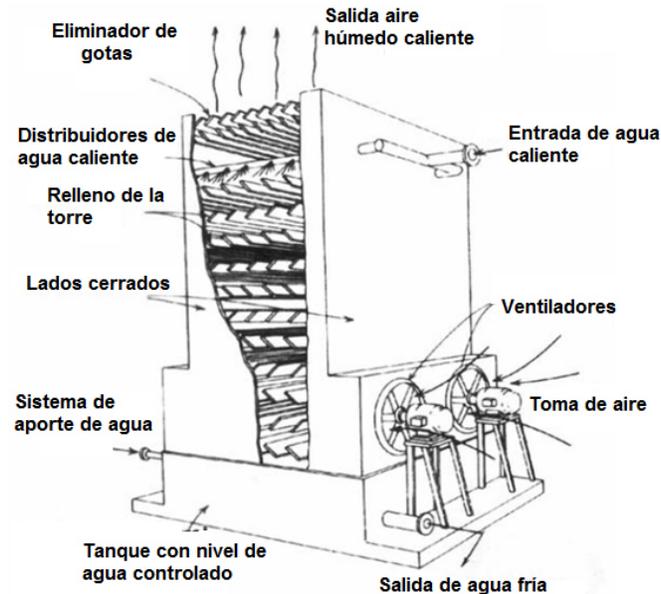


Figura 2.5: Esquema de componentes de una torre de tiro mecánico.

Marco y carcasa: La mayoría de las torres tienen marcos estructurales que soportan los cerramientos exteriores, motores, ventiladores y otros componentes. La carcasa puede ser esencialmente el marco con algunos diseños más pequeños, tales como algunas unidades de fibra de vidrio.

Relleno: El relleno tiene dos funciones principales: primero proporcionar una superficie de contacto lo mayor posible entre el agua y el aire; y segundo aumentar el tiempo de intercambio de calor entre el agua y el aire [6].

Separadores de gotas: La finalidad de los separadores es detener las gotas arrastradas por la corriente del aire a la salida de la torre. Los separadores de gotas reducen las pérdidas de carga, limitan la formación de neblinas y evita daños en el entorno de la torre (sobre todo si es agua salada) [6].

Sistema de distribución de agua: Es un sistema de tuberías y conductos cuya finalidad es repartir uniformemente el agua por encima del relleno. Existen dos métodos de reparto: por gravedad o por presión [6].

Pulverizadores: Su misión es la de dividir lo más fino posible el tamaño de la gota compatible con los arrastres de aire, con el objetivo de aumentar la superficie y repartir homogéneamente el caudal de agua sobre el relleno [6].

Bandeja o balsa: Suelen ser de hormigón y sirven como cimentación de la torre, así como de depósito de agua fría [6].

Sistema de aporte de agua: La evaporación de agua en la torre provoca una disminución del volumen de agua de ésta. Por otro lado, la concentración de sales en el agua se controla con un régimen adecuado de purgas. La evaporación y las purgas hacen que sea necesario el aporte constante de agua [6].

Ventilador: Es el encargado de crear el flujo de aire. El equipo completo se compone de motor, transmisión y aspas. Estos equipos trabajan en condiciones complicadas ya que están en continuo funcionamiento en un ambiente de elevada humedad y temperatura, razón por la cual los motores de la torre deben estar protegidos [6].

Válvulas: Las válvulas se utilizan para controlar y regular el flujo a través de las líneas de agua que sirven a la torre.

2.4 INFLUENCIAS EXTERNAS SOBRE EL FUNCIONAMIENTO DE LA TORRE.

Rango del intercambiador de calor.

El rango en el intercambiador está totalmente determinado por la carga de calor y la tasa de circulación de agua a través del intercambiador y el agua de refrigeración [7].

Restricción del flujo de Aire.

A una determinada carga de calor, un flujo determinado de agua y una temperatura de bulbo húmedo particular, la temperatura del agua fría producida por una torre de enfriamiento es totalmente dependiente de la cantidad de aire de entrada [7].

Viento.

Dependiendo de su velocidad y dirección, tiende a incrementar el potencial de la torre de enfriamiento a la recirculación [7].

Interferencia.

Sumideros de calor ubicados cerca de una torre de enfriamiento pueden “Interferir” con el desempeño térmico de la misma [7].

Carga de calor.

La carga de calor impuesta a una torre de enfriamiento está determinada por el proceso en que trabaja. El grado de enfriamiento requerido es controlado por el nivel de temperatura de funcionamiento deseada del proceso.

Temperatura de bulbo húmedo.

Es un factor de control para la mínima temperatura del agua fría a la cual el agua puede ser enfriada por el método de evaporación. Por lo tanto, la temperatura de bulbo húmedo del aire que entra en la torre de enfriamiento determina los niveles de temperatura de funcionamiento en toda la planta, proceso o sistema.

2.5 BALANCE DE MASA Y ENERGÍA.

Una torre de enfriamiento puede ser considerada como un intercambiador de calor de contacto directo, en el cual el agua y el aire están en régimen pelicular. El uso de un coeficiente de transferencia de calor convectivo para la descripción del proceso de transferencia de energía en este sistema es complicado, ya que no existe un método estándar para calcular exactamente la superficie total de contacto entre el agua y el aire. Adicionalmente, resulta difícil obtener soluciones analíticas rigurosas debido al acoplamiento de transporte de cantidad de movimiento, energía y masa. Es por eso que, comúnmente, se hace necesario la realización de un estudio experimental

acompañado de un análisis adimensional para la determinación del coeficiente de transferencia de masa global del empaque, lo cual permite el diseño de equipos específicos [8].

2.5.1 BALANCES DE MASA.

Los balances de masa se fundamentan en el principio de conservación de la masa: la masa no se crea ni se destruye. Lo anterior se basa en la observación que, para sistemas cerrados y abiertos, la distribución de los materiales puede cambiar entre un instante inicial y uno final debido a cambios físicos o químicos, pero la cantidad total medida en unidades de masa se mantienen antes y después de un proceso.

La ecuación general del balance de masa en procesos físicos viene dada por:

$$\left(\begin{array}{l} \text{Cambio en la cantidad} \\ \text{de masa del sistema.} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{l} \text{Masa total} \\ \text{que entra} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{l} \text{Masa total} \\ \text{que sale} \end{array} \right) \quad (2.1)$$

2.5.2 BALANCE DE ENERGÍA.

La aplicación práctica de la primera ley de la termodinámica está orientada a la utilización más eficiente de la energía, a la evaluación de fuentes energéticas y a contabilizar cuanta de ella se usa en los procesos de producción. Su enunciado más conocido es que la energía no se crea ni se destruye, sólo se transforma.

2.5.3 FUNDAMENTOS TERMODINÁMICOS.

En el interior de la torre se produce un contacto íntimo entre el agua que desciende y aire que asciende. En la caída del agua, se arrastra una capa finísima de aire que desciende [6].

Concretamente, la transmisión de calor entre el agua y el aire, se realiza a través de dos fenómenos:

1. Transmisión de calor por convección.
2. Por absorción del calor latente de vaporización del agua.

Se estima que alrededor del 90% del calor evacuado es debido a la evaporación. A medida que aumenta la superficie de contacto entre aire-agua mejoran estos dos procesos, para aumentar dicha superficie de contacto se utilizan los rellenos.

En la transmisión de calor por convección, se produce un flujo de calor en dirección al aire que rodea el agua, por causa de la diferencia de temperaturas entre ambos fluidos. Al entrar en contacto el aire con el agua se forma una fina película de aire húmedo saturado sobre la lámina de agua que desciende por el relleno. Esto es debido a que la presión parcial de vapor de agua en la película de aire es superior a la del aire húmedo que circula por la torre, produciéndose una cesión de vapor de agua (evaporación). Esta masa de agua evaporada extrae el

calor latente de vaporización del propio líquido. Este calor latente es cedido al aire, obteniéndose el enfriamiento del agua y el aumento de la temperatura del aire. La diferencia entre la temperatura del agua a la salida y la temperatura húmeda del aire se llama acercamiento o aproximación, ya que representa el límite termodinámico de enfriamiento al que puede llegar el agua.

2.6 INTERCAMBIADORES DE CALOR DE PLACAS.

Los intercambiadores de calor de placas están compuestos básicamente por un conjunto de placas estampadas de acero inoxidable, soportadas paralelamente entre cabezales y separadas entre sí por juntas de goma, formando una serie de cámaras, estrechas y alternativamente intercomunicadas por donde circulan a distintas temperaturas los líquidos cuyo intercambio calórico se desea.

Los intercambiadores pueden realizar un solo proceso (calentamiento o enfriamiento), o realizar varios procesos dentro de un solo equipo (calentamiento, recuperación calórica, enfriamiento). En este último caso, el equipo se encuentra separado en zonas de intercambio, divididas por placas de conexiones.

2.6.1 CLASIFICACIÓN DE INTERCAMBIADORES SEGÚN LA DISTRIBUCIÓN DE FLUJO.

Tenemos cuatro tipos de configuraciones de acuerdo a la trayectoria del flujo [9].

En la distribución de flujo en paralelo, los fluidos caliente y frío entran por el mismo extremo del intercambiador, fluyen a través de él en la misma dirección y salen por el otro extremo. La temperatura de los fluidos, se aproximan la una a la otra, es decir que uno disminuye su temperatura y el otro la aumenta tratando de alcanzar el equilibrio térmico entre ellos. Debe quedar claro que el fluido con menor temperatura nunca alcanza la temperatura del fluido más caliente [10].

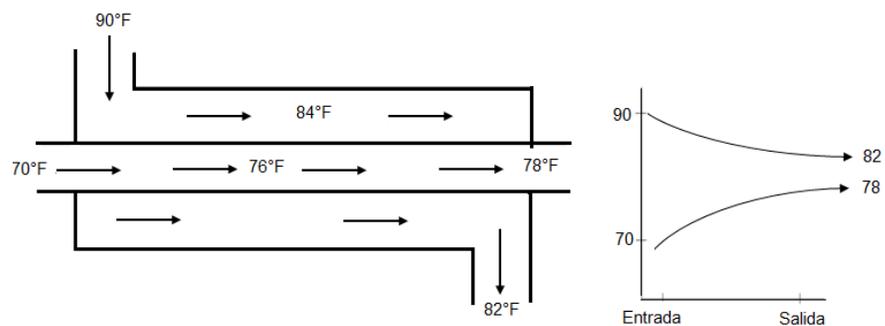


Figura 2.6: Distribución de flujo en paralelo y curva de equilibrio térmico.

En la distribución en contracorriente o contraflujo, los fluidos caliente y frío entran por los extremos opuestos del intercambiador y fluyen en direcciones opuestas. La temperatura del fluido más frío se aproximará a la temperatura del fluido de entrada.

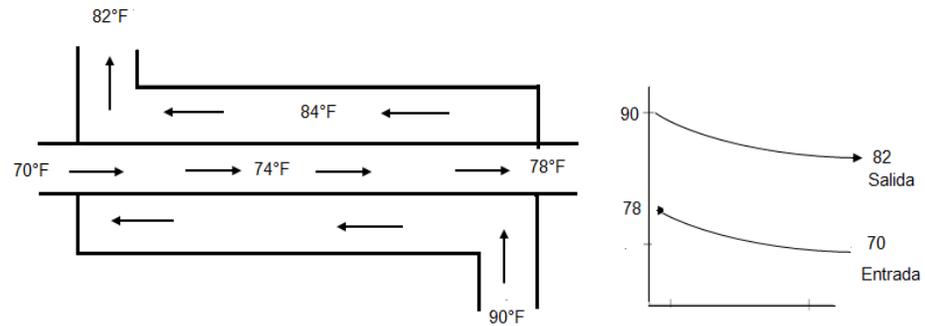


Figura 2.7: Distribución en contraflujo y curva de equilibrio térmico.

En la distribución en flujo cruzado de un solo paso, un fluido se desplaza dentro del intercambiador perpendicularmente a la trayectoria del otro fluido. Uno de los fluidos pasa a través de tubos mientras que el otro pasa alrededor de dichos tubos formando un ángulo de 90°.

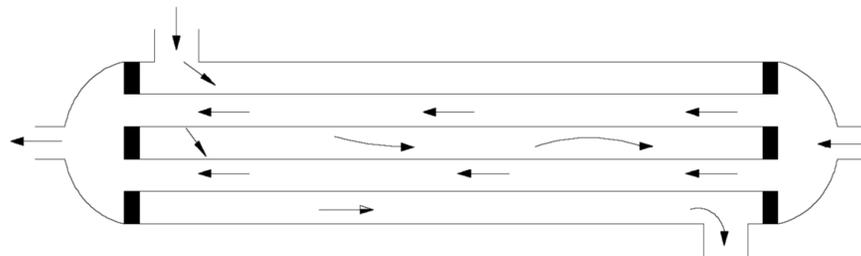


Figura 2.8: Distribución en flujo cruzado de un solo paso.

Cuando los fluidos del intercambiador, intercambian calor más de una vez se denomina intercambiador de múltiple pasos. En la figura 2.9 se muestra un ejemplo de estos intercambiadores. Comúnmente el intercambiador de múltiples pasos invierte el sentido del flujo en los tubos al utilizar dobleces en forma de "U" en los extremos, es decir, el doblez en forma de "U" permite al fluido ir de regreso e incrementar el área de transferencia del intercambiador.

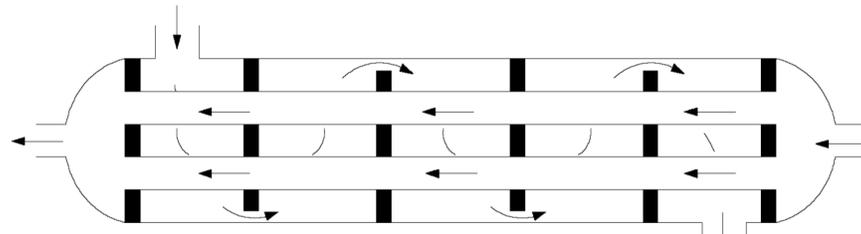


Figura 2.9: Distribución en flujo cruzado de paso múltiple.

2.6.2 CLASIFICACIÓN DE INTERCAMBIADORES SEGÚN SU CONTACTO ENTRE FLUIDOS.

Para la clasificación de los intercambiadores tenemos tres categorías importantes [9]:

1. **Regeneradores:** Los regeneradores son intercambiadores en donde un fluido caliente fluye a través del mismo espacio seguido de uno frío en forma alternada, con tan poca mezcla física como sea posible entre las dos corrientes.
2. **Intercambiadores de tipo abierto:** Son dispositivos en los que las corrientes del fluido de entrada fluyen hacia una cámara abierta y ocurre una mezcla física completa de las corrientes. Las corrientes caliente y fría que entran por separado a este intercambiador salen mezcladas en una sola.
3. **Intercambiadores de tipo cerrado o recuperador:** Los intercambiadores de tipo cerrado son aquellos en los cuales

ocurre transferencia de calor entre dos corrientes fluidas que no se mezclan o que no tienen contacto entre sí.

2.7 ESTADO DEL ARTE DEL CONTROL AUTOMÁTICO.

A largo del tiempo los sistemas de control han ido evolucionando, es por ello que a continuación se presenta una breve reseña de este cambio y su importancia en la automatización:

El control manual: Antes de la década de los 40 la mayoría de plantas de procesos se controlaban manualmente, el operador detectaba una condición no deseada en una variable de proceso y efectuaba ajustes basados en las instrucciones del procesos.

El control manual con instrumentos de medición: Se inician alrededor de los años 40, con dispositivos neumáticos que envían y reciben señales de presión de aire en el rango de 3 a 15 psi.

El control automático centralizado: Todos los controladores fueron colocados en un mismo cuarto como resultado de la creciente complejidad de los lazos de control. Para la década de los 60 la instrumentación electrónica podía sustituir a la neumática.

El control automático local: En la década de los 70 se produce un vuelco total hacia el control de tipo electrónico, con señales analógicas de 4 a 20 mA o 0 a 5V, con esto se eliminó el problema de retraso de transmisión de señales.

El control por computadora: Dio nacimiento al sistema de control distribuido, basado en microprocesadores programables que tiene la capacidad de comunicar varios controladores entre sí a través de una red.

El control automático de procesos es una de las disciplinas que se ha desarrollado a una velocidad vertiginosa, dando las bases a lo que hoy algunos autores llaman la segunda revolución industrial. El estudio y aplicación del control automático ha contribuido al reconocimiento universal de sus ventajas y beneficios asociados al ámbito industrial, que es donde tiene una de sus mayores aplicaciones debido a la necesidad de controlar un gran número de variables, sumado esto a la creciente complejidad de los sistemas [11].

2.8 ESTADO DEL ARTE EN EL MODELADO DE LAS TORRES DE ENFRIAMIENTO.

Muchos trabajos han sido realizados para modelar matemáticamente las torres de enfriamiento en el siglo pasado Walker [12], propuso una teoría básica de la operación de la torre de enfriamiento. Merkel [13] desarrolló la primera teoría práctica que incluye las ecuaciones diferenciales de transferencia de masa y calor.

Webb en su trabajo “Design of Cooling Towers by the Effectiveness-NTU Method”, demostró que la eficiencia y las unidades de difusión en una torre, son consistentes con las usadas en otros intercambiadores de calor. Nimir [14], presentó un modelo que describe el comportamiento de una torre, para el

diseño del modelo tuvo en cuenta el empaque o relleno en la torre. Milosavljevic [15], determinó un modelo en ecuaciones diferenciales ordinarias para describir la transferencia de masa y calor en una torre de enfriamiento mecánica, utilizó los datos experimentales en un equipo piloto para analizar mediante simulación, el comportamiento de la torre con diferentes empaques. Kloppers y Kröger [16], [17], evaluaron el número de Lewis en una torre de enfriamiento y encontraron que la relación disminuye, cuando el aire entra relativamente húmedo y caliente en la torre. También plantearon un modelo matemático en ecuaciones diferenciales ordinarias para determinar la transferencia de masa y energía en una torre de enfriamiento. Fisenko y Brin [18], describen la transferencia de masa y calor en una torre, para ello se acopla un modelo con ecuaciones diferenciales parciales para la temperatura del aire y del agua. Kranc [19], desarrolló un modelo computacional para simulación de la torre de enfriamiento, él tomó en consideración la distribución no uniforme del agua en el empaque, [20].

Zubair [21], investigó las características de rendimiento a través de la torre de enfriamiento a contracorriente, los resultados mostraron que la mayor tasa de transferencia de calor es la evaporación, siendo el 62,5% de la tasa total de transferencia de calor en la parte inferior y alrededor del 90% en la parte superior de la torre. Dado que la evaporación es, con mucho, el factor más eficaz en las torres de enfriamiento, la exactitud de las condiciones predichas

depende directamente de ella. Para este propósito, es muy común incluir el término de evaporación en el modelo de Oesterle [22].

En los últimos años se han desarrollado nuevas herramientas en el modelo de torres de enfriamiento como la de Xiao [23], quien desarrolló un modelo matemático en ecuaciones diferenciales ordinarias, él aplicó el concepto de Red Neuronal Artificial (RNA), proponiéndola como una herramienta de diseño computacional que ayuda a evaluar la temperatura de agua a la salida. Los resultados que predecía la RNA fueron comparados con los obtenidos del modelo matemático y con los datos experimentales. La RNA predijo la temperatura del agua con un margen de error absoluto de 1.31%, y de 9.42%. Ming Gao (2008) aplicó una RNA para predecir el funcionamiento de una torre, la cual mostró un buen comportamiento estadístico, el coeficiente de correlación estaba en el rango de 0.993 - 0.999, [20].

2.9 DESARROLLO EN LA INDUSTRIA DEL CONTROL CON LÓGICA DIFUSA.

La teoría difusa y la aplicación de los sistemas difusos surge para el tratamiento de la incertidumbre del mundo real; los problemas en el mundo real están caracterizados por tener que procesar información con incertidumbre, imprecisión, ambigüedad, vaguedad o información incompleta. La teoría difusa es considerada una nueva tendencia para el tratamiento de la incertidumbre con mucha aplicabilidad en diferentes campos.

La teoría difusa comenzó en los Estados Unidos de Norte América en 1965 por el profesor Lotfi Asker Zadeh, profesor de Ingeniería Eléctrica y Ciencias de la Computación de la Universidad de California en Berkeley. En el artículo publicado por Zadeh se introdujo por primera vez la palabra “fuzzy” en la literatura técnica y describe con la teoría matemática de conjuntos clásicos como se puede trabajar matemáticamente con expresiones imprecisas, tal como lo hace el ser humano. Pero dicha teoría no es tomada en cuenta y se introduce en 1972 en Japón [24].

La lógica difusa no se desarrolló en las universidades, sino en el mercado comercial y saltó por encima de las objeciones científicas occidentales [25]. En la década de los 70 se realizan un gran número de investigaciones en Japón, en la década de los 80 se investiga en Europa y se desarrollan las primeras aplicaciones en Japón y Europa; en esta misma década se conoce la lógica difusa en la sociedad Japonesa convirtiéndose en una moda.

Finalmente, en la década de los 90 vuelve a los Estados Unidos de Norte América desarrollándose grandes investigaciones y aplicaciones. Actualmente en el siglo XXI, prácticamente en todo el mundo se trabaja con la teoría difusa como una rama más de las ciencias aplicadas [24].

CAPÍTULO III

MODELADO DE LAS TORRES DE ENFRIAMIENTO

3.1 MODELO MATEMÁTICO DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO.

El modelo es una representación simplificada de un sistema, elaborada para comprender, predecir y controlar el comportamiento de un sistema.

Los modelos matemáticos son expresiones que describen las relaciones existentes entre las magnitudes que caracterizan un sistema. Pueden ser sistemas de ecuaciones, inecuaciones, expresiones lógico matemático, su resolución puede ser analítica o experimental.

El proceso de modelado analítico se divide en tres grandes etapas:

1. La primera de ellas consiste en la delimitación del modelo en función de los fenómenos que resultan relevantes de acuerdo al problema que se quiere resolver. Esta es una etapa que no puede sistematizarse fácilmente, requiere de intuición y por sobre todo de una vasta experiencia en relación con el sistema a modelar.
2. Una vez delimitados los fenómenos que se consideraron para la construcción del modelo, se pasa a la siguiente etapa, en la cual se realizan las suposiciones bajo las cuales se modela, y por las que se define el rango de validez que distinguen el modelo real del modelo ideal.
3. Finalmente en la tercera etapa se describen las ecuaciones asociadas al fenómeno. En los sistemas físicos, estas relaciones constitutivas tienen su expresión formal en las leyes fundamentales de la física. Matemáticamente la utilidad de estas ecuaciones es describir las relaciones entre las variables de campo cinemática, mecánica, térmica y permitir la formulación en medios continuos.

3.1.1 VARIABLES DEL PROCESO.

Para modelar matemáticamente una torre de enfriamiento es necesario considerar los procesos que intervienen en su operación, estos procesos pueden ser divididos en dos tipos:

- Procesos termodinámicos asociados a la transferencia de calor

- Procesos fluido-dinámicos.

Los primeros se refieren a la transferencia de calor y de masa que ocurren dentro de la torre y el segundo se refiere a los caudales de aire y agua. El proceso de evaporación en una torre de enfriamiento, depende directamente de las condiciones locales (temperatura, humedad), de la geometría y el tipo de flujo [4].

Para el establecimiento de un modelo es necesario identificar las variables del proceso. El sistema a estudiar tiene las siguientes variables:

Variables de interés.

- Temperatura de salida del agua a través de la torre de enfriamiento.
- Temperatura final del producto (Glicerina).

Variables medibles experimentalmente.

- Temperatura del producto a la entrada y salida del intercambiador.
- Flujo de circulación del producto.
- Flujo de circulación del agua a través de la torre de enfriamiento.
- Humedad relativa.
- Temperatura de entrada y salida del agua a la torre de enfriamiento.

Variables manipulables.

- Flujo de circulación del agua a través de la torre de enfriamiento.

- Flujo de circulación del producto.
- Flujo de aire ventilación forzada.

3.1.2 SUPOSICIONES PARA EL MODELADO DINÁMICO DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO.

Para el modelado de la torre de enfriamiento se tomaran en consideración las siguientes hipótesis:

- La transferencia de masa y calor ocurre de forma unidireccional.
- La temperatura del agua es uniforme a lo largo de la torre.
- La temperatura de la interface entre el agua y el aire se supone igual a la temperatura del agua y se considera saturada.
- El área es uniforme para cada sección transversal.
- Es válido el uso de la carta psicrométrica.
- El calor que pierde el agua se debe únicamente a la evaporación con el aire, es decir, no hay transferencia de calor por conducción, por convección ni por radiación.
- La torre es adiabática, es decir no hay pérdidas de calor al ambiente.
- El agua está más caliente que el aire.
- Los calores específicos del agua y aire seco son constantes a lo largo de la columna.
- El calor y coeficientes de transferencia de masa son constantes a lo largo de la columna.

3.1.3 SISTEMA DE ECUACIONES DIFERENCIALES.

Se supone que el aire que entra por el fondo de la torre tiene una humedad H_b y una temperatura T_{Gb} y sale por la parte superior con una humedad H_a y una temperatura T_{Ga} .

El agua entra por la parte superior con una temperatura T_{La} y sale por el fondo con una temperatura T_{Lb} . La velocidad másica del aire es G que es la masa de aire exenta de vapor. Las velocidades másicas del líquido a la entrada y a la salida son L_{La} y L_{Lb} respectivamente. Sea dZ la altura de una pequeña sección de torre situada a una distancia Z del fondo de la torre [26].

Las ecuaciones del modelo relacionan la transferencia de masa y calor en estado estable y son derivadas con respecto a la altura. El sistema de ecuaciones se resuelve con las condiciones de entrada del agua, aire, área de sección transversal (A), altura (Z) y coeficiente de transferencia de masa (K_{Ga}). Las ecuaciones diferenciales que describen el comportamiento de la humedad relativa (Ec. 3.1), flujo de calor sensible (Ec. 3.2), flujo de calor latente (Ec. 3.3), temperatura del aire (Ec. 3.4) y temperatura del agua (Ec. 3.5) dadas en [20] son:

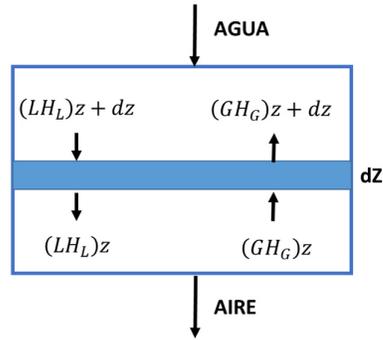


Figura 3.1: Nomenclatura para una torre de enfriamiento.

$$\frac{dY}{dZ} = \frac{h_a A}{C_h G} (Y_s - Y) \quad (3.1)$$

$$\frac{dQ_s}{dZ} = h_a A (T_L - T_G) \quad (3.2)$$

$$\frac{dQ_L}{dZ} = \frac{h_a h_{fg} A}{C_h} (Y_s - Y) \quad (3.3)$$

$$\frac{dT_G}{dZ} = \frac{h_a h_{fg} A}{C_h} (Y_s - Y) \quad (3.4)$$

$$\frac{dT_G}{dZ} = \frac{A \left[h_a (T_L - T_G) + \frac{h_a}{C_h} (Y_s - Y) h_{fg} \right]}{GC_h} - \frac{(h_{fg} + C_V T_G)}{C_h} \frac{dY}{dZ} \quad (3.5)$$

$$\frac{dT_L}{dZ} = \frac{A \left[h_a (T_L - T_G) + \frac{h_a}{C_h} (Y_s - Y) h_{fg} \right]}{C_L L} + \frac{GT_L}{L} \frac{dY}{dZ} \quad (3.6)$$

3.2 CONCEPTOS DE CONTROL EN TORRES DE ENFRIAMIENTO.

El sistema de control de la torre de enfriamiento a ser desarrollado e implementado tiene el propósito de asegurar que el fluido al que se realiza el tratamiento térmico (Glicerina), mantenga la temperatura según el proceso lo requiera, los valores de referencia de temperatura deben estar dentro del rango de operación lineal de la planta.

El diseño del sistema de control de la torre de enfriamiento se realizará utilizando dos estrategias de control, una con PID clásico y otra con control difuso. Por consiguiente se hará una breve introducción teórica de cada uno de ellos.

3.2.1 CONTROLADORES PID.

Los miembros de la familia de controladores PID, incluyen tres acciones: proporcional (P), integral (I) y derivativa (D), [27].

P: acción de control proporcional, da una salida del controlador que es proporcional al error, es decir:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) \quad (3.7)$$

Descrita desde su función transferencia queda:

$$C_p(s) = K_p \quad (3.8)$$

Donde K_p es una ganancia proporcional ajustable. Un controlador proporcional puede controlar cualquier planta estable, pero posee desempeño limitado y error en régimen permanente (off-set).

I: acción de control integral: da una salida del controlador que es proporcional al error acumulado, lo que implica que es un modo de controlar lento.

$$u(t) = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (3.9)$$

$$C_i(s) = \frac{K_i}{s} \quad (3.10)$$

La señal de control $u(t)$ tiene un valor diferente de cero cuando la señal de error $e(t)$ es cero. Por lo que se concluye que dada una referencia constante, o perturbaciones, el error en régimen permanente es cero.

PI: acción de control proporcional-integral, se define mediante:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (3.11)$$

Donde T_i se denomina tiempo integral y es quien ajusta la acción integral. La función de transferencia resulta:

$$C_{pi}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (3.12)$$

Con un control proporcional, es necesario que exista error para tener una acción de control distinta de cero. Con acción integral, un error pequeño positivo siempre nos dará una acción de control creciente y si fuera negativa la señal de control sería decreciente. Este razonamiento sencillo nos muestra que el error en régimen permanente sería siempre cero.

PD: acción de control proporcional-derivativa, se define mediante:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3.13)$$

Donde T_d es una constante denominada tiempo derivativo. Esta acción tiene carácter de previsión, lo que hace más rápida la acción de control, aunque tiene la desventaja importante que amplifica las señales de ruido y puede provocar saturación en el actuador. La acción de control derivativa nunca se utiliza por sí sola debido a que sólo es eficaz durante periodos transitorios. La función de transferencia de un controlador PD resulta:

$$C_{pd}(s) = K_p + sK_p T_d \quad (3.14)$$

PID: acción de control proporcional-integral-derivativa, esta acción combinada reúne las ventajas de cada una de las tres acciones de control individuales. La ecuación de un controlador con esta acción combinada se obtiene mediante:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3.15)$$

Su función transferencia resulta:

$$C_{pid}(s) = K_p + \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (3.16)$$

El principal inconveniente de los controladores PID es que normalmente asume que el proceso presenta un comportamiento lineal. Además como la complejidad de los procesos aumenta, es más difícil elaborar un modelo coherente del proceso.

3.2.2 CONTROL CON LÓGICA DIFUSA.

La incorporación de lógica difusa a los sistemas de control, da lugar a lo que se conoce como sistemas de control con lógica difusa. La lógica difusa incorpora sentencias del lenguaje común, que se caracterizan por ser un tanto indefinidas, para interpretar el estado de las variables de cierto proceso, asignándoles en cada momento un grado de pertenencia a estos conjuntos difusos. Esta interpretación puede ser fácilmente

relacionada mediante operadores lógicos tradicionales con ciertas medidas de acción, también de naturaleza no exacta, que son diseñadas de tal manera que produzcan un cambio deseado en las variables de interés. En resumen se puede diseñar un controlador, que interprete en forma intuitiva (y no numéricamente exacta) el estado de ciertas variables, y en base a ello deduzca en forma lógica una actuación posible que permita llevar la variable al estado deseado [28].

CONJUNTOS BORROSOS.

Los conjuntos borrosos son una extensión de los clásicos, donde se añade una función de pertenencia, definida esta como un número real entre 0 y 1. Así se introduce el concepto de conjunto o subconjunto borroso y se lo asocia a un determinado valor lingüístico definido por una palabra o etiqueta lingüística, donde esta es el nombre del conjunto o subconjunto. Por cada conjunto se define una función de pertenencia o membresía denominada $\mu_A(x)$, indica el grado en que la variable x está incluida en el concepto representado por la etiqueta A ($0 \leq \mu_A(x) \leq 1$), si esta función toma el valor 0 significa que tal valor de x no está incluido en A y si toma el valor 1 el correspondiente valor de x está absolutamente incluido en A . En la Figura 3.2 se puede apreciar un ejemplo donde el conjunto velocidad (con variable x) está subdividido

en 3 subconjuntos {Baja, Meda, Alta}, con sus respectivas funciones de membresía $\{\mu_{Baja}(x) \mu_{Media}(x) \mu_{Alta}(x)\}$

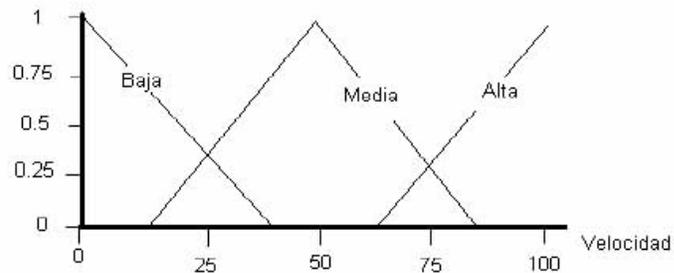


Figura 3.2: Ejemplo de subconjuntos borrosos para el conjunto velocidad.

REGLAS DIFUSAS.

Para realizar razonamiento difuso se utilizan proposiciones condicionales difusas denominadas reglas difusas, de la forma:

SI x es A ENTONCES y es B

Donde el antecedente A es un conjunto difuso definido en X y el consecuente es un conjunto difuso B definido en Y. Además x y y son las variables lingüísticas. A y B son valores lingüísticos determinados por los conjuntos difusos en los universos de discursos de x y y , respectivamente.

La evaluación de una proposición condicional difusa se hace utilizando una relación denominada implicación difusa. Algunos tipos de implicaciones son:

Implicación de Zadeh: $\mu_{Rz}(x, y) = \max[\min(\mu_A(x), u_B(y)), 1 - \mu_A(x)]$

Implicación de Mandani: $\mu_{Ru}(x, y) = \min(\mu_A(x), u_B(y))$

Las proposiciones condicionales difusas determinan las reglas de inferencia de la lógica difusa. Los métodos del razonamiento difuso se clasifican en métodos directos y métodos indirectos, los más populares son los directos.

Método directo de Mandani.

Utiliza reglas de inferencia de la forma:

SI x es A y y es B ENTONCES z es C

Las variables x y y son llamadas variables de las premisas y la variable z es llamada variable de la consecuencia.

Método directo de Takagy Sugeno (Modelamiento difuso).

Utiliza reglas de inferencia de la forma:

SI x es A y y es B ENTONCES $z=ax+by+c$

La variable z de la consecuencia es una función lineal y . Los parámetros de la consecuencia son a , b y c .

3.3 ESTRATEGIA DE CONTROL DIFUSO.

El control difuso se expresa como un control de palabras que interpretan un sentido común, en lugar de números o ecuaciones. Se trata de determinar, de manera lógica que se debe hacer para lograr los objetivos de control a partir de una base de conocimiento y experiencia proporcionada por un operador humano.

El diseño de un regulador difuso contiene la selección de variables de entrada/salida, el establecimiento de funciones de pertenencia y la disposición de la base de reglas. La precisión del sistema depende del número de funciones y cómo se aplican muchas reglas.

En vista de que las variables de los procesos no se miden en sentido común, sino en números, se hace necesario realizar un procesamiento previo antes de introducir el estado de la variable al controlador [29].

3.3.1 PROCESAMIENTO DE UN CONTROLADOR DIFUSO.

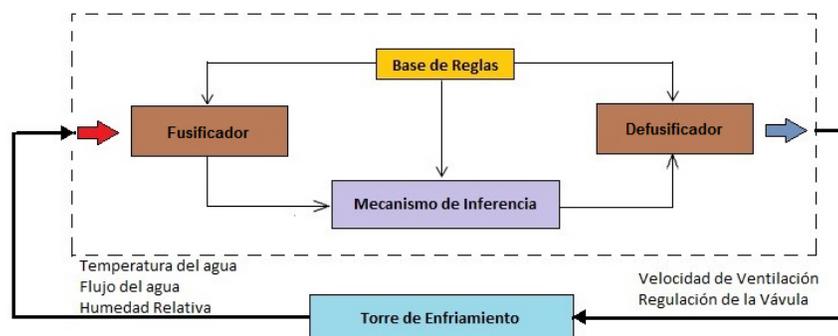


Figura 3.3: Lazo de control difuso.

En un regulador difuso se ejecutan tres pasos de procesamiento: fusificación, inferencia y defusificación.

- **Fusificación.-** Los valores de entrada exactos se transforman en conceptos lingüísticos difusos. Esto sucede con ayuda de modelos matemáticos, las funciones de pertenencia.
- **Inferencia.-** Aquí se enlazarán cantidades difusas y se compararán con los diferentes reguladores. El resultado de la inferencia es una cantidad difusa de salida, una cantidad difusa para la variable de ajuste.
- **Defusificación.-** La cantidad difusa de salida se vuelve a transformar en un valor de salida exacto.

3.3.2 FORTALEZAS DEL CONTROL DIFUSO.

Los sistemas de control convencional PID son expresadas por medio de ecuaciones matemáticas, en cambio los sistemas basados en lógica difusa pueden controlar más adecuadamente procesos que estén gobernados por reglas intuitivas que difícilmente pueden expresarse por medio de modelos matemáticos complejos, debido a que el controlador no necesita explícitamente el modelo del proceso a controlar.

Los sistemas de control difuso proveen una eficiente y efectiva metodología para desarrollar en forma experimental un controlador no

lineal, sin usar matemática avanzada. Hacer un controlador difuso requiere de una descripción lingüística de la ley de control, tal descripción es capturada por los conjuntos difusos, los operadores difusos, y las reglas difusas.

Se cuenta con la manipulación de varias variables del controlador, como son los conjuntos difusos, factores de escalamiento, etc., junto con simulaciones y el método de prueba y error. Se puede desarrollar un controlador no lineal con buenas prestaciones, esta es una ventaja importante desde el punto de vista industrial.

3.3.3 SOFTWARE A UTILIZAR.

Labview: (Abreviación de Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench) es una plataforma de desarrollo de software propiedad de National Instruments basada en un lenguaje de programación gráfico, conocido como Lenguaje G. Aunque pretende ser de propósito general, la plataforma Labview es utilizada principalmente para adquisición de datos, control de instrumentación y automatización, tanto a nivel académico y de investigación como industrial.

Existen módulos para un sinnúmero de aplicaciones, tales como Control Industrial (Control Design and Simulation Module, Datalogging and Supervisory Control Module), Robótica y Procesamiento de Imágenes

(Robotics Module, Vision Development Module), Electrónica (FPGA Module, Embedded System Design) y otros.

Matlab: (Abreviatura de MATrix LABoratory), el cual es un software que ofrece un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje de programación propio. Entre sus prestaciones básicas se hallan la manipulación de matrices, representación de datos y funciones, implementación de algoritmos, adquisición de datos, gráficas en tiempo real, creación de interfaces gráficas, programación mediante bloques en simulink, así como la comunicación con dispositivos hardware e incluso con otros programas.

3.4 CONCEPTOS DE SENSADO.

En todos los procesos industriales es absolutamente necesario controlar y mantener constantes algunas magnitudes tales como caudal, nivel, temperatura, presión, etc. Los instrumentos de medición y control permiten mantener dichas variables ya sea en un valor fijo o un valor que varíe con el tiempo de acuerdo con una relación predeterminada.

3.4.1 ELEMENTOS DE MEDICIÓN Y TRANSMISIÓN.

Son los dispositivos que se encargan de transformar la variable de ingeniería (temperatura, por ejemplo) en una señal mecánica, eléctrica,

etc. que puede ser usada por otros instrumentos (indicadores, controladores, registradores, etc.). Estos dispositivos tienen dos partes:

- **Elemento primario:** es el que capta la variable a medir y produce cambios en propiedades físicas que luego puede transformarse en una señal.
- **Elemento secundario:** capta la señal elaborada por el elemento primario y la transforma en una salida (indicación por ejemplo) o genera una señal estandarizada que puede ser captada por otro instrumento en forma local o remota.

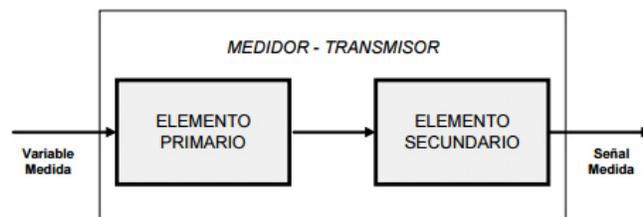


Figura 3.4: Elementos de medición y transmisión.

3.4.2 SENSADO DE TEMPERATURA.

En la actualidad hay muchas formas de medir la temperatura con todo tipo de sensores de diversas naturalezas. La ingeniería de control de procesos ha inventado, perfeccionado e innovado a la hora de disponer de sensores que les ayuden a controlar los cambios de temperatura en procesos industriales. A continuación se presentan los diferentes tipos de sensores de temperatura.



Figura 3.5: *Sensores de temperatura.*

Termocupla: La f.e.m. inducida en dos alambres de distintos metales o aleaciones depende en forma directa de la diferencia de temperaturas entre los dos extremos soldados (juntas).

Termoresistencias: Se infiere la temperatura a partir de la variación en la resistencia eléctrica de un metal, generalmente platino, cobre o níquel.

Termistores: Similar al anterior, pero de un semiconductor. La resistencia tiene relación inversa con la temperatura.

Sistemas de dilatación: Son elementos que aprovechan la capacidad de los fluidos (líquidos y gases) de dilatarse con la temperatura. Generalmente se asocian a transmisores neumáticos.

Bimetálicos: Consisten en dos piezas de aleaciones de distinto coeficiente de dilatación térmica que producen cambios de forma por efecto de la temperatura.

Pirómetros ópticos, de radiación total y de relación: Sistema que mide la temperatura basándose en la radiación que emite la superficie cuya temperatura es sensada. El elemento sensible no está en contacto con el cuerpo sobre el que se practica la medición.

3.4.3 SENSADO DE CAUDAL.

Esta es una variable muy importante ya que su conocimiento es indispensable en los balances de materia y energía. Algunos de los elementos primarios más empleados son los siguientes:



Figura 3.6: Sensores de caudal KEYENCE.

Placa Orificio: Consiste en dos elementos básicos, una placa orificio y un transmisor de presión diferencial. La placa orificio es una placa delgada con un orificio perforado que actúa como restricción en la corriente de flujo.

Caudalímetro Magnético: Su funcionamiento se basa en la Ley de Faraday de inducción magnética. Los caudalímetros magnéticos generan un campo perpendicular a la corriente de flujo y miden la

tensión producida por el fluido que pasa a través del instrumento. La tensión producida es proporcional a la velocidad media del fluido.

Caudalímetro a turbina: Mide caudal de líquidos claros mediante la detección de la rotación de un alabe de turbina colocada en la corriente de flujo. El fluido que circula sobre los álabes del rotor lo hace girar y la velocidad rotacional es proporcional al caudal volumétrico.

Medidor de engranajes: Consiste de dos ruedas maquinadas y una cavidad de medición. El paso del fluido a través del medidor hace girar las ruedas ovaladas; cada rotación de las ruedas corresponde al paso de una cantidad conocida de fluido a través del medidor.

3.4.4 SENSADO DE HUMEDAD.

La humedad es un fenómeno natural, que se presenta a nivel molecular y se encuentra básicamente relacionada con la cantidad de moléculas de agua presentes en una determinada sustancia, la cual puede estar en estado sólido o gaseoso.

Las mediciones de humedad relativa pueden ser hechas por sensores basados en: psicometría, deformación, resistivos, capacitivos y algunos otros tipos para aplicaciones más específicas.

3.5 ADQUISICIÓN DE DATOS.

La adquisición de datos (DAQ) es el proceso de medir con una PC un fenómeno eléctrico o físico como voltaje, corriente, temperatura, presión o sonido. Un sistema DAQ consiste de sensores, hardware de medidas DAQ y una PC con software programable. Comparados con los sistemas de medidas tradicionales, los sistemas DAQ basados en PC aprovechan la potencia del procesamiento, la productividad, la visualización y las habilidades de conectividad de las PCs estándares en la industria proporcionando una solución de medidas más potente, flexible y rentable.



Figura 3.7: Partes de un sistema DAQ.

El hardware DAQ actúa como la interfaz entre una PC y las señales del mundo exterior. Funciona principalmente como un dispositivo que digitaliza señales analógicas entrantes para que una PC pueda interpretarlas. Los tres componentes claves de un dispositivo DAQ usado para medir una señal son: el circuito de acondicionamiento de señales, convertidor analógico-digital (ADC) y un bus de PC.

3.5.1 COMPONENTES DE MEDIDAS PARA UN SISTEMA DAQ.

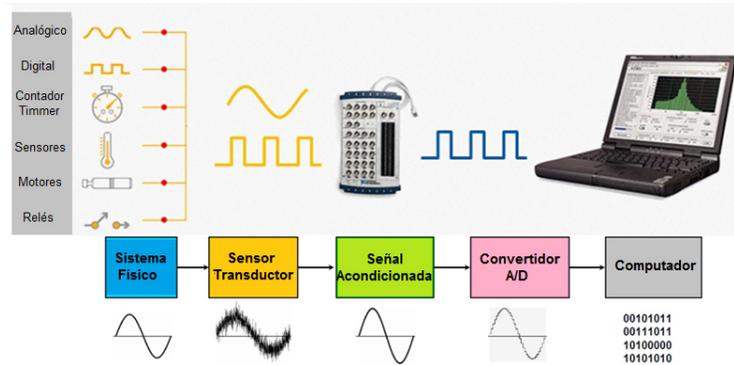


Figura 3.8: Componentes de medidas DAQ.

Acondicionamiento de Señales.

Las señales de los sensores o del mundo exterior pueden ser ruidosas o demasiado peligrosas para medirse directamente. El circuito de acondicionamiento de señales manipula una señal de tal forma que es apropiado para la entrada a un ADC. Este circuito puede incluir amplificación, atenuación, filtrado y aislamiento.

Convertidor Analógico Digital (ADC).

Las señales analógicas de los sensores deben ser convertidas en digitales antes de ser manipuladas por el equipo digital como una PC. Un ADC es un chip que proporciona una representación digital de una señal analógica en un instante de tiempo.

Bus de la PC.

Los dispositivos DAQ se conectan a una PC a través de una ranura o puerto. El bus de la PC sirve como la interfaz de comunicación entre el dispositivo DAQ y la PC para pasar instrucciones y datos medidos.

3.5.2 TARJETAS DE ADQUISICIÓN DE DATOS.

El último paso en un sistema de adquisición de datos son las tarjetas de adquisición de datos, estas tarjetas se encargan de:

- Las conversiones de señales desde analógica a digital.
- La comunicación con el ordenador.



Figura 3.9: Tarjetas de adquisición de datos NI Compact DAQ.

Como características más relevantes de una tarjeta de adquisición de datos están:

- **Número de canales analógicos:** Nos indica la cantidad de magnitudes distintas que podemos adquirir con la misma tarjeta.

- **Velocidad de muestreo:** La velocidad de muestreo debe ser siempre mayor que el doble de la frecuencia de la señal que queremos muestrear.
- **Resolución:** Viene dada por el número de bits del ADC que se utilizan para representar cada muestra.
- **Rango de entrada:** Indica los márgenes entre los que debe estar la señal de entrada para que pueda ser convertida.

3.6 BREVE DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA.

La planta de procesos en la cual se realizará el diseño y estudio de controladores de temperatura consta de las siguientes etapas.

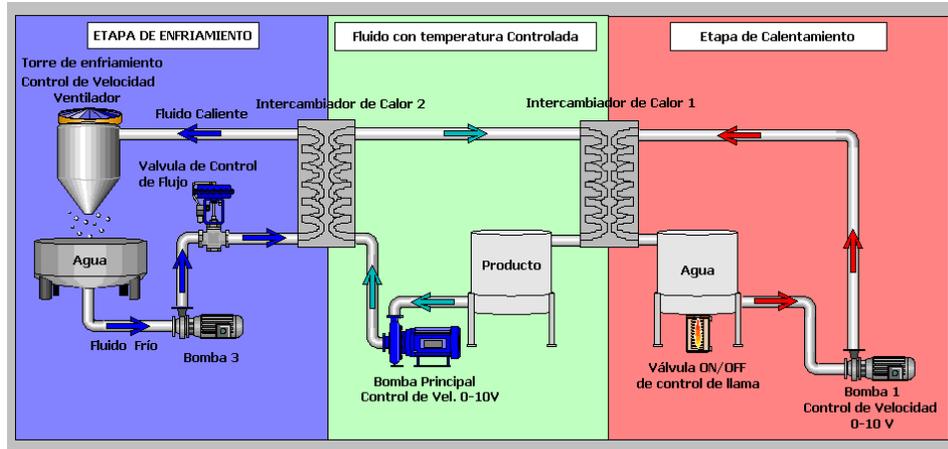


Figura 3.10: Etapas de la planta de procesos.

La primera etapa tiene un tanque con agua que es calentada con gas por medio de dos electroválvulas, una es la llama piloto y la otra es la llama de trabajo accionada por un controlador de temperatura. El fluido caliente

recircula por el circuito mediante las bombas 1 y 2 que son configuradas en serie o paralelo según la apertura de 3 válvulas.

El producto con temperatura controlada (Glicerina) se encuentra en el tanque 2 y es recirculado por la bomba 3. Como se muestra en la figura 3.10, el intercambiador de calor 1 sirve para calentar el producto y el intercambiador 2 sirve para enfriar el producto.

Para la etapa de enfriamiento el fluido frío (Etilenglicol) es recirculado por la bomba 4, el flujo se regula con la válvula de control y es enfriado por un prototipo de una torre de enfriamiento de tiro inducido.

3.7 DIMENSIONAMIENTO DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO.

Las características de la torre de torre de enfriamiento de la planta de procesos son las siguientes:

- Marco de la torre: 2m de alto x 0.3m de ancho.
- Tanque de depósito de agua fría: 0.3 m de alto x 0.7 m de ancho x 0.7m de largo.
- El flujo de agua a través de la torre de enfriamiento es $\dot{v} = 32$ lit/min.
- Temperatura de entrada y salida del agua; $T_{ent w} = 60^{\circ}C$ y $T_{sal w} = 50^{\circ}C$
- La densidad del agua a $60^{\circ}C$ es $\rho_w = 983.2 \text{ kg/m}^3$
- La densidad del aire a $25^{\circ}C$ es $\rho_a = 1.2 \text{ kg/m}^3$

- El calor específico del agua a 60°C es $c_{pw} = 4.183 \frac{KJ}{kg K}$
- Temperatura de entrada y salida del aire; $T_{ent a} = 27^\circ C$ y $T_{sal a} = 35^\circ C$
- El calor específico del aire a 25°C es $c_{pa} = 1.01 \frac{KJ}{kg K}$

El flujo másico de agua en la torre de enfriamiento se calcula con la siguiente ecuación:

$$q_w = \rho_w \cdot v \quad (3.17)$$

Que al evaluar se obtiene:

$$q_w = 983.2 \frac{kg}{m^3} * 1.92 \frac{m^3}{h} * \frac{1}{3600} \frac{h}{s} \quad (3.18)$$

$$q_w = 0.524 \frac{kg}{s} \quad (3.19)$$

Cuando el agua es enfriada en estos rangos cede una cantidad de calor dada por la siguiente expresión:

$$Q_w = C_{pw} * q_w * (T_{sal_w} - T_{ent_w}) \quad (3.20)$$

Sustituyendo los datos conocidos tendremos:

$$Q_w = 4.183 \frac{KJ}{kgK} * 0.524 \frac{kg}{s} * (50 - 60)K \quad (3.21)$$

$$Q_w = 21.918 \frac{KJ}{s} \quad (3.22)$$

Este resultado es la cantidad de calor que cede el agua para disminuir la temperatura desde 60°C hasta 50°C.

En una transferencia ideal el aire debe absorber esta cantidad de calor. Cuando el aire se emplea para absorber una cantidad de calor se emplea la ecuación de transferencia de calor que se usó para el agua, pero considerando el calor específico del aire según la temperatura y la diferencia de temperatura del aire de entrada y el aire de salida, entonces se obtiene:

$$Q_a = C_{pa} * q_a * (T_{sal_a} - T_{ent_a}) \quad (3.23)$$

Como es de interés el flujo de aire requerido para absorber la cantidad de calor que cede el agua se despeja la ecuación de la siguiente forma:

$$q_a = \frac{Q_a}{C_{pa} * (T_{sal_a} - T_{ent_a})} \quad (3.24)$$

Sustituyendo los valores de las variables de la ecuación se tiene el flujo másico de aire a través de la torre de enfriamiento:

$$q_a = \frac{21.918 \frac{KJ}{s}}{1.01 \frac{KJ}{kgK} * (35 - 27)K} = 2.712 \frac{kg}{s} \quad (3.25)$$

Cabe recalcar que el flujo másico del aire depende de la temperatura de entrada del aire, que es función de la temperatura ambiente. Por lo tanto si hubiera cambios de estación que provoque diferentes valores de temperatura ambiente se puede calcular la potencia de ventilación que requiere la torre de enfriamiento. Mientras menor sea la temperatura ambiente, menor será el consumo de potencia.

Conociendo la densidad del aire y con la ecuación 3.25 se puede obtener el flujo de aire que debe circular a través de la torre de enfriamiento para disminuir la temperatura del agua de 60°C a 50°C, con las condiciones de temperatura del aire previamente establecidas.

$$\dot{v}_{vent} = \frac{q_a}{\rho_a} = \frac{2.712 \frac{kg}{s}}{1.2 \frac{kg}{m^3}} = 2.26 \frac{m^3}{s} \quad (3.26)$$

CAPITULO IV

BOSQUEJO DE LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA

En la planta de procesos de tratamiento térmico se pretende mantener controlada la temperatura de un fluido que será Glicerina. Este estudio desde el punto de vista práctico se asemeja a los procesos productivos como por ejemplo la pasteurización, donde se requiere que el producto una vez que ha pasado la etapa de calentamiento, se enfríe hasta una temperatura que el proceso requiera, por ello la necesidad de implementar un sistema de control que permita lograr dicho requerimiento. El control de la temperatura es la parte principal del proceso de pasteurización ya que de ello depende la calidad final del producto y el ahorro económico evitando el desperdicio.

La planta de procesos de tratamiento térmico en la etapa de enfriamiento tiene un intercambiador de calor y un prototipo de una torre de enfriamiento. Los actuadores de la torre de enfriamiento que permitirán controlar la temperatura son la válvula reguladora de flujo y el ventilador. Se realizará un análisis mediante experimentos del aporte de enfriamiento de cada actuador y el comportamiento de las variables del proceso. Luego de esto se encontrará un punto de operación donde el sistema sea lineal, para poder diseñar el sistema de control PID. El controlador PID será diseñado con la ayuda de una función de transferencia que será encontrada mediante técnicas de identificación de sistemas. Una vez ajustado el PID se procederá a diseñar el sistema de control con lógica difusa donde se requiere un amplio conocimiento del sistema. Finalmente se realizará un estudio comparativo de ambos controladores.

4.1 CARACTERÍSTICAS DE LA PLANTA.

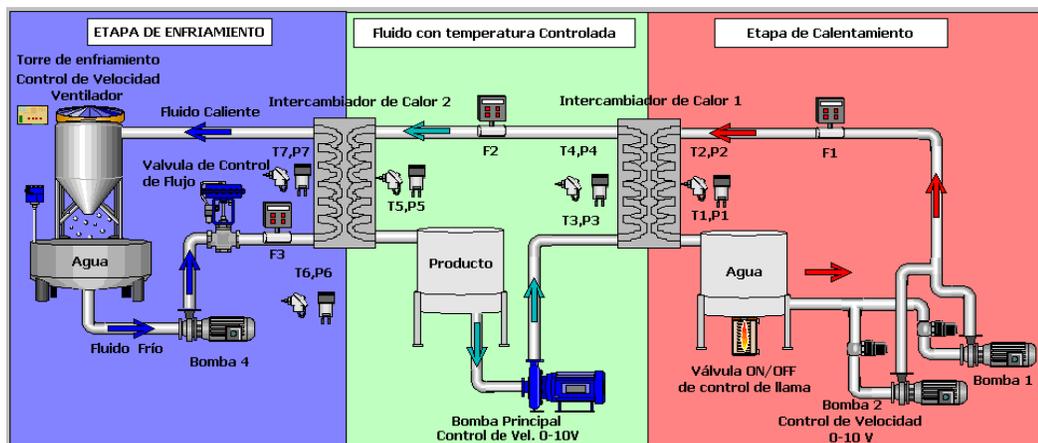


Figura 4.1: Planta de tratamiento térmico.

La planta de tratamiento térmico consta de:

- 7 Sensores de temperatura RTD, Pt100 y transmisores en el rango de entrada (-50 a 150 °C) y salida (4-20mA).
- 4 Sensores de presión y transmisores en el rango de entrada de (0-10bar) y salida (4-20mA).
- 2 Intercambiadores de calor de placas, uno para la etapa de calentamiento y otro para la etapa de enfriamiento, figura 4.6.
- 3 Tanques con recubrimiento térmico, el primero para el fluido caliente, el segundo para el fluido con temperatura controlada y el tercero contiene el agua que circula por la torre de enfriamiento.
- 3 Sensores de flujo Keyence FM-D, en el rango de medición de 0-200 lit/min y con salida analógica de (4-20mA) para cada uno de los fluidos.
- 1 Válvula reguladora de flujo que circula a través de la torre de enfriamiento con apertura de (0-100%) y flujo correspondiente de (0-82 lit/min), dependiendo del voltaje de control (0-10V) y 1 transformador de 110/24Vac que alimenta la tarjeta de fuerza de la válvula.
- 1 Sensor de humedad relativa HM1500LF ubicado en la cercanía de la parte superior de la torre de enfriamiento con señal analógica de (0-5V) y rango de medición de 0-100% de humedad relativa.
- Bombas 1 y 2, permiten circulan el fluido caliente y son accionadas mediante variadores de frecuencia VFD-L y Altivar respectivamente, figura 4.3. Los variadores son comandados por una misma señal de

controlador (0-10V) que regula la frecuencia entre (0-60Hz). Los datos de placa las bombas Weq son: Potencia->0.55kw, Voltaje->220 3 Φ , Velocidad->3450 rpm, Corriente->2.7 Amp.

- Bomba 3, permite circular el fluido con temperatura controlada y es accionada mediante un variador IG5A con una señal de control de (0-10V) que permite regular la frecuencia de (0-60Hz). Los datos de placa del motor ABB son: Potencia->3.6kw, Voltaje->220 3 Φ , Velocidad->3420 rpm, Corriente->6 Amp.
- Bomba 4, figura 4.5, permite circular el fluido a través de la torre de enfriamiento y es accionada en modo manual o automático on/off. Los datos de placa de la bomba marca Rong Long son: Potencia->0.75kw, Voltaje->110 1 Φ , Velocidad->3450 rpm, Q.max->105 lit/min.
- Ventilador de la torre de enfriamiento de 12Vdc, 6.6 Amp y velocidad nominal de 2250 rpm, 1730 CFM, el ventilador trabaja con control de velocidad PWM, mediante una tarjeta electrónica.
- 2 Tarjetas DAQ USB 6009 de National Instruments.
- Tarjeta electrónica 1, para aislar las señales de entrada analógicas y convertir de (4-20mA) a (0.964 – 4.82V), figura 4.8.
- Tarjeta electrónica 2, para proteger las salidas analógicas de la DAQ con seguidores de voltaje y amplificadores de (0-5V) a (0-10V), figura 4.8.

- Tarjeta electrónica 3 para acondicionar las señales digitales debido a que las DAQ tienen un voltaje de salida máximo de 5Vdc y los relés y contactores se accionan con 24Vdc, figura 4.8.
- Elementos de protección contra sobrecorrientes como breakers, fusibles, contactores, guardamotores, figura 4.3.
- 3 Paneles eléctricos, uno es para fuerza, figura 4.3 y los otros dos son de los elementos de control e instrumentación figura 4.4.
- 3 Válvulas neumáticas y 3 válvulas electro-neumáticas para configurar el paso del fluido caliente en serie o paralelo.
- 1 Controlador de relés programado Logo de Siemens.
- 1 Válvula de gas para la llama piloto y 1 válvula gas para la llama de trabajo cuyo accionamiento es controlada por un relé programado de acuerdo al set point de temperatura del fluido caliente que se desea.
- Selectores, pulsadores y paro de emergencia.
- 7 Displays de temperatura y 4 manómetros.
- 1 Fuente de voltaje con tres salidas 5V, 12V y 24V para la parte de instrumentación, figura 4.4.
- 1 Fuente de voltaje de 12V para el ventilador de la torre de enfriamiento.
- 1 Fuente de voltaje de 24V para el Logo, relés de manual/automático y válvulas, figura 4.3.



Figura 4.2: Esquema de la planta de tratamiento térmico.



Figura 4.3: Panel de fuerza accionamiento de las bombas y centro de carga de 220V.



Figura 4.4: Panel de control alimentación de sensores y tarjetas de adquisición de datos.



Figura 4.5: Bomba y válvula reguladora de flujo a través de la torre de enfriamiento.



Figura 4.6: Intercambiador de calor etapa de enfriamiento, displays de temperatura y manómetros.



Figura 4.7: Torre de enfriamiento, ventilador y tanque de agua a enfriar.

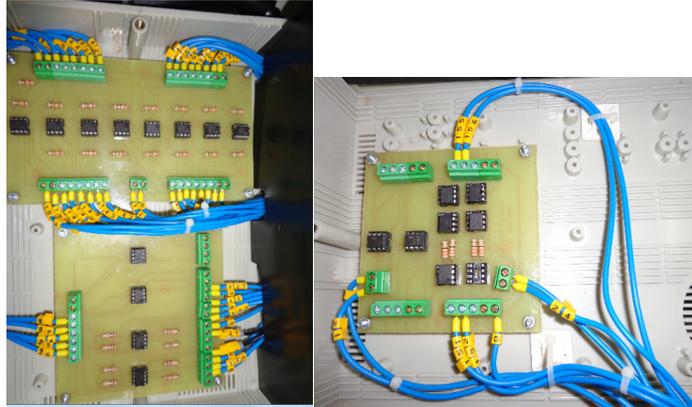


Figura 4.8: Tarjetas electrónicas de acondicionamiento de señal para las tarjetas DAQ USB 6009.

Cabe resaltar que la planta de tratamiento térmico de líquidos puede trabajar en modo manual, para ello se cambia la referencia de velocidad de los variadores de frecuencia y se accionan mediante los selectores del panel de control. La válvula reguladora de flujo se la deja en manual abriéndola completamente, la bomba 4 y el ventilador de la torre de enfriamiento se accionan con sus respectivos selectores en modo manual.

4.2 SISTEMA DE MEDICIÓN Y ADQUISICIÓN DE DATOS.

La tarjeta DAQ-USB 6009 brinda funcionalidad para aplicaciones como registro de datos simple, medidas portátiles y experimentos académicos de laboratorio. Las ventajas que tiene la tarjeta son: que es accesible para uso de estudiantes y para aplicaciones de medida más sofisticadas.



Figura 4.9: Tarjeta DAQ USB-6009 de National Instruments.

Las características de la tarjeta USB-6009 son:

- 8 Entradas analógicas en conexión simple (RSE, 14 bits, 48 kS/s) con un rango de medición de $\pm 10V$.
- 12 Entradas/salidas digitales programables.
- Protección de sobrecarga de hasta $\pm 35V$.
- 2 Salidas analógicas (12 bits 150kS/s) en el rango de 0 a +5V.
- Compatible con Labview y Matlab.
- Máxima corriente de salida de 5 mA.
- USB 2.0 a máxima velocidad de 12Mb/s.

La asignación de entradas y salidas, tanto analógicas como digitales es como se indica a continuación:

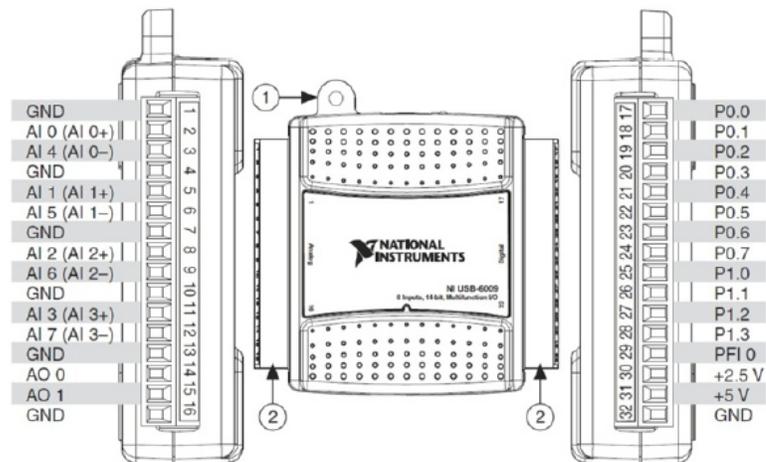


Figura 4.10: Asignaciones de canales Tarjeta DAQ USB-6009.

Las conexiones físicas a las tarjetas DAQ se han asignado de la siguiente manera:

| DAQ 1 USB-6009 | |
|---|--|
| Entradas Analógicas (Conexión modo referencial RSE) | |
| Canal | Variable sensada |
| AI0 | Temperatura T1, Intercambiador 1 |
| AI1 | Temperatura T2, Intercambiador 1 |
| AI2 | Temperatura T3, Intercambiador 1 |
| AI3 | Temperatura T4, Intercambiador 1 |
| AI4 | Temperatura T5, Intercambiador 2 |
| AI5 | Temperatura T6, Intercambiador 2 |
| AI6 | Temperatura T7, Intercambiador 2 |
| AI7 | Presión P1, Intercambiador 1 |
| Salidas Analógicas | |
| Canal | Actuador |
| AO0 | Frecuencia variador VFD-L y Altivar 11 |
| AO1 | Frecuencia variador IG5A |

Tabla 4.1: Asignación de Entradas/Salidas DAQ 1 USB 6009.

| DAQ 2 USB-6009 | |
|--|--|
| Entradas Analógicas (Conexión modo referencial RSE) | |
| Canal | Variable sensada |
| AI0 | Presión P2, Intercambiador 1 |
| AI1 | Presión P3, Intercambiador 1 |
| AI2 | Presión P4, Intercambiador 1 |
| AI3 | Presión P5, Intercambiador 2 |
| AI4 | Presión P6, Intercambiador 2 |
| AI5 | Flujo F3, Fluido con temperatura controlada |
| AI6 | Flujo F1, Fluido caliente |
| AI7 | Flujo F2, Fluido frio |
| Salidas Analógicas | |
| Canal | Actuador |
| AO0 | Válvula reguladora de la torre de enfriamiento |
| AO1 | Control PWM del ventilador |
| Salidas Digitales | |
| Canal | Actuador |
| P0,0 | Accionamiento on/off Bomba 4 |

Tabla 4.2: Asignación de Entradas/Salidas DAQ 2 USB 6009.

4.3 VARIABLES A CONTROLAR Y MANIPULAR.

Con el propósito de mantener controlada la temperatura del producto a realizar el tratamiento térmico que es la Glicerina, se manipularán los siguientes actuadores de la torre de enfriamiento: Una válvula reguladora de flujo y la velocidad del ventilador que extrae el calor por convección del agua caliente.

4.3.1 VÁLVULA REGULADORA DE FLUJO.

Para el control del flujo del agua que circula en la torre de enfriamiento se utiliza una válvula moduladora con actuador magnético modelo SIEMENS M2H50FYN. El actuador está equipado con conexión electrónica para el control de posicionamiento.

El corto tiempo de posicionamiento $<1\text{seg}$, la alta resolución y rango la hacen ideal para el control proporcional.



Figura 4.11: Válvula de control de flujo SIEMENS M2H50FYN.

El actuador de la válvula es de membrana con retención de muelle y se energiza con 24vac, para obtener este voltaje se utiliza un transformador de 110/24Vac con corriente nominal de 3 Amp. El control de posicionamiento se lo realiza por medio de una señal analógica de 0 a 10 V, como se muestra en la figura 4.12 la relación entre el voltaje de control y la apertura de la válvula es lineal.

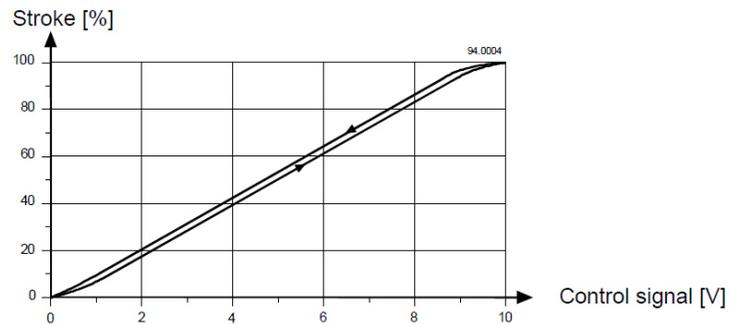


Figura 4.12: Relación entre la apertura de la válvula y el voltaje de control.

Para determinar la relación entre la apertura de la válvula y el flujo, se tomaron datos en la planta de los cuales obtuvimos que:

- Con apertura de 0% el flujo es de 0 lit/min.
- Con apertura de 100% el flujo es de 89 lit/min.
- Para una apertura entre 10% y 40% la pendiente de cambio de flujo es mayor que la pendiente cuando la apertura está entre 40% y 70%.
- Con apertura entre 70% y 100% la variación de flujo es pequeña, se podría considerar como constante.

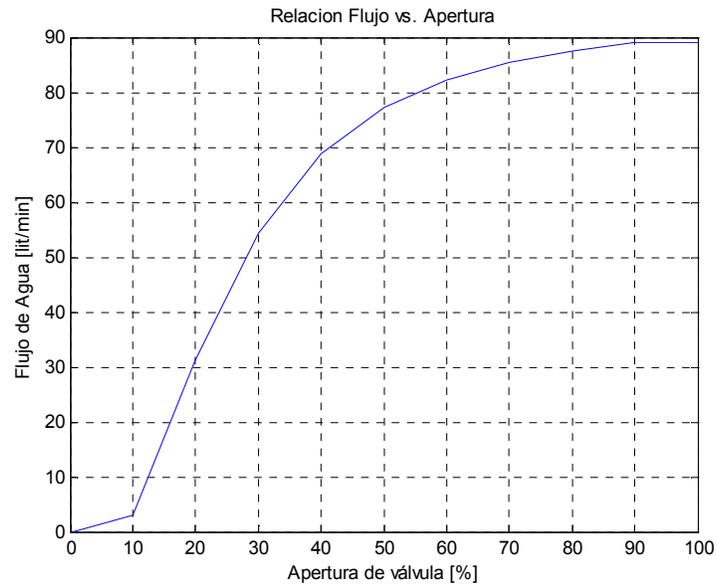


Figura 4.13: Relación entre el flujo y la apertura de la válvula.

4.3.2 CONTROL DE VELOCIDAD PWM.

Otra de las variables a manipular en la torre de enfriamiento es la cantidad de calor por convección que se extrae del agua caliente, para ello se utiliza un control de velocidad PWM en el ventilador ubicado en la parte superior de la torre.

En el control PWM (Pulse Width Modulation) los parámetros fundamentales son la frecuencia y el ciclo de trabajo k , el mismo que indica el tiempo en el que una onda cuadrada o rectangular tiene un valor alto respecto al periodo.

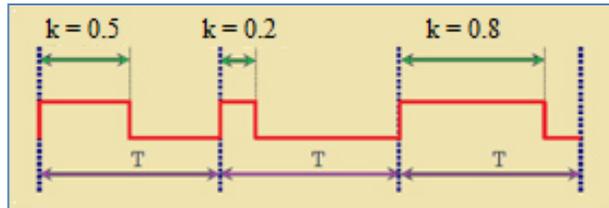


Figura 4.14: Señal PWM con distintos ciclos de trabajo.

La señal PWM es enviada al ventilador a través de una tarjeta electrónica que trabajará como un variador de corriente directa, el porcentaje del ciclo de trabajo del PWM es regulado por un voltaje de control de (1.25-2.75V) enviado desde la salida analógica de la tarjeta de adquisición de datos DAQ USB 6009.

Las características más importantes de la tarjeta electrónica de control PWM son:

- Voltaje de trabajo: 12VDC
- Potencia Máxima: 300W
- Máxima corriente: 30Amp
- Ciclo de trabajo PWM: 0%-100%
- Frecuencia PWM: 15kHz
- Voltaje de control: 1.25-2.75 V

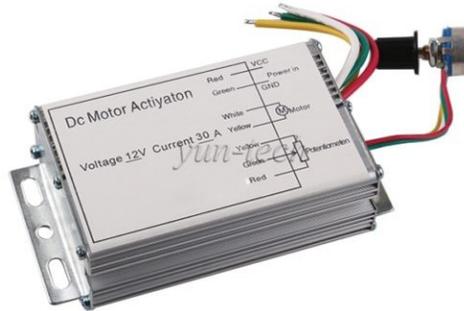


Figura 4.15: Tarjeta electrónica RioRand de control de velocidad de motor DC.

Tomando datos entre el voltaje de control que envía el porcentaje de ciclo de trabajo y el voltaje de salida al ventilador, se obtuvo el siguiente gráfico con una respuesta lineal entre ambos.

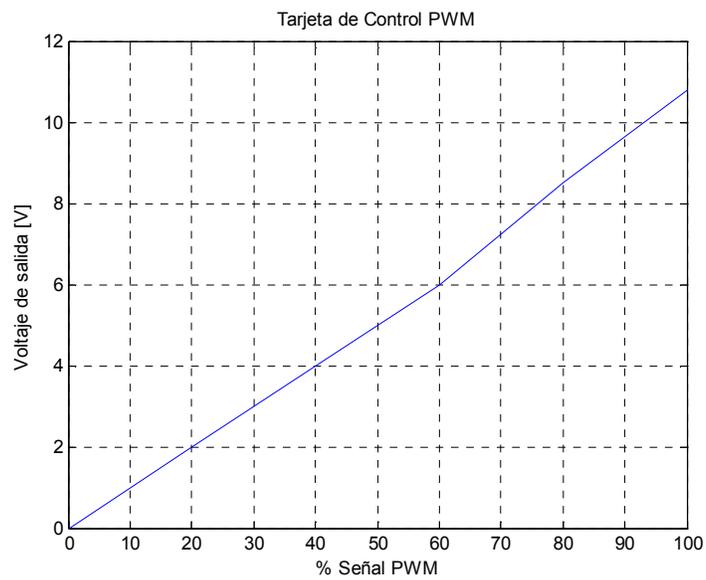


Figura 4.16: Relación entre el porcentaje del ciclo de trabajo del PWM y el Voltaje de salida.

4.3.3 MEDICIÓN DE TEMPERATURA.

En la planta de tratamiento térmico de líquidos se utilizan sensores de temperatura Pt100, que consiste en un alambre de platino que a 0 °C tienen 100 ohms y que al aumentar la temperatura aumenta su resistencia eléctrica.



Figura 4.17: *Sensor de temperatura Pt100.*

El incremento de la resistencia no es lineal pero si creciente y característico del platino de tal forma que mediante tablas y transmisores es posible encontrar la temperatura exacta a la que corresponde. Actualmente tenemos una variedad de transmisores que convierten la variación de resistencia en señales eléctricas, para este proyecto se ha seleccionado un transmisor universal con las siguientes características:

- Rango de medición: -50°C a 150°C.
- Alimentación: 24Vdc.
- Señal de salida: 4-20mA.



Figura 4.18: Transmisor de temperatura para sensor Pt100.

En vista de que la tarjeta DAQ USB 6009 no lee entradas de corriente se convierte la señal en términos de voltaje (4mA-20mA) equivale a (0.964V-4.82V) respectivamente, utilizando una tarjeta electrónica que convierte de corriente a voltaje. Con la señal de entrada en términos de voltaje entre los valores indicados podemos hallar las escalas para la conversión de voltaje a temperatura.

La ecuación para escalar la temperatura viene dada por:

$$T = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{V_{\max} - V_{\min}} * V_{in} + c \quad (4.1)$$

Que para el rango de medición de este transmisor sería:

$$T = \frac{(150 - (-50))}{(4.82 - 0.964)} * V_{in} + c \quad (4.2)$$

La constante c, se encuentra evaluando la ecuación en uno de los puntos máximo o mínimo. Finalmente la ecuación queda de la siguiente manera:

$$T = 51.867 * V_{in} - 100 \quad (4.3)$$

Con la ecuación 4.3 ya podemos escalar la temperatura en función del voltaje de entrada proporcionado por el transmisor.

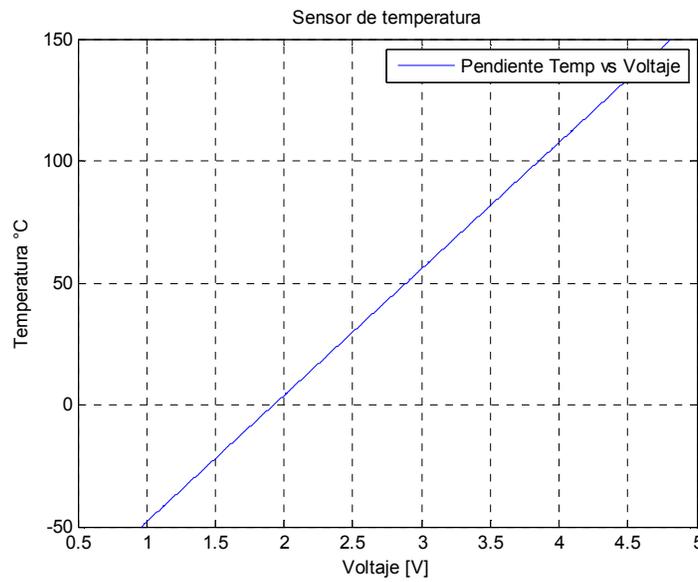


Figura 4.19: Escala de temperatura en función del voltaje.

4.3.4 MEDICIÓN DE FLUJO

Los caudales de los tres tanques con sus respectivas bombas se los mide utilizando sensores de flujo electromagnético KEYENCE FD-M



Figura 4.20: Sensor de flujo electromagnético KEYENCE FD-M.

Las características más importantes de este sensor son:

- Alimentación: 24Vdc.
- Salidas digitales de alarma caudal máximo y mínimo.
- Rango de medición: 0-200 lit/min.
- Salida Analógica: 4-20mA.
- Tiempo de respuesta: 0-0.5-1-5-10-30-60 segundos.
- Selección de rango de caudal máximo y mínimo para la salida analógica.
- Cambio de dirección de flujo por teclado.

En vista de que el sensor de flujo tiene una salida de corriente se debe pasar a voltaje antes de ingresar a la DAQ USB 6009, para ello se utiliza la tarjeta electrónica que convierte de corriente a voltaje, (4mA-20mA) equivale a (0.964V-4.82V).

Con la señal de entrada en términos de voltaje entre los valores indicados podemos hallar las escalas para la conversión de voltaje a flujo, recordando los valores referenciados como máximo y mínimo.

La ecuación para escalar el flujo viene dada por:

$$F = \frac{F_{\max} - F_{\min}}{V_{\max} - V_{\min}} * V_{in} + c \quad (4.4)$$

Para el rango de flujo configurado por teclado al sensor la ecuación queda de la siguiente forma:

$$F = \frac{(100 - 0)}{(4.82 - 0.964)} * V_{in} + c \quad (4.5)$$

La constante c, se encuentra evaluando la ecuación en uno de los puntos máximo o mínimo. Finalmente la ecuación para escalar el flujo queda de la siguiente manera:

$$F = 25.934 * V_{in} - 25 \quad (4.6)$$

Ahora se realizará la escala del flujo en función del voltaje de la salida analógica del sensor.

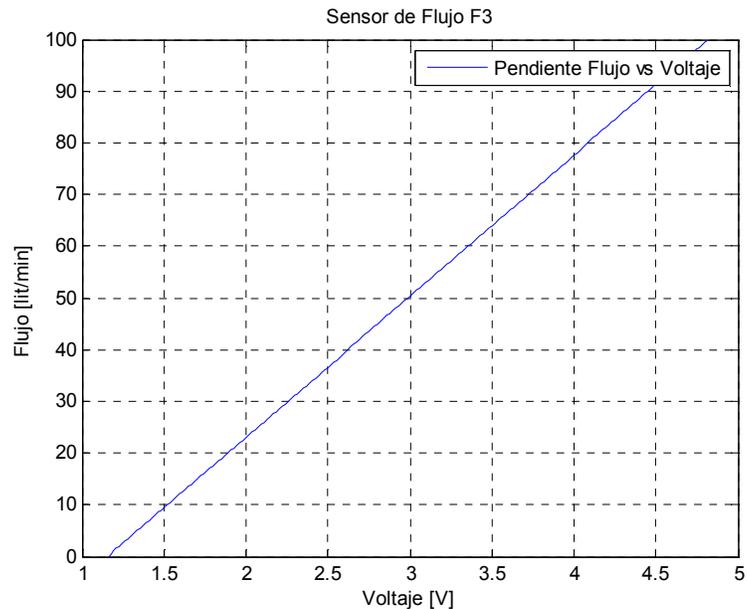


Figura 4.21: Escala de flujo en función de voltaje.

4.4 TRATAMIENTO DE DATOS EN EL ORDENADOR.

4.4.1 TRATAMIENTO DE DATOS MEDIANTE LABVIEW.

Para realizar la adquisición de datos con la tarjeta DAQ-6009 se crea un proyecto en Labview que contiene los VIs para la planta de tratamiento térmico. Con los factores de escala presentados en la sección 4.3 se proceden a crear sub-VIs para escalar las señales eléctricas procedentes de los sensores de la planta y presentarlos en una interfaz de usuario junto con controladores para accionamiento de los actuadores del sistema.

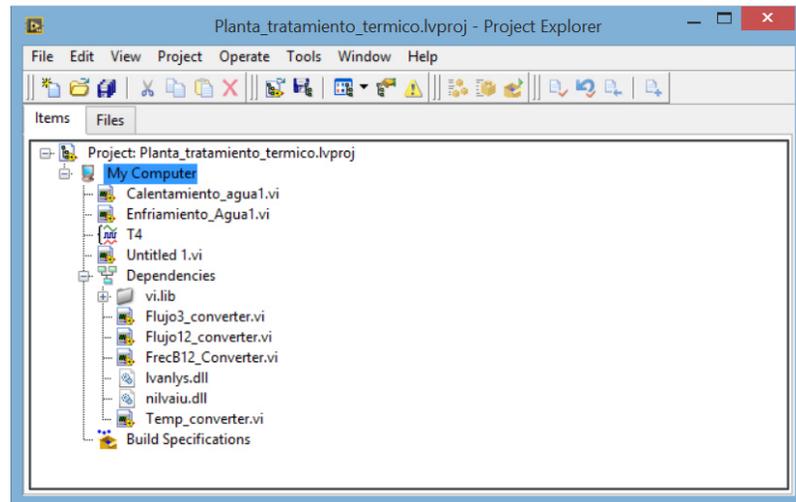


Figura 4.22: Proyecto en Labview para la planta de tratamiento térmico.

El panel frontal con la interfaz de usuario para el control y monitoreo de las variables del proceso se muestra a continuación.

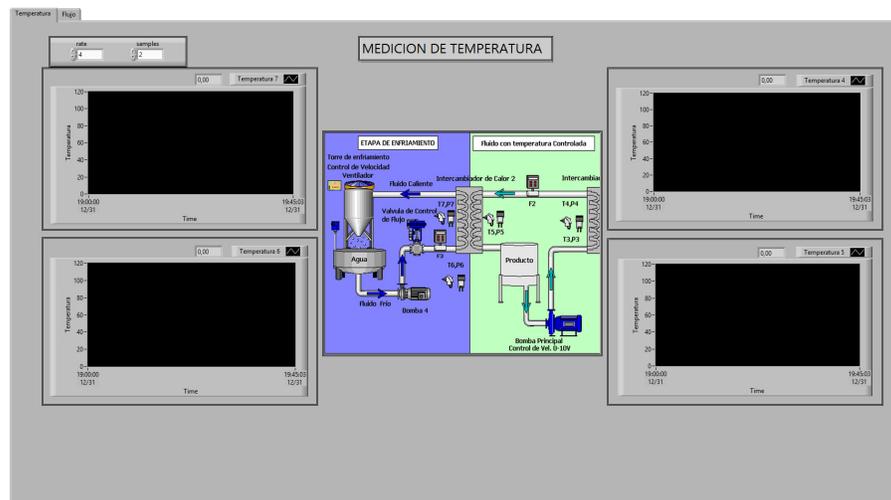


Figura 4.23: Interfaz con el usuario para las variables de temperatura del fluido a enfriar y el agua en la torre de enfriamiento.

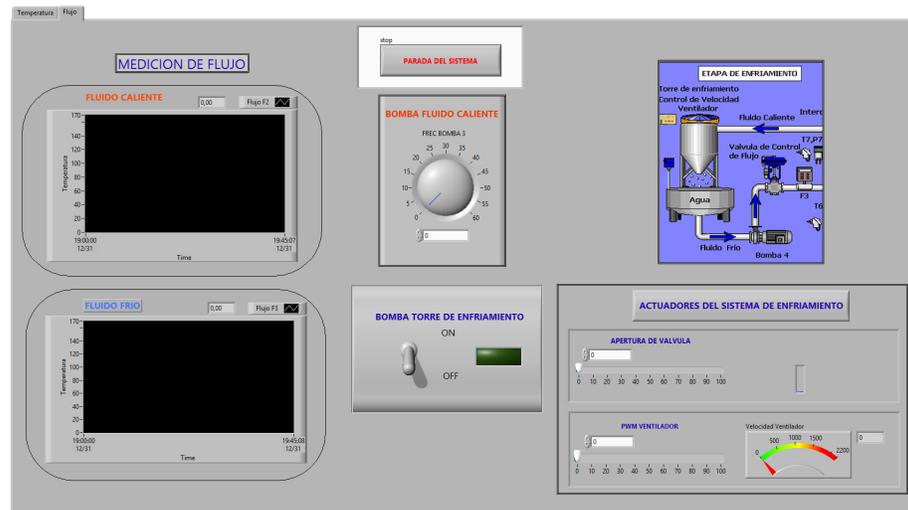


Figura 4.24: Interfaz con el usuario para monitoreo de las variables de flujo y controlar los accionamiento de los actuadores.

El panel frontal consta de:

- Un tablero de control con 2 pantallas.
- La primera contiene 4 waveform chart para las temperaturas del sistema.
- La segunda pantalla contiene 2 waveform chart para los flujos 2 y 3 del sistema. Dos controladores de tipo slide para selección del porcentaje de apertura de la válvula y el porcentaje de dutty cycle del ventilador. Un controlador tipo bool para el accionamiento de la bomba de la torre de enfriamiento y un controlador dial para seleccionar la frecuencia de circulación de flujo del producto.

El programa gráfico desarrollado se encuentra en el diagrama de bloques de Enfriamiento_Agua1.vi. Ver gráfico 4.25.

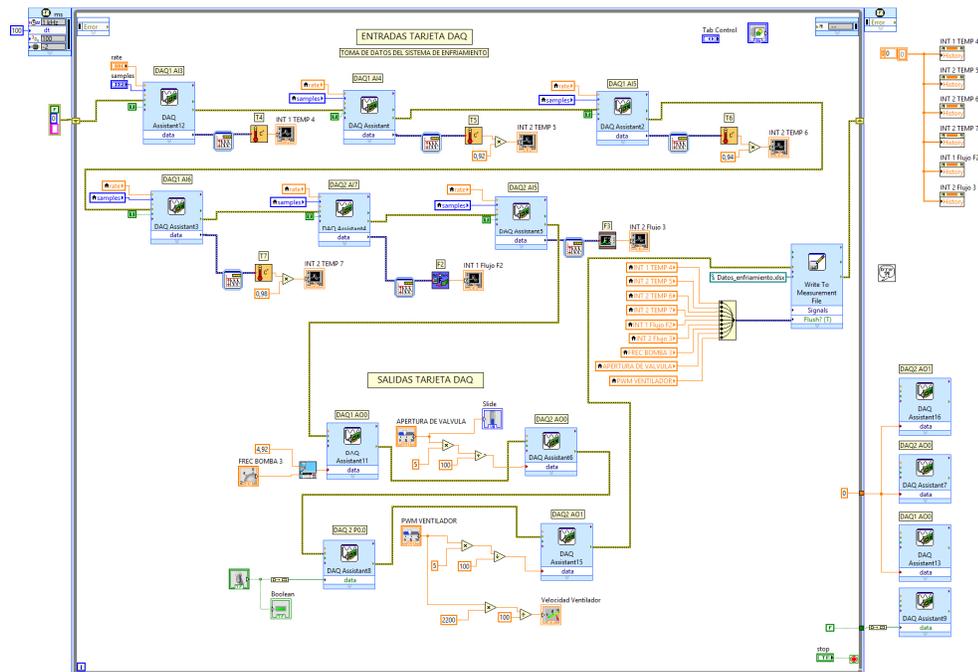


Figura 4.25: Diagrama de bloques de Enfriamiento_Agua1.vi con DAQ Assistant.

El programa consta de:

- Un lazo Time Loop que permite fijar un tiempo de muestreo de 1 segundo.
- Seis DAQ Assistant que permiten obtener los datos de entradas analógicas provenientes de los sensores de temperatura y flujo.
- Seis bloques Amplitud and Level Measurement para obtener el valor promedio de las entradas analógicas.
- Tres DAQ Assistant para las salidas analógicas correspondientes a la frecuencia de la bomba3, %Apertura de la válvula y % Duty Cycle del ventilador.

- Un DAQ Assistant tipo bool para la bomba de la torre de enfriamiento.
- Un bloque Write to Measurement File para el registro de los datos en excel.
- Cuatro Sub-VIs creados para escalar los datos de entrada provenientes de los sensores.

Ahora se construye un VI que utiliza el bloque DAQmx para la adquisición de datos, este bloque se caracteriza por ser no recursivo y por tomar solo un dato cada vez que se llama la función, a diferencia del DAQ Assistant que toma un buffer de datos y está iterando de forma continua.

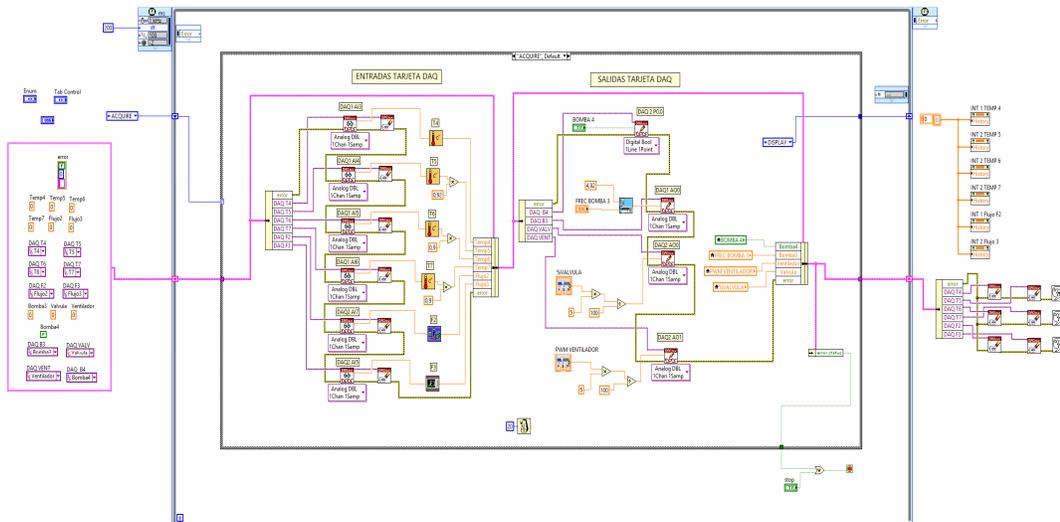


Figura 4.26: Diagrama de bloques de Enfriamiento_Agua2.vi con DAQmx.

En vista de que el bloque DAQmx proporciona un dato cada vez que se llama la función, se debe crear una secuencia automática que permita

tomar el dato, cerrar el canal y llamar a la función nuevamente, esto se consigue utilizando una estructura case y varios clusters que permiten ir actualizando las variables de entrada, salida y las variables locales que permiten cambiar el estado del case. Este programa utiliza tres Case, en el primero se adquieren los datos, en el segundo se grafican los datos y en el tercero se guardan los datos.

4.4.2 TRATAMIENTO DE DATOS MEDIANTE MATLAB.

La identificación de la planta y el diseño de los controladores se realizará en simulink de Matlab, por esta razón se crea un diagrama de bloques realizar la adquisición de datos usando la Tarjeta USB-6009. A fin de reducir el espacio físico de los bloques en el diagrama se crean bloques de funciones para escalar las variables, filtrar las señales de entrada y guardar los datos en el workspace. El tiempo de muestreo que se selecciona es de 0.25 segundos para la medición de las variables y de 1 segundo para la implementación del controlador. En los parámetros de configuración del modelo de simulink se selecciona Fixed-step y ode4 (Runge Kutta).

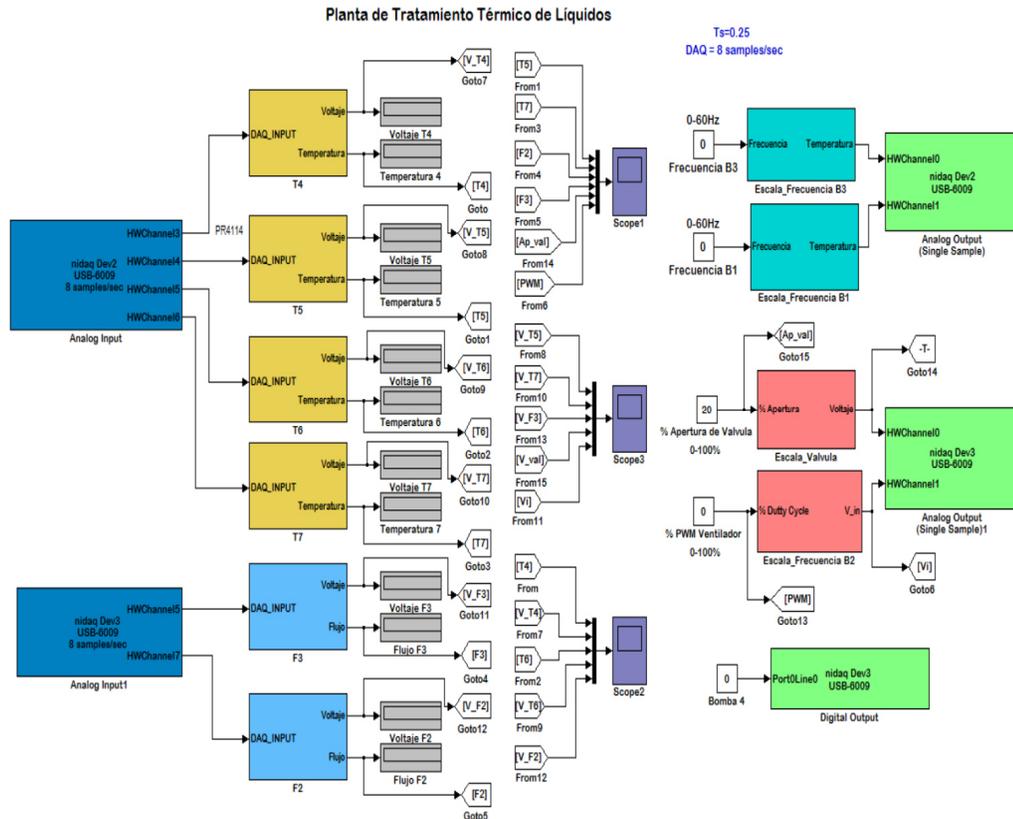


Figura 4.27: Diagrama de bloques en Simulink de la planta de tratamiento térmico.

4.5 ANÁLISIS DEL APOORTE DE ENFRIAMIENTO DE LOS ACTUADORES.

Mediante pruebas experimentales se realiza un estudio comparativo del aporte de enfriamiento de la válvula y el ventilador al sistema. Este análisis nos permitirá conocer si los dos actuadores aportan de igual forma al enfriamiento, entonces serán variables manipuladas dando un sistema TISO. Caso contrario si hay uno que tenga la mayor influencia en el enfriamiento del producto, se establecerá uno como variable manipulada y el otro actuator de menor influencia será considerado como perturbación controlada dando un sistema SISO.

Se realizaron 7 pruebas, en las pruebas 1 a 3 se fija una apertura de válvula del 50% y se varía la velocidad del ventilador. En las pruebas 4 a 6 se fija el PWM del control de velocidad del ventilador en 50% y se varía la apertura de la válvula. En la prueba 7 se establece una apertura de la válvula del 30% y PWM del ventilador en 100%. Las condiciones iniciales para todas las pruebas son iguales. A continuación se muestra una tabla con los datos obtenidos en las pruebas.

| PRUEBAS REALIZADAS PARA DETERMINAR EL APORTE DE ENFRIAMIENTO DE CADA ACTUADOR | | | | | | | |
|---|--|--------------|-----------|--|--------------|--------------|----------------------------------|
| | PRUEBA 1 | PRUEBA 2 | PRUEBA 3 | PRUEBA 4 | PRUEBA 5 | PRUEBA 6 | PRUEBA 7 |
| ACTUADORES | Apertura de la válvula fija y variación de la velocidad del ventilador | | | Velocidad del ventilador fija y variación de la apertura de la válvula | | | Min. flujo F2 y Max. ventilación |
| %Apertura de la válvula | 50 | 50 | 50 | 30 | 40 | 70 | 30 |
| Flujo F3 (Lit/min) | 77,5 | 77,5 | 77,5 | 53,6 | 66,8 | 82,7 | 51,4 |
| % Duty Cycle Ventilador | 60 | 80 | 100 | 50 | 50 | 50 | 100 |
| Velocidad rpm | 1320 | 1760 | 2200 | 1100 | 1100 | 1100 | 2200 |
| PRODUCTO A ENFRIAR | | | | | | | |
| Flujo F2 (Lit/min) | 59,2 | 59,8 | 60,9 | 60,31 | 61,23 | 61,58 | 62,6 |
| Temp. Inicial °C | 60,9 | 60,6 | 60,7 | 60,7 | 60,53 | 60,8 | 60,7 |
| Temp. Final °C | 40,13 | 40,18 | 40 | 40,73 | 43,17 | 43,68 | 40,04 |
| Tiempo ΔT (min:seg) | 0:22:48 | 0:11:03 | 0:13:10 | 0:20:05 | 0:18:23 | 0:17:40 | 0:13:38 |
| CONDICIONES DEL AGUA DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO | | | | | | | |
| Temp. Inicial °C | 28,36 | 29,33 | 33,64 | 30,5 | 33,57 | 33,73 | 33,92 |
| Temp. Final °C | 40,96 | 38,48 | 39,05 | 40,08 | 42,43 | 43,03 | 39,26 |
| Temp. Ambiente °C | 28 | 27 | 27 | 27,6 | 28,5 | 28,8 | 29,5 |

Figura 4.28: Pruebas del aporte de enfriamiento al sistema de la válvula y el ventilador.

Los mejores resultados fueron obtenidos en las pruebas 2,3 y 7. La característica de estas pruebas es la alta velocidad del ventilador. La temperatura de la glicerina se enfría de 60 a 40 °C en un tiempo de estabilización menor que las otras pruebas.

En pruebas 4,5 y 6 donde el flujo de ventilación está al 50 % y se varía la apertura de la válvula, se observa que mientras menor es el flujo, más se enfría la Glicerina. El tiempo de estabilización para estas pruebas es mayor que cuando se mantiene fija la apertura de la válvula y se varía la velocidad del ventilador.

En la prueba 1 se tiene el mayor tiempo de estabilización del sistema al tener la válvula al 50% de apertura y el 60% de velocidad del ventilador.

En la figura 4.29 se muestra la gráfica de Temperatura vs. Tiempo del producto a enfriar, esta fue obtenida en la prueba 7 con los valores de consigna que se muestran en la tabla 4.3.

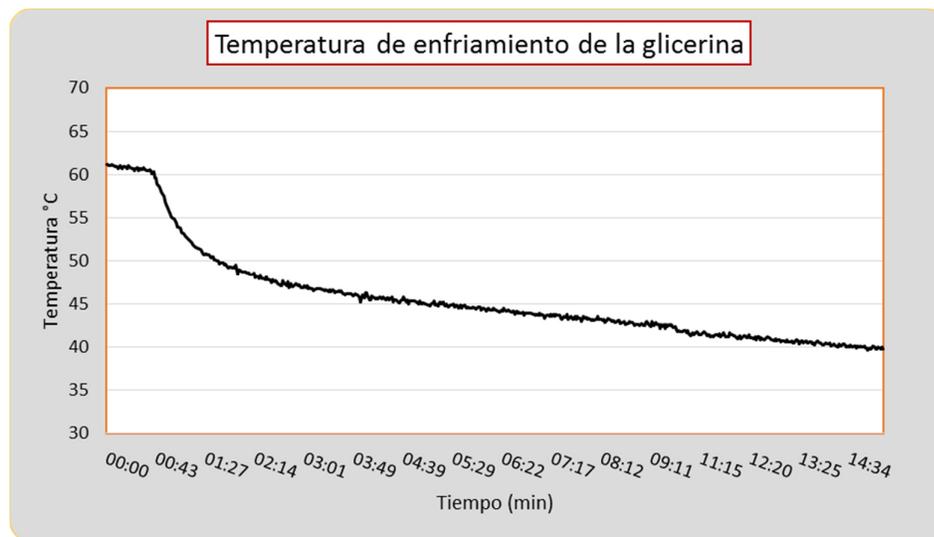


Figura 4.29: Temperatura de la glicerina realizada en la prueba 7.

En vista de esto se concluye que de los dos actuadores el que más aporta al enfriamiento es el flujo de ventilación a través de la torre de enfriamiento, por

lo que se será considerada como variable manipulada en el sistema y la válvula se considerará como perturbación controlada estableciendo un valor fijo que está en el rango de 10 a 30% de apertura. Recordando que mientras mayor sea el tiempo de contacto entre el agua y el aire en la torre de enfriamiento, mayor será el intercambio de calor y permitirá enfriar el producto en un menor tiempo. Ahora se analizará en qué valor de apertura de la válvula el sistema tiene un comportamiento lineal.

4.6 OPERACIÓN LINEAL DE LA PLANTA.

Para encontrar el rango de temperatura de operación donde el sistema es lineal se realizan pruebas con variación de velocidad del ventilador y la apertura de la válvula entre 10 y 30%, para ello se establecen los siguientes valores como condición para la operación de la planta:

| | | |
|---|---------|-----------------|
| Fluido Caliente | BOMBA 1 | Frecuencia=40Hz |
| Fluido Glicerina | BOMBA 3 | Frecuencia=40Hz |
| Fluido Etilenglicol | BOMBA 4 | ON |
| Controlador de Temperatura fluido caliente | | 75 °C |
| Temperatura inicial de la Glicerina | | 60 °C |
| Velocidad del ventilador | | 0-100 % PWM |
| Apertura de la válvula | | 0-30% |

Tabla 4.3: Condiciones de operación de la planta.

Las pruebas se las realiza bajo las condiciones descritas en la tabla 4.3. En la primera prueba se varía la velocidad del ventilador y se deja fija la apertura de la válvula en 30% que equivale a 53.5 lit/min.

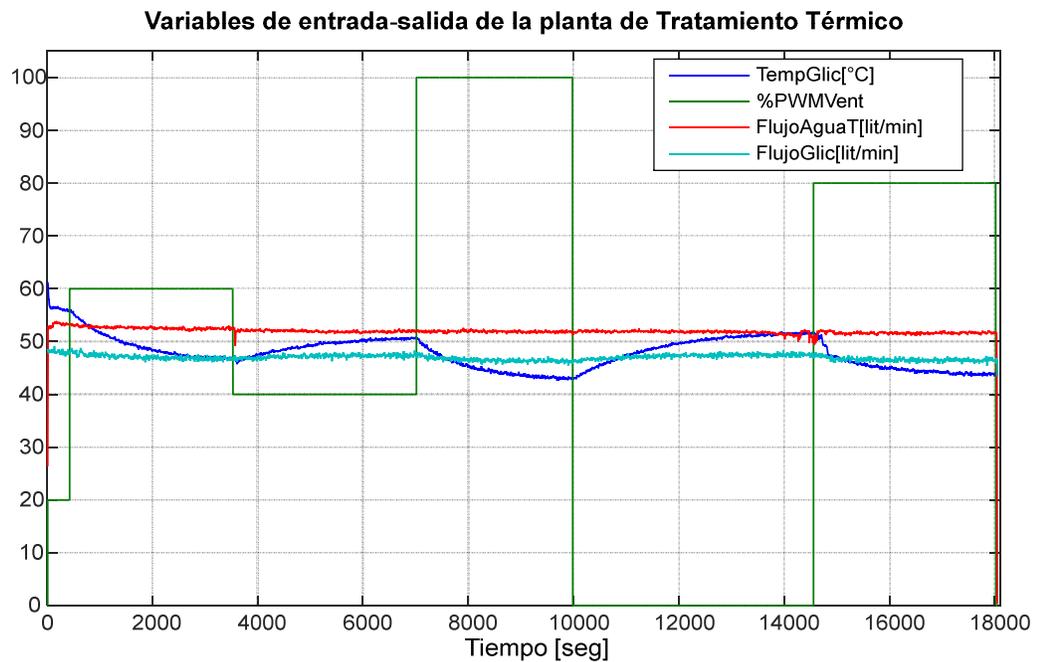


Figura 4.30: Prueba realizada con apertura de válvula fija en 30 %.

En la figura 4.30 podemos observar que para un 30% de apertura de la válvula el sistema tiene un comportamiento no lineal, los rangos de temperatura de la glicerina son variables. Por esta razón no se escoge esta apertura como punto de operación.

En la siguiente prueba se varía la apertura de la válvula mediante pasos, cuyos valores se muestran en la figura 4.31 y se observa el comportamiento de la temperatura del producto.

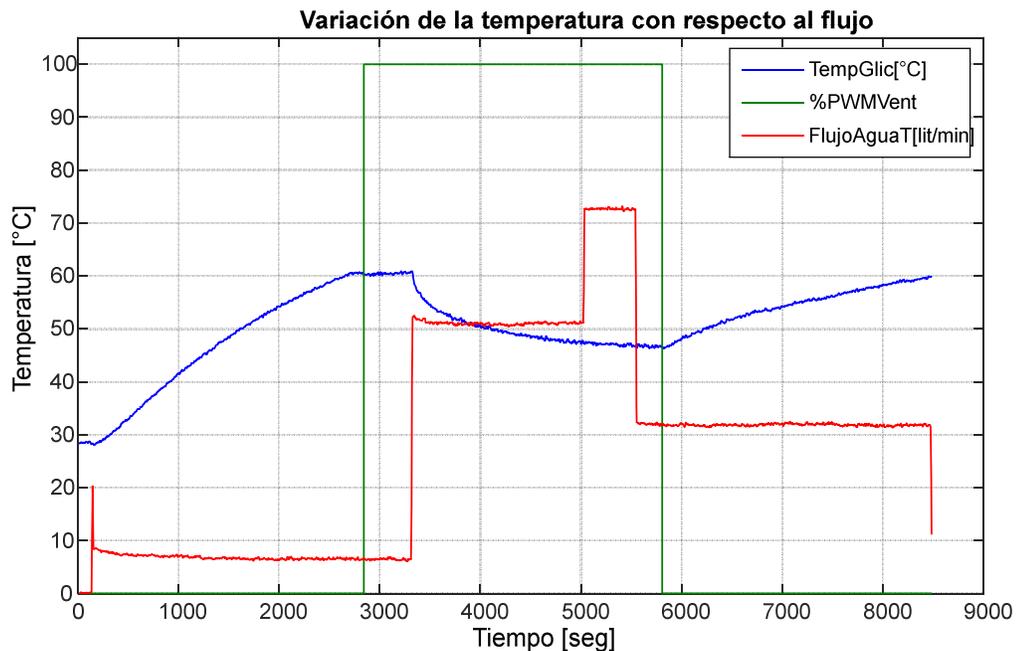


Figura 4.31: Prueba realizada con apertura de válvula multipasos.

De acuerdo a la figura 4.31 podemos observar lo siguiente:

- Con apertura de 10% el flujo de agua a través de la torre de enfriamiento es de 8 lit/min. El producto se calienta hasta 60 °C pero aun cuando se pone a funcionar el ventilador al 100% la temperatura no disminuye.
- Con apertura entre 50% y 70% la tasa de enfriamiento es la misma pero cuando se apaga el ventilador, la temperatura del producto no llega hasta los 60 °C.
- Con apertura de válvula de 20% el producto sin acción del ventilador se calienta hasta 60 °C y cuando se acciona el ventilador la temperatura del producto llega hasta 50 °C. Por lo que se establece el valor de

apertura de 20% como punto de operación para que el sistema sea lineal.

En resumen se estable el rango de operación lineal de la planta en el rango de valores entre 50 y 60 °C. Como resultado se obtuvo un sistema SISO, donde la entrada es la velocidad del ventilador y la salida es la temperatura de la glicerina. Las condiciones para que exista linealidad se describen en la siguiente tabla:

| | | |
|---|----------------|-----------------|
| Fluido Caliente | BOMBA 1 o 2 | Frecuencia=30Hz |
| Fluido Glicerina | BOMBA 3 | Frecuencia=40Hz |
| Fluido Etilenglicol | BOMBA 4 | ON |
| Controlador de Temperatura fluido caliente | | 70 °C |
| Temperatura máxima de la Glicerina | | 60 °C |
| Temperatura mínima de la Glicerina | | 50 °C |
| Velocidad del ventilador | | 0-100 % PWM |
| Apertura de la válvula | | 20% |

Tabla 4.4: *Condiciones para operación lineal de la planta.*

CAPÍTULO V

DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL PARA LA TORRE DE ENFRIAMIENTO DE LA PLANTA DE PROCESOS

Para el diseño de un controlador continuo mediante técnicas clásicas o variables de estado se requiere de un modelo que caracterice el comportamiento dinámico de la planta a controlar. El modelo de la planta permite realizar el ajuste de los parámetros del controlador a fin de obtener una respuesta que satisfaga las condiciones de diseño y a su vez se puede validar el controlador mediante simulación.

Por el estudio teórico realizado en la planta de tratamiento térmico donde intervienen procesos de balance de masa, energía y cantidad de movimiento, resulta complicado solucionar las ecuaciones descritas para el modelo matemático de la torre de enfriamiento, debido a que son ecuaciones en

función del espacio. Por esta razón y como se tiene la planta para realizar experimentos se recurre a la técnica de identificación de sistemas.

5.1 IDENTIFICACIÓN DEL SISTEMA A PARTIR DE LOS DATOS ENTRADA-SALIDA.

La identificación de sistemas consiste en construir modelos de sistemas dinámicos basándose en los datos de entrada-salida. El modelo obtenido se conoce como Modelo de Caja Negra o Modelo Entrada-Salida.

Existen diversos métodos de identificación que pueden clasificarse en:

- **Métodos no paramétricos.-** Algunos de estos métodos son: Análisis de la respuesta transitoria, análisis de la respuesta de frecuencia, análisis de correlación y análisis espectral.
- **Métodos paramétricos.-** Requieren la elección de una posible estructura de modelo, de un criterio de ajuste de parámetros y por último la estimación de parámetros.

El sistema para la torre de enfriamiento de la planta de tratamiento térmico está constituido de la siguiente forma:

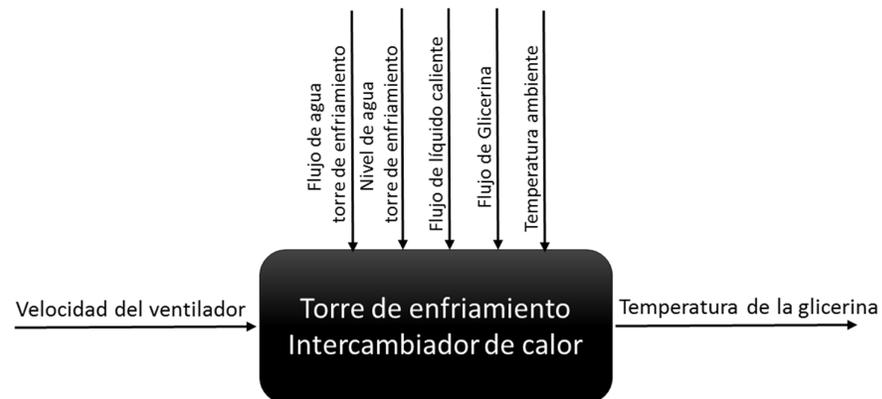


Figura 5.1: Sistema dinámico con entrada, salida y perturbaciones.

5.1.1 IDENTIFICACIÓN EXPERIMENTAL DE SISTEMA DE PRIMER ORDEN.

Este método consiste en aplicar sobre el sistema los valores máximos y mínimos de velocidad de ventilación y observar la respuesta de la temperatura del agua en la torre de enfriamiento, los datos a considerar en la respuesta del sistema son los siguientes:

- La ganancia del sistema (K) es la relación entre la variación de los voltajes de salida (ΔV_o) y la variación de los voltajes de entrada (ΔV_i).
- El tiempo de estabilización (t_{ss}) es el intervalo de tiempo en el que la respuesta del sistema consigue un valor único, o llamado valor final.

- La constante de tiempo (τ) es el intervalo de tiempo en el que la respuesta del sistema consigue un valor que corresponde al 63% de su valor final.
- El tiempo de retardo (t_0) o tiempo muerto es el intervalo de tiempo en el que sistema se tarda en responder debido a cierto disturbio.

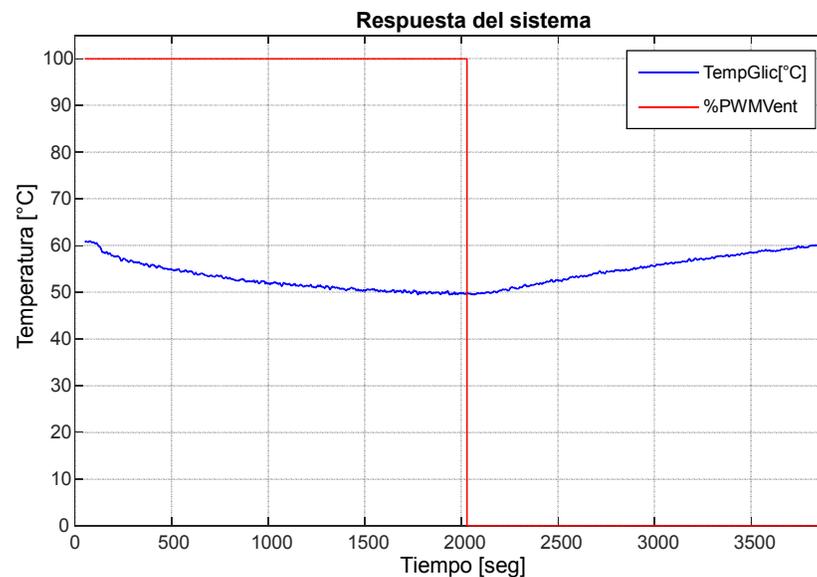


Figura 5.2: Variación de temperatura con ventilación máxima y mínima.

En base al gráfico observamos que la respuesta del sistema es de primer orden y podemos calcular los siguientes valores:

$$\Delta y = 11.33$$

$$\Delta u = 100$$

$$K = 0.1133$$

$$t_0 = 40 \text{ s}$$

$$\tau = 617 \text{ s}$$

La función de transferencia del sistema, obtenida mediante el gráfico de la respuesta del sistema de primer orden, da como resultado:

$$G(s) = \frac{-0.1133}{697s+1} e^{-40s} \quad (5.1)$$

5.1.2 IDENTIFICACIÓN DE DATOS ENTRADA-SALIDA USANDO LA HERRAMIENTA IDENT DE MATLAB.

Para el proceso de identificación es muy importante diseñar una señal de entrada que permita obtener información sobre la dinámica total del sistema.

La señal de entrada que se diseña para excitar la planta consta de dos partes, la primera consiste en una sucesión de tres pulsos rectangulares con diferente ancho de pulso de forma que tenga un contenido rico de frecuencias y la segunda parte de la señal es multipaso con incrementos y decrementos de la señal de entrada de tal forma que permita capturar toda la dinámica de la planta.

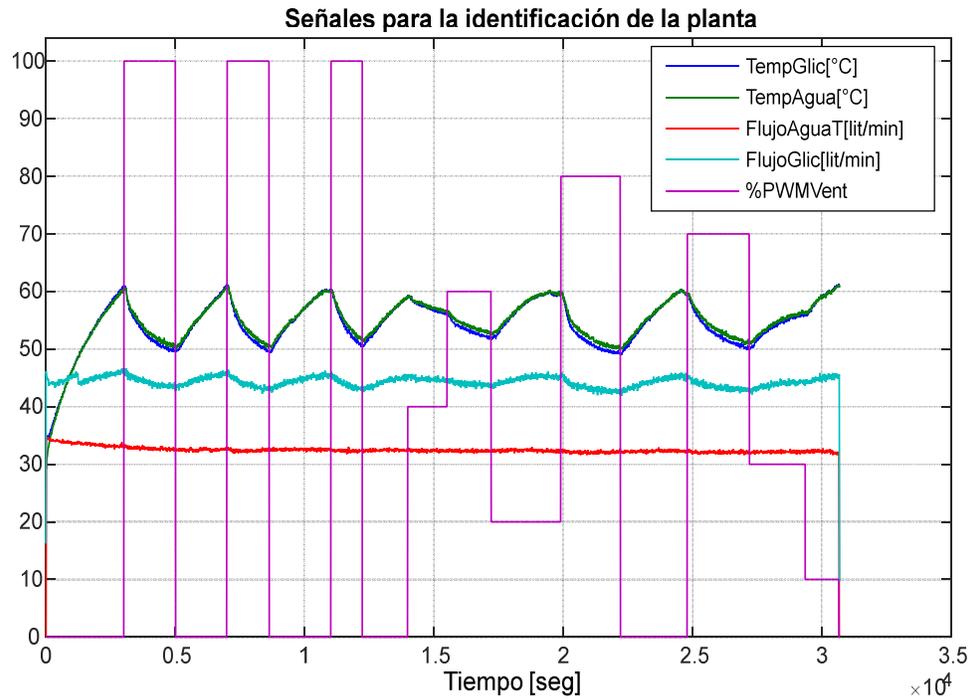


Figura 5.3: Datos de entrada-salida para la identificación de la planta.

En la figura 5.3 se puede observar cómo se comportan las variables del sistema ante cambios en la referencia de velocidad del ventilador. Las temperaturas del Etilenglicol que circula a través de la torre de enfriamiento y la Glicerina son bastante similares, de hecho se podría considerar que son iguales, por lo que existe una alta eficiencia en la transferencia térmica del intercambiador 2. Otro aspecto importante de la planta es que el flujo de la glicerina varía con respecto a la temperatura y que el flujo del Etilenglicol se mantiene constante.

Los datos de entrada corresponden a la velocidad del ventilador y los de salida a la temperatura de la Glicerina. Estos datos son ingresados

en la interfaz “*ident*” de Matlab para ser procesados, se selecciona tiempo de muestreo de 0.25 segundos, se remueven las medias y tendencias, una parte de los datos se utiliza para calcular el modelo y otra parte para validar.

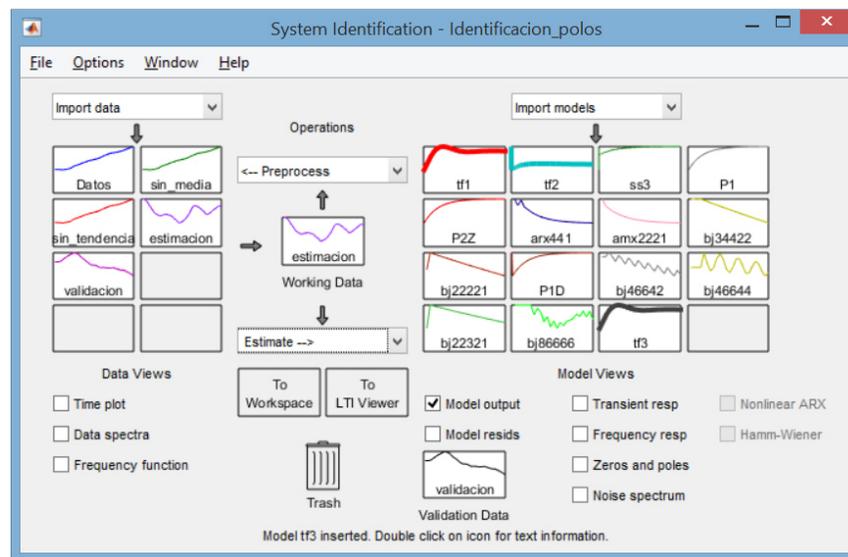


Figura 5.4: Ventana principal de la interfaz gráfica “*ident*”.

En esta interfaz se pueden importar datos, ya sea en el dominio del tiempo o la frecuencia. Se puede estimar mediante modelos paramétricos como ARX, ARMAX, OE, BJ o FIR. Además permite identificar mediante espacio de estados o modelo de función de transferencia.

A continuación se muestran las señales de entrada y salida una vez que han sido removidas las medias y tendencias, así como la selección de los datos para la estimación del modelo.

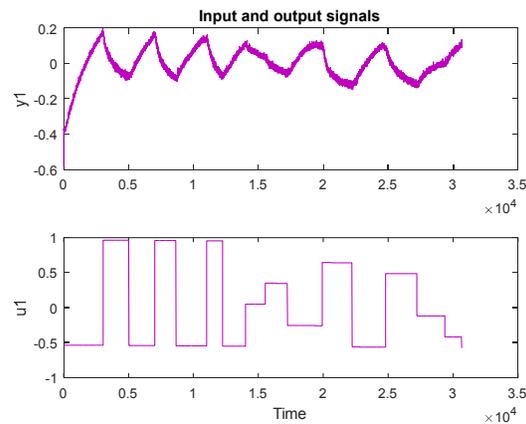


Figura 5.5: *Procesamiento de señales de salida y entrada.*

Para la elección del mejor método de parametrización de la planta se tomaran en cuenta los siguientes criterios:

- **Modelo de Salida:** Una vez que se ha obtenido el modelo experimental, se compara si el modelo obtenido es suficientemente representativo con el modelo real de la planta. Para ello se puede comparar el porcentaje de similitud entre los datos del modelo real y estimado.

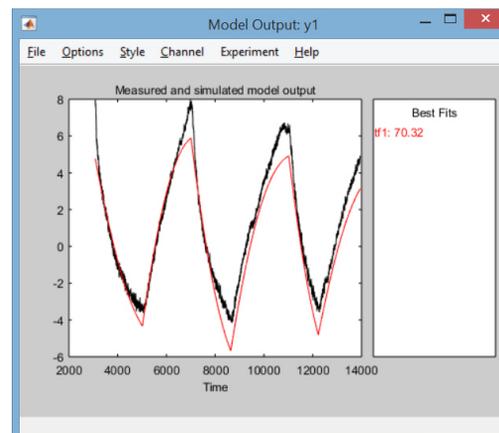


Figura 5.6: *Modelo de salida para un modelo de 2 polos y un cero.*

- **Análisis residual:** También se lo denomina error de predicción y es la diferencia entre el valor observado y el valor estimado. La autocorrelación de la salida nos permite conocer si los errores son independientes. La correlación cruzada permite medir la intensidad y la dirección entre la salida y la entrada.
- **Intervalos de confianza:** Los modelos de estimación presentan un grado de incertidumbre, que en los gráficos aparece marcada por líneas segmentadas, la región entre estos intervalos es la verdadera respuesta del sistema con 99% de confianza, mientras que la región restante da una respuesta incierta, razón por la cual se tomará el modelo cuya respuesta esté dentro de estos intervalos.

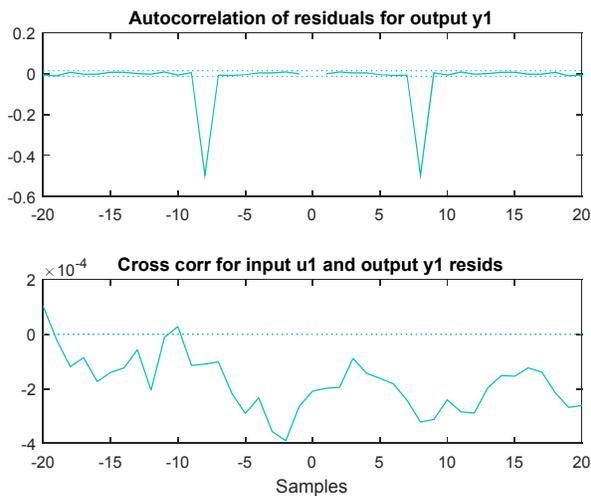


Figura 5.7: Análisis residual para un modelo BJ:21111.

- **Parsimonia:** Implica no hacer uso de una gran cantidad de parámetros en forma innecesaria, porque se incrementa el orden del modelo y el diseño del controlador requerirá del uso de mayores recursos.
- **Flexibilidad:** Consiste en emplear un modelo que ofrezca una gran capacidad de descripción de posibles sistemas.
- **Modelo no viable:** Nos indica que no se puede hallar una función de transferencia esto se produce cuando los coeficientes del numerador son mayores a los del denominador, lo cual indicaría que matemáticamente se pueden obtener valores futuros.

5.1.3 MODELO ARX.

Estructura ARX.- En este modelo “AR” hace referencia a la parte auto regresiva $A(q).y(t)$ y “X” a la entrada extra $B(q).u(t)$ también conocida como variable exógena. Debido a que el término de ruido blanco $e(t)$ entra como un error directo en la ecuación en diferencias, el modelo es también conocido como modelo o estructura de ecuación de error.

$$A(z)y(t) = B(z)u(t - nk) + r(t) \quad (5.2)$$

Dentro de la interfaz gráfica “*ident*” aparece la siguiente ventana donde podemos elegir los valores de na , nb y nk para el modelo ARX.

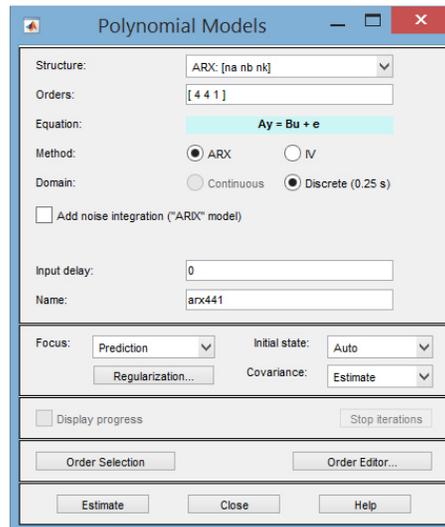


Figura 5.8: Construcción del modelo ARX:4,4,1.

Ahora se ajustan distintas combinaciones de los coeficientes del modelo ARX para obtener la mejor respuesta.

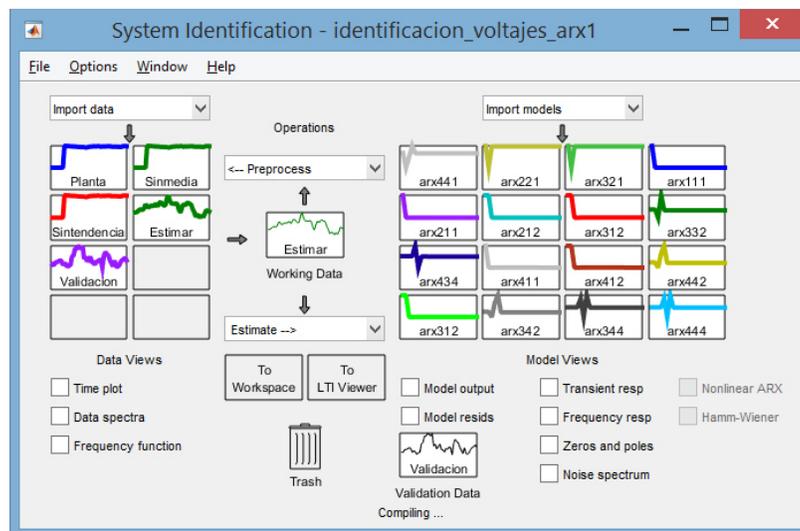


Figura 5.9: Pruebas con algunos modelos ARX.

Con los datos para estimar encontramos el modelo y con los datos de validación procedemos a comparar la respuesta obtenida con la

respuesta real, es importante considerar la parsimonia. Los resultados de la prueba con el modelo ARX se muestran a continuación.

Tabla 5.1: Resultados con modelos ARX.

| Modelo | Porcentaje de similitud | Nivel de Confianza | Función de transferencia |
|---------------|--------------------------------|---------------------------|---------------------------------|
| ARX:3,2,1 | 40.40% | Incertidumbre | 3 polos, 2 ceros |
| ARX:2,2,1 | 40.38% | Incertidumbre | 3 polos, 2 ceros |
| ARX:4,4,1 | 40.26% | Incertidumbre | 4 polos, 3 ceros |
| ARX:2,2,1 | 40.00% | Incertidumbre | 3 polos, 2 ceros |
| ARX:4,1,1 | 39.98% | Incertidumbre | 4 polos, 3 ceros |
| ARX:1,1,1 | 39.92% | Incertidumbre | 1 polo, ningún cero |
| ARX:4,3,4 | 39.67% | Incertidumbre | 4 polos, 3 ceros |
| ARX:3,1,2 | 39.63% | Incertidumbre | 3 polos, 2 ceros |
| ARX:2,1,2 | 39.60% | Incertidumbre | 3 polos, 2 ceros |
| ARX:4,1,2 | 39.59% | Incertidumbre | 4 polos, 3 ceros |
| ARX:3,3,2 | 39.49% | Incertidumbre | 3 polos, 2 ceros |
| ARX:3,4,4 | 39.14% | Incertidumbre | 4 polos, 4 ceros |
| ARX:4,4,4 | 39.13% | Incertidumbre | 4 polos, 3 ceros |

Mediante las pruebas realizadas con el modelo paramétrico ARX obtenemos porcentajes de similitud con los datos reales que están entre 30 y 40 %. A medida que se incrementa el valor de los coeficientes del modelo, se incrementa el número de polos y ceros. La autocorrelación y la correlación cruzada de estos modelos están fuera de los intervalos de confianza. Este modelo resulta no viable porque en todas las funciones de transferencia obtenidas, existe un polo en el semiplano derecho.

5.1.4 MODELO ARMAX.

Estructura ARMAX.- La principal desventaja del modelo reside en la escasez o falta de libertad en la descripción del término de perturbación. Sin embargo es posible incorporar mayor flexibilidad al modelado si es que agregamos un término como media en movimiento del ruido blanco.

$$A(z)y(t) = B(z)u(t - nk) + C(z)r(t) \quad (5.3)$$

Para elegir la estructura de este tipo de modelos se debe determinar el orden de cada uno de los polinomios anteriores, es decir n_a , n_b , n_c , n_d , n_f y el retardo entre la entrada y la salida n_k . Una vez elegidos estos valores se determina el vector de coeficientes θ que hacen que el modelo se ajuste a los datos de entrada – salida del sistema real.

En la siguiente ventana se ingresan los parámetros del modelo:

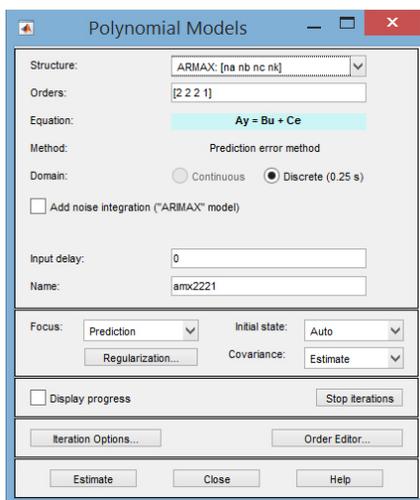


Figura 5.10: Construcción del modelo ARMAX:2,2,2,1.

En la interfaz se ingresan el orden de n_a que representa el polinomio A_y , n_b que es orden del polinomio B_u , n_c corresponde al polinomio C_e y n_k que representa el retardo en la entrada y salida.

Ingresando diferentes valores para n_a , n_b , n_c y n_k , se obtuvieron diferentes parametrizaciones con el modelo ARMAX.

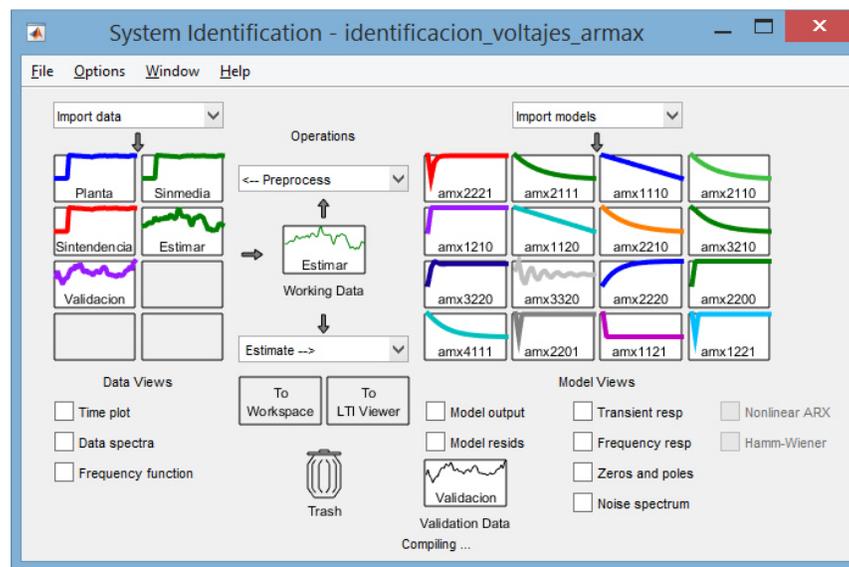


Figura 5.11: Pruebas con algunos modelos ARMAX.

El modelo obtenido se compara con los datos reales de la planta utilizados para validar el modelo. Para la selección del modelo que mejor describa las características de la planta se toma en cuenta el análisis residual y la parsimonia. Los resultados obtenidos se muestran a continuación en la siguiente tabla.

Tabla. 5.2: Resultados con modelos ARMAX.

| Modelo | Porcentaje de similitud | Nivel de confianza | Función de transferencia |
|---------------|-------------------------|--------------------|--------------------------|
| ARMAX:1,2,1,0 | 56.55% | Incertidumbre | 1 polo, 1 cero |
| ARMAX:1,1,1,0 | 53.43% | Incertidumbre | 1 polo, 1 cero |
| ARMAX:4,1,1,1 | 53.01% | Incertidumbre | 5 polos, 4 ceros |
| ARMAX:2,1,1,0 | 52.97% | Incertidumbre | 2 polos, 2 ceros |
| ARMAX:2,1,1,1 | 52.94% | Incertidumbre | 2 polos, 1 cero |
| ARMAX:2,2,1,0 | 52.81% | Incertidumbre | 2 polos, 2 ceros |
| ARMAX:3,2,1,0 | 52.68% | Incertidumbre | 3 polos, 3 ceros |
| ARMAX:1,2,2,1 | 41.48% | Incertidumbre | 2 polos, 2 ceros |
| ARMAX:2,2,0,1 | 41.39% | Incertidumbre | 1 polo, 1 cero |
| ARMAX:1,1,2,0 | 41.10% | Incertidumbre | 2 polos, 1 cero |
| ARMAX:2,2,0,0 | 41.10% | Incertidumbre | 1 polo, 1 cero |
| ARMAX:3,2,2,0 | 41.04% | Incertidumbre | 3 polos, 3 ceros |
| ARMAX:1,1,2,1 | 41.02% | Incertidumbre | 1 polo, 1 cero |
| ARMAX:2,2,2,0 | 40.66% | Incertidumbre | 2 polos, 2 ceros |
| ARMAX:3,3,2,0 | 38.21% | Incertidumbre | 3 polos, 3 ceros |
| ARMAX:2,2,2,1 | 20.55% | Incertidumbre | 2 polos, 1 cero |

El mayor porcentaje de similitud que se obtuvo con este modelo fue de 56.55%. La auto-correlación y la correlación cruzada están fuera de los intervalos de confianza. Todos los modelos obtenidos mediante la estimación ARMAX son inestables, esto es porque tienen un polo ubicado en el semiplano derecho.

5.1.5 MODELO BOX JENKIN.

Los modelos BJ están descritos por la siguiente ecuación:

$$y(t) = \frac{B(z)}{F(z)} u(t-nk) + \frac{C(z)}{D(z)} r(t) \quad (5.4)$$

En la siguiente ventana ingresamos los parámetros para el modelo BJ.

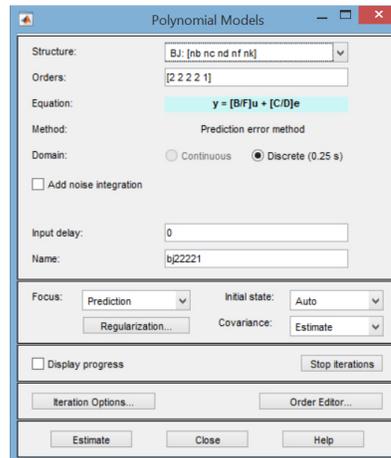


Figura 5.12: Construcción del modelo BJ:2,2,2,2,1.

El orden del polinomio B corresponde a nb, nc es el orden del polinomio C, nd es el orden del polinomio D, nf es el orden del polinomio F y nk es el retardo en la entrada. Se eligieron diferentes valores para el orden de los polinomios nb, nc, nd, nf y nk, se obtuvieron los siguientes modelos.

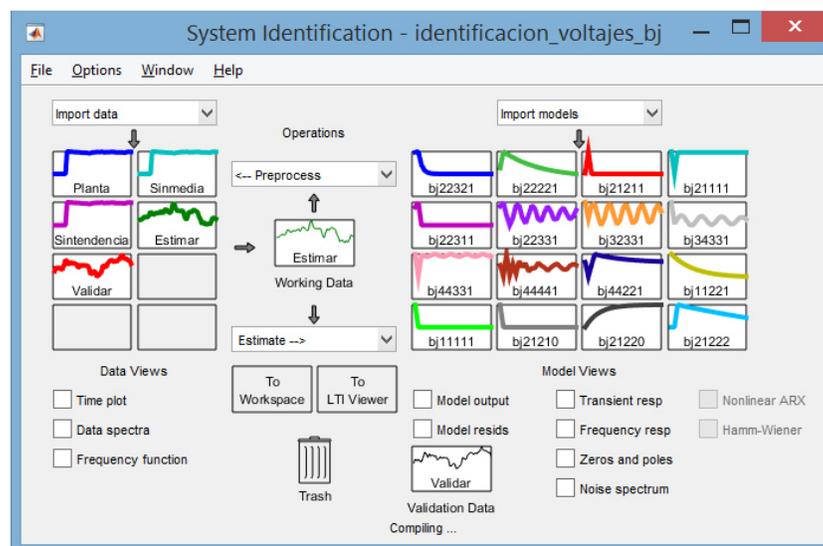


Figura 5.13: Pruebas con algunos modelos BJ.

De manera similar que en las pruebas anteriores se comparan los datos reales de la planta con los datos obtenidos del modelo estimado. La selección se hace mediante el análisis residual y la parsimonia.

El modelo Box Jenkin extrae mucha información de la serie de tiempo, mediante este modelo se obtienen muy buenas aproximaciones como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 5.3: Resultados con modelos BJ.

| Modelo | Porcentaje de similitud | Nivel de Confianza | Función de transferencia |
|---------------|--------------------------------|---------------------------|---------------------------------|
| BJ:3,2,3,3,1 | 82.14% | Incertidumbre | 3 polos, 2 ceros |
| BJ:2,2,3,1,1 | 81.97% | Incertidumbre | 2 polos, 2 ceros |
| BJ:4,4,3,3,1 | 81.89% | Incertidumbre | 4 polos, 4 ceros |
| BJ:2,2,3,2,1 | 81.71% | 99% de confianza | 2 polos, 1 cero |
| BJ:3,4,3,3,1 | 95.02% | Incertidumbre | 3 polos, 3 ceros |
| BJ:2,1,2,2,2 | 76.15% | 99% de confianza | 2 polos, 1 ceros |
| BJ:2,1,2,1,0 | 75.70% | 99% de confianza | 1 polo, 1 cero |
| BJ:2,1,2,1,1 | 75.70% | 99% de confianza | 2 polos, 2 ceros |
| BJ:2,1,2,2,0 | 75.45% | Incertidumbre | 2 polos, 2 ceros |
| BJ:4,4,4,4,1 | 72.91% | 99% de confianza | 5 polos, 4 ceros |
| BJ:2,2,2,2,1 | 65.85% | Incertidumbre | 2 polos, 1 cero |
| BJ:2,1,1,1,1 | 62.25% | 99% de confianza | 2 polos, 2 ceros |
| BJ:2,2,3,3,1 | 62.04% | Incertidumbre | 3 polos, 2 ceros |
| BJ:1,1,1,1,1 | 61.30% | Incertidumbre | 1 polo, ningún cero |
| BJ:4,4,2,2,1 | 51.34% | Incertidumbre | 4 polos, 4 ceros |
| BJ:1,1,2,2,1 | 48.30% | Incertidumbre | 2 polos, 1 cero |

Considerando las pruebas realizadas con el modelo Box Jenkin, se selecciona el modelo BJ:2,2,3,2,1. Los criterios por los cuales se seleccionó dicho modelo son:

El análisis residual al estar dentro de los intervalos de confianza, la parsimonia al contener dos ceros y un polo, por último se tomó en cuenta el porcentaje de similitud que fue de 81.71%.

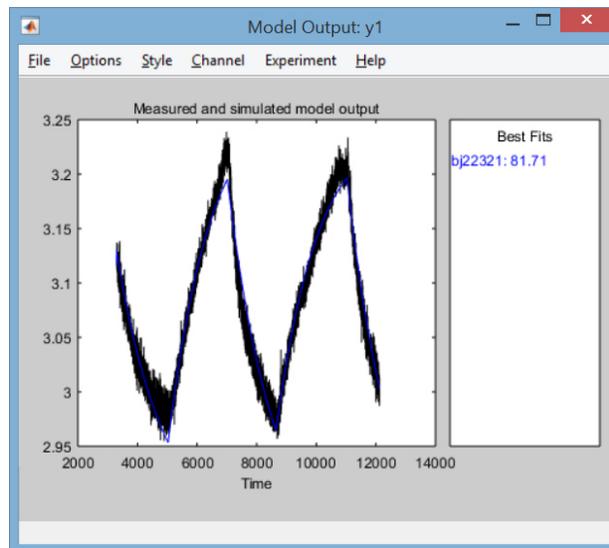


Figura 5.14: Modelo BJ:2,2,3,2,1.

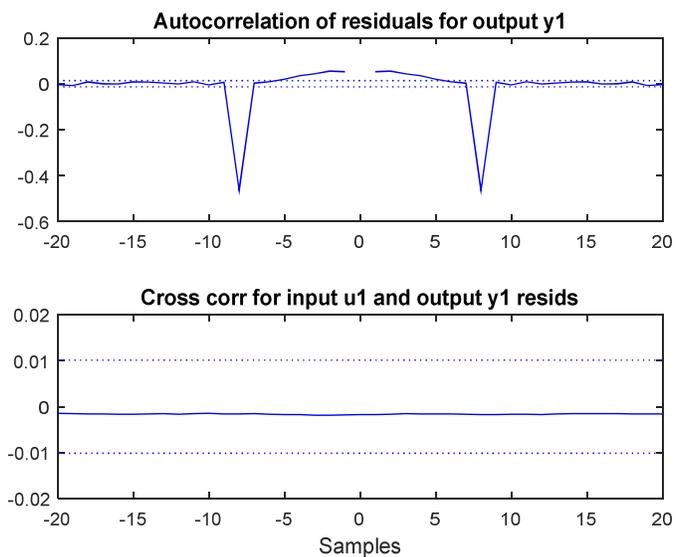


Figura 5.15: Análisis residual del modelo BJ:2,2,3,2,1.

5.2 SELECCIÓN DEL MODELO.

De acuerdo con las pruebas realizadas en la identificación paramétrica, aplicando los diferentes métodos de modelamiento se obtienen los siguientes resultados.

- **ARX:** Modelo no viable.
- **ARMAX:** Modelo no viable.
- **BJ:** Modelo aceptable.

Como se observaron en las pruebas únicamente el modelo BJ ofrece resultados aceptables. Los modelos ARX y ARMAX nos dan funciones de transferencia con polos positivos, lo cual da como resultado un sistema inestable.

De los resultados obtenidos con el modelo BJ, se selecciona el BJ:2,2,3,2,1 porque ser el de mejor porcentaje de similitud al de la planta real, por estar dentro de los intervalos de confianza y por ser la función de transferencia con el menor número de polos y ceros.

5.2.1 COMPROBACIÓN DEL MODELO BJ:2,2,3,2,1.

Se procederá a comprobar si esta función de tiene la misma dinámica que la planta real, para ello se realiza la siguiente prueba:

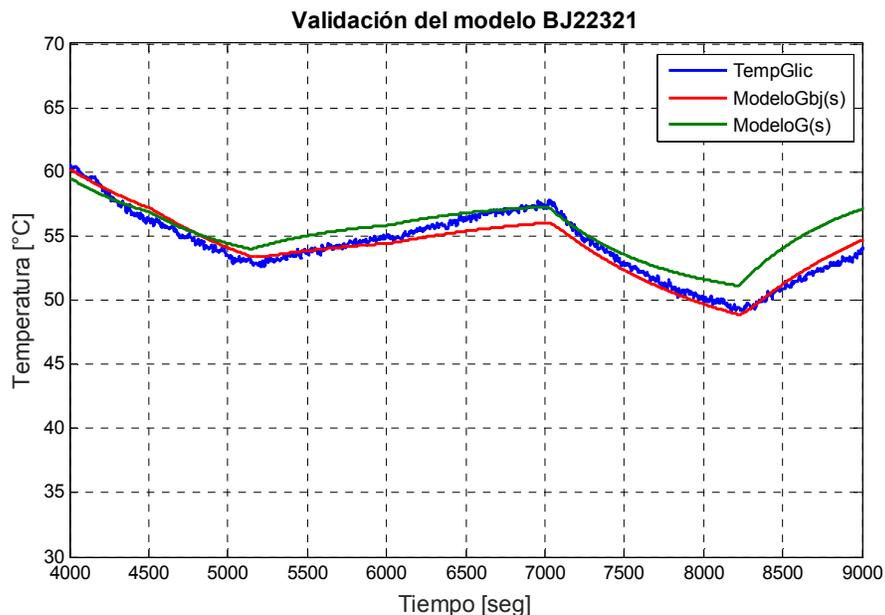


Figura 5.16: Respuestas de la planta real e identificada.

La respuesta de la planta real y del modelo BJ son muy aproximadas, lo cual nos brinda la confianza de decidir que el modelo BJ:2,2,3,2,1 es una muy buena aproximación del sistema en ganancia y dinámica.

5.2.2 COEFICIENTES DEL MODELO BJ:2,2,3,2,1.

Recordando la ecuación del modelo Box Jenkin (5.4) obtenemos los siguientes polinomios:

$$B(z) = 1.626e-06 z^{-1} - 3.03e-05 z^{-2} \quad (5.5)$$

$$C(z) = 1 + 1.8e-06 z^{-1} + z^{-2} \quad (5.6)$$

$$D(z) = 1 - z^{-1} + 0.7504 z^{-2} - 0.7501 z^{-3} \quad (5.7)$$

$$F(z) = 1 - 1.392z^{-1} + 0.3921z^{-2} \quad (5.8)$$

5.2.3 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL MODELO BJ:2,2,3,2,1.

Los polinomios obtenidos están en tiempo discreto, para pasar de tiempo discreto a continuo se utiliza el comando “d2c” de Matlab y luego el comando “tf” de Matlab para convertir los polinomios a función de transferencia. La función de transferencia queda de la siguiente forma:

$$G_{bj}(s) = \frac{0.00011191 (s - 6.313)}{(s + 3.744)(s + 0.0006712)} \quad (5.9)$$

Esta función de transferencia servirá para poder diseñar el controlador clásico PID, dicho controlador se diseñará a continuación bajo diferentes métodos y mediante simulación se ajustaran los parámetros del controlador.

5.3 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL CLÁSICO PID.

El controlador PID (Proporcional, Integral y Derivativo) es un controlador realimentado que tiene como propósito hacer que el error en estado estacionario, entre la señal de referencia y la salida de la planta, sea cero de forma asintótica en el tiempo.

Para sintonizar el PID se deben ajustar los parámetros que son: la ganancia, tiempo integral y tiempo derivativo. Los valores de los parámetros del PID se ajustan para que la respuesta del sistema en lazo cerrado tenga unas características determinadas.

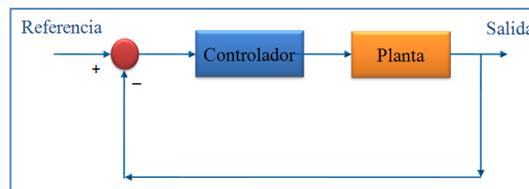


Figura 5.17: Diagrama de bloques de un sistema en lazo cerrado.

En un controlador PID el término proporcional contribuye a la reducción del error en estado estacionario. La acción integral tiene un efecto cualitativo sobre el error en estado estacionario y garantiza la anulación de este cuando la referencia es de tipo escalón. La acción derivativa permite una cierta predicción del futuro error y por tanto juega un papel anticipativo.

Los algoritmos del controlador PID que se usan con mayor frecuencia en la industria pertenecen a tres grupos (no interactivos, interactivos y paralelos). Para el diseño de los controladores PID, se utilizará la función de transferencia obtenida mediante técnicas de identificación.

5.3.1 IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR PID INTERACTIVO.

En el algoritmo de control PID interactivo, cualquier modificación de las constantes de tiempo T_i o T_d afecta a las tres acciones (proporcional,

integral y derivativa). La función de transferencia de un controlador PID interactivo tiene la siguiente forma.

$$U(S) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i S} \right) (1 + T_d S) E(S) \quad (5.10)$$

Para el ajuste de los parámetros K_p , T_i y T_d del controlador PID existen muchos métodos de sintonización como son: Ziegler y Nichols, Cohen y Coon, Integral del error (ITAE), Método del relé, etc.

Para el diseño del controlador PID se utilizará la herramienta Simulink, el ajuste de los parámetros del controlador se realizará observando la respuesta obtenida en lazo cerrado, al aplicar dicho controlador a la función de transferencia de la planta estimada $G_b(s)$ (5.9).

A continuación se muestra el diagrama de bloques del algoritmo del controlador PID interactivo.

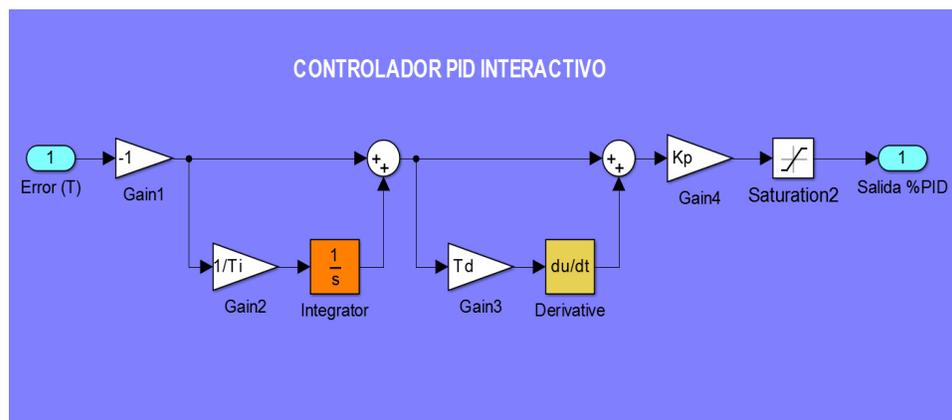


Figura 5.18: Diagrama de bloques del controlador PID interactivo.

El esquema de control en lazo cerrado del controlador PID interactivo y la función de transferencia de la planta identificada queda de la siguiente forma.

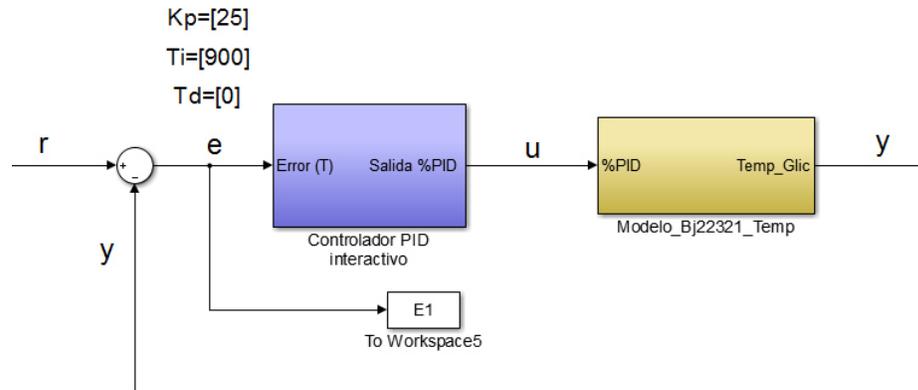


Figura 5.19: Diagrama de bloques del controlador PID interactivo, y la planta identificada en lazo cerrado.

Las pruebas realizadas previamente sirven como base para establecer los valores de trabajo en los que se desea que el sistema opere. Los parámetros del controlador se ajustarán hasta que se cumplan las siguientes especificaciones con la planta estimada:

- El tiempo de estabilización debe ser menor de 1200 segundos
- Sobre nivel porcentual menor o igual al 10%.

Para probar el desempeño del controlador se utiliza una señal multipaso con cambios en la referencia de temperatura cada 2000 segundos.

Al ajustar los parámetros del controlador se observa el efecto que produce cada una de las ganancias:

- **Acción Proporcional:** Mientras menor es la constante proporcional, mayor es el tiempo de estabilización. Con valores de K_p entre 20 y 30, se obtuvo menor tiempo de estabilización.
- **Acción Integral:** A medida de que T_i disminuye, el tiempo de estabilización y el sobre nivel porcentual son mayores. A medida que se aumenta T_i el tiempo de estabilización disminuye, el valor hasta el cual se puede incrementar es 1500, después de ese valor empieza a haber error de estado estacionario.
- **Acción derivativa:** La constante derivativa T_d , si toma valores mayores a cero, provoca picos elevados en la señal de control que va al actuador, esto sucede cuando existe cambios en la referencia.

Los valores de los parámetros del controlador PID interactivo que dan la respuesta que se muestra en la figura 5.20 son:

$$K_p = 25 \quad T_i = 900 \quad T_d = 0$$

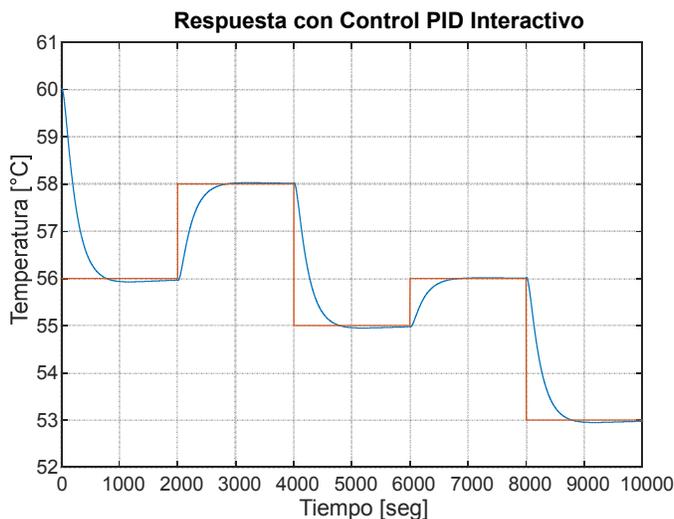


Figura 5.20: Respuesta del controlador PID interactivo.

Con el controlador PID interactivo se puede observar que el tiempo de estabilización es de 942 segundos, el error de estado estacionario es cero. El tiempo de respuesta del controlador PID interactivo cuando existen perturbaciones es de 900 segundos, la respuesta del controlador ante perturbaciones se observa en la figura 5.21.

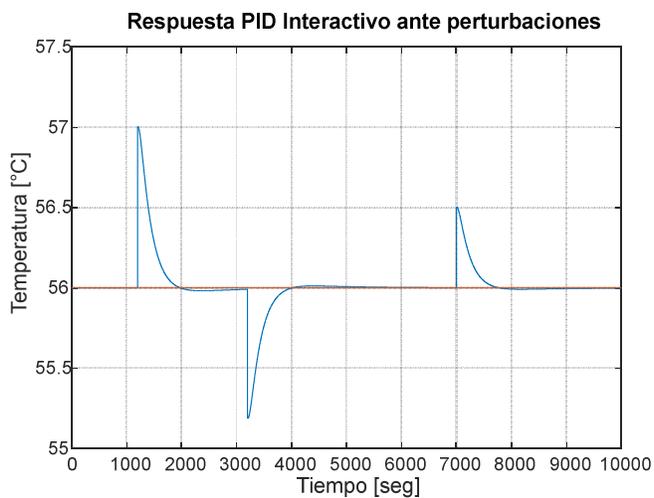


Figura 5.21: Respuesta del controlador PID interactivo ante perturbaciones.

Es importante analizar la señal de salida del controlador cuando se requiere implementar, ya que esta señal servirá para el control del drive del motor de corriente continua y debe estar dentro del rango de operación para evitar que el actuador se sature.

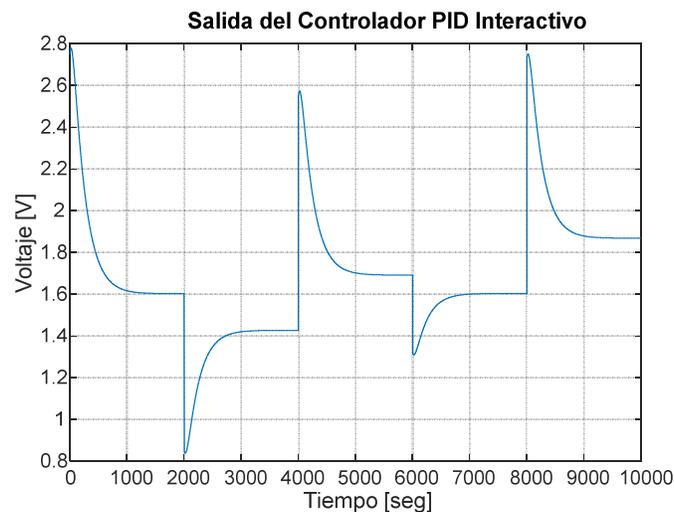


Figura 5.22: Salida del controlador PID interactivo.

El rango de voltaje del control para el PWM es de 1.25 a 2.75 V. En la figura 5.22 se observa que la señal de salida del PID está entre 0.8 y 2.75 V, cuando la referencia cambia de menos a más temperatura, la señal de control que va a la tarjeta PWM se sale del valor de rango mínimo, esto puede provocar limitaciones en el actuador, al no alcanzar los puntos de consigna deseados.

5.3.2 IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR PID NO INTERACTIVO.

En el algoritmo de control PID no interactivo las acciones de control integral y derivativa son independientes, aunque exista un parámetro del controlador, la ganancia proporcional K , que afecte a las tres acciones (proporcional, integral y derivativa). La función de transferencia de un controlador PID no interactivo tiene la siguiente forma:

$$U(S) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i S} + T_d S \right) E(S) \quad (5.11)$$

Los parámetros de interés para el controlador PID no interactivo son las constantes K_p , T_i y T_d , para ajustar dichos parámetros se utiliza la función de transferencia de la planta y se construye el controlador basado en la función de transferencia 5.11.

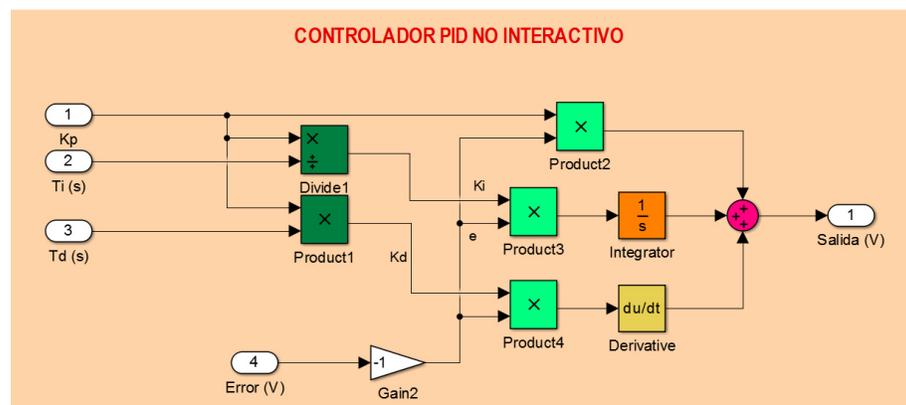


Figura 5.23: Diagrama de bloques del controlador PID no interactivo.

El esquema de diagrama de bloques del controlador PID no interactivo y la función de transferencia de la planta identificada queda de la siguiente forma.

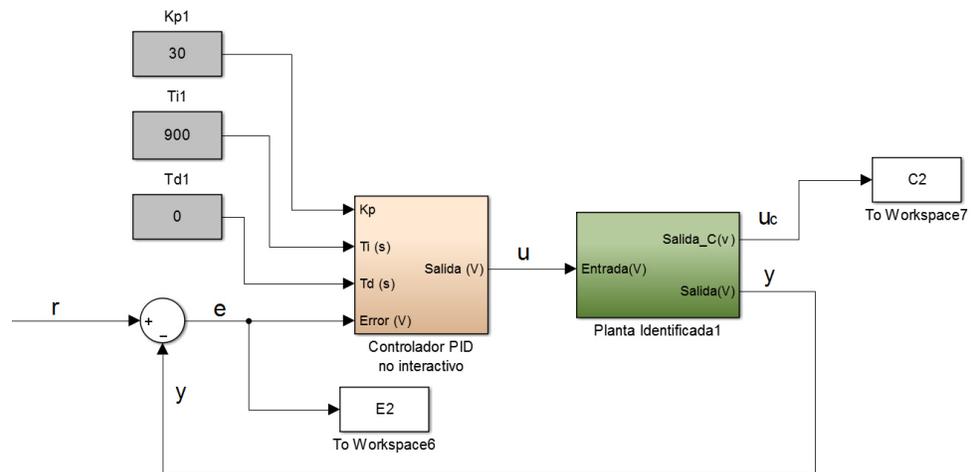


Figura 5.24: Diagrama de bloques del controlador PID no interactivo, y la planta identificada en lazo cerrado.

Las especificaciones de diseño para el controlador no interactivo son iguales que en el caso del PID interactivo. La señal de referencia para probar el controlador no interactivo es la misma que se utilizó para el PID interactivo.

Los parámetros del controlador PID no interactivo son ajustados mediante simulación en Simulink, hasta alcanzar el criterio de sintonía. Los valores de los parámetros del controlador con los que se obtuvo la respuesta de la figura 5.25 son:

$$K_p = 30 \quad T_i = 900 \quad T_d = 0$$

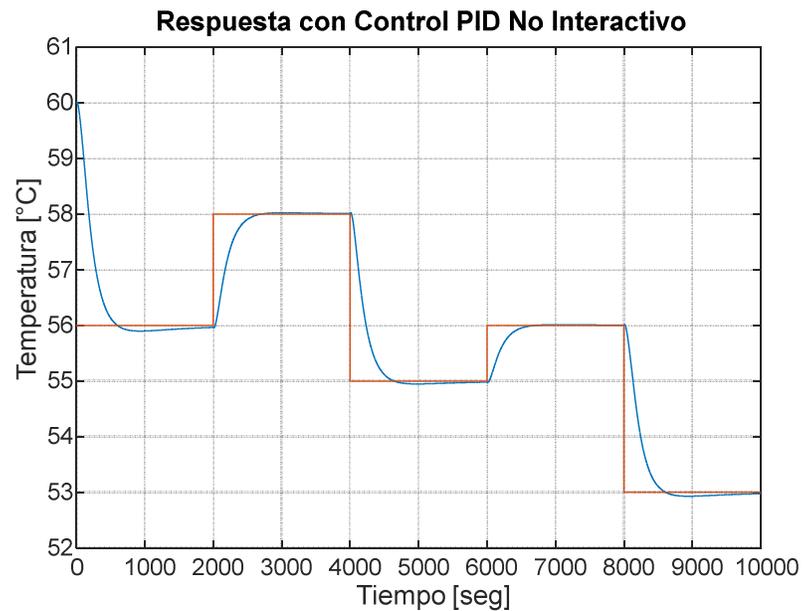


Figura 5.25: Respuesta del controlador PID No interactivo.

Con el controlador PI interactivo observamos que el error en estado estacionario es cero, el tiempo de estabilización es de 776 segundos y sobre nivel porcentual menor al 2%. El error en estado estacionario es cero.

Al ajustar los parámetros del controlador se observa lo siguiente:

- **Acción Proporcional:** Con valores pequeños, existe error en estado estacionario y mayor tiempo de estabilización, a medida que se aumenta la constante proporcional disminuye el error en estado estacionario.
- **Acción Integral:** A medida de que T_i disminuye, aumenta el sobre nivel porcentual y el tiempo de estabilización. Si se

requiere bajo sobre nivel porcentual se requiere ir aumentando T_i .

- **Acción derivativa:** El valor de T_d si se aumenta o disminuye, no afecta la respuesta del sistema en lazo cerrado, pero se observa que se ve afectada la señal de salida del controlador, alcanzando valores muy elevados de sobre-picos. Por esta razón se deja en cero esta constante para que la salida de controlador no se sature.

La respuesta del controlador PID no interactivo ante perturbaciones es de 770 segundos.

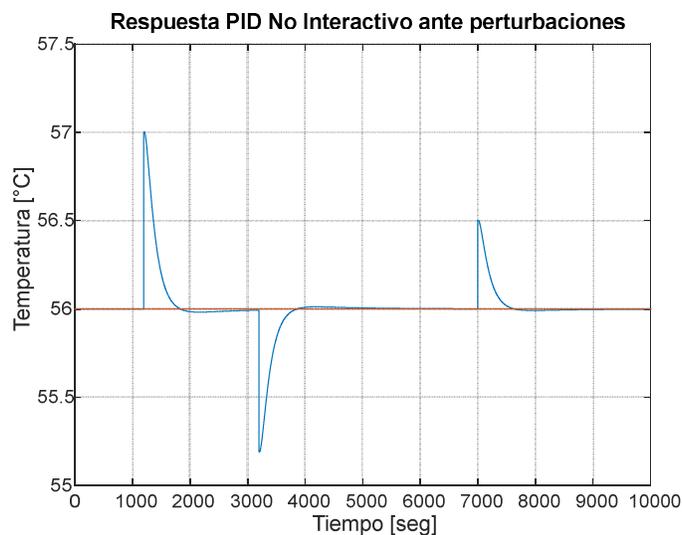


Figura 5.26: Respuesta del controlador PID no interactivo ante perturbaciones.

El voltaje de salida del controlador se muestra en la figura 5.27, el rango de voltaje está entre 0.6 y 2.75 V. Físicamente el ventilador no puede

girar a mayor velocidad que la nominal. La tarjeta de control del PWM con 2.75V, da como resultado un duty cycle de 100%.

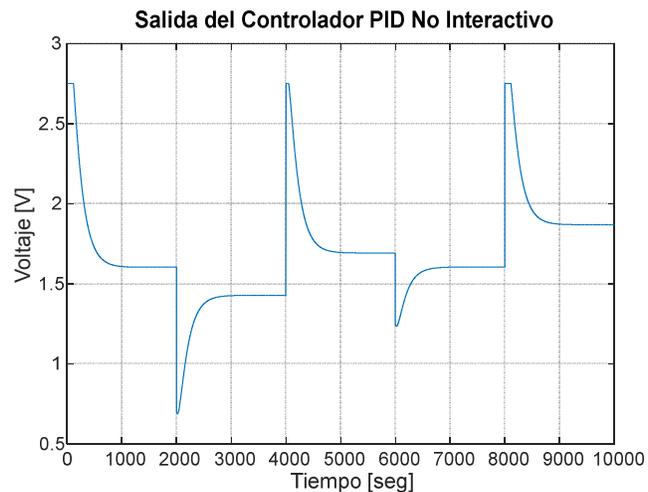


Figura 5.27: Salida del controlador PID no interactivo.

En los controladores PID interactivo y no interactivo, se pudo observar que existe saturación en el voltaje mínimo que va a la tarjeta de control PWM, el inconveniente se presentaría cuando se desea incrementar la temperatura. Este efecto de saturación en la salida del controlador se conoce como Windup del integrador y se lo analizará a continuación como una opción en caso de que se requiera al momento de implementar el controlador.

5.3.3 IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR PID ANTI WINDUP.

Todos los actuadores tienen limitaciones, el motor tiene limitada su velocidad. Para un sistema de control con amplio rango de condiciones de operación puede suceder que la variable de control alcance los

límites del actuador. Cuando esto sucede, el lazo realimentado permanece en su límite independiente de la salida. Si se utiliza un controlador con acción integral, el error seguirá siendo integrado, incrementando su valor hasta hacerse más grande o hacer “windup”.

Una forma de evitar el windup del integrador es introducir limitadores en los cambios de referencia tal que la salida del controlador nunca sature el actuador. Otra forma de evitar el windup es inhibiendo la integración cuando se satura la salida. Este método es equivalente al de recalcu lo que trabaja de la siguiente forma:

Cuando se satura la salida, se recalcula la integral y su nuevo valor proporciona una salida en el límite de saturación. El integrados no se reinicializa instantáneamente pero si dinámicamente.

A continuación se muestra el diagrama de bloques del controlador PID con anti windup basado en la técnica de recalcu lo.

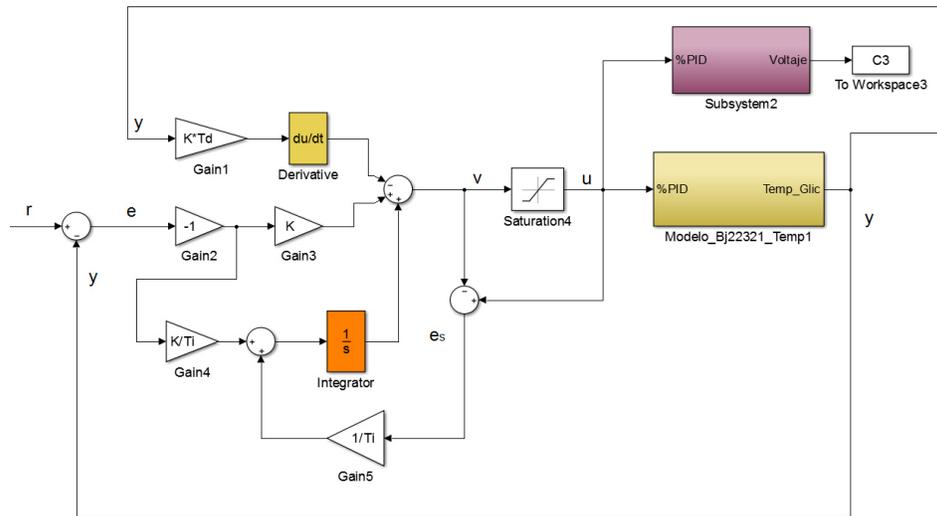


Figura 5.28: Diagrama de bloques del controlador PID con anti windup.

El sistema tiene una realimentación extra, generado por la medición de la salida real del actuador y una señal de error (e_s), que es la diferencia entre las salidas de controlador (v) y del actuador (u). La señal de e_s es realimentada a la entrada del integrador a través de la ganancia $1/T_i$. Cuando no hay saturación el error e_s es cero y no tiene ningún efecto sobre la saturación normal, cuando hay saturación e_s es diferente de cero.

Los parámetros de sintonización del controlador PID anti windup son los siguientes:

$$K = 75; \quad T_i = 900; \quad T_d = 10$$

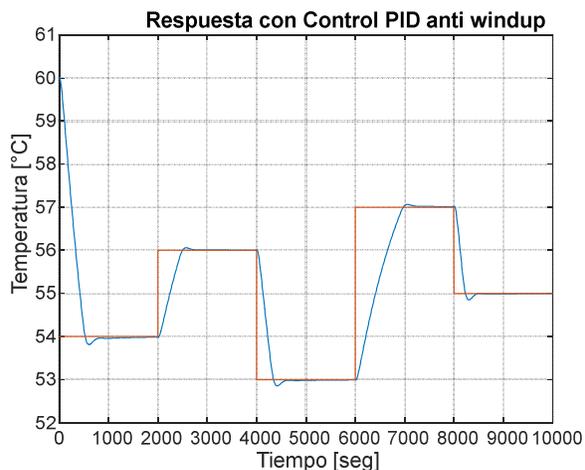


Figura 5.29: Respuesta del controlador PID con anti windup.

El desempeño del controlador PID con anti windup presenta dinámicas diferentes cuando se desea aumentar y disminuir la temperatura, el tiempo de estabilización al cambio en la referencia es de 850 segundos cuando la temperatura disminuye y cuando la temperatura aumenta el tiempo de estabilización es de 910 segundos. El sobre nivel porcentual es menor de 2%.

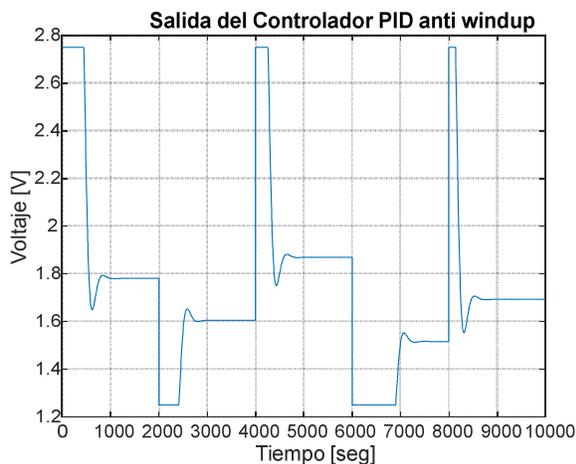


Figura 5.30: Salida del controlador PID anti windup.

La señal de salida del controlador se muestra en la figura 5.30. Esta vez se observa que los valores de la señal del controlador están dentro del rango de acción del actuador. La señal de control presenta la forma de modulación de ancho de pulso. Otro dato interesante es que la salida del controlador es 1.25V, que representa 0% del PWM cuando se desea incrementar la temperatura del sistema. A continuación se muestra la gráfica del error del controlador PID anti windup.

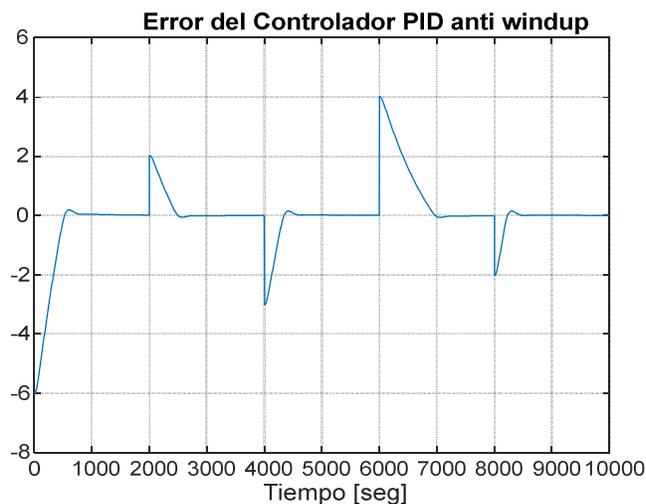


Figura 5.31: Error del controlador PID con anti windup.

De los tres tipos de controladores hallados hasta el momento se obtuvieron los parámetros de mejor ajuste para cada caso, considerando el tiempo de estabilización sobre nivel porcentual y error de estado estacionario. El rango de valores que pueden tomar las constantes proporcionales, integrales y derivativas para cada controlador, se indican en la tabla 5.4.

| Tipo de Controlador | Kp | Ti | Td |
|---------------------|--------|----------|-------|
| PID Interactivo | 10-40 | 900-2800 | 0-20 |
| PID No Interactivo | 10-40 | 600-1500 | 0-100 |
| PID Anti Windup | 50-100 | 600-1200 | 0-20 |

Tabla 5.4: Valores de *parámetros de los controladores PID.*

Estos valores servirán como referencia cuando se implemente el controlador PID en la planta de tratamiento térmico. De acuerdo a los resultados obtenidos mediante simulación, el controlador que se implementará será el PID no interactivo, en caso de que se sature la salida y esto provoque error en la acción de control, se procederá a utilizar el controlador PID anti wind up.

5.3.4 DISEÑO DE UN SERVOMECANISMO EN ESPACIO DE ESTADOS.

El controlador diseñado mediante espacio de estados servirá para comprobar la respuesta obtenida con los controladores PID interactivo, no interactivo y anti windup. No se implementará porque desde el punto de vista práctico no se utiliza en las industrias.

De la respuesta en lazo cerrado se observa lo siguiente: El tiempo de estabilización es de 2500 segundos, continúa la presencia de error en estado estacionario, la forma del gráfico 5.32 es de un sistema de segundo orden.

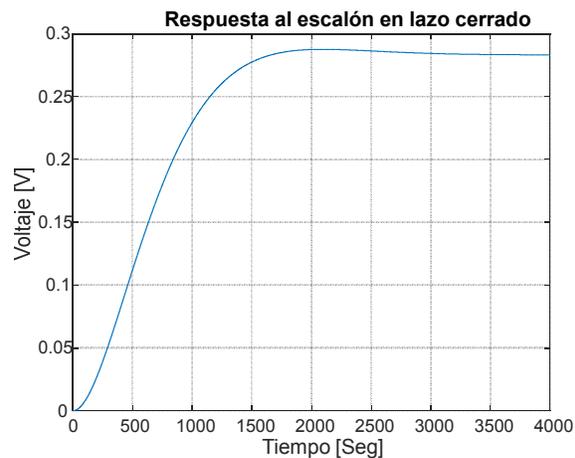


Figura 5.32: Respuesta al escalón en lazo cerrado mediante espacio de estados.

Que el error de estado estacionario no sea cero provoca que el esfuerzo del controlador en estado estacionario tampoco sea cero, como se muestra en la figura 5.33.

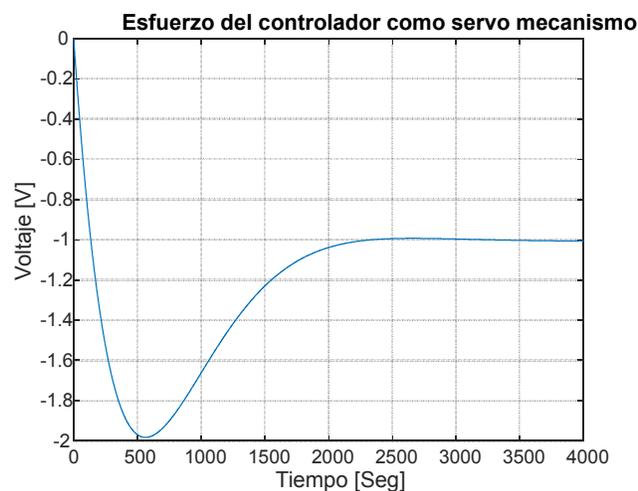


Figura 5.33: Esfuerzo del controlador con realimentación de estados.

El esfuerzo del controlador en estado estacionario es cero cuando el error en estado estacionario es cero también, por lo que nos encontramos ante un sistema cuya planta no tiene integrador.

El diseño para el control por servomecanismo incluye la inserción de un polo en el origen para garantizar que el error en estado estacionario sea cero. Además se debe obtener una constante de integración K_i paralelamente a la matriz de ganancias K . Para ello se requiere la inserción de un polo que este 10 veces más alejado en el semiplano izquierdo a los polos dominantes de segundo orden, esto es para no afectar la respuesta del sistema de segundo orden. Al insertar el polo adicional se amplía el tamaño de las matrices A y B . El código en Matlab se muestra a continuación:

```
%Diseño del controlador servomecanismo planta sin integrador
Tsc1=500; % Tiempo de estabilización
zita=0.90; % Sobrenivel porcentual
Wn=4/(zita*Tsc1); % Frecuencia
pa=[-(zita*Wn)+(sqrt(1-zita^2)*Wn)*sqrt(-1)    -(zita*Wn)-(sqrt(1-
zita^2)*Wn)*sqrt(-1)]; %polos dominantes
pb=[-10]; % Polo aumentado para el Ki del integrador
p=[pa pb]; % Nuevos polos del sistema
Ahat=[A zeros(2,1); -C zeros(1,1)]; % Matriz A aumentada de lazo
cerrado
Bhat=[B;-D]; % Matriz B aumentada de lazo cerrado
k=place(Ahat,Bhat,p); %Matriz K de realimentación de estados
k1=k(:,(1:2)); %Matriz de realimentación
```

```
ki=k(:,3); % Ganancia del Integrador
```

La implementación de este controlador resulta sencillo, ya que mediante la función de transferencia de la planta se puede llevar a espacio de estados y colocar en bloques el esquema de control mediante las matrices de estados A, B, C y D. Luego se seleccionan los polos de acuerdo a la respuesta que se desea y se calcula la matriz de realimentación K, aumentando un polo para la ganancia del integrador ya que esta planta no tiene integrador.

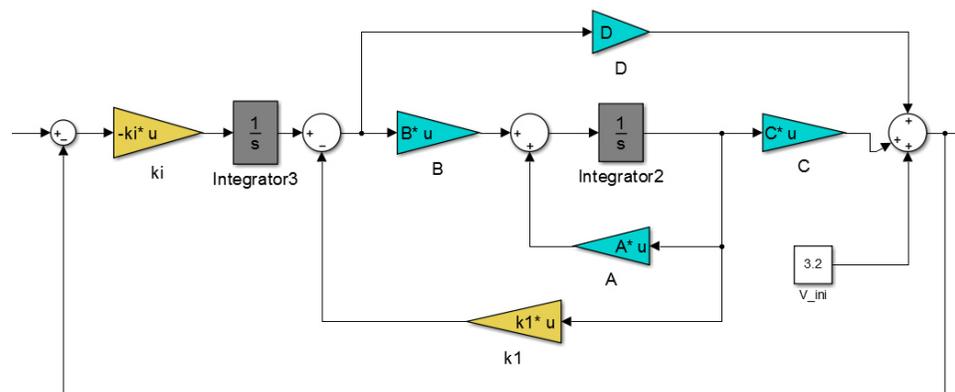


Figura 5.34: Diseño de un servomecanismo mediante espacio de estados.

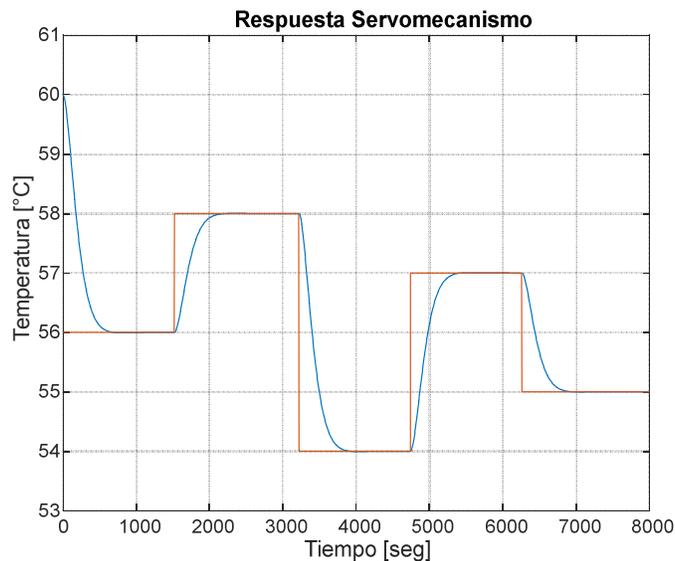


Figura 5.35: Respuesta del servomecanismo.

El integrador puro en el modelo de espacio de estados, provoca que el error en estado estacionario sea cero ante pasos en la referencia. El tiempo de estabilización es de 850 segundos y sobre nivel porcentual de cero.

Se puede resumir el desempeño de los controladores mediante simulación en la siguiente tabla.

| Tipo de Controlador | Tiempo de estabilización | Sobre nivel Porcentual | Error de estado estacionario |
|---------------------------|--------------------------|------------------------|------------------------------|
| PID Interactivo | 942 s | 0.943 | 0 |
| PID No Interactivo | 776 s | 0 | 0 |
| PID Anti Windup | 910 s | 0.245 | 0 |
| Servomecanismo | 850 s | 0 | 0 |

Tabla 5.5: Respuesta de los controladores PID clásicos.

5.4 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL CON LÓGICA DIFUSA.

Para el diseño del sistema de control con lógica difusa, se tomará como base la respuesta obtenida con los controladores PID convencionales, se pretende al menos igualar su respuesta. Para la implementación del controlador difuso, se utilizará la función de transferencia de la planta identificada.

5.4.1 DISEÑO DEL CONTROLADOR DIFUSO PARA LA TORRE DE ENFRIAMIENTO.

Para controlar el sistema, resulta conveniente utilizar como variable de entrada al controlador, el error (e) y la derivada del error (Δe). Luego cada una debe ser fusificada definiendo una cantidad de funciones de pertenencia para los diferentes estados lingüísticos. El procedimiento para definir las funciones de pertenencia es el siguiente:

- Se elige el número de funciones, de tal forma que estén representados todos los estados que la variable tome.
- Cierta grado de cruzamiento entre las funciones para no tener estados pobremente definidos.
- Se parte con funciones simétricas, es decir números impares.

5.4.2 PRIMER CASO DE ESTUDIO.

REGLAS DE CONTROL.

Para definir las reglas de base del controlador fuzzy, se considera la siguiente notación:

- Variables lingüísticas de entrada.- Se asignaron tres valores: negativo, cero y positivo.
- Variable lingüística de salida.- Se asignaron tres valores: negativo, cero y positivo.

| Δe | E | | |
|------------|----------|----------|----------|
| | Negativo | cero | positivo |
| negativo | Negativo | negativo | Cero |
| cero | Negativo | cero | positivo |
| positivo | Cero | positivo | positivo |

Tabla 5.6: Reglas de control primer caso de estudio.

FUNCIONES DE PERTENENCIA.

- El rango de la función de pertenencia del error está entre $[-10,10]$.
- El rango de la función de pertenencia de la derivada del error está entre $[-10,10]$.
- El rango de la función de la salida u está entre $[-100,100]$.
- La forma de las funciones de pertenencia son de tipo triangular.

Una vez definidas las funciones de pertenencia de las variables de entrada y salida se puede ingresar el conjunto de reglas definidas en la tabla 5.6, para el primer caso de estudio se generan nueve reglas.

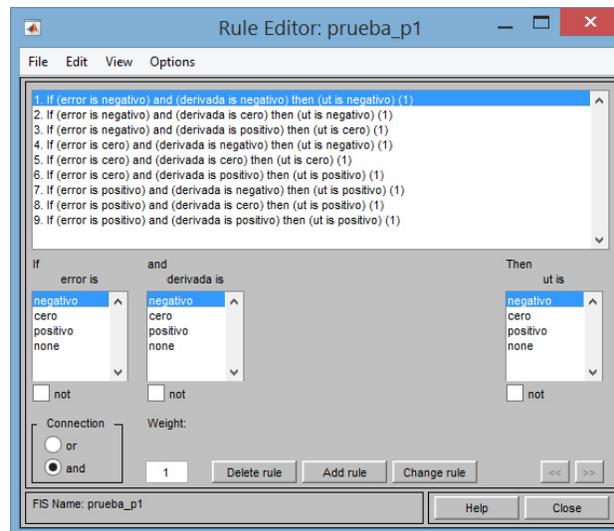


Figura 5.36: Reglas del primer caso de estudio.

MECANISMO DE INFERENCIA.

El método empleado para el mecanismo de inferencia es por factores de confianza. Dependiendo de las variables de entrada se obtiene un factor de confianza por cada regla para la variable de salida. Se empleó el operador lógico and como mínimo entre estos factores.

A continuación se muestra el estado de las reglas de control ante combinaciones en las variables de entrada.

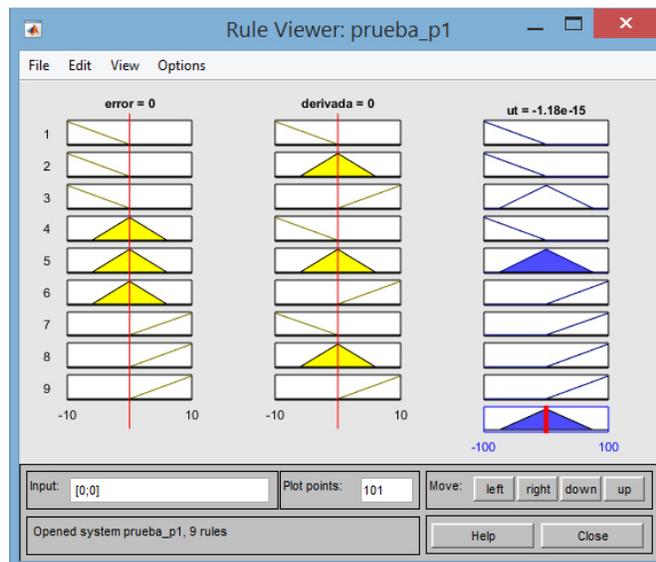


Figura 5.37: Reglas de control primer caso de estudio ante combinaciones en las variables de entrada.

Para la defusificación se empleó el método de Mamdani. Una vez que se ha creado el controlador se puede observar la superficie que representa la salida del controlador en función del error y la derivada del error.

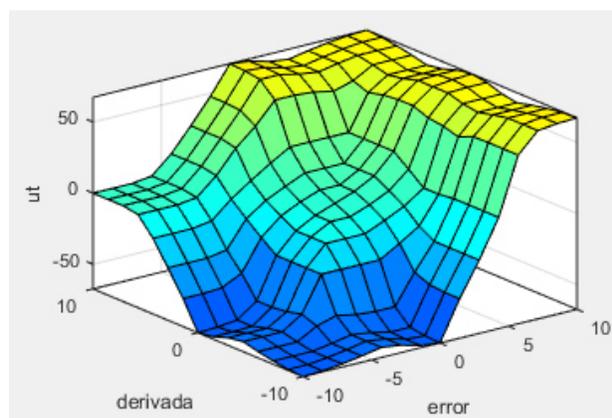


Figura 5.38: Salida del controlador en función de las variables de entrada para el primer caso de estudio.

Se genera un archivo en Matlab con la extensión .fis para luego ser implementado mediante diagrama de bloques en simulink. El código en Matlab que se obtiene para el controlador del primer caso de estudio es el siguiente:

```
[System]
Name='prueba_p1'
Type='mamdani'
Version=2.0
NumInputs=2
NumOutputs=1
NumRules=9
AndMethod='min'
OrMethod='max'
ImpMethod='min'
AggMethod='max'
DefuzzMethod='centroid'

[Input1]
Name='error'
Range=[-10 10]
NumMFs=3
MF1='negativo':'trimf',[-18 -10 0]
MF2='cero':'trimf',[-6 0 6]
MF3='positivo':'trimf',[0 10 19.58]

[Input2]
Name='derivada'
Range=[-10 10]
```

```

NumMFs=3
MF1='negativo':'trimf',[-18 -10 0]
MF2='cero':'trimf',[-6 0 6]
MF3='positivo':'trimf',[0 10 18]

```

```

[Output1]
Name='ut'
Range=[-100 100]
NumMFs=3
MF1='negativo':'trimf',[-180 -100 0]
MF2='cero':'trimf',[-75 0 75]
MF3='positivo':'trimf',[0 100 180]

```

```

[Rules]
1 1, 1 (1) : 1
1 2, 1 (1) : 1
1 3, 2 (1) : 1
2 1, 1 (1) : 1
2 2, 2 (1) : 1
2 3, 3 (1) : 1
3 1, 3 (1) : 1
3 2, 3 (1) : 1
3 3, 3 (1) : 1

```

5.4.3 SEGUNDO CASO DE ESTUDIO

REGLAS DE CONTROL.

Las reglas de control fuzzy para el segundo caso de estudio quedan definidas de la siguiente forma:

- Variables lingüísticas de entrada.- Se asignaron cinco valores: negativo grande (ng), negativo pequeño (np), cero (z), positivo pequeño (pp) y positivo grande (pg).
- Variable lingüística de salida.- Se asignaron siete valores: negativo grande (ng), negativo mediano (nm), negativo pequeño (np), cero (z), positivo pequeño (pp), positivo mediano (pm) y positivo grande (pg).

En base a los valores de las variables de entrada y salida se construye una matriz de 5x5, que contiene 25 reglas de control.

| Δe | E | | | | |
|------------|----|----|----|----|----|
| | ng | Np | Z | pp | Pg |
| ng | ng | Ng | Nm | np | z |
| np | ng | Nm | Np | z | Pp |
| z | nm | Np | z | pp | Pm |
| pp | np | z | pp | pm | Pg |
| pg | z | Pp | pm | pg | Pg |

Tabla 5.7: Reglas de control segundo caso de estudio.

FUNCIONES DE PERTENENCIA.

El rango de la función de pertenencia del error está entre [-10,10].

- El rango de la función de pertenencia de la derivada del error está entre [-10,10].
- El rango de la función de la salida u está entre [-100,100].

- La forma de las funciones de pertenencia son de tipo triangulares en los rangos intermedios y trapezoidales en los extremos.

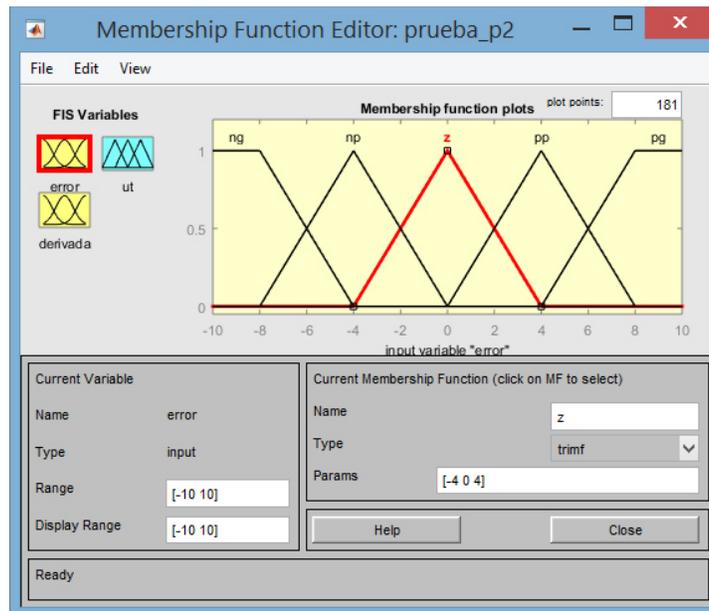


Figura 5.39: Función de pertenencia del error, segundo caso de estudio.

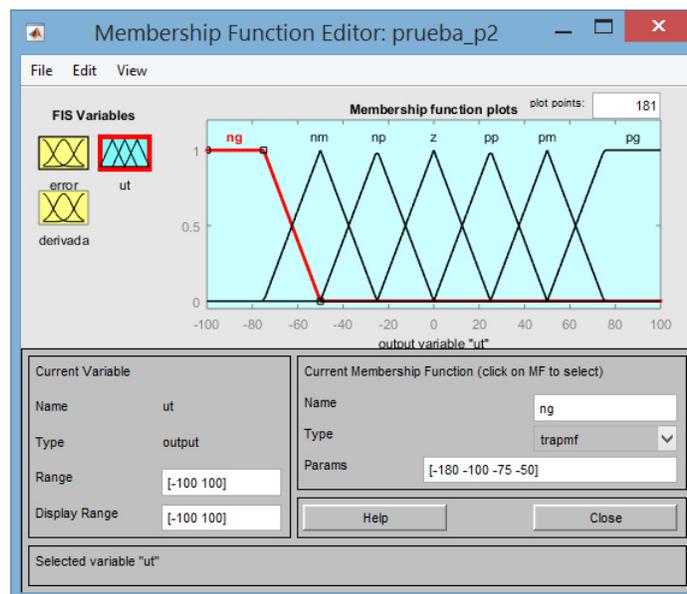


Figura 5.40: Función de pertenencia de la salida, segundo caso de estudio.

En la ventana Rule Editor se ingresan las reglas que en total son veinticinco.

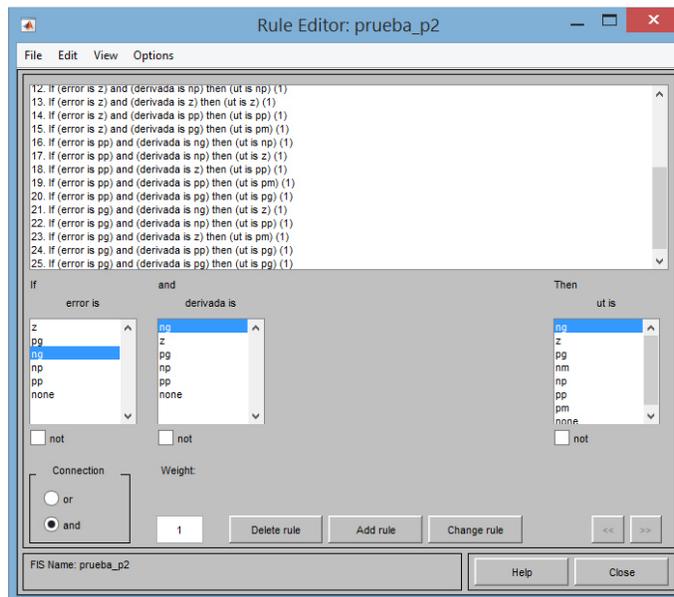


Figura 5.41: Reglas del segundo caso de estudio.

MECANISMO DE INFERENCIA.

El mecanismo de inferencia es el mismo que en el caso anterior, es decir por factores de confianza. Dependiendo de las variables de entrada se obtiene un factor de confianza por cada regla para la variable de salida.

A continuación se muestra el estado de las reglas de control ante combinaciones en las variables de entrada.

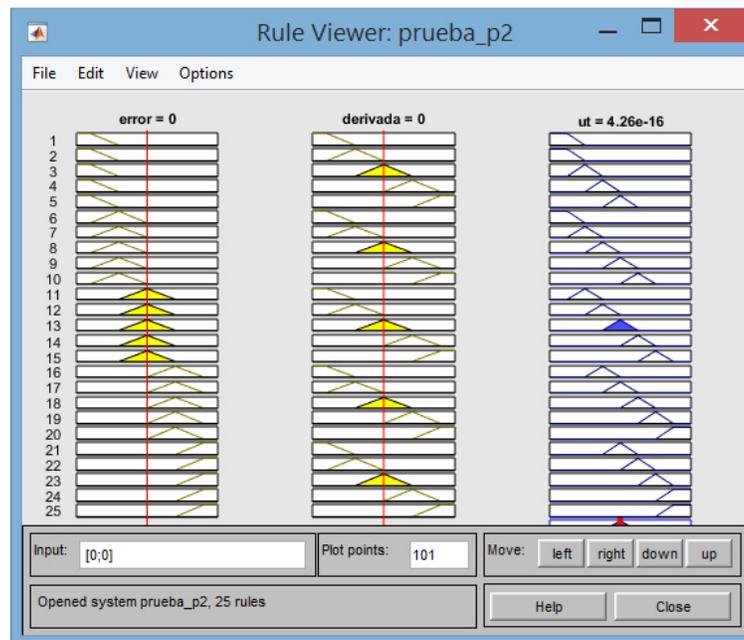


Figura 5.42: Reglas de control segundo caso de estudio ante combinaciones en las variables de entrada.

Se puede observar la superficie que representa la salida del controlador en función del error y la derivada del error.

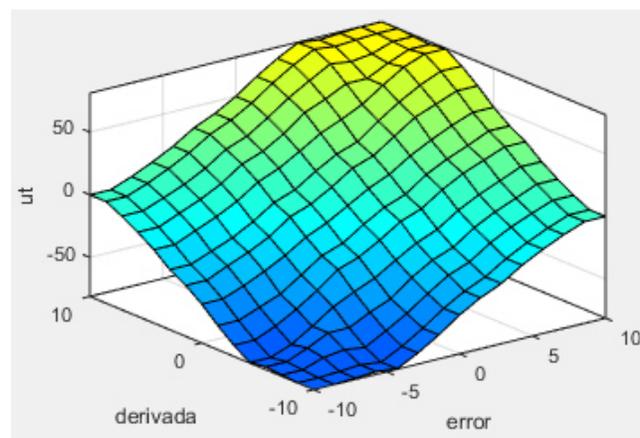


Figura 5.43: Salida del controlador en función de las variables de entrada para el segundo caso de estudio.

El código en Matlab obtenido mediante el archivo FIS, para el segundo caso de estudio, es el siguiente:

```
[System]
Name='prueba_p2'
Type='mamdani'
Version=2.0
NumInputs=2
NumOutputs=1
NumRules=25
AndMethod='min'
OrMethod='max'
ImpMethod='min'
AggMethod='max'
DefuzzMethod='centroid'
```

```
[Input1]
Name='error'
Range=[-10 10]
NumMFs=5
MF1='z':'trimf',[-4 0 4]
MF2='pg':'trapmf',[4 8 10 18]
MF3='ng':'trapmf',[-18 -10 -8 -4]
MF4='np':'trimf',[-8 -4 0]
MF5='pp':'trimf',[0 4 8]
```

```
[Input2]
Name='derivada'
Range=[-10 10]
```

```
NumMFs=5
MF1='ng':'trapmf',[-18 -10 -8 -4]
MF2='z':'trimf',[-4 0 4]
MF3='pg':'trapmf',[4 8 10 18]
MF4='np':'trimf',[-8 -4 0]
MF5='pp':'trimf',[0 4 8]
```

```
[Output1]
Name='ut'
Range=[-100 100]
NumMFs=7
MF1='ng':'trapmf',[-180 -100 -75 -50]
MF2='z':'trimf',[-25 0 25]
MF3='pg':'trapmf',[50 75.1 100 180]
MF4='nm':'trimf',[-75 -50 -25]
MF5='np':'trimf',[-50 -25 0]
MF6='pp':'trimf',[0 25 50]
MF7='pm':'trimf',[25 50 75.1]
```

```
[Rules]
3 1, 1 (1) : 1
3 4, 1 (1) : 1
3 2, 4 (1) : 1
3 5, 5 (1) : 1
3 3, 2 (1) : 1
4 1, 1 (1) : 1
4 4, 4 (1) : 1
4 2, 5 (1) : 1
4 5, 2 (1) : 1
4 3, 6 (1) : 1
```

1 1, 4 (1) : 1
1 4, 5 (1) : 1
1 2, 2 (1) : 1
1 5, 6 (1) : 1
1 3, 7 (1) : 1
5 1, 5 (1) : 1
5 4, 2 (1) : 1
5 2, 6 (1) : 1
5 5, 7 (1) : 1
5 3, 3 (1) : 1
2 1, 2 (1) : 1
2 4, 6 (1) : 1
2 2, 7 (1) : 1
2 5, 3 (1) : 1
2 3, 3 (1) : 1

5.4.4 IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR DIFUSO MEDIANTE SIMULINK.

Al momento de implementar el controlador difuso es importante tener en consideración el efecto sumatorio del error que produce la acción integral, por ello se lo incorporará a la salida del controlador difuso. A la entrada del bloque Fuzzy, irá un controlador PD con ganancias que permitan ponderar el grado de pertenencia de los conjuntos difusos. Esto permite mejorar el desempeño del controlador. La salida del integrador es la señal de control del ventilador, por lo que debe ser

escalada entre los valores que opera la planta, para este caso es entre 1.25 y 2.75 V.

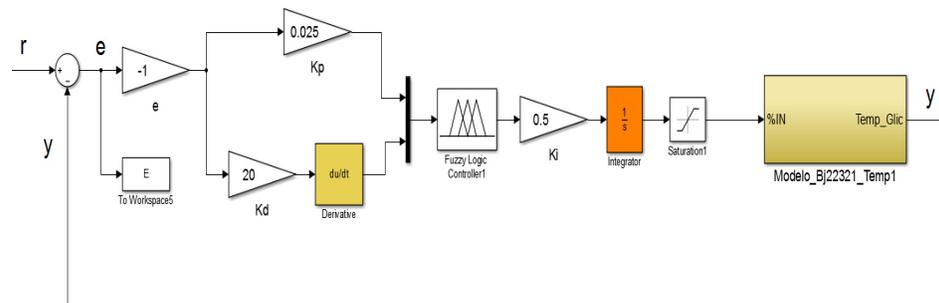


Figura 5.44: Implementación del controlador difuso en Simulink.

A continuación se hará el análisis del efecto en la respuesta ante variaciones en los parámetros K_p , K_d y K_i de la figura 5.44.

- **Parámetro K_p :** Puede tomar valores entre (0.25 y 0.025). Partiendo de un valor intermedio en el rango indicado, a medida que aumenta, la respuesta se hace oscilatoria. Cuando se acerca al valor mínimo del rango, la respuesta se hace más lenta, es decir aumenta el tiempo de estabilización.
- **Parámetro K_d :** Puede tomar valores entre (10 y 30). Partiendo de la mitad del rango se observa que a medida que se incrementa K_d , aumenta el tiempo de estabilización, A medida que K_d disminuye, aumenta el sobre nivel porcentual y disminuye el tiempo de estabilización.

- **Parámetro Ki:** Puede tomar valores entre (0.2 y 1). Partiendo de la mitad del rango, se observa que cuando Ki aumenta, disminuyen el sobre nivel porcentual y el tiempo de estabilización. A medida que Ki disminuye, aumentan el sobre nivel porcentual y el tiempo de estabilización.

Los parámetros de sintonización que dieron una respuesta similar a las obtenidas mediante los controladores PID convencionales, se detallan a continuación:

$$K_p = 0.08 \quad K_d = 20 \quad K_i = 0.5$$

Con estos valores, se obtiene la respuesta del sistema para los dos casos de controladores fuzzy calculados previamente.

- a) Respuesta del primer caso, con tres valores para las variables de entrada, tres valores para la variable de salida y nueve reglas.

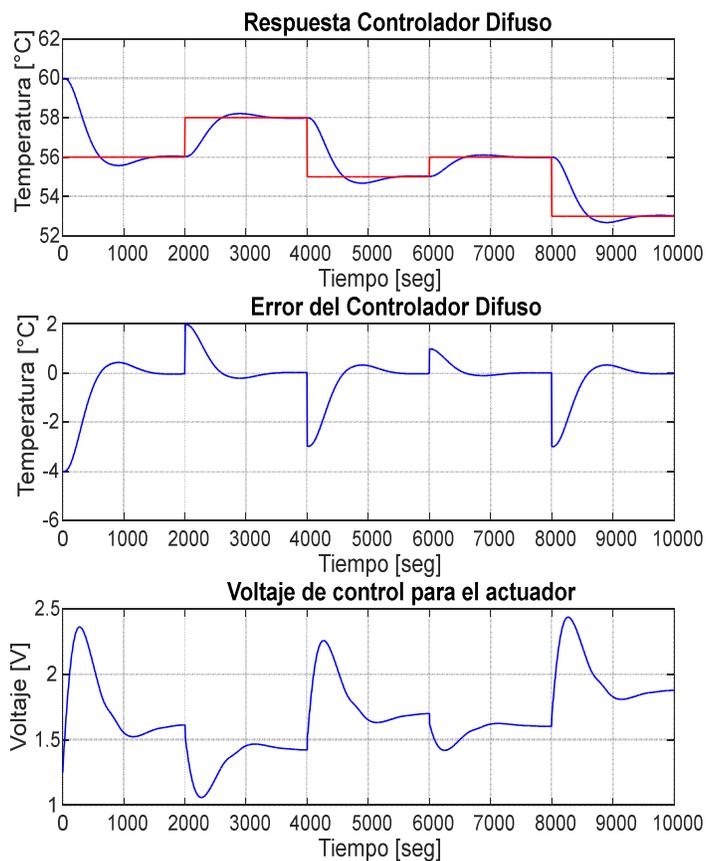


Figura 5.45: Respuestas del controlador difuso del primer caso de estudio.

- b) Respuesta del segundo caso, con cinco valores para las variables de entrada, siete valores para la variable de salida y veinticinco reglas.

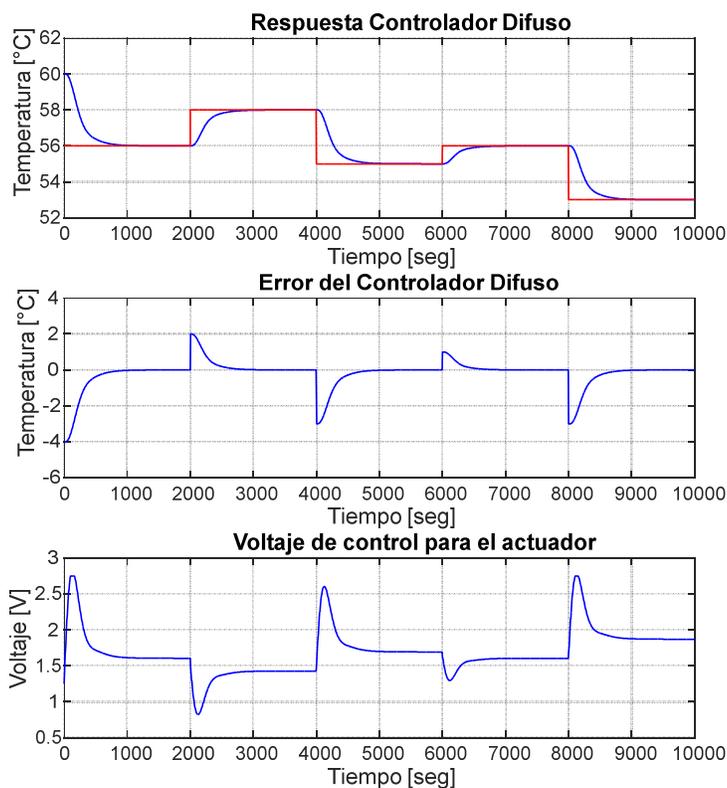


Figura 5.46: Respuestas del controlador difuso del segundo caso de estudio.

Del análisis de los dos casos de estudio podemos observar que la respuesta del sistema depende del número de funciones de pertenencia y el número de reglas, por ello que el segundo caso al contener más funciones de pertenencia y reglas, presenta menor tiempo de estabilización y sobre nivel porcentual que el primer caso. La siguiente tabla muestra el desempeño de los controladores.

| Tipo de Controlador | Tiempo de estabilización | Sobre nivel Porcentual | Error de estado estacionario | Número de reglas |
|---------------------------|--------------------------|------------------------|------------------------------|------------------|
| FUZZY PRIMER CASO | 1545 s | 0.76 | 0 | 9 |
| FUZZY SEGUNDO CASO | 830 s | 0.57 | 0 | 25 |

Tabla 5.8: Respuestas del controlador difuso del primer y segundo caso de estudio.

5.5 DISEÑO DE PRUEBAS.

Para evaluar el desempeño de los controladores PID y Difuso previamente sintonizados, se tomarán en cuenta los siguientes índices que permiten cuantitativamente tener una idea del comportamiento del sistema de control [30].

- **Error Máximo.-** Uno de los criterios de desempeño es el porcentaje de error máximo (PEM) o también llamado sobre nivel porcentual, la ecuación está dada por:

$$PEM = \frac{100|y(\max) - r(t)|}{r(t)} \quad (5.12)$$

- **Tiempo de Establecimiento.-** Es el tiempo (tss) requerido por el sistema para que el error entre en una banda del $\pm 2\%$ del valor deseado.
- **Integral del error absoluto.-** Brinda el área bajo la curva del error y está definido por:

$$e_{medio} = \frac{1}{t_f - t_i} \int_{t_i}^{t_f} |y(t) - r(t)| \quad (5.13)$$

- **Valor medio de la señal de control.-** Está definido por la siguiente expresión:

$$u_{medio} = \frac{1}{t_f - t_i} \int_{t_i}^{t_f} u \cdot dt \quad (5.14)$$

- **Derivada de la señal de control.**- Representa la rapidez con la que cambia la señal con respecto al tiempo, está definido por:

$$u' = \frac{1}{t_f - t_i} \int_{t_i}^{t_f} |du/dt| \quad (5.15)$$

Se considerará como el desempeño o comportamiento dinámico requerido del lazo de control, al que sea óptimo respecto a la funcionalidad de costo que penaliza la integral del error definida como e_medio. Esta función debe evaluarse tanto para cambios en el valor deseado, como en perturbaciones al sistema de control.

Tomando en consideración los índices mencionados previamente, se establece la siguiente tabla para realizar el análisis del desempeño de los controladores PID y Difuso.

| Referencia (°C) | Tss (seg) | | PEM (%) | | e_medio | | u_medio | | du/dt | |
|----------------------|-----------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|-------|-------|
| | PID | FUZZY | PID | FUZZY | PID | FUZZY | PID | FUZZY | PID | FUZZY |
| 56 ($\Delta T=0$) | | | | | | | | | | |
| 58 ($\Delta T=2$) | | | | | | | | | | |
| 57 ($\Delta T=-1$) | | | | | | | | | | |
| 55 ($\Delta T=-2$) | | | | | | | | | | |
| 56 ($\Delta T=1$) | | | | | | | | | | |
| 55 (Pert.) | | | | | | | | | | |
| 56 (Pert.) | | | | | | | | | | |

Tabla 5.9: Banco de pruebas para el desempeño de los controladores PID y Fuzzy.

CAPITULO VI

ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1 PRUEBAS DEL DESEMPEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL CLASICO (PID) VS. CONTROL CON LÓGICA DIFUSA EN LA TORRE DE ENFRIAMIENTO DE LA PLANTA DE PROCESOS.

Con los valores de referencia de temperatura de la tabla 5.9 se procederá a probar el desempeño de los controladores y se cuantificará los resultados obtenidos con los índices de desempeño establecidos en la sección 5.5.

Para las pruebas del control de temperatura en el rango de 55 a 60 °C, se trabaja en el rango de operación lineal de la planta, para ello se debe establecer como condición los valores descritos en la tabla 4.4.

Al sistema se lo puede perturbar de diferentes formas, por ejemplo variar el flujo del producto o del agua que circula a través de la torre de enfriamiento, pero la perturbación más significativa se da cuando se ingresa agua fresca a la torre de enfriamiento, esto es para completar el nivel en el tanque de agua enfriada producto de las perdidas por evaporación.

6.1.1 CONTROLADOR PID.

La implementación del controlador PID en la planta real se realiza en simulink mediante el siguiente diagrama de bloques.

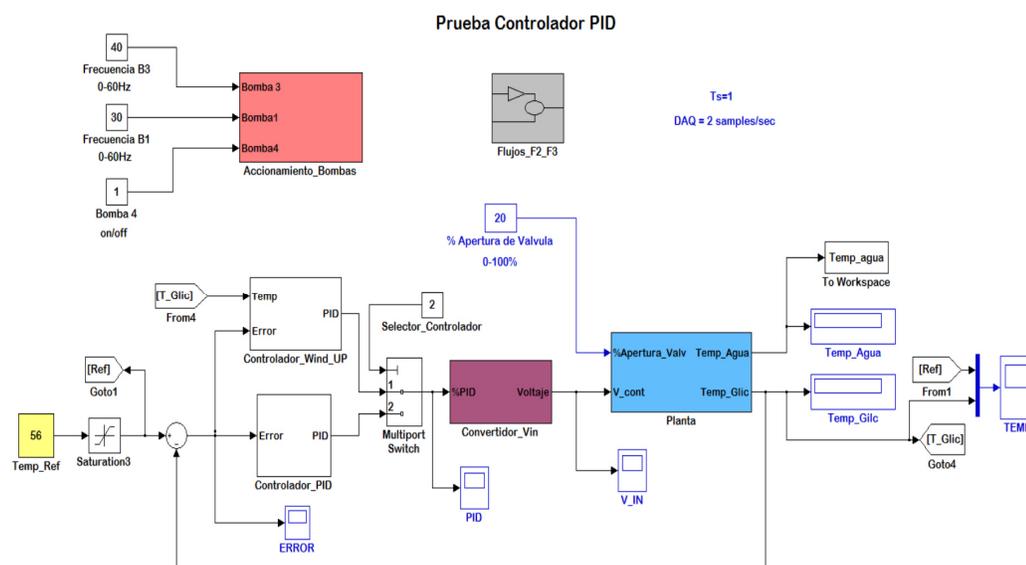


Figura 6.1: Implementación mediante simulink del controlador PID en la planta real.

Se establece un bloque para seleccionar entre el controlador PID no interactivo y el controlador PID con anti windup. La salida del PID dará como resultado una señal entre 0-100%, luego será escalada a voltaje. El voltaje que viene del

controlador PID ingresa al variador de corriente directa para el control de la velocidad del ventilador. La velocidad promedio de ventilación será de acuerdo a la temperatura que se establezca como referencia.

Para la implementación del controlador se establece como tiempo de muestreo un segundo. Se toma como punto de partida los parámetros del controlador hallados mediante la planta simulada, estos valores se ajustan hasta tener una respuesta aceptable, según los criterios de diseño.

Los valores de los parámetros a los que se ajustó el controlador PID no interactivo son:

$$K = 10; \quad T_i = 2800; \quad T_d = 100$$

La prueba realizada con el controlador PID arrojó los siguientes resultados:

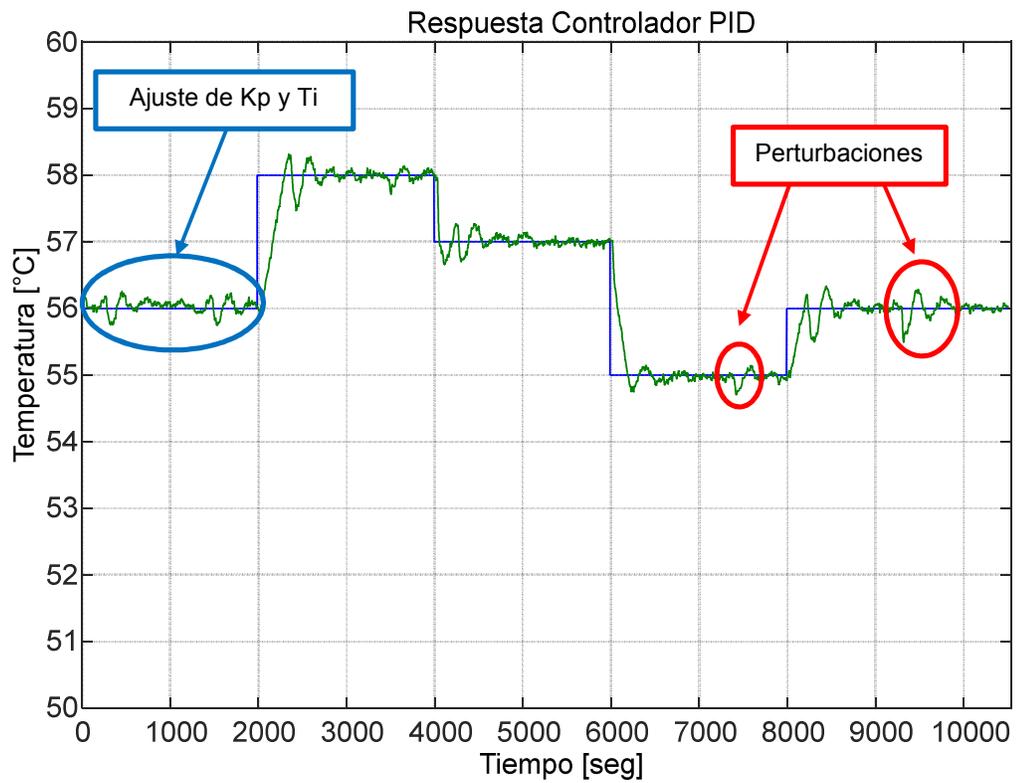


Figura 6.2: Respuesta de la planta con el controlador PID no interactivo.

Los resultados obtenidos con los índices mencionados en la sección 5.5 con el controlador PID se muestran en los gráficos a continuación:

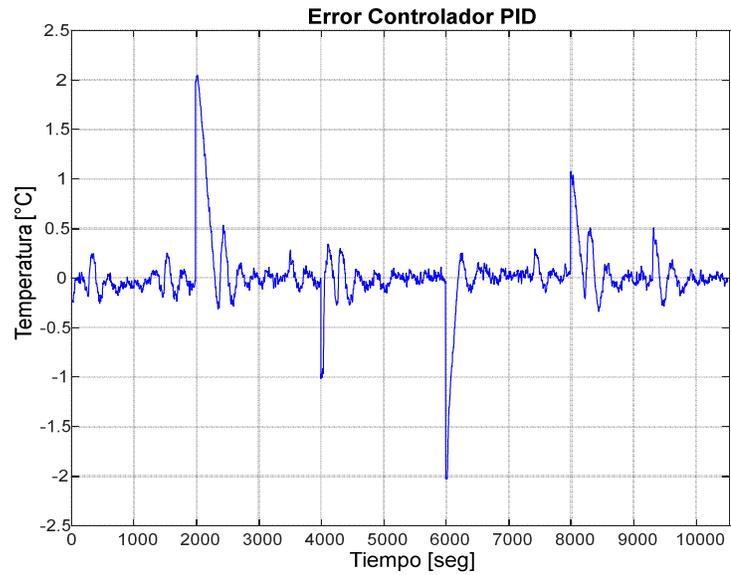


Figura 6.3: Error del controlador PID no interactivo en la planta real.

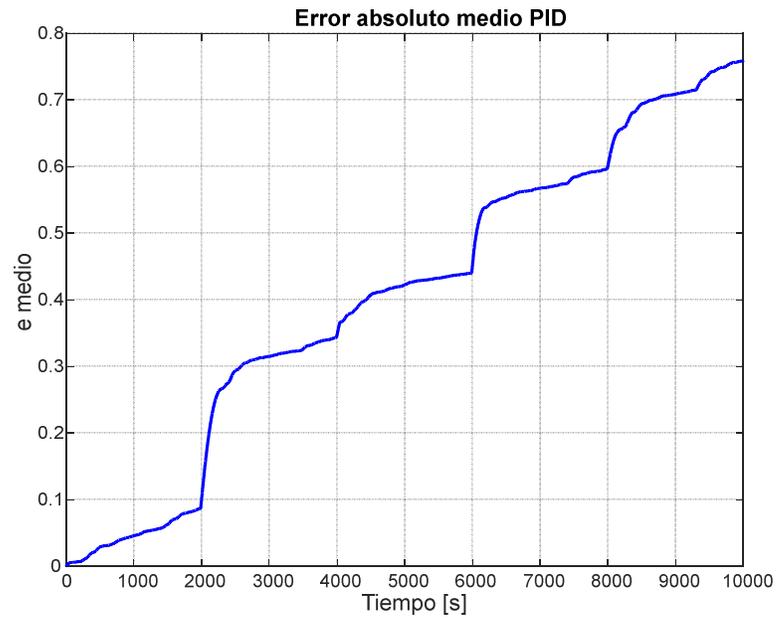


Figura 6.4: Error absoluto medio PID.

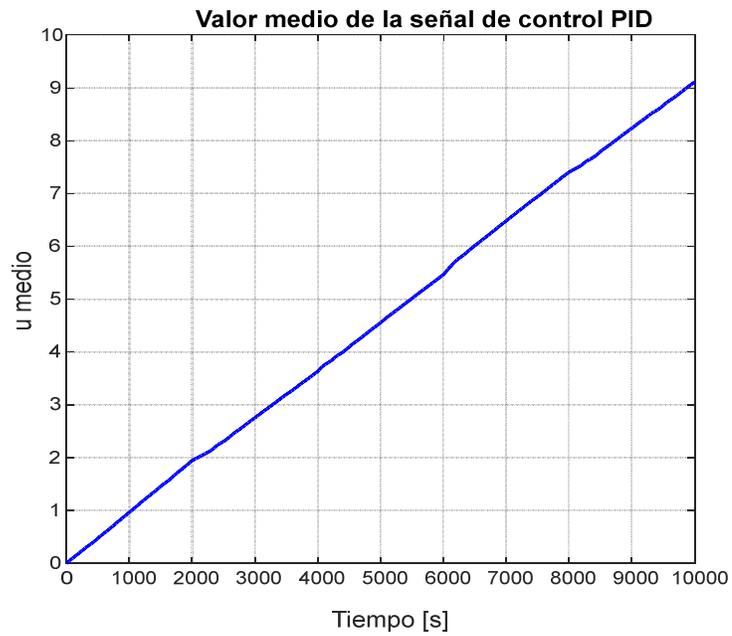


Figura 6.5: Valor medio de la señal de control u Controlador PID

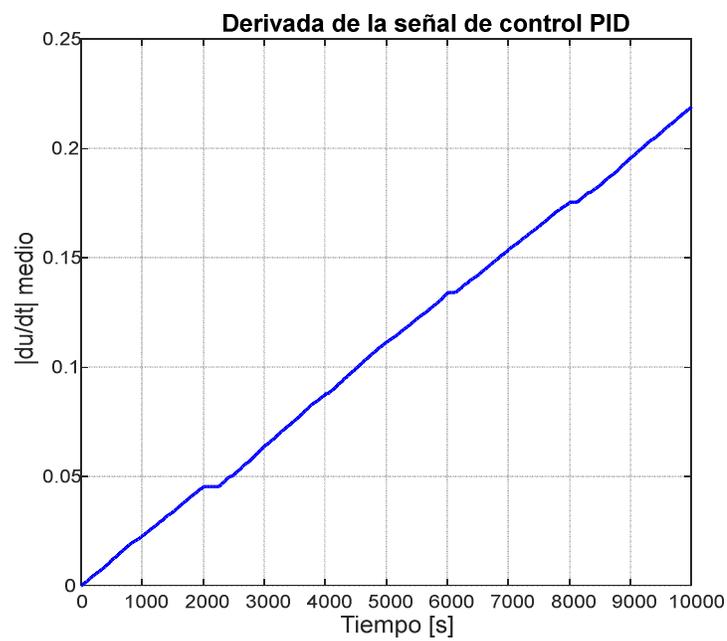


Figura 6.6: Rapidez de variación de la señal de control u Controlador PID.

6.2.2 CONTROLADOR DIFUSO.

La implementación del controlador difuso se realiza utilizando simulink, mediante el siguiente diagrama de bloques:

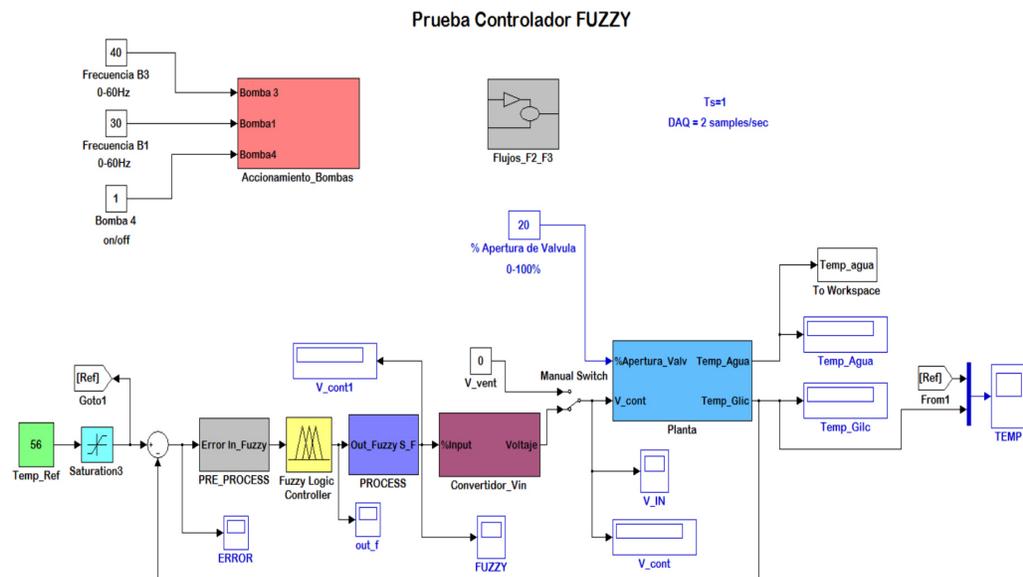


Figura 6.7: Implementación mediante simulink del controlador Difuso en la planta real.

En el diagrama de bloque se observa que existe un bloque de procesamiento previo para el controlador difuso, en este bloque se colocan ganancias para el error y la derivada del error, que fueron ajustadas con la planta simulada. En la parte de procesamiento se coloca el bloque integral junto con su respectiva ganancia. La señal procesada del controlador difuso va al bloque donde se escala a valores de voltaje para el control del drive del ventilador.

Para probar el desempeño del controlador difuso se utiliza la misma señal de referencia que se utilizó para el controlador PID. La respuesta que se obtuvo al implementar el controlador difuso, se muestra en la figura 6.8.

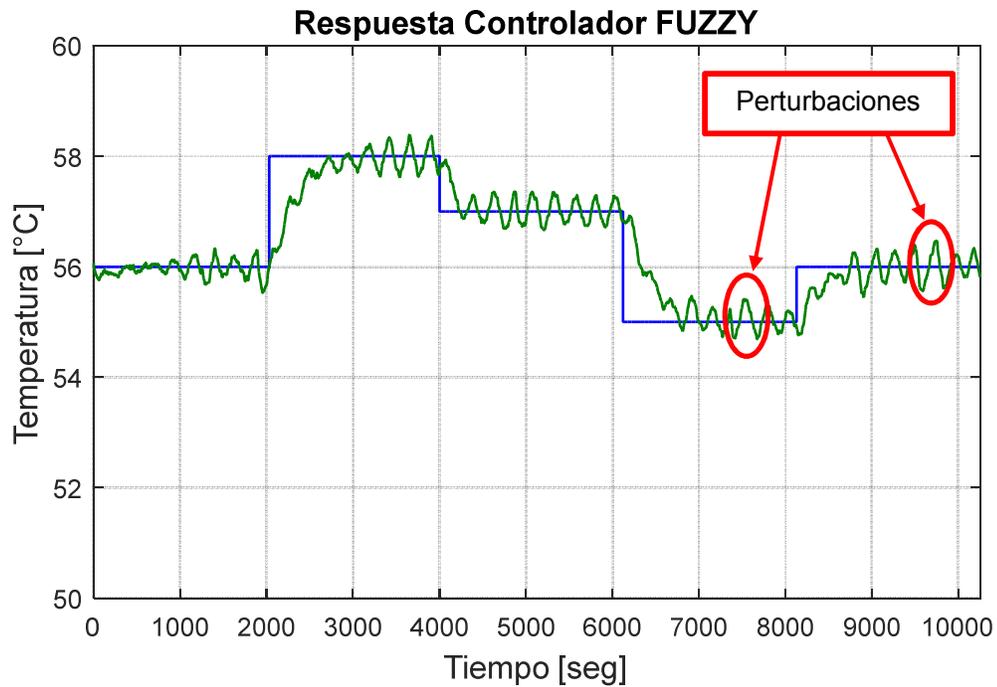


Figura 6.8: Respuesta de la planta con el controlador Difuso.

Para probar el desempeño del controlador difuso y luego compararlo con el PID, se utilizan los índices descritos en la sección 5.5. Se analizará el error, valor absoluto del error medio, valor medio de la señal de control y la derivada de la señal de control.

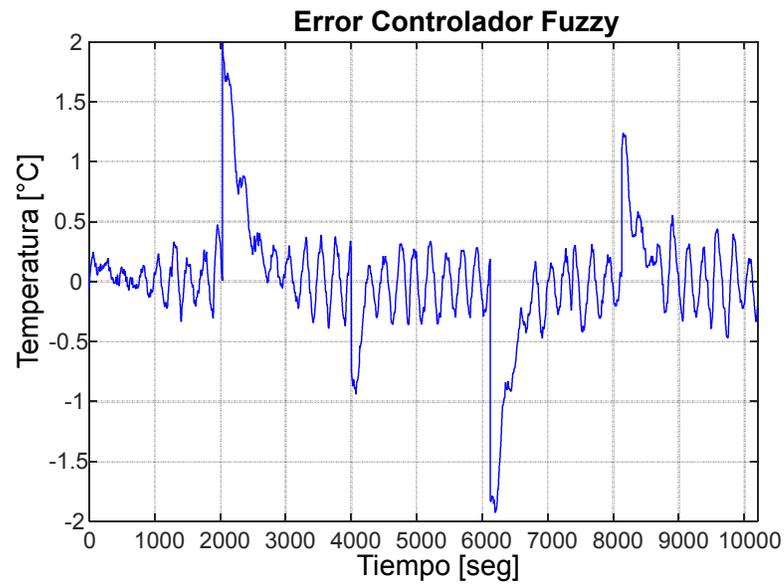


Figura 6.9: Error del controlador Fuzzy en la planta real

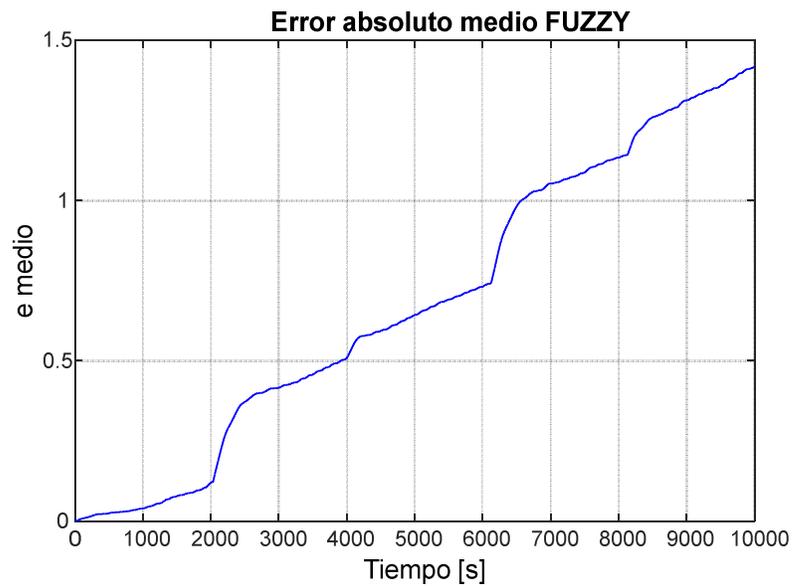


Figura 6.10: Error absoluto medio Fuzzy.

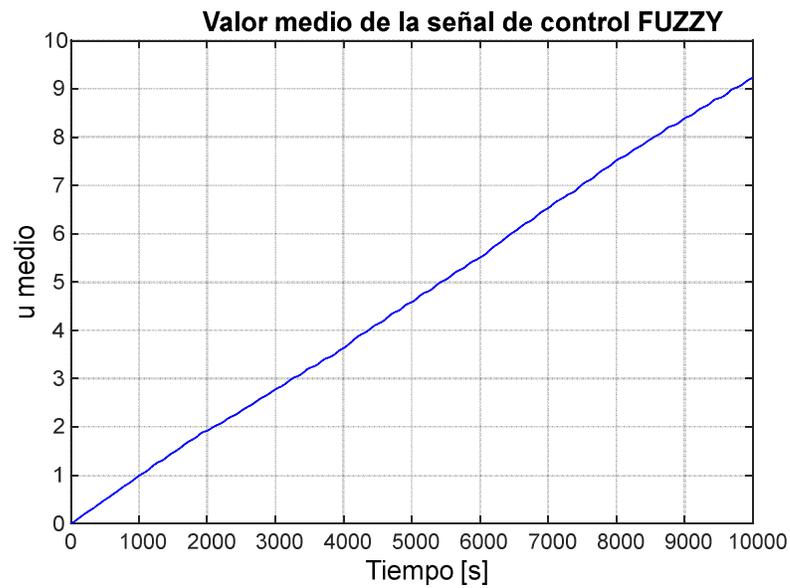


Figura 6.11: Valor medio de la señal de control u Controlador Fuzzy.

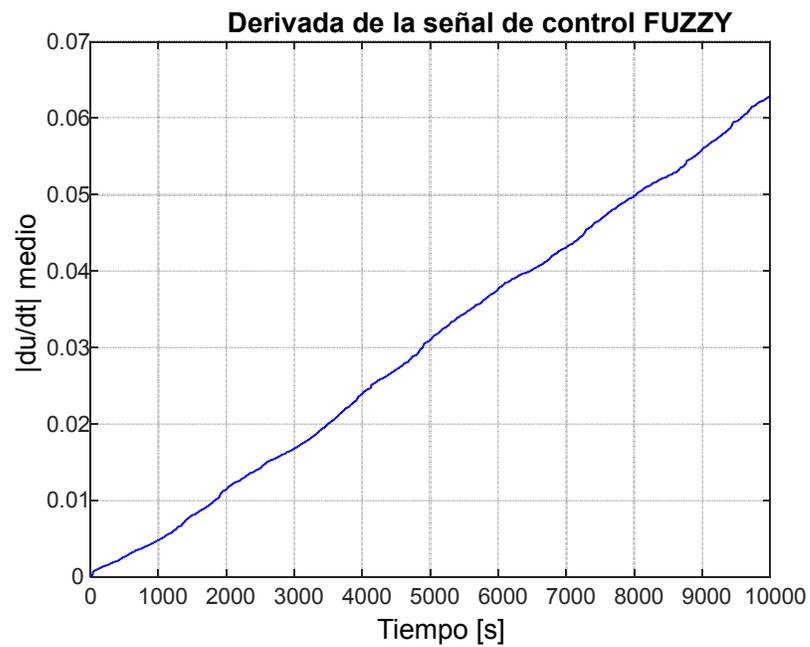


Figura 6.12: Rapidez de variación de la señal de control Controlador Fuzzy.

6.2 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LAS PRUEBAS.

Una vez realizadas las pruebas para los controladores PID y Fuzzy, se proceden a cuantificar los índices de desempeño con el propósito de realizar el análisis comparativo de ambos controladores. Los resultados de los índices de desempeño obtenidos de la implementación de los controladores se muestran en la tabla 6.1.

| Referencia (°C) | Tss (seg) | | PEM (%) | | e_medio | | u_medio | | du/dt | |
|----------------------|-----------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|-------|-------|
| | PID | FUZZY | PID | FUZZY | PID | FUZZY | PID | FUZZY | PID | FUZZY |
| 56 ($\Delta T=0$) | 635 | 735 | 0,341 | 0,589 | 0,087 | 0,125 | 1,959 | 1,912 | 0,199 | 0,012 |
| 58 ($\Delta T=2$) | 875 | 1121 | 0,448 | 0,637 | 0,256 | 0,386 | 1,701 | 1,71 | 0,689 | 0,013 |
| 57 ($\Delta T=-1$) | 644 | 445 | 0,421 | 0,614 | 0,098 | 0,234 | 1,818 | 1,894 | 0,994 | 0,014 |
| 55 ($\Delta T=-2$) | 704 | 990 | 0,273 | 0,764 | 0,134 | 0,404 | 1,917 | 1,916 | 0,842 | 0,013 |
| 56 ($\Delta T=1$) | 732 | 840 | 0,572 | 0,535 | 0,115 | 0,273 | 1,699 | 1,697 | 0,553 | 0,013 |
| 55 (Pert.) | 399 | 379 | 0,254 | 0,578 | 0,021 | 0,032 | 1,917 | 1,919 | 0,206 | 0,013 |
| 56 (Pert.) | 697 | 378 | 0,785 | 0,821 | 0,044 | 0,228 | 1,701 | 1,712 | 0,182 | 0,013 |

Tabla 6.1: Resultados de las pruebas de los controladores.

El análisis de cada uno de los índices de desempeño es el siguiente:

- **Tiempo de estabilización (Tss):** Cuando hay cambios en la referencia de temperatura el controlador PID presenta menor tiempo de estabilización que el controlador difuso, la diferencia entre el tiempo de estabilización del controlador PID y difuso es menor a 250 segundos. Sin embargo cuando hay una perturbación en el sistema el tiempo de estabilización es muy similar para ambos controladores.

- **Porcentaje de error máximo (PEM):** Comparando ambos controladores, se observa que el error máximo es mayor para el controlador difuso, esto es debido a que la señal que sale del controlador difuso varía entre -100 y 100, en este rango el controlador difuso hace un barrido dependiendo del error, por ello se obtuvo una respuesta oscilatoria de la temperatura de la glicerina alrededor del valor fijado en la referencia (figura 6.8). En cambio la señal del controlador PID varía entre 0 y 100%, se observa la respuesta con menor porcentaje de sobre pico en la figura 6.2.
- **Error medio:** En el caso del promedio del error se observan valores similares para ambos controladores, siendo un poco mayor el del controlador difuso.
- **Valor medio de la señal de control:** Se observa que en cada una de las referencias de temperatura y en las perturbaciones, el valor promedio de la señal de control es igual para ambos controladores.
- **Rapidez de cambio de la señal de control:** La rapidez de cambio de la señal de control PID es mucho mayor que la del controlador difuso, ante cambios en la referencia la señal de control del PID cambia muy rápido producto de la acción integral para hacer que el error en estado estacionario sea cero. Mientras mayor es el error más rápido cambia la señal de control del PID, en cambio en el controlador difuso se observa que el cambio en la señal de control es el mismo en todas las

referencias y perturbaciones establecidas en el banco de pruebas. Por ello la diferencia en el tiempo de estabilización del controlador PID y difuso.

6.3 GENERALIZACIÓN DE LOS RESULTADOS.

Los resultados muestran que los controladores PID y Difuso controlan la temperatura de la Glicerina y la del agua que circula en la torre de enfriamiento en el rango de 55 a 60 °C.

La selección de con que controlador se va a trabajar dependerá de la precisión con la que se desea que el sistema opere. Como se pudo observar el rango de oscilación alrededor de la referencia de temperatura y el tiempo de estabilización es mayor con el controlador difuso que con el PID. El valor promedio el error es similar para ambos controladores.

Si se desea que el sistema responda rápido ante cambios de referencia el PID es muy útil, dependiendo de la diferencia del error varia la rapidez de cambio de la señal de control. El controlador difuso presenta la misma rapidez de cambio ante variaciones en la referencia dentro del rango de control del sistema.

Es importante cuantificar la potencia promedio del ventilador de la torre de enfriamiento con los controladores, con el propósito de determinar si se disminuye el consumo energético.

El voltaje promedio de trabajo de la señal de control para ambos controladores es de 1.82 V, con la tabla 6.3 podemos observar que el voltaje que se aplica al ventilador con esta señal de control es en promedio 4 V, es decir la tercera parte del voltaje nominal.

| PWM | V_CONTROL | V_OUT |
|-----|-----------|-------|
| 0 | 1,25 | 0 |
| 20 | 1,55 | 2 |
| 40 | 1,85 | 4 |
| 60 | 2,15 | 6 |
| 80 | 2,45 | 8,5 |
| 100 | 2,75 | 10,8 |

Tabla 6.2: Voltajes de operación de tarjeta de control PWM.

La potencia promedio de trabajo del ventilador con los controladores es la novena parte de la potencia nominal de 80 [w]. Para el control de temperatura entre 55 y 60 °C se necesita en promedio una potencia de 8.88 [w]. Con esto se observa que al implementar el control de temperatura en el sistema se tiene ahorro energético.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES:

1. Mediante pruebas de funcionamiento se observó que la planta de tratamiento térmico de líquidos presenta un comportamiento estable, es decir existen valores máximos y mínimos a los cuales llega la temperatura del producto. Partiendo de que el sistema es estable, se realizaron los estudios posteriores de los controladores PID y Difuso.
2. La interfaz gráfica en Labview permitió monitorear las variables de la planta, escalar las señales provenientes de los diversos sensores de la planta así como escalar las salidas a los actuadores. La interfaz permitió almacenar los datos para posterior procesamiento y análisis.
3. Para analizar el aporte de enfriamiento entre la válvula y el ventilador se realizaron siete pruebas experimentales, dando como resultado que el ventilador aporta más extracción de calor del agua caliente que la válvula reguladora de flujo. Por esta razón se dejó fija la válvula con una

apertura del 20 %, para que el sistema opere de forma lineal y controlar únicamente la velocidad del ventilador.

4. En vista de que resultó complicado modelar el sistema mediante ecuaciones diferenciales, se optó por identificar la planta y se obtuvo un modelo que describe la dinámica del sistema mediante la estimación paramétrica Box Jenkin (BJ22321). Las razones por la que se escogió este modelo fue por la parsimonia, por estar dentro de los intervalos de confianza y por tener el mejor porcentaje de similitud con el modelo real. Este modelo se utilizó para el diseño de los controladores PID y Difuso.
5. Se diseñaron diversos controladores PID basados en los algoritmos Interactivo, No Interactivo y Anti windup. De todos ellos el que se escogió para implementarlo en la planta mediante Simulink fue el controlador PID No Interactivo. La selección se realizó basándose en el tiempo de respuesta del sistema ante cambios en la referencia y perturbaciones,
6. Se diseñaron dos controladores difusos, uno basado en nueve reglas con tres funciones de membresía para las entradas y salidas, para el segundo controlador se utilizaron veinticinco reglas con cinco funciones de membresía en la entrada y siete a la salida. El controlador difuso que fue implementado en la planta fue el que tenía veinticinco reglas de control, la razón fue por el tiempo de estabilización que era menor que el primer caso de estudio.

7. El banco de pruebas que se diseñó sirvió para probar el desempeño de los controladores PID y Difuso ante cambios en la referencia y perturbaciones. Los índices de desempeño establecidos permitieron cuantificar la respuesta de los controladores implementados en la planta real.
8. Los resultados obtenidos de la implementación de ambos controladores muestran que se puede controlar la temperatura de la Glicerina y del agua a través de la torre de enfriamiento en el rango de 55 a 60 °C, este es el rango de operación lineal de la planta que fue determinado mediante pruebas experimentales.
9. Los indicadores muestran que el controlador PID presenta mejor desempeño que el controlador Difuso ante cambios en la referencia y perturbaciones, esto es debido a que la rapidez de cambio de la señal de control del PID es mayor que el controlador Difuso. Sin embargo los índices de los valores promedios del error y la señal de control del ventilador, son muy similares.
10. Los resultados obtenidos mediante el banco de pruebas, muestran que el voltaje promedio que se aplica al ventilador con los controladores PID y Difuso es de 4V, es decir que hubo un ahorro energético de la novena parte de la potencia nominal.

RECOMENDACIONES:

1. Para realizar este trabajo se escogió un rango de operación donde el sistema sea lineal, para ello se fijaron ciertas condiciones. Si se desea realizar otros experimentos se puede escoger diferentes rangos de operación donde el sistema puede ser lineal o no lineal, de ello dependerá el algoritmo que se utilice para controlar el sistema.
2. Algo que se observó al realizar los experimentos, fue que la cantidad de agua que se evapora producto de la extracción de calor es considerable para la dimensión del tanque de depósito de agua de la torre de enfriamiento, por lo que a futuro podría instalarse un sistema de aporte de agua con control de nivel.
3. Al realizar las pruebas del controlador es importante fijar como referencia los valores establecidos para que la planta opere en el rango lineal establecido en este trabajo, fuera de este rango puede que los controladores no funcionen de forma correcta.
4. Se escogió como aporte de calor al sistema una llama que funciona a gas, la potencia de la llama dependerá del nivel de gas en el tanque, por ello es importante observar la temperatura del agua caliente. Si no hay buen aporte de calor el sistema tardaría mucho en responder cuando se fija como referencia una temperatura mayor a la que se esté trabajando, esto podría provocar no linealidad.

5. Con el controlador PID evitar dar cambios en la referencia de temperatura con pasos mayores a cuatro grados Celsius, ya que se satura la señal de control y no se puede alcanzar la referencia en el tiempo que se desea que el sistema se estabilice, si se desean cambios mayores a cuatro grados se deben dar pasos progresivos de dos grados hasta alcanzar la referencia que debe estar dentro del rango de linealidad de la planta.
6. Con el controlador difuso al hacer cambios en la referencia no se satura la señal de control, pero la respuesta será mucho más lenta comparada con la que se obtendría con el PID.
7. Para probar el desempeño de los controladores se escogió como perturbación ingresar agua fresca al tanque de almacenamiento de agua de la torre de enfriamiento, pero se pueden escoger otras perturbaciones como variar el flujo del producto o el flujo del agua a través de la torre de enfriamiento, otra perturbación podría ser la temperatura ambiente.
8. Se puede diseñar una interfaz gráfica de usuario GUI en Matlab para la implementación de los controladores, ya que la interfaz gráfica de usuario que se realizó en Labview solo permite monitorear las variables provenientes de los sensores y manipular los actuadores.
9. La implementación de los controladores PID y Difuso también se puede realizar mediante microcontroladores. Utilizando filtros electrónicos, se

puede mejorar la lectura de las señales provenientes de los sensores. Con los microcontroladores ya no se tendría que tener conectado el computador para poder ejercer alguna acción de control, lo que si sucede cuando se implementa un controlador con Simulink.

10. Para aumentar el tiempo de contacto entre el agua y el aire, se podría colocar el relleno que va al interior de las torres de enfriamiento industriales.
11. Para diseñar un controlador PID se debe utilizar la función de transferencia de la planta, mientras que para diseñar un controlador difuso se debe tener cierto grado de experiencia del proceso, de esa forma resulta más sencillo establecer las reglas de control.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. FOUST, *PRINCIPLES OF UNIT OPERATIONS*, Second Edi. 1980.
- [2] F. Carías, “ANÁLISIS TERMODINÁMICO Y PROPUESTA DE MEJORA DE EFICIENCIA DE TORRE DE ENFRIAMIENTO, EN EL ÁREA DE COGENERACIÓN, INGENIO TULULÁ,” Universidad de San Carlos de Guatemala , 2010.
- [3] R. Perry and D. Green, *Chemical Engineers Handbook*. McGraw-Hill, 1994.
- [4] J. Ortiz, Herdy Briceño, “Automatización de una torre de enfriamiento,” Universidad simón bolívar decanato de estudios profesionales coordinación de ingeniería de materiales, 2012.
- [5] J. Maldonado, “DISEÑO Y FUNCIONAMIENTO DE LAS TORRES DE ENFRIAMIENTO EN PLANTAS DE PROCESO,” UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO , 2006.
- [6] L. Martinez and F. Calzada, “DISEÑO DE UN SISTEMA INDUSTRIAL DE ENFRIAMIENTO CON AGUA DE REFRIGERACIÓN PARA UN COMPLEJO INDUSTRIAL EN LIMA, PERÚ,” ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERIA (ICAI) , 2012.
- [7] C. Salas, “Torres de enfriamiento de agua,” UNIVERSIDAD DE LOS

ANDES VENEZUELA, 2012.

- [8] J. Restrepo, "DISEÑO OPERACIONAL DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO ADIABÁTICA DE AGUA DE TIRO MECÁNICO INDUCIDO CONTRACORRIENTE A ESCALA DE LABORATORIO," UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, 2011.
- [9] Gonzales Núñez, "Estudio Comparativo de los Intercambiadores de Calor de Coraza-tubos y los de Placas Planas," UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS, 2007.
- [10] A. Jaramillo, "INTERCAMBIADORES DE CALOR," p. 33, 2007.
- [11] P. Abarca, "Sistemas de Control Automático," *El ABC LA Autom.*, pp. 1–2, 2012.
- [12] W. Walker, *Principles of Chemical Engineering*. McGraw-Hill, 1923.
- [13] F. Merkel, *Verdunstungskühlung*. Berlin: VDI Forschungsarbeiten, 1925.
- [14] Al-Nimr, "Modeling the dynamic thermal behavior of cooling towers containing packing materials. *heat transfer engineering*," 1999.
- [15] Milosavljevic, "A comprehensive approach to cooling tower design. *Applied Thermal Engineering*," pp. 899–915, 2001.
- [16] C. Kloppers and G. Krö Ger, "A critical investigation into the heat and mass transfer analysis of counterflow wet-cooling towers," 2004.

- [17] C. Kloppers and G. Kröger, “The Lewis factor and its influence on the performance prediction of wet-cooling towers,” *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 44, pp. 879–884, 2005.
- [18] P. Fisenko and A. Brin, “Simulation of a cross - flow cooling tower performance,” 2007.
- [19] C. Kranc, “Optimal spray patterns for counterflow cooling towers with structured packing,” *Appl. Math. Model.*, 2007.
- [20] D. Alean, A. Gutiérrez, F. Chejne, and J. Bastidas, “Simulación de una Torre de Enfriamiento Mecánica Comparada con Curvas Experimentales,” *Inf. Tecnológica*, 2009.
- [21] Khan, M. Yaqub, and M. Zubair, “Performance characteristics of counter flow wet cooling towers,” 2003.
- [22] F. Osterle, “On the analysis of counter-flow cooling towers,” *Int. J. Heat Mass Transf.* 34, pp. 1316–1318, 1991.
- [23] L. Xiao, “Dynamic Modeling of Mechanical Draft Counter-Flow Wet Cooling Tow,” University of Wisconsin-Milwaukee, 2010.
- [24] P. Tremante and E. Brea, “Una visión de la teoría difusa y los sistemas difusos enfocados al control difuso,” vol. IV, pp. 121–136, 2014.
- [25] B. Kosko, *Neural Networks and Fuzzy Systems: A Dynamical Systems*

Approach to Machine Intelligence. Englewood Cliffs: Prentice- Hall, 1992.

- [26] E. Guillama, "DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE CONTROL DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO PARA DISMINUIR EL CONSUMO ENERGETICO," Instituto Superior Politécnico José Antonio Echevarría, 2010.
- [27] V. Mazzone, "Controladores PID," 2012.
- [28] S. Kouro and R. Musalem, "Control mediante lógica difusa," *Técnicas Mod. Autom.*, pp. 1–7, 2002.
- [29] E. Kassir, "SISTEMAS DE CONTROL DIFUSO," 2002.
- [30] V. Alfaro, "CONTROLADORES PID QUE OPERAN COMO REGULADORES," vol. 12, no. 2, pp. 21–36, 2002.