

UNIVERSIDAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA



**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE
CONTROLADORES BASADOS EN LÓGICA DIFUSA
PARA UNA PLANTA DE PROCESOS
MULTIPROPÓSITO**


TESIS

Para optar el título profesional de Ingeniero Electrónico

AUTOR:

Jose Luis Pampamallco Jara 

ASESOR

Arturo Rojas Moreno 

Lima - Perú

2022

Dedicatoria:

Dedico esta tesis con todo mi cariño a mis padres, quienes me han brindado su apoyo incondicional en mis estudios y desarrollo como persona.

Agradecimientos:

Les agradezco a mis padres y hermanos por su apoyo y confianza puesta en mí. También, un agradecimiento a la universidad por la experiencia brindada durante todos estos años de desarrollo profesional. A mi asesor Dr. Arturo Rojas, por apoyarme con su asesoría y sus enseñanzas durante mi desarrollo en la carrera de Ingeniería Electrónica.

Índice general

	Pág.
RESUMEN	1
ABSTRACT	3
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	5
1.1 Formulación del Problema	6
1.2 Antecedentes	7
1.2.1 Aplicaciones de Control Difuso en Entorno Real	8
1.2.2 Desempeño de Controladores PID vs Controladores Difusos	10
1.2.3 Herramientas utilizadas para Simular e Implementar Controladores Difusos	12
1.3 Alcance y Limitaciones	14
1.4 Objetivos de la Tesis	14
1.5 Organización de la Tesis	15
CAPÍTULO 2 CONFIGURACIÓN DE EQUIPOS Y MODELADO EXPERIMENTAL DE LOS PROCESOS	16
2.1 Equipos Industriales de Control	16
2.1.1 Planta Industrial Multipropósito para Control e Instrumentación	17
2.1.2 Módulo Industrial Multipropósito para Control y Supervisión	19
2.1.3 Interfaz de Usuario	20
2.1.4 Procedimientos utilizados para los Controladores PID y Difuso	22
2.2 Modelado Experimental de los Procesos de la Planta Industrial Multipropósito	23

2.2.1 Modelado del Proceso de Flujo	24
2.2.2 Modelado del Proceso de Presión	26
2.2.3 Modelado del Proceso de Nivel	27
2.2.4 Modelado del Proceso de Temperatura	29
CAPÍTULO 3 CONTROL BASADO EN ALGORITMO PID	31
3.1 Algoritmo de Control PID	31
3.2 Estrategias de Control PID	32
3.3 Simulación de los Sistemas de Control PID	35
3.3.1 Control del Proceso Flujo	36
3.3.2 Control del Proceso Presión	37
3.3.3 Control del Proceso Nivel	38
3.3.4 Control del Proceso Temperatura	38
3.4 Implementación de los Sistemas de Control PID	39
3.4.1 Control del Proceso Flujo	40
3.4.2 Control del Proceso Presión	40
3.4.3 Control del Proceso Nivel	42
3.4.4 Control del Proceso Temperatura	43
3.4.5 Control de la Razón de Flujos	44
3.4.6 Control en Cascada del Nivel empleando Flujo	45
3.4.7 Control Descentralizado de Nivel y Temperatura	46
CAPÍTULO 4 CONTROL BASADO EN LÓGICA DIFUSA	48
4.1 Controlador basado en Algoritmo de Lógica Difusa	48
4.1.1 Fuzzificación	49
4.1.2 Tipos de Reglas difusas: Mamdani y Takagi-Sugeno	50
4.1.3 Métodos de Inferencia Difusa: Mamdani y Takagi-Sugeno	51
4.1.4 Defuzzificación	54
4.1.5 Estructuras de los Sistemas de Control Difuso	57

4.2 Simulación de los Sistemas de Control Difuso	58
4.2.1 Control del Proceso Flujo	59
4.2.2 Control del Proceso Presión	60
4.2.3 Control del Proceso Nivel	61
4.2.4 Control del Proceso Temperatura	62
4.3 Implementación de los Sistemas de Control Difuso	63
4.3.1 Control del Proceso Flujo	63
4.3.2 Control del Proceso Presión	65
4.3.3 Control del Proceso Nivel	67
4.3.4 Control del Proceso Temperatura	68
4.3.5 Control de la Razón de Flujos	70
4.3.6 Control en Cascada del Nivel empleando Flujo	72
4.3.7 Control Descentralizado de Nivel y Temperatura	74
CAPÍTULO 5 COMPARACIÓN DE RESULTADOS	76
5.1 Proceso de Flujo	76
5.2 Proceso de Presión	77
5.3 Proceso de Nivel	78
5.4 Proceso de Temperatura	79
5.5 Estrategia de Control de la Razón de Flujos	80
5.6 Estrategia de Control en Cascada de Nivel empleando Flujo	81
5.7 Estrategia de Control Descentralizado de Nivel y Temperatura	82
CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES	84
6.1 Recomendaciones	86
6.2 Trabajos Futuros	86
ANEXOS Y PROGRAMAS FUENTES	91

Índice de tablas

1.1	Software de controladores difusos ofertados por empresas de automatización industrial.	6
2.1	Escalamiento de instrumentos digitales.	18
2.2	Escalamiento de instrumentos analógicos.	19
3.1	Variación de los parámetros de diseño: K_c , K_i o K_d [1].	32
4.1	Reglas difusas empleadas para el control del proceso de flujo FIT11. . . .	63
4.2	Reglas difusas empleadas para el control del proceso de presión PIT11. . .	66
4.3	Reglas difusas empleadas para el control del proceso de nivel LIT10. . . .	68
4.4	Reglas difusas empleadas para el control del proceso de temperatura TIT10.	69
4.5	Reglas difusas empleadas para el control del proceso de flujo FIT10. . . .	72
5.1	Sistema de control PID vs. difuso del proceso de flujo.	76
5.2	Sistema de control PID vs. difuso del proceso de presión.	78
5.3	Sistema de control PID vs. difuso del proceso de nivel.	79
5.4	Sistema de control PID vs. difuso del proceso de temperatura.	80
5.5	Sistema de control PID vs. difuso de la razón de flujos.	81
5.6	Sistema de control PID vs. difuso en cascada de nivel empleando flujo. . .	82
5.7	Sistema de control PID vs. difuso descentralizado de temperatura y nivel.	83

Índice de figuras

1.1	Diagrama de bloques del sistema de separación de solución etanol-agua.	9
1.2	Estructura del sistema de agua caliente.	10
2.1	Planta industrial multipropósito para control e instrumentación.	17
2.2	P&ID de la planta industrial multipropósito para control e instrumentación.	18
2.3	Módulo industrial multipropósito para control y supervisión.	20
2.4	Arquitectura de control de equipos empleado para el desarrollo de la tesis.	20
2.5	Diseño de la interfaz de control y supervisión. a) Pantalla principal. b) Diagrama de proceso para el control descentralizado. c) Pantalla de control PID. d) Pantalla de control difuso. e) Tendencia de control de nivel y temperatura.	21
2.6	Diagrama de flujo de la implementación del controlador PID.	22
2.7	Diagrama de flujo de la implementación del controlador difuso.	22
2.8	P&ID de la variable del proceso de flujo FIT10 y FIT11.	24
2.9	Modelo dinámico experimental vs. aproximado del proceso de flujo FIT10.	25
2.10	Modelo dinámico experimental vs. aproximado del proceso de flujo FIT11.	25
2.11	P&ID de la variable del proceso de presión PIT11.	26
2.12	Modelo dinámico experimental vs. aproximado del proceso de presión PIT11.	27
2.13	P&ID de la variable del proceso de nivel LIT10.	28
2.14	Modelo dinámico experimental vs. aproximado del proceso de nivel LIT10.	28
2.15	P&ID de la variable del proceso de temperatura TIT10.	29

2.16	Modelo dinámico experimental vs. aproximado del proceso de temperatura TIT10.	30
3.1	Diagrama de bloques del sistema de control de la razón.	33
3.2	Diagrama de bloques del sistema de control descentralizado.	34
3.3	Diagrama de bloques del sistema de control en cascada.	35
3.4	Simulación del sistema de control PID de flujo FIT11.	36
3.5	Simulación del sistema de control PID de presión PIT11.	37
3.6	Simulación del sistema de control PID de nivel LIT10.	38
3.7	Simulación del sistema de control PID de temperatura TIT10.	39
3.8	Implementación del sistema de control PID de flujo FIT11.	41
3.9	Implementación del sistema de control PID de presión PIT11.	42
3.10	Implementación del sistema de control PID de nivel LIT10.	43
3.11	Implementación del sistema de control PID de temperatura TIT10.	44
3.12	Implementación del sistema de control PID de razón de flujos FIT10 y FIT11.	45
3.13	Implementación del sistema de control PID en cascada de nivel LIT10 empleando flujo FIT11.	46
3.14	Implementación del sistema de control PID descentralizado de nivel LIT10 y temperatura TIT10.	47
4.1	Funciones de pertenencia [23]	49
4.2	Grado de cumplimiento (DOF) en las funciones de pertenencia de las entradas.	50
4.3	Sistema difuso Mamdani [24].	52
4.4	Grados de cumplimientos (DOF) mínimos en la función de pertenencia de salida.	53
4.5	Sistema difuso Takagi-Sugeno [24].	54
4.6	Estructura general de sistema difuso de 2 entradas, 25 reglas y una salida.	56

4.7	Estructura del sistema de control PD Difuso	57
4.8	Estructura del sistema de control PI Difuso	58
4.9	Estructura del sistema de control PID Difuso	58
4.10	Simulación del sistema de control difuso de flujo FIT11.	59
4.11	Simulación del sistema de control difuso de presión PIT11.	60
4.12	Simulación del sistema de control difuso de nivel LIT10.	61
4.13	Simulación del sistema de control difuso de temperatura TIT10.	62
4.14	Funciones de pertenencia de entrada y salida para el proceso de flujo FIT11.	64
4.15	Implementación del sistema de control difuso de flujo FIT11.	64
4.16	Funciones de pertenencia de entrada y salida para el proceso de presión PIT11.	65
4.17	Implementación del sistema de control difuso de presión PIT11.	66
4.18	Funciones de pertenencia de entrada y salida para el proceso de nivel LIT10.	67
4.19	Implementación del sistema de control difuso de nivel LIT10.	68
4.20	Funciones de pertenencia de entrada y salida para el proceso de tempera- tura TIT10.	69
4.21	Implementación del sistema de control difuso de temperatura TIT10.	70
4.22	Sistema de control difuso de la razón de flujos.	71
4.23	Funciones de pertenencia de entrada y salida para el proceso de flujo FIT10.	71
4.24	Implementación del sistema de control difuso de la razón de flujos FIT10 y FIT11.	72
4.25	Implementación del sistema de control difuso en cascada de nivel LIT10 empleando flujo FIT11.	73
4.26	Sistema de control difuso en cascada de nivel empleando flujo	74
4.27	Sistema de control difuso descentralizado de nivel y temperatura.	74
4.28	Implementación del sistema de control difuso descentralizado de nivel LIT10 y temperatura TIT10.	75
5.1	Sistema de control PID vs. difuso del proceso de flujo FIT11.	77

5.2	Sistema de control PID vs. difuso del proceso de presión PIT11.	78
5.3	Sistema de control PID vs. difuso del proceso de nivel LIT10.	79
5.4	Sistema de control PID vs. difuso del proceso de temperatura TIT10. . . .	80
5.5	Sistema de control PID vs. difuso de la razón de flujos FIT10 y FIT11. . .	81
5.6	Sistema de control PID vs. difuso en cascada de nivel LIT10 empleando flujo FIT11.	82
5.7	Sistema de control PID vs. difuso descentralizado de nivel LIT10 y tem- peratura TIT10.	83
6.1	Dirección de conexionado para el tablero de control y supervisión.	91

RESUMEN

El controlador PID es el más empleado en la actualidad en las industrias. Se estima que tal algoritmo se aplica en más del 90 % de los procesos industriales. El controlador PID, se emplea cuando se tiene el modelo dinámico del proceso y resulta más conveniente cuando los procesos se encuentran en marcha, ya que solo se necesita ajustar las tres ganancias que la conforman para llegar al punto de referencia deseado. Sin embargo, en los procesos en los cuales no se puede estimar el modelo dinámico y el cálculo matemático resulta muy complejo o no se obtiene el desempeño deseado, se requiere una opción para tales casos. Por ello, se utiliza el controlador basado en lógica difusa, el cual es un tipo de control inteligente que no depende del modelo matemático, sino que imita el razonamiento de un experto humano.

En esta tesis, se desarrollaron bloques de control basado en lógica difusa para la implementación en un PLC Siemens para el control de los procesos flujo, presión, temperatura, nivel. Además, también se empleó para las estrategias control de la razón, control en cascada y control descentralizado de los procesos de una planta multipropósito. Para implementar el control de tales procesos, primero se hallan sus respectivos modelos dinámicos, los cuales se lograron con la adquisición de datos experimentales para aproximar los modelos a través de software especializado. Para fines de comparación, se implementaron los sistemas de control PID y sistemas de control difuso en el software TIA Portal. Por un lado, el controlador PID presenta mejor desempeño basándonos en tiempo de establecimiento y error en estado estable, a diferencia del controlador basado en lógica difusa para los siguientes procesos. En primer lugar, el proceso de flujo con una señal escalón de 12 - 15 l/min, comparando entre el controlador PID y el difuso, el parámetro que define el mejor rendimiento es el tiempo de establecimiento de 13 segundos versus 20.5 segundos respectivamente. En segundo lugar, el proceso de presión con una señal escalón de 0 - 0.2 bar, el controlador PID presenta tiempo de establecimiento de 13.8 segundos y error en estado estable de 0.1 %; el controlador difuso, tiempo de establecimiento de 35

segundos y error en estado estable de 1.6 %. En tercer lugar, en la estrategia de control de la razón de flujos el desempeño es directamente proporcional, al igual que en el proceso de flujo. Por último, en la estrategia de control en cascada de nivel empleando flujo en un rango de 0 - 25 cm, comparando el controlador PID contra el difuso comprende: tiempo de establecimiento de 146 y 100 segundos y error en estado estable de 0 % y 10 % respectivamente para ambos parámetros. Por tanto, en los procesos que requiera el control de la variable de flujo o presión de agua en una tubería resulta más conveniente la aplicación del controlador PID, debido a su rápida respuesta y mayor precisión.

Por otro lado, el controlador difuso tiene un mejor desempeño que el controlador PID para los siguientes procesos. Primero, el proceso de nivel con una señal escalón de 20 - 30 cm, el controlador PID presenta un tiempo de establecimiento de 60 segundos y porcentaje de sobreimpulso de 20.6 %; el controlador difuso, tiempo de establecimiento de 41 segundos y porcentaje de sobreimpulso de 1.7 %. Segundo, el proceso de temperatura con un escalón de 27 - 40 °C, el controlador PID presenta tiempo de establecimiento 50 minutos, error en estado estable de 10 % y porcentaje de sobreimpulso de 25 %; el controlador difuso, tiempo de establecimiento de 40 minutos, error en estado estable de 0.7 % y porcentaje de sobreimpulso de 16.2 %. Finalmente, en la estrategia de control descentralizado los resultados muestran un menor tiempo de establecimiento, error en estado estable y porcentaje de sobreimpulso del controlador difuso a diferencia del controlador PID.

Palabras clave:

Controlador difuso; Planta multipropósito; Reglas difusas; Fuzzificación; Defuzzificación; Procesos industriales; Mamdani; Takagi-Sugeno

ABSTRACT

**DESIGN AND IMPLEMENTATION OF FUZZY
LOGIC-BASED CONTROLLERS FOR A
MULTIPURPOSE PROCESS PLANT**

The PID controller is the most widely used controller in industry today. It is estimated that such algorithm is applied in more than 90 % of industrial processes. The PID controller is used when the dynamic model of the process is available and it is more convenient when the processes are running, since it is only necessary to adjust the three gains that conform it to reach the desired set point. However, in processes where the dynamic model cannot be estimated or the mathematical calculation is too complex and the desired performance is not obtained, an option is required for such cases. Therefore, the fuzzy logic based controller is used, which is a type of intelligent control that does not depend on the mathematical model, but mimics the reasoning of a human expert.

In this thesis, fuzzy logic based control blocks were developed for implementation in a Siemens PLC for the control of flow, pressure, temperature, level processes. In addition, it was also used for the strategies ratio control, cascade control and decentralized control of the processes of a multipurpose plant. To implement the control of such processes, first their respective dynamic models are found, which were achieved with the acquisition of experimental data to approximate the models through specialized software. For comparison purposes, PID control systems and fuzzy control systems were implemented in TIA Portal software. On the one hand, the PID controller presents better performance based on settling time and steady state error, as opposed to the fuzzy logic based controller for the following processes. Firstly, the flow process with a step signal of 12 - 15 l/min, comparing between the PID and fuzzy controller, the parameter that defines the best performance is the settling time of 13 seconds versus 20.5 seconds respectively. Secondly, the pressure process with a step signal of 0 - 0.2 bar, the PID controller presents

settling time of 13.8 seconds and steady state error of 0.1 %; the fuzzy controller, settling time of 35 seconds and steady state error of 1.6 %. Third, in the flow ratio control strategy the performance is directly proportional, as in the flow process. Finally, in the cascade level control strategy using flow in a range of 0 - 25 cm, comparing the PID controller against the fuzzy controller comprises: settling time of 146 and 100 seconds and steady state error of 0 % and 10 % respectively for both parameters. Therefore, in processes that require the control of the flow variable or water pressure in a pipeline, the application of the PID controller is more convenient, due to its fast response and higher accuracy.

On the other hand, the fuzzy controller has a better performance than the PID controller for the following processes. First, the level process with a step signal of 20 - 30 cm, the PID controller has a settling time of 60 seconds and overshoot percentage of 20.6 %; the fuzzy controller has a settling time of 41 seconds and overshoot percentage of 1.7 %. Second, the temperature process with a step of 27 - 40 °C, the PID controller has a settling time of 50 minutes, steady state error of 10 % and overshoot percentage of 25 %; the fuzzy controller, settling time of 40 minutes, steady state error of 0.7 % and overshoot percentage of 16.2 %. Finally, in the decentralized control strategy, the results show a lower settling time, steady state error and overshoot percentage for the fuzzy controller as opposed to the PID controller.

Keywords:

Fuzzy logic control; Multipurpose plant; Fuzzy rules; Fuzzification; Defuzzification; Industrial processes; Mamdani; Takagi-Sugeno

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

En la automatización industrial, los controladores SISO (del inglés *Single-Input, Single-Output*) está caracterizado por tener una salida y una entrada, los más utilizados son los que se basan en el algoritmo de control PID (Proporcional, Integral y Derivativo) [1]. Los controladores se emplean para controlar las variables presentes en los procesos industriales, tales como flujo, nivel, presión, temperatura, velocidad y posición. La amplia aceptación de los controladores PID en el control de procesos se debe a su simplicidad, fácil implementación en cualquier procesador y su desempeño en la aplicación de procesos lineales en términos de tiempo de respuesta, porcentaje de sobreimpulso y error en estado estable [2]. Sin embargo, en la industria existen casos en los que determinar el modelo dinámico del proceso resulta complejo. En tales casos, el empleo del controlador PID es restringido y no es tan eficiente.

En la industria existen procesos complejos de modelar o cuyos modelos matemáticos son no lineales, como el caso del proceso de nivel de agua en tanque, los cuales no se pueden controlar con el algoritmo PID convencional, sino que requieren de controladores avanzados para obtener un mejor rendimiento [3]. Por un lado, el controlador predictivo es un método de control que usa el modelo dinámico del proceso para predecir las salidas futuras y con ello optimiza las acciones de control posteriores. Por otro lado, el control difuso no requiere de un modelo dinámico preciso del proceso [4]. El procesamiento de un controlador difuso es más próximo al razonamiento del experto humano, el cual se basa en el cumplimiento de ciertas reglas que son específicas para cada aplicación [1]. Por ese motivo, para resolver estos problemas, las grandes firmas dedicadas al rubro de

automatización ofrecen software de controladores difusos que trabajan con sus controladores lógicos programables (PLC, del inglés *Programmable Logic Controller*) ofertados (ver Tabla 1.1).

TABLA 1.1: Software de controladores difusos ofertados por empresas de automatización industrial.

Empresas de automatización	Software dedicado
Rockwell automation	RSLogix 5000 FuzzyDesigner
Siemens	S7 Fuzzy Control ++
ABB	Fuzzy control W/Fuzzyoon
Emerson process Management	Delta V Fuzzy

La Universidad de Ingeniería y Tecnología (UTEC) cuenta con un laboratorio de Automatización, donde se imparte la enseñanza y entrenamiento de los estudiantes en sistemas industriales de control, redes industriales y automatización industrial. Los equipos disponibles son tres plantas industriales multipropósito para control e instrumentación compuesta por sensores de flujo, presión, temperatura y nivel y actuadores digitales y analógicos, también con tres módulos industriales multipropósito para control y supervisión, de los cuales dos están compuestos de equipos Rockwell y uno de equipos Siemens. Para el desarrollo de esta tesis se usó el sistema compuesto por equipos de la marca Siemens, los cuales cuentan con tres diferentes gamas de PLC: bajo, medio y alto.

1.1 Formulación del Problema

Las herramientas de software para aplicación de control difuso, si bien existen y son ofrecidas por las grandes firmas dedicadas al rubro de automatización, son utilizados como una alternativa para el control de plantas industriales cuyo modelo dinámico es complejo de calcular, ya sea porque no se cuenta con los valores de las variables reales de la planta o no se llega a obtener el desempeño deseado con el controlador PID, por ejemplo, el proceso de nivel de agua en un tanque [3] o control de temperatura del agua [5]. Por ende, la aplicación del control PID es descartado debido a la dificultad de estimar

los parámetros de este controlador. Además, tales paquetes de software involucran un alto costo de adquisición, ya que no viene incluido con el software de programación de los PLC ofertados (ver Tabla 1.1), a comparación de los controladores PID que si vienen incorporados.

En esta tesis, se propone como una alternativa de solución el desarrollo de bloques controladores basados en lógica difusa en el software de programación TIA Portal de Siemens. Por esta razón, se diseñaron e implementaron bloques controladores basados en lógica difusa para el control de procesos industriales. Además, se realizó el diseño y simulación del algoritmo lógico difuso para los procesos flujo, presión, temperatura, nivel, también se diseñaron para las estrategias control de la razón, control en cascada y control descentralizado de los procesos de la planta industrial multipropósito. Posteriormente, la implementación de tales algoritmos se ejecutaron en un PLC de gama alta de la marca Siemens. También, los bloques de control difuso se desarrollaron con características similares a los bloques difusos ofrecidos por la marca Siemens.

La existencia de los bloques controladores basados en lógica difusa incrementa la oferta de controladores en el laboratorio de automatización. Asimismo, tales bloques se pueden usar en la capacitación dentro del curso de control inteligente o similar.

1.2 Antecedentes

En la actualidad, más del 90 % de los procesos existentes en las industrias [6] aplican los controladores basados en algoritmo PID. Esto se debe a la necesidad de automatizar los procesos industriales con la finalidad de aumentar la producción, reduciendo el tiempo de fabricación para obtener el mejor rendimiento e incrementar las ganancias. Sin embargo, no todos los procesos se pueden controlar con el algoritmo PID, sino también se necesita aplicar otros algoritmos de control avanzado. Por ello, las marcas dedicadas

al rubro de automatización ponen a disposición software y módulos para aplicación de control avanzado e inteligente, entre los cuales está el controlador difuso.

El algoritmo de lógica difusa es una forma de representación matemática del razonamiento humano, el cual es útil en aplicaciones de sistemas expertos e inteligencia artificial [7]. El procesamiento de información basado en lógica difusa se basa en las reglas heurísticas si (antecedente) entonces (consecuente) [8]. Por ejemplo, en el sector industrial los operarios deciden, con base en su experiencia, si la temperatura es muy alejada al esperado en determinado proceso, entonces se incrementa la potencia, en caso contrario, si la temperatura es cercana al valor deseado se reduce la potencia al mínimo. En las industrias, el control por lógica difusa representa una alternativa de aplicación de control inteligente frente al control tradicional PID, en especial cuando se requiere controlar procesos no lineales y procesos complejos de modelar [9].

Para entender la importancia de control basado en algoritmo de lógica difusa en las industrias se hace énfasis en tres aspectos importantes. Primero, las aplicaciones de control difuso en entorno real. Segundo, el desempeño de los controladores PID vs. los controladores difusos. Por último, las herramientas utilizadas para simular e implementar controladores difusos.

1.2.1 Aplicaciones de Control Difuso en Entorno Real

En el entorno industrial hay muchas aplicaciones de lógica difusa para el control de variables de procesos. Una aplicación es el uso del algoritmo lógico difuso para el control de la separación de solución de etanol-agua, el cual se suele encontrar en procesos de conversión de azúcares a alcohol [10]. La técnica aplicada para ese propósito es por destilación basada en el control de puntos de ebullición de los disolventes bajo presión relevante. Las variables presión y temperatura (ver figura 1.1) se usan como señales de

entrada al módulo de lógica difusa para el control del regulador de voltaje que suministra calor al depósito de la mezcla.

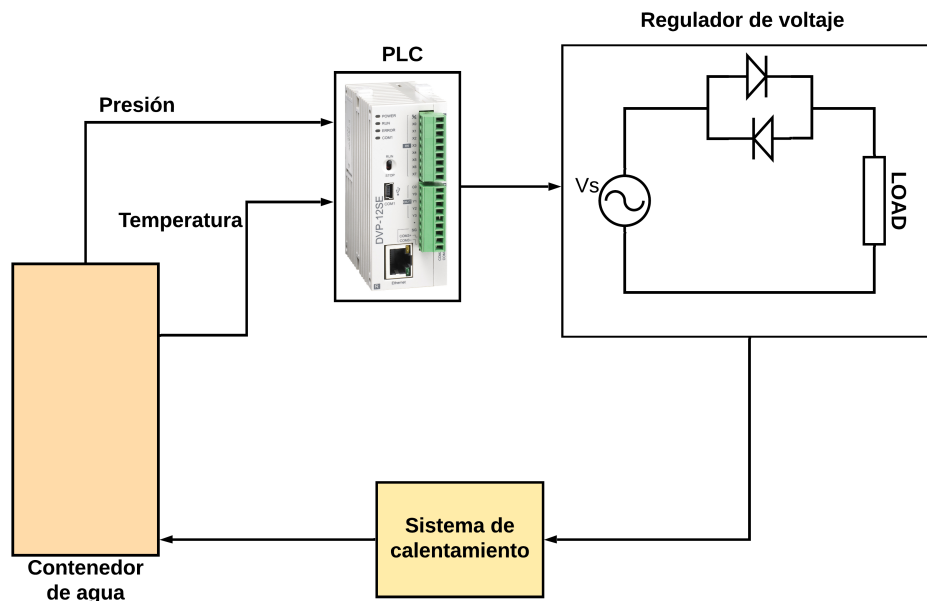


FIGURA 1.1: Diagrama de bloques del sistema de separación de solución etanol-agua.

Otra aplicación es la elaboración de un sistema de control eléctrico para tratamiento de huevo en polvo [11]. Entre los procedimientos de tratamiento de huevo en polvo, la pulverización y el secado son los más importantes y complejos. Por lo tanto, la alta precisión en el control de presión de la tubería es relevante para la parte de pulverización y la temperatura para el proceso de secado en la caja de desecación. Entre todas estas aplicaciones, la combinación de tecnología de control difuso y PLC mostró un control eficiente al aplicarlo en este sistema no lineal.

Por otra parte, el uso del control basado en lógica difusa para un sistema de suministro de agua a presión constante y regulación de frecuencia de una bomba [12]. Los resultados obtenidos muestran un mejor desempeño en términos de conservación de energía y alta confiabilidad a comparación del obtenido con un controlador PID.

En el entorno de aplicación doméstica se utilizó el control de lógica difusa para un sistema de agua caliente en una institución [5]. El sistema de agua caliente (ver figura 1.2) está constituido por energía solar como una fuente de calefacción principal y una varilla de calefacción eléctrica como secundario. El resultado obtenido es un sistema de control de temperatura de agua con ahorro de consumo energético y de alta eficiencia en términos de tiempo de respuesta, pequeños rebosamientos.

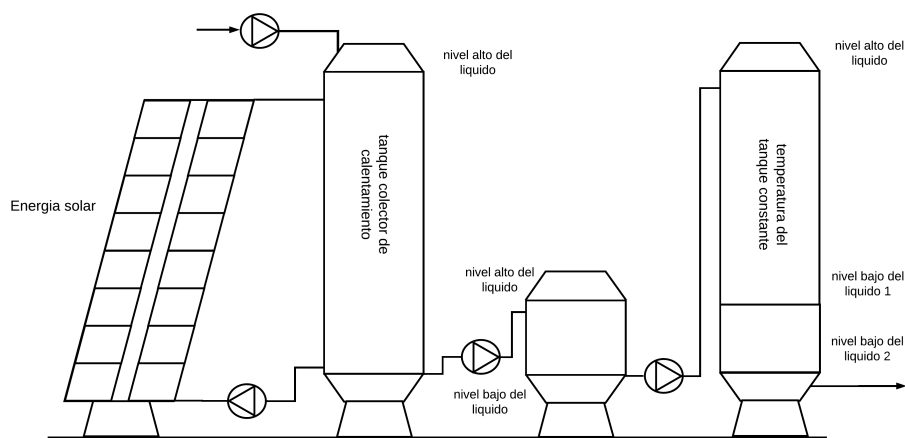


FIGURA 1.2: Estructura del sistema de agua caliente.

1.2.2 Desempeño de Controladores PID vs Controladores Difusos

Según los resultados obtenidos a través de la simulación e implementación del control de las variables de proceso, se realizó una comparación entre el desempeño del controlador convencional PID y el controlador basado en algoritmo de lógica difusa. A continuación se explicarán casos de resultados obtenidos comparando los dos algoritmos de control.

En [13], se empleó el algoritmo lógico difuso para un sistema de control de nivel de agua en un tanque de compensación de comportamiento dinámico y no lineal. Los resultados obtenidos con el controlador lógico difuso presentaron un mejor rendimiento en término de tiempo de respuesta y error en estado estable.

En [14], la simulación del control difuso se hace utilizando la librería Fuzzy Logic Toolbox del software Matlab, donde se usa el control no lineal de la variable de flujo, aunque solo asume la parte de simulación más no implementación. El desempeño de un controlador basado en lógica difusa sobre un controlador PID se observa en los resultados. Se puede esperar un mejor rendimiento de control, robustez y estabilidad general del controlador basado en algoritmo de lógica difusa.

Otros estudios muestran la aplicación de controlador PID combinado con el algoritmo de lógica difusa e incluso redes neuronales y comparan con los resultados obtenidos con el controlador convencional PID. En [15], el control basado en lógica difusa se usa en el proceso no lineal de temperatura de agua en un tanque, para hallar las ganancias proporcional, integral y derivativo del controlador PID estándar. En otros trabajos, se empleó la lógica difusa en la sintonización de las ganancias proporcional e integral del controlador PI, como en [8], donde se realizó el control de velocidad de un brazo robótico. También, el control difuso se implementó para el proceso no lineal de nivel de agua en un tanque bombeado por una bomba hidráulica [9]. Otra forma de utilizar la lógica difusa es implementarlo en conjunto a las redes neuronales. En [16], la lógica difusa y redes neuronales se aplicó para el control del proceso no lineal de la variable temperatura.

Los resultados obtenidos de todos los experimentos mostraron mayor rendimiento en los controladores PID sintonizados por el algoritmo basado en lógica difusa, ya que permite tener valores dinámicos de los parámetros proporcional, integral y derivativo del PID a diferencia del habitual controlador PID que tiene parámetros de control estáticos. Además, en el controlador basado en redes neuronal permite el aprendizaje del proceso, el cual no se puede realizar con el algoritmo de lógica difusa que no depende de valores históricos.

1.2.3 Herramientas utilizadas para Simular e Implementar Controladores Difusos

En los trabajos previos acerca del uso de algoritmo de lógica difusa se sigue tres pasos respectivos. Primero, modelar el proceso que se desea controlar. Luego, simular el sistema de control difuso de procesos industriales con el fin de hallar las reglas lógicas. Finalmente, implementar el algoritmo de control difuso en controladores lógicos programables.

Los trabajos previos usan el modelo dinámico para hallar las reglas difusas por medio de la simulación del sistema de control difuso. En algunos casos hallan el modelo dinámico de dos formas distintas: desarrollo del cálculo matemático para un sistema de bombeo de agua [4], nivel de líquido en un tanque de base esférica [13] y para uno de base rectangular [9], la otra forma es a través de toma de datos de entrada y salida del proceso de forma experimental utilizando la librería de Matlab System Identification Toolbox™ para realizar aproximación del modelo dinámico como en el caso de [15] lo utilizo para la aproximación del proceso de temperatura de agua, proceso de nivel de agua en un prototipo de tanque a pequeña escala [15].

Para la simulación, se usó del software Matlab/Simulink, de modo que se configura el controlador difuso con la librería Fuzzy Logic Toolbox™. Por ejemplo, la simulación de un sistema de control difuso de nivel de agua por bombeo de una bomba centrífuga [4], [9]; sistema de control difuso para temperatura [10], velocidad de un servomotor [7], el flujo de agua por una tubería.

Los controladores lógicos programables son dispositivos electrónicos para controlar procesos secuenciales, por eso se emplean para la implementación de control en plantas industriales. Sus características principales son su alta fiabilidad y robustez. Se aplican ampliamente en procesos industriales, pero también se utilizan en otros campos, como la automatización de viviendas y edificios, sistemas de energías renovables [7]. En la industria, principalmente se aplica en la producción automática estándar. Con el incremento en

el campo de la automatización, no solo las funciones de seguridad se llevan a cabo, sino también el control inteligente está involucrado con el proceso de automatización [8]. La demanda de usar controladores inteligentes fue en ascenso, por el cual las grandes firmas en el rubro de automatización lanzaron al mercado módulos / software que se acoplan a sus PLC, por ello la empresa Siemens ofrece el paquete de software FuzzyControl++ que emplea métodos basados en lógica difusa y el paquete NeuroSystem basado en la teoría de las redes neuronales.

Sin embargo, muchos de los estudios realizados sobre control basado en lógica difusa implementado en PLC desarrollan un programa que les facilite aplicar control inteligente sin la necesidad de adquirir software o módulos de control basado en lógica difusa. Los múltiples modelos de PLC utilizados para el desarrollo de algoritmo lógico difuso que se ejecutaron en PLC Siemens sin necesidad de usar módulos o software adicionales. En [4], se usó para el control de nivel; en [11], para un sistema de tratamiento de huevo en polvo en un PLC S7-200; en [7], para el control difuso de velocidad de un servomotor en PLC-1200; [15], para el control de temperatura de agua y en [10] para sistema de separación de etanol-agua, ambos en PLC delta. En el caso de [8], se usó el software adicional FuzzyControl++ y fue implementado en un PLC de gama media S7-300 Siemens para el control de velocidad de un brazo mecánico.

Las soluciones de control de la industria generalmente se basan en un controlador lógico programable (PLC). No obstante, las implementaciones de controladores basados en lógica difusa para sistemas complejos cuyo control se basa en un sistema difuso ha sido una desventaja, ya que no todos los PLC tienen módulos específicos para este propósito [17].

Otra alternativa de aplicar control basado en lógica difusa es utilizada en [18] quien utiliza el PLC S7-200, software OPC server y el programa Matlab. Mediante el uso redes de comunicación con OPC server se enlaza las dos variables de diferente software, así que se realiza la toma de datos (sensor) del proceso con el PLC, pero el control basado

en lógica difusa se hace en Matlab y se reenvía la señal de control al PLC para enviar (actuador) al proceso. El autor menciona que no se requiere hacer un control complejo en PLC y solo usar el control basado en lógica difusa del Matlab, el cual es empleado por la mayor parte de las industrias para modelar procesos y simular la aplicación de algoritmos de control en procesos.

1.3 Alcance y Limitaciones

Los bloques de control lógico difuso estarán disponibles en el software de programación del PLC Siemens del módulo industrial multipropósito para control y supervisión. La implementación del control basado en lógica difusa se limita a los procesos de la planta industrial multipropósito para control e instrumentación ubicada en el laboratorio de Automatización de UTEC. El control difuso se realizó para los procesos flujo, presión, temperatura y nivel. Asimismo, empleando las variables previamente mencionadas se implementará las estrategias de control de la razón, control en cascada y control descentralizado. Además, no se requiere adicionar software adicional a los equipos existentes para este trabajo de tesis. El PLC utilizado para el sistema de control es el S7-1500 Siemens y el software de programación es TIA Portal.

1.4 Objetivos de la Tesis

El objetivo general de la tesis es diseñar e implementar bloques controladores basados en lógica difusa para el control de procesos de una planta industrial multipropósito. Para alcanzar este objetivo se cuenta con los siguientes objetivos específicos:

- Hallar los modelos dinámicos de los procesos de una planta industrial multipropósito: flujo, presión, nivel y temperatura.

- Diseñar e implementar los sistemas de control PID para los procesos flujo, presión, temperatura, nivel, así como también las estrategias de control de la razón, control en cascada y control descentralizado de una planta industrial multipropósito.
- Diseñar e implementar el algoritmo de control difuso en el PLC S7-1500 para los procesos y las estrategias de control anteriormente mencionadas.
- Comparar los resultados experimentales de la implementación tanto de los sistemas de control PID como los sistemas de control difuso.
- Brindar este trabajo como un punto de partida para futuras investigaciones de aplicación de lógica difusa en PLC.

1.5 Organización de la Tesis

El presente trabajo de tesis sigue la siguiente organización: En el Capítulo 2, se describe la planta industrial multipropósito para control e instrumentación y el módulo industrial multipropósito para control y supervisión. En este capítulo, también se obtienen los modelos dinámicos de los procesos de la planta industrial multipropósito a través de datos adquiridos de forma experimental. En el Capítulo 3, se da una breve introducción al algoritmo de control PID y se muestran los resultados obtenidos de la simulación e implementación del controlador PID Compact en el PLC Siemens para los procesos: flujo, presión, nivel, temperatura y las estrategias de control de la razón de flujo, cascada y descentralizado. En el Capítulo 4, se explica sobre los distintos algoritmos de control difuso y se observan los resultados obtenidos al simular e implementar los sistemas de control difuso diseñado a través de lenguaje estructurado en el PLC Siemens para los procesos previamente mencionados. En el Capítulo 5, se hace el análisis de los resultados experimentales obtenidos con los algoritmos de control PID y lógico difuso. En el Capítulo 6, se presentan las conclusiones a las que se llegó al finalizar la tesis.

Capítulo 2

CONFIGURACIÓN DE EQUIPOS Y MODELADO EXPERIMENTAL DE LOS PROCESOS

La Universidad de Ingeniería y Tecnología cuenta con tres plantas industriales multipropósito ubicadas en el laboratorio de automatización. En esta tesis, se usa la planta multipropósito y el módulo de control y supervisión instrumentada con equipos marca Siemens. Primero, se describe acerca de los equipos y el conexionado realizado para ser operado a través de una interfaz SCADA. Finalmente, se da detalles sobre el cálculo de los modelos dinámicos estimados a través de los datos experimentales extraídos y procesados en el software Matlab.

2.1 Equipos Industriales de Control

Actualmente, la universidad UTEC brinda cursos de pregrado donde se imparte la enseñanza a sus alumnos de la mención de automatización de programación de PLC, configuración de redes industriales y desarrollo de proyectos de automatización. Por tal motivo, se emplea el manejo de una planta industrial multipropósito a pequeña escala con un módulo de control y supervisión con el fin de familiarizarse con equipos posteriormente encontrados en el ámbito industrial. Asimismo, se brindan programas externos de educación ejecutiva de diseño y gestión de proyectos de automatización ¹.

Antes de comenzar el desarrollo del trabajo de tesis, se brinda una breve introducción de los equipos usados. Primero, la planta industrial multipropósito en conjunto a

¹Programa Avanzado de Ingeniería del Diseño y Gestión de Proyectos de Automatización, septiembre 2019. Enlace: <http://y2u.be/LZB3tkqKQ4c>. Última revisión el 23-09-2019.

su diagrama de instrumentación y tuberías (P&ID, del inglés *Piping and Instrumentation Diagram*). Segundo, la arquitectura de control usada en el módulo de control y supervisión para la implementación del control de los procesos de las variables y de las estrategias de control previamente mencionadas.

2.1.1 Planta Industrial Multipropósito para Control e Instrumentación

La planta industrial multipropósito es un sistema de circulación de agua fría y caliente entre dos tanques de agua. Por un lado, la circulación de agua fría alimenta a la planta. Por otro lado, el agua caliente generada en el tanque inferior circula desde el tanque T-20 a T-10 con ayuda de una bomba centrífuga. En este sistema de control, se realiza la lectura de las variables: flujo, presión, temperatura y nivel. En la Figura 2.1, se muestra la tercera planta industrial multipropósito adquirida por la universidad visualizada de forma más exacta en su P&ID (ver figura 2.2).



FIGURA 2.1: Planta industrial multipropósito para control e instrumentación.

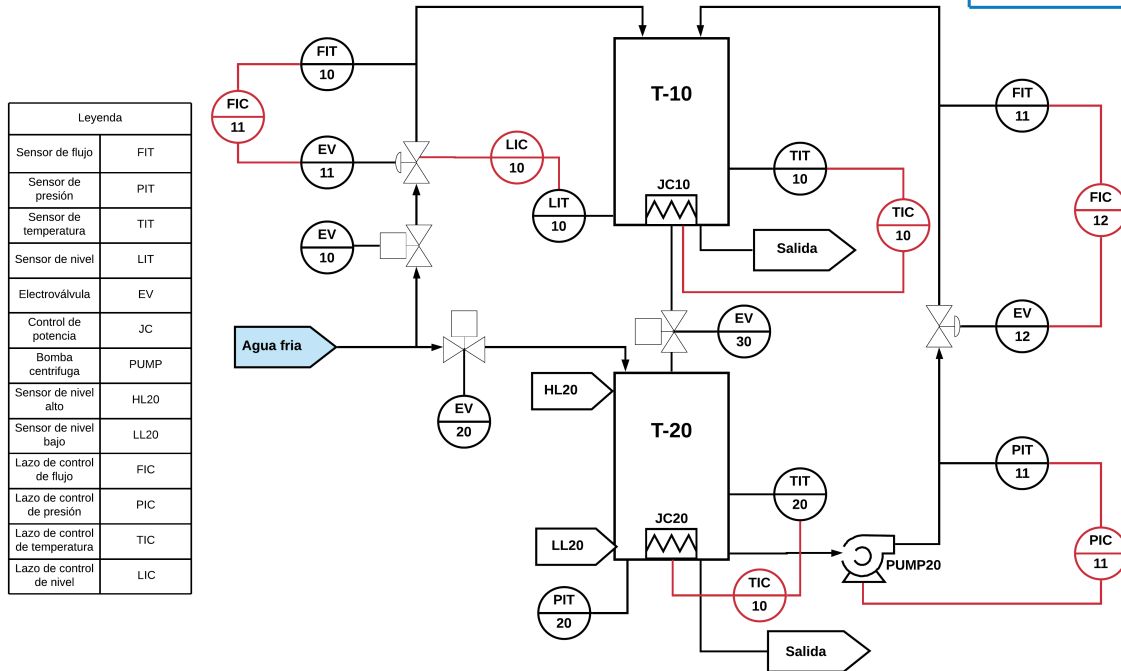


FIGURA 2.2: P&ID de la planta industrial multipropósito para control e instrumentación.

En las Tablas 2.1 y 2.2, se observa los rangos de operación de los sensores y actuadores analógicos y digitales de la planta industrial multipropósito usados para la elaboración de esta tesis. Se tiene en cuenta que el único equipo conectado por Ethernet es el variador de frecuencia VFD20 que acciona la bomba centrífuga PUMP20.

TABLA 2.1: Escalamiento de instrumentos digitales.

Tag	Instrumentos	Rango de operación
EV10	Válvula electroneumática	ON - OFF
EV20	Válvula electroneumática	ON - OFF
EV30	Válvula electroneumática	ON - OFF
HL20	Switch de nivel alto	ON - OFF
LL20	Switch de nivel bajo	ON - OFF
JC10encl	Enclavamiento del control de potencia	ON - OFF

TABLA 2.2: Escalamiento de instrumentos analógicos.

Tag	Instrumentos	Comunicación	Rango de operación
FIT10	Transmisor indicador de flujo	4-20mA	0 - 80 l/min
FIT11	Transmisor indicador de flujo	4-20mA	0 - 80 l/min
LIT10	Transmisor indicador de nivel	4-20mA	0 - 255 cmH ₂ O
PIT11	Transmisor indicador de presión	4-20mA	0 - 16 bar
PIT20	Transmisor indicador de presión	4-20mA	0 - 255 mbar
TIT10	Transmisor indicador de temperatura	4-20mA	0 - 100 °C
EV11	Válvula electroneumática	4-20mA	0 - 100 %
EV12	Válvula electroneumática	4-20mA	0 - 100 %
VFD20	Variador de frecuencia	Ethernet	0 - 100 %
JC10	Control de potencia	4-20mA	0 - 100 %

2.1.2 Módulo Industrial Multipropósito para Control y Supervisión

El módulo industrial multipropósito para de control y supervisión (ver figura 2.3) está conformado por tres PLC de marca Siemens de distintas gamas utilizadas para múltiples funciones. Para el propósito de esta tesis se emplea el modelo S7-1500 Siemens.

Este equipo es un módulo educativo, donde se enseña a hacer el conexionado de los sensores y los actuadores a las I/O de los PLC. También, se enseña a realizar el conexionado de la arquitectura de control para saber los equipos que se desea usar.

La arquitectura utilizada para hacer esta tesis es la descrita en la figura 2.4, donde se emplea el uso del controlador PLC S7-1500, la periferia I/O ET-200 SP, variador de frecuencia VFD20 para accionar la bomba PUMP20 y una computadora para configurar una topología estrella entre todos los equipos con el switch como centro (ver figura 2.4).

Se tiene en cuenta que los módulos I/O del PLC S7-1500 Siemens ubicado en el módulo industrial multipropósito para control y supervisión, solo cuentan con entradas y salidas digitales. Por lo tanto, el uso de la periferia I/O ET-200 SP es necesario para las señales digitales y analógicas de los sensores y actuadores necesarios a utilizar. En los anexos, se puede encontrar las direcciones de todos los conexionados realizados y el esquema del panel frontal del tablero de control y supervisión.

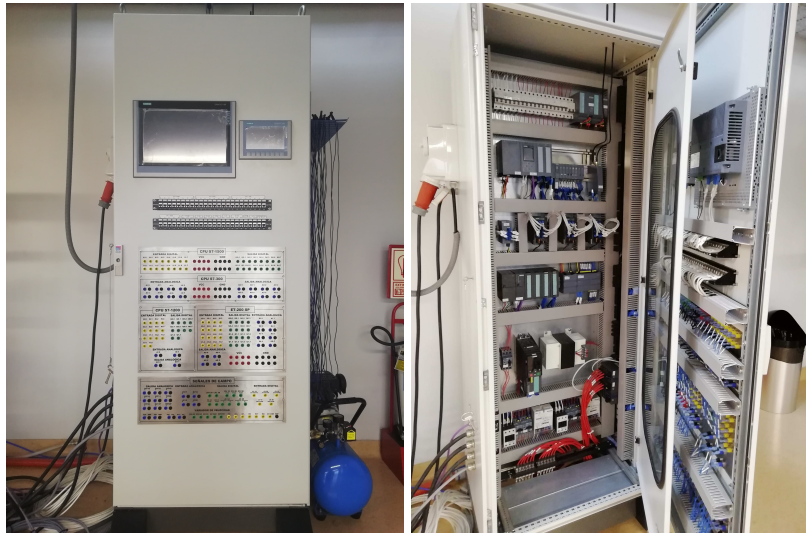


FIGURA 2.3: Módulo industrial multipropósito para control y supervisión.

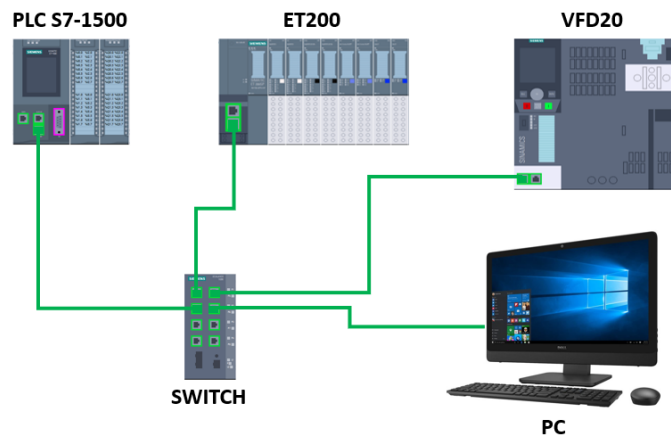
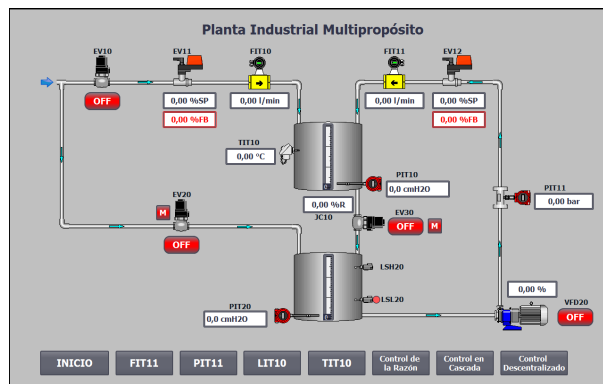


FIGURA 2.4: Arquitectura de control de equipos empleado para el desarrollo de la tesis.

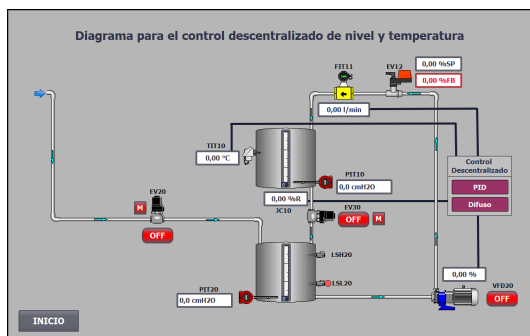
2.1.3 Interfaz de Usuario

La interfaz diseñada en esta tesis se basa en el SCADA actualmente usado para la planta industrial multipropósito, donde se muestran los estados y valores de los sensores y actuadores. Adicionalmente, al SCADA se le agrega la opción para aplicar control basado en lógica difusa, así como el control PID para los procesos de flujo, presión, temperatura, nivel, así como también las estrategias de control de la razón, control en cascada y control

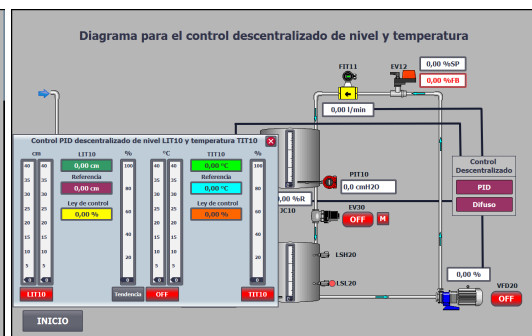
descentralizado. En la figura 2.5, la interfaz muestra la respuesta de los procesos y las estrategias de control previamente mencionadas al emplear tanto el controlador basado en lógica difusa como el controlador basado en PID.



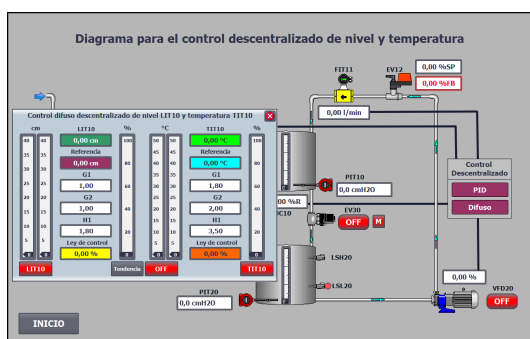
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

FIGURA 2.5: Diseño de la interfaz de control y supervisión. a) Pantalla principal. b) Diagrama de proceso para el control descentralizado. c) Pantalla de control PID. d) Pantalla de control difuso. e) Tendencia de control de nivel y temperatura.

2.1.4 Procedimientos utilizados para los Controladores PID y Difuso

En las figuras 2.6 y 2.7, se muestran los pasos a seguir para la implementación de los sistemas de control PID, así como los sistemas de control difuso respectivamente. Los pasos a seguir son los mismos para los procesos: flujo, presión, nivel, temperatura y para las estrategias de control de la razón de flujos, control en cascada de nivel empleando flujo y control descentralizado de nivel y temperatura.

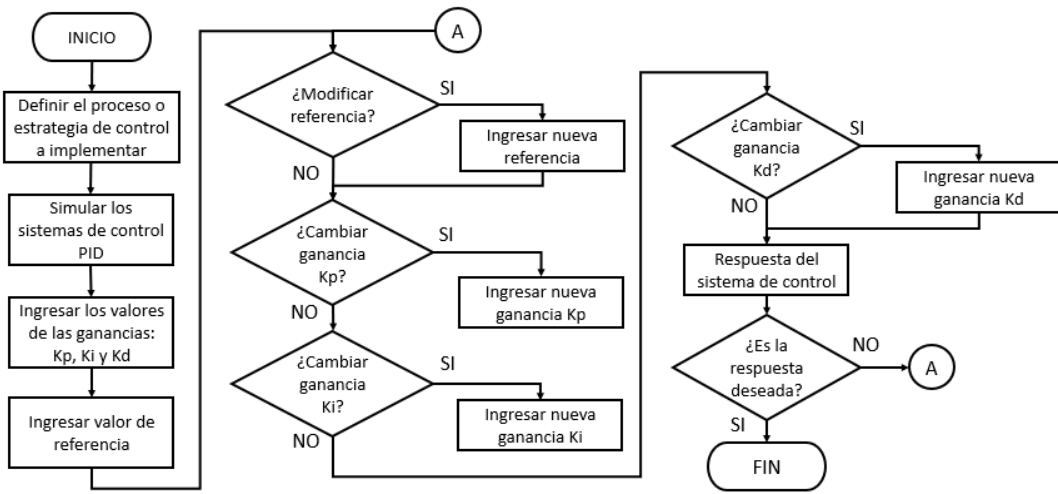


FIGURA 2.6: Diagrama de flujo de la implementación del controlador PID.

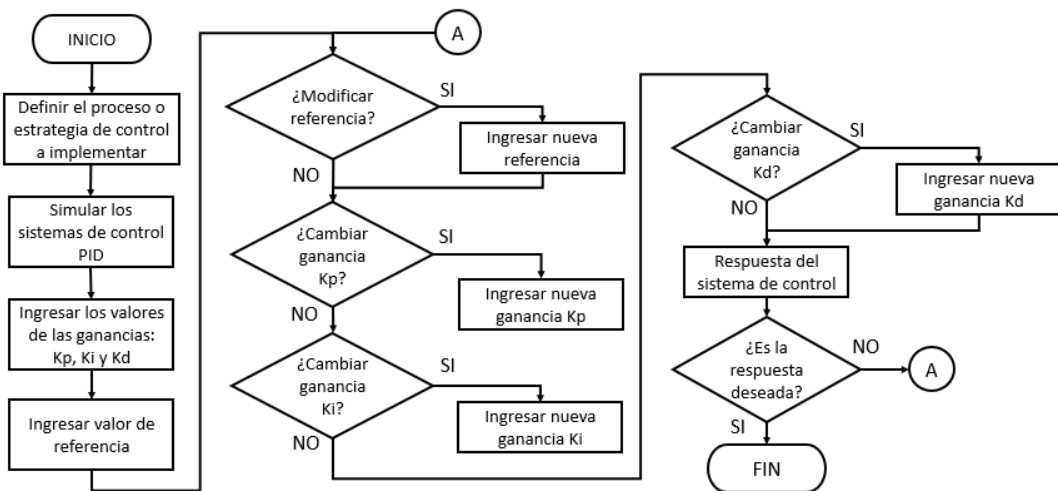


FIGURA 2.7: Diagrama de flujo de la implementación del controlador difuso.

2.2 Modelado Experimental de los Procesos de la Planta Industrial Multipropósito

En la industria, la automatización de los procesos es requerida con el fin de optimizar el consumo de recursos y reducir el tiempo de producción. Por ello, es necesario utilizar el algoritmo de control más adecuado. El cálculo de parámetros de los controladores suelen ser dependientes de los modelos dinámicos del proceso; sin embargo, hallar el modelo dinámico de los procesos suele ser complejo de estimar por dos motivos. Primero, el dimensionamiento de los equipos es difícil de obtener si el proceso está en operación. Segundo, el cálculo matemático de forma manual es tedioso de realizar.

Entonces, el cálculo del modelo dinámico del proceso se realiza de forma experimental. Primero, una señal de entrada se envía al proceso. Segundo, el proceso debe generar una señal de salida. Tercero, se estima el modelo dinámico a través de la relación de la señal de salida sobre la señal de entrada. Por ejemplo, en el caso del proceso de flujo se tiene como señal de entrada el porcentaje de la abertura de la válvula y como señal de salida será el flujo de agua que pase por la tubería. El proceso de flujo se define como:

$$G_{flujo} = \frac{salida}{entrada} = \frac{flujo(L/min)}{abertura(\%)}. \quad (2.1)$$

El modelo dinámico se calculó de forma experimental, así que el uso de una herramienta o método para realizar tal operación es necesario. El método utilizado para hallar el modelo es ARMAX, el cual consiste en estimar los parámetros de un sistema utilizando el método de predicción y los órdenes polinómicos definidos por el usuario. Además, son ampliamente usados en la identificación de modelos dinámicos o funciones de transferencia [19]. Por ello, se empleó la herramienta brindada, el software Matlab "ident", el cual es una herramienta que se basa en el método identificación ARMAX. Con esta herramienta se obtiene el modelo dinámico de los procesos: flujo, presión, temperatura y nivel de la

planta industrial multipropósito. Además, esta herramienta permite saber el porcentaje de fiabilidad del modelo dinámico estimado vs. el real.

2.2.1 Modelado del Proceso de Flujo

La planta industrial multipropósito para control e instrumentación cuenta con dos procesos que miden flujo de agua por la tubería. El primero mide el flujo a la entrada de agua de fría al tanque T-10 con un sensor FIT10, el cual es regulado por la válvula EV11. El segundo sensor, FIT11, mide el flujo que agua que circula de la tubería del tanque T-20 al T-10, el cual es controlado por el actuador PUMP20 (ver figura 2.8).

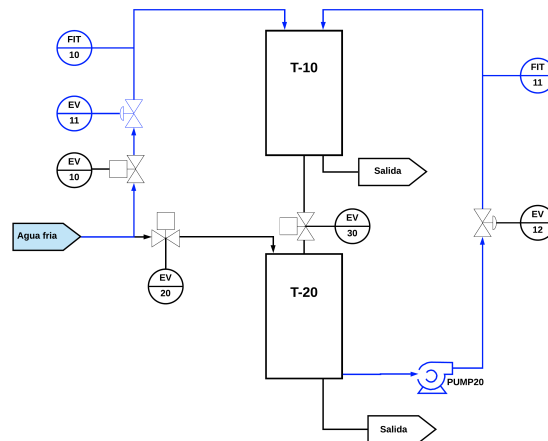


FIGURA 2.8: P&ID de la variable del proceso de flujo FIT10 y FIT11.

El modelo dinámico del proceso de flujo se representa en el dominio de Laplace con el nombre de función de transferencia, el cual se puede encontrar en (2.2) para FIT10 y (2.3) para FIT11. La función de transferencia obtenida se verifica graficando los datos obtenidos experimentalmente versus el resultado estimado (ver figura 2.9 y 2.10).

$$G_{flujoFIT10} = \frac{0.1262}{s + 0.1656} \quad (2.2)$$

$$G_{flujofIT11} = \frac{0.1341}{s + 0.1749} \quad (2.3)$$

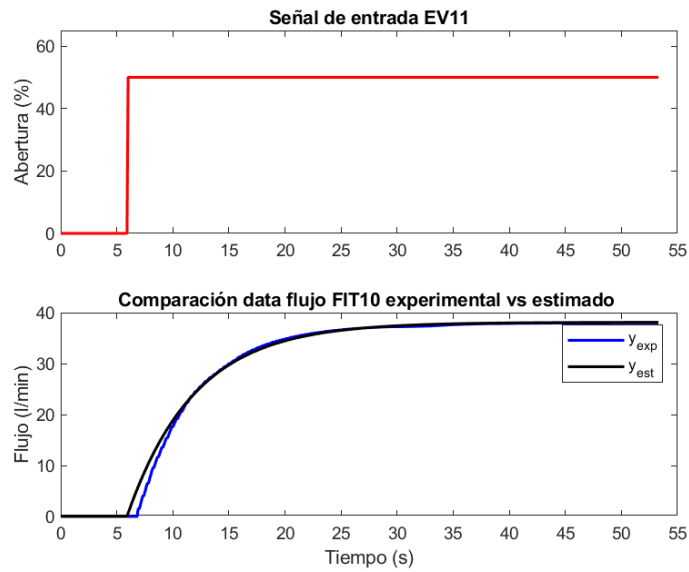


FIGURA 2.9: Modelo dinámico experimental vs. aproximado del proceso de flujo FIT10.

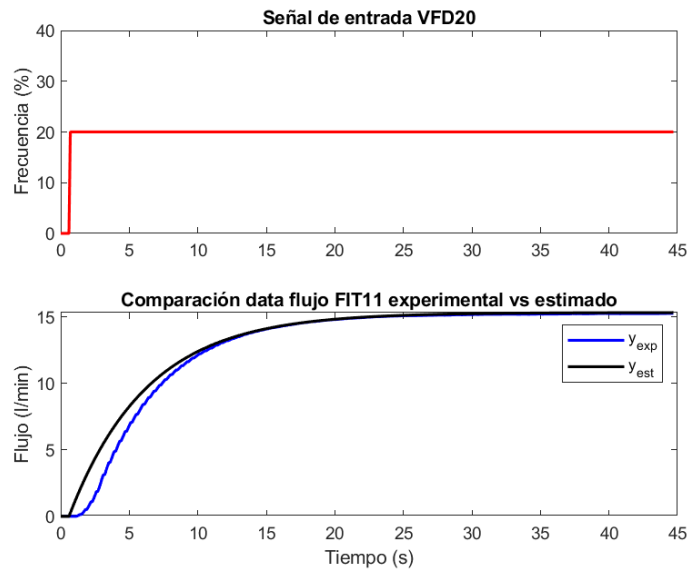


FIGURA 2.10: Modelo dinámico experimental vs. aproximado del proceso de flujo FIT11.

Los resultados obtenidos muestran que el proceso de flujo FIT10 tiene un porcentaje de fiabilidad del 94.5 %; el proceso flujo FIT11, un 92.9 %, ambas con funciones de

transferencia de primer orden. Además, no se considera el retraso visualizado en 2.10 en la función de transferencia 2.3, debido a que solo sucede al inicio cuando la tubería está completamente vacía.

2.2.2 Modelado del Proceso de Presión

Con el objetivo de obtener el modelo dinámico del proceso de presión de agua que pasa por la tubería del tanque T-20 al T-10. Se utilizó una abertura de la válvula EV12 de 50 % solo para dejar pasar el agua, más no para usarlo como actuador. En la figura 2.11, el P&ID muestra los elementos necesarios para la recopilación de datos. Donde el sensor de presión es PIT11, y el actuador para este caso es la bomba PUMP20, la cual es accionada por el variador de frecuencia VFD20 que está conectada a través de la comunicación Ethernet (ver figura 2.4).

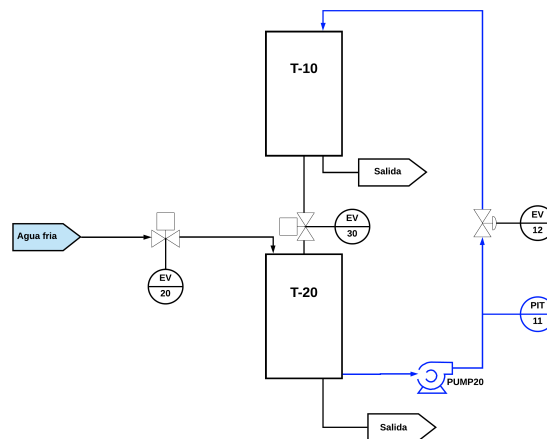


FIGURA 2.11: P&ID de la variable del proceso de presión PIT11.

El cálculo del proceso de presión se realizó siguiendo los mismos pasos que en el caso del proceso de flujo, y para la estimación del modelo se utilizó la herramienta “ident” de Matlab. Según la respuesta obtenida, el proceso de presión toma una función de transferencia de segundo orden mostrada en (2.4), el cual presenta un porcentaje de

similitud de 91.72 % con respecto al modelo real. Con respecto al orden de la función de transferencia, se basó el modelo dinámico más aproximado usando la función “ident”.

$$G_{presion} = \frac{0.000.6118}{s^2 + 0.5007s + 0.118} \quad (2.4)$$

Luego de obtener la función de transferencia y saber que tiene un alto valor de confiabilidad, el comportamiento dinámico experimental versus el estimado de la presión se compara de forma gráfica (ver figura 2.12) con respecto a la señal de entrada de frecuencia de la bomba manejado de forma porcentual (0 - 100 %). No se considera el retraso visualizado en 2.12 en la función de transferencia 2.4, debido a que solo se genera al inicio cuando la tubería está completamente vacía.

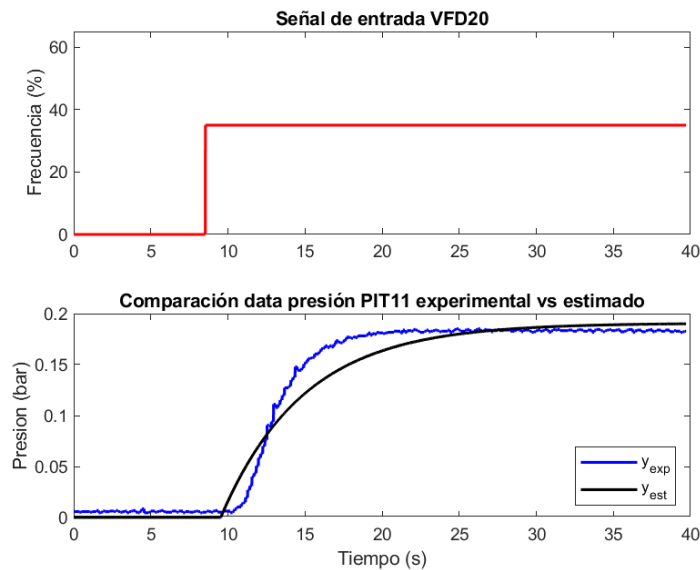


FIGURA 2.12: Modelo dinámico experimental vs. aproximado del proceso de presión PIT11.

2.2.3 Modelado del Proceso de Nivel

Con el fin de obtener el modelo dinámico del proceso de nivel de agua que circula del tanque T-20 al T-10. Se usó una abertura de la válvula EV12 al 50 % solo para dejar

pasar el agua, no para usarla como actuador. En la figura 2.13, el P&ID muestra los elementos necesarios para la toma de datos. Donde el sensor de nivel es LIT10, y el actuador para este caso es la bomba PUMP20, la cual es accionada por el variador de frecuencia VFD20 conectado a través de la comunicación Ethernet (ver figura 2.4).

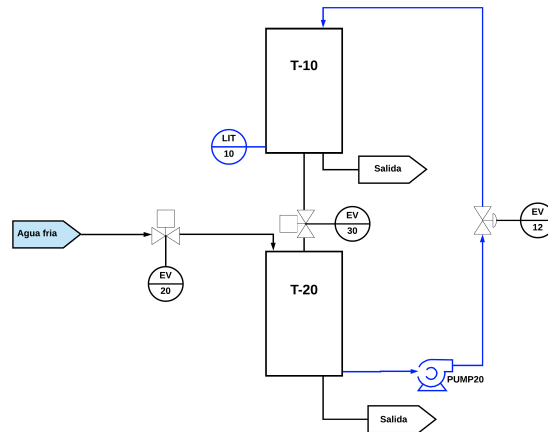


FIGURA 2.13: P&ID de la variable del proceso de nivel LIT10.

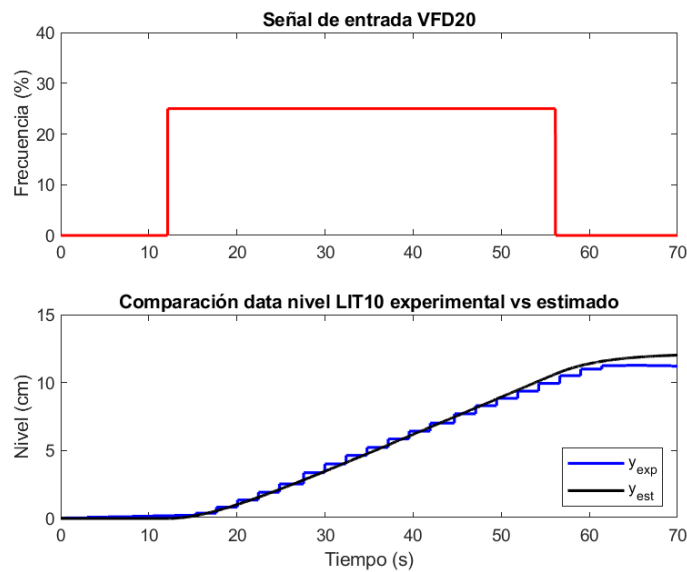


FIGURA 2.14: Modelo dinámico experimental vs. aproximado del proceso de nivel LIT10.

Aplicando los mismos pasos que en los casos anteriores se realizó el cálculo de proceso de nivel y se usó la herramienta “ident” de Matlab para estimar el modelo dinámico. Según la respuesta obtenida, el proceso de nivel toma una función de transferencia

de segundo orden mostrada en (2.5), cuyo porcentaje de similitud con el gráfico obtenido experimentalmente es del 96.42 %. Con respecto al orden de la función de transferencia, se basó el modelo dinámico más aproximado obtenido al usar la función “ident”.

Tras la adquisición de la función de transferencia y saber que tiene un alto valor de fiabilidad, se compara de forma gráfica el comportamiento dinámico experimental versus el estimado del proceso de nivel (ver figura 2.14) con respecto a la señal de entrada de frecuencia de la bomba manejado de forma porcentual (0 - 100 %).

$$G_{nivel} = \frac{0.002013}{s^2 + 0.1824s + 0.005826} \quad (2.5)$$

2.2.4 Modelado del Proceso de Temperatura

En el siguiente caso, el modelo dinámico del proceso de temperatura de agua en el tanque T-10, se realiza inicialmente con una cantidad de agua constante en el tanque superior. En la figura 2.15, el P&ID muestra los elementos necesarios para la toma de datos. Donde el sensor de temperatura es TIT10, y el actuador para este caso es la resistencia, la cual se regula a través de la comunicación 4-20 mA (ver Tabla 2.2).

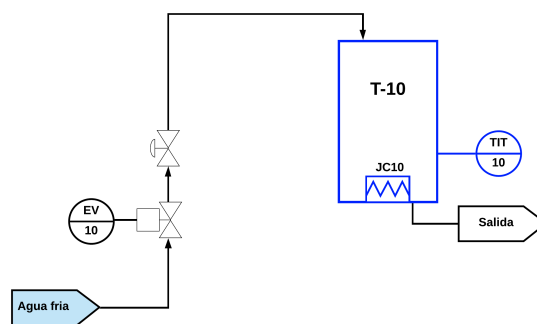


FIGURA 2.15: P&ID de la variable del proceso de temperatura TIT10.

Empleando los mismos pasos que en los casos anteriores, se realizó el cálculo de proceso de temperatura usando la herramienta “ident” de Matlab para estimar el modelo

dinámico, con la única excepción que el tiempo muerto de 76.9 segundos no se tomó en cuenta para la aproximación. Según la respuesta obtenida, el proceso de temperatura toma una función de transferencia de tercer orden mostrada en (2.6), cuyo porcentaje de similitud con el modelo real es 99.32 %.

$$G_{temperatura} = \frac{4.205e - 05}{s^3 + 76.93942s^2 + 3.0315s + 8.405e - 03} \quad (2.6)$$

Luego de obtener la función de transferencia y saber que tiene un alto valor de confiabilidad, se compara de forma gráfica para ver el comportamiento dinámico experimental versus el estimado de temperatura (ver figura 2.16) con respecto a la señal de entrada de potencia manejada de forma porcentual (0 - 100 %).

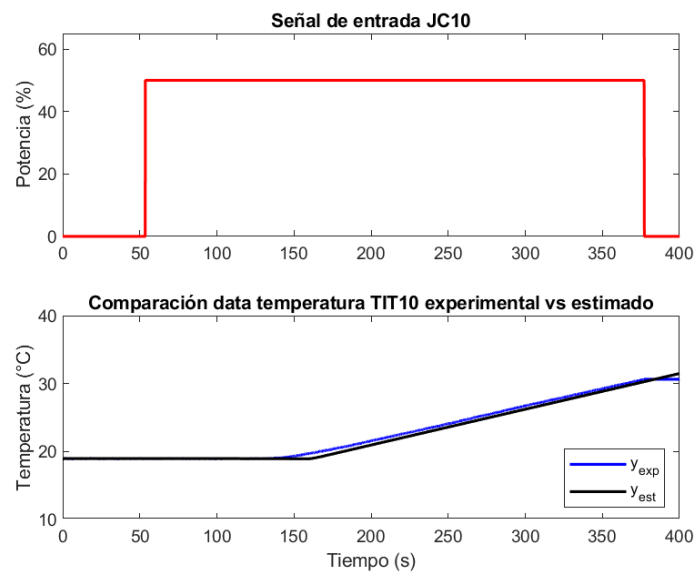


FIGURA 2.16: Modelo dinámico experimental vs. aproximado del proceso de temperatura TIT10.

Capítulo 3

CONTROL BASADO EN ALGORITMO PID

En este capítulo, se da una breve descripción general del algoritmo de control PID implementado en la planta industrial multipropósito, utilizando el bloque de control PID de Siemens. Además, se explican las estrategias de control a emplear para que puedan ser comparadas posteriormente con el control basado en lógica difusa. Finalmente, la simulación e implementación de los sistemas de control PID se realizó para los procesos: flujo, presión, temperatura, nivel y las estrategias de control de la razón, cascada y descentralizado en el controlador lógico programable (PLC), de los cuales se muestran los resultados obtenidos gráficamente.

3.1 Algoritmo de Control PID

El controlador PID es la suma de las acciones o modos de control P (Proporcional), I (Integral) y D (Derivativo) que se encargan de procesar la señal de error $e(t)$ para obtener la variable controlada (CV) como se muestra a continuación:

$$u = K_c e(t) + \frac{K_c}{T_i} \int e(t) dt + K_c T_d \frac{de(t)}{dt} = P(t) + I(t) + D(t), \quad (3.1)$$

Donde u es la variable controlada (CV), y es la salida controlada del proceso o variable del proceso (PV), e es la señal de error, r es la señal de referencia deseada, K_c es la ganancia que produce estabilidad marginal cuando solo se usa la acción de control

proporcional, T_i es el tiempo integral y T_d es el tiempo derivativo. En (3.1), se enfoca en el dominio del tiempo, pero también se puede usar en el dominio de Laplace como:

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_c + \frac{K_c}{T_i \cdot s} + K_c T_d s \quad (3.2)$$

Para alterar la respuesta del sistema, este controlador se sintoniza con la finalidad de conseguir el máximo rendimiento en términos de tiempo de subida, sobreimpulso, tiempo de estabilización y error en estado estable de la respuesta de salida. Para ello, los parámetros K_c , K_i equivalente a K_c/T_i y K_d igual a $K_c \cdot T_d$ se sintonizan con las reglas que se muestran a continuación:

TABLA 3.1: Variación de los parámetros de diseño: K_c , K_i o K_d [1].

Parámetros	T_r	$PO\%$	T_s	e_{ss}
K_c	Disminuye	Aumenta	Cambio pequeño	Disminuye
K_i	Disminuye	Aumenta	Aumenta	Elimina
K_d	Cambio pequeño	Disminuye	Disminuye	Cambio pequeño

Donde T_r representa el tiempo de subida desde un punto inicial hasta la referencia indicada, $PO\%$ es porcentaje de sobreimpulso de la respuesta, T_s es el tiempo de estabilización de la variable del proceso y e_{ss} es el error en estado estable, el cual es la diferencia entre la referencia y la variable del proceso.

3.2 Estrategias de Control PID

A lo largo de los años, el desarrollo de las industrias se ha debido al creciente uso de controladores lógicos programables (PLC). Las industrias buscan que sus procesos se manejen de la manera más eficiente; es decir, alcanzar la máxima productividad, máximo beneficio, costo mínimo o el menor tiempo de gasto de energía [20]. Por lo tanto, la intervención humana se debe mantener al mínimo posible, de modo que a través de los

controladores lógicos programables, los procesos se puedan controlar sin la necesidad de intervención de un operario en todo el proceso de producción.

Entonces, existe la necesidad de algoritmos de control que ayuden a garantizar que con el controlador lógico programable (PLC), se obtenga un sistema de control automático eficiente. En la industria, con el fin de obtener el mejor rendimiento, también se aplican estrategias de control. Existen muchas aplicaciones para estos distintos métodos de control, en los cuales se involucran el control de dos o más variables. Las estrategias de control aplicadas en esta tesis son las siguientes:

■ Control de la Razón

El control de la razón se aplica para mantener la relación constante entre dos flujos. En la industria, la aplicación de esta estrategia se realiza para mezcla o fundición de dos o más sustancias. Por ejemplo, control de la razón de flujo de aire y combustible en el proceso de combustión [1]. La estructura de control de la razón se observa en la figura 3.1.

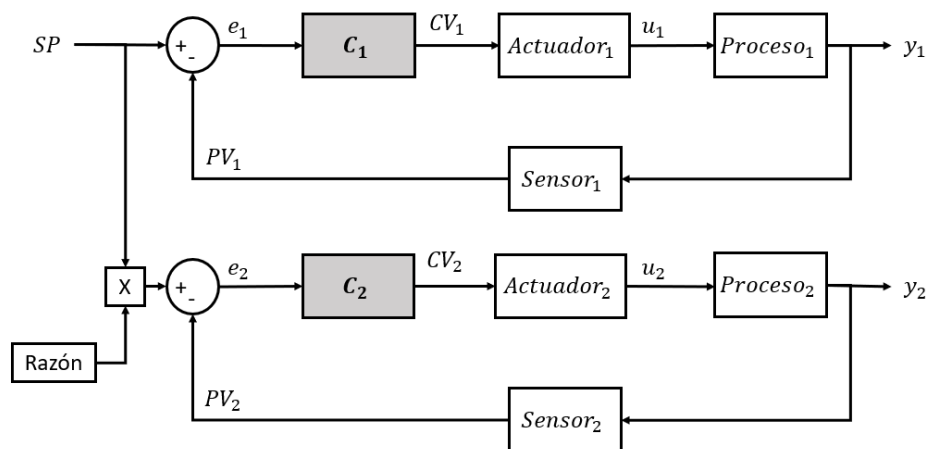


FIGURA 3.1: Diagrama de bloques del sistema de control de la razón.

■ Control Descentralizado

La estrategia de control descentralizado es donde dos procesos están relacionados directamente, ya que la entrada de uno afecta al otro proceso. Por ejemplo, en esta tesis se realizará el control de nivel y temperatura de un tanque (ver figura 3.2), donde a mayor entrada de agua afecta la temperatura del tanque; es decir, si se ingresa agua a menor temperatura al actualmente en el tanque afecta en una reducción de temperatura.

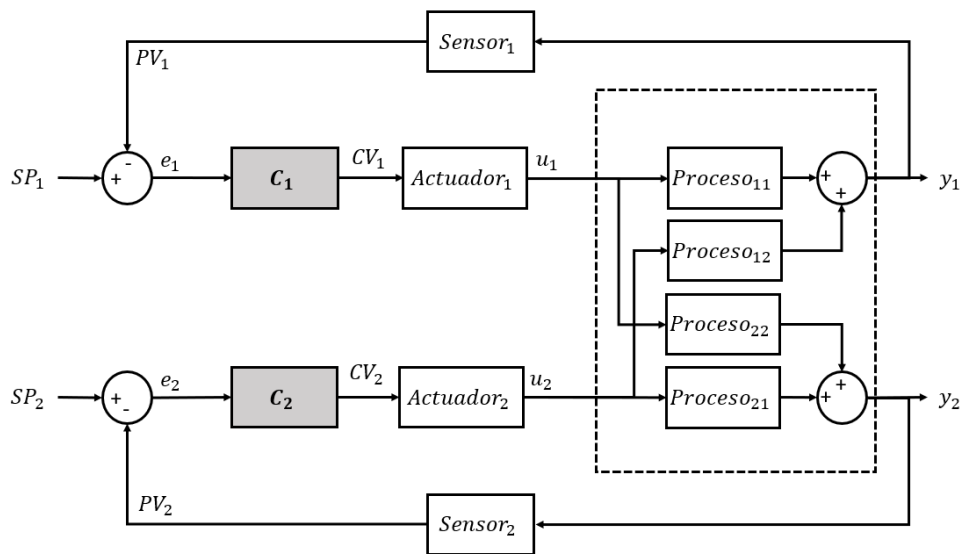


FIGURA 3.2: Diagrama de bloques del sistema de control descentralizado.

■ Control en Cascada

La estrategia de control en cascada presenta mejoras significativas en el rendimiento del sistema de control [1]. Por ello, se requiere generar un lazo de control secundario realimentado internamente al lazo de control principal (ver figura 3.3). En esta tesis, el proceso principal se representa por el nivel y el proceso secundario es el de la variable de flujo; es decir, proceso 1 es para la variable de nivel y proceso 2 es para la variable de flujo y solo se tiene un actuador que será el variador de frecuencia que acciona la bomba centrífuga.

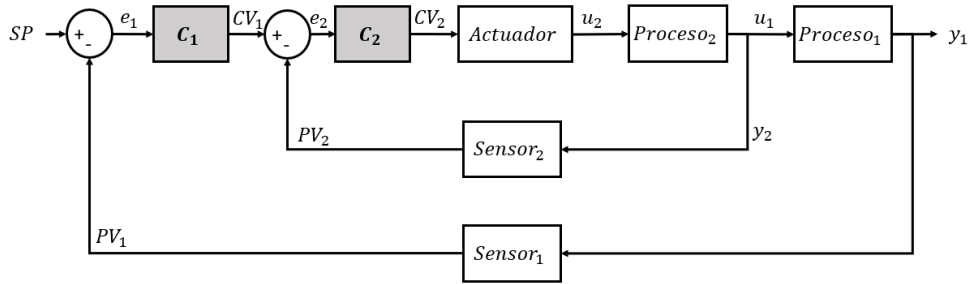


FIGURA 3.3: Diagrama de bloques del sistema de control en cascada.

3.3 Simulación de los Sistemas de Control PID

En la industria, los sistemas industriales de control son automatizados utilizando el algoritmo de control PID. Además, hay muchas variaciones de este algoritmo y no hay un estándar definido. El software TIA Portal usa un bloque de control definido por el algoritmo mostrado a continuación:

$$y = K_p[(b.w - x) + \frac{1}{T_i \cdot s}(w - x) + \frac{T_D \cdot s}{a \cdot T_D \cdot s + 1}(c.w - x)], \quad (3.3)$$

En donde y es el valor de salida del algoritmo PID, K_p es la ganancia proporcional, s representa el operador laplaciano, b es la variable que indica el ponderado de la acción proporcional, w es la consigna o referencia, x es la variable actualmente controlada, T_i es el tiempo de integración, a es el coeficiente para el retardo de la acción derivada y c es la variable para la ponderación de la acción derivativa. Además, este algoritmo es un equivalente al PID ideal mostrado en (3.1).

La simulación de los sistemas de control PID, se emplea para el proceso de flujo, presión, temperatura, nivel. Además, se utiliza la herramienta “pidtune” del software Matlab para hallar las ganancias proporcional, integral y derivativo del controlador visualizado en la ecuación (3.3). La simulación de las estrategias de control de la razón de flujo, control en cascada de nivel empleando flujo y control descentralizado de nivel

y temperatura se adjuntan en el enlace de drive en el capítulo de Anexos y programas fuentes.

3.3.1 Control del Proceso Flujo

En la planta industrial multipropósito existen dos tramos para medir flujo. Primero, el flujo de agua de entrada con el sensor FIT10. Segundo, el flujo de agua bombeado del tanque inferior al superior con el sensor FIT11. En la simulación, solo se consideró el modelo dinámico del proceso de flujo con el sensor FIT11 hallado en (3.3). Los parámetros del controlador PID utilizados para la simulación son: $K_p = 4.98$, $b = 1.2625$, $T_i = 1.266$, $a = 0.1$, $T_D = 0.5718$ y $c = 0$.

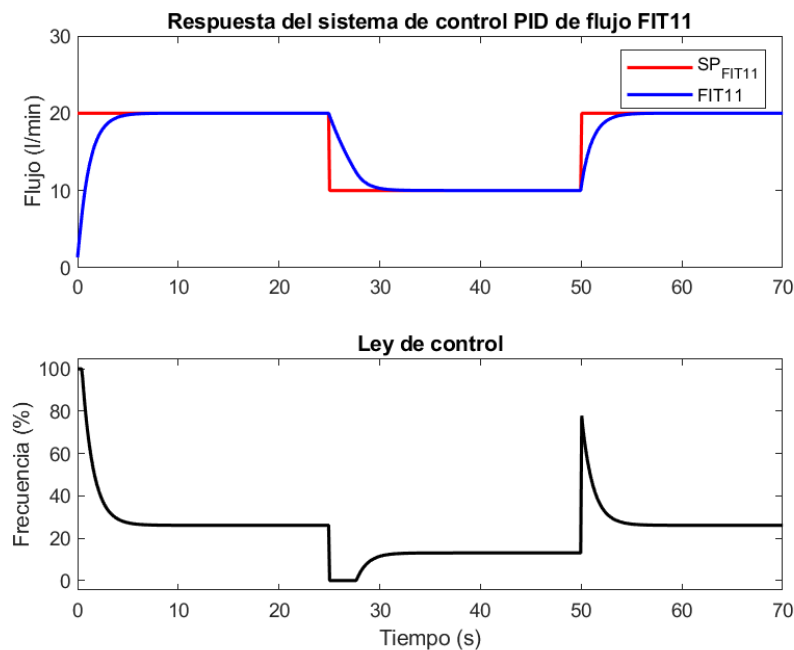


FIGURA 3.4: Simulación del sistema de control PID de flujo FIT11.

La respuesta del sistema de control PID de flujo FIT11, se observa en la figura 3.4. Donde las características de la curva de salida son: 5 segundos de tiempo de estabilización, porcentaje de sobreimpulso 0 % y 0.05 % de error de estado estable.

3.3.2 Control del Proceso Presión

La simulación del sistema de control de presión, se realizó usando el modelo dinámico calculado en (2.4), donde el sensor usado es PIT11 y el actuador es la bomba PUMP20 accionada por el variador de frecuencia VFD20. Los parámetros del controlador PID utilizados para la simulación son: $K_p = 238.63$, $b = 1.7535$, $T_i = 0.184$, $a = 0.1$, $T_D = 0.8584$ y $c = 0$.

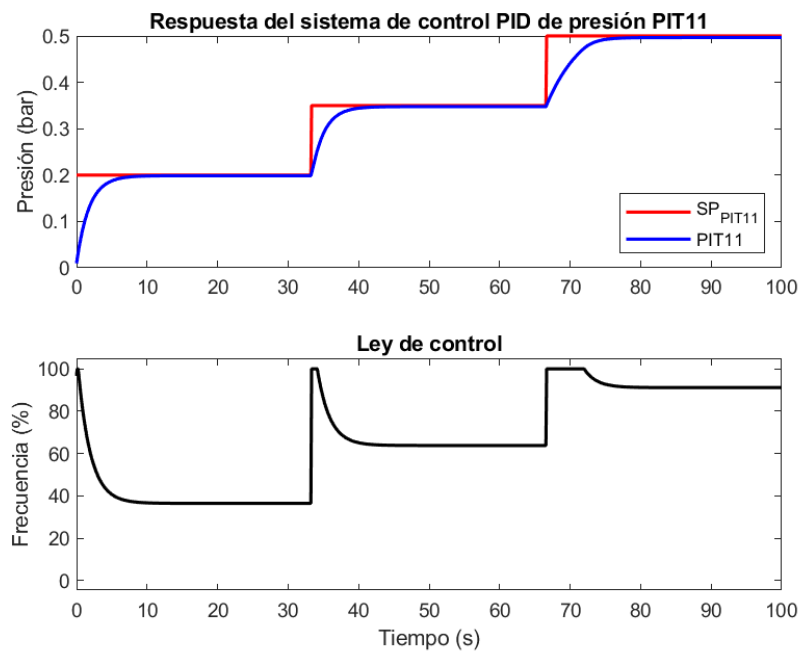


FIGURA 3.5: Simulación del sistema de control PID de presión PIT11.

La respuesta del sistema de control PID de presión PIT11, se muestra en la figura 3.5. Donde las características de la curva de salida son: 8 segundos de tiempo de estabilización, porcentaje de sobreimpulso 0 % y 0.667 % de error de estado estable.

3.3.3 Control del Proceso Nivel

La simulación del sistema de control de nivel fue realizado empleando el modelo dinámico hallado en (2.5), donde el sensor usado es LIT10 y el actuador es la bomba PUMP20 accionada por el variador de frecuencia VFD20. Los parámetros del controlador PID son: $K_p = 1.410$, $b = 1.22$, $T_i = 1.0505$, $a = 0.133$, $T_D = 1.8143$ y $c = 0$.

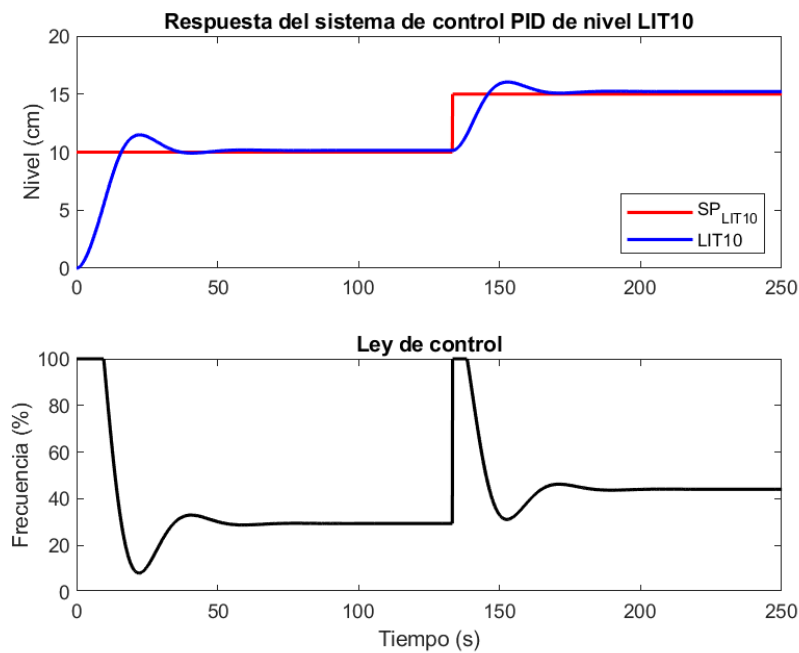


FIGURA 3.6: Simulación del sistema de control PID de nivel LIT10.

La respuesta del sistema de control PID de nivel LIT10, se visualiza en la figura 3.6. Donde las características de la curva de salida son: 40 segundos de tiempo de estabilización, 12.5 % porcentaje de sobreimpulso promedio y 4.6 % de error de estado estable.

3.3.4 Control del Proceso Temperatura

La simulación del sistema de control de temperatura fue realizada con el modelo dinámico estimado en (2.6), donde el sensor usado es TIT10 y el actuador es el controlador

de potencia JC10. Los parámetros del controlador PID son: $K_p = 40.810$, $b = 1$, $T_i = 0.9505$, $a = 0.133$, $T_D = 0.8143$ y $c = 0$. Se tiene en cuenta una temperatura inicial de 20 °C y una señal escaón de 30 °C.

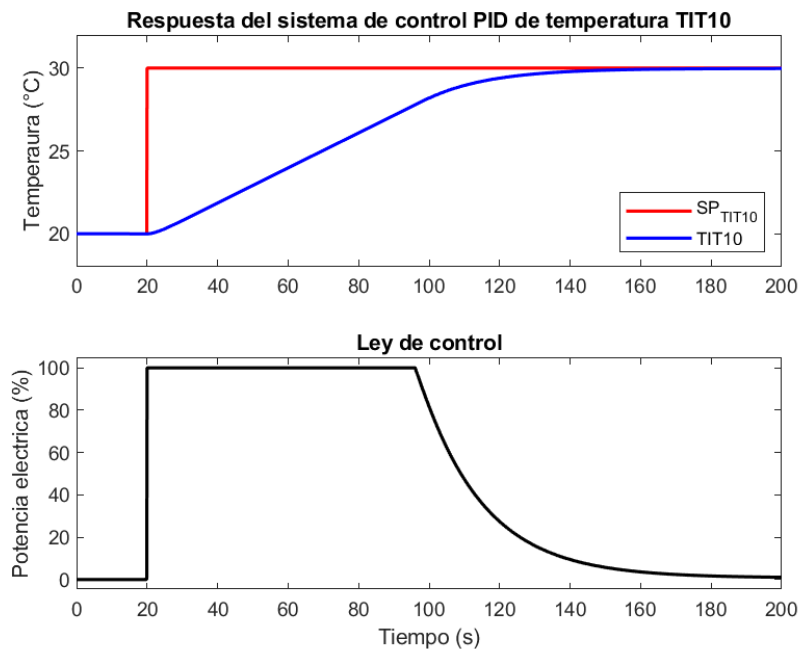


FIGURA 3.7: Simulación del sistema de control PID de temperatura TIT10.

La respuesta del sistema de control PID de temperatura TIT10, se observa en la figura 3.7. Donde las características de la curva de salida son: 130 segundos de tiempo de estabilización, porcentaje de sobreimpulso nulo y 0.28 % de error de estado estable.

3.4 Implementación de los Sistemas de Control PID

En la implementación de los sistemas de control PID de los procesos de la planta industrial multipropósito, se usa el bloque PID Compact del software TIA Portal Siemens. En los bloques PID, se configuran los parámetros proporcional, integral y derivativo previamente hallados en simulación. Con la finalidad de obtener la mejor respuesta con el

bloque controlador PID, se emplea la función de sintonización fina para los procesos: flujo, presión, nivel, temperatura y las estrategias de control de la razón de flujos, control en cascada de nivel empleando flujo y control descentralizado de nivel y temperatura.

3.4.1 Control del Proceso Flujo

En la planta industrial multipropósito, existen dos tramos para medir flujo. Primero, el flujo de agua de entrada con el sensor FIT10. Segundo, el flujo de agua bombeado del tanque inferior al superior con el sensor FIT11. El lazo de control para el proceso de flujo fue realizado con el sensor FIT11 y el actuador es la bomba PUMP20 accionada por el variador de frecuencia VFD20, cuyo modelo dinámico fue hallado en (2.3). Los parámetros del controlador PID empleados son los calculados a través de simulación y sintonizados en la implementación, los cuales son: $K_p = 5.7045$, $b = 0.2637$, $T_i = 3.3377$, $a = 0.1$, $T_D = 0.8417$ y $c = 0$. La respuesta al implementar el sistema de control PID de la variable del proceso de flujo FIT11, se observa en la figura 3.8.

Antes de indicar las características de la respuesta del flujo, se debe mencionar que no se considerará el sobreimpulso inicial, ya que el sensor no lee correctamente al inicio hasta que detecte un flujo de agua constante en la tubería verticalmente. A modo de corrección física de la planta, se puede colocar una sección de la tubería de forma horizontal y que el flujómetro este situado en dicho punto para evitar los sobreimpulso inicial generado por la tubería vacía. Las características de la respuesta del proceso de flujo FIT11 con una señal de escalón de 15 l/min a 20 l/min son: 14.2 segundos de tiempo de estabilización, 3.4 % porcentaje de sobreimpulso y error de estado estable nulo.

3.4.2 Control del Proceso Presión

El lazo de control para el proceso de presión fue efectuado con el sensor PIT11 y el actuador es la bomba PUMP20 accionada por el variador de frecuencia VFD20, cuyo

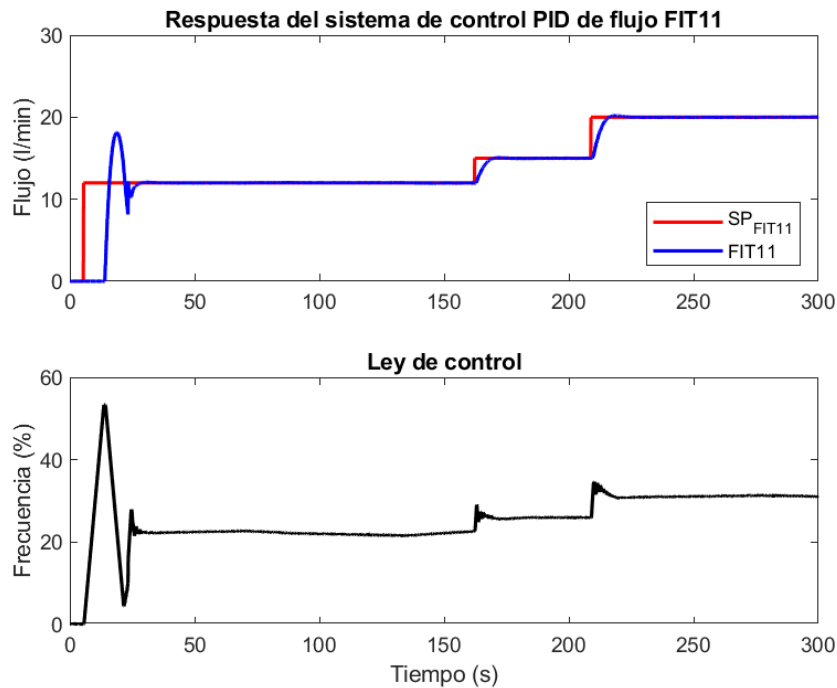


FIGURA 3.8: Implementación del sistema de control PID de flujo FIT11.

modelo dinámico fue hallado en (2.4). Los parámetros del controlador PID empleados son los calculados a través de simulación y sintonizados en la implementación, los cuales son: $K_p = 238.6338$, $b = 0.2530$, $T_i = 3.3836$, $a = 0.1$, $T_D = 0.8584$ y $c = 0$. La respuesta al implementar el sistema de control PID del proceso de presión PIT11, se visualiza en la figura 3.9.

Las características de la respuesta del proceso de presión PIT11 con una señal escalón de 0.35 bar a 0.5 bar son: 13.2 segundos de tiempo de estabilización, porcentaje de sobreimpulso nulo y error de estado estable de 3.34 %. Adicionalmente, se debe mencionar que la máxima de presión de agua que puede circular por la tubería es de 0.55 bar debido a las dimensiones de la tubería. Por eso, cuando se toma la referencia de 0.5 bar y sumado a que el valor de la ganancia proporcional es alto, genera las oscilaciones en la respuesta del sistema cuando la señal de escalón es 0.5 bar.

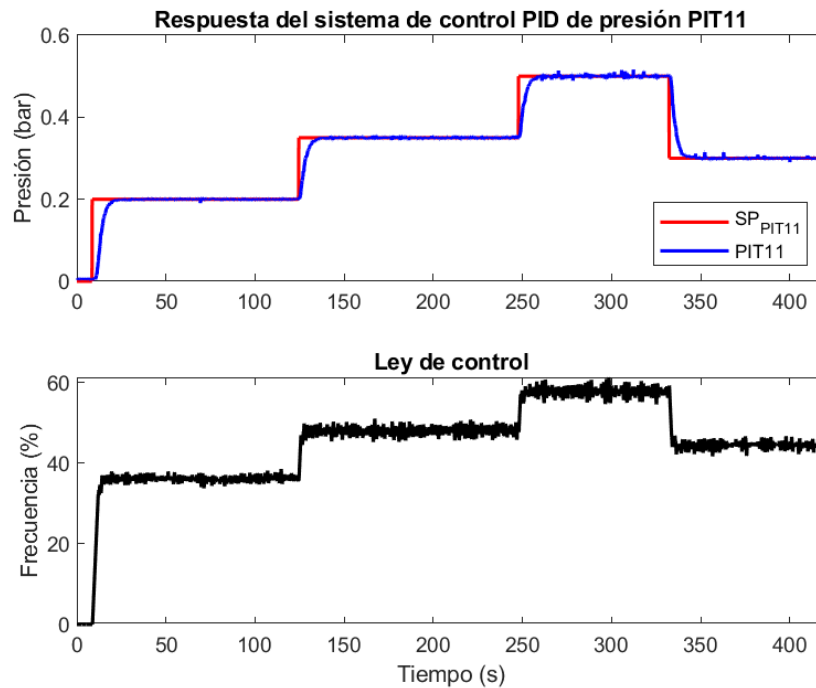


FIGURA 3.9: Implementación del sistema de control PID de presión PIT11.

3.4.3 Control del Proceso Nivel

El lazo de control para el proceso de nivel fue realizado con el sensor LIT10 y el actuador es la bomba PUMP20 accionado por el variador de frecuencia VFD20, cuyo modelo dinámico fue hallado en (2.5). Los parámetros del controlador PID utilizados son los hallados a través de simulación y sintonizados en la implementación, los cuales son: $K_p = 1.410$, $b = 1.22$, $T_i = 1.0505$, $a = 0.133$, $T_D = 1.8143$ y $c = 0$. La respuesta al implementar el sistema de control PID del proceso de nivel LIT10, se observa en la figura 3.10.

Las características de la respuesta del proceso de nivel LIT10 con una señal escalón de 20 cm a 30 cm son: 60 segundos de tiempo de estabilización, 20.6 % porcentaje de sobreimpulso y 0.1 % de error de estado estable.

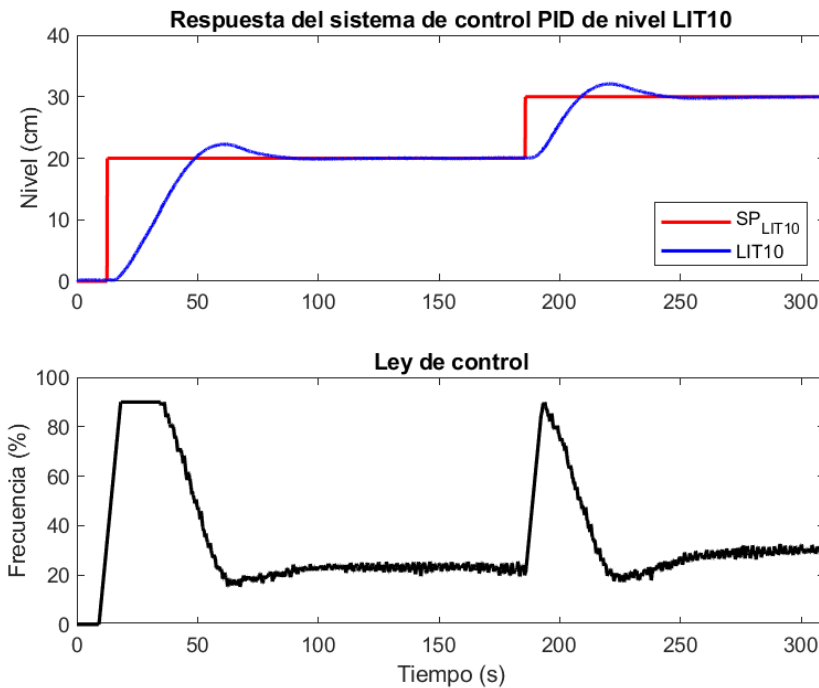


FIGURA 3.10: Implementación del sistema de control PID de nivel LIT10.

3.4.4 Control del Proceso Temperatura

El lazo de control para el proceso de temperatura fue efectuado con el sensor TIT10 y el actuador es el controlador de potencia JC10, cuyo modelo dinámico fue hallado en (2.6). Los parámetros del controlador PID usados, son los calculados a través de simulación y sintonizados en la implementación, los cuales son: $K_p = 10.810$, $b = 1$, $T_i = 0.9505$, $a = 0.133$, $T_D = 0.8143$ y $c = 0$. La respuesta al implementar el sistema de control PID de la variable del proceso de temperatura TIT10 tiene en cuenta una temperatura inicial del agua de $27\text{ }^\circ\text{C}$ y una señal escalón de $40\text{ }^\circ\text{C}$, se muestra en la figura 3.11.

Las características de la respuesta del proceso de temperatura TIT10 con una señal escalón de $27\text{ }^\circ\text{C}$ a $40\text{ }^\circ\text{C}$ son: tiempo de estabilización 50 min, 25 % porcentaje de sobreimpulso y error final varía entre 0 y 10 %.

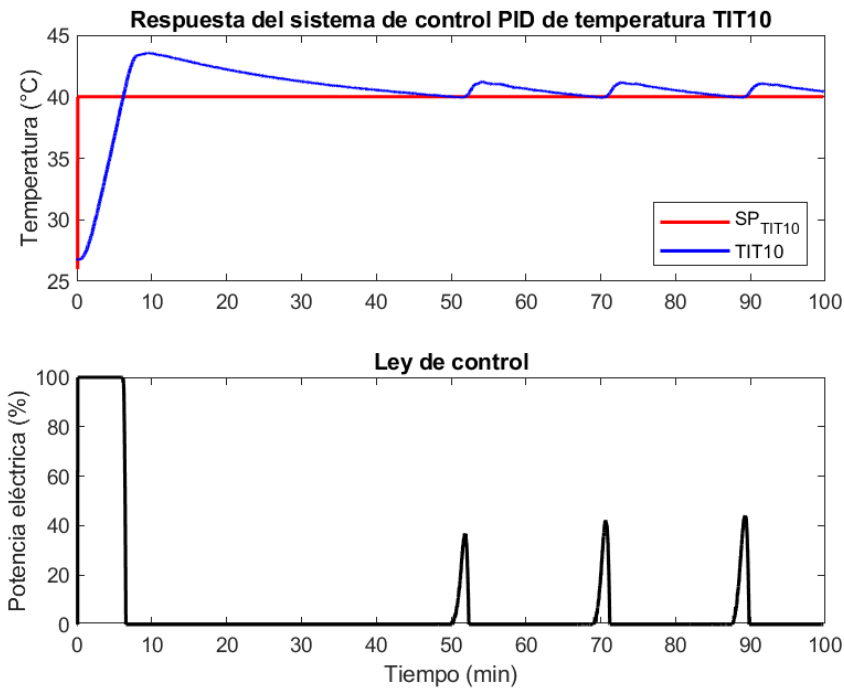


FIGURA 3.11: Implementación del sistema de control PID de temperatura TIT10.

3.4.5 Control de la Razón de Flujos

Los lazos de control para la estrategia de control de la razón de flujos fueron diseñados empleando los modelos dinámicos hallados en (2.2) y (2.3). Los parámetros del controlador PID para el flujo por el sensor FIT11 son los asumidos previamente. Mientras, el flujo por el sensor FIT10 se utilizan otros parámetros debido a que el actuador es válvula EV11. Los parámetros del controlador PID usados son los calculados a través de simulación y sintonizados en la implementación FIT10, los cuales son: $K_p = 3.1371$, $b = 0.2625$, $T_i = 2.266$, $a = 0.1$, $T_D = 0.5718$ y $c = 0$. La respuesta al implementar el sistema de control PID de la razón de flujos FIT10 y FIT11, se observa en la figura 3.12.

Las características de la respuesta de la razón de flujos FIT10 y FIT11 con una referencia de 8 l/min a 10 l/min y 16 l/min a 20 l/min respectivamente son: 12.5 y 14.1

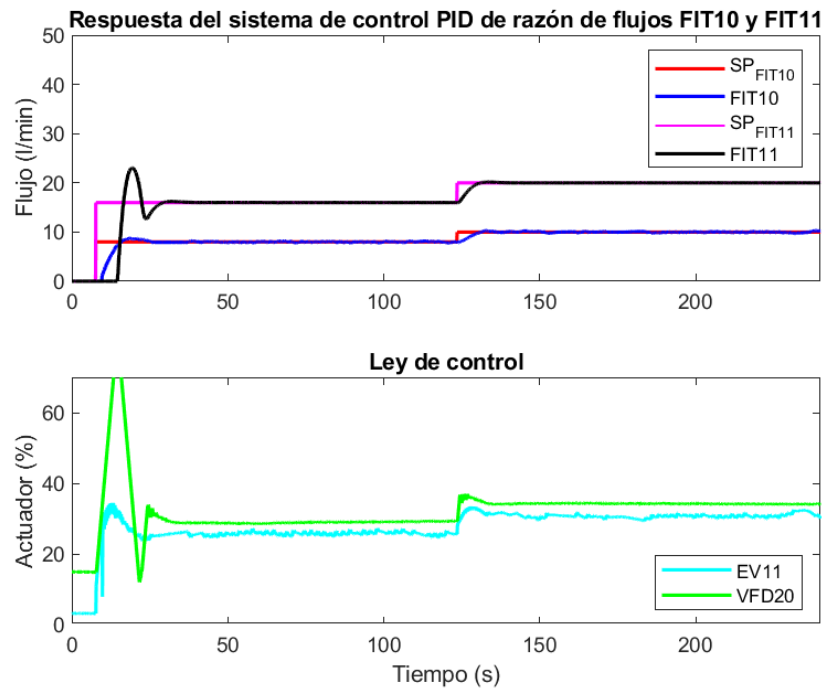


FIGURA 3.12: Implementación del sistema de control PID de razón de flujos FIT10 y FIT11.

segundos de tiempo de estabilización, 15 y % 4 % de porcentaje de sobreimpulso y error de estado estable nulo.

3.4.6 Control en Cascada del Nivel empleando Flujo

Los lazos de control para la estrategia de control en cascada de nivel empleando flujo se realizaron con los modelos dinámicos hallados en (2.5) para el proceso de nivel y (2.3) para el proceso de flujo. Los parámetros del controlador PID usados son los calculados a través de simulaciones y sintonizados en la implementación de flujo FIT11, los cuales son: $K_p = 5.7045$, $b = 0.2637$, $T_i = 3.3377$, $a = 0.1$, $T_D = 0.8417$ y $c = 0$. Del mismo modo, los parámetros del controlador PID de nivel LIT10 son: $K_p = 1.410$, $b = 1.22$, $T_i = 1.0505$, $a = 0.133$, $T_D = 1.8143$ y $c = 0$.

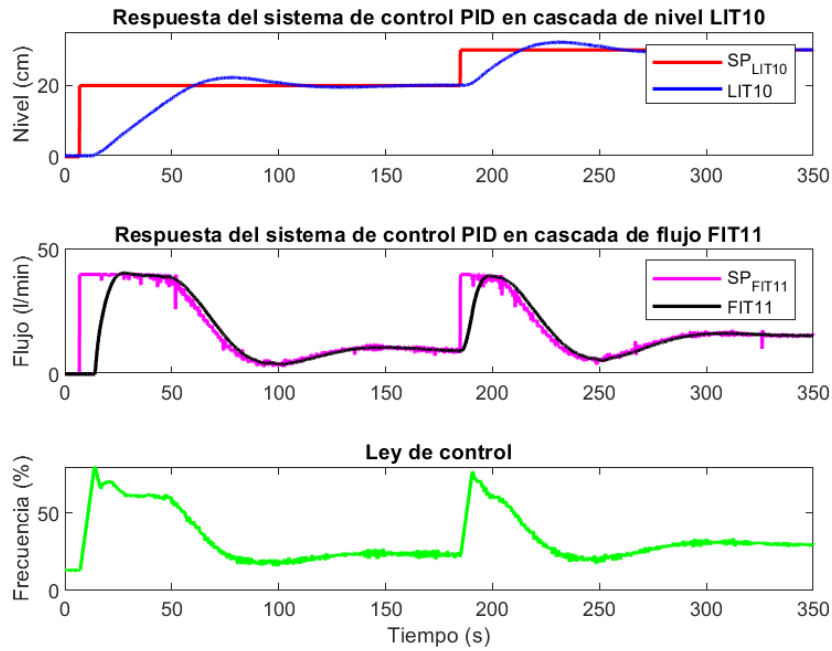


FIGURA 3.13: Implementación del sistema de control PID en cascada de nivel LIT10 empleando flujo FIT11.

La respuesta al implementar el sistema de control PID en cascada de nivel LIT10 empleando flujo FIT11, se observa en la figura 3.13. Las características de la respuesta con la estrategia de control en cascada, para la variable de nivel LIT10 con una referencia de 0 cm a 25 cm, son las siguientes: 146 segundos de tiempo de estabilización, 4.5 % porcentaje de sobreimpulso y error de estado estable nulo.

3.4.7 Control Descentralizado de Nivel y Temperatura

Los lazos de control para la estrategia de control descentralizado de nivel y temperatura se realizaron con los modelos dinámicos hallados en (2.5) para el proceso de nivel y (2.6) para el proceso de temperatura. Los parámetros del controlador PID usados son los calculados a través de simulaciones y sintonizados en la implementación LIT10, los cuales son: $K_p = 1.410$, $b = 1.22$, $T_i = 1.0505$, $a = 0.133$, $T_D = 1.8143$ y $c = 0$. Del mismo

modo, los parámetros para el control de la variable TIT10 son: $K_p = 10.810$, $b = 1$, $T_i = 0.9505$, $a = 0.133$, $T_D = 0.8143$ y $c = 0$. La respuesta al implementar el sistema de control PID descentralizado de nivel LIT10 y temperatura TIT10, se observa en la figura 3.14.

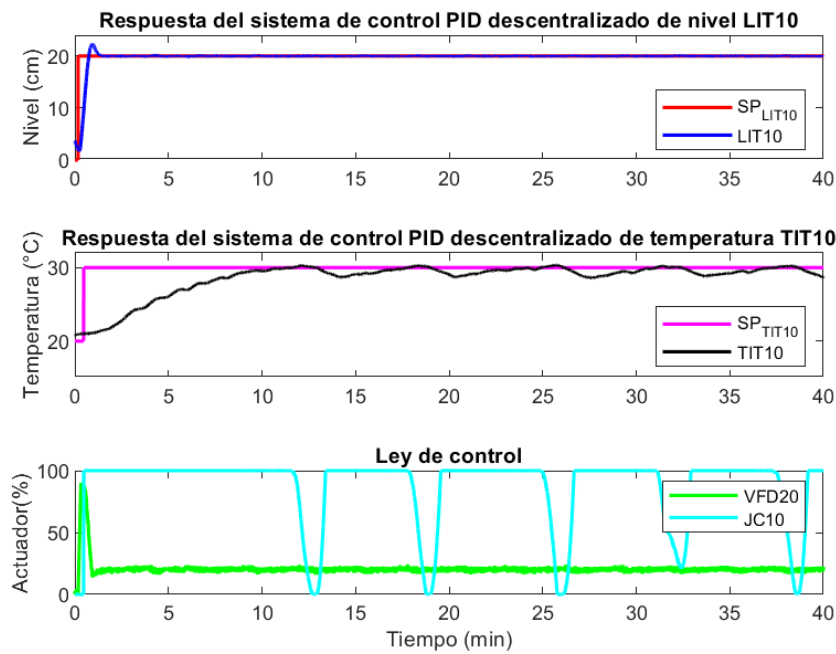


FIGURA 3.14: Implementación del sistema de control PID descentralizado de nivel LIT10 y temperatura TIT10.

Las características de la respuesta del proceso de nivel LIT10 son: 1.15 minutos de tiempo de estabilización, 11.7 % porcentaje de sobreimpulso y 1 % de error de estado estable y para el proceso de temperatura TIT10 son: 13 minutos aproximadamente de tiempo de estabilización, porcentaje de sobreimpulso 0 % y 12 % de error de estado estable.

Capítulo 4

CONTROL BASADO EN LÓGICA DIFUSA

En este capítulo, se da un breve concepto teórico sobre el algoritmo de lógica difusa, los parámetros que permiten sintonizar este controlador, los tipos de control difuso existentes y la implementación del algoritmo en la planta industrial multipropósito para control e instrumentación y el módulo industrial multipropósito para control y supervisión, configurados a través del software TIA Portal para el control de los procesos: flujo, presión, nivel, temperatura, así como a las estrategias de control de la razón, cascada y descentralizado.

4.1 Controlador basado en Algoritmo de Lógica Difusa

El controlador difuso es un formalismo matemático usado para representar el razonamiento del experto humano. Por ello, su aplicación es realizada en sistemas expertos y aplicaciones relacionados con inteligencia artificial [7].

El algoritmo de lógica difusa emplea reglas para procesar las variables de entrada y generar una señal de control que actúa sobre el proceso que se requiera controlar [1]. En muchas aplicaciones para sistemas de control MISO, se suelen tener como señales de entrada el error y derivada del error y la señal de salida es la ley de control [21].

Para la aplicación de lógica difusa en un sistema de control, se debe tener en cuenta que es un controlador de tipo cíclico, al igual que los controladores convencionales [1]. Los sistemas de control difuso comprenden cuatro partes fundamentales: fuzzificación, inferencia, reglas difusas y defuzzificación [21].

4.1.1 Fuzzificación

La **fuzzificación** es donde la entrada del controlador se convierte en variables de entrada de tipo difuso usando para ello las funciones de pertenencia [22]. Actualmente, los controladores lógicos difusos utilizan distintas formas de función de pertenencia, tales como la forma triangular, la forma trapezoidal y la forma sigmoide o campana (ver figura 4.1), en este trabajo se usa la forma trapezoidal.

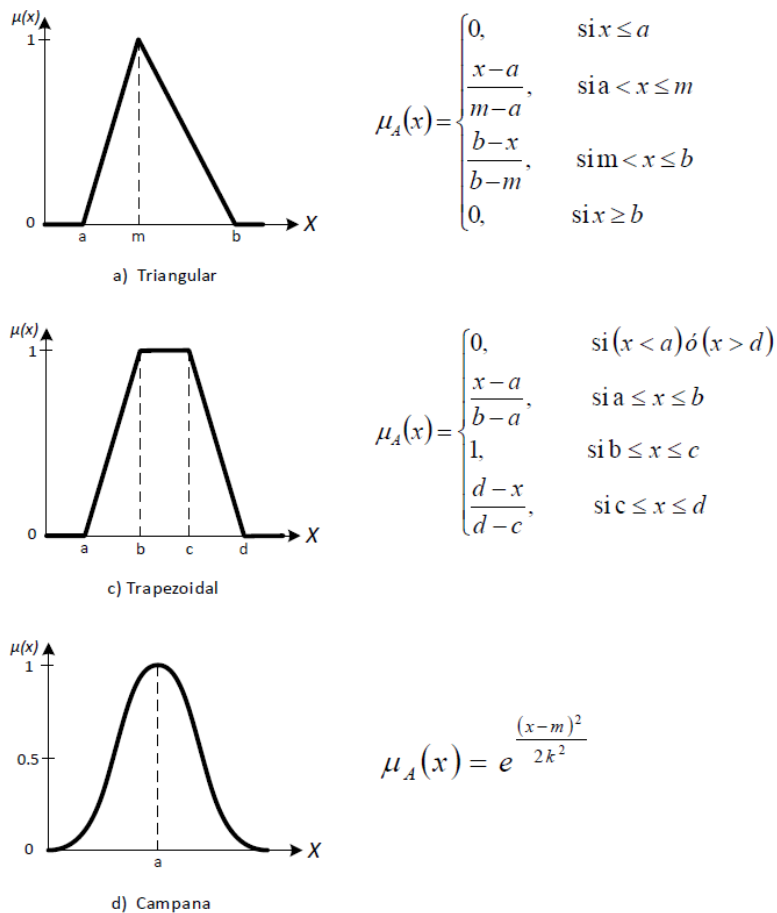


FIGURA 4.1: Funciones de pertenencia [23]

Luego de definir la función de pertenencia se calcula el grado de cumplimiento (DOF, del inglés *degree of fulfillment*), el cual se halla al trazar una línea vertical con el valor de la señal de entrada (ver figura 4.2).

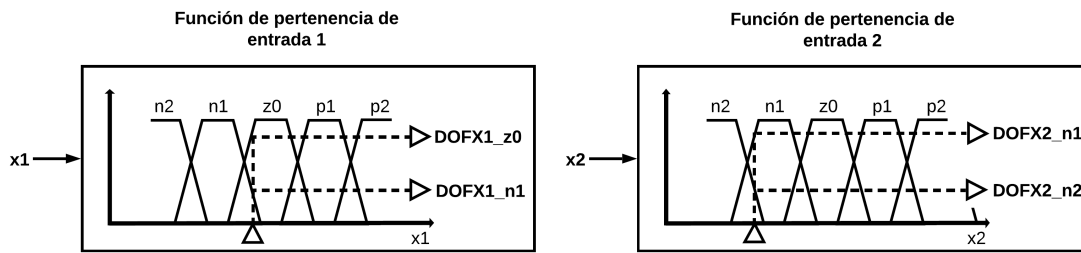


FIGURA 4.2: Grado de cumplimiento (DOF) en las funciones de pertenencia de las entradas.

Considerando el caso de las señales de entrada 1 y entrada 2 son las líneas verticales que se interceptan en los mismos puntos de la función de pertenencia de la figura 4.2.

4.1.2 Tipos de Reglas difusas: Mamdani y Takagi-Sugeno

Las **reglas difusas** se usan reglas heurísticas de la forma SI (antecedente), ENTONCES (consecuente), donde el antecedente y el consecuente también son valores difusos, ya sean puros o resultado de operar con ellos [24]. Además, tales reglas constituyen la clave del sistema de control difuso, ya que ellas determinan el comportamiento del sistema para diferentes tipos de entradas [1]. Existen dos tipos de reglas difusas: Mamdani y Takagi-Sugeno.

- **Reglas de tipo Mamdani**

El formato de estas reglas es:

$$\textit{si } x_1 \textit{ es } A_1 \textit{ y } x_2 \textit{ es } A_2 \textit{ y } \dots \textit{ y } x_n \textit{ es } A_n, \textit{ entonces } y \textit{ es } B.$$

En donde x_i y y son variables heurísticas, y los A_i y B representan los valores heurísticos que pueden asumir. Los sistemas que usan este tipo de reglas fueron propuestos por Mamdani [23].

Cada regla difusa está conformado por uno o varios antecedentes y consecuentes. Las ventajas del método Mamdani, es intuitivo, adaptable al lenguaje humano, por lo tanto, resulta fácil de implementar.

Por ejemplo, tomando como referencia las siguientes reglas definidas por el razonamiento del experto humano:

- si $x_1 = n1$ y $x_2 = n1$, entonces $y = n1$
- si $x_1 = n1$ y $x_2 = n2$, entonces $y = z0$
- si $x_1 = z0$ y $x_2 = n1$, entonces $y = z0$
- si $x_1 = z0$ y $x_2 = n2$, entonces $y = p1$

■ Reglas de tipo Takagi-Sugeno

El formato de estas reglas es:

$$\text{si } x_1 \text{ es } A_1 \text{ y } x_2 \text{ es } A_2 \text{ y } \dots \text{ y } x_n \text{ es } A_n, \text{ entonces } y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

En donde x_i son variables heurísticas, y los A_i representan los valores heurísticos que pueden asumir, y es la variable de salida y f es la función lineal de las entradas. Los sistemas de este tipo se les conoce como sistemas Takagi-Sugeno [23].

Estos tipos de sistemas se adaptan mejor al análisis matemático. Las ventajas que presenta es la eficiencia computacional. Además, funciona bien con técnicas de optimización, lineales y adaptativas.

4.1.3 Métodos de Inferencia Difusa: Mamdani y Takagi-Sugeno

La función de **inferencia** consiste en tomar las funciones de pertenencia provenientes de la fuzzificación, y apoyado en la base de las reglas difusas para generar la salida del sistema difuso [25]. Existen diferentes métodos de inferencia, los más comunes son: Mamdani y Takagi-Sugeno [24].

■ **Inferencia en sistemas Mamdani**

Primero, evaluar el grado de cumplimiento o certeza de cada regla difusa para los valores de las variables de entrada. Si la regla difusa que se evalúa es la n -ésima, el grado de cumplimiento viene dado por $DOFx(n)$.

Segundo, a partir del grado de cumplimiento, se halla la conclusión de la regla. Asigna a cada variable de salida el conjunto difuso correspondiente modificado por el grado especificado por $DOFx(n)$. La función de pertenencia modificada se expresa por las premisas de la señal de salida $y_{premise(n)}$, donde n es la regla evaluada. Dicho cambio se realiza mediante la implicación difusa Mamdani [23]. En la figura 4.3, se muestra la configuración básica de un sistema difuso Mamdani.

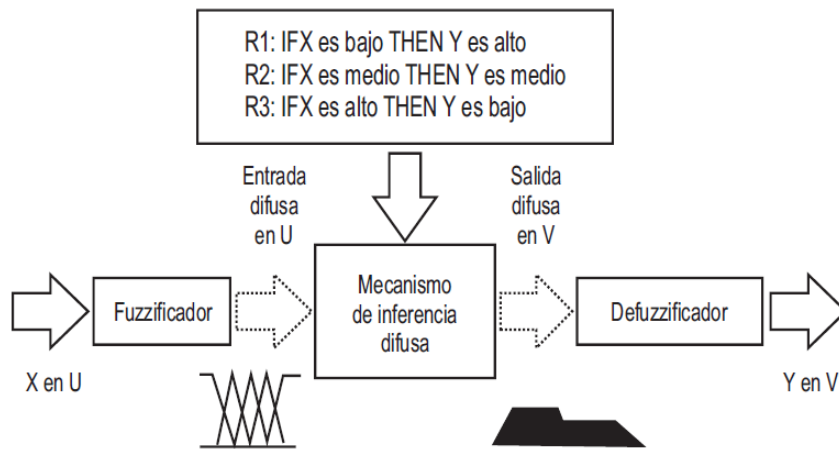


FIGURA 4.3: Sistema difuso Mamdani [24].

Por ejemplo, en la figura 4.2 se halla el grado de cumplimiento de las dos señales de entrada y además se toman las reglas difusas Mamdani planteadas anteriormente como ejemplo para hallar las premisas de la señal de salida a través del operador de inferencia difusa, la cual se emplea el operador mínimo al aplicar la inferencia de Mamdani.

- $y_{premise(1)} = \min(DOFX_{1n1}, DOFX_{2n1}) = DOFX_{1n1}$
- $y_{premise(2)} = \min(DOFX_{1n1}, DOFX_{2n2}) = DOFX_{2n2}$

- $y_{premisas(3)} = \min(DOF X1_{z0}, DOFX2_{n1}) = DOFX1_{z0}$
- $y_{premisas(4)} = \min(DOF X1_{z0}, DOFX2_{n2}) = DOFX2_{n2}$

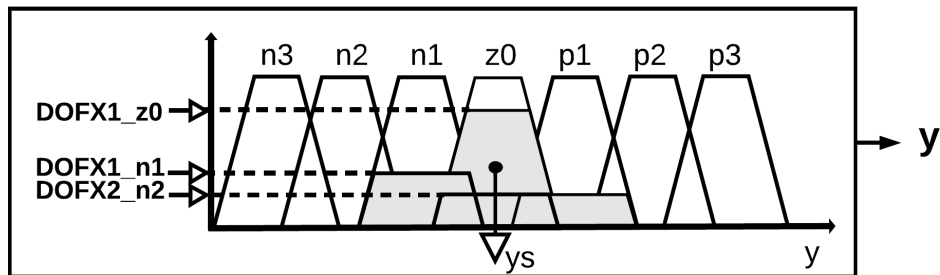


FIGURA 4.4: Grados de cumplimientos (DOF) mínimos en la función de pertenencia de salida.

■ Inferencia en sistemas Takagi-Sugeno

Primero, el cálculo del antecedente de las reglas difusas es igual que en el caso de los sistemas Mamdani; al emplear el operador de implicación elegido se obtiene el grado de cumplimiento α para cada regla.

Segundo, el cálculo del consecuente de las reglas difusas se obtienen mediante la combinación lineal de las señales de las entradas:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

En la figura 4.5, se observa la configuración básica de un sistema difuso Takagi-Sugeno.

Por último, en un sistema difuso Takagi-Sugeno con un número de M reglas difusas, la salida se obtiene a través de la media ponderada de las salidas individuales y_1, y_2, \dots, y_n proporcionada por las reglas, como se muestra a continuación:

$$Salida = \frac{\sum_{i=1}^M \alpha_i \cdot f_i(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\sum_{i=1}^M w_i} \quad (4.1)$$

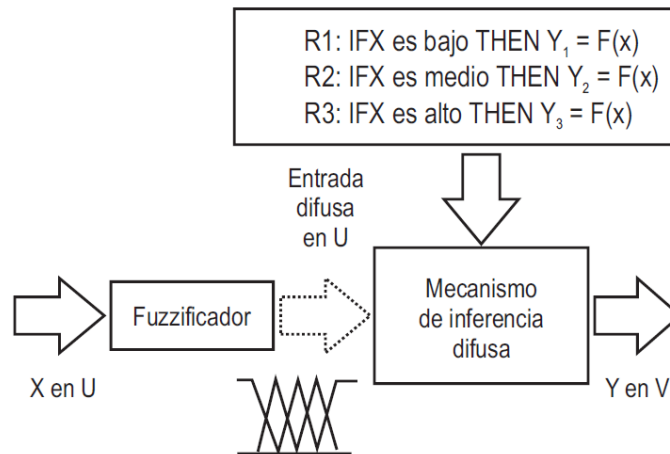


FIGURA 4.5: Sistema difuso Takagi-Sugeno [24].

4.1.4 Defuzzificación

En la **defuzzificación** se realiza la conversión de los datos que provienen de la salida difusa de la función de inferencia a una salida numérica, mediante una ponderación y normalización de las sentencias lógicas antecedentes [25]. Esta etapa es necesaria en los sistemas difusos Mamdani, porque el conjunto difuso de salida para estos sistemas no es directamente utilizable para dar una información exacta al operador o enviar el dato a un accionador, es necesario pasar el dato difuso de salida a un valor real [23].

En la actualidad, existen distintos métodos de defuzzificación. Los principales métodos de defuzzificación son: Centro de Máximos (COM), Suma de los Centros de Áreas (SCOA) y Centro de Áreas (COA). Se tomó como referencia la descripción planteada en [26] acerca de estos métodos:

- **Centro de Máximos (COM)**

Los k términos heurísticos de la variable difusa de salida de la función de inferencia, y sus valores máximos de pertenencia, cm_{ax_k} , tal que $u(cm_{ax_k}) = 1, 0$. A los cm_{ax_k} se les conoce como valores típicos de la variable.

La aportación de cada regla difusa al valor real y_{COM} es ponderada a través de la altura α_j de la j-ésima conclusión, de la siguiente forma:

$$y_{COM} = \frac{\sum_k cmax_k \cdot \alpha_j}{\sum \alpha_j}, \quad (4.2)$$

■ Suma de los Centros de Áreas (SCOA)

A comparación del método previo, el cual no toma en cuenta las funciones de pertenencia de salida, este método añade tal información produciendo que incremente el costo computacional [26].

Este método consiste en evaluar individualmente el centro de gravedad (área de función de pertenencia cuando solo hay una sola señal de salida) de los conjuntos difusos obtenidos en la inferencia y, a continuación, efectuar la media ponderada del conjunto total, el que resulta de los conjuntos difusos. Si la función de pertenencia de salida $u_B(y)$ es continua, se calcula a través de la siguiente ecuación:

$$y_{SCOA} = \frac{\int_s y \cdot \sum u_B(y) \cdot dy}{\int_s u_B(y) \cdot dy} \quad (4.3)$$

Donde y es la variable de integración y S es el soporte conjunto difuso global. Además, este es el método empleado en el trabajo de tesis, por ello, se puede simplificar la ecuación 4.3 con la ecuación mostrada en 4.4 y empleando a la función de pertenencia mostrada en 4.4.

$$y_S = \frac{\sum_{i=1}^M cmax_i \cdot A(i)}{\sum_{i=1}^M A(i)} \quad (4.4)$$

En donde i representa el número de premisas halladas anteriormente, $cmax_i$ es el centro de la función de pertenencia de salida y $A(i)$ representa el área de cada función de pertenencia de salida, el área de cada trapecio se calcula con la fórmula

$A = (base_{menor} + base_{mayor}).altura/2$, en el cual se puede reemplazar la altura con el valor DOF de cada premisa hallada.

■ **Centro de Área (COA)**

Funciona de la misma forma que el método COA con la diferencia que corrige la superposición de áreas de las funciones de pertenencia de salida. Esto se realiza tomando en cuenta las áreas solo una vez a diferencia del método SCOA [26]; para ello solo se considera únicamente el área de la función de pertenencia que resulte mayor en cada punto. Si la función de pertenencia $u_B(y)$ es continua, se halla a través de la siguiente ecuación:

$$y_{COA} = \frac{\int_s u_B(y) \cdot y \cdot dy}{\int_s u_B(y) \cdot dy} \tag{4.5}$$

En la figura 4.6, se explica gráficamente la estructura del controlador difuso a emplear en esta tesis, donde la cantidad de funciones de pertenencia por cada señal de entrada y salida son de 5, la cantidad de reglas difusas equivalentes para ello son de 25. Como referencia, la cantidad de funciones de pertenencias utilizadas para las señales de entrada y salida, se toma en cuenta lo mencionado en [27], donde menciona que al emplear más de 7 funciones de pertenencia para las señales del controlador difuso, el desempeño del controlador será el mismo.

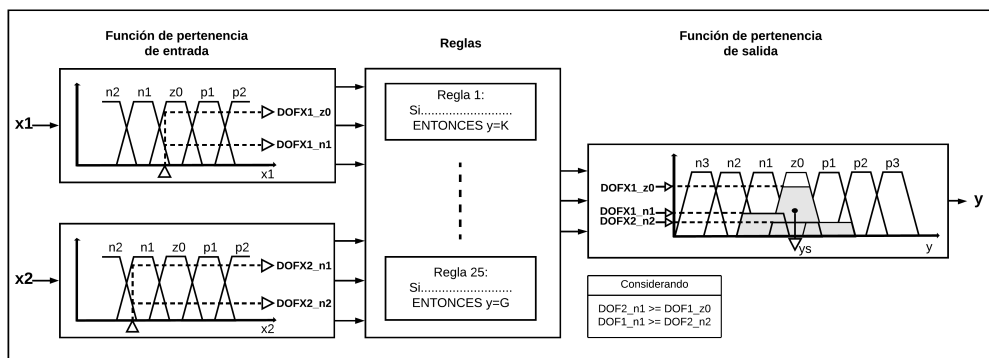


FIGURA 4.6: Estructura general de sistema difuso de 2 entradas, 25 reglas y una salida.

4.1.5 Estructuras de los Sistemas de Control Difuso

Las estructuras de los sistemas de control difuso son muy diversos, ya que se puede emplear de distintas formas de control. Ya seleccionado el método de control difuso de Mamdani, ahora se analizan las estructuras de los sistemas de control difuso. A continuación, se muestra los distintos tipos de los sistemas de control PD, PI y PID difusos.

■ Estructura del sistema de control PD Difuso

La estructura del sistema de control PD difuso [28], [21] se basa en tomar como señales de entrada al error y la derivada del error. Adicionalmente, se agrega ganancias ponderadas para sintonizar las señales de entrada g_1 y g_2 . De igual forma, se emplea una ganancia h_1 en la señal salida (ver figura 4.7). Las ganancias se sintonizan para obtener el mayor desempeño de la señal de salida del sistema.

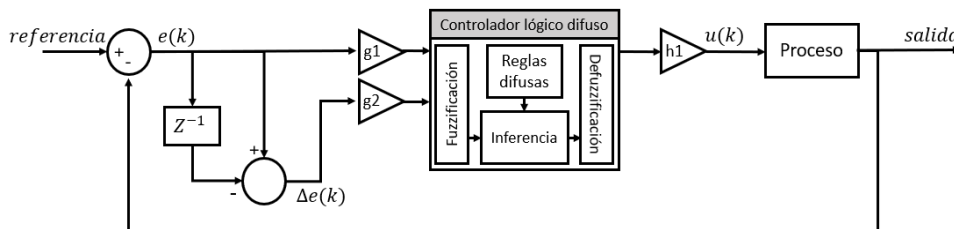


FIGURA 4.7: Estructura del sistema de control PD Difuso

■ Estructura del sistema de control PI Difuso

La estructura del sistema de control PI difuso [28], [21] considera como señales de entrada al error y derivada del error. Sin embargo, a diferencia del caso anterior, en la señal de salida hay una retroalimentación del dato anterior. Adicionalmente, se agrega ganancias ponderadas para sintonizar las señales de entrada g_1 y g_2 . De igual manera, se emplea una ganancia h_1 en la señal salida (ver figura 4.8). Las ganancias se sintonizan para obtener el mayor desempeño de la señal de salida del sistema.

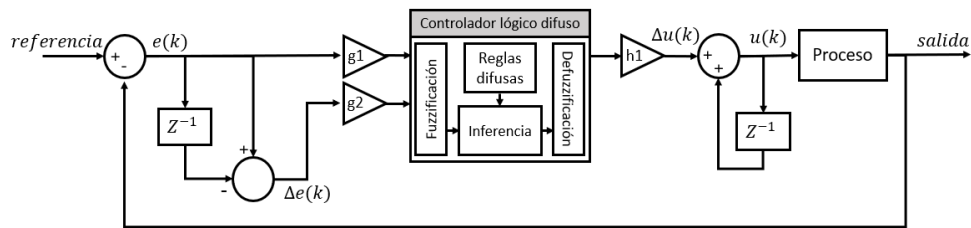


FIGURA 4.8: Estructura del sistema de control PI Difuso

■ Estructura del sistema de control PID Difuso

En la aplicación del sistema de control PID difuso, se define como la suma del sistema de control PI difuso y el sistema de control PD difuso [29], [28] para dar como resultado el sistema de control PID difuso (ver figura 4.9). También, existe otra forma de aplicar el controlador PID difuso y es con las señales de error y la derivada del error como las entradas, pero en lugar de generar la señal de control del sistema de control, se genera las ganancias proporcional, integral y derivativa del controlador PID como señal de salida [30].

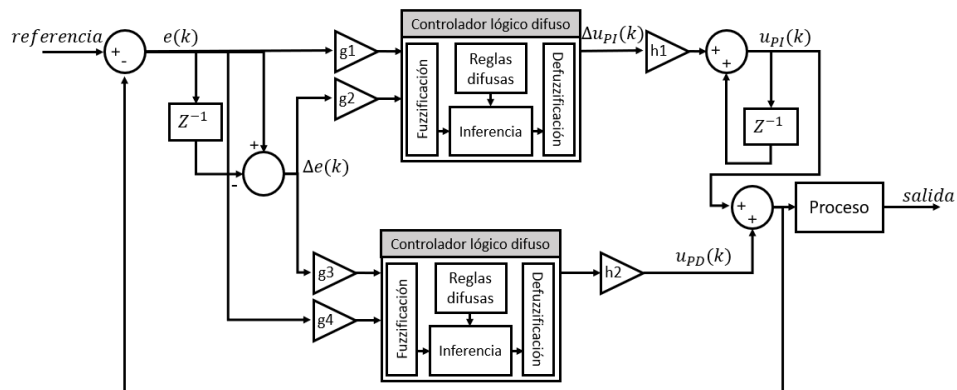


FIGURA 4.9: Estructura del sistema de control PID Difuso

4.2 Simulación de los Sistemas de Control Difuso

Debido a que los equipos fueron adquiridos recientemente, se realizaron simulaciones para determinar las reglas difusas, rango de las funciones de pertenencia para el

control lógico difuso de los procesos de flujo, presión, nivel y temperatura, cuyos modelos dinámicos fueron estimados previamente en el capítulo 2 y se emplea el sistema de control de la figura 4.7, el cual tiene como señales de entradas el error y la derivada del error y la señal de salida es la ley de control. También, tener en cuenta que a pesar de emplear el uso del software Matlab, no se usa la librería dedicada para el control difuso. La simulación de las estrategias de control se adjuntan en el enlace de drive en el capítulo de Anexos y programas fuentes.

4.2.1 Control del Proceso Flujo

En la simulación del proceso de flujo, se usa el modelo dinámico previamente calculado en (2.3), donde el sensor es FIT11 y el actuador es el variador de frecuencia VFD20 que acciona la bomba centrífuga. Por lo tanto, la ley de control estará relacionado directamente al porcentaje de frecuencia de la bomba entre 0 y 100 %. Tener en cuenta que la frecuencia máxima de la bomba es 60 Hz, el cual se entiende como el 100 %.

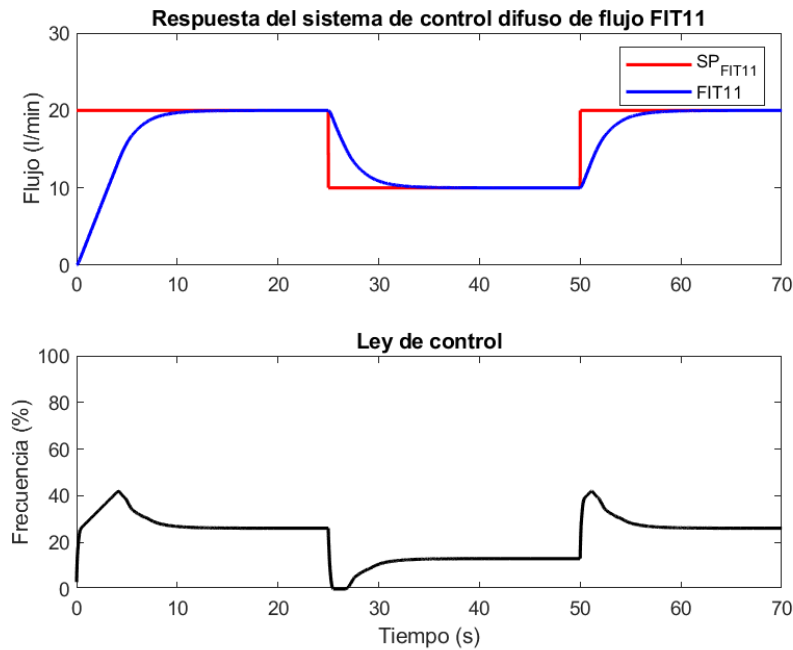


FIGURA 4.10: Simulación del sistema de control difuso de flujo FIT11.

El valor de las ganancias del controlador difuso (ver figura 4.7) son calculados a través de la simulación, las cuales son: $g1 = 5$, $g2 = 2$ y $h1 = 1$. En la figura 4.10, se utilizó una señal de escalón variable para el flujo de agua del tanque inferior al superior. Donde las características de la curva de salida para el proceso de flujo son: tiempo de establecimiento de 7.85 segundos, porcentaje de sobreimpulso de 0% y error en estado estable de 0.

4.2.2 Control del Proceso Presión

En la simulación del proceso de presión, se usó el modelo dinámico previamente calculado en (2.4), donde el sensor de presión es PIT11 y el actuador es el variador de frecuencia VFD20. Por lo tanto, la ley de control estará relacionado directamente al porcentaje de frecuencia del variador de la bomba entre 0 y 100%. Además, el valor de las ganancias del controlador difuso (ver figura 4.7) son calculados a través de la simulación, las cuales son: $g1 = 2$, $g2 = 1$ y $h1 = 1$.

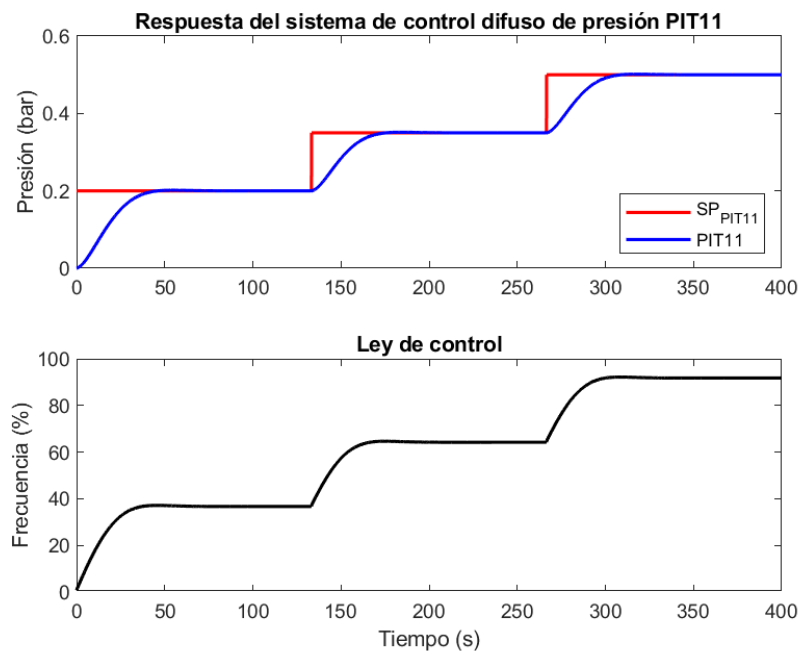


FIGURA 4.11: Simulación del sistema de control difuso de presión PIT11.

En la figura 4.11, se usó una señal escalón variable para el proceso de presión en la tubería. Donde las características de la curva de salida para la presión son: tiempo de estabilización de 41 segundos, porcentaje de sobreimpulso de 0% y error en estado estable de 0.

4.2.3 Control del Proceso Nivel

En la simulación del proceso de nivel, se utilizó el modelo dinámico previamente hallado en (2.5), donde sensor de nivel es LIT10 y el actuador es el variador de frecuencia VFD20. Por lo tanto, la ley de control estará relacionado directamente al porcentaje de frecuencia del variador de la bomba entre 0 y 100%. Además, el valor de las ganancias del controlador difuso (ver figura 4.7) son calculados a través de la simulación, las cuales son: $g1 = 2$, $g2 = 1$ y $h1 = 1$.

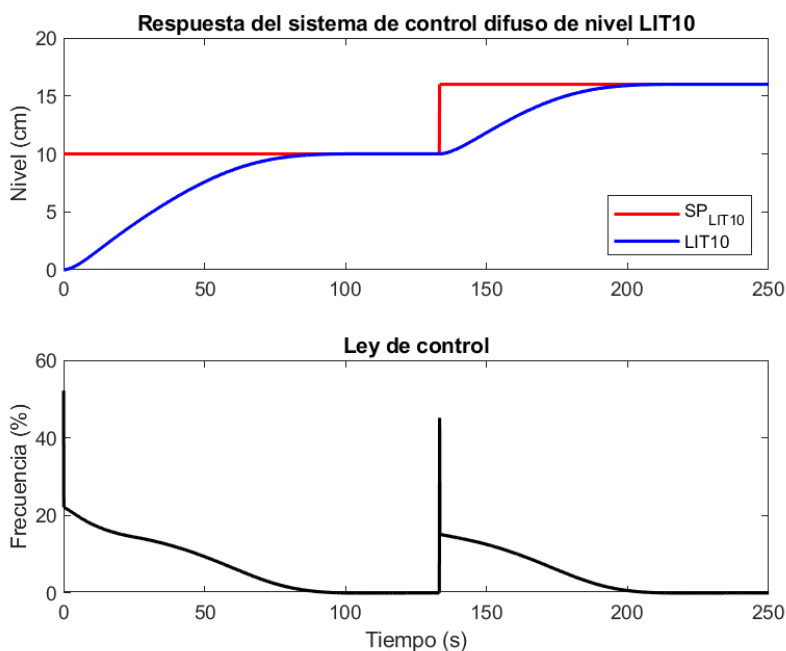


FIGURA 4.12: Simulación del sistema de control difuso de nivel LIT10.

En la figura 4.12, se utilizó una señal escalón variable para el proceso de nivel del tanque superior. Donde las características de la curva de salida para el nivel son: tiempo

de estabilización de 70 segundos, porcentaje de sobreimpulso de 1 % y error en estado estable de 0.

4.2.4 Control del Proceso Temperatura

En la simulación del proceso de temperatura, se empleó el modelo dinámico previamente estimado en (2.6), donde sensor de temperatura es TIT10 y el actuador es el controlador de potencia JC10. Por lo tanto, la ley de control estará relacionado directamente al porcentaje de potencia en la resistencia entre 0 y 100 %. También, el valor de las ganancias del controlador difuso (ver figura 4.7) son calculados a través de la simulación, las cuales son: $g1 = 2$, $g2 = 1$ y $h1 = 6$.

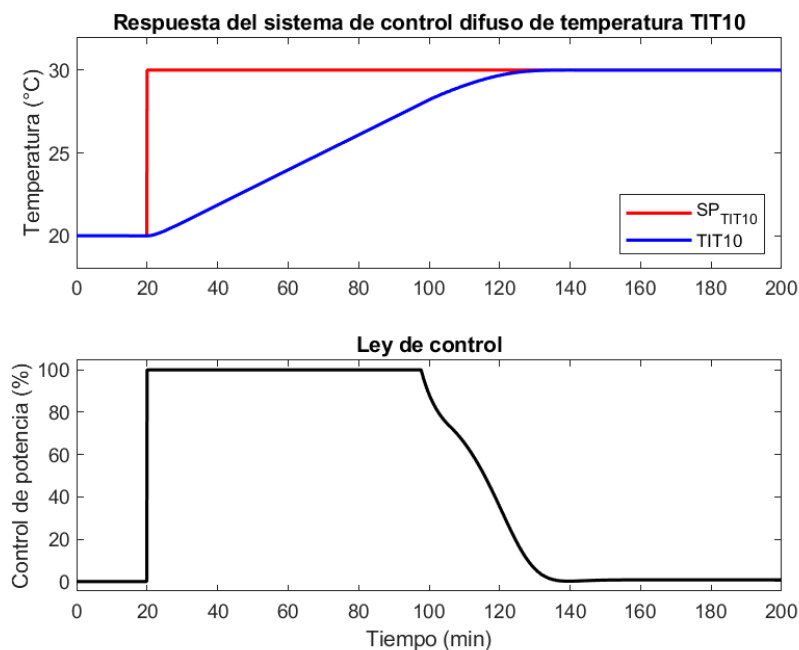


FIGURA 4.13: Simulación del sistema de control difuso de temperatura TIT10.

En la figura 4.13, se empleó una señal de escalón de 20 °C a 30 °C. Donde las características de la curva de salida para la temperatura del tanque superior son: tiempo de estabilización de 100 minutos, porcentaje de sobreimpulso de 0 % y error en estado estable de 0.

4.3 Implementación de los Sistemas de Control Difuso

La implementación de los procesos de la planta industrial multipropósito, se realizó tomando como base el diagrama de sistema de control PD difuso (ver figura 4.7). Las ganancias de las señales de entradas y salida se utilizan para sintonizar el sistema sin necesidad de alterar los rangos de las funciones de pertenencia de las entradas y salidas [21]. Otra forma de sintonizar el controlador difuso es a través de las reglas difusas asignadas. A continuación, se muestran los resultados al implementar el bloque de control difuso para los procesos flujo, presión, nivel y temperatura. También, se implementan para las estrategias de control de la razón de flujos, control en cascada de nivel empleando flujo y control descentralizado de temperatura y nivel.

4.3.1 Control del Proceso Flujo

El lazo de control para el proceso de flujo fue realizado con el sensor FIT11 y el actuador es la bomba PUMP20 accionado por el variador de frecuencia VFD20, cuyo modelo dinámico fue estimado en (2.3). El valor de las ganancias del controlador difuso (ver figura 4.7) son calculadas a través de simulación y sintonizados en la implementación, los cuales son: $g_1 = 1$, $g_2 = 0.5$ y $h_1 = 0.45$. Además, las reglas difusas asumidas para este proceso se observan en la Tabla 4.1, las cuales también se estimaron basándose en la simulación previamente realizada y las funciones de pertenencia para las señales de las entradas y salida se muestran en la figura 4.14.

TABLA 4.1: Reglas difusas empleadas para el control del proceso de flujo FIT11.

		de/dt				
		n2	n1	z0	p1	p2
e(t)	n2	n3	n2	n2	n1	z0
	n1	n2	n2	n1	z0	p1
	z0	n2	n1	z0	z0	z0
	p1	n1	z0	p1	p2	p2
	p2	z0	p1	p2	p3	p3

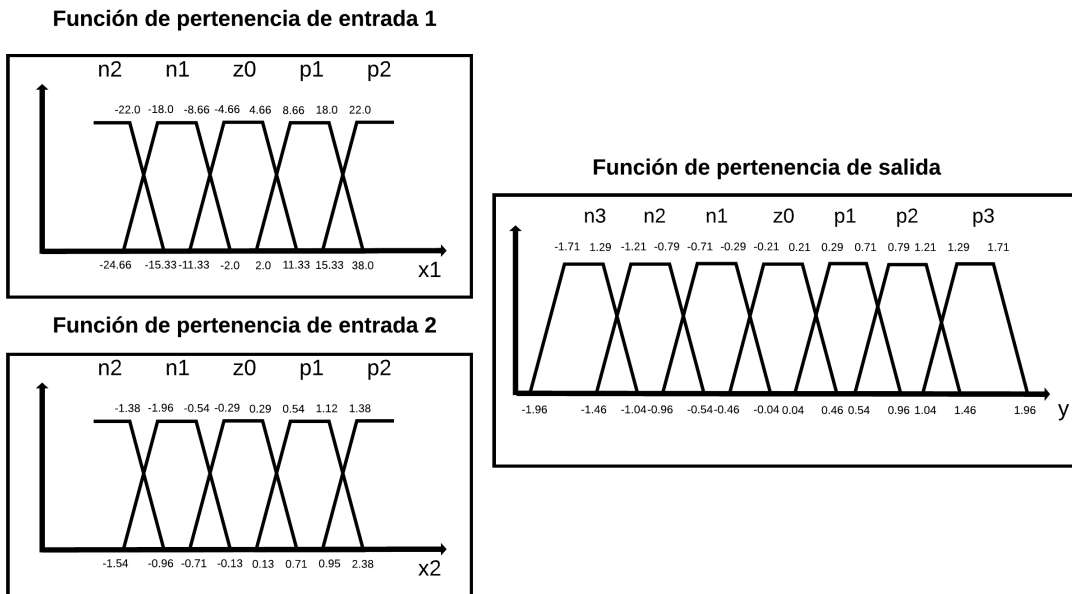


FIGURA 4.14: Funciones de pertenencia de entrada y salida para el proceso de flujo FIT11.

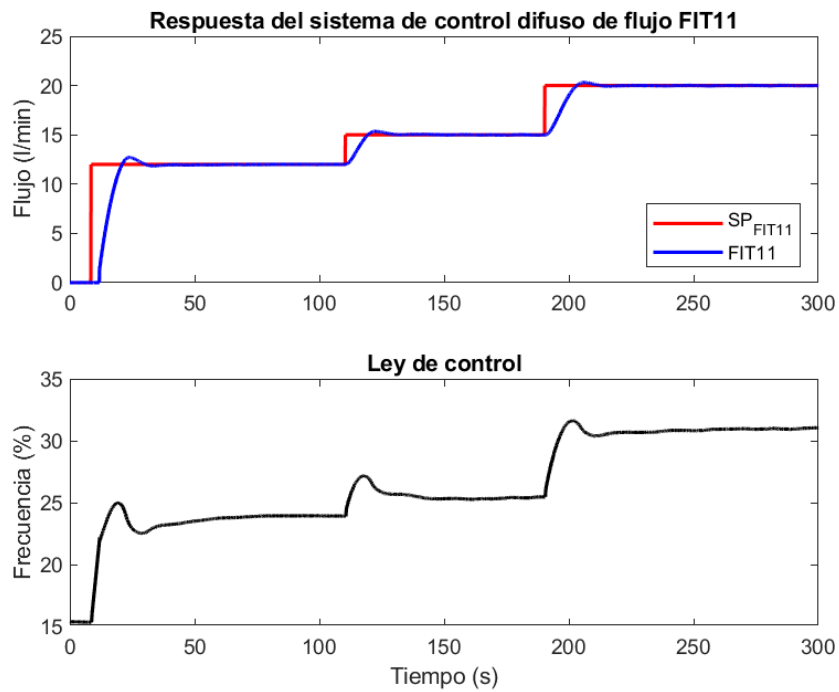


FIGURA 4.15: Implementación del sistema de control difuso de flujo FIT11.

La respuesta obtenida tras implementar el sistema de control difuso de flujo es visualizado en la figura 4.15. Las características del sistema de control difuso implementado del proceso de flujo FIT11 con una señal escalón de 15 l/min a 20 l/min son: tiempo de estabilización de 22.5 segundos, porcentaje de sobreimpulso de 6.2 % y error en estado estable nulo.

4.3.2 Control del Proceso Presión

El lazo de control para el proceso de presión fue realizado con el sensor PIT11 y el actuador es la bomba PUMP20 accionada por el variador de frecuencia VFD20, cuyo modelo dinámico fue hallado en (2.4). Las ganancias del controlador basado en lógica difusa utilizadas son los calculados a través de la simulación y sintonizados en la implementación, los cuales son: $g1 = 1$, $g2 = 1$ y $h1 = 1$. Además, las reglas difusas asumidas para este proceso se observan en la Tabla 4.2 y las funciones de pertenencia para las entradas y salida se muestran en la figura 4.16.

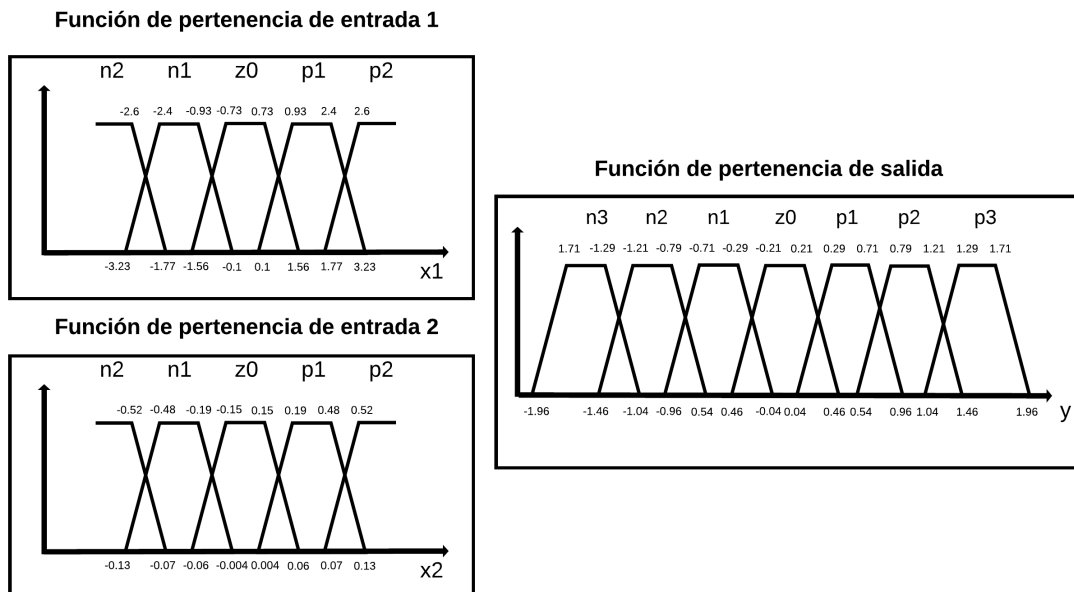


FIGURA 4.16: Funciones de pertenencia de entrada y salida para el proceso de presión PIT11.

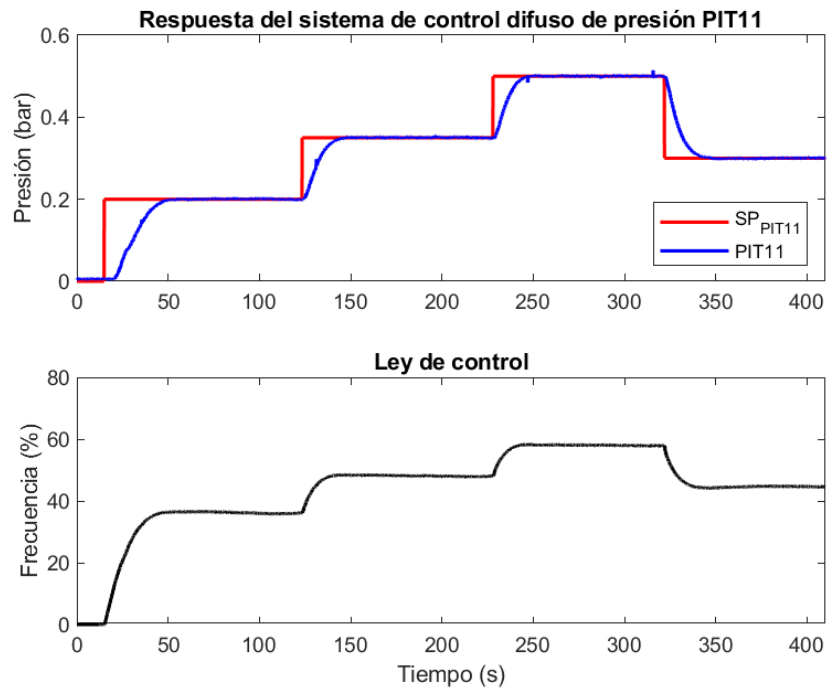


FIGURA 4.17: Implementación del sistema de control difuso de presión PIT11.

La respuesta al implementar el sistema de control difuso de presión, se observa en la figura 4.15. Las características de la respuesta del proceso de presión PIT11 con una referencia de 0.35 bar a 0.5 bar son: tiempo de estabilización de 23 segundos, porcentaje de sobreimpulso nulo y error en estado estable de 1 %.

TABLA 4.2: Reglas difusas empleadas para el control del proceso de presión PIT11.

		de/dt				
		n2	n1	z0	p1	p2
e(t)	n2	n3	n2	n1	n1	z0
	n1	n2	n1	n1	z0	p1
	z0	n1	n1	z0	p1	p2
	p1	n1	z0	p1	p2	p2
	p2	z0	p1	p2	p2	p3

4.3.3 Control del Proceso Nivel

El lazo de control para el proceso de nivel fue realizado con el sensor LIT10 y el actuador es la bomba PUMP20 accionada por el variador de frecuencia VFD20, cuyo modelo dinámico fue calculado en (2.5). Las ganancias del controlador basado en lógica difusa utilizadas son los calculados a través de la simulación y sintonizados en la implementación, los cuales son: $g_1 = 1$, $g_2 = 1$ y $h_1 = 1.8$. Además, las reglas difusas asumidas para este proceso se observan en la Tabla 4.3 y las funciones de pertenencia para las entradas y salida se muestran en la figura 4.18.

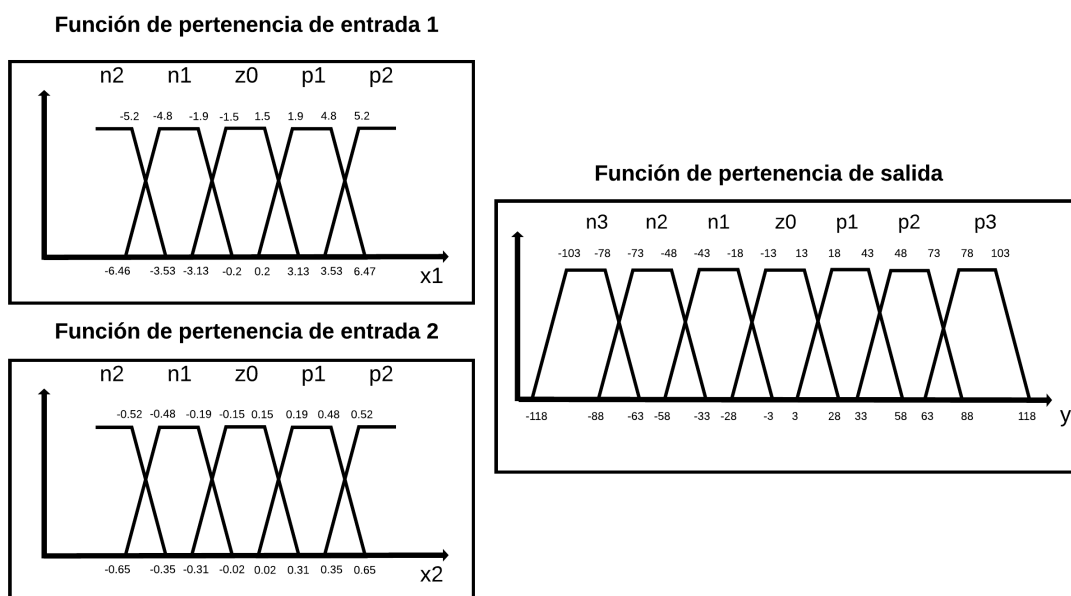


FIGURA 4.18: Funciones de pertenencia de entrada y salida para el proceso de nivel LIT10.

La respuesta experimental del sistema de control difuso de nivel se observa en la figura 4.19. Las características de la respuesta del proceso de nivel LIT10 con una señal escalón de 20 cm a 30 cm son: Las características de la curva de salida son: tiempo de estabilización de 41 segundos, porcentaje de sobreimpulso 1.7 % y error en estado estable 1.5 %.

TABLA 4.3: Reglas difusas empleadas para el control del proceso de nivel LIT10.

		de/dt					
		n2	n1	z0	p1	p2	
e(t)	n2	n3	n2	n2	n1	z0	
	n1	n2	n2	n1	z0	p1	
	z0	n1	n1	p1	p1	p1	
	p1	n1	z0	p1	p2	p2	
	p2	z0	p1	p3	p2	p3	

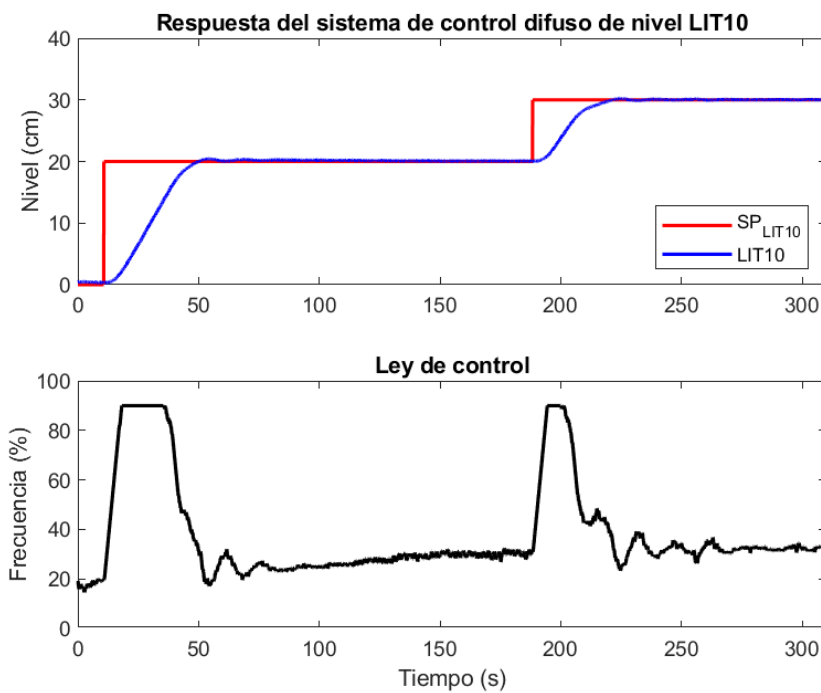


FIGURA 4.19: Implementación del sistema de control difuso de nivel LIT10.

4.3.4 Control del Proceso Temperatura

El lazo de control para el proceso de temperatura fue realizado con el sensor TIT10 y el actuador es el controlador de potencia JC10, cuyo modelo dinámico fue hallado en (2.6). La señal de referencia que va de 27 °C a 40 °C. Las ganancias del controlador basado en lógica difusa utilizadas son los calculados a través de la simulación y sintonizados en la implementación, los cuales son: $g1 = 1$, $g2 = 1$ y $h1 = 3.5$. Además, las reglas difusas

asumidas para este proceso se observan en la Tabla 4.4 y las funciones de pertenencia para las entradas y salida se muestran en la figura 4.20.

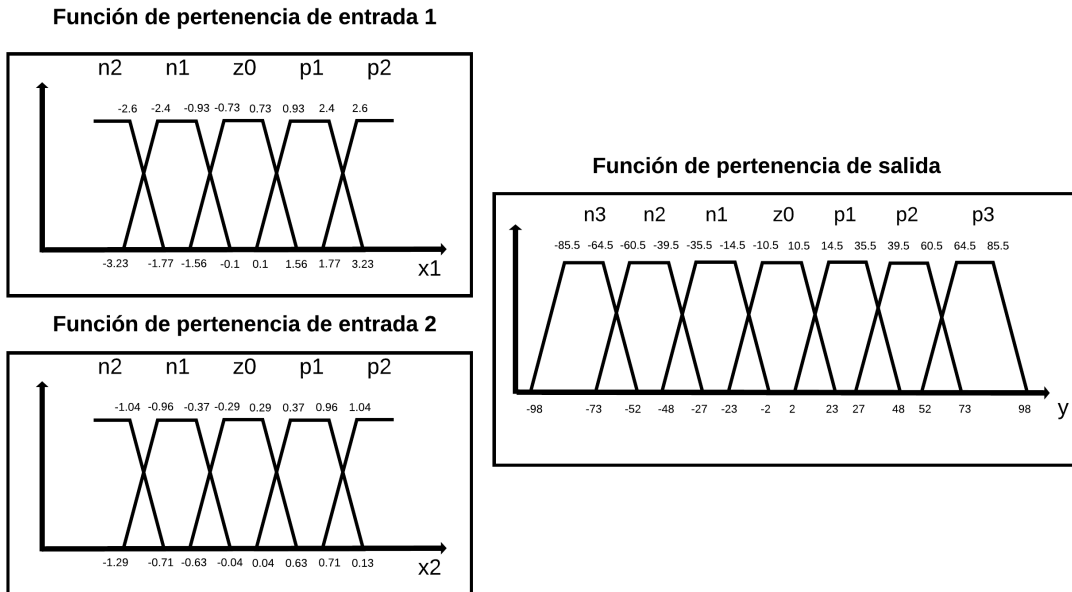


FIGURA 4.20: Funciones de pertenencia de entrada y salida para el proceso de temperatura TIT10.

TABLA 4.4: Reglas difusas empleadas para el control del proceso de temperatura TIT10.

		de/dt				
		n2	n1	z0	p1	p2
e(t)	n2	n3	n2	n2	n1	z0
	n1	n2	n2	n1	z0	p1
	z0	n1	n1	n1	p1	p1
	p1	n2	n1	z0	p1	p1
	p2	z0	p1	p1	p2	p3

La respuesta al implementar el sistema de control difuso de temperatura, se observa en la figura 4.21. Las características de la respuesta del proceso de temperatura TIT10 con una referencia de 27 °C a 40 °C son: tiempo de estabilización de 40 minutos, porcentaje de sobreimpulso 16.2 % y error en estado estable 0.7 %.

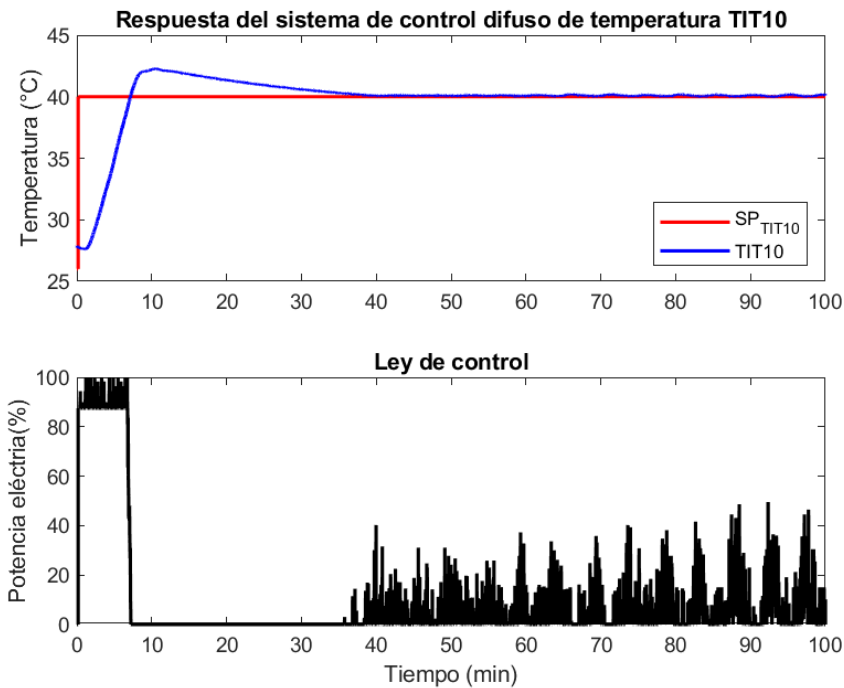


FIGURA 4.21: Implementación del sistema de control difuso de temperatura TIT10.

4.3.5 Control de la Razón de Flujos

Los lazos de control para la estrategia de control de la razón de flujos es efectuado empleando los modelos dinámicos hallados en (2.2) y (2.3). Además, la señal de referencia variable para el proceso de flujo FIT10 y al tener una razón de 0.8 la referencia del flujo de FIT11 sería equivalente a la referencia de FIT10 multiplicado por la razón. Al implementar la estrategia de control de la razón de flujos, se asume como referencia el diagrama del sistema de control de la figura 4.22. Las ganancias del controlador difuso utilizado son calculadas a través de la simulación y sintonizados en la implementación, los cuales son: $g_1 = 1$, $g_2 = 1$, $h_1 = 1.2$, $g_3 = 1$, $g_4 = 0.5$ y $h_2 = 0.45$. Además, las reglas difusas asumidas para este proceso se observan en la Tabla 4.5 y las funciones de pertenencia para las entradas y salida se muestran en la figura 4.23 y en el caso del proceso de flujo FIT11 son las asumidas anteriormente.

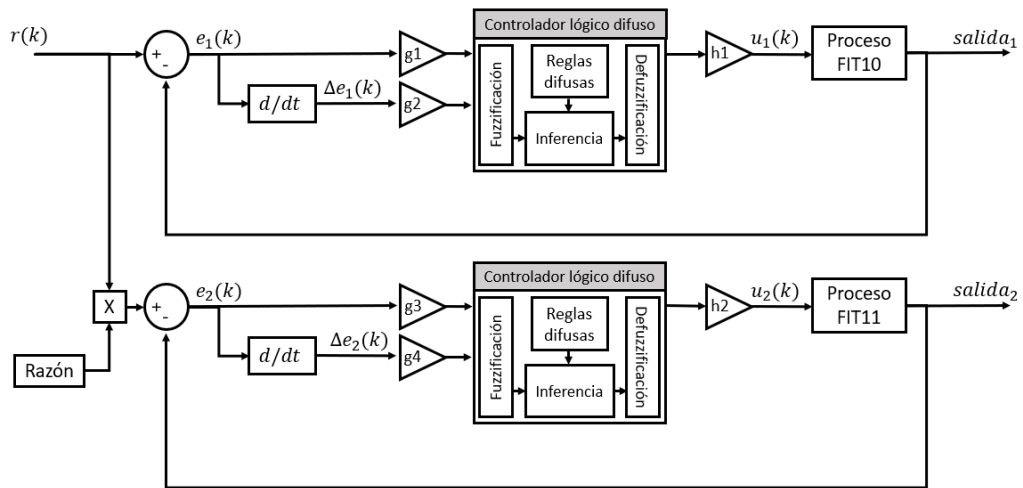


FIGURA 4.22: Sistema de control difuso de la razón de flujos.

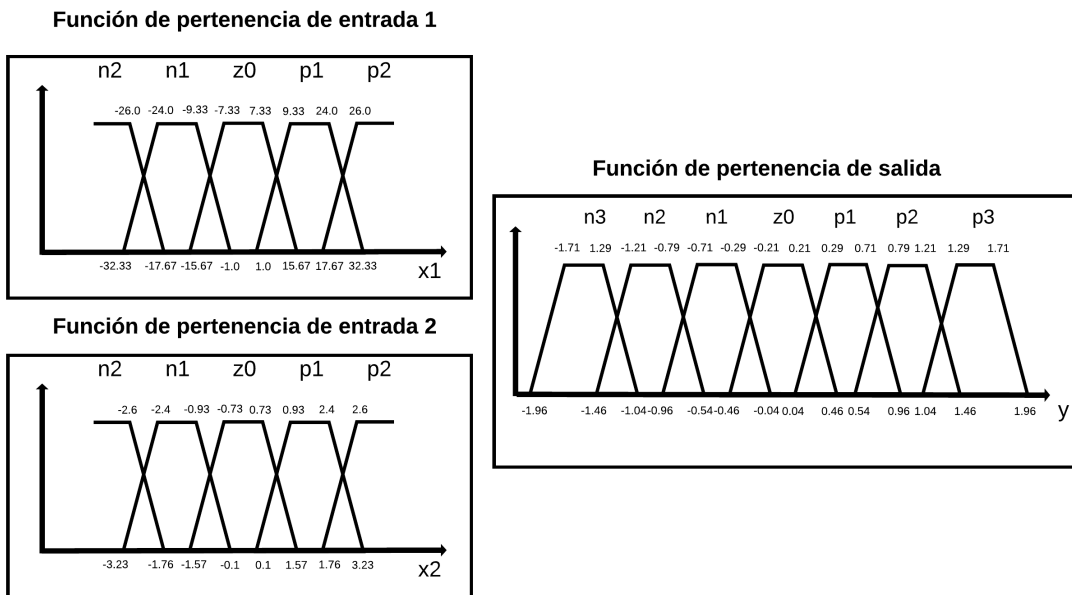


FIGURA 4.23: Funciones de pertenencia de entrada y salida para el proceso de flujo FIT10.

La respuesta al implementar la estrategia de control difuso de la razón de flujos, se observa en la figura 4.24. Las características de la respuesta de la razón de flujos FIT10 y FIT11 con una señal escalón de 8 l/min a 10 l/min y 16 l/min a 20 l/min respectivamente son: tiempo de estabilización de 18.4 y 22.5 segundos, porcentaje de sobreimpulso de

TABLA 4.5: Reglas difusas empleadas para el control del proceso de flujo FIT10.

		de/dt				
		n2	n1	z0	p1	p2
e(t)	n2	n3	n2	n2	n1	z0
	n1	n3	n2	n1	z0	p1
	z0	n2	n1	z0	p1	p2
	p1	n1	z0	p1	p2	p2
	p2	z0	p1	p2	p2	p3

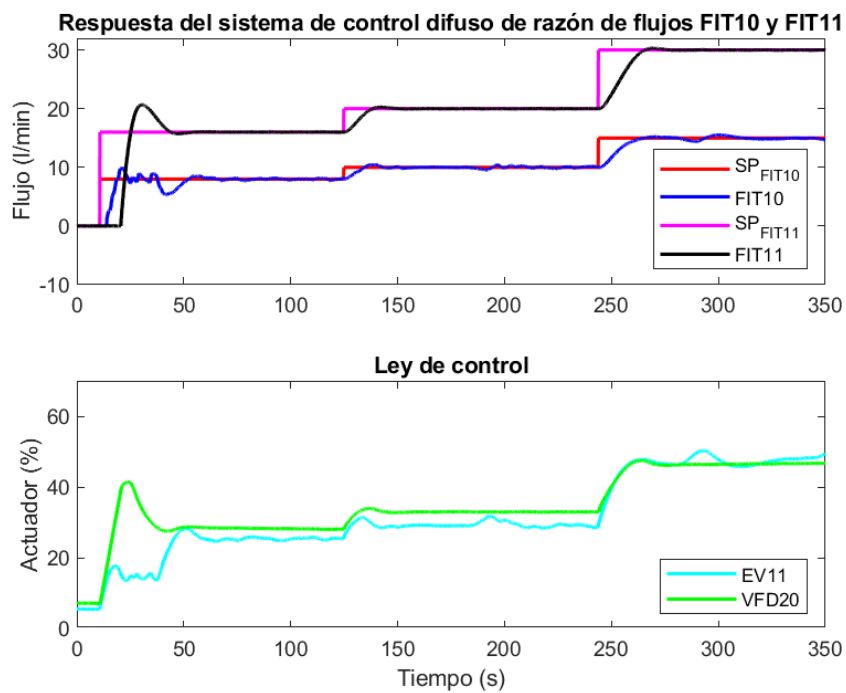


FIGURA 4.24: Implementación del sistema de control difuso de la razón de flujos FIT10 y FIT11.

25.2 % y 2 %, error en estado estable de 5 % y 0 %.

4.3.6 Control en Cascada del Nivel empleando Flujo

La estrategia de control en cascada del proceso de nivel (2.5) en el tanque superior con el uso del sensor de nivel LIT10 empleando el proceso de flujo (2.3) de agua bombeado por el tanque inferior se utilizó el sensor de flujo FIT11, donde el único actuador es el

variador de frecuencia VFD20. En la implementación de la estrategia de control en cascada de nivel LIT10 usando flujo FIT11, se toma como referencia el diagrama del sistema de control de la figura 4.26. Los valores de las ganancias con las cuales se implementó son: $g_1 = 1.2$, $g_2 = 1$, $h_1 = 3.2$, $g_3 = 1.2$, $g_4 = 0.5$ y $h_2 = 0.8$. Para los procesos de flujo y nivel se emplearon las funciones de pertenencia 4.14 y 4.18 y para las reglas difusas 4.1 y 4.3 respectivamente.

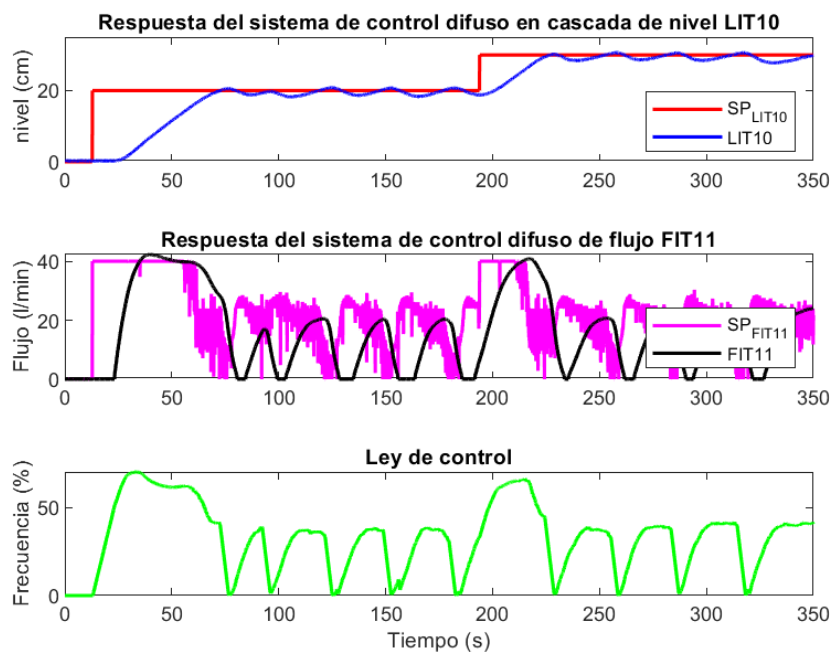


FIGURA 4.25: Implementación del sistema de control difuso en cascada de nivel LIT10 empleando flujo FIT11.

La respuesta al implementar la estrategia de control difuso en cascada de nivel LIT10 empleando flujo FIT11, se muestra en la figura 4.25. Las características de la respuesta del proceso de nivel LIT10 del control en cascada con una variación de la referencia de 0 cm a 25 cm son: tiempo de estabilización de 100 segundos, porcentaje de sobreimpulso de 0% y error en estado estable de 10%.

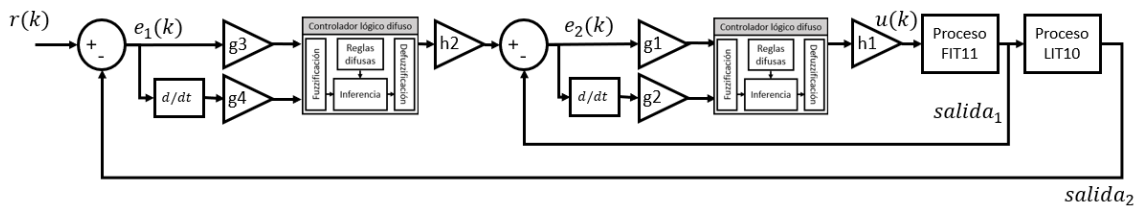


FIGURA 4.26: Sistema de control difuso en cascada de nivel empleando flujo

4.3.7 Control Descentralizado de Nivel y Temperatura

La estrategia de control descentralizado del proceso de nivel (2.5) empleando el sensor LIT10 y para el proceso de temperatura (2.6) se usa el sensor TIT10 y los actuadores son el variador de frecuencia VFD20 y el controlador de potencia JC10 respectivamente. Al momento de implementar la estrategia de control descentralizado de nivel LIT10 y temperatura TIT10, se toma como referencia el diagrama del sistema de control de la figura 4.27. Los valores de las ganancias con las cuales se implementó son: $g_1 = 1$, $g_2 = 1$, $h_1 = 1.8$, $g_3 = 1.2$, $g_4 = 1$ y $h_2 = 4.2$. Para los procesos de nivel y temperatura se utilizaron las funciones de pertenencia 4.18 y 4.20 y para las reglas difusas 4.3 y 4.4 respectivamente.

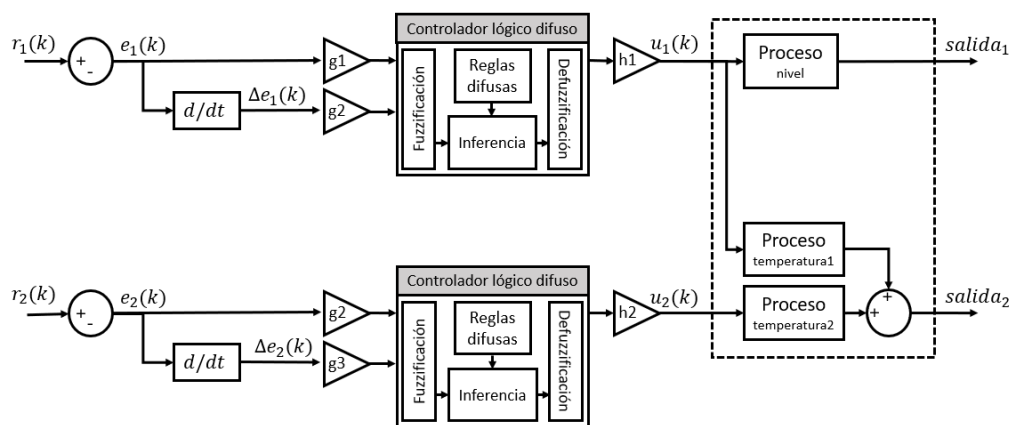


FIGURA 4.27: Sistema de control difuso descentralizado de nivel y temperatura.

La respuesta experimental de la estrategia de control descentralizado difuso de nivel LIT10 y temperatura TIT10, se observa en la figura 4.28. Donde las características de

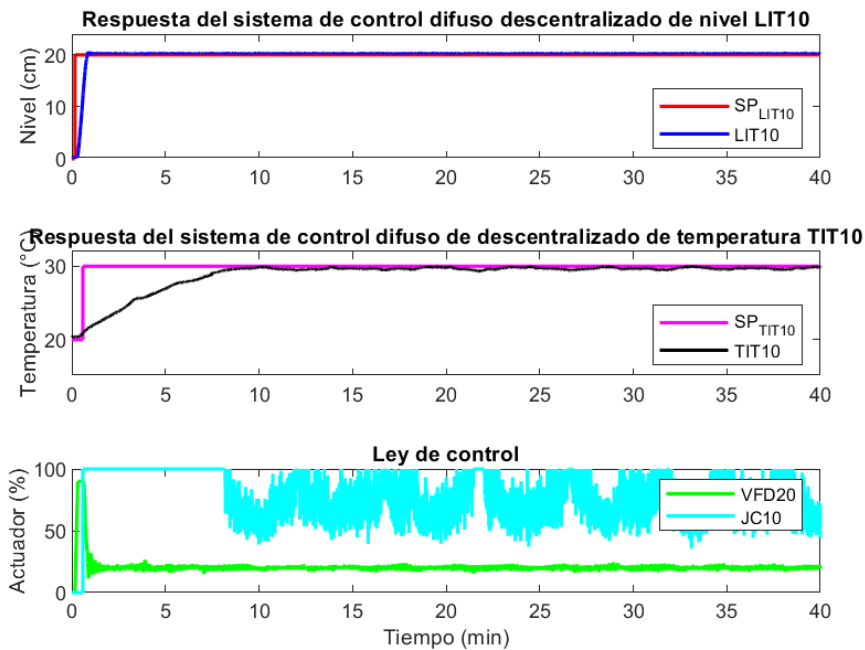


FIGURA 4.28: Implementación del sistema de control difuso descentralizado de nivel LIT10 y temperatura TIT10.

la respuesta del proceso de nivel LIT10 son: 0.8 minutos de tiempo de estabilización, 0 % porcentaje de sobreimpulso y 2 % de error de estado estable y para temperatura TIT10 son: 10 minutos aproximadamente de tiempo de estabilización, porcentaje de sobreimpulso nulo y 4 % de error de estado estable.

Capítulo 5

COMPARACIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo, se compara los resultados obtenidos de la implementación de los sistemas de control PID visto en el capítulo 3; los sistemas de control difuso, en el capítulo 4 y se discute el rendimiento obtenido en cada proceso y estrategia de control implementado. En la industria, para comparar el desempeño de las respuestas de los sistemas controlados se observa las especificaciones de diseño: tiempo de estabilización (T_s), el porcentaje de sobreimpulso ($\%OS$) y el error en estado estable (e_{ss}).

5.1 Proceso de Flujo

Los resultados obtenidos (ver Tabla 5.1) muestran que para el control del proceso de flujo FIT11, el control PID presenta un mayor rendimiento que el control difuso. En la figura 5.1, se observa la respuesta del proceso de flujo FIT11 aplicando el controlador PID y controlador difuso con una señal escalón de 15 - 20 l/min. En este rango, el controlador PID tiene un tiempo de estabilización 14.2 segundos y 3.4 % de porcentaje de sobreimpulso a comparación del controlador difuso con un valor de 22.5 segundos de tiempo de establecimiento y 6.2 % de porcentaje de sobreimpulso; es decir, para este proceso el controlador PID resulta ser la mejor alternativa.

TABLA 5.1: Sistema de control PID vs. difuso del proceso de flujo.

Controlador	Referencia	T_s	e_{ss}	PO %
PID	12 - 15 l/min	13 seg	0	2 %
	15 - 20 l/min	14.2 seg	0	3.4 %
Difuso	12 - 15 l/min	20.5 seg	0	11 %
	15 - 20 l/min	22.5 seg	0	6.2 %

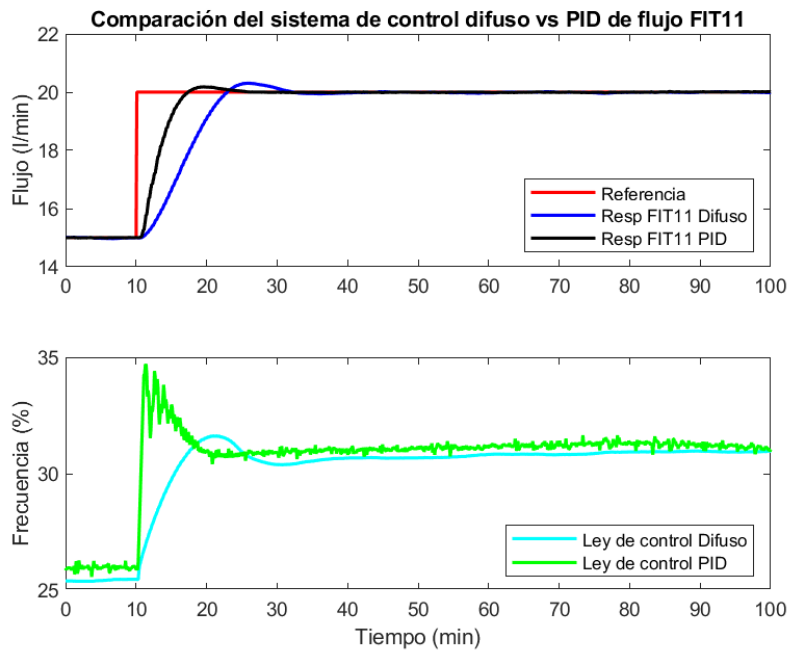


FIGURA 5.1: Sistema de control PID vs. difuso del proceso de flujo FIT11.

5.2 Proceso de Presión

En el caso del proceso de presión PIT11, los resultados muestran (ver Tabla 5.2) que el tiempo de estabilización y el error en estado estable resulta menor al aplicar el control PID a diferencia del control difuso. En la figura 5.2, se observa la respuesta del sistema de control de presión PIT11 aplicando PID y difuso para una señal escalón de 0.2 - 0.35 bar. Para el caso del controlador PID el tiempo de estabilización es 13.22 segundos y el error en estado estable es 2.67 % y para el controlador difuso es 23 segundos y 2 % respectivamente. Tener en cuenta que al aplicar el control PID mostró ciertas perturbaciones en su respuesta al alcanzar el valor de 0.5 bar, esto se debe a que se genera perturbaciones al alcanzar el valor máximo de presión soportado en la tubería de la planta multipropósito.

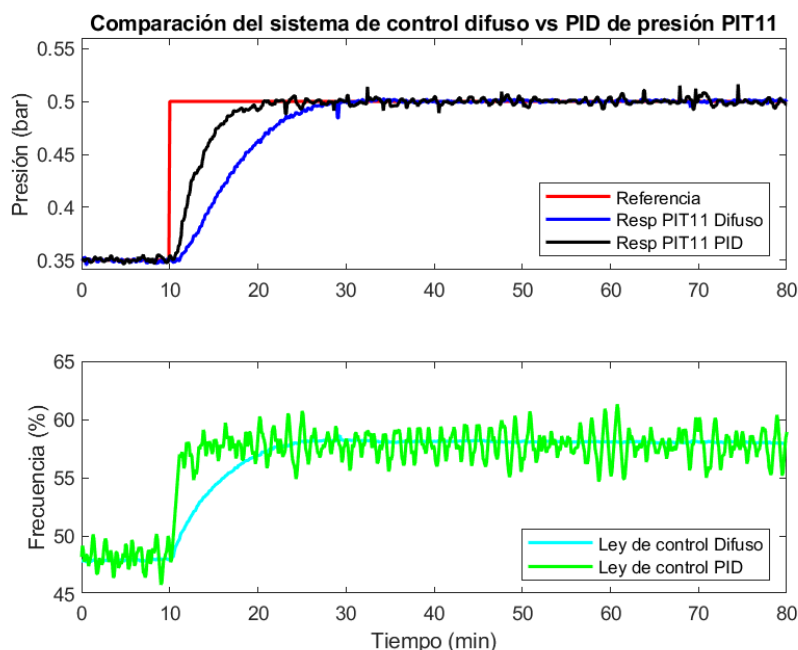


FIGURA 5.2: Sistema de control PID vs. difuso del proceso de presión PIT11.

TABLA 5.2: Sistema de control PID vs. difuso del proceso de presión.

Controlador	Referencia	T_s	e_{ss}	$PO\%$
PID	0 - 0.2 bar	13.8 seg	0.1 %	0 %
	0.2 - 0.35 bar	12 seg	2.67 %	0 %
	0.35 - 0.5 bar	13.2 seg	3.34 %	0 %
	0.5 - 0.2 bar	13 seg	1.25 %	0 %
Difuso	0 - 0.2 bar	35 seg	1.6 %	0 %
	0.2 - 0.35 bar	21.6 seg	2 %	0 %
	0.35 - 0.5 bar	23 seg	1 %	0 %
	0.5 - 0.2 bar	22.6 seg	0.5 %	0 %

5.3 Proceso de Nivel

Los resultados obtenidos del control del proceso de nivel LIT10 (ver Tabla 5.3) muestran un menor tiempo en estado estable y porcentaje de sobreimpulso al aplicar el control difuso a diferencia del control PID. En la figura 5.3, se observa la respuesta del sistema de control difuso y PID al variar la señal escalón de 20 - 30 cm. Para el controlador difuso el tiempo de estabilización es 40 segundos, error en estado estable de 1 % y

porcentaje de sobreimpulso es 2 % y en el caso del controlador PID resulta 60 segundos, 0.1 % y 20.6 % respectivamente.

TABLA 5.3: Sistema de control PID vs. difuso del proceso de nivel.

Controlador	Referencia	T_s	e_{ss}	PO %
PID	0 - 20 cm	72 seg	0.1 %	10.9 %
	20 - 30 cm	60 seg	0.1 %	20.6 %
Difuso	0 - 20 cm	49.8 seg	1 %	1.8 %
	20 - 30 cm	41 seg	0.5 %	1.7 %

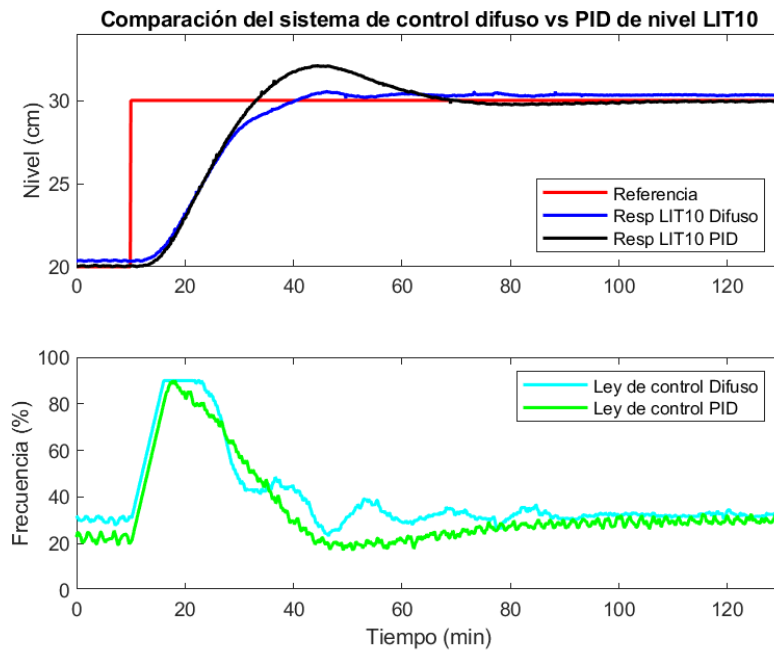


FIGURA 5.3: Sistema de control PID vs. difuso del proceso de nivel LIT10.

5.4 Proceso de Temperatura

En el caso del proceso de temperatura, se obtuvo una mejor respuesta aplicando el algoritmo de control difuso a diferencia del algoritmo de control PID (ver Tabla 5.4). En la figura 5.4, se observa la respuesta del sistema de control PID y difuso con una señal escalón de 27 - 40 °C. Sin embargo, los resultados aplicando PID muestran una señal con

tiempo de estabilización de 50 minutos a más, error en estado estable 10 % y porcentaje de sobreimpulso de 27 %. A comparación del sistema de control difuso, el cual tiene un tiempo de estabilización de 40 minutos, error en estado estable de 1 % y porcentaje de sobreimpulso de 17.5 %. Además, en la figura 4.21 muestra que al aplicar el control difuso la señal de control cambia bastante en un periodo de tiempo corto.

TABLA 5.4: Sistema de control PID vs. difuso del proceso de temperatura.

Controlador	Referencia	T_s	e_{ss}	PO %
PID	27 - 40 °C	50 min	0 - 10 %	25 %
Difuso	27 - 40 °C	40 min	0.7 %	16.2 %

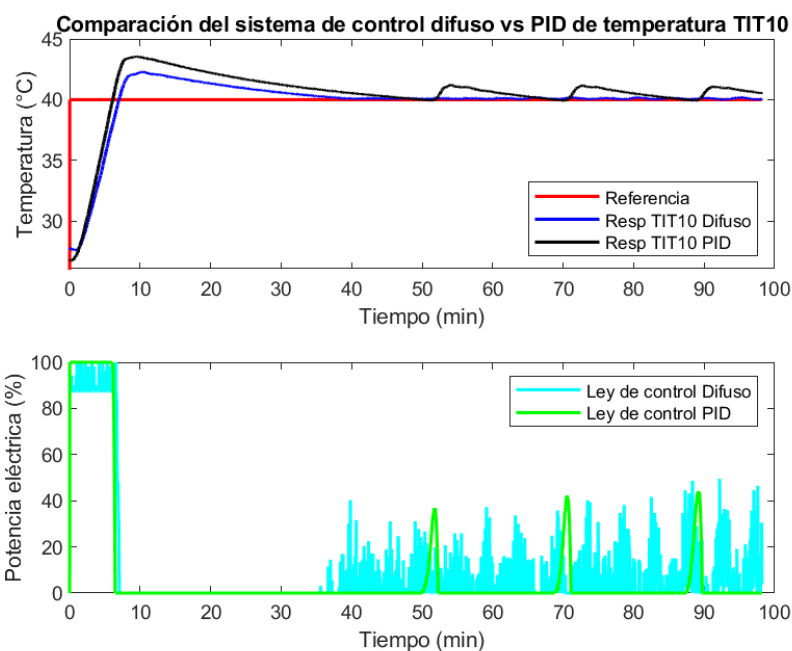


FIGURA 5.4: Sistema de control PID vs. difuso del proceso de temperatura TIT10.

5.5 Estrategia de Control de la Razón de Flujos

Para la aplicación de la estrategia de control de la razón de flujos, los resultados obtenidos muestran mejor precisión en el flujo FIT10 al aplicar PID (ver figura 5.5). La respuesta es más rápida tanto para el caso del flujo FIT10 y el flujo en FIT11 (ver Tabla

5.5). Los resultados obtenidos en la figura 5.5 muestran un menor tiempo de estabilización para el controlador PID a diferencia del controlador difuso.

TABLA 5.5: Sistema de control PID vs. difuso de la razón de flujos.

Controlador	Proceso	Referencia	T_s	e_{ss}	PO %
PID	FIT10	8 - 10 l/min	12.5 seg	0	15 %
	FIT11	16 - 20 l/min	14.1 seg	0	4 %
Difuso	FIT10	8 - 10 l/min	18.4 seg	5 %	25.2 %
	FIT11	16 - 20 l/min	22.5 seg	0	2 %

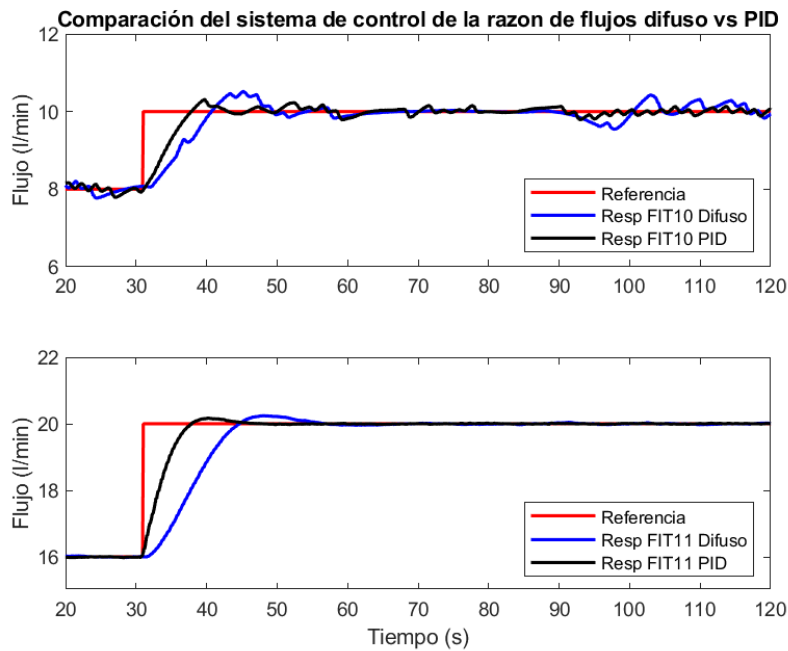


FIGURA 5.5: Sistema de control PID vs. difuso de la razón de flujos FIT10 y FIT11.

5.6 Estrategia de Control en Cascada de Nivel empleando Flujo

En los resultados obtenidos al aplicar la estrategia de control en cascada (ver Tabla 5.6), se observa una respuesta más estable al aplicar el controlador PID en el error en estado estable al compararlo con el controlador difuso. El control del proceso de nivel LIT10 es el más importante al aplicar la estrategia de control en cascada. En la figura

5.6, cuya señal escalón de 0 - 25 cm, se observa un tiempo de establecimiento de 100 segundos y un error en estado estable de +/- 10 % al aplicar el control difuso y un tiempo de establecimiento de 146 segundos y porcentaje de sobreimpulso de 4.5 % para el control PID. En esta tesis, se asume el error en estado estable como la especificación de diseño más relevante, así que el mejor controlador es PID.

TABLA 5.6: Sistema de control PID vs. difuso en cascada de nivel empleando flujo.

Controlador	Referencia	T_s	e_{ss}	$PO\%$
PID	0 - 25 cm	146 seg	0 %	4.5 %
Difuso	0 - 25 cm	100 seg	10 %	0 %

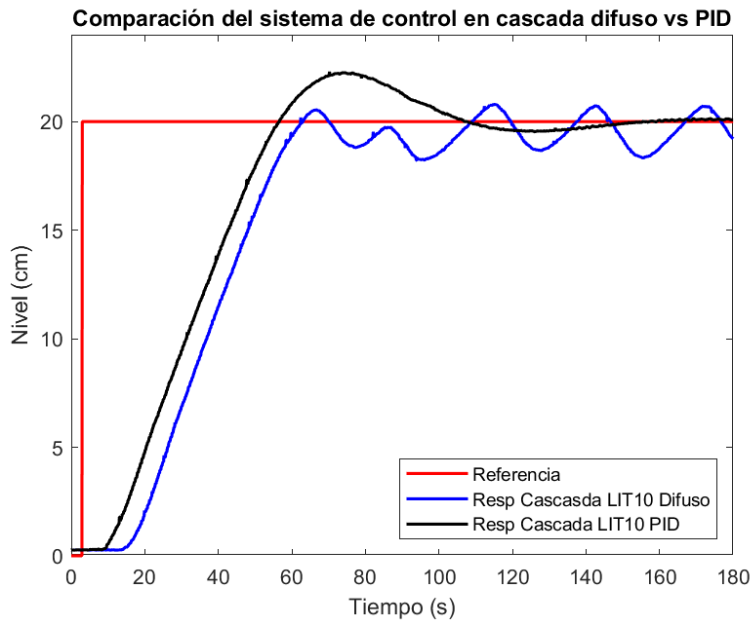


FIGURA 5.6: Sistema de control PID vs. difuso en cascada de nivel LIT10 empleando flujo FIT11.

5.7 Estrategia de Control Descentralizado de Nivel y Temperatura

Los resultados del sistema de control descentralizado de nivel y temperatura (ver Tabla 5.7) muestran un tiempo de estabilización y menor error en estado en estable al aplicar el control difuso a comparación del control PID. En la figura 5.7, se observa el control de temperatura con una menor variación del valor final al aplicar el controlador difuso

con un error en estado estable de 4 % a comparación del PID con un 12 % y el tiempo en estado estable es de 10 minutos y 13 minutos respectivamente. En el caso del proceso de nivel LIT10, el controlador difuso presenta menor resultado en términos de tiempo de estabilización de 0.8 minutos y porcentaje de sobreimpulso de 0 % a diferencia del PID con un tiempo de establecimiento de 1.15 minutos y porcentaje de sobreimpulso de 11.7 %. Por otro lado, la señal de control resulta más variable para el caso de controlador difuso, ya que requiere regular con mayor precisión la respuesta del sistema (ver figura 4.28), a diferencia del controlador PID (ver figura 3.14).

TABLA 5.7: Sistema de control PID vs. difuso descentralizado de temperatura y nivel.

Controlador	Proceso	Referencia	T_s	e_{ss}	PO %
PID	Temperatura	20 - 30 °C	13 min	12 %	0 %
	Nivel	0 - 20 cm	1.15 min	1 %	11.7 %
Difuso	Temperatura	20 - 30 °C	10 min	4 %	0 %
	Nivel	0 - 20 cm	0.8 min	2 %	0 %

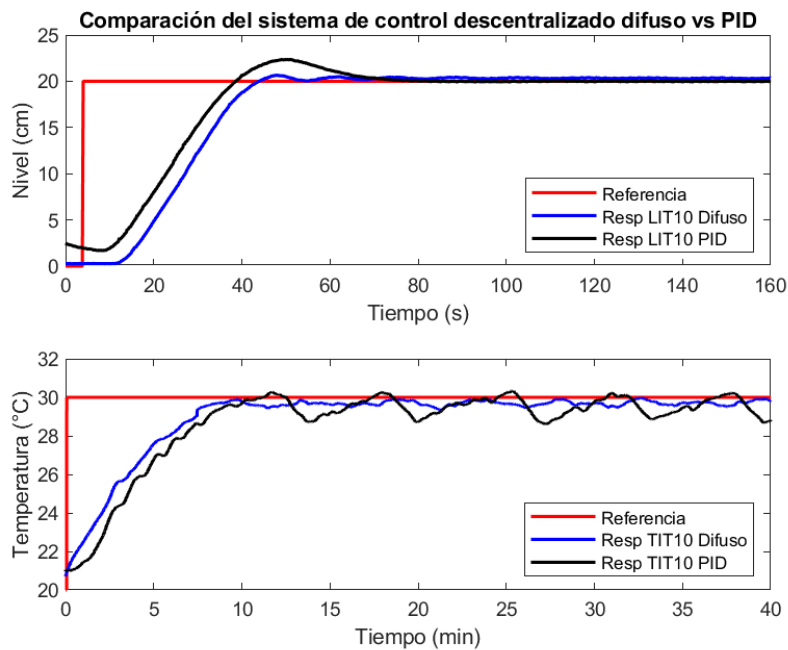


FIGURA 5.7: Sistema de control PID vs. difuso descentralizado de nivel LIT10 y temperatura TIT10.

Capítulo 6

CONCLUSIONES

El desarrollo de esta tesis, se centra en el diseño e implementación de los bloques controladores basado en lógica difusa para el control de los procesos flujo, presión, temperatura y nivel de la planta multipropósito, así como para las estrategias control de la razón, control en cascada y control descentralizado. Por ello, primero se hallaron los modelos dinámicos de todos los procesos previamente mencionados. Los modelos dinámicos se determinaron a través de datos experimentales con porcentajes de estimaciones o similitud mayores al 90 %.

Empleando los modelos dinámicos de los procesos previamente determinados, se procedió a simular los sistemas de control PID y difuso. En el caso del algoritmo de control PID, se hallaron los valores de las ganancias proporcional, integral y derivativa requeridas para su implementación en el PLC. La simulación del sistema de control difuso corroboró el diseño del controlador, principalmente las reglas de control y los rangos de las funciones de pertenencia, los cuales posteriormente se implementaron en el PLC S7-1500 Siemens usando el lenguaje estructurado para elaborar el algoritmo de control.

Los resultados experimentales obtenidos muestran que las salidas de los procesos se estabilizan en sus respectivas señales de referencia. Sin embargo, en el caso de la temperatura, la respuesta presenta sobreimpulsos altos correspondientes a inercia de las resistencias en el tanque. Además, en el caso del proceso presión, la respuesta se estabiliza con respecto a la señal de referencia, pero con la presencia de algunos sobreimpulsos de corta duración. En el caso de control en cascada del nivel empleando el flujo, la respuesta del sistema oscila con un porcentaje de aproximadamente $\pm 10\%$ con respecto a la magnitud de la señal deseada.

Al comparar los resultados obtenidos con los dos algoritmos de control, tanto PID como difuso, se puede concluir lo siguiente. En el proceso de flujo, la respuesta obtenida con el controlador PID presenta un tiempo de estabilización promedio de 13.6 segundos y porcentaje de sobreimpulso promedio de 2.7 %, los cuales son menores, a comparación de los 21.5 segundos y 8.6 % obtenidos al aplicar el controlador difuso respectivamente. En el proceso de presión, el controlador PID presenta un mejor desempeño en términos de tiempo de establecimiento promedio de 13.8 segundos y error en estado estable promedio de 1.84 %, a diferencia del controlador difuso con tiempo de establecimiento promedio de 25.55 segundos y error en estado estable promedio de 1.3 %. Sin embargo, el controlador difuso presentó un mejor desempeño en los procesos restantes. En el proceso del nivel, la respuesta obtenida con el controlador difuso presenta un tiempo de estabilización promedio de 45.4 segundos y porcentaje de sobreimpulso promedio de 1.75 %, los cuales son menores, a diferencia de los 66 segundos y 15.8 % obtenidos con el controlador PID respectivamente. En el proceso de temperatura, la respuesta obtenida con el controlador difuso presenta un tiempo de estabilización de 40 minutos y porcentaje de sobreimpulso de 16.2 %, los cuales son menores, a diferencia de los 50 minutos y 25 % obtenidos con el controlador PID respectivamente.

En la implementación de la estrategia de control PID de la razón de flujos, el tiempo de establecimiento promedio fue de 13.3 segundos a comparación del sistema de control difuso de la razón con tiempo de establecimiento promedio de 20.5 segundos. Por otro lado, en la estrategia de control en cascada del nivel empleando el flujo, se muestra un tiempo de establecimiento de 146 y porcentaje de sobreimpulso de 4.5 % empleando el controlador PID; sin embargo, la respuesta se estabiliza en la referencia con un error en estado estable menor al obtenido con el control difuso, el cual tiene un tiempo de establecimiento de 100 segundos, pero no se estabiliza la señal con un error en estado estable de 10 %. En la estrategia de control descentralizado de la temperatura y del nivel, los resultados obtenidos basándose en el proceso de nivel son: tiempo de establecimiento 1.15 minutos y 0.8 minutos, error en estado estable de 1 % y 2 %, porcentaje de sobreimpulso

de 11.7 % y 0 % al aplicar control PID y difuso respectivamente. Del mismo modo, los resultados obtenidos en relación con el proceso de temperatura son: tiempo de establecimiento 13 minutos y 10 minutos, error en estado estable de 12 % y 4 %, porcentaje de sobreimpulso de 0 % al aplicar control PID y difuso respectivamente.

6.1 Recomendaciones

En la aplicación de sistemas de control de procesos, cuyos modelos dinámicos de complejo cálculo matemático, es recomendable usar el controlador difuso. Siempre y cuando las reglas difusas se calculan por un personal experto en el proceso.

Considerar que al realizar la simulación, el comportamiento de la señal de control del actuador se debe encontrar dentro de los rangos admisibles en el equipo físico de la planta industrial multipropósito. En el caso de este trabajo los rangos varían de 0 a 100 %.

Durante la implementación, se aplicó el control difuso con funciones de pertenencia triangular, los cuales no son suficientes para la obtención de la respuesta deseada del sistema.

6.2 Trabajos Futuros

En este trabajo solo se empleó de funciones de pertenencia de forma trapezoidal, pero para futuros trabajos se puede comparar el desempeño de los sistemas al emplear el tipo trapezoidal y el tipo sigmoide. Además de evaluar las respuestas al cambiar la cantidad de funciones de pertenencia de las señales de entrada del controlador difuso.

Otro alcance futuro a realizar es que el controlador basado en lógica difusa se emplee en conjunto con otros controladores; por ejemplo, el controlador PID combinado con el lógico difuso o el controlador difuso con la inteligencia artificial por redes neuronales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. Rojas, *Control de procesos práctico y avanzado*, 1st ed., EDUNI, Ed. Lima, Perú, 2012.
- [2] F. Chabni, R. TALEB, A. Benbouali, and M. Amin, “The application of fuzzy control in water tank level using arduino,” *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 7, 04 2016.
- [3] E. D. Mañay, M. D. Chiliquinga, J. E. Iza, H. E. Yanchatipan, and P. Salazar, “Diseño por simulación de un control fuzzy y mpc para un proceso de nivel,” in *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, ser. 1, vol. 6, 2022, pp. 1951–1970.
- [4] Z. Aydogmus, “Implementation of a fuzzy-based level control using SCADA,” *Expert Systems with Applications*, vol. 36, no. 3, pp. 6593–6597, apr 2009.
- [5] Zhang Hua, Cai Zhenjiang, and Li Yan, “Fuzzy control strategies for temperature of hot-water based on plc system,” in *2010 2nd International Conference on Industrial and Information Systems*, vol. 1, July 2010, pp. 57–60.
- [6] C. L. Cuevas, “Diseño e implementación de bloques de control de orden fraccionario para una planta multipropósito industrial,” in *Repositorio Institucional UTEC*, 2020.
- [7] I. G. Pérez, A. J. C. Godoy, and M. C. Godoy, “Fuzzy controller based on plc s7-1200: Application to a servomotor,” in *2014 11th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO)*, vol. 01, Sep. 2014, pp. 156–163.

- [8] S. Tomas, K. Michal, and K. Alena, "Fuzzy control of robotic arm implemented in plc," in *2013 IEEE 9th International Conference on Computational Cybernetics (ICCC)*, July 2013, pp. 45–49.
- [9] B. Bo, L. Chuang, and C. Meng, "Based on plc fuzzy control algorithm in the application of level control," in *2016 International Symposium on Computer, Consumer and Control (IS3C)*, July 2016, pp. 698–701.
- [10] S. Ansari, A. Soomro, and S. Karim, "Plc based fuzzy controlled ethanol-water separation system," *Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 13, pp. 5266–5275, 08 2018.
- [11] Y. Song, Z. Bi, and K. Liu, "The plc system of egg powder treatment based on fuzzy control algorithm," in *Fourth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD 2007)*, vol. 4, Aug 2007, pp. 530–534.
- [12] X. Peng, L. Xiao, Z. Mo, and G. Liu, "The variable frequency and speed regulation constant pressure water supply system based on plc and fuzzy control," in *2009 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, vol. 1, April 2009, pp. 910–913.
- [13] M. S. Aftab and M. B. Kadri, "Design of fuzzy logic based level controller for surge tank system," in *2013 3rd IEEE International Conference on Computer, Control and Communication (IC4)*, Sep. 2013, pp. 1–4.
- [14] A. K. Gaurav and A. Kaur, "Comparison between conventional pid and fuzzy logic controller for liquid flow control: Performance evaluation of fuzzy logic and pid controller by using matlab/simulink," *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, vol. 1, no. 1, pp. 84–88, 2012.
- [15] Y. Yang and H. Bian, "Design and realization of fuzzy self-tuning pid water temperature controller based on plc," in *2012 4th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics*, vol. 2, Aug 2012, pp. 3–6.

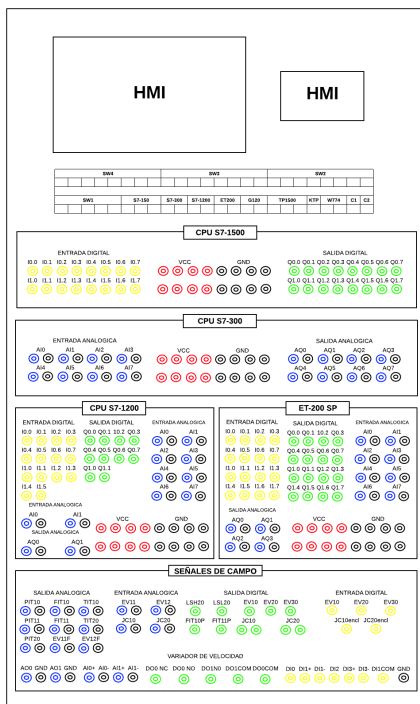
- [16] H. Guo, C. Fu, and S. Gan, “A fuzzy neural network algorithm applied to s7-200 plc,” in *2011 Eighth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD)*, vol. 1, July 2011, pp. 480–484.
- [17] P. Leon, H. Lara, D. Aguilar, C. Vega, D. Sotomayor, and N. Espinosa, “Fuzzy controller developed in a plc, based on weighted average method,” in *2015 CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON)*. IEEE, 2015, pp. 55–60.
- [18] H. Li and L. Yang, “The application of fuzzy control in plc temperature control system based on opc technology,” in *2014 Seventh International Symposium on Computational Intelligence and Design*, vol. 2, Dec 2014, pp. 288–291.
- [19] R. Diversi, R. Guidorzi, and U. Soverini, “Identification of armax models with noisy input and output,” *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 44, no. 1, pp. 13 121–13 126, 2011, 18th IFAC World Congress. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667016457289>
- [20] K. Ogata, *Sistemas de control en tiempo discreto*, 2nd ed., P. H. HISPANOAMERICANA, Ed. México, 1995.
- [21] K. Passino and S. Yurkovich, *Fuzzy Control*, A.-W. Longman, Ed. Columbus, Ohio, 1997.
- [22] Siemens, *SIMATIC S7 Fuzzy Control*, 1996.
- [23] J. Quevedo, *Diseño de un controlador difuso para la estabilización de flujos de retorno y de salida en un circuito de molienda de cemento*. Universidad Politécnica Salesiana Ecuador, 2016.
- [24] R. Pérez, “Sistemas de inferencia basados en lógica borrosa: Fundamentos y caso de estudio,” in *Revista de Investigación de sistemas e Informática*, vol. 7, 2010, pp. 91–104.

- [25] N. Fernandez, L. Carbajal, and E. Colina, “Sistema difuso tipo mamdani para la determinación genérica de la calidad del agua,” in *Revista de la Facultad de Ciencias Básicas*, ser. 1, vol. 8. Universidad de Pamplona Colombia, 2010.
- [26] F. M. Alvarez, “Diseño sistemático de controladores difusos usando razonamiento inductivo.” Ph.D. dissertation, Universidad Politécnica de Cataluña, 2007.
- [27] J. De la Cruz and M. Loya, “Diseño de un control difuso tipo mamdani para regular la temperatura de una acuario tipo tropical,” *Revista del Diseño Innovativo*, vol. 3, no. 8, pp. 1–9, sep 2019.
- [28] P. Pivonka, “Comparative analysis of fuzzy pi/pd/pid controller based on classical pid controller approach,” in *2002 IEEE World Congress on Computational Intelligence. 2002 IEEE International Conference on Fuzzy Systems. FUZZ-IEEE’02. Proceedings (Cat. No.02CH37291)*, vol. 1, 2002, pp. 541–546 vol.1.
- [29] R. Carrasco Duboué and G. Alvarez Bestard, “Diseño e implementación de un pid profesional y un pid difuso utilizando un microcontrolador pic18f4550,” 06 2014.
- [30] C. Saeteros, “Implementación de un control pid fuzzy para la regulación de nivel den módulo mps pa compact workstation mediante la tarjeta stm32f4 discovery,” Master’s thesis, Universidad Politécnica Salesiana, 2018.

ANEXOS Y PROGRAMAS FUENTES

En este capítulo, se incluye los archivos empleados para el diseño e implementación de los bloques de control lógico difuso:

Hardware: Incluye esquema principal del tablero de control y supervisión y las direcciones empleadas para el conecxionado realizado de los sensores y actuadores a la periferia I/O ET-200 SP.



Tipo	Slot	Ch	Dirección	Instrumento
Digital	1	0	I0.0	EV10estado
Digital	1	1	I0.1	EV20estado
Digital	1	2	I0.2	EV30estado
Digital	1	3	I0.3	LSL20
Digital	1	4	I0.4	LSH20
Digital	1	5	I0.5	JC10R1
Digital	1	6	I0.6	JC10R2
Digital	3	0	Q0.0	EV10activacion
Digital	3	1	Q0.1	EV20activacion
Digital	3	2	Q0.2	EV30activacion
Digital	3	3	Q0.3	JC10enclavamiento
Analógico	5	0	AI0	FIT10
Analógico	5	1	AI1	FIT11
Analógico	5	2	AI2	PIT10
Analógico	5	3	AI3	PIT11
Analógico	6	4	AI4	PIT20
Analógico	6	5	AI5	TIT10
Analógico	6	6	AI6	EV11F
Analógico	6	7	AI7	EV12F
Analógico	7	0	AQ0	EV11
Analógico	7	1	AQ1	EV12
Analógico	8	2	AQ2	JC10

FIGURA 6.1: Dirección de conecxionado para el tablero de control y supervisión.

Software: Incluye las simulaciones de las estrategias de control aplicando el controlador PID y el controlador difuso en el software Matlab. Además, se adjunta el programa ejecutable del software TIA Portal para la implementación de los sistemas de control PID y sistemas de control basado en lógica difusa en el tablero de control y supervisión para de los procesos: flujo, presión, nivel, temperatura y las estrategias de control trabajadas en esta tesis para una planta industrial multipropósito.

Todos los archivos se encuentran adjuntos y almacenados en la nube en el siguiente enlace:

<https://drive.google.com/drive/folders/1ZMN0gOxNJRh5a8QB3gV8e-Jol9G4b65o?usp=sharing>