



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DEL ESTADO DE HIDALGO

CENTRO DE INVESTIGACIÓN AVANZADA EN
INGENIERÍA INDUSTRIAL

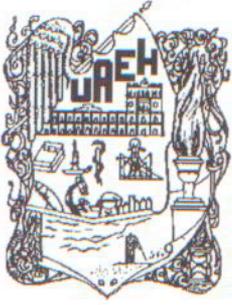
Diseño de un Controlador PI Difuso de Flujo en un
Sistema de Circulación de Agua

T E S I S
PARA OBTENER EL TÍTULO DE
Maestro en Ciencias en Ingeniería en Manufactura
P R E S E N T A :
Ing. Othon Colorado Arellano

DIRECTOR DE TESIS:
Dr. Juan Carlos Seck Tuoh Mora



2009



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA
ÁREA ACADÉMICA DE INGENIERÍA

M. en C. JULIO CÉSAR LEINES MEDÉCIGO
DIRECTOR DE CONTROL ESCOLAR
DE LA U.A.E.H.
P R E S E N T E.

Por este conducto le comunico que la Comisión Revisora asignada al trabajo de tesis del alumno de Maestría en Ciencias en Ingeniería de Manufactura, OTHÓN COLORADO ARELLANO con número de cuenta 177333, quien presenta el tema "DISEÑO DE UN CONTROLADOR PI DIFUSO DE FLUJO EN UN SISTEMA DE CIRCULACIÓN DE AGUA", después de revisar la tesis y constituida como Jurado, ha decidido autorizar la impresión de la misma, hechas las correcciones que fueron acordadas.

A continuación se anotan las firmas de conformidad de los integrantes del Jurado:

PRESIDENTE: DR. GILBERTO PÉREZ LECHUGA

VOCAL: DR. JUAN CARLOS SECK TUOH MORA

SECRETARIO: DR. JOSELITO MEDINA MARÍN

SUPLENTE: M. EN C. NORBERTO HERNÁNDEZ ROMERO

Sin otro particular, reitero a usted la seguridad de mi atenta consideración.

A T E N T A M E N T E

"AMOR, ORDEN Y PROGRESO"

Mineral de la Reforma, Hgo. a 9 de julio de 2009.

M. EN I. CÉSAR A. ARROYO BARRANCO
COORDINADOR ACADÉMICO DEL AAI

Diseño de un controlador PI difuso de flujo en un sistema de circulación de agua

Othon Colorado Arellano

Agosto 2009

Resumen

Los sistemas electrónicos de instrumentación industrial y el control basados en una computadora han tenido un incremento en su aplicación para monitorear y controlar procesos industriales; en nuestro caso se desea controlar el flujo de agua en un sistema compuesto por dos depósitos, una bomba, red de tubería y una válvula de control.

En el trabajo de investigación se diseñó un controlador proporcional e integral (PI) analógico, digital y difuso en un sistema de circulación de agua; se eligió el control PI ya que en éste el error en estado estacionario es cero, de tal modo que permite comparar el comportamiento de cada uno de los controladores y obtener una metodología de sintonización para el sistema de control de flujo; para ello primero se determinaron los elementos que conforman nuestro sistema de control, se representaron en diagramas de bloques obteniendo el modelo matemático del sistema de circulación de agua, con el fin de obtener el controlador PI analógico. A partir de éste, se obtiene el controlador PI digital; en cada uno de los casos se realizó una simulación con el software MatLab.

Para el diseño del controlador PI difuso, se utilizó la técnica de Mamdani, debido a que para el diseño y sintonización del controlador sólo se requiere del conocimiento y experiencia en el comportamiento del sistema, dejando a un lado el modelo matemático. Para realizar el diseño y la simulación del controlador PI difuso, se utilizó el software Fuzzy Logic de MatLab.

De los resultados obtenidos podemos decir que para diseñar un control PI digital es necesario contar con el control PI analógico; y para obtener la sintonización del control analógico es necesario el obtener el modelo matemático del sistema, en nuestro caso resulta que el modelo matemático no es lineal de tal modo que es necesario linealizar, lo cual hace que tenga variaciones con respecto al sistema real. En el caso del control PI difuso resulta de mayor relevancia el conocimiento y la experiencia que se tenga en el sistema a controlar, ya que el planteamiento de las funciones de membresía y las reglas de inferencia dependen precisamente de ello. Una vez obtenidos los controladores se hace una comparación, con simulación en el software MatLab, estableciendo un set point de la variable que se desea controlar (en nuestro caso el flujo) y observamos gráficamente el desempeño de los controladores, constatando que en todos los casos su comportamiento es similar.

Finalmente el diseño del controlador PI digital se implementó en un módulo de control de procesos para la empresa Industrial Teleternik S.A. de C.V., el cual se utiliza actualmente para realizar prácticas de control digital que se imparten en diversas licenciaturas de distintas universidades del país.

Abstract

The electronic systems for industrial instrumentation and computer-based control have been widely developed for monitoring and controlling industrial processes; in our case, we desire to control the water flow in a system composed by two tanks, a pump, a pipe network and a control valve.

In this research we design both an analog, digital and fuzzy proportional and integral (PI) controller, for a water circulation system; the PI controller was chosen because its steady-state error is zero, therefore it allows to compare the behavior of each type of controller and obtain a tuning methodology for the control-flow system. In order to achieve the previous task, first the elements conforming our monitoring system are determined, hence they are represented in block diagrams to obtain the mathematical model of the water circulation system and to get as well the analog PI controller.

From this one, the digital PI controller is defined; in both cases simulation is performed with MatLab software. For the fuzzy PI controller design, the Mamdani technique was applied because it only requires the knowledge and experience of the system for designing and tuning the controller, leaving aside the mathematical model. MatLab Fuzzy Logic simulation software is used for implementing the PI fuzzy controller. From these results, we can say that the design of a digital PI controller needs of having first the analog PI controller and for tuning the analog one the mathematical model of the system is required, in our case the mathematical model is not linear so that it is necessary to linearize, which makes the model varies with regard of the real system. In the case of the fuzzy PI controller, it is more relevant the knowledge and experience about the system to control, because the elaboration of membership functions and inference rules depend precisely on them.

Once obtained the controllers, they are compared by simulation in MatLab establishing a set point for the desired variable to manage (in our case flow) and graphically the performance of controllers is analyzed, concluding that in all cases their behavior is similar.

Finally the manufacturing of the digital PI controller is realized in a process control module for the company Teleternik Industrial, which is used for digital control practices that are taught in several courses of distinct universities in Mexico.

Objetivo general

Analizar y diseñar un control difuso de flujo en un sistema de circulación de agua usando las técnicas convencionales de control y evaluar la factibilidad de controlar el sistema mediante un control difuso.

Investigar las ventajas que tiene un control difuso sobre un control convencional digital, mediante simulación.

Objetivos específicos

1. Desarrollar un sistema integrado por tanques acoplados conectados por tuberías, cuyo flujo se da por medio de una bomba centrífuga; implementar la instrumentación para adquirir el flujo y el actuador para generar las acciones de control con una tarjeta de adquisición de datos.
2. Obtener el modelo de la planta.
3. Diseñar un control PI digital en simulación.
4. Diseñar un controlador difuso bajo la técnica de Mamdani en simulación.
5. Comparar el desempeño de ambos controladores bajo las mismas circunstancias.

Metodología

Para el desarrollo del proyecto, se adoptó la metodología de estudios descriptivos que acuden a técnicas en la recolección de la información como: la observación; modelado con ecuaciones diferenciales que nos representan el comportamiento dinámico de las variables de proceso involucradas en el sistema. Los pasos para la realización de la investigación pueden resumirse en los siguientes:

1. Planteamiento del problema por resolver.
2. Definición de objetivos generales y específicos.
3. Delimitación del alcance de la investigación.
4. Elaboración del marco de referencia de la investigación, recolectando información en distintas fuentes bibliográficas.
5. Obtención del modelo de la planta.
6. Diseño de los algoritmos de control convencional y difuso.
7. Simulación para validar los algoritmos planteados.

Justificación

La razón de este trabajo es mostrar cómo utilizar una metodología de control difuso en un sistema de circulación de agua, sin necesidad de usar un modelo matemático complejo. Se realiza una comparación del controlador difuso con el controlador PI digital, para evaluar el desempeño de ambos.

Otro de los motivos para el desarrollo del proyecto es que actualmente los módulos de control existentes en el mercado solo muestran la parte del control convencional. Lo que se ofrece en el presente trabajo es tanto el control difuso como el control digital de modo que al hacer prácticas, el usuario puede determinar qué técnica de control utilizar para poder evaluar el desempeño de los mismos.

El trabajo también tiene el objetivo de diseñar un sistema académico que presente las alternativas de control convencional y control heurístico en un sistema de flujo hidráulico.

Hipótesis

El controlador difuso tipo Mamdani tiene un desempeño dinámico similar a un control convencional PI y no necesita de un modelo matemático complejo de la planta para su sintonización.

Índice general

1. Fundamentos de control por computadora	1
1.1. Introducción	1
1.2. Sistemas electrónicos de instrumentación y control basados en computadora	2
1.2.1. Instrumento de medición	4
1.2.2. Instrumento de medición virtual	5
1.2.3. Modelo de un sistema de instrumentación genérico	5
1.3. Control digital	6
1.3.1. Elementos básicos de un sistema de control de datos discretos	7
1.3.2. Ventajas y desventajas de los sistemas de control de datos discretos	7
1.4. Lógica difusa y su técnica de control	9
1.5. Modelo y simulación en el control de procesos	11
1.6. Estado del arte	14
1.7. Conclusiones	17
2. Conceptos generales del comportamiento de fluidos en estado transitorio	18
2.1. Introducción	18
2.2. Flujo laminar y turbulento	18
2.3. Ecuaciones en sistemas de nivel de líquidos	19
2.3.1. Resistencia	19
2.3.2. Capacidad, C de un tanque	21
2.4. Formas de excitación de un sistema de control	21
2.5. Conclusiones	22

3. Modelo matemático del sistema de circulación de agua	23
3.1. Introducción	23
3.2. Características de respuesta y configuraciones de un sistema	24
3.2.1. Entrada y salida	24
3.2.2. Sistemas en lazo abierto	24
3.2.3. Sistemas en lazo cerrado	24
3.3. Sistema de circulación de agua en lazo cerrado	25
3.4. Función de transferencia del sistema de circulación de agua en lazo cerrado	26
3.4.1. Función de transferencia del control proporcional-integral (PI)	27
3.4.2. Válvula de control	27
3.4.3. Función de transferencia de la planta	29
3.4.4. Función de transferencia del sistema	31
3.5. Conclusiones	33
4. Diseño del controlador convencional proporcional integral (PI) del sistema de circulación de agua	34
4.1. Introducción	34
4.2. Obtención de los parámetros para el controlador PI	35
4.2.1. Capacidad del tanque del sistema de recirculación de agua	35
4.2.2. Constante de tiempo de respuesta de la válvula de control del sistema en estudio	35
4.2.3. Resistencia al paso de flujo por la válvula de salida del sistema	36
4.3. Diseño del controlador PI analógico	37
4.4. Diseño del controlador PI digital	39
4.5. Conclusiones	42
5. Diseño del controlador proporcional integral (PI) del sistema de circulación de agua con lógica difusa	43
5.1. Introducción	43
5.2. Fundamentos de lógica difusa	44
5.2.1. Conjuntos difusos	44
5.2.2. Operaciones con conjuntos difusos	44
5.2.3. Funciones de membresía de conjuntos difusos	45

5.2.4. Variable lingüística	46
5.2.5. Reglas difusas	46
5.2.6. Dispositivos de inferencia difusa	46
5.3. Composición de Mamdani	47
5.4. Diseño del Controlador Difuso	48
5.4.1. Controlador PI difuso	49
5.4.2. Funciones de membresía	50
5.4.3. Especificación del universo de discurso	50
5.4.4. Número de funciones de membresía	50
5.4.5. Reglas de inferencia	54
5.5. Metodología de sintonización	60
5.6. Pruebas y resultados	64
5.7. Conclusiones	68
6. Conclusiones y aportaciones	69
6.1. Conclusiones	69
6.2. Aportaciones	70
6.3. Trabajos futuros	70
Bibliografía	71
Apéndice	73

Índice de figuras

1.1. Utilización de la computadora en el control de un proceso	2
1.2. Sistema de adquisición de datos y control	3
1.3. Esquema de la misión del instrumento como nexo entre el mundo real y las personas	5
1.4. Modelo genérico del sistema de instrumentación y control	6
1.5. Sistema de control de lazo cerrado con datos muestreados	7
1.6. Sistema de control de lazo cerrado con datos muestreados	7
1.7. Elementos básicos de un sistema de control analógico	8
1.8. Control directo de un proceso o sistema	9
1.9. Estructura de un sistema difuso	10
1.10. Estructura de un controlador difuso	10
1.11. Clasificación de los modelos	12
1.12. Diagrama de bloques del sistema del modelo Llanés et. al.	16
1.13. Sistema de tanques acoplados del modelo Pérez et al.	17
2.1. Sistema de control de nivel de líquido	19
2.2. Función escalón unitario	21
2.3. Función rampa unitaria	22
3.1. Diagrama de bloques de sistema en lazo abierto	24
3.2. Diagrama de bloques de sistema en lazo cerrado	25
3.3. Diagrama esquemático del sistema	25
3.4. Diagrama de bloques del sistema	26
3.5. Diagrama de bloques de la válvula, sistema de primer orden	28

3.6. Diagrama simplificado	28
3.7. Curva de la respuesta exponencial	29
3.8. Planta: Tanque y válvula de control	29
3.9. Diagrama de bloques del sistema, incluye control PI, válvula de control, tanque y sensor . .	31
3.10. Diagrama de bloques utilizando las constantes K_p y K_i , simplificando el efecto de la válvula de control y el tanque	32
3.11. Diagrama de bloques simplificado del sistema en lazo cerrado	32
4.1. Diagrama básico de un control automático	34
4.2. Diagrama del tanque del sistema de circulación de agua	35
4.3. Gráfica Tiempo Vs Flujo acumulado	36
4.4. Gráfica Flujo Vs Altura de nivel de agua en el tanque	37
4.5. Respuesta al escalón unitario del sistema de circulación de agua en lazo cerrado con control analógico	39
4.6. Diagrama de bloques en lazo cerrado con un control digital PI y el retenedor de orden cero	40
4.7. Respuesta al escalón unitario del sistema de circulación de agua en lazo cerrado con control digital	41
5.1. Función de pertenencia de tipo singleton	45
5.2. Función de pertenencia de tipo triangular	45
5.3. Etapas de un controlador difuso usando la técnica de Mamdani	48
5.4. Con tres funciones de membresía del error	50
5.5. Con tres funciones de membresía de derivada del error	51
5.6. Sistema de defusificación para tres funciones de membresía	51
5.7. Con cinco funciones de membresía del error	52
5.8. Con cinco funciones de membresía de la derivada del error	52
5.9. Sistema de defusificación para cinco funciones de membresía	53
5.10. Con siete funciones de membresía del error	53
5.11. Con siete funciones de membresía de derivada del error	54
5.12. Sistema de defusificación para siete funciones de membresía	54
5.13. Eventos que se pueden presentar en el sistema de inferencia cuando se tienen tres funciones de membresía	55
5.14. Diagrama de bloques del sistema de circulación de agua utilizando un controlador PI difuso	60

5.15. Superficie de la acción de control PI difuso del sistema de circulación de agua	60
5.16. Funciones de membresía del error	61
5.17. Funciones de membresía de la derivada del error	62
5.18. Funciones de membresía de la defusificación, salida	63
5.19. Reglas de inferencia utilizada para la simulación del sistema de circulación de agua	64
5.20. Respuesta de salida con tres funciones de membresía y cambio de error de -0.005 a 0.005	65
5.21. Respuesta de salida con tres funciones de membresía y cambio de error de -0.0015 a 0.0015	65
5.22. Respuesta de salida con cinco funciones de membresía y cambio del error de -0.005 a 0.005	66
5.23. Respuesta de salida con cinco funciones de membresía y cambio del error de -0.002 a 0.002	66
5.24. Respuesta de salida del controlador con cambio del error de -0.005 a 0.005	67
5.25. Respuesta de salida del controlador con cambio del error de -0.002 a 0.002	67
6.1. Unidad de control de procesos	73
6.2. Elementos de la Unidad de control de procesos	74
6.3. Menú principal del software ITKUCP	75
6.4. Ensayos del software ITKUCP	76
6.5. Sensor y transmisor de flujo	78
6.6. Interfaz de usuario del sistema de circulación de agua	79

Índice de tablas

4.1. Tiempo Vs Flujo	36
4.2. Tiempo Vs Flujo acumulado en porcentaje	36
4.3. Relación de flujo y altura de la columna de agua en el tanque	37
5.1. Acciones cuando se tienen tres funciones de membresía	58
5.2. MAD con tres funciones de membresía	59
5.3. MAD con cinco funciones de membresía	59
5.4. MAD con siete funciones de membresía	59
6.1. Identificación de los elementos del sistema ITK-UCP	76
6.2. Salidas digitales	77
6.3. Salidas analógicas	77
6.4. Entradas analógicas	77

Capítulo 1

Fundamentos de control por computadora

1.1. Introducción

Una de las principales áreas de la electrónica y la automatización que se imparten en las universidades es el control de sistemas dinámicos; es por ello que surge la necesidad de desarrollar un sistema de tipo académico de modo que permita evaluar el desempeño de controles convencionales y heurísticos para realizar su sintonización con las metodologías de control digital y difuso.

En este trabajo de investigación se analiza y diseña un controlador proporcional integral (PI) de flujo para un sistema de agua a través de un circuito de tuberías de modo que permita mantener el control del flujo estableciendo un set point de referencia y por lo tanto, una presión hidrostática en el tanque. Una de las principales razones para utilizar control proporcional e integral es que este controlador mejora el desempeño de estado estacionario y al mismo tiempo mejora la estabilidad relativa; utilizando las técnicas de control digital y control difuso.

En este trabajo se comparan también las ventajas y desventajas que tiene el control proporcional-integral utilizando tanto control digital como lógica difusa; además de estudiar la factibilidad de su implementación en un sistema que permita realizar prácticas educativas, de modo que las técnicas anteriores se muestren no solo de manera teórica si no que se apliquen en el control de un sistema.

En el desarrollo del proyecto se utilizó MatLab para la simulación de la planta, LabView para el proceso de implementación del sistema y la tarjeta USB 6008 de National Instruments para la adquisición de datos.

El sistema propuesto basa su análisis en el estado transitorio, razón por la cual al plantear el modelo matemático las ecuaciones que describen el comportamiento de los fluidos en estado estacionario no se utilizan, considerando también que el tiempo de análisis es muy breve en lo que dura el transitorio.

1.2. Sistemas electrónicos de instrumentación y control basados en computadora

Actualmente, la utilización de las computadoras se ha hecho fundamental, dentro de la infraestructura de cualquier disciplina tecnológica. De hecho, diferentes ramas de la industria, como las cadenas de producción, las comunicaciones, el transporte, los laboratorios de investigación y los sistemas de medida, entre otros, dependen de la ayuda de las computadoras.

Un proceso físico es una combinación de operaciones que se llevan a cabo con el fin de efectuar alguna actuación o cambio sobre un sistema. Este proceso se puede caracterizar por una serie de elementos de entrada y salida de materiales, energía e información. Los materiales y la energía son componentes básicos en todo proceso, mientras que la información es una parte indispensable que ayuda a controlar y desarrollar en las mejores condiciones las pautas de éste.

Tomando en cuenta que las computadoras son dispositivos para procesar la información capturada del proceso físico, se utilizan las mismas para controlar la adquisición, el procesamiento y el control de la actuación final sobre el proceso.

Entonces, a partir de la información de entrada y de salida de la computadora puede hacerse un intercambio de información hacia el proceso físico, tal como se representa en la Figura 1.1 [9].

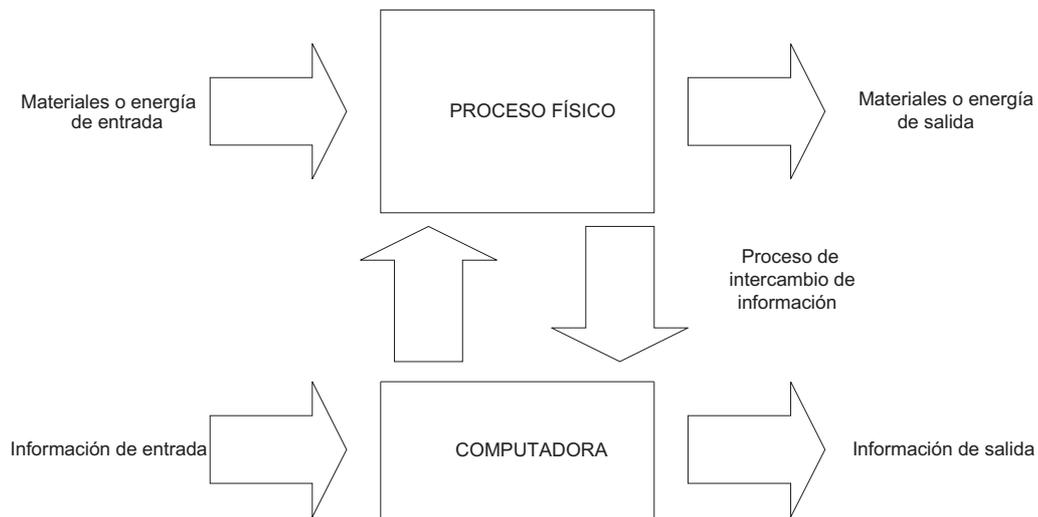


Figura 1.1: Utilización de la computadora en el control de un proceso

La obtención de resultados óptimos a partir de un sistema de adquisición de datos depende de cada uno de los elementos que se utilicen en el sistema. La Figura 1.2 ilustra un sistema genérico en el cual podemos considerar una serie de elementos esenciales:

- a. Computadora. La cual determinará la velocidad de proceso del sistema. Las aplicaciones que requieran un proceso de tiempo real de señales de alta frecuencia necesitarán computadoras potentes, a menudo con procesadores de tiempo real (Digital Signal Processing). En otras

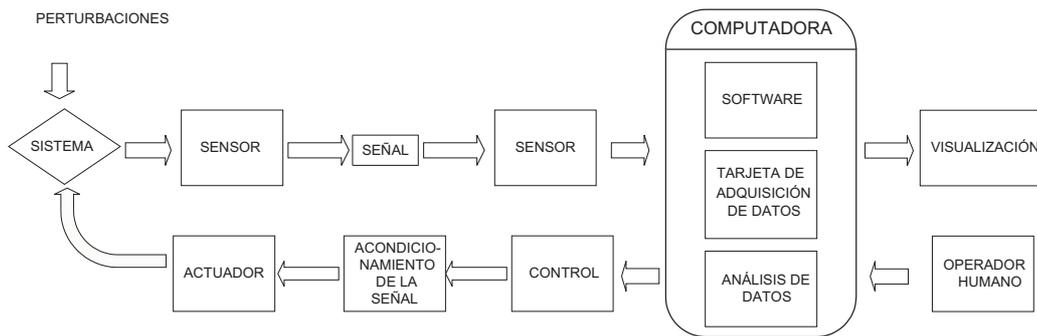


Figura 1.2: Sistema de adquisición de datos y control

aplicaciones más simples, en que no haga falta adquirir tantas muestras por segundo, podrán utilizarse procesadores más lentos.

- b. Transductores. También llamados sensores, ya que son lo que detectan el fenómeno físico y suministran una señal eléctrica que pueda ser aceptada por el sistema de adquisición.
- c. Actuadores. Para el control de procesos se requiere de algún dispositivo capaz de variar su característica de ganancia, al aplicarle una señal de control; por ejemplo: válvulas de control, bombas hidráulicas, potenciómetros, motores, entre otros. [3]
- d. Acondicionador de señal. En la mayoría de los casos, la señal eléctrica generada por el transductor tiene que ser tratada, convertida o escalada de forma que pueda ser aceptada por el sistema de adquisición. Las formas más comunes para el acondicionamiento de la señal son:
 - La amplificación. Hay que tener en cuenta que, para disponer de una resolución máxima, la señal tiene que ser amplificada de manera que la tensión máxima alcanzable sea igual al valor máximo del rango de entrada del convertidor analógico digital.
 - La linealización. Muchos transductores presentan una respuesta no lineal a los cambios de magnitud física bajo medida, en estos casos, con el fin de tener una medida suficientemente significativa, hay que realizar un proceso de linealización mediante módulos circuitales específicos o bien mediante programas adecuados de cálculo numérico.
 - El aislamiento. La otra aplicación común de los circuitos de acondicionamiento es el aislamiento de las señales procedentes del transductor para la seguridad de la computadora. El sistema físico que se tiene que monitorear puede presentar transitorios de alto voltaje que podrían estropear el sistema de adquisición o dañar a la computadora.
- e. Tarjeta de adquisición de datos. El esquema más simple de adquisición de datos tiene que incorporar, como mínimo, una tarjeta que se ocupe de adquirir la señal analógica y que realice la conversión digital. Las características más relevantes de las tarjetas de adquisición se centran en los aspectos siguientes.
 - Entradas analógicas. Hacen referencia al número de canales analógicos de entrada que soporta la placa.
 - Salidas analógicas. Es el arreglo que se necesita para poder proveer de estímulos el sistema de adquisición de datos.

- Entradas y salidas digitales. Hacen referencia al número de entradas y salidas digitales que soporta la placa. Las interfaces de entrada y salida digitales se utilizan para realizar el control de procesos, generar patrones de prueba y realizar la comunicación con el equipo periférico.
- f. Análisis de datos. La capacidad de proceso de las computadoras personales actuales se ha incrementado hasta el punto de tener la potencia de cómputo suficiente para muchas aplicaciones de adquisición de datos y de análisis de resultados. De todos modos, hay aplicaciones en que el microprocesador de la computadora no puede procesar los datos con la rapidez suficiente para responder a las señales del mundo real. Por eso, en muchos casos, es necesaria la utilización de módulos específicos de análisis basados en procesadores de señal, que realizan los cálculos a la misma velocidad que el procesador de la propia computadora. Mientras este nuevo dispositivo realiza su tarea de cálculo, el procesador de la computadora ejecuta el programa de aplicación. La potencia de cálculo de estos dispositivos es útil en diversos campos; en cualquier aplicación que requiera alta velocidad de ejecución, aplicaciones que traten con señales de alta frecuencia y necesiten respuestas en tiempo real.
- g. Técnica de control. La ventaja de usar una computadora como sistema de control es que muchos lazos pueden ser controlados o compensados por la misma computadora por medio de tiempo compartido. La computadora también puede efectuar funciones de supervisión, como la programación de aplicaciones requeridas en el proceso.
- h. Software. Los programas transforman la computadora y el dispositivo de adquisición de datos en un sistema completo de adquisición, análisis y presentación de resultados, en el que también es factible implementar algoritmos de control. Se puede hablar de tres posibilidades para programar el hardware de un sistema de adquisición de datos.
 - Programar directamente los registros del hardware del sistema. Esta opción es más flexible para el diseñador, pero, por otra parte, suele ser la más costosa, ya que la realización de cada aplicación requiere mucho tiempo.
 - Utilizar drivers o programas que simplifican el proceso de desarrollo de software para la adquisición de datos, y aportan funciones de alto nivel que pueden ser usadas por los lenguajes de programación convencionales. Si se utilizan los drivers adecuados se puede llegar a tener la misma flexibilidad de programación que en el caso anterior, pero con un ahorro de tiempo importante.
 - Usar software de aplicación, el cual añade grandes capacidades de análisis y, al mismo tiempo, permite integrar el control de instrumentos con los buses de instrumentación estándares GPIB, VXI, y también con instrumentos que tengan un puerto de comunicaciones RS-232; o bien con tarjetas de adquisición de datos.

1.2.1. Instrumento de medición

Un instrumento de medición es una herramienta que, si se observa y se controla, se puede utilizar para aprender y conocer mejor el universo.

Generalmente, es una costumbre trabajar con instrumentos independientes en forma de cajas negras para realizar determinadas medidas. Sin embargo, estos instrumentos pueden llegar a ser demasiado rígidos para configurar metodologías al desarrollar nuevas alternativas de medida. De

hecho, los instrumentos modernos generalmente ya están pensados para ser integrados en sistemas de instrumentación, que combinan la potencia de cálculo y la flexibilidad de operación de las computadoras, el software e instrumentos programables especializados. Por lo tanto, un instrumento puede tomar diversas formas: desde la más simple; constituida por un módulo tradicional, hasta un sistema complejo, basado en computadora, que se compone de diferentes elementos de hardware y software, construido para una aplicación determinada. La Figura 1.3 ilustra la misión de un instrumento.

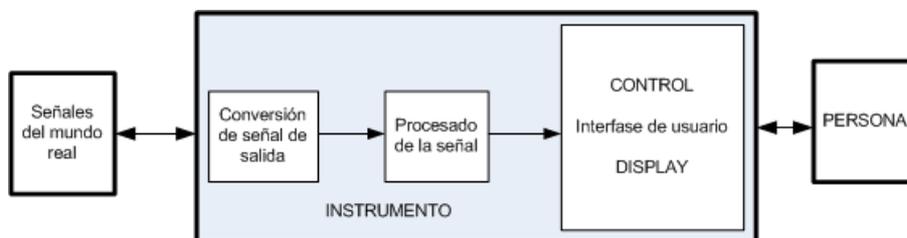


Figura 1.3: Esquema de la misión del instrumento como nexo entre el mundo real y las personas

El desarrollo tecnológico a todos los niveles que se ha producido en los últimos años, especialmente en el campo de la electrónica, hace que las empresas y los centros de investigación dispongan de instrumentos cada vez más competitivos. Según estas características, se debe mantener en tanto que el instrumento sea fácil de utilizar, se integre sin complicaciones en un sistema de medida basado en computadora y sea flexible, es decir, que se adapte fácilmente a las necesidades de cambios en la metodología de medida. De esta manera es posible disponer de instrumentos y de sistemas de instrumentación especializados para cada campo, abierto a diferentes configuraciones de medida.

1.2.2. Instrumento de medición virtual

Un instrumento virtual es un módulo de software que simula cada uno de los aspectos funcionales del instrumento real basándose en todos los dispositivos físicos que pueden ser accesibles para la computadora (tarjetas de adquisición, tarjetas DSP, instrumentos accesibles GPIB, VXI, RS-232, etc.). Cuando se ejecuta un programa que representa un instrumento virtual, el usuario ve en la pantalla el panel que correspondería al instrumento físico y que permite su visualización y control.

Hasta hace poco tiempo, la construcción de un instrumento virtual podía realizarse con programas que ofrecían un conjunto de facilidades como funciones de alto nivel y la incorporación de elementos gráficos, que simplificaban la tarea de programación y de elaboración del panel frontal. No obstante, el cuerpo del programa continuaba basándose en el texto, lo que significaba invertir mucho tiempo en detalles de programación que no revertían en la finalidad real del instrumento. Con la aparición de los paquetes de programación gráfica, como el LabVIEW de National Instruments o el VEE de Hewlett Packard, entre otros, el proceso de creación del instrumento virtual se simplifica y se minimiza el tiempo de desarrollo de las aplicaciones.

1.2.3. Modelo de un sistema de instrumentación genérico

Resulta necesaria la utilización de una plataforma de hardware basada en computadora y una serie de programas que realicen el control de los dispositivos electrónicos. Por otra parte, la utilización

de una interfaz gráfica de usuario (graphical user interface) facilitará la interacción entre el sistema y el operador.

El software de control del sistema tiene que ser lo suficientemente flexible para poder adaptarse a las diferentes necesidades de medida y prueba. Además, a bajo nivel están los drivers de control de las diferentes opciones de adquisición. Los programas de aplicación deben incorporar otros drivers de los diferentes instrumentos; de tal manera, que desde la pantalla de la computadora tiene que poder controlarse el dispositivo de una manera similar a como se haría manualmente.

Este driver debe desarrollar prácticamente todas las funciones del instrumento en la pantalla de la computadora. Si a estas funciones se añaden otras procedentes de las librerías propias del paquete de software de aplicaciones, se tiene como resultado un instrumento virtual; la Figura 1.4 muestra dicho sistema.

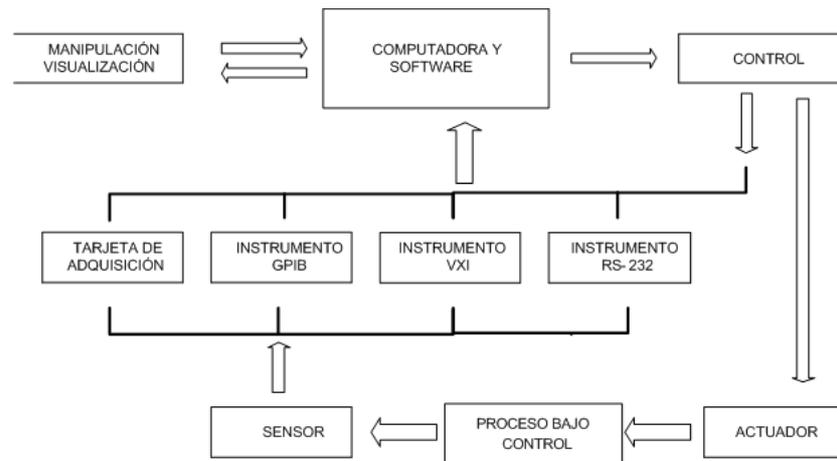


Figura 1.4: Modelo genérico del sistema de instrumentación y control

1.3. Control digital

En años recientes el análisis y diseño de sistemas de control de datos discretos y digitales han experimentado avances muy importantes. Estos sistemas han ganado mucha popularidad e importancia en la industria debido, en gran parte, a los progresos realizados en computadoras digitales de control, microprocesadores y procesadores digitales de señal.

Los sistemas de control de datos discretos y digitales difieren de los sistemas continuos o analógicos, en que las señales en una o más partes de ellos se encuentran en forma de trenes de pulsos o códigos numéricos. Los datos muestreados son señales cuya amplitud está modulada por pulsos y que se tienen mediante el muestreo de señales analógicas. Con frecuencia, la señal con amplitud modulada por pulsos está presente en la forma de trenes de pulsos, donde la información es transmitida por las amplitudes de éstos.

En general, los datos digitales son las señales generadas por computadoras o transductores digi-

tales; lo usual es que estos datos se encuentran codificados de alguna manera en formato digital.

1.3.1. Elementos básicos de un sistema de control de datos discretos

La Figura 1.5, presenta los elementos básicos de un sistema común de control de lazo cerrado con datos muestreados. El muestreador representa un dispositivo u operación cuya salida es un tren de pulsos, ninguna clase de información se transmite entre dos pulsos consecutivos. La señal de entrada $e(t)$ continúa queda muestreada por el dispositivo, y la salida es una secuencia de pulsos, en este caso la frecuencia de muestreo es uniforme, las magnitudes que tienen los pulsos en los instantes de muestreo representan los valores de la señal de entrada $e(t)$ justo en esos momentos. En general, el esquema de muestreo tiene muchas variaciones: algunos son periódicos, de frecuencia cíclica, con varias frecuencias, aleatorios y modulados por el ancho de pulso. El tipo más común encontrado en sistemas prácticos es el muestreo uniforme con una sola frecuencia.

El filtro ubicado entre el muestreador y el proceso controlado se utiliza para suavizar la salida del primero debido a que la mayor parte de los procesos controlados, están diseñados para recibir señales analógicas.

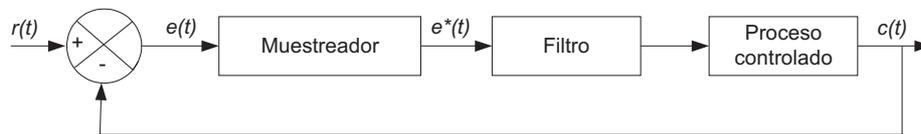


Figura 1.5: Sistema de control de lazo cerrado con datos muestreados

La Figura 1.6 presenta el diagrama de bloques de un sistema de control digital. La existencia de señales codificadas de manera digital, como las señales codificadas en binario, en ciertas partes del sistema requiere convertidores digital-analógico (D/A) y analógico-digital (A/D). El bloque de la Figura 1.6 que corresponde a la computadora digital puede representar una computadora digital de propósito especial, un microprocesador o un procesador digital de señales.

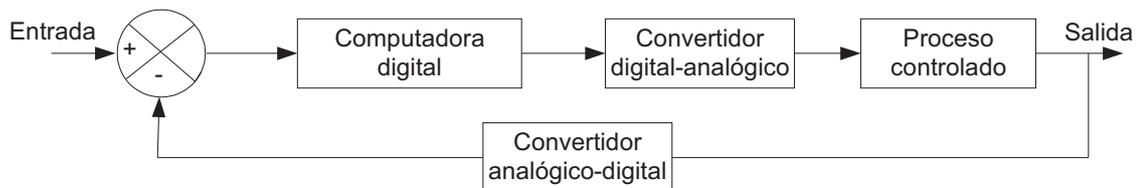


Figura 1.6: Sistema de control de lazo cerrado con datos muestreados

1.3.2. Ventajas y desventajas de los sistemas de control de datos discretos

El empleo de datos muestreados en los sistemas de control se remonta por lo menos a sesenta años. Algunas de las primeras aplicaciones de los datos muestreados fueron, mejorar el desempeño del sistema de control de una u otra forma. Es necesario reconocer que el muestreo es una característica

inherente de muchos sistemas físicos, y que el comportamiento de éstos puede describirse mediante datos discretos o modelos digitales.

Para abordar las ventajas de los sistemas de datos discretos, es necesario examinar los sistemas de control de datos continuos, en la Figura 1.7 se muestra el diagrama de bloques que contiene los elementos básicos de un sistema de control de datos continuos formado por un solo lazo.

En general, el controlador es un circuito electrónico que trabaja con una señal analógica y cuya salida es otra señal del mismo tipo. La ventaja del controlador analógico es que el sistema trabaja en tiempo real y puede tener un ancho de banda muy grande, esto es equivalente a tener una frecuencia de muestreo infinita, de modo que el efecto del controlador siempre está presente. Las desventajas del controlador analógico es que sus elementos se encuentran montados de manera rígida, de modo que las características del controlador están fijas de antemano, lo que dificulta modificar el diseño; por otra parte, el envejecimiento de los componentes y la sensibilidad de éstos cambios en el medio pueden llegar a ser muy importantes. Asimismo, los componentes analógicos exhiben una susceptibilidad mayor a problemas de ruido.

Algunas de las ventajas del control digital son las siguientes:

- Los componentes digitales tienen menor susceptibilidad al envejecimiento y a las variaciones de las condiciones ambientales.
- Los componentes digitales son menos sensibles al ruido y las perturbaciones.
- Los procesadores digitales tienen un menor tamaño y menor peso. Pueden fabricarse microprocesadores y procesadores digitales de señales en un solo circuito integrado muy versátil y de gran capacidad para aplicaciones de control.
- Los costos de los microprocesadores y los procesadores digitales de señal son cada vez menores.
- Los microprocesadores y los procesadores digitales de señal, permiten una flexibilidad mayor en la programación; un cambio en el diseño no requiere cambios en el hardware.
- Son más confiables.
- Proporcionan una mejor sensibilidad a variaciones en los parámetros.

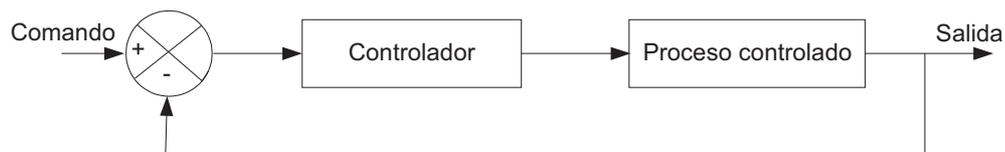


Figura 1.7: Elementos básicos de un sistema de control analógico

Sin embargo, los sistemas de control digital también tienen desventajas cuando se comparan con los sistemas analógicos, algunas de ellas son:

- Limitaciones en la velocidad de cálculo y en la resolución de la señal debido a la longitud de palabra finita del procesador digital, en contraste, los controladores analógicos trabajan en tiempo real y tienen una resolución teóricamente infinita.

- La longitud de palabra finita del procesador digital con frecuencia da origen a inestabilidad en el sistema, mismas que se manifiestan como ciclos límite en sistemas de lazo cerrado.
- La limitación en la velocidad de cálculo provoca retrasos en el lazo de control, los cuales pueden provocar inestabilidad en sistemas de lazo cerrado.

1.4. Lógica difusa y su técnica de control

La denominada lógica difusa (fuzzy logic) permite tratar información imprecisa, como estatura media, temperatura baja o mucha fuerza, en términos de conjuntos difusos. Los sistemas de control basados en lógica difusa combinan unas variables de entrada, por medio de grupos de reglas que producen uno o varios valores de salida.

La implementación de sistemas difusos dependerá de diversas condicionantes; tales como:

- Eficiencia computacional. Para los problemas complejos, con muchas variables lingüísticas o muchas reglas, o en realizaciones en microcontroladores de poca capacidad de cálculo y poca memoria, resulta fundamental seleccionar métodos que no requieran muchos cálculos o mucha memoria. Así, son preferibles en este caso funciones de inclusión triangulares o trapezoidales frente a las exponenciales, y el cálculo de máximos frente a multiplicaciones. Además las funciones de inclusión de tipo singleton para la salida producen sistemas más simples, aunque son sensibles al ruido de las entradas.
- Facilidad de adaptación. En aplicaciones en las que se requiere que el sistema pueda realizar aprendizaje puede ser necesario que la función de salida $y = f(t)$ sea derivable respecto de los parámetros que se han de ajustar. En este caso, por el contrario, son preferibles funciones de inclusión exponencial frente a las triangulares o trapezoidal, y las multiplicaciones frente al cálculo de máximos.

Los sistemas expertos de control difuso basados en reglas, conocidos como controladores difusos o FLC (Fuzzy Logic Controllers), o también, sistemas de inferencia difusa o FIS (Fuzzy Inference Systems), son una aplicación de la lógica difusa.

Para controlar un proceso o sistema se hace uso de un módulo controlador, que recibe como entradas una o varias variables de control llamadas referencias, (R), y una o varias variables, que se conocen como actuadores (A). Normalmente, el objetivo del control es mantener $R = S$, tal como se muestra en la Figura 1.8.

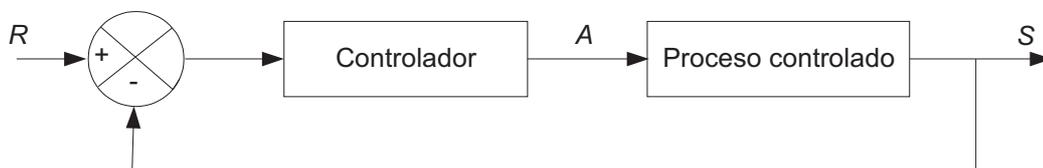


Figura 1.8: Control directo de un proceso o sistema

La estructura típica de un controlador basado en un sistema difuso puede verse en la Figura 1.9. Un primer bloque realiza un preprocesado de las variables de entrada, que proporciona el vector de entradas al controlador difuso. El controlador difuso aplica la entrada que recibe a la base de reglas, para obtener la salida. Finalmente, esta salida puede requerir un tratamiento final para adecuarla al proceso que se desea controlar.

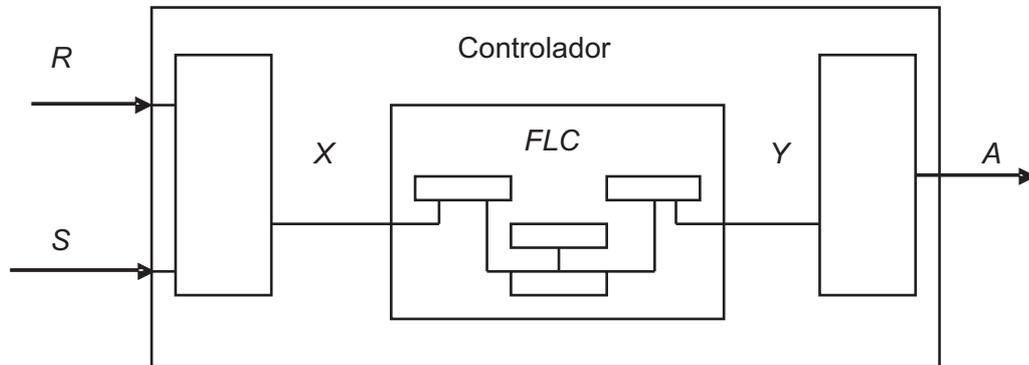


Figura 1.9: Estructura de un sistema difuso

La estructura interna de un controlador difuso o FLC se muestra en la Figura 1.10. Un primer elemento llamado difusificador realiza la conversión de valores discretos a términos difusos, su salida es utilizada por el dispositivo de inferencia difusa para aplicarla a cada una de las reglas de la base de reglas, siguiendo el método de inferencia seleccionado. La salida de este bloque puede ser M conjuntos difusos, o bien un único conjunto difuso; finalmente el desfusificador transformará estos conjuntos difusos en un valor no difuso.

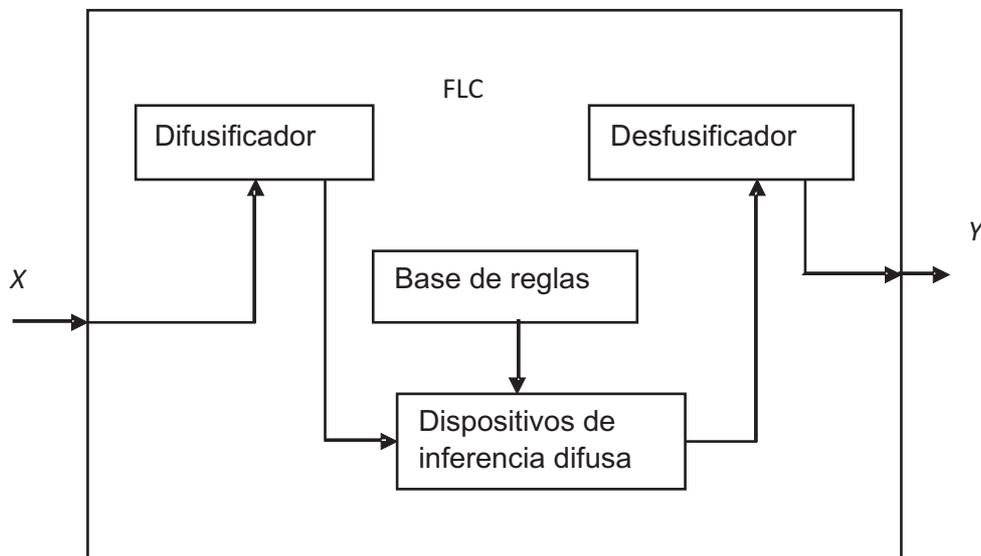


Figura 1.10: Estructura de un controlador difuso

1.5. Modelo y simulación en el control de procesos

Para modelar y resolver problemas de simulación dentro de un sistema, es conveniente comprender los conceptos de:

- Sistema: es un conjunto de objetos reunidos en alguna interacción o interdependencia bien definida, para alcanzar una o más metas. Para lograr esto clasificaremos los sistemas en dos categorías: discretos y continuos. Un sistema discreto es aquel para el que los cambios en las variables de estado cambian instantáneamente en puntos separados del tiempo. Un sistema continuo es aquel para el que las variables de estado cambian continuamente con respecto al tiempo.
- Estado del sistema: se indica una colección de variables que contiene toda la información para la descripción de todas las entidades, los atributos y las actividades de acuerdo con su existencia en algún punto del tiempo. Estas variables de estado determinan la efectividad del sistema.
- Actividad del sistema: es todo proceso que provoque cambios en dicho sistema.
- Un evento es un hecho que ocurre instantáneamente y que cambia en estado del sistema.
- Las variables de estado describen el estado de un sistema o uno de sus componentes, ya sea al comienzo, al final o durante el periodo. Estas variables interactúan con las variables exógenas del sistema y con las endógenas, de acuerdo con las relaciones funcionales supuestas por el sistema. El valor de una variable de estado, durante un periodo particular de tiempo, puede depender no solamente de los valores de una o más variables exógenas en algún periodo precedente, sino también del valor de ciertas variables de salida en periodos anteriores.

La naturaleza propia de la dinámica de los modelos de simulación de eventos discretos requiere que se lleve un registro de los valores actuales del tiempo simulado conforme la simulación se ejecuta, y también se requiere de un mecanismo de avance del tiempo de un valor a otro. Por ello, introduciremos en nuestro modelo de simulación una variable que proporcionará el valor actual del tiempo simulado y la llamaremos reloj de simulación.

La simulación es la imitación de la operación de un proceso o sistema real a lo largo del tiempo. El desempeño del sistema real se imita usando distribuciones de probabilidad para generar aleatoriamente los distintos eventos que ocurren en el sistema. Por ello, al modelar, se caracterizan matemáticamente las relaciones que definen de manera lógica la interacción de los componentes del sistema y de las variables endógenas y exógenas.

Una descripción del sistema se debe hacer en la forma modular y por bloques. En cada modulo se identificarán los componentes, los atributos, las variables endógenas y exógenas, así como las relaciones entre éstas. Cada bloque debe contener la información relevante. El tamaño del bloque lo determina el nivel de agregación de los componentes del sistema. El sistema como un todo se modelará matemáticamente de acuerdo con la lógica que enlaza sus bloques. Como las corridas de simulación por lo general requieren la generación y procesamiento de una gran cantidad de datos es inevitable que estos experimentos estadísticos simulados se ejecuten en una computadora. Con estas precisiones ya se pueden comprender con mayor claridad algunas definiciones que fueron enunciadas por pioneros expertos de la simulación de sistemas [6].

Robert E. Shanon define la simulación como: "... el proceso de diseñar y desarrollar un modelo computarizado de un sistema o proceso y conducir experimentos con este modelo con el propósito

de entender el comportamiento del sistema o evaluar varias estrategias con las cuales se operará el sistema”.

En sentido más estricto H. Maisel y G. Gnugnoli definen la simulación como: “... una técnica numérica para realizar experimentos en una computadora digital. Estos experimentos involucran ciertos tipos de modelo matemático y lógicos que describen el comportamiento de sistemas de negocios, económicos, sociales, biológicos, físicos o químicos a través de largos periodos de tiempo”.

Thomas H. Naylor et al. la define como: “... una técnica numérica para conducir experimentos en una computadora digital. Estos experimentos comprenden ciertos tipos de relaciones matemáticas y lógicas, las cuales son necesarias para describir el comportamiento y la estructura de sistemas complejos del mundo real a través de largos periodos de tiempo”.

Un “modelo” es una descripción lógica de cómo un sistema, proceso ó componente se comporta. La simulación incluye el diseño de un “modelo” de un sistema, proceso o componente, y la realización de experimentos sobre el mismo. El propósito de los experimentos es determinar cómo el sistema real se desempeña, y pronosticar el efecto de los cambios sobre el mismo en el tiempo.

Se utiliza la simulación para responder a preguntas como:

- ¿Resultará este cambio en el proceso en una mayor calidad, eficiencia ó producción?
- ¿Podemos estabilizar el sistema en un menor tiempo aplicando este algoritmo de control?
- ¿Se reduce el consumo de materia prima realizando estos cambios al sistema de control?
- ¿Disminuye la variación del proceso utilizando este nuevo algoritmo?

Si el resultado de una actividad se puede describir completamente en términos de su entrada, se denomina “determinística”. Si los efectos de la actividad varían aleatoriamente en diferentes salidas, se denomina estocástica. Si la ocurrencia de una actividad es aleatoria, se le atribuye al entorno o medio ambiente y por lo tanto es exógena. Se utilizan distribuciones de probabilidad para describir el carácter aleatorio de una actividad.

Los modelos son estáticos o dinámicos. Los modelos dinámicos se sub-dividen en continuos y discretos, como se muestra en la Figura 1.11.

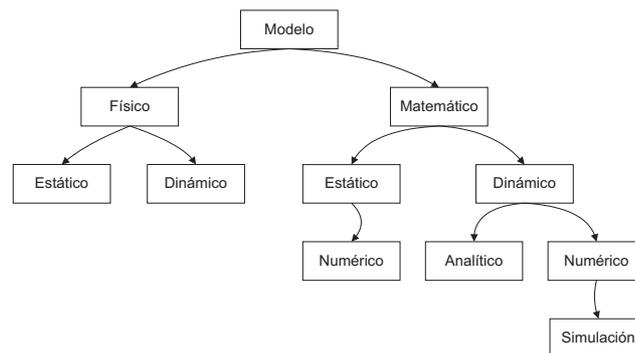


Figura 1.11: Clasificación de los modelos

Los sistemas discretos son aquellos en los que los cambios ocurren en forma discontinua. Se describe en base a los eventos que producen los cambios en el estado del sistema, y a veces se simplifican considerando que los cambios ocurren en forma continua.

En un modelo matemático, las entidades del sistema y sus atributos se representan con variables matemáticas. Las actividades se describen mediante funciones matemáticas que interrelacionan las variables. Los modelos matemáticos dinámicos normalmente se resuelven mediante métodos numéricos, y la simulación es una de las herramientas más comunes.

El modelado y simulación se ha constituido en una poderosa herramienta para el diseño, análisis y optimización sistemas y procesos industriales. La disponibilidad de computadoras personales cada vez más poderosas, de menor costo y de fácil uso, acompañados con software ó programas de aplicación y lenguajes de programación altamente flexibles, ha permitido la masificación del uso de diferentes técnicas de simulación y control de procesos.

Este trabajo se concentra en la aplicación de las técnicas de modelado, simulación y control de procesos haciendo uso de la tecnología PC y un lenguaje de programación gráfico con tarjetas de adquisición y control (entradas/salidas) para la PC; un sistema de simulación y control capaz de manejar señales reales (analógicas y digitales, de entrada y de salida) y ejecutar modelos matemáticos de control de procesos en tiempo real.

La simulación de sistemas nos permite, entre otras cosas:

- Predecir el resultado de las acciones que se tomen sobre el proceso o sistema de control.
- Comprender por qué los eventos ocurren.
- Identificar áreas problemáticas antes de la implantación del sistema.
- Explorar los efectos de las modificaciones.
- Evaluar ideas y su viabilidad, e identificar sus ineficiencias.
- Estimular el pensamiento creativo y entrenar al personal.
- Optimizar los procesos (ahorros de energía, cuellos de botella, mejoras de los rendimientos, etc.).

Para simular un sistema de control, se debe contar con un "modelo" matemático de la planta o proceso que se quiere controlar, el cual puede optimizarse vía interacciones múltiples, bajo múltiples escenarios, variables, parámetros que se evalúan individual ó simultáneamente.

Un modelo no es solo el sustituto de un sistema, sino también una simplificación del mismo. Para obtener un modelo se debe al menos determinar su estructura entidades, atributos, actividades y fronteras, además de definir los datos, valores de los atributos y relaciones involucradas en las actividades.

Los pasos básicos para modelar un sistema de control son:

- Definir el modelo matemático y programar el sistema de control.
- Seleccionar los parámetros y los valores iniciales.

- Ejecutar el modelo.
- Procesar los resultados.
- Interactuar con el modelo hasta lograr optimización.

Con el modelo y simulación de los sistemas de control, se busca satisfacer la necesidad de controlar la fabricación de los productos mediante el mantenimiento de las variables de proceso en los valores más estables posibles. Los controladores comparan las variables de proceso con el punto de consigna (Set Point) y a partir de su diferencia o error calculan cual debe ser la señal de salida al elemento final de control.

Para controlar el proceso, en el presente estudio se utilizó un control proporcional integral y un control fuzzy logic.

Los sistemas de simulación tradicionales, utilizan principalmente señales simuladas a través de funciones o datos pre-capturados, mientras que los lenguajes de programación permiten el uso de señales reales analógicas y digitales, junto a las simuladas.

El manejo de señales reales con los modelos de simulación, permiten que el modelo sea optimizado y ajustado en tiempo-real, de acuerdo a los patrones de comportamiento de las señales de entrada y salida del sistema. Es decir, el modelo puede ser ajustado con base en respuesta del proceso o sistema real a las señales de estímulo generadas por el modelo mismo. Esto hace que la transición del modelo/simulación hacia el sistema final sea rápida y efectiva, disminuyéndose el número de interacciones normalmente requeridas para adaptar o implantar el modelo en el proceso real.

Bajo este esquema, la transición del modelo simulado al modelo físico, es relativamente sencillo, sólo se requiere la sustitución de la planta o proceso simulado, por uno real. El sistema de control sería el mismo para ambos casos, y puede ser validado inmediatamente tanto con el modelo físico como con el proceso real.

En este trabajo se usa un controlador proporcional-integral a un proceso simulado; primero se aplicó a un modelo simulado, función de transferencia y posteriormente al proceso real. También se evaluó un controlador de lógica difusa para hacer la comparación y determinar las ventajas y desventajas de ambos métodos de control.

1.6. Estado del arte

Para la simulación de control de proceso existen distintos simuladores propuestas por distintos fabricantes; tal como De Lorenzo, que ofrece simuladores de control de procesos, el control es realizado con medios electrónicos. LabVol es otro fabricante de simuladores de control de procesos; sin embargo, cada una de las variables de proceso es monitoreada con un módulo independiente, el cual lo hace costoso ya que si se desea adquirir un simulador para distintas variables su costo se incrementa, la ventaja es que puede usarse separadamente cada uno de los módulos y por lo tanto cada una de las variables de modo independiente. Edibon empresa que ofrece un sistema que permite monitorear y controlar las variables, flujo, nivel, temperatura y PH, utilizando control digital con una tarjeta de adquisición de datos y el software desarrollado en plataforma Lab View, todas en un mismo modulo.

Por otro lado la lógica difusa se ha desarrollado desde 1965 por el profesor Lofti Zadeh de la universidad de california en Berkeley, el cual hizo una extensión de la teoría de conjuntos la cual

llamo lógica difusa, conocida también como lógica multivariada o lógica continua. Lofti Zadeh observo que en la teoría de conjuntos convencionales no se podían representar las ambigüedades de la vida diaria porque solo se limitaba a falso y verdadero; para la lógica difusa un conjunto tiene un grado de membresía o un grado de verdad.

Una vez hecha la publicación de la teoría de lógica difusa ésta no tuvo gran aceptación, fue hasta los años 70's cuando una aplicación industrial usó lógica difusa. En el colegio de Queen Mary London, Inglaterra, Ebrahim Mamdani usó la lógica difusa para controlar un generador de vapor el cual no podía ser controlado bajo técnicas convencionales de control [20]. Después de esta aplicación, se dan otras aplicaciones sin tener gran aceptación en la industria.

Sin embargo, actualmente en a más de 35 años de nacimiento de la lógica difusa hay una gran variedad de aplicaciones de la lógica difusa. La naturaleza de las aplicaciones son del tipo multidisciplinario, incluye control automático, electrónica de consumo, procesamiento de señales, predicción de series de tiempo, recuperación de información, manejo de bancos de datos, visión por computadora, entre otros [20].

Por otro lado, dentro de los trabajos de control implementado lógica difusa tenemos:

1. El desarrollado por Castro Montoya, A. J., Vera Monterrosas, F y Quintana Silva, J. A. Los cuales diseñaron un controlador de lógica difusa (CLD) para regular el flujo de fluidos en una estación de laboratorio. Para medir el desempeño del CLD ejecutaron diferentes tipos de pruebas, comparando sus resultados con los obtenidos utilizando un PID convencional. El controlador de lógica difusa obtuvo mejores resultados en la respuesta al escalón, lo que implica que éste puede utilizarse en el arranque de plantas. Para perturbaciones tipo escalón, pero inversa, el PID no es capaz de seguir la referencia, debido a la no-linealidad del proceso mientras que el CLD presenta buenos resultados. Para perturbaciones tipo rampa, el PID presenta un mejor seguimiento a las rampas que el CLD, ya que su comportamiento es lineal [16].
2. Francisco José Garcés, Darío Arturo Díez Ángel y César Augusto Quintero Vallejo de la Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia. Desarrollaron un sistema de control óptimo para un motor trifásico de AC de bajo voltaje que permite incidir sobre la velocidad y el torque del mismo, dando así, máxima autonomía a su fuente de poder. Está dirigido a formar parte de un automóvil eléctrico para personas con discapacidades motrices, dándole a éstas mayor independencia y la posibilidad de realizar actividades útiles para la sociedad. El desarrollo utiliza técnicas modernas de control como la lógica difusa y la modulación por vector de espacio, con el fin de obtener la mayor eficiencia posible en la utilización de los recursos energéticos. Es también un avance en la industria del automóvil eléctrico, que puede contribuir a disminuir los índices de contaminación en las ciudades causados por los gases tóxicos que resultan de los combustibles fósiles utilizados hasta el momento por la gran mayoría de los vehículos [11].
3. Coronel Lemus Martha Esmeralda y Hernández Reyes José Antonio del Instituto Tecnológico de Zacatepec, Morelos. Desarrollaron un controlador difuso de la velocidad de un motor de CD ante variaciones en el par de carga. El trabajo se desarrollo a nivel de simulación empleando el software Matlab 5.3 (Simulink y la herramienta "fuzzy logic"). El método de inferencia empleado es la implicación de Mamdani [17].
4. Ferreyra, R. Fuentes. UAM-Azcapotzalco. Demuestran cómo el rendimiento de un control PID puede ser igualado y excedido por un control P difuso en aplicaciones que requieren una muy

alta precisión y estabilidad. Un control PID normal y uno P difuso son implementados para controlar temperatura en aplicaciones que requieren bastante precisión; este tiene la capacidad de ajustar variaciones de hasta de $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Se realiza una comparación profunda entre estos dos tipos de control y se establecen las ventajas y desventajas de cada uno de ellos en la aplicación [22].

5. E. Cesar, O Llanés, F. García, J. E. Rojas, A. Barriga y S. Sánchez desarrollaron un trabajo realizado con control difuso de nivel en un sistema de tanques múltiples con alimentación centralizada el proceso a controlar es el que aparece esquematizado en la Figura 1.12, formado por tres tanques T1, T2 y T3 cumpliéndose que el volumen del tanque T3, es mayor que la suma de los volúmenes de los tanques T1 y T2. La motobomba (MB) que está gobernada por el variador de velocidad (VV) alimenta los dos tanques en forma centralizada. El sistema incluye además los siguientes sensores y actuadores:

- a) Sensores de presión (TP1 y TP2) de características lineales y salida 4 - 20mA, ubicados en el fondo de los tanques para la medición del nivel con gama de 0 a 2 Bar.
- b) Válvulas solenoides (on-off) V1 y V2 en la alimentación de los tanques T1 y T2 respectivamente.
- c) Válvulas manuales V3, V4 y V5 en la descarga de los tanques T1, T2 y T3 respectivamente.

El objetivo del control es, a partir de los requerimientos, mantener constantes los niveles de los tanques T1 y T2 (no necesariamente el nivel es el mismo para los dos tanques) [8].

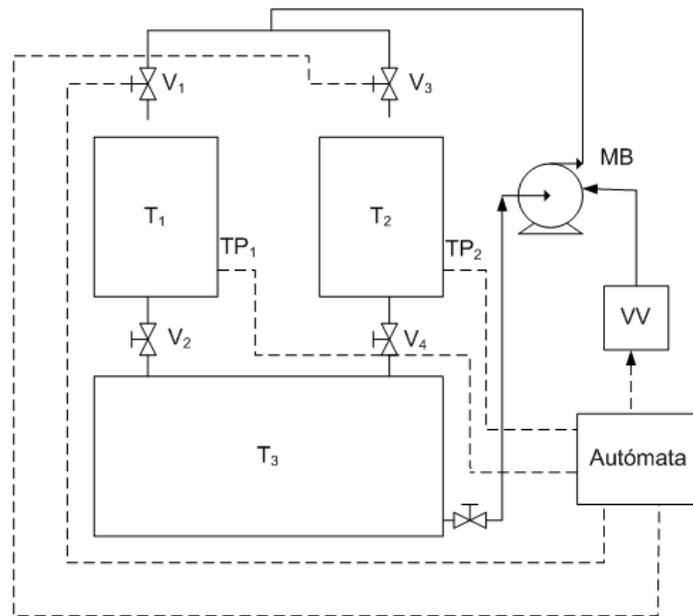


Figura 1.12: Diagrama de bloques del sistema del modelo Llanés et. al.

6. Marco Antonio Pérez Cisneros y James Vernon, desarrollaron un sistema de tanques acoplados que utiliza lógica difusa para ajustar el voltaje de entrada (u) hacia el motor de la bomba que

se muestra en la Figura 1.13, de tal forma que el nivel del tanque 2 se conserva en el estado estable. La salida medida está en el nivel del segundo tanque y se denota por la señal y_2 , el controlador sigue las siguientes reglas difusas [19]:

SI {nivel muy alto} ENTONCES {reducir el voltaje de la bomba}

SI {nivel muy bajo} ENTONCES {incrementar el voltaje de la bomba}

SI {nivel es correcto} ENTONCES {fijar el voltaje de la bomba}

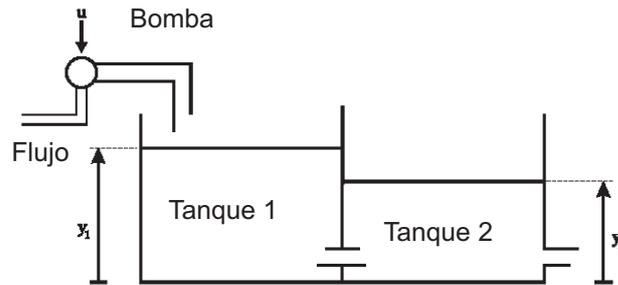


Figura 1.13: Sistema de tanques acoplados del modelo Pérez et al.

7. Cristian Cuadra Alvarado y Juan L. Hernández Sánchez. Diseñaron un modelo de estrategias de control difuso para un sistema alineal bivariado. Presentan cuatro estrategias de control difuso para sistemas alineales bivariados, extensibles a casos multivariados. Las cuatro estrategias son evaluadas comparativamente en su aplicación en diseño de controladores difusos para una planta de dos entradas y dos salidas, que consiste en un tanque que es agitado en que controlan el caudal y concentración de salida mediante dos caudales de entrada. Los desempeños de las estrategias se evaluaron por medio de un programa Matlab-Simulink [7].

1.7. Conclusiones

La adquisición, monitoreo y control de variables de proceso utilizando una computadora vía una tarjeta de adquisición de datos es cada vez más común favoreciendo el desarrollo de las técnicas de control de procesos, en este caso la aplicación de la lógica difusa. Su importancia radica principalmente en que es posible utilizarla en sistemas en donde es difícil la obtención del modelo matemático del sistema o cuando se tienen sistemas no lineales.

La adquisición, monitoreo y control de variables de proceso utilizando una computadora vía una tarjeta de adquisición de datos, es cada vez más común favoreciendo el desarrollo de las técnicas de control de procesos. Para esto se requiere conocer el comportamiento del sistema y las variables que lo definen; en nuestro caso para un sistema de flujo. En el siguiente capítulo se definen los conceptos relacionados con el comportamiento de sistemas de tanques y flujo en estado transitorio.

Capítulo 2

Conceptos generales del comportamiento de fluidos en estado transitorio

2.1. Introducción

Con frecuencia los procesos industriales implican un flujo de líquidos a través de tubos y tanques conectados; el flujo en tales procesos resulta a menudo turbulento y no laminar. Los sistemas que contienen un flujo turbulento a menudo deben representarse mediante ecuaciones diferenciales no lineales, en tanto que los sistemas con un flujo laminar pueden representarse mediante ecuaciones diferenciales lineales. Al analizar sistemas que implican el flujo de líquidos, resulta necesario dividir los regímenes de flujo en laminar y turbulento, de acuerdo con la magnitud del número de Reynolds. En esta sección obtendremos las ecuaciones de sistemas de nivel de líquidos en estado transitorio, para así obtener el modelo matemático del sistema de circulación de agua.

2.2. Flujo laminar y turbulento

En un flujo laminar el fluido fluye sin mezclado significativo de sus partículas próximas entre sí. En el flujo turbulento los movimientos del fluido varían irregularmente de tal suerte que las cantidades como velocidad y presión muestran una variación aleatoria con el tiempo y las coordenadas espaciales. El régimen del flujo depende de tres parámetros físicos que describen las condiciones del flujo. El primero es la escala de longitud del campo de flujo, tal como el espesor de una capa límite o el diámetro de un tubo, si la escala de longitud es suficientemente grande, una perturbación de flujo puede incrementarse y el flujo puede llegar a ser turbulento, el segundo es una escala de velocidad tal como un promedio espacial de la velocidad, con una velocidad suficientemente grande el flujo puede llegar a ser turbulento, el tercero es la viscosidad, con una viscosidad lo suficientemente pequeña el flujo puede llegar a ser turbulento. Los tres parámetros se pueden combinar en uno solo que puede servir para predecir un régimen de flujo, esta cantidad es el número de Reynolds, nombrada así en

honor de Osborne Reynolds (1842-1912), un parámetro sin dimensiones definido como:

$$\text{Re} = \frac{VL}{\nu} \quad (2.1)$$

Donde L y V son la longitud y velocidad característica respectivamente y ν es la viscosidad cinemática. Para saber si un flujo es laminar o turbulento se recurre al número de Reynolds crítico (Re_c), el cual se define como el número, arriba del cual, un flujo laminar primario deja de existir. De modo que el flujo es laminar si $Re < Re_c$. En un flujo por el interior de un tubo de pared áspera se encontró que Re_c es aproximadamente igual a 2000, éste es el número de Reynolds crítico mínimo utilizado en la mayoría de las aplicaciones de ingeniería; si la pared del tubo es extremadamente lisa y libre de vibración el número de Reynolds crítico se incrementa a medida que disminuye el nivel de fluctuación en el flujo, se han medido valores de más de 40 000, [18]

2.3. Ecuaciones en sistemas de nivel de líquidos

Para describir el modelo matemático de un sistema de nivel de líquido, es necesario conocer las características dinámicas de estos sistemas, tal como la resistencia y capacidad de nivel de líquido; estos parámetros son magnitudes constantes que definen las características fundamentales, inherentes de los componentes del sistema de nivel de líquidos.

2.3.1. Resistencia

Sea el flujo a través de una tubería corta que conecta a dos tanques, la resistencia R , por el flujo de líquido en tal tubo se define como la variación de diferencia de nivel necesaria para producir una variación unitaria en el gasto. Sea el sistema de nivel de líquido que aparece en la Figura 2.1.

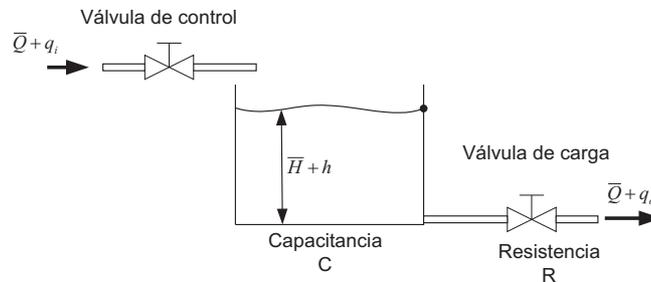


Figura 2.1: Sistema de control de nivel de líquido

El líquido fluye a través de la válvula de carga en el costado del tanque, si el flujo a través de esta restricción es laminar, la relación entre el gasto y la presión hidrostática en estado estacionario al nivel de la restricción está dada por [13]:

$$Q = KH \quad (2.2)$$

Donde

Q :es el gasto en estado estacionario en, m^3/s

K :coeficiente de descarga en, m^2/s

H :presión hidrostática en estado estacionario en, mts

La ley que rige al flujo laminar es análoga a la ley de Coulomb, la cual establece que la corriente es directamente proporcional a la diferencia de potencial. En el caso de flujo laminar, la resistencia R , se obtiene como [13]:

$$R = \frac{dH}{dT} = \frac{H}{Q} \quad (2.3)$$

La resistencia al flujo laminar es constante y análoga a la resistencia eléctrica. Si el flujo a través de la restricción es turbulento, el gasto en estado estacionario está dado por:

$$Q = K\sqrt{H} \quad (2.4)$$

La resistencia R para el flujo turbulento se obtiene de:

$$R = \frac{dH}{dQ} \quad (2.5)$$

de la Ecuación 2.4 se obtiene

$$dQ = \frac{K}{2\sqrt{H}}dH$$

o bien

$$\frac{dH}{dQ} = \frac{2\sqrt{H}}{K} = \frac{2\sqrt{H}\sqrt{H}}{Q} = \frac{2H}{Q}$$

Finalmente la resistencia queda expresada como:

$$R = \frac{2H}{Q} \quad (2.6)$$

así el valor de la resistencia en flujo turbulento R depende del gasto y de la presión hidrostática, sin embargo el valor de R se puede considerar como constante si las variaciones en la presión hidrostática y en el gasto son pequeñas. Si se utiliza la resistencia de flujo turbulento, la relación entre Q y H está dada por:

$$Q = \frac{2H}{R}$$

Esta linealización es válida, siempre que las modificaciones de presión hidrostática y de gasto sean pequeñas respecto al estado estacionario.

En muchos casos reales no se conoce el valor del coeficiente de descarga K de la Ecuación 2.4. En este caso la resistencia se determina trazando la representación gráfica de la presión hidrostática en función del gasto, basándose en los valores experimentales y midiendo la pendiente de la curva en la condición de operación.

2.3.2. Capacidad, C de un tanque

Se define como la variación en la cantidad del líquido acumulado, necesaria para producir una variación unitaria en el potencial (presión hidrostática). La capacidad del tanque es igual al área de la sección de corte, si ésta es constante, la capacitancia es constante para cualquier carga hidrostática.

Este parámetro se utilizará en el Capítulo 3 para determinar el modelo matemático del sistema de circulación de agua.

2.4. Formas de excitación de un sistema de control

El análisis de la respuesta transitoria, ya sea de un componente elemental, o de un sistema complejo, precisa utilizar funciones que permitan excitar dichos componentes o sistemas, y analizar las respuestas frente a estos estímulos. Para lo cual tenemos:

1. Función escalón unitario. Significa un cambio instantáneo de la magnitud de la variable, desde un valor nulo hasta un valor igual a la unidad, y una vez alcanzado dicho valor permanece constante. Se asume que este cambio se produce en un tiempo cero; esto es:

$$u(t) = \begin{cases} 0, & \text{para } t < 0 \\ 1, & \text{para } t > 0 \end{cases}$$

Su representación gráfica se muestra en la Figura 2.2.

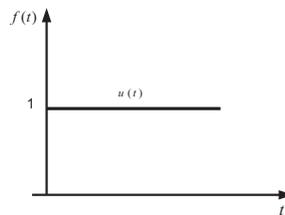


Figura 2.2: Función escalón unitario

2. Función rampa unitaria. Consiste en un cambio constante e uniforme de la magnitud de la variable, a razón de una unidad de medida por unidad de tiempo, a partir del instante $t=0$. Esto equivale a decir que la variable cambia a una velocidad constante igual a la unidad; esto es:

$$u(t) = t, \text{ para } t > 0$$

Su representación gráfica se muestra en la Figura 2.3.

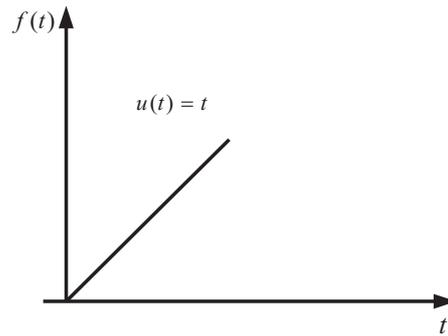


Figura 2.3: Función rampa unitaria

2.5. Conclusiones

Para saber el comportamiento de un sistema es necesario conocer los elementos en que se fundamenta, en nuestro caso para un sistema de flujo con tanques conectados es conocer el tipo de flujo que se tiene presente ya sea laminar o turbulento para así determinar las ecuaciones de gasto a utilizar y con ello calcular la resistencia (la cual nos indica la relación entre la variación del nivel y la variación del gasto de salida, es decir, la dependencia del gasto con el nivel), así como la capacidad (la cual es la superficie de la sección horizontal del tanque). También es importante conocer el tipo de función de excitación a que estará sujeto el sistema a controlar entre las cuales están: escalón unitario y rampa unitaria. En el siguiente capítulo se obtiene la función de transferencia del sistema de circulación de agua.

Capítulo 3

Modelo matemático del sistema de circulación de agua

3.1. Introducción

Un modelo matemático de un sistema dinámico se define como un conjunto de ecuaciones que representan la dinámica del sistema con exactitud, o al menos, razonablemente bien. Además, un modelo matemático no es único para un sistema dado. Los modelos matemáticos son importantes en los sistemas de control porque conociendo el modelo matemático del sistema a controlar se podrá analizar y diseñar el controlador para dicho sistema. Los dos modelos matemáticos más comunes son la función de transferencia y el de las ecuaciones diferenciales.

El método de función de transferencia sólo es válido para sistemas lineales invariantes con el tiempo, mientras que las ecuaciones de estado, que son ecuaciones diferenciales de primer orden pueden utilizarse para describir tanto sistemas lineales como no lineales. Los sistemas físicos reales nunca son completamente lineales, para poder usar las funciones de transferencia o las variables de estado es necesario linealizar el sistema, o bien limitar su intervalo de operación en el dominio lineal.

Lo anterior es válido para el control clásico o el control moderno, no así para el control difuso el cual se aborda en el presente trabajo de investigación; en el control difuso es necesario conocer el funcionamiento del sistema de manera rigurosa, así como su control, de manera que éste pueda ser expresado en forma lingüística; no como en el control tradicional. La ventaja del control difuso es que no es necesario conocer el modelo matemático para poder sintonizar un controlador difuso; sin embargo para hacer la simulación con un controlador difuso, si es necesario un modelo matemático.

3.2. Características de respuesta y configuraciones de un sistema

Todo sistema controlado está constituido por una serie de componentes, interconectados entre sí, de tal manera que, en general, la salida de cada uno de los elementos pasa a ser la entrada del siguiente, con la excepción de las entradas y salidas exteriores, así como los posibles puntos de suma intermedios. Por otro lado los parámetros característicos de la cada elemento, son considerados constantes e invariantes en el tiempo y se les denomina parámetros del sistema.

3.2.1. Entrada y salida

Un sistema de control produce una salida o respuesta para una entrada o estímulo dado. La entrada representa una respuesta deseada; la salida es la respuesta real. Después de la respuesta transitoria, un sistema físico aproxima su respuesta en estado estable, que es su aproximación a la respuesta deseada. La diferencia entre el valor de entrada con el valor de salida se le llama error en estado estable.

3.2.2. Sistemas en lazo abierto

La Figura 3.1, muestra un sistema en lazo abierto formado por un subsistema llamado transductor de entrada, que convierte la forma de la entrada a la empleada por el controlador. El controlador maneja un proceso o planta, a la entrada se le denomina referencia, mientras que la salida se llama variable controlada, otras señales llamadas perturbaciones se agregan al controlador y a las salidas por medio de puntos de suma que dan la suma algebraica de sus señales de salida por medio de signos asociados. [5]

La característica de un sistema en lazo abierto es que no puede compensar ninguna perturbación que se suma a la señal de actuación del controlador, simplemente se comandan por la entrada.

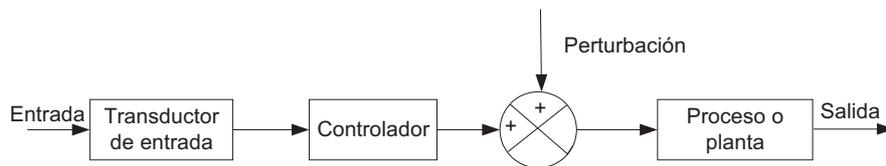


Figura 3.1: Diagrama de bloques de sistema en lazo abierto

3.2.3. Sistemas en lazo cerrado

Compensa perturbaciones al medir la respuesta de salida alimentando la misma medida a una trayectoria de realimentación y comparando esa respuesta con la entrada en el punto de suma, si hay alguna diferencia entre las dos respuestas, el sistema acciona la planta, por medio de una señal de actuación, para hacer la corrección. Si no existe diferencia, el sistema no acciona la planta, puesto que

la respuesta de la planta ya es la respuesta deseada, como se muestra en la Figura 3.2. Los sistemas de lazo cerrado tienen la ventaja de una mayor precisión que los sistemas de lazo abierto, aún cuando son menos sensibles al ruido, a perturbaciones y a cambios en el entorno. La respuesta transitoria y error en estado estable se pueden controlar en forma más cómoda y con mayor flexibilidad en los sistemas de lazo cerrado [24].

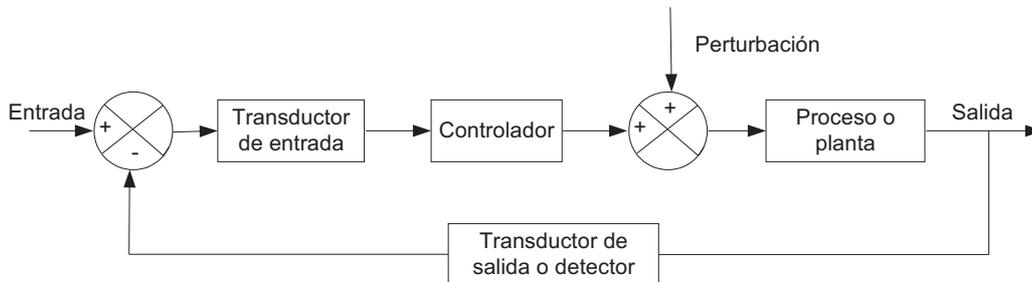


Figura 3.2: Diagrama de bloques de sistema en lazo cerrado

3.3. Sistema de circulación de agua en lazo cerrado

El proceso consiste en el transporte de agua) del tanque 1 al tanque 2, a través de tubería de PVC; formado por los siguientes elementos: un conjunto de tuberías de PVC de 0.5 y 0.25 pulgadas, un rotámetro, dos válvulas solenoides y una bomba centrífuga. La Figura 3.3 muestra una representación esquemática del sistema donde se aprecian los elementos que lo conforman así como el lazo de control retroalimentado; en el mismo se observa la planta formada por el tanque de suministro (1), la tubería, las válvulas de paso, la bomba centrífuga, el elemento de medición (rotámetro) y el elemento de control válvula de control.

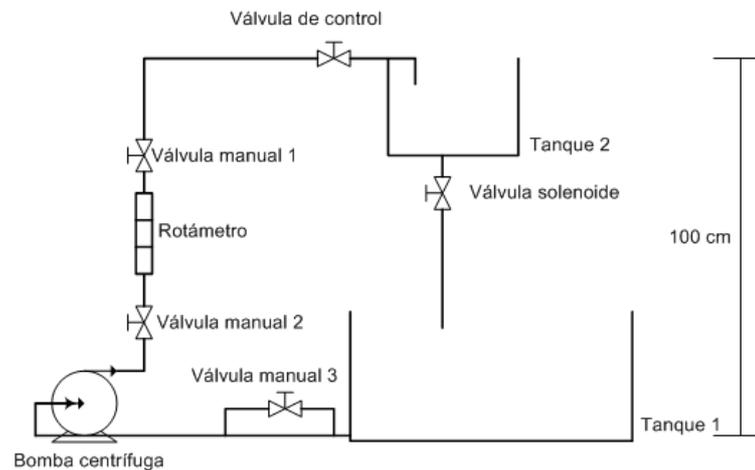


Figura 3.3: Diagrama esquemático del sistema

El diagrama de bloques para representar el sistema a estudiar se muestra en la Figura 3.4.

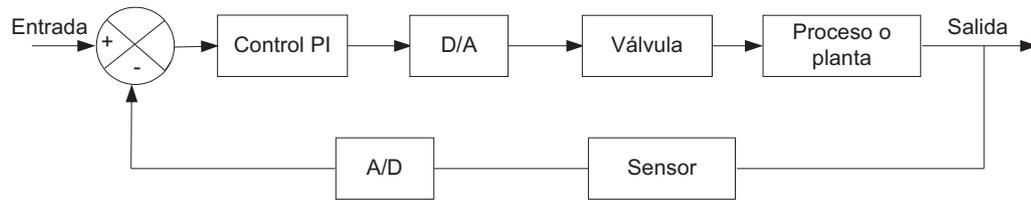


Figura 3.4: Diagrama de bloques del sistema

3.4. Función de transferencia del sistema de circulación de agua en lazo cerrado

El método de la transformada de Laplace es un método operacional que puede usarse para resolver ecuaciones diferenciales lineales, ya que las funciones pueden convertirse en expresiones algebraicas en función de una variable compleja s , y reemplazar operaciones como la diferenciación y la integración, por operaciones algebraicas en el plano complejo. Por lo tanto, una ecuación diferencial lineal se puede transformar en una ecuación algebraica en una variable compleja s . Si esta ecuación algebraica se resuelve en s para la variable dependiente, se puede hallar la solución de la ecuación diferencial. Una de las ventajas para usar este método es que cuando se resuelve la ecuación diferencial se obtienen las componentes del estado transitorio y estacionario de la solución simultáneamente, otra ventaja es que permite utilizar técnicas gráficas para predecir el funcionamiento del sistema sin tener que resolver el sistema de ecuaciones diferenciales.

En teoría de control, se utilizan frecuentemente funciones denominadas funciones de transferencia, para caracterizar las relaciones de entrada-salida de componentes o sistemas que pueden describirse por ecuaciones diferenciales lineales invariantes en el tiempo. La función de transferencia de un sistema de ecuaciones diferenciales lineales invariantes en el tiempo, se define como la relación entre la transformada de Laplace de la salida y la transformada de Laplace de la entrada, bajo la suposición de que todas las condiciones iniciales son cero. Esto es [13]:

$$G(s) = \frac{L_s}{L_e}$$

donde:

$G(s)$, es la función de transferencia del sistema

L_s , es la transformada de Laplace de la función de salida

L_e , es la transformada de Laplace de la función de entrada

3.4.1. Función de transferencia del control proporcional-integral (PI)

Un controlador es un dispositivo responsable de elaborar la señal correctora que constantemente es enviada al elemento final de regulación del proceso, con el fin último de alcanzar, restablecer o mantener las condiciones de regulación deseadas; es decir, hacer que la medida se mantenga en un valor lo más próximo posible al punto de consigna. Esta señal correctora, o salida del controlador es función de la señal de error, llamada también desviación, y tiene o puede tener en cuenta su signo, magnitud, desviación y tendencia [4].

Este módulo de regulación reúne las características de los modos proporcional e integral, aprovechando las ventajas y obviando los inconvenientes de ambos modos, contendrá por tanto la acción proporcional e integral.

Por lo tanto, en los instantes que siguen a un cambio de carga o punto de consigna, la acción proporcional facilitará inmediatamente un cambio en la salida del controlador que tenderá de manera aproximada a ajustar el proceso, finalmente la acción integral proporcionará paulatinamente la corrección suplementaria exacta hasta anular la desviación.

La acción de control proporcional e integral está definida por la ecuación [13]:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad (3.1)$$

y la función de transferencia del controlador es:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (3.2)$$

donde K_p es la ganancia proporcional y T_i se denomina tiempo integral, ambos valores son ajustables. El tiempo integral regula la acción de control integral, mientras que una modificación en K_p afecta tanto la parte integral como a la proporcional de la acción de control. El recíproco del tiempo integral T_i , recibe el nombre de frecuencia de reposición. La frecuencia de reposición es la cantidad de veces por minuto en que se repite la acción proporcional. La frecuencia de reposición se mide en términos de repeticiones por minuto.

3.4.2. Válvula de control

Es el elemento final de control más usado en los procesos industriales, su función es la de permitir un mayor o menor paso de un fluido, a efectos de modificar la aportación de material al proceso, con el fin último de mantener la regulación deseada.

Básicamente una válvula se compone de la parte motriz, denominada servomotor o actuador, el cuerpo, y el conjunto asiento-obturador. Considerando la función de transferencia de válvula como un sistema de primer orden, como se muestra en el diagrama de bloques de la Figura 3.5.

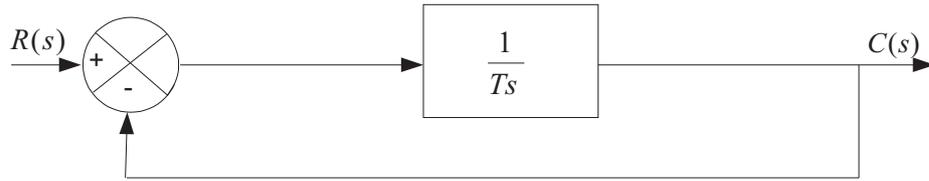


Figura 3.5: Diagrama de bloques de la válvula, sistema de primer orden

El diagrama simplificado es:

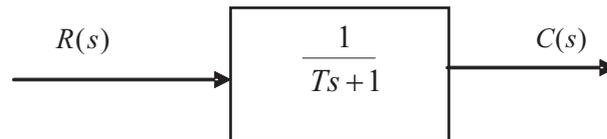


Figura 3.6: Diagrama simplificado

Por lo tanto la relación de entrada-salida está dada por:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1}{Ts + 1} \quad (3.3)$$

Se aplica una señal de entrada una función escalón unitario; es decir $R(s)=1/s$ a la Ecuación 3.3 y se evalúa la transformada de Laplace, tenemos:

$$C(s) = \frac{1}{Ts + 1} \times \frac{1}{s} \quad (3.4)$$

tomando la transformada inversa de Laplace a la Ecuación 3.4, tenemos:

$$c(t) = 1 - e^{-\frac{t}{T}} \quad (t \geq 0) \quad (3.5)$$

La Ecuación 3.5 establece que inicialmente, la salida $c(t)$ es cero y finalmente se convierte en la unidad. Una característica de una curva exponencial de respuesta $c(t)$ es que en $t=T$ el valor $c(t)$ es 0.632, es decir la respuesta $c(t)$ ha alcanzado el 63.2% de su cambio total, lo cual se puede ver al evaluar $t = T$ en la Ecuación 3.5, es decir [13]:

$$c(t = T) = 1 - e^{-\frac{T}{T}} = 1 - e^{-1} = 0,632 \quad (3.6)$$

Cuando más pequeña sea la constante de tiempo T más rápida es la respuesta del sistema. Otra característica importante de la curva exponencial es que la pendiente de la recta tangente en $t=0$ es:

$$\frac{dc(t)}{dt} = \frac{1}{T} e^{-\frac{t}{T}} \Big|_{t=0} = \frac{1}{T} \quad (3.7)$$

La salida alcanza el valor final en $t=T$ manteniendo la velocidad constante. La curva de respuesta exponencial $c(t)$ de la Ecuación 3.5 aparece en la Figura 3.7. En un tiempo igual a una constante de tiempo, la curva exponencial de respuesta ha pasado de 0 a 63.2% del valor final. En dos constantes de tiempo, la respuesta alcanza 86.5% de su valor final respectivamente. Así para $t \geq 4T$, la respuesta se encuentra dentro del 2% del valor final.

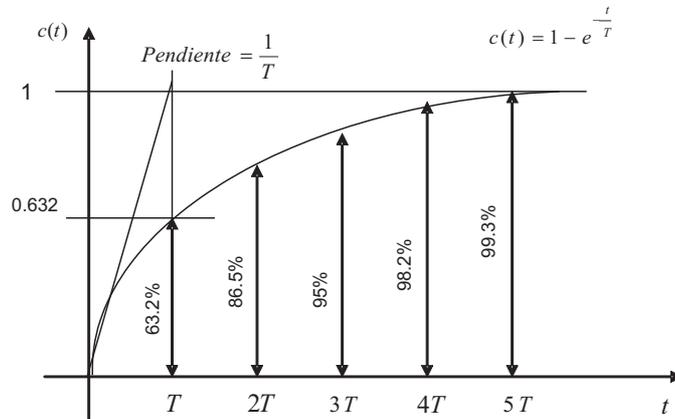


Figura 3.7: Curva de la respuesta exponencial

3.4.3. Función de transferencia de la planta

La planta está constituida por el sistema de tanque y válvulas para determinar su función de transferencia, como se muestra en la Figura 3.8

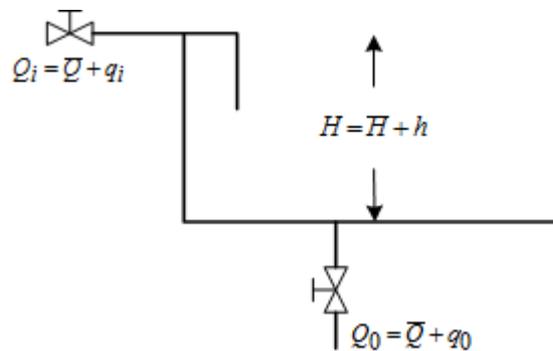


Figura 3.8: Planta: Tanque y válvula de control

En estado estacionario, el gasto de entrada es $Q_i = \bar{Q}$, el gasto de salida es $Q_o = \bar{Q}$, esto es debido a la ley de continuidad, la cual dice que masa entra es igual a la masa que sale; y la presión hidrostática es $H = \bar{H}$. Como el flujo es turbulento tenemos:

$$\bar{Q} = K\sqrt{\bar{H}} \quad (3.8)$$

Suponemos que en $t=0$, el gasto de entrada varía de $Q_i = \bar{Q}$ a $Q_i = \bar{Q} + q_i$. Este cambio produce una modificación de la presión hidrostática de $H=\bar{H}$ a $H=\bar{H}+h$, lo que a su vez produce que el caudal cambie de $Q_o = \bar{Q}$ a $Q_o = \bar{Q} + q_o$. Entonces el modelo del sistema de nivel de líquido, mostrado en la Figura 3.8; suponiendo que existe un flujo turbulento es:

$$(Q_i - Q_o) dt = CdH \quad (3.9)$$

Sustituyendo la Ecuación 3.8 en la Ecuación 3.9 y relacionando, tenemos:

$$\frac{dH}{dt} + \frac{K}{C}\sqrt{H} = \frac{Q_i}{C} \quad (3.10)$$

o bien;

$$\frac{dH}{dt} = f(H, Q_i) = \frac{Q_i}{C} - \frac{K\sqrt{H}}{C} \quad (3.11)$$

La condición de operación del sistema de nivel de líquido en estado estacionario; es decir donde la salida es igual que la entrada, es (\bar{H}, \bar{Q}) y $H = \bar{H} + h$, $Q_i = \bar{Q} + q_i$.

En estado estacionario, $\frac{dH}{dt} = 0$, entonces se tiene que $f(\bar{H}, \bar{Q}) = 0$. Como se puede ver la ecuación diferencial 3.11 no es lineal, por lo que se tiene que linealizar, entonces:

$$\frac{dH}{dt} - f(\bar{H}, \bar{Q}_i) = \frac{\partial f}{\partial H} (H - \bar{H}) + \frac{\partial f}{\partial Q_i} (Q_i - \bar{Q}_i) \quad (3.12)$$

Resolviendo:

$$\left. \frac{\partial f}{\partial H} \right|_{H=\bar{H}, Q_i=\bar{Q}} = -\frac{K}{2C\sqrt{\bar{H}}} = -\frac{\bar{Q}}{\sqrt{\bar{H}} 2C\sqrt{\bar{H}}} = -\frac{\bar{Q}}{2C\bar{H}} = -\frac{1}{RC} \quad (3.13)$$

en la que se utilizó la resistencia R , definida como la variación de diferencia de nivel necesaria para producir una variación unitaria en el gasto; es decir:

$$R = \frac{2\bar{H}}{\bar{Q}}, \quad (3.14)$$

igualmente, como:

$$\left. \frac{\partial f}{\partial Q_i} \right|_{H=\bar{H}, Q_i=\bar{Q}} = \frac{1}{C} \quad (3.15)$$

entonces:

$$\frac{dH}{dt} = \frac{1}{RC} (H - \bar{H}) + \frac{1}{C} (Q_i - \bar{Q}_i) \quad (3.16)$$

ya que

$$H - \bar{H} = h \text{ y } Q_i - \bar{Q}_i = q_i$$

se tiene que:

$$RC \frac{dh}{dt} + h = Rq_i \quad (3.17)$$

Tomado la transformada de Laplace en ambos lados de la Ecuación 3.17, tenemos:

$$(RCs + 1) H(s) = RQ_i(s) \quad (3.18)$$

Si se considera a q_i como entrada y h como salida del sistema mostrado en la Figura 3.8, la función de transferencia es:

$$\frac{H(s)}{Q_i(s)} = \frac{R}{RCs + 1} \quad (3.19)$$

Sin embargo si se toma a q_o como salida del sistema de nivel de líquido con la misma entrada, la función de transferencia es:

$$\frac{Q_o(s)}{Q_i(s)} = \frac{R}{RCs + 1} \quad (3.20)$$

3.4.4. Función de transferencia del sistema

Como las características dinámicas y estáticas del sensor no afectan el valor efectivo de la variable de salida, su efecto se considera insignificante en comparación con las constantes de tiempo del sistema, así la función de transferencia del sensor se considera como una ganancia unitaria. Una vez que se han analizado las funciones de transferencia de los elementos que conforman al sistema, podemos representarlo en un diagrama de bloques, tal como se muestra en la Figura 3.9.

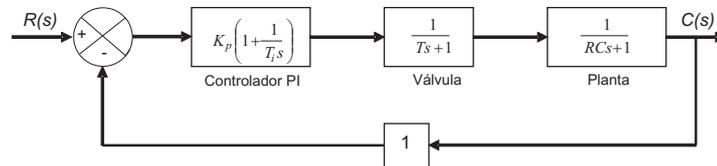


Figura 3.9: Diagrama de bloques del sistema, incluye control PI, válvula de control, tanque y sensor

Aplicando una simplificación en las operaciones de la válvula y de la planta para reducir el número de bloques, obtenemos la función de transferencia del sistema como se muestra en las Figuras 3.10 y 3.11.

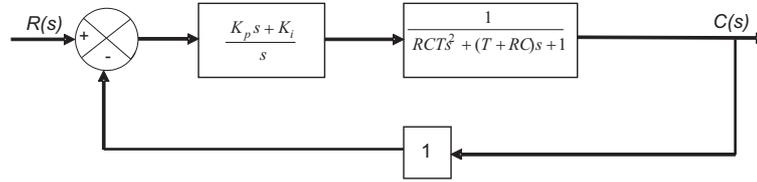


Figura 3.10: Diagrama de bloques utilizando las constantes K_p y K_i , simplificando el efecto de la válvula de control y el tanque

Aplicando el mismo proceso con las operaciones del controlador, tenemos:

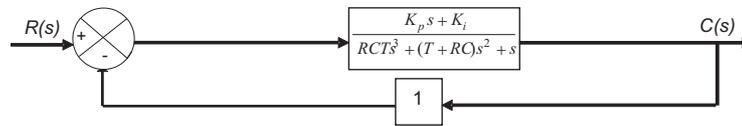


Figura 3.11: Diagrama de bloques simplificado del sistema en lazo cerrado

Como la función de transferencia de un sistema en lazo cerrado se define como [21]:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} \quad (3.21)$$

Utilizando la definición 3.21 a nuestro sistema en estudio, se obtiene:

$$\frac{Q_o(s)}{Q_i(s)} = \frac{K_p s + K_i}{RCTs^3 + (T + RC)s^2 + (1 + K_p)s + K_i} \quad (3.22)$$

La Ecuación 3.22 es la función de transferencia del sistema de circulación de agua en lazo cerrado, la cual nos relaciona el gasto de salida $Q_o(s)$, y el gasto de entrada $Q_i(s)$.

donde:

K_p :constante para el control proporcional.

K_i :constante para el control integral.

R :resistencia.

C :capacidad.

T :es el tiempo en que la válvula de control alcanza el 63.2% del paso del fluido.

3.5. Conclusiones

En este capítulo se obtuvo la función de transferencia del sistema de circulación de agua en lazo cerrado; para lo cual se determinaron las funciones de transferencia de cada uno de los elementos que conforman el sistema tal como el control proporcional integral PI; la válvula de control y la planta; utilizado en el presente estudio. En este caso como la ecuación diferencial que define la planta es no lineal, se procedió a linealizarla con el fin de determinar su función de transferencia. En el siguiente capítulo se diseñará el controlador convencional proporcional integral analógico y digital.

Capítulo 4

Diseño del controlador convencional proporcional integral (PI) del sistema de circulación de agua

4.1. Introducción

Una ventaja del sistema de control de lazo cerrado es que el uso de la retroalimentación hace que la respuesta del sistema sea relativamente insensible a perturbaciones externas y variaciones internas de parámetros del sistema, la Figura 4.1, muestra un diagrama a bloques de un esquema de control en lazo cerrado, que tiene un controlador automático, un actuador, una planta y un sensor. El controlador detecta la señal de error; usando un comparador entra la señal de referencia y la salida del sensor, el sensor adecúa la señal de salida de la planta para poder ser comparada con la señal de referencia. La señal de error es aplicada al controlador, que genera la acción de control en función del error, la acción de control es entregada a un actuador, el cual se encarga de amplificar la acción de control y entregar la potencia necesaria a la planta para corregir el error.

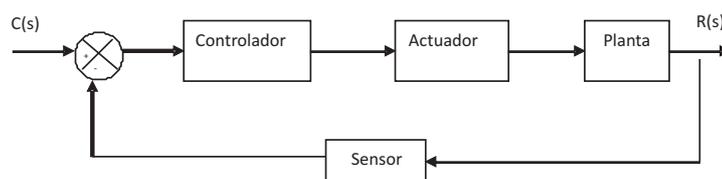


Figura 4.1: Diagrama básico de un control automático

El tipo de controlador que se usa en este trabajo es un controlador PI, el cual se encuentra definido por [21]:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad (4.1)$$

Donde $u(t)$ es la acción, $e(t)$ el error existente entre la referencia y la salida de la planta, K_p la proporcional y T_i es la ganancia de tiempo integral.

4.2. Obtención de los parámetros para el controlador PI

4.2.1. Capacidad del tanque del sistema de recirculación de agua

La capacidad C del tanque utilizado se determinó midiendo directamente el área de la sección transversal del tanque; el cual tiene la forma mostrada en la Figura 4.2.

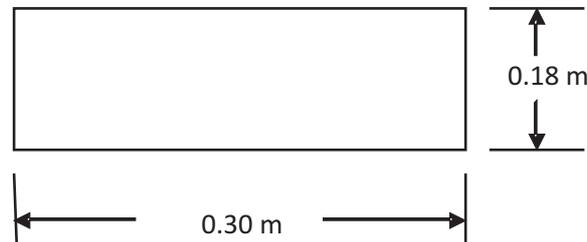


Figura 4.2: Diagrama del tanque del sistema de circulación de agua

De esta forma $C = (0,30)(0,18) = 0,054m^2$.

4.2.2. Constante de tiempo de respuesta de la válvula de control del sistema en estudio

La constante de tiempo T de respuesta de la válvula al 63.2% se obtuvo de manera experimental, con los datos mostrados en la Tabla 4.1. Lo anterior consistió en poner en marcha el sistema de circulación de agua, en seguida en cada periodo de tiempo en segundos $t(seg)$ se registró el valor del flujo de agua $F(lt/min)$; se utilizó esta unidad ya que el sistema en estudio tiene como medidor de flujo un rotámetro el cual tiene la unidad de medida en $F(lt/min)$, esto se observa en la segunda columna de la Tabla 4.1; en la tercer columna se realizó la conversión de unidades de flujo de $F(lt/min)$ a $F(lt/seg)$, para disponer de unidades homogéneas.

Con los datos experimentales, se determinó el porcentaje de flujo acumulado con respecto al tiempo, de modo que permita obtener al 63.2% de flujo que pasa por la válvula; tal como se muestra en la Tabla 4.2.

$t(seg)$	$F(lt/min)$	$F(lt/seg)$
1.38	0.33	0.006
2.56	1.01	0.017
3.56	1.48	0.025
4.96	1.66	0.028
5.63	1.92	0.032
6.83	1.82	0.030
8.16	2.04	0.034
10.23	2.05	0.034
12.37	2.09	0.035
14.44	2.17	0.036
15.5	2.17	0.036

Tabla 4.1: Tiempo Vs Flujo

En la Tabla 4.2, la primera columna muestra el tiempo (seg), la segunda el Flujo (lt/seg); la tercera el Flujo acumulado (lt/seg) y finalmente la cuarta columna el flujo acumulado en porcentaje.

$t(seg)$	$F(lt/seg)$	$F(lt/seg)acumulado$	$\%F(lt/seg)acumulado$
1.38	0.006	0.006	1.643
2.56	0.017	0.022	6.673
3.56	0.025	0.050	14.044
4.96	0.028	0.100	30.030
5.63	0.032	0.130	39.592
6.83	0.030	0.160	48.655
8.16	0.034	0.230	68.576
10.23	0.034	0.260	78.785
12.37	0.035	0.300	89.193
14.44	0.036	0.330	100.000

Tabla 4.2: Tiempo Vs Flujo acumulado en porcentaje

Aplicando una interpolación [12] para un porcentaje del 63.2%, tenemos un $T = 7.331$ seg.; el cual nos indica que al tiempo de 7.331 seg. la válvula de control deja pasar el 63.2% del flujo de agua en el sistema en estudio; tal como se muestra en la Figura 4.3.

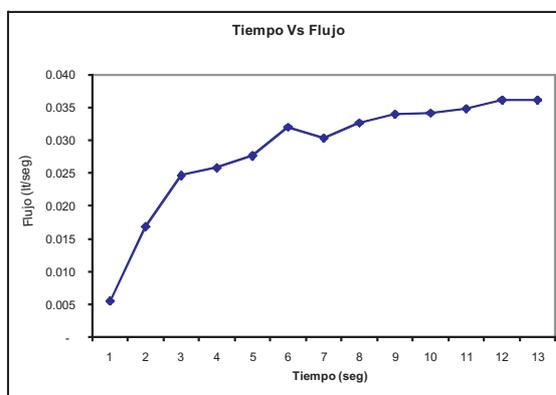


Figura 4.3: Gráfica Tiempo Vs Flujo acumulado

4.2.3. Resistencia al paso de flujo por la válvula de salida del sistema

La resistencia R se calculó midiendo el flujo que pasa por la válvula de salida variando la altura de nivel de líquido; de este modo se determinó el cambio de flujo $F(lt/min)$, con respecto a la altura

del tanque $h(\text{mm})$, y la pendiente de la línea recta. Al ser graficados estos parámetros obtenemos el valor de la resistencia R , los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4.3.

$h(\text{mm})$	$F(\text{lt}/\text{min})$	$F(\text{m}^3/\text{seg})$	$h(\text{m})$
71.86	0.78	0.000013	0.07186
94.64	0.81	0.0000135	0.09464
134.50	0.85	$1,41667^{-5}$	0.13450
173.50	0.89	$1,48333^{-5}$	0.17350
255.00	0.98	$1,63333^{-5}$	0.25500
282.80	0.95	$1,58333^{-5}$	0.28280

Tabla 4.3: Relación de flujo y altura de la columna de agua en el tanque

Una vez obtenidos los datos, se procedió a graficar el flujo en m^3/s y la altura del nivel de agua del tanque del sistema en estudio en m , tal como se muestra en la Figura 4.4.

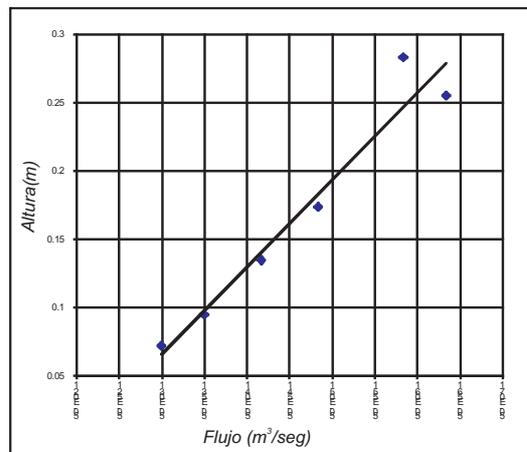


Figura 4.4: Gráfica Flujo Vs Altura de nivel de agua en el tanque

Aplicando regresión lineal simple podemos obtener la tasa de variación R , dando un valor de $R = 63565,25\text{s}/\text{m}^2$.

4.3. Diseño del controlador PI analógico

En el desarrollo del presente trabajo es importante determinar las ecuaciones que describen el control PI analógico, ya que a partir de éste diseñaremos el control PI digital. Por ello, una vez que hemos determinado la función de transferencia del sistema y los parámetros que lo definen, se sustituye el valor de la capacidad C , el tiempo de establecimiento T y la resistencia R en la Ecuación 3.22:

$$\frac{Q_o(s)}{Q_i(s)} = \frac{K_p s + K_i}{RCTs^3 + (T + RC)s^2 + (1 + K_p)s + K_i}$$

de esta manera tenemos que:

$$\frac{Q_o(s)}{Q_i(s)} = \frac{K_p s + K_i}{25163,83s^3 + 3439,85s^2 + (1 + K_p)s + K_i} \quad (4.2)$$

Como propuesta de diseño se eligió un coeficiente de amortiguamiento $\zeta = 0.6$; ya que para valores pequeños de ζ ($\zeta < 0.4$) producen sobreimpulso excesivo en la respuesta transitoria y un sistema con un valor grande ζ ($\zeta > 0.8$) el tiempo de respuesta es muy lento [13]. En nuestro caso ζ se encuentra en el intervalo $0 < \zeta < 1$, por lo que tendremos un sistema subamortiguado y los polos en lazo cerrado, serán complejos conjugados y quedarán en el semiplano izquierdo del plano s . La frecuencia natural no amortiguada $\omega_n = 0.10$ rad/s; es la frecuencia a la cual el sistema oscilará si el amortiguamiento descendiera a cero.

Un sistema de segundo orden subamortiguado tiene como ecuación característica, [13]:

$$s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 \quad (4.3)$$

entonces, sustituyendo los valores de $\zeta = 0.6$ y de $\omega_n = 0.10$ rad/s en la Ecuación 4.3 y calculando las raíces de la ecuación, tenemos:

$$s^2 + 0,12s + 0,01 = (s + 0,06 + j0,08)(s + 0,06 - j0,08) \quad (4.4)$$

Tomando el denominador de la Ecuación 4.2, y dividiendo entre el coeficiente del primer término, tenemos:

$$s^3 + 0,132s^2 + \frac{1 + K_p}{25163,83}s + \frac{K_i}{25163,83} \quad (4.5)$$

El tercer polo se elige tal que se obtenga el coeficiente de s^2 en la Ecuación 4.5

$$(s + 0,0123)(s + 0,06 + j0,08)(s + 0,06 - j0,08) = s^3 + 0,132s^2 + 0,011476s + 0,000123 \quad (4.6)$$

Para que dos polinomios sean iguales sus coeficientes deben ser iguales, por lo que de las ecuaciones 4.5 y 4.6, se igualan los coeficientes de modo que:

$$\frac{1 + K_p}{25163,83} = 0,011476 \quad (4.7)$$

$$\frac{K_i}{25163,83} = 0,000123 \quad (4.8)$$

De las ecuaciones 4.7 y 4.8 se obtiene que $K_p = 287,78$ y $K_i = 3,095$

Por lo tanto, la ecuación del controlador analógico PI se define de la siguiente manera:

$$u(t) = 287,78e(t) + 3,095 \int_0^t e(t)dt \quad (4.9)$$

La función de transferencia del sistema en lazo cerrado, sustituyendo las constantes K_p y K_i es:

$$\frac{Q_o(s)}{Q_i(s)} = \frac{287,78s + 3,095}{25163,83s^3 + 3439,85s^2 + 288,78s + 3,095} \quad (4.10)$$

La simulación del sistema se realizó en MATLAB, utilizando una entrada escalón unitario, como se muestra en la Figura 4.5, en esta grafica se observa cómo el controlador lleva a la referencia ($1m^3/seg$), la variable que se desea controlar en este caso, el flujo.

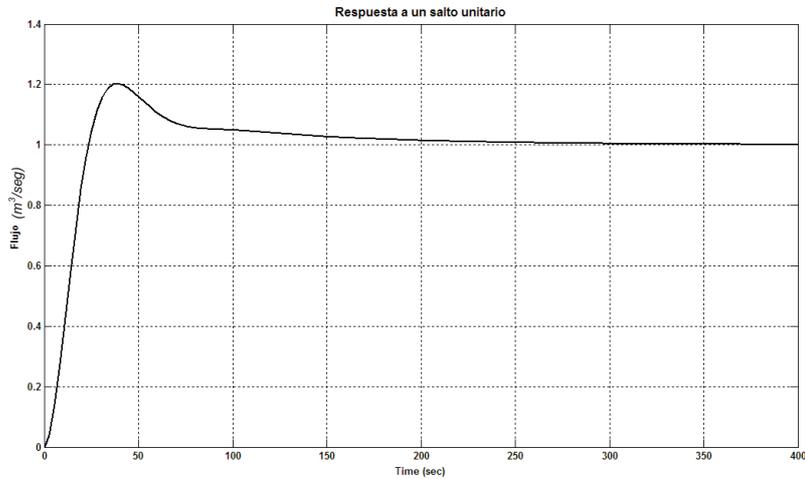


Figura 4.5: Respuesta al escalón unitario del sistema de circulación de agua en lazo cerrado con control analógico

4.4. Diseño del controlador PI digital

Para determinar el comportamiento del sistema de circulación de agua mediante control digital, utilizaremos las ecuaciones del control PI analógico; discretizando la Ecuación 4.1 obtenemos:

$$u(kT) = k_p e(kT) + \frac{k_p}{T_i} T \left[\frac{e(0) + e(T)}{2} + \frac{e(T) + e(2T)}{2} + \dots + \frac{e((k-1)T) + e(kT)}{2} \right] \quad (4.11)$$

Donde T es el tiempo de muestreo y $e(kT)$ el error del flujo en el instante k . La Figura 4.6 muestra un diagrama de bloques de un esquema de control lazo cerrado, que tiene un controlador digital PI, el retenedor de orden cero y la planta.

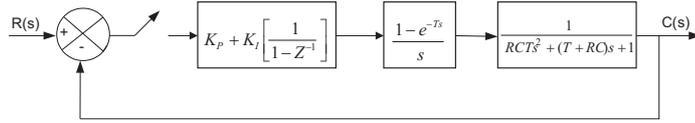


Figura 4.6: Diagrama de bloques en lazo cerrado con un control digital PI y el retenedor de orden cero

La transformada z de la Ecuación 4.11, da la función de transferencia del controlador digital PI en z [14]:

$$\frac{U(z)}{E(z)} = K_P + K_I \left[\frac{1}{1 - z^{-1}} \right] \quad (4.12)$$

donde

$$K_P = k_p - \frac{k_p T}{2T_i} \quad (4.13)$$

y

$$K_I = \frac{k_p T}{T_i} \quad (4.14)$$

Si consideramos que el tiempo de muestreo es de $T = 1$ seg; $k_p = 287,78$ y $T_i = 92,966$, tenemos que $K_P = 286,22$ y $K_I = 3,095$. Sustituyendo en 4.12 se obtiene:

$$\frac{U(z)}{E(z)} = 286,23 + 3,095 \left[\frac{1}{1 - z^{-1}} \right] \quad (4.15)$$

y simplificando, se produce:

$$G_D(s) = \frac{U(z)}{E(z)} = \frac{289,325 - 286,23z^{-1}}{1 - z^{-1}} \quad (4.16)$$

Por otro lado para discretizar la función de transferencia de la planta, incluyendo el retenedor de orden cero, se tiene:

$$G_p(s) = \frac{1 - e^{-Ts}}{s} \cdot \frac{1}{25163,83s^2 + 3439,86s + 1} \quad (4.17)$$

Aplicando la transformada z a ambos lados de la ecuación:

$$z \left[G_p(s) = \frac{1 - e^{-Ts}}{s} \cdot \frac{1}{25163,83s^2 + 3439,86s + 1} \right], \quad (4.18)$$

obtenemos:

$$G_p(z) = \frac{2,0021 - 1,7469z^{-1}}{1 - 0,87z^{-1}} \quad (4.19)$$

Entonces la función de transferencia del control PI, del retenedor de orden cero y la planta se calcula de las ecuaciones 4.16 y 4.19.

$$G(z) = \frac{579,2575 - 1078,473z^{-1} + 500,102z^{-2}}{1 - 1,87z^{-1} + 0,898z^{-2}}, \quad (4.20)$$

y la función de transferencia en lazo cerrado se convierte en:

$$\frac{Q_o(z)}{Q_i(z)} = \frac{G(z)}{1 + G(z)} = \frac{579,2575 - 1078,473z^{-1} + 500,102z^{-2}}{580,2575 - 1080,347z^{-1} + 500,988z^{-2}} \quad (4.21)$$

o bien:

$$\frac{Q_o(z)}{Q_i(z)} = \frac{G(z)}{1 + G(z)} = \frac{579,2575z^2 - 1078,473z^1 + 500,102}{580,2575z^2 - 1080,347z + 500,988} \quad (4.22)$$

La estabilidad de los sistemas de control en tiempo discreto, pueden determinarse por la localización de los polos de lazo cerrado en el plano z o por las raíces de la ecuación característica. Un sistema de control en lazo cerrado en tiempo discreto lineal e invariante en el tiempo de una entrada una salida se vuelve inestable si cualquiera de los polos de lazo cerrado se presenta por fuera del círculo unitario y/o cualquier polo múltiple de lazo cerrado se presenta sobre el círculo unitario z . Las raíces de la función de transferencia de la Ecuación 4.22 son las siguientes:

$$r_1 = 0,98769664969786 \quad r_2 = 0,87414399863499$$

Por lo tanto, el sistema es estable para una $K_P = 286,23$ y $K_I = 3,095$ y un tiempo de muestreo de 1 seg. La simulación del sistema se realizó en MATLAB, utilizando una entrada escalón unitario, como se muestra en la Figura 4.7 [15].

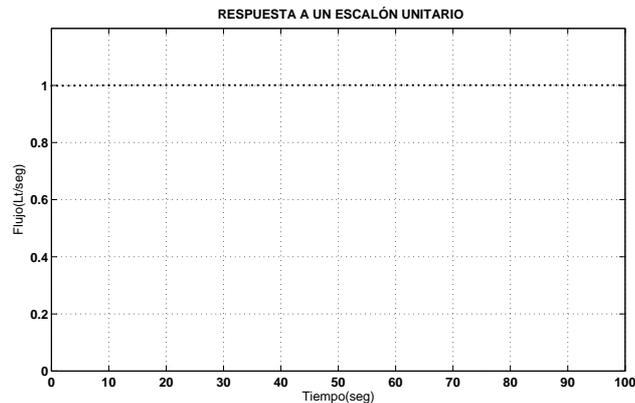


Figura 4.7: Respuesta al escalón unitario del sistema de circulación de agua en lazo cerrado con control digital

También se observa en la gráfica que al aplicarle como entrada una función escalón unitario ($Q_i(z)$) a la Ecuación 4.22, función de transferencia del sistema en modo digital; éste alcanza la referencia, muestra como el tiempo de crecimiento es rápido; es decir el tiempo en el cual se alcanza la referencia.

4.5. Conclusiones

En este capítulo se diseñaron los controladores (analógico y digital) del sistema de circulación de agua, en este caso se obtiene que el control PI digital es más rápido que el control PI analógico, como se observa en las Figuras 4.5 y 4.7. Para sintonizar el control PI digital es necesario primeramente sintonizar el control analógico, ya que una vez que se obtuvo el valor de las constantes que lo conforman, se sintonizó el caso digital. Se muestra también como en el control analógico existe un sobreimpulso de aproximadamente el 20% y en el control digital prácticamente no existe. En el siguiente capítulo se desarrollará el control PI difuso del sistema de circulación de agua, para poder comparar el comportamiento de los controladores mediante una simulación en MatLab.

Capítulo 5

Diseño del controlador proporcional integral (PI) del sistema de circulación de agua con lógica difusa

5.1. Introducción

La teoría de control clásico, control moderno, control no lineal, control adaptable, son áreas donde los sistemas se conocen con precisión, esto es, se debe conocer el modelo matemático del sistema a controlar. Sin embargo en la mayoría de los casos es difícil conocer el modelo del sistema con exactitud y debe someterse a linealizaciones y suposiciones para determinar el modelo matemático de manera aproximada, ya que no va con la realidad. Por lo tanto si el modelo es aproximado es difícil ejercer una acción de control óptima para el sistema.

La lógica difusa es una de las tecnologías más exitosas para el desarrollo sofisticado de los sistemas de control. Usando la lógica difusa se evita la necesidad de modelos matemáticos rigurosos. Sin embargo al usar la lógica difusa para ejercer control sobre un sistema se deberá ser un experto en el proceso para poder describir el comportamiento del proceso de forma lingüística. Por ello el corazón de los sistemas difusos es el conocimiento base que se tenga del proceso a controlar; es decir el conocimiento de operarios expertos.

Los sistemas difusos son aplicados en áreas como: sistemas de control, procesamiento de señales, comunicaciones, manufactura de circuitos integrados y en sistemas expertos, medicina entre otras; sin embargo la aplicación más significativa es en el área de problemas de control

5.2. Fundamentos de lógica difusa

5.2.1. Conjuntos difusos

Sea U el universo de discurso, o el conjunto universal, el cual contiene a todos los posibles elementos que conciernen a una aplicación y sea A un conjunto representado como:

$$A = \{x \in U : x \text{ sujeta a una condición}\}$$

El conjunto A es matemáticamente equivalente a la función de membresía denotada por $\mu_A(x)$, como :

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x \in A \\ 0 & \text{si } x \notin A \end{cases}$$

En los conjuntos clásicos un elemento está completamente incluido en él o no lo está en absoluto. Esta situación puede describirse asignando 1 a todos los elementos incluidos en el conjunto y un 0 a los no incluidos. A la función que asigna estos valores se denomina función de membresía, inclusión o de pertenencia [10].

Un conjunto difuso en un universo de discurso U está caracterizado porque la función de membresía $\mu_A(x)$, toma valores en el intervalo $[0,1]$, [25].

5.2.2. Operaciones con conjuntos difusos

Sean A y B dos conjuntos, entonces se definen las siguientes operaciones [25]:

1. Igualdad. Dos conjuntos son iguales si y sólo si $\mu_A(x) = \mu_B(x)$ para todo $x \in U$.
2. Contenido. A está contenido en B , denotado por $A \subset B$ si y sólo si $\mu_A(x) \leq \mu_B(x)$ para todo $x \in U$.
3. Complemento. Si $A \in U$ entonces su complemento denotado por \overline{A} tiene una función de membresía definida como:

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

4. La unión de A y B es un conjunto difuso en U denotado por $A \cup B$, su función de membresía se define como:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)]$$

5. La intersección de A y B es un conjunto difuso en U denotado por $A \cap B$, su función de membresía se define como:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)]$$

5.2.3. Funciones de membresía de conjuntos difusos

La función de membresía o pertenencia de un conjunto difuso consiste en un conjunto de pares ordenados $F = \{(u, \mu_f(u) \mid u \in U)\}$ si la variable es discreta, o una función continua si no lo es. Para la definición de estas funciones se aplican convencionalmente ciertas familias de formas estándar; las más frecuentes son la función de tipo singleton, triangular, trapezoidal, tipo S, exponencial y tipo π ; en este trabajo solo se utilizarán las dos primeras por su facilidad de cálculo y ya que no se obtiene una gran diferencia al usar los otros tipos de funciones [23].

La función de tipo singleton tiene valor 1 solo para un punto a y 0 para el resto; y se define como:

$$Sing(u; a) = \begin{cases} 1 & \text{si } u = a \\ 0, & u \neq a \end{cases}$$

Dicha función se muestra en la Figura 5.1.

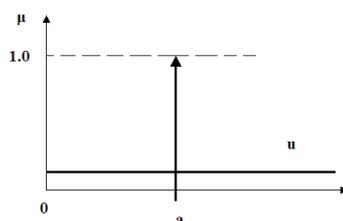


Figura 5.1: Función de pertenencia de tipo singleton

La función de tipo T (triangular), se muestra en la Figura 5.2, y se define como:

$$T(u; a, b, c) = \begin{cases} 0, & \text{si } u < a \text{ o } u > c \\ \frac{u-a}{b-a}, & \text{si } a \leq u \leq b \\ \frac{c-u}{c-b}, & \text{si } b \leq u \leq c \end{cases}$$

Esta función se muestra en la Figura 5.2.

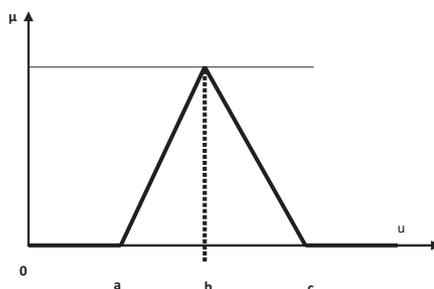


Figura 5.2: Función de pertenencia de tipo triangular

La función de tipo T es adecuada para modelar propiedades con valor de inclusión distintos de cero y para un rango de valores estrecho en torno a un punto b .

5.2.4. Variable lingüística

Una variable lingüística se define por una quintupla $(A, T(A), U, G, M)$, donde A es el nombre de la variable, $T(A)$ es el conjunto de términos x que puede tomar A . El conjunto de valores numéricos que puede tomar una variable discreta, o el rango de valores posibles para una continua, es lo que se conoce como el universo de discurso de la variable x , y se nombra como U ; por último, G es una regla sintáctica para la generación de los nombres de los valores de x , y M es una regla semántica para asociar un significado a cada valor.

5.2.5. Reglas difusas

Las reglas difusas combinan uno ó más conjuntos difusos de entrada, llamados antecedentes o premisas, y se les asocian un conjunto difuso de salida, llamado consecuente o consecuencia. Las reglas difusas permiten expresar el conocimiento que se dispone sobre la relación entre antecedentes y consecuentes.

La base de reglas se puede representar como una tabla de las reglas que la forman, o bien como una memoria asociativa difusa o FAM (Fuzzy Associative Memory).

5.2.6. Dispositivos de inferencia difusa

Se llaman dispositivos de inferencia difusa a los sistemas que interpretan las reglas de tipo IF-THEN de una base de reglas, con el fin de obtener los valores de salida a partir de los actuales valores de las variables lingüísticas de entrada al sistema. La parte de entrada se conoce como difusificador y la parte de salida como defusificador [23].

El difusificador establece una relación entre puntos de entrada no difusos al sistema $x = (x_1, \dots, x_n)^T$, y sus correspondientes conjuntos difusos A en U (las variables procedentes del exterior serán, en general, valores no difusos, y habrá que difusificarlas previamente). Se pueden utilizar diversas estrategias de difusificación:

1. Difusificador singleton. Es el método de difusificación más utilizado, principalmente en los sistemas de control, y consiste en considerar los propios valores discretos como conjuntos difusos. De otra forma, por cada valor de entrada x se define un conjunto A' que lo soporta, con función de pertenencia $\mu_{A'}(x')$, de modo que $\mu_{A'}(x) = 1$, ($x' = x$) y $\mu_{A'}(x') = 0$, para todos los otros $x' \in U$ en los que $x' \neq x$
2. Difusificador no singleton. En este método de difusificación se utiliza la siguiente función exponencial:

$$\mu_{A'}(x') = a \cdot \exp \left[- \left(\frac{x' - x}{\sigma} \right)^2 \right]$$

El defusificador es la función que transforma un conjunto difuso en una acción de control la cual es un valor $y \in V$, donde V es el conjunto de todas las posibles salidas que puede asumir el controlador. Para esta tarea se utilizan diversos métodos:

1. Defusificador por máximo, definido como:

$$y = \arg \sup_{y \in V} (\mu_{B'}(y))$$

2. Defusificador por media de centros, definido como:

$$y = \frac{\sum_{l=1}^M y^{-1}(\mu_{B'}(y^{-1}))}{\sum_{l=1}^M (\mu_{B'}(y^{-1}))}$$

3. Defusificador por centro de área, definido como:

$$y = \frac{\sum_{l=1}^M M^l(\mu_{B'}(y^{-1}))}{\sum_{l=1}^M A^l(\mu_{B'}(y^{-1}))}$$

5.3. Composición de Mamdani

Existen diferentes arquitecturas de controladores difusos, por ejemplo el modelo difuso de Mamdani, el modelo difuso de Sugeno, el modelo difuso de Tsukamoto, etc. [20] El modelo difuso utilizado en este trabajo para controlar el flujo que pasa por la válvula proporcional será el modelo difuso de Mamdani ya que solo requiere la experiencia del sistema y no hace uso de la función de transferencia; lo que facilita su implementación.

La arquitectura de un controlador difuso por el modelo de Mamdani está formada por las siguientes etapas:

1. Normalización. Esta etapa hace una transformación de escala de la entrada nítida con el objetivo de tener un universo de discurso normalizado. Esta etapa es opcional, al existir esta etapa en la entrada; deberá existir una etapa de desnormalización en la salida.
2. Difusificación, consiste en pasar de una variable nítida a una variable difusa o variable lingüística, haciendo uso de funciones de membresía, y dando un grado de membresía a cada variable lingüística. En esta etapa se deberá definir el grado del universo de discurso, número y tipo de funciones de membresía.
3. Inferencia. Es la evaluación de las reglas que inferen las acciones de control difuso en forma de variables lingüísticas, también conocida como MAD (Memoria Asociativa Difusa), para llevar a cabo la programación de la MAD se deberá tener experiencia en controlar el proceso.

4. Desfusificación. La desfusificación es la etapa de salida del controlador difuso, consiste en pasar una variable lingüística a una variable nítida. Para realizar este proceso existen varios métodos como son el método del centroide, método del centro de sumas, derecha de máximo, etc.
5. Desnormalización. Esta etapa consiste en pasar una variable nítida normalizada a un valor del mundo real, esta etapa existe solo si esta la etapa de normalización en la entrada del controlador difuso [20].

La Figura 5.3 muestra el esquema de las diferentes etapas del controlador difuso usando el algoritmo de Mamdani.

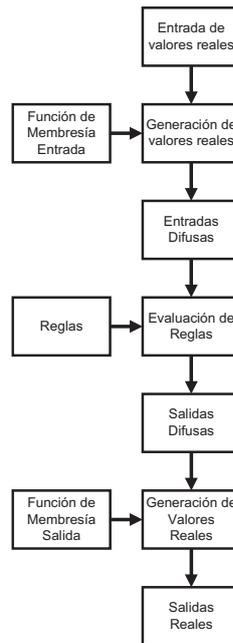


Figura 5.3: Etapas de un controlador difuso usando la técnica de Mamdani

5.4. Diseño del Controlador Difuso

Para diseñar un controlador difuso se debe tomar en cuenta diferentes parámetros y características tal como:

1. Tipo de controlador difuso.
2. Tipos de funciones de membresía a utilizar.
3. Rango del universo de discurso.
4. Determinación del número de funciones de membresía.
5. Determinación de las reglas de inferencia.

5.4.1. Controlador PI difuso

Los controladores PI son usados en las empresas para el control de los procesos industriales; tal como el proceso de secado del cemento, control del desperdicio de agua en su tratamiento y control del metro en Japón; la función de transferencia para este control está dada por la siguiente ecuación:

$$u = K_P \left[e(t) + K_I \int_0^t e(\tau) d\tau \right] \quad (5.1)$$

Cuando la Ecuación 5.1 se deriva en ambos lados tenemos:

$$u' = K_P e'(t) + K_I e(t) \quad (5.2)$$

Discretizando la ecuación anterior, donde $u' \approx \frac{du}{dt}$

$$\Delta u(k) = K_P \Delta e(k) + K_I e(k), \quad (5.3)$$

donde $\Delta u(k)$ es el cambio de la salida del controlador. Así $u(k)$ es la acción de control definida como:

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1) \quad (5.4)$$

y el error $e(k)$ se establece como:

$$e(k) = y_{REF} - y(k) \quad (5.5)$$

con $y(k)$ como la salida del sistema y y_{REF} la salida deseada o referencia. $\Delta e(k)$ es el cambio del error y se define como:

$$\Delta e(k) = e(k) - e(k-1) \quad (5.6)$$

en donde k es el k -ésimo tiempo de muestreo. Normalizando las ecuaciones del error y la derivada del error, tenemos:

$$e(k) = \frac{y_{REF} - y(k)}{y_{REF}} \quad (5.7)$$

$$e(k-1) = \frac{y_{REF} - y(k-1)}{y_{REF}} \quad (5.8)$$

$$\frac{de(k)}{dk} = \frac{e(k) - e(k-1)}{T} \quad (5.9)$$

Definiendo el tipo de controlador se determinan las entradas al controlador siendo sus entradas para un controlador difuso tipo PI, el error $e(k)$ y el cambio del error $\Delta e(k)$. La salida del controlador

es el cambio de la acción de control, por lo tanto para ejercer dicha acción se deberá integrar la salida del controlador $\Delta u(k)$.

5.4.2. Funciones de membresía

Para la elección adecuada de la función de membresía de un controlador difuso, se deben considerar primeramente las características propias de cada función de membresía con respecto a la experiencia que se ha tenido en el uso del diseño de controladores difusos. En el desarrollo de este trabajo se emplearán funciones de membresía triangular; debido a su facilidad de implementación y de cálculo.

5.4.3. Especificación del universo de discurso

Para seleccionar el rango del error, se debe conocer aproximadamente en qué intervalos oscilará el error durante la simulación. En el tiempo $t=0$ el error es del 100 % conforme pasa el transitorio, el error irá disminuyendo hasta que tenga un error del 0 %. Por lo anterior proponemos un rango para el error de -100 % al 100 % y expresado por unidad o entrada normalizada de -1 a 1. El cambio del error (derivada del error) es la pendiente o velocidad de cambio que tiene el error durante el transitorio, el cambio del error puede tomar valores desde menos infinito a más infinito. Suponemos un rango de -0.05 a 0.05, con un tiempo de muestreo de 0.01 segundos.

5.4.4. Número de funciones de membresía

El número de funciones de membresía en un controlador difuso, también representa la experiencia en un controlador y es el modo de distinguir pequeños cambios en la entrada nítida y poder expresarlos en las variables lingüísticas. En este trabajo se utilizarán funciones de membresía triangulares; debido a su facilidad de implementación. Para las variables de entrada se harán pruebas con tres, cinco y siete funciones. Para tres funciones de membresía, tenemos:

1. El universo de discurso del error que se muestra en la Figura 5.4.

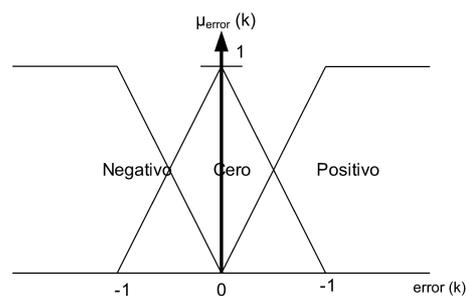


Figura 5.4: Con tres funciones de membresía del error

- El universo de discurso para la derivada del error se muestra en la Figura 5.5, la parte difusa de este universo está acotada entre $-0,005$ y $0,005$ para tener una sintonización adecuada de la acción de control.

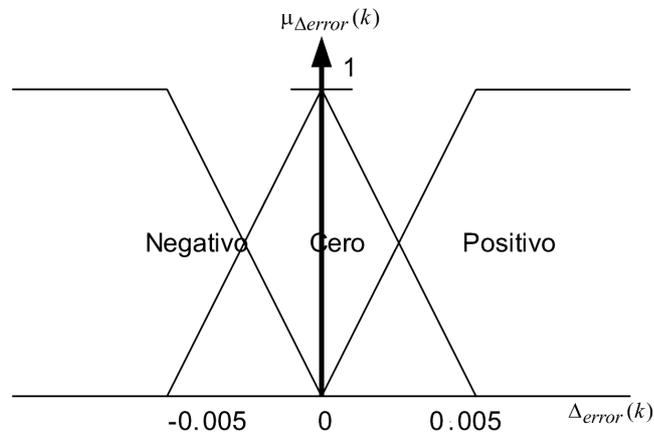


Figura 5.5: Con tres funciones de membresía de derivada del error

- Para el sistema de defusificación se utilizará el método del centroide, su elección se debe a la practicidad para ser implementado ya que dado el polígono de salida, simplemente se calcula el centro de gravedad; la función se muestra en la Figura 5.6.

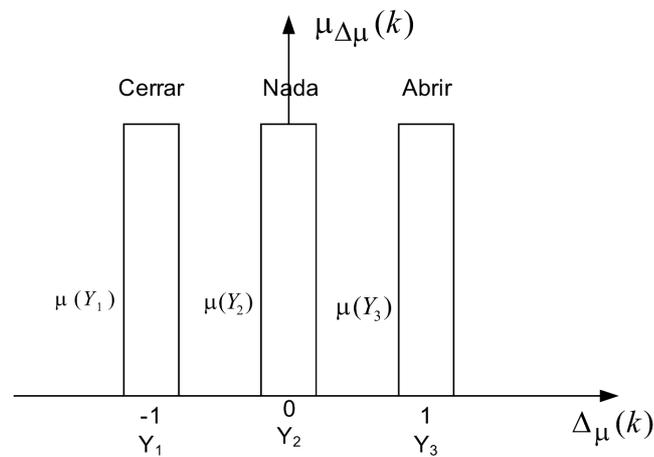


Figura 5.6: Sistema de defusificación para tres funciones de membresía

Para cinco funciones de membresía usadas para el control PI difuso del sistema de circulación de agua, tenemos:

1. El universo de discurso para cinco funciones del error se muestra en la Figura 5.7.

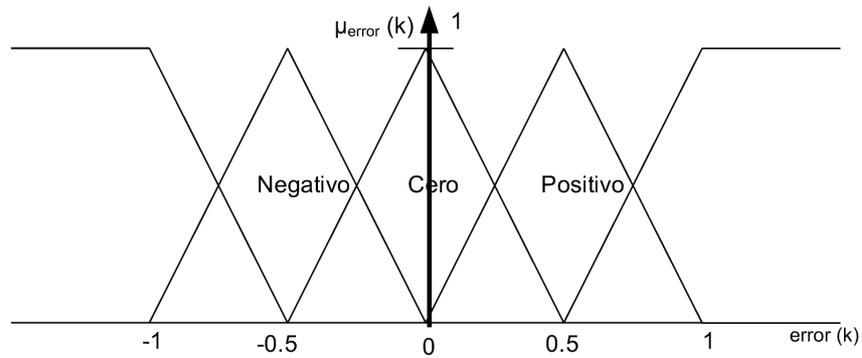


Figura 5.7: Con cinco funciones de membresía del error

2. El universo de discurso de las funciones de derivada del error se muestra en la Figura 5.8.

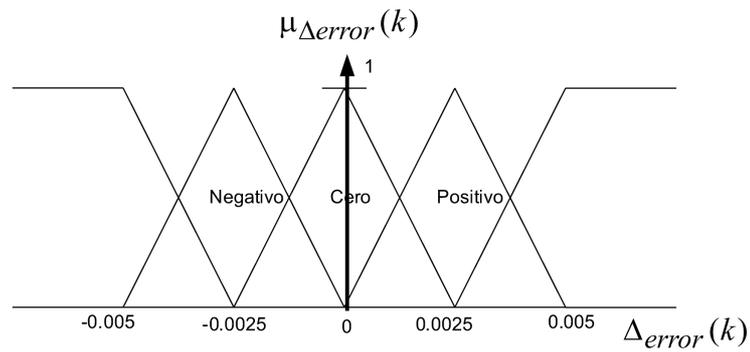


Figura 5.8: Con cinco funciones de membresía de la derivada del error

3. Para el sistema de desfusicación se utilizará la función que se muestra en la Figura 5.9.

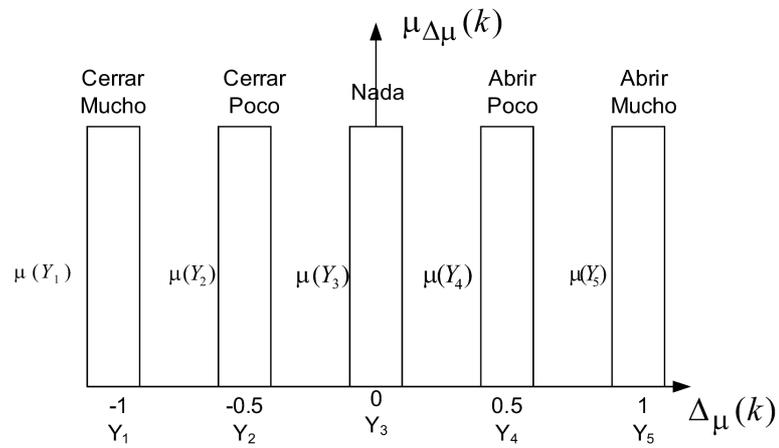


Figura 5.9: Sistema de desfusicación para cinco funciones de membresía

Para siete funciones de membresía usadas para el control PI difuso del sistema de circulación de agua, tenemos:

1. El universo de discurso para siete funciones del error se muestra en la Figura 5.10.

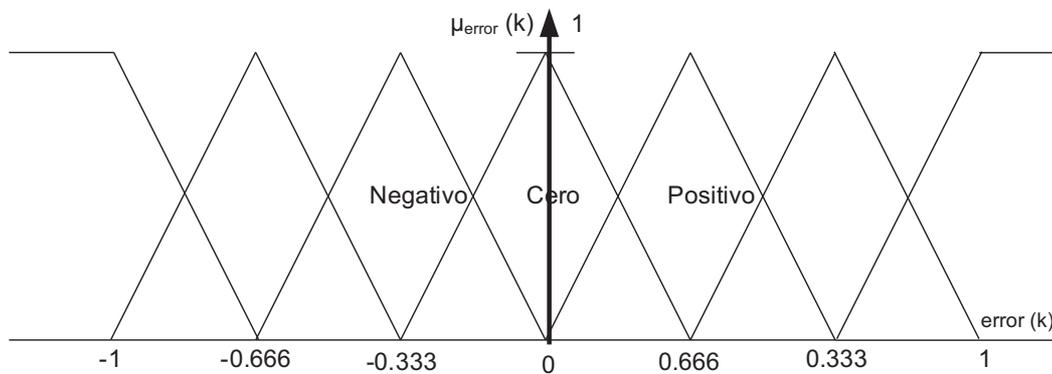


Figura 5.10: Con siete funciones de membresía del error

2. El universo de discurso de las funciones de derivada del error se muestra en la Figura 5.11.

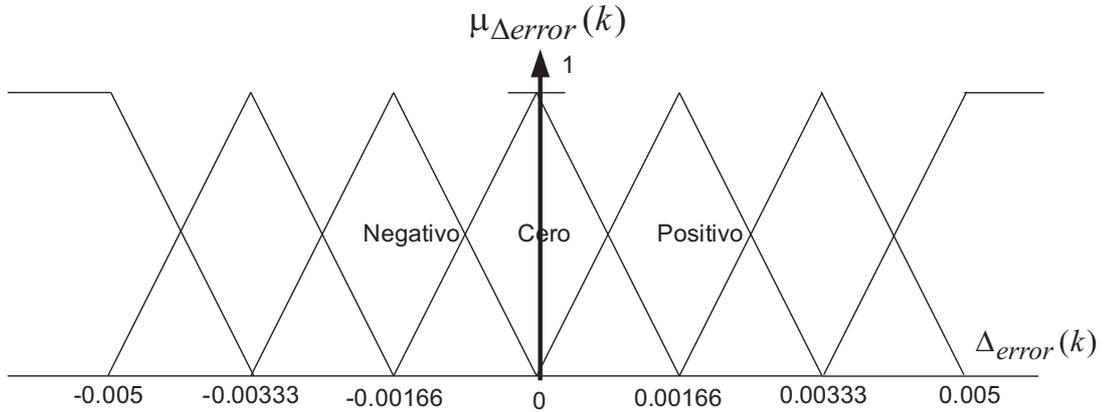


Figura 5.11: Con siete funciones de membresía de derivada del error

3. Para el sistema de defusificación se utilizará la función que se muestra en la Figura 5.12.

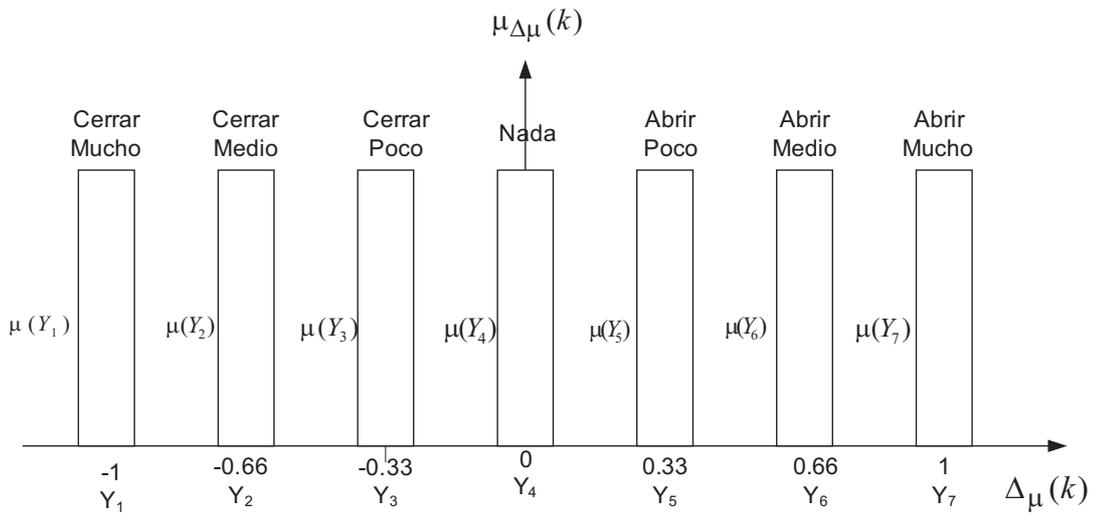


Figura 5.12: Sistema de defusificación para siete funciones de membresía

5.4.5. Reglas de inferencia

Las reglas de inferencia es el lugar del controlador difuso donde queda plasmada la experiencia del operador. La sistematización de la experiencia se hace tomando en cuenta las variables lingüísticas error y derivada del error, a continuación se dan las MAD para tres, cinco y siete funciones

de membresía. Para determinar los eventos que se pueden presentar en el sistema utilizando tres funciones de membresía y las ecuaciones 5.7, 5.8 y 5.9, se muestran en la Figura 5.13.

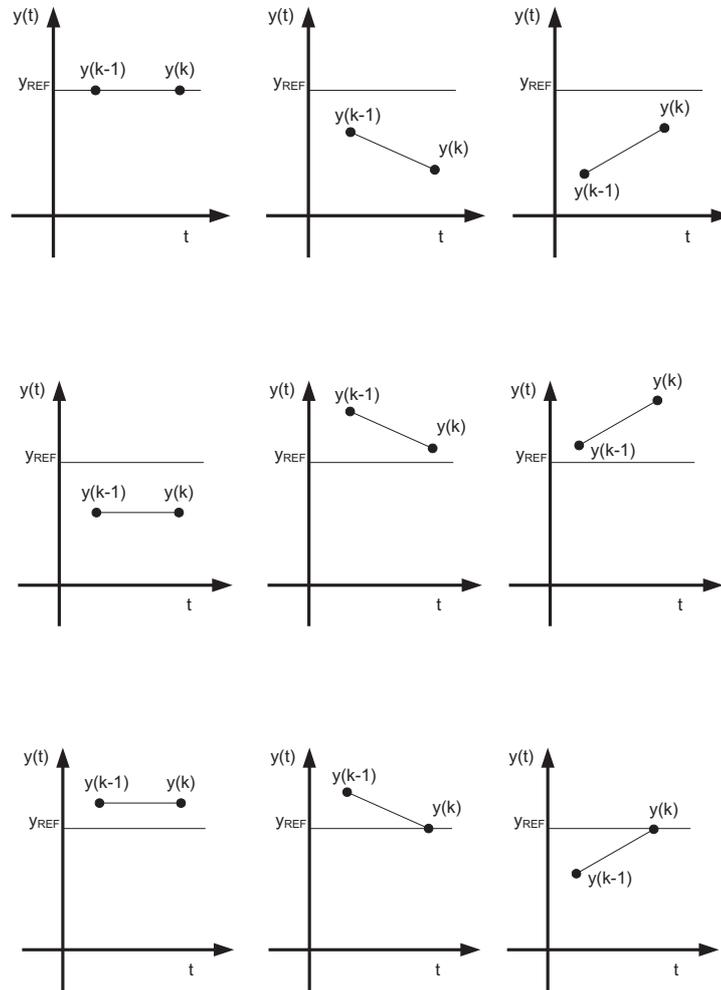


Figura 5.13: Eventos que se pueden presentar en el sistema de inferencia cuando se tienen tres funciones de membresía

Para analizar uno a uno los eventos disponibles, tomando como $y_{REF} = 8 \text{ lt/mín}$; variando $y(k)$ y $y(k-1)$, obtenemos: $e(k)$, $e(k-1)$ y $\frac{de(k)}{dk}$; tenemos:

1. Si $y(k) = 8 \text{ lt/mín}$ y $y(k-1) = 8 \text{ lt/mín}$ obtenemos:

$$e(k) = \frac{8 - 8}{8} = 0$$

$$e(k-1) = \frac{8-8}{8} = 0$$

$$\frac{de(k)}{dk} = 0$$

En esta situación el error es cero y la derivada del error también es cero por lo tanto la acción a tomar es **nada**.

2. Si $y(k) = 3 \text{ lt/ mín}$ y $y(k-1) = 6 \text{ lt/ mín}$ obtenemos:

$$e(k) = \frac{8-3}{8} = 0,625$$

$$e(k-1) = \frac{8-6}{8} = 0,25$$

$$\frac{de(k)}{dk} = 0,625 - 0,25 = 0,375$$

En este caso el error es positivo y la derivada del error también es positiva, por lo tanto la acción a tomar es **abrir**, de modo que la variable alcance la referenica.

3. Si $y(k) = 6 \text{ lt/ mín}$ y $y(k-1) = 3 \text{ lt/ mín}$ obtenemos:

$$e(k) = \frac{8-6}{8} = 0,250$$

$$e(k-1) = \frac{8-3}{8} = 0,625$$

$$\frac{de(k)}{dk} = 0,25 - 0,625 = -0,375$$

Aquí se tiene el error positivo y la derivada del error negativa, por lo tanto la acción a tomar es **nada**, ya que con el impulso que lleva la variable si se llega a la referencia establecida.

4. Si $y(k) = 6 \text{ lt/ mín}$ y $y(k-1) = 6 \text{ lt/ mín}$ obtenemos:

$$e(k) = \frac{8-6}{8} = 0,250$$

$$e(k-1) = \frac{8-6}{8} = 0,250$$

$$\frac{de(k)}{dk} = 0,250 - 0,250 = -0$$

Aquí se presenta el caso en que el error es positivo y la derivada del error también es positiva; sin embargo la variable se encuentra debajo de la referencia, por lo que la acción a tomar es **abrir**.

5. Si $y(k) = 9 \text{ lt/ mín}$ y $y(k-1) = 12 \text{ lt/ mín}$ obtenemos:

$$e(k) = \frac{8-6}{8} = -0,125$$

$$e(k-1) = \frac{8-12}{8} = -0,500$$

$$\frac{de(k)}{dk} = -0,125 - -(0,5) = 0,375$$

En esta situación el error es negativo y la derivada del error es positiva, la acción a tomar es **nada**, de modo que la variable si alcanza la referencia.

6. Si $y(k) = 12 \text{ lt/ mín}$ y $y(k-1) = 9 \text{ lt/ mín}$ obtenemos:

$$e(k) = \frac{8-12}{8} = -0,500$$

$$e(k-1) = \frac{8-9}{8} = -0,125$$

$$\frac{de(k)}{dk} = -0,500 - -(0,125) = -0,375$$

En este caso se presenta el error negativo igualmente la derivada del error, la acción a tomar por el controlador es **cerrar**, para que la variable llegue a la referencia.

7. Si $y(k) = 10 \text{ lt/ mín}$ y $y(k-1) = 10 \text{ lt/ mín}$ obtenemos:

$$e(k) = \frac{8-10}{8} = -0,250$$

$$e(k-1) = \frac{8-10}{8} = -0,250$$

$$\frac{de(k)}{dk} = -0,250 - -(0,250) = 0$$

Aquí se tiene que el error es negativo y la derivada del error es cero, por lo que la acción a tomar es **cerrar**.

8. Si $y(k) = 8 \text{ lt/ mín}$ y $y(k-1) = 10 \text{ lt/ mín}$ obtenemos:

$$e(k) = \frac{8-8}{8} = 0$$

$$e(k-1) = \frac{8-10}{8} = -0,250$$

$$\frac{de(k)}{dk} = 0 - -(0,250) = 0,250$$

Obtenemos el error cero y la derivada del error positiva, la acción a tomar es **abrir**, para que la variable alcance la referencia.

9. Si $y(k) = 8 \text{ lt/mín}$ y $y(k-1) = 6 \text{ lt/mín}$ obtenemos:

$$e(k) = \frac{8-8}{8} = 0$$

$$e(k-1) = \frac{8-6}{8} = 0,250$$

$$\frac{de(k)}{dk} = 0 - (0,250) = -0,250$$

En esta situación el error es cero y la derivada del error es negativa, la acción a tomar por el controlador es **cerrar**, para que la variable llegue a la referencia.

Los resultados de las acciones a tomar por el controlar PI difuso; según las distintas situaciones presentadas en el sistema de circulación de agua se observan en la Figura 5.13 y el resumen de dichas acciones se presenta en la Tabla 5.1.

No.	$y(k) \text{ lt/min}$	$y(k-1) \text{ lt/min}$	$e(k)$	$e(k-1)$	$\frac{de(k)}{dk}$	Acción
1	8	8	0	0	0	Nada
2	3	6	0.625	0.250	0.375	Abrir
3	6	3	0.250	0.625	-0.375	Nada
4	6	6	0.250	0.250	0	Abrir
5	9	12	-0.125	-0.500	0.375	Nada
6	12	9	-0.500	-0.125	-0.375	Cerrar
7	10	10	-0.250	-0.250	0	Cerrar
8	8	10	0	-0.250	0.250	Abrir
9	8	6	0	0.250	-0.250	Cerrar

Tabla 5.1: Acciones cuando se tienen tres funciones de membresía

Para 3 funciones de membresía se asignan las variables lingüísticas NEG, CER y POS, respectivamente negativo, cero y positivo. En la Tabla 5.2 se muestra el MAD para tres funciones de membresía.

$\Delta e \backslash e$	NEG	CER	POS
NEG	CERRAR	CERRAR	NADA
CER	CERRAR	NADA	ABRIR
POS	NADA	ABRIR	ABRIR

Tabla 5.2: MAD con tres funciones de membresía

Para 5 funciones de membresía se asignan las variables lingüísticas NEGG, NEGP, CER, POSP y POSG, respectivamente negativo grande, negativo pequeño, cero, positivo pequeño y positivo grande. En la Tabla 5.3 se muestra el MAD para cinco funciones de membresía.

$\Delta e \backslash e$	NEGG	NEGP	CER	POSP	POSG
NEGG	CERRAR MUCHO	CERRAR MUCHO	CERRAR MUCHO	CERRAR POCO	NADA
NEGP	CERRAR MUCHO	CERRAR MUCHO	CERRAR POCO	NADA	ABRIR POCO
CER	CERRAR MUCHO	CERRAR POCO	NADA	ABRIR POCO	ABRIR MUCHO
POSP	CERRAR POCO	NADA	ABRIR POCO	ABRIR MUCHO	ABRIR MUCHO
POSG	NADA	ABRIR POCO	ABRIR MUCHO	ABRIR MUCHO	ABRIR MUCHO

Tabla 5.3: MAD con cinco funciones de membresía

Para 7 funciones de membresía se asignan las variables lingüísticas NEGG, NEGM, NEGP, CER, POSP, POSM y POSG, respectivamente negativo grande, negativo mediano, negativo pequeño, cero, positivo pequeño, positivo mediano y positivo grande. En la Tabla 5.4, se muestra el MAD para siete funciones de membresía.

$\Delta e \backslash e$	NEGG	NEGP	CER	POSP	POSG
NEGG	CERRAR MUCHO	CERRAR MUCHO	CERRAR MUCHO	CERRAR POCO	NADA
NEGP	CERRAR MUCHO	CERRAR MUCHO	CERRAR POCO	NADA	ABRIR POCO
CER	CERRAR MUCHO	CERRAR POCO	NADA	ABRIR POCO	ABRIR MUCHO
POSP	CERRAR POCO	NADA	ABRIR POCO	ABRIR MUCHO	ABRIR MUCHO
POSG	NADA	ABRIR POCO	ABRIR MUCHO	ABRIR MUCHO	ABRIR MUCHO

Tabla 5.4: MAD con siete funciones de membresía

5.5. Metodología de sintonización

El controlador PI difuso fue diseñado mediante la herramienta "Fuzzy" de Matlab y junto con Simulink se realizó la simulación; los rangos fueron ajustados a prueba y error tomando en cuenta sus rangos observables dentro de la simulación comenzando por el ajuste de la salida, continuando con el ajuste del error y finalmente el ajuste de la variación del error.

La Figura 5.14, muestra el diagrama de bloques para la simulación, se usa una entrada escalón y el error se normaliza; así como el controlador difuso del sistema de circulación de agua, un integrador y la planta, con su respectiva salida hacia el osciloscopio.

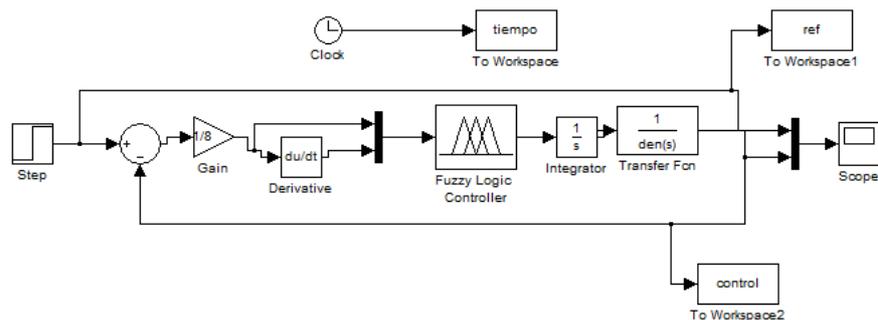


Figura 5.14: Diagrama de bloques del sistema de circulación de agua utilizando un controlador PI difuso

En la Figura 5.15 se muestra la superficie de la acción de control, el rango del error es de -1 a 1; el del cambio del error es de -0.005 a 0.005 y el rango de la salida es de -1 a 1; como puede observarse presenta una forma homogénea.

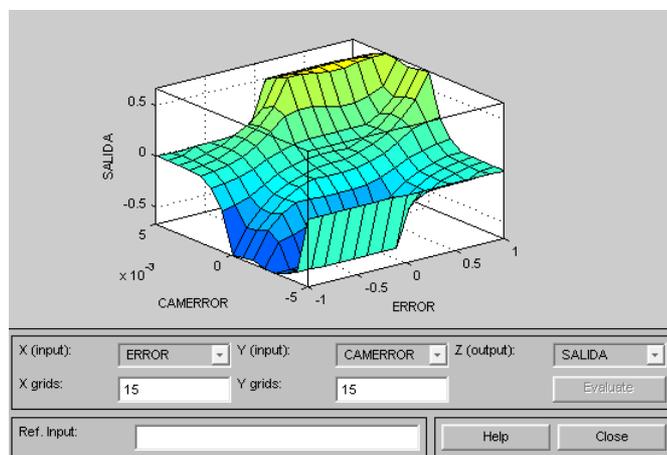


Figura 5.15: Superficie de la acción de control PI difuso del sistema de circulación de agua

Las funciones de membresía del error se muestran en la Figura 5.16.

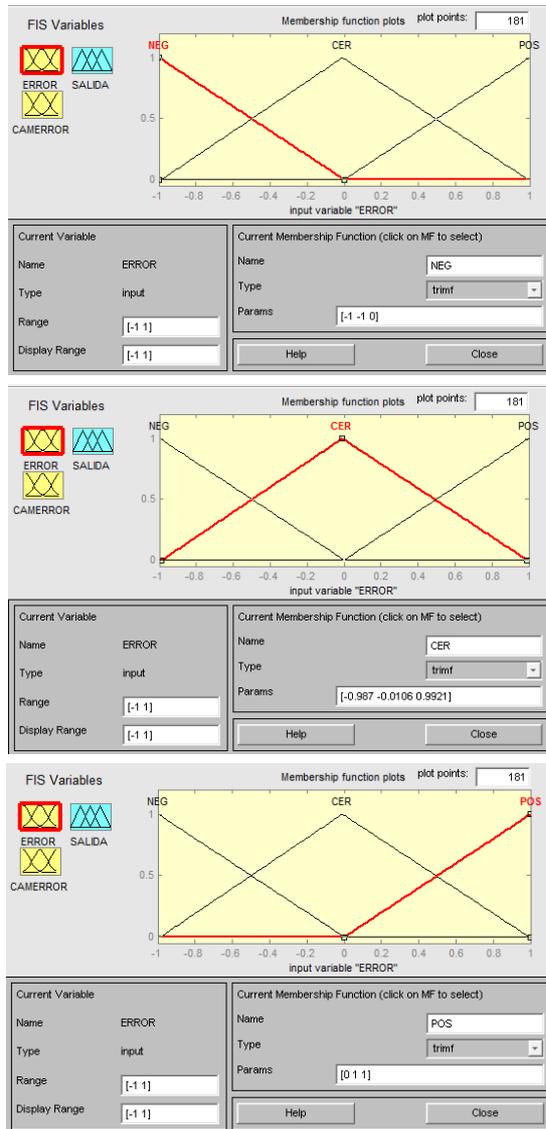


Figura 5.16: Funciones de membresía del error

Las funciones de membresía de cambio del error se muestran en la Figura 5.17.

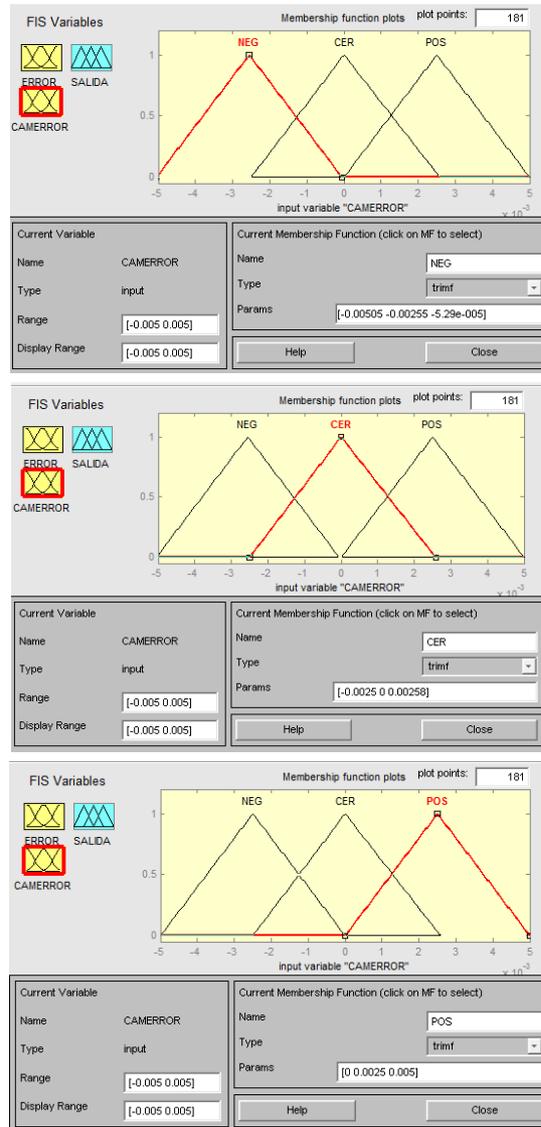


Figura 5.17: Funciones de membresía de la derivada del error

Las funciones de membresía de salida se muestran en la Figura 5.18.

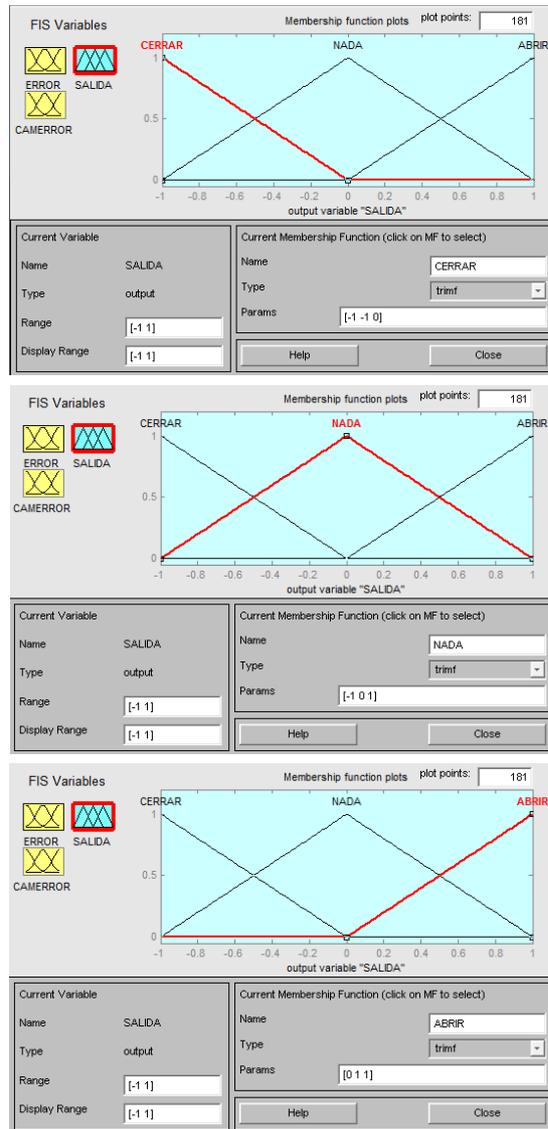


Figura 5.18: Funciones de membresía de la defusificación, salida

En la Figura 5.19 se muestran las reglas de inferencia para las nueve funciones de membresía.

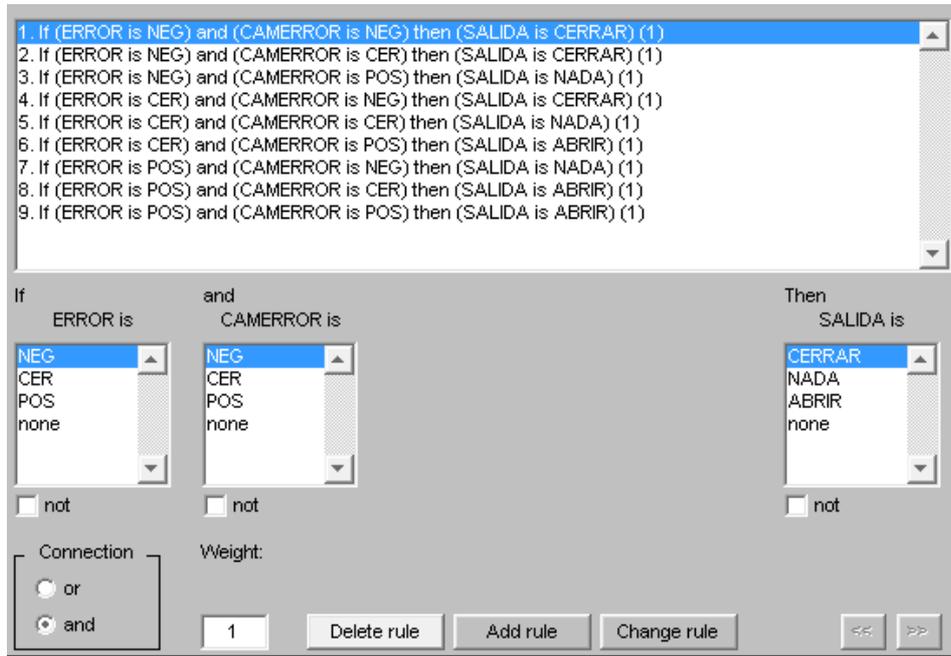


Figura 5.19: Reglas de inferencia utilizada para la simulación del sistema de circulación de agua

Los pasos para la sintonización del control son:

1. El universo de discurso del error se fija como un máximo uno; pues lo mas que se puede tener de error en valor absoluto es de 100 %.
2. El universo de discurso de la derivada del error (cambio del error) se fija en un valor, en este caso se tiene un intervalo de -0.005 a 0.005 se elije este valor debido a que el tiempo de respuesta de la válvula es lento.
3. Disminuir el universo de discurso del cambio del error hasta que la respuesta transitoria no presente oscilaciones.
4. Se considera que el controlador esta sintonizado cuando al reducir los universos de discurso del error y del cambio del error no mejora la respuesta del sistema.

5.6. Pruebas y resultados

Para realizar la simulación del controlador difuso se realizaron las siguientes pruebas, se fijó una referencia en el flujo que debería pasar por la tubería, en este caso se tomo el valor 8 lt/min, utilizando un número diferente para las funciones de membresía tanto del error, del cambio del error así como la función de salida, obteniéndose los siguientes resultados:

1. Para tres funciones de membresía:

- Respuesta del controlador difuso, tomando un universo de discurso para la función error -1 a 1 y para la función cambio del error -0.005 a 0.005, la respuesta se observa en la Figura 5.20.

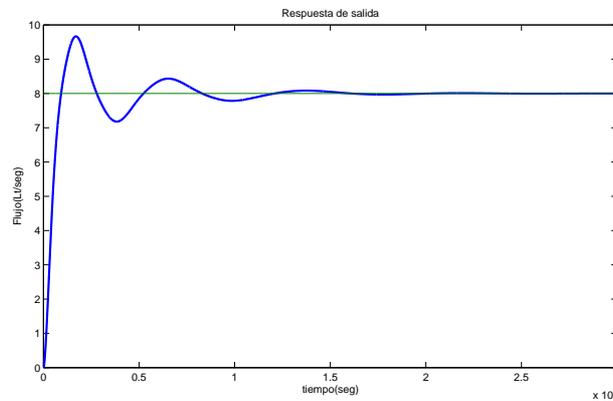


Figura 5.20: Respuesta de salida con tres funciones de membresía y cambio de error de -0.005 a 0.005

En este caso podemos observar que existe un sobreimpulso como respuesta de salida menor del 20%; y el tiempo en el que llega a la referencia es de muy extenso; entonces aunque se obtiene el valor deseado, el tiempo para alcanzarlo es muy grande.

- Respuesta del controlador difuso, tomando un universo de discurso para la función error -1 a 1 y para la función cambio del error -0.0015 a 0.0015, la respuesta se observa en la Figura 5.21.

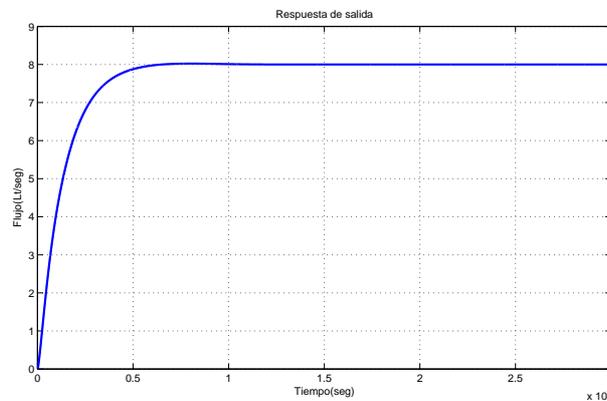


Figura 5.21: Respuesta de salida con tres funciones de membresía y cambio de error de -0.0015 a 0.0015

En este caso al reducir el intervalo del cambio del error se observa que ya no existe sobreimpulso y el tiempo de establecimiento disminuyo considerablemente, con respecto a la grafica 5.20.

2. Para cinco funciones de membresía

- Respuesta del controlador difuso, con cinco funciones de membresía. Tomando un universo de discurso para la función error -1 a 1 y para la función cambio del error -0.005 a 0.005, la respuesta se observa en la Figura 5.22.

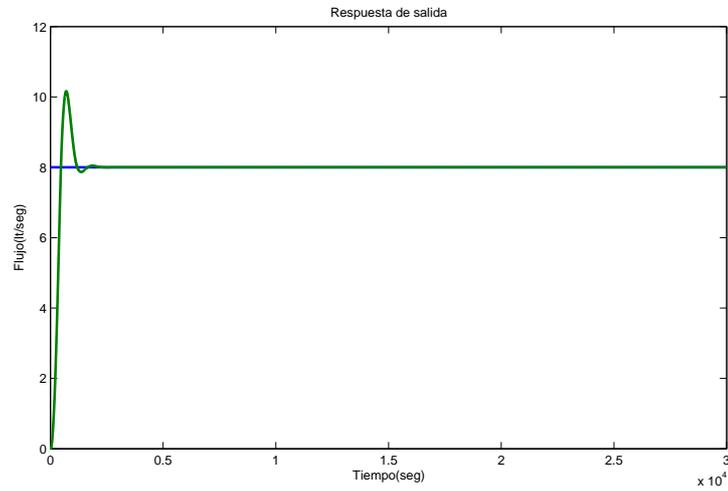


Figura 5.22: Respuesta de salida con cinco funciones de membresía y cambio del error de -0.005 a 0.005

En este caso podemos observar como al aumentar el número de funciones de membresía se alcanza la referencia con un tiempo más corto, pero el sobre impulso aumenta.

- Tomando un universo de discurso para la función error -1 a 1 y para la función cambio del error -0.002 a 0.002, la respuesta se observa en la Figura 5.23.

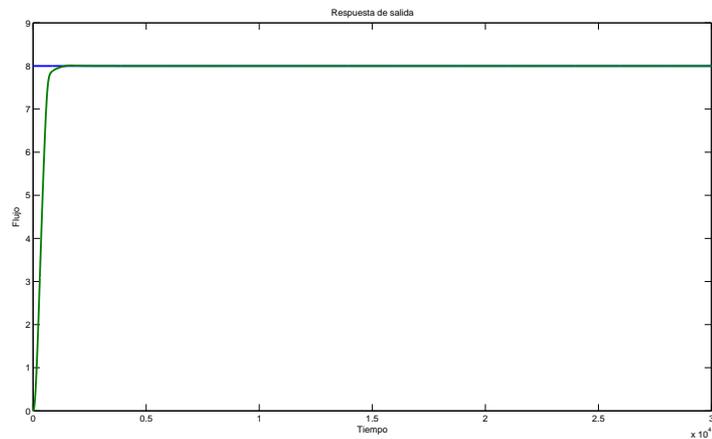


Figura 5.23: Respuesta de salida con cinco funciones de membresía y cambio del error de -0.002 a 0.002

Aquí observamos como al aumentar el número de funciones de membresía y disminuyendo el intervalo del cambio del error se logra una mejor sintonización ya que el tiempo en alcanzar la referencia disminuye y no existe sobreimpulso.

3. Para siete funciones de membresía

- Respuesta del controlador difuso, con siete funciones de membresía. Tomando un universo de discurso para la función error -1 a 1 y para la función cambio del error -0.005 a 0.005, la respuesta se observa en la Figura 5.24.

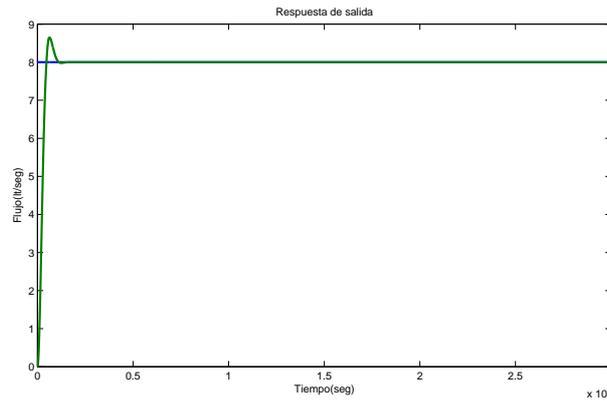


Figura 5.24: Respuesta de salida del controlador con cambio del error de -0.005 a 0.005

Para este caso el cambio en el tiempo en que se alcanza la referencia no es significativo con respecto a cinco funciones de membresía, aunque el sobreimpulso mejora un poco.

- Tomando un universo de discurso para la función error -1 a 1 y para la función cambio del error -0.002 a 0.002, la respuesta se observa en la Figura 5.25.

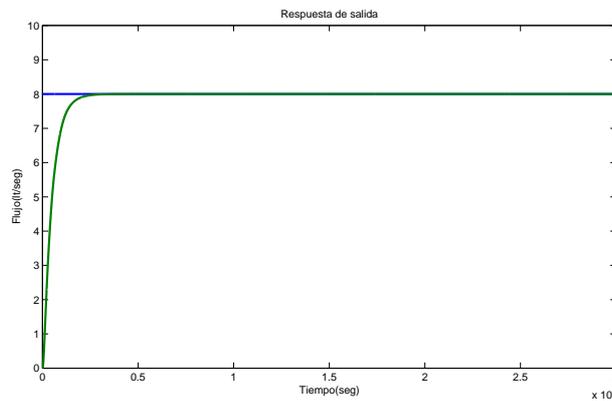


Figura 5.25: Respuesta de salida del controlador con cambio del error de -0.002 a 0.002

Aquí podemos observar como aunque el intervalo del cambio del error se redujo, el tiempo de establecimiento no tiene una mejora significativa en comparación a la prueba de salida con cinco funciones de membresía.

5.7. Conclusiones

Para el diseño del controlador PI difuso es necesario estar más familiarizado con el proceso a controlar que en el caso de los controladores analógicos y digitales, ya que para establecer las reglas de inferencia se requiere tener una idea acerca del comportamiento del sistema. Por otro lado las funciones de membresía utilizadas en el presente trabajo de investigación son triangulares y de tipo singletón, por su relativa facilidad para implementar. Al realizar la simulación del controlador PI en el sistema de circulación de agua, se tiene que si se incrementa el número de funciones de membresía la respuesta del controlador mejora como se muestra en las Figuras 5.20, 5.21, 5.22, 5.23, 5.24, 5.25; por lo que se concluye que el comportamiento de un controlador PI digital es similar al comportamiento del PI difuso con base en la simulación.

Capítulo 6

Conclusiones y aportaciones

6.1. Conclusiones

En el presente trabajo se diseñaron los controladores PI analógico, PI digital y el controlador PI difuso de tipo Mamdani.

El controlador PI analógico se sintonizó mediante la aproximación a un sistema de segundo orden, presentando un sobreimpulso del 20 % y un tiempo de establecimiento de 350 segundos, ante una entrada escalón del sistema en lazo cerrado.

Con respecto al controlador PI digital podemos decir que mejora la acción de control, pues en éste no se presenta el sobreimpulso que se tiene en el controlador analógico, además de que el tiempo de establecimiento se reduce de 350 segundos a 200 segundos.

Por otro lado el controlador PI difuso mejora la respuesta de dicho controlador pues su respuesta transitoria no presenta oscilaciones, además de que reduce el tiempo de establecimiento del sistema.

Dentro de las principales ventajas que se tienen al realizar un controlador PI difuso es que no es necesario conocer el modelo matemático del sistema; éste sólo es necesario cuando se realiza la simulación del mismo. Para la sintonización del controlador no se requiere la aproximación a un sistema de segundo orden, únicamente se utilizan los aspectos relevantes de la operación de la planta, razón por la cual se debe tener un conocimiento extenso acerca del funcionamiento del sistema.

Dentro de las desventajas que presenta el control difuso es que debe tener mayor experiencia sobre el proceso a controlar para diseñar el sistema de inferencia, a diferencia del control tradicional.

También se concluye que la hipótesis inicialmente planteada de que un controlador digital tiene un comportamiento similar a un controlador difuso se cumple, como se observa en las gráficas de respuesta de la simulación.

6.2. Aportaciones

Dentro de las principales aportaciones que se pueden mencionar al desarrollar el presente proyecto encontramos:

- Obtención del modelo matemático de una situación real, ya que la planta existe físicamente pero no se tenía dicho modelo; así como la obtención de los parámetros que se requieren para el diseño del controlador analógico y digital.
- Comprobación de la metodología de sintonización de controlador PI analógico y digital dado en la literatura, aplicado a una situación real.
- Desarrollo de una metodología para la sintonización de un controlador difuso mediante la observación de los rangos de la respuesta de la planta a distintas variaciones de los universos de discurso de las funciones de membresía del error y del cambio del error; aplicado a un sistema de circulación de agua. Como se menciona en el estado del arte del presente estudio, las empresas que ofrecen módulos de entrenamiento no cuentan con el módulo de control difuso.
- Al implementar el control digital en el simulador se favorece la enseñanza aprendizaje de los cursos de control que se imparten en las universidades.
- Metodología de diseño del controlador difuso.
- Diseño y simulación del sistema de inferencia.
- Sintonización del control difuso.

6.3. Trabajos futuros

Para trabajos futuros se propone:

- Implementar el control difuso en el entrenador, pues en esta etapa solo se está trabajado con control digital, y a nivel simulación el control difuso.
- Desarrollar el control neurodifuso para determinar las constantes PI o con otras tecnologías emergentes.
- El sistema computacional utilizado para el desarrollo del controlador fue Lab View junto con una tarjeta de adquisición de datos, por lo que se propone realizar el control con PLC y con un microcontrolador.
- Reemplazar la válvula de control por otro actuador de modo que su acción de control sea más rápida.

Bibliografía

- [1] *Manual LabView Básico I*, 2003.
- [2] *Manual LabView Básico II*, 2003.
- [3] Creus A. *Instrumentación Industrial*. Marcombo, México, tercera edición, 2002.
- [4] Roca C. A. *Control de Procesos*. Alfaomega, México, segunda edición, 2005.
- [5] Kuo C. B. *Sistemas de Control Digital*. CECSA, México, sexta edición, 2002.
- [6] Cortes L. C. *Problemas y Modelos Matemáticos para la administración y dirección de empresas*. Agapea, México, primera edición, 2007.
- [7] Cuadra A. C. and H. S. Juan. Estrategias de control difuso para un sistema alineal bivaribale. *Teoria Universidad de Bio-Bio*, 10, 2007.
- [8] E. Cesar, O Llanés amd García J. E., and el. al. Control difuso de nivel en un sistema de tanques multiples con alimentación centralizada. *Ingeniería Electrónica Automática y Comunicaciones*, 21, 2000.
- [9] Biel D., A. Manuel, and J. P. Joaquín. *Instrumentación Virtual*. Alfaomega, México, primera edición, 2006.
- [10] Martín del Brio B. and S. M. Alfredo. *Redes Neuronales y Sistemas Difusos*. Alfaomega, México, segunda edición, 2005.
- [11] Garcés F. J., D. A. Dario Arturo, and S.S. Sistema de control Óptimo para un motor trifásico de ac de bajo nivel. Universidad Ponticia Boliviana, Colombia, 2002.
- [12] Holman P. J. *Metodos Experimentales para Ingenieros*. Mc Graw Hill, México, segunda edición, 1986.
- [13] Ogata K. *Ingeniería de Control Moderna*. Prentice Hall, México, segunda edición, 1993.
- [14] Ogata K. *Sistemas de Control en Tiempo Discreto*. Prentice Hall, México, segunda edición, 1996.
- [15] Ogata K. *Problemas de Ingeniería de Control Utilizando Matlab*. Prentice Hall, España, primera edición, 2000.
- [16] Castro M. A. M., V. M. Fernando, and Q. S. José Antonio. Control difuso de flujo en una estaciónd de laboratorio. *Información Tecnológica*, 15, 2004.

- [17] Coronel L. M. and H. R. José Antonio. Control difuso de velocidad de un motor de cd ante variaciones en el par de carga. *Instituto Tecnológico de Zacatepec, Morelos*, 2005.
- [18] Potter C. M. and C. W. David. *Mecánica de Fluidos*. Thomson, México, tercera edición, 2002.
- [19] Pérez C. M. and Vernon James. Sistema de logica difusa. Universidad de Guadalajara, México. Tomado de Internet: <http://www.control-systemsprincipales.co.uk>, 2009.
- [20] Hernández R. N. *Control Neurodifuso de la Velocidad de un Motor de Corriente Directa*. Instituto Tecnológico de la Laguna, Torreón Coahuila México, primera edición, 2000.
- [21] Norman S. N. *Sistemas de Control para Ingeniería*. CECSA, México, tercera edición, 2006.
- [22] Ferreyra F. R. Control pid difuso. UAM Azcapotzalco, México, 2005.
- [23] King E. R. *Computational Intelligence in Control Engineering*. Marcel Dekker, United State of America, primera edición, 1999.
- [24] Eronini E. U. *Dinámica de Sistemas y Control*. Thomson, México, tercera edición, 2001.
- [25] Li X. W. *A course in Fuzzy Systems and Control*. Prentice Hall, United State of America, primera edición, 1997.

Apéndice

Descripción general del sistema

El sistema consiste en una unidad de control de procesos (UCP) para un circuito hidráulico, con un depósito inferior (1) y un tanque de proceso superior (2), dos bombas de circulación (3), dos caudalímetros con llave de control manual (4), tres electroválvulas todo/nada (5), y una válvula proporcional motorizada (6). El conjunto de tubos, los codos, las conexiones, las llaves de paso y los drenajes para la operación del circuito se monta sobre una estructura de soporte diseñada para el sostén del equipo. La Figura 6.1 muestra la planta.



Figura 6.1: Unidad de control de procesos

Con los elementos fijos adicionales, también hay un sensor de caudal que está instalado en una de las líneas ascendentes (7), un sensor de temperatura situado en el fondo lateral del tanque de proceso (8), junto con un sensor de conductividad (9), en el fondo del tanque se encuentra un sensor

de presión (10); así como en el otro costado del tanque de proceso se halla un conjunto de calefacción eléctrica (11).

Los elementos adicionales son un agitador (12) y un sensor de nivel tipo flotador (13), los cuales se muestran en la Figura 6.2.

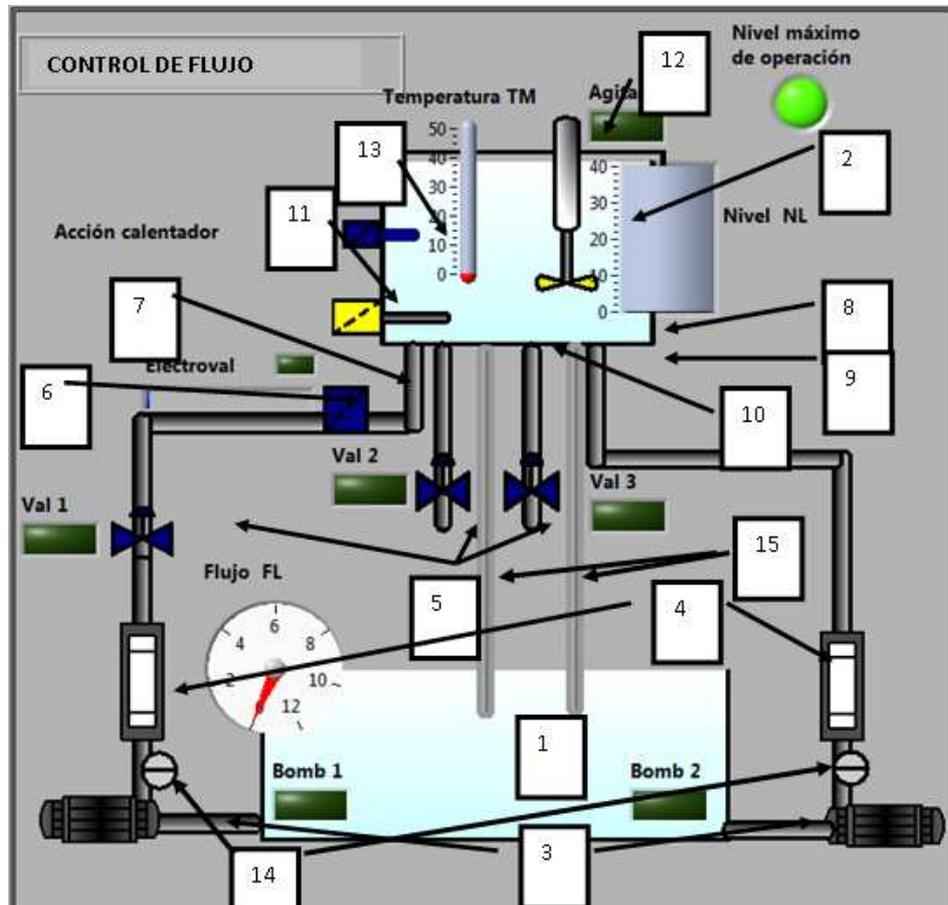


Figura 6.2: Elementos de la Unidad de control de procesos

Los elementos de la UCP indicados en la Figura 6.2 son:

1. Un depósito almacén de 80 x 40 cm, con válvula de drenado.
2. Un tanque de proceso de 40 x 40 cm y una escala graduada.
3. Dos bombas de recirculación.
4. Dos caudalímetros de área variable (0 - 14 lt/min)
5. Línea de válvulas de regulación todo/nada.

6. Una válvula de control motorizada (tipo pistón).
7. Sensor de flujo tipo turbina.
8. Sensor de temperatura.
9. Sensor de conductividad.
10. Sensor de presión.
11. Resistencia eléctrica.
12. Agitador de hélice.
13. Sensor de nivel tipo flotador.
14. Válvulas de regulación de flujo manuales.
15. Válvulas manuales de salida de flujo del tanque superior.

Interfaz Gráfica de Usuario

El sistema unidad de control de procesos (ITKUCP) es un sistema de adquisición y control, en el cual se disponen de diferentes niveles de configuración que permiten al profesor diseñar diferentes ejercicios prácticos. Este sistema se desarrolló con el software LabView. [1], [2] y para que pueda funcionar correctamente, necesita un sistema operativo Windows 98 o superior (no Windows Vista), con una tarjeta de adquisición de datos.

El software está preparado para trabajar con una resolución mínima de 1024x768, si se trabaja con una resolución menor es posible que algunos controles no puedan visualizarse en pantalla. Al ejecutar el programa ITKUCP, aparece un menú con las distintas variables de proceso que se pueden simular, tal como se muestra en la Figura 6.3.



Figura 6.3: Menú principal del software ITKUCP

Los ensayos de control que se pueden realizar con el módulo aparecen en la Figura 6.4.

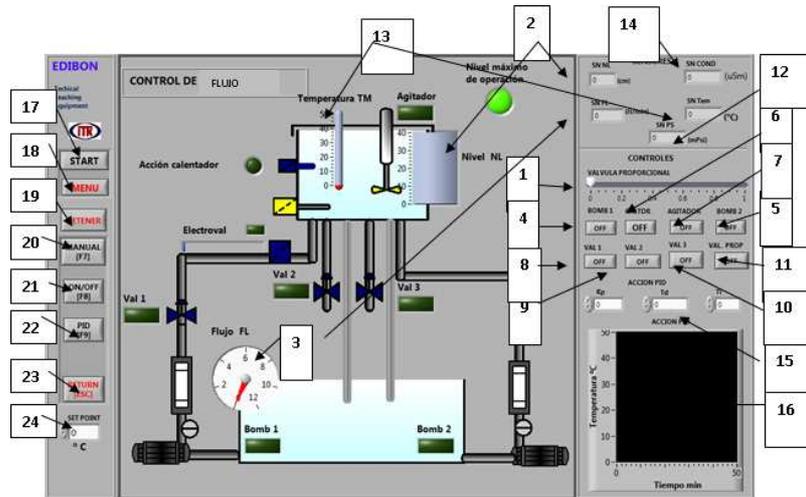


Figura 6.4: Ensayos del software ITKUCP

La identificación de cada elemento que forma el sistema se muestran en la Tabla 6.1

Identificación	Descripción
1	Control manual de la válvula motorizada
2	Indicador de nivel de depósito superior
3	Indicador de caudal de agua
4,5	Interruptor de bomba 1 y 2
6	Interruptor de calentador
7	Interruptor de agitador
8,9,10	Válvula solenoide, control manual 1,2 y 3
11	Interruptor válvula proporcional
12	Indicador de presión
13	Indicador de temperatura
14	Indicador de conductividad
15	Constantes para el control PID
16	Representación gráfica del PID
17	Botón de inicio de prueba
18	Botón de regreso al menú principal
19	Botón para detener prueba
20	Control manual
21	Control On/Off
22	Control PID
23	Regresa al sub menú
24	Set Point

Tabla 6.1: Identificación de los elementos del sistema ITK-UCP

Tarjeta de adquisición de datos

Para la adquisición de datos se utilizó una tarjeta de adquisición con conexión a puerto USB, con las siguientes características:

Las salidas digitales usadas en la UCP son por el puerto físico "0", con las líneas que a continuación se describen.

Puerto Usado "0"	Conexión
Línea 0	Bomba 1
Línea 1	Bomba 2
Línea 2	Electroválvula 1
Línea 3	Electroválvula 2
Línea 4	Electroválvula 3
Línea 5	Calentador
Línea 6	Válvula proporcional
Línea 7	Agitador

Tabla 6.2: Salidas digitales

La salida analógica usada en la UCP es el puerto analógico cero (Ao0), con un valor de salida de voltaje de 0 a 5 Volts, tal como se muestra en la Tabla 6.3

Puerto Usado "Ao0"	Conexión
Ao0	Válvula proporcional

Tabla 6.3: Salidas analógicas

Las entradas analógicas son utilizadas para adquirir las señales de los distintos sensores, los cuales se describen en la Tabla 6.4 al igual que sus rangos de medida.

Puerto Usado	Conexión	Rango de valor (Volts)
AI0	Sensor de flujo	0 - 5
AI3	Sensor de presión	0 - 5
AI3	Sensor de nivel	0 - 5
AI4	Sensor de temperatura	0 - 5
AI4	Sensor de conductividad	0 - 5

Tabla 6.4: Entradas analógicas

Sensor y transductor de flujo

El sensor de flujo utilizado en el proyecto es del tipo paletas, para que pueda enviar la señal a la tarjeta de adquisición de datos es necesario conectarlo a un transductor el cual envía una señal de voltaje entre 0 y 10 Volts. En la Figura 6.5 se muestra el sensor de flujo así como la electroválvula proporcional, y el transductor de flujo.

Sensor de flujo

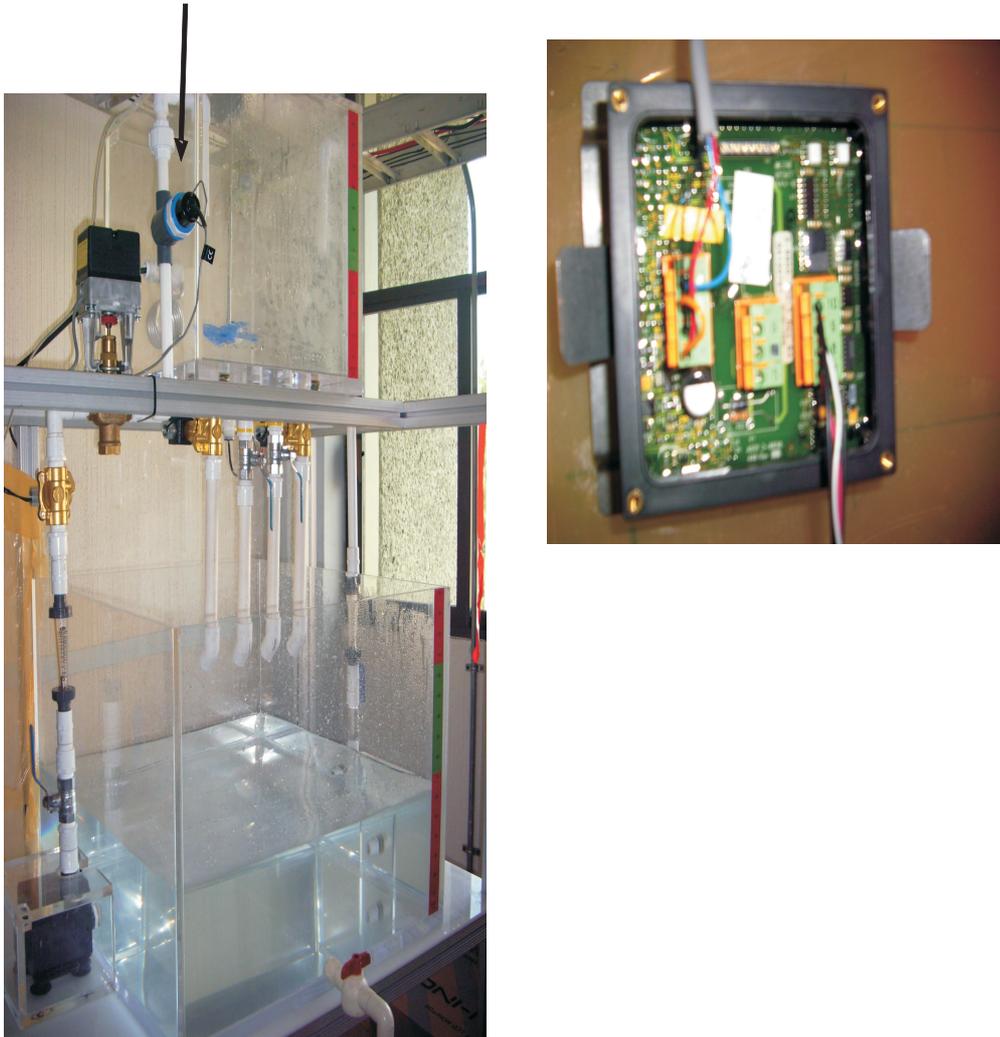


Figura 6.5: Sensor y transmisor de flujo

Programa de control de flujo en LabView

La interfaz gráfica de usuario del control de flujo se muestra en la Figura 6.6.

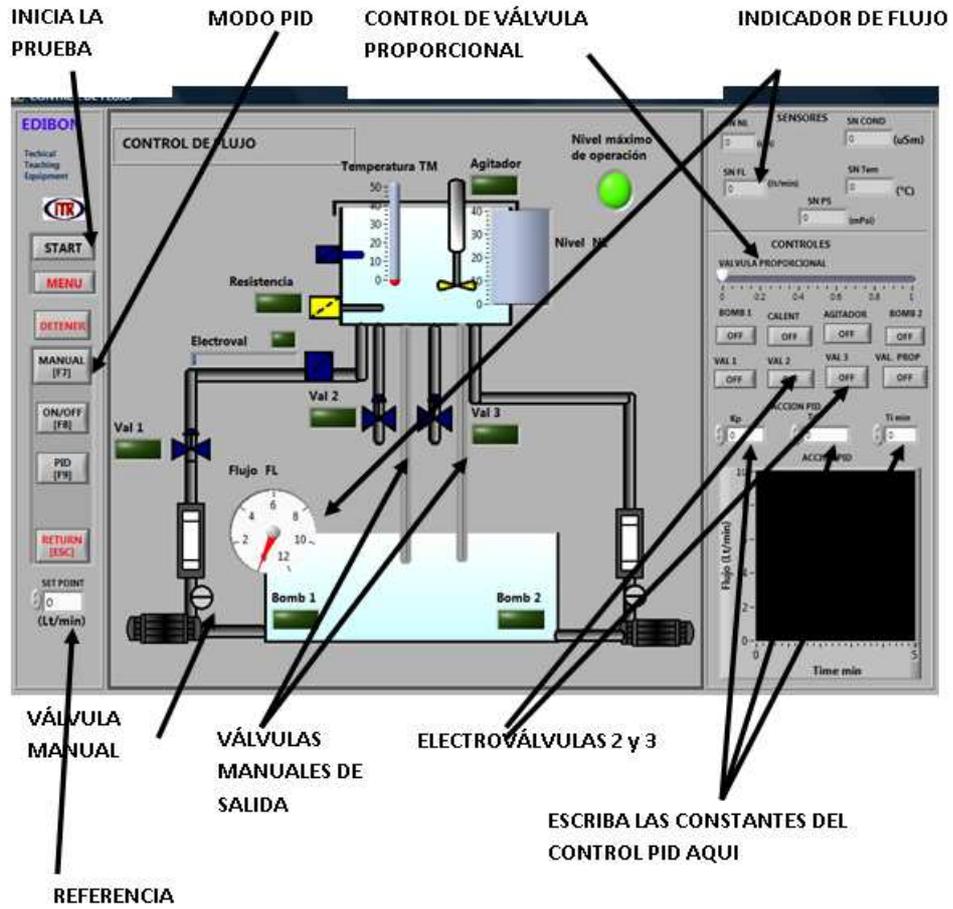


Figura 6.6: Interfaz de usuario del sistema de circulación de agua