## "DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROLADOR DIFUSO TOLERANTE A FALLA, APLICADO AL CONTROL DE NIVEL DE LÍQUIDO"

## "DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROLADOR DIFUSO TOLERANTE A FALLA, APLICADO AL CONTROL DE NIVEL DE LÍQUIDO"

## AUTOR:

**Edgar Augusto Criollo Ayala** Ingeniero Electrónico Egresado de la Maestría en Automatización y Control Industriales

## **DIRECTOR:**

Julio César Viola Ph.D.

Ingeniero Electrónico Doctor en ingeniería



**CUENCA-ECUADOR** 

2015

Datos de catalogación bibliográfica

#### CRIOLLO AYALA EDGAR AUGUSTO

#### "DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROLADOR DIFUSO TOLERANTE A FALLA, APLICADO AL CONTROL DE NIVEL DE LÍQUIDO"

Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca - Ecuador, 2015

MAESTRÍA EN AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL INDUSTRIALES

Formato 170 x 240 mm

Páginas: 70

Breve reseña de los autores e información de contacto

Autor:



EDGAR AUGUSTO CRIOLLO AYALA Ingeniero Electrónico Egresado de la Maestría en Automatización y Control Industriales eddy3530@hotmail.com

#### Dirigido por:



JULIO CESAR VIOLA Ingeniero Electrónico Doctor en Ingeniería jcviola@ieee.org.

Todos los derechos reservados.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS ©2015 Universidad Politécnica Salesiana. CUENCA – ECUADOR CRIOLLO AYALA EDGAR AUGUSTO. "DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROLADOR DIFUSO TOLERANTE A FALLA, APLICADO AL CONTROL DE NIVEL DE LÍQUIDO "

IMPRESO EN ECUADOR - PRINTED IN ECUADOR.

# **INDICE GENERAL**

1.	INT	RODUCCIÓN	1
	1.1.	Estado del arte	1
	1.2.	Motivación y justificación	2
	1.3.	Descripción del problema	2
	1.4.	Objetivos	3
	1.4.1.	Objetivo general	3
	1.4.2.	Objetivos específicos	3
	1.5.	Alcances y limitaciones	3
2.	COI	NTROL DE NIVEL DE LÍQUIDO	5
	2.1.	Medición de nivel	5
	2.1.1.	Método de medición directa	5
	2.1.2.	Método de medición indirecta	5
	2.1.3.	Método por las características eléctricas del líquido	6
	2.2.	Válvulas de control	6
	2.2.1.	Definición de válvula de control	6
	2.2.2.	Tipos de válvulas	6
	2.2.2.1.	Clasificación según su función	6
	2.2.2.2.	Clasificación según el tipo de cuerpo de la válvula	7
	2.3.	Descripción del sistema MPS PA Compact Workstation	7
	2.3.1.	Descripción del sistema	7
	2.3.2.	Características principales	8
	2.3.3.	Diagramas de flujo	9
	2.4.	Descripción del lazo de control	0
	2.5.	Escenario de falla 1	1
	2.5.1.	Características 1	1
	2.5.2.	Especificaciones de confiabilidad1	1
	2.5.3.	Clasificación de fallas	1
	2.5.3.1.	Clasificación de fallas por su localidad 1	2
	2.5.3.2.	Clasificación de fallas por su efecto 1	2

	2.5.4.	Administración de la redundancia	. 13
	2.5.5.	Tolerancia a falla en sensores y actuadores	. 14
	2.5.5.1.	Esquema de diagnóstico y aislamiento de fallas basado en un observador	. 14
	2.6.	Obtención del modelo matemático del sistema	. 14
	2.6.1.	Definición del sistema	. 14
	2.6.2.	Modelo del sistema	. 15
	2.6.2.1.	Identificación analítica	. 15
	2.6.2.2.	Identificación experimental	. 16
	2.6.3.	Identificación paramétrica del modelo del sistema	. 17
	2.7.	Adquisición de datos	. 19
3.	DIS	EÑO DEL CONTROLADOR DIFUSO TOLERANTE A FALLA	. 21
	3.1.	Identificación de la planta	21
	3.1.1.	Identificación experimental	21
	3.1.2.	Identificación analítica	23
	3.2.	Descripción del controlador difuso de ganancias programadas	30
	3.2.1.	Controlador de ganancias programadas	30
	3.2.2.	Controlador de ganancias programadas con lógica difusa	. 33
	3.3.	Diseño del controlador PID con ganancias programadas con lógica difusa	34
	3.3.1.	Diseño del controlador PI	. 34
	3.3.2.	Diseño del sistema difuso para la autosintonización del controlador PI	36
	3.3.2.1.	Variables de entrada (variable programadora)	36
	3.3.2.2.	Variables de salida	37
	3.3.2.3.	Reglas difusas	38
	3.4.	Modelado difuso de los escenarios de falla	40
	3.4.1.	Control tolerante a falla de la bomba basado en un caudalímetro	40
	3.4.2.	Control tolerante a falla de la bomba basado en un caudalímetro virtual	. 44
	3.4.2.1.	Filtro de Savitzky–Golay	45
4.	Imp	lementación y resultados	. 49
	4.1.	Simulaciones	49
	4.1.1.	Simulación del controlador PI	49
	4.1.2.	Simulación del controlador de ganancias programadas	50
	4.2.	Implementación del controlador de ganancias programadas	52
	4.2.1.	Evaluación del rendimiento del GSC con respecto al controlador PI lineal	53
	4.2.2.	Evaluación del rendimiento del GSC con respecto al controlador CMP	55

BIBLIOGRAFÍA 69				
ANEXOS				
4.4.2.	Recomendaciones			
4.4.1.	Conclusiones	61		
4.4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	61		
4.3.	Resultados y análisis	58		
4.2.3.	Evaluación del GSC tolerante a falla	56		

# **INDICE DE FIGURAS**

<b>Figura 1</b> . Clasificación de las válvulas de control según el tipo de cuerpo de la válvula (Rodas A. 2011)
<b>Figura 2.</b> Planta didáctica Festo MPS PA. Compact Workstation (Festo 2014)
Figura 3. Diagrama de flujo del proceso, Festo(2014)9
Figura 4. Lazo para el control de nivel
Figura 5. Clasificación de las fallas 12
<b>Figura 6.</b> Sistema dinámico con entrada u(t), perturbación e(t) y salida y(t) (López M. 2008)
<b>Figura 7.</b> Metodología para identificación de sistemas (Bravo D. Rengifo C. 2011)
Figura 8. Descripción del modelo ARX
Figura 9. PRBS con cinco celdas
<b>Figura 10.</b> Señal PRBS y Respuesta del Sistema en Lazo de Nivel (Idrovo A. Peña M. 2014)
Figura 11. Respuesta al escalón del modelo obtenido mediante experimentación23
Figura 12. Esquema del tanque con superficie constante
<b>Figura 13.</b> Curva del flujo de ingreso en función de la altura (Idrovo A. Peña M. 2014)
Figura 14. Tanque de superficie variable
Figura 15. Respuesta al escalón del modelo encontrado analíticamente
Figura 16. Esquema de un controlador con ganancias programadas
Figura 17. Proceso para diseñar un controlador de ganancias programadas32
Figura 18. Esquema de un sistema difuso
Figura 19. Control PID de ganancias programadas mediante lógica difusa
<b>Figura 20.</b> Sintonización del PI en sisotool de MATLAB y respuesta de sistema al escalón
Figura 21. Variables de entrada a) altura, b) error
<b>Figura 22.</b> Variables de salida a) kp, b) ki

Figura 23. Esquema del motor más la bomba40
Figura 24. Sistema difuso tolerante a falla en el actuador41
Figura 25. Variables de entrada, a) voltaje y b) caudal
Figura 26. Variable de salida Residuo
<b>Figura 27.</b> Obtención del polinomio para el filtro de Savitzky-Golay (Schafer R. 2011
<b>Figura 28.</b> Filtro Savitzky-Golay, señal derivada numérica color roja señal filtrada y suavizada color azul
<b>Figura 29.</b> Simulación del controlador lineal PI en simulink: señal de control color rojo (V), referencia color azul (cm), variable controlada verde (cm)50
Figura 30. Diseño del sistema difuso para el GSC50
Figura 31. Diseño del controlador de ganancias programadas en simulink51
<b>Figura 32.</b> Comportamiento de la variable controlada ante un cambio de referencia: variable controlada color verde (cm), señal de control rojo (V), referencia color azul
Figura 33. Panel frontal del controlador de ganancias programadas
<b>Figura 34.</b> Controlador PI lineal, señal de referencia color azul (cm), variable controlada color verde (cm), señal de control color roja (V)
<b>Figura 35.</b> Controlador PI lineal, señal de referencia color azul (cm), variable controlada color verde (cm), señal de control color rojo (V)
<b>Figura 36.</b> Controlador de ganancias programadas, señal de referencia color azul (cm), variable controlada color verde (cm), señal de control color rojo (V)
<b>Figura 37.</b> Controlador CMP, señal de referencia color verde (cm), variable controlada color azul (cm), señal de control color rojo (V) (Carpio M. 2013)55
<b>Figura 38.</b> Controlador de ganancias programadas sin tolerancia a falla, señal de referencia color azul (cm), variable controlada color verde (cm), señal de control color rojo (V)
<b>Figura 39.</b> Controlador de ganancias programadas tolerante a falla (caudalímetro físico), señal de referencia color azul (cm), variable controlada color verde (cm), señal de control color roja (V)
<b>Figura 40.</b> Controlador de ganancias programadas tolerante a falla (caudalímetro virtual), señal de referencia color azul (cm), variable controlada color verde (cm), señal de control color rojo (V)

#### **INDICE DE TABLAS**

<b>Tabla 1.</b> Acciones para Administrar la Redundancia (Rogina P. 1999)1	3
Tabla 2. Controladores lineales para cada zona de trabajo	5
Tabla 3a. Reglas para el sistema difuso encargado de actualizar la ganancia kp3	9
Tabla 3b. Reglas para el sistema difuso encargado de actualizar la ganancia ki3	9
Tabla 4. Caudal de salida de la bomba con el voltaje aplicado4	1
Tabla 5. Tabla de reglas difusas para el control tolerante a fallas	1
Tabla 6. Comparación entre los controladores PI de ganancias fijas y GSC	)
Tabla 7. Comparación entre los controladores GSC y GSC Tolerante a falla	0

## DEDICATORIA

A Dios por haberme permitido llegar a este momento tan especial en mi vida y a mi hijo Sebastián quien ha sido el promotor de mis más ambiciosos proyectos, entregándome su comprensión y cariño.

Ing. Edgar A. Criollo A.

## **PREFACIO**

Este trabajo de investigación, presenta los resultados del diseño e implementación de un controlador moderno mediante la técnica de *gain scheduling*, sobre un sistema de control de nivel de un tanque de agua. La investigación está enfocada en la evaluación del rendimiento entre el controlador moderno y un controlador clásico.

Los controladores son diseñados y simulados en *MATLAB*, luego son implementados en una plataforma de *LABVIEW* 2012.

En este trabajo se analizan las posibles fallas que puedan presentarse durante el proceso y se propone un diseño de control tolerante a falla del actuador, el cual es evaluado para diferentes porcentajes de falla.

## PRÓLOGO

En la presente investigación se describen el diseño e implementación de un controlador de ganancias programadas con lógica difusa, tolerante a falla, para el sistema de control de nivel de líquido *MPS PA Compact Workstation*, que dispone la Universidad Politécnica Salesiana.

Los controladores diseñados para esta investigación, son de tipo clásico PI y un controlador moderno que usa la técnica de *gain scheduling*. Los cuales se utilizan para evaluar las ventajas y desventajas existentes entre estos controladores.

Al controlador moderno se le agrega un control difuso tolerante a falla del actuador, el cual puede trabajar con un caudalímetro físico o un caudalímetro virtual.

El caudalímetro virtual está diseñado con la derivada del volumen, que está en función de la altura para lo cual se implementó el filtro de *Savitzky-Golay* para suavizar y obtener la primera derivada del volumen.

## AGRADECIMIENTOS

A mi madre, que me ha enseñado a no rendirme ni desfallecer ante las adversidades y siempre perseverar para lograr mis objetivos.

A mi esposa, que ha estado a mi lado brindándome cariño, confianza y apoyo incondicional para conseguir mis metas.

Al Dr. Julio Viola, director de tesis por su ayuda brindada en la elaboración de esta investigación.

## CAPÍTULO 1

# 1. INTRODUCCIÓN

La creciente evolución de plantas, industrias y empresas que se encargan de procesos con líquidos, hace necesaria la implementación de sistemas de producción más eficientes y con altos estándares de calidad, esto implica optimizar los diferentes recursos, por lo que se ve la necesidad de automatizar de manera eficiente dichos procesos.

El presente trabajo se enfoca en el análisis de un controlador difuso tolerante a falla con la técnica de *gain scheduling*, que se emplea para el control de nivel de una estación de trabajo, siendo esta estación la que simula el comportamiento de una planta real. En primera instancia, se identifica el modelo matemático que caracteriza al proceso mediante el método de identificación experimental paramétrica.

Para la parte de tolerancia a fallas se analizan expresamente las fallas en los actuadores, ya que son las fallas más comunes en los sistemas de automatización, siendo esta la causa de diferentes averías en los procesos, que van desde un mal funcionamiento y pueden desencadenar en una falla catastrófica.

El objetivo de este documento es fundamentar la supremacía de controladores sofisticados sobre los controladores clásicos como el PID, por lo que se realiza un análisis comparativo entre estos dos controladores.

## **1.1. Estado del arte**

Existen varios trabajos enfocados al diseño de controladores que usan la técnica de *gain scheduling* como lo exponen Blanchett T. Kember G. y Dubay R. (2000). Existen también trabajos sobre control tolerante a fallas del sistema como lo exponen Peña L. y Domínguez H. (2004), publicaciones que hablan de la detección de fallos y sus resultados que ilustran la eficacia del enfoque en Dolan B. (2005), diseño de un *gain scheduling controller (GSC)* para aeronaves de guerra para mejorar el ángulo de ataque como expone Oosterom M. y Babus R. (2006), análisis comparativo entre controladores no lineales y *GSC* aplicado al control de aeronaves, Wang J. y Sundararajan N. (1994).

En lo que se refiere a control de nivel referenciamos a Youssef y R. Hui P. (2007), quienes presentan un control tolerante a fallas basado en un controlador de modo deslizante. El diseño de un controlador PID autosintonizado, estructurado en modelo

adaptativo de red neuronal que exponen Chang K. y Yu D. (2005), diseño de un controlador usando la técnica de control adaptativo por ganancias programadas de Franco E., Pinedo C. y Naranjo F. (1996), finalmente se citan los trabajos implementados en la planta *MPS PA. Compact Workstation*, que se enfocan en la evaluación del desempeño de un controlador predictivo tolerante a fallos en Carpio M. (2013), y el diseño de un controlador PID clásico en Idrovo A. Peña M. (2014), en donde se realiza la identificación de la planta mediante los métodos experimental y analítico.

En la revisión de esta bibliografía se observa el estado del arte desarrollado sobre controladores tolerantes a fallas con la técnica de *GSC*, sin embargo no se ha identificado un trabajo que compare exclusivamente un controlador difuso con ganancias programadas con un control clásico, por lo que se considera a esta investigación de gran interés.

## 1.2. Motivación y justificación

Debido a los altos estándares de calidad que exigen las normas internacionales a la industria, se ve la necesidad de implementar controladores sofisticados que garanticen el correcto funcionamiento del proceso.

En la actualidad la mayoría de controladores son del tipo clásico PID, este tipo de controladores realizan un buen trabajo para reducir el error del sistema, pero muestran una clara deficiencia cuando se le presentan perturbaciones externas. Otra limitante de este controlador es que su funcionamiento depende de la sintonización de las ganancias proporcional, derivativa e integral.

Por otro lado el controlador de ganancias programadas con lógica difusa, nos permite manejar y procesar información de manera similar como lo hace un experto humano, a través de la implementación de una serie de reglas, y una máquina de inferencia.

Existen varios estudios comparativos entre estos tipos de controladores, que coinciden en una supremacía del controlador de ganancias programadas con lógica difusa (no tolerante a falla) sobre el PID, por lo que el presente trabajo tiene como uno de sus objetivos corroborar este análisis mediante la implementación del algoritmo difuso en el MPS PA. Compact Workstation.

## 1.3. Descripción del problema

Debido a la creciente evolución de plantas, industrias y empresas que se encargan de procesos con líquidos, es necesaria la implementación de sistemas de producción más eficientes y con altos estándares de calidad, esto implica optimizar los diferentes recursos, como son la materia prima, tiempo de producción y mano de obra.

En la actualidad existe la necesidad de implementar algoritmos para control de nivel sofisticados como el *GSC* tolerante a falla, que garanticen el correcto funcionamiento del proceso, efectuando así una detección temprana de fallos, que es fundamental para minimizar el tiempo de inactividad por daños.

El *GSC* es una técnica de control difuso para sistemas no lineales que se basa en el conocimiento de un experto, para lo cual se hace necesario un conocimiento a priori sobre el funcionamiento de la planta.

## 1.4. Objetivos

### 1.4.1. Objetivo general

Diseñar e implementar un controlador difuso tolerante a falla mediante la técnica de *gain scheduling* para el control de nivel de un tanque.

### 1.4.2. **Objetivos específicos**

- Identificar el modelo matemático de la planta del MPS PA. Compact Workstation.
- Realizar el diseño del controlador de ganancias programadas *GSC* tolerante a falla.
- Implementar el controlador difuso en la planta del MPS PA. Compact Workstation.
- Identificar diferentes escenarios de fallas durante el proceso.
- Evaluar el comportamiento del controlador difuso, sometiendo el proceso a múltiples fallas.
- Comparar la eficiencia del controlador difuso con controladores de trabajos anteriores.

## **1.5.** Alcances y limitaciones

Se diseñará un controlador difuso tolerante a falla con la técnica de *gain scheduling* para un proceso de control de nivel de líquido en el *MPS PA*. *Compact Workstation*, del cual se obtendrá el modelo matemático de la planta para la posterior simulación en el software de *simulink* de *MATLAB*.

Se realizará un control tolerante a falla del hardware, específicamente de la bomba, el control de fallas del software no se realizará por falta de recursos, además no está contemplado en los objetivos de la presente tesis.

Se implementará el controlador difuso en el *MPS PA*. *Compact Workstation*, mediante la interfaz de *LABVIEW*, sometiéndole a fallas controladas y midiendo su rendimiento.

Se analizarán los resultados obtenidos al implementar el controlador difuso en el módulo, estableciendo las ventajas y desventajas de este controlador sobre un controlador clásico.

## CAPÍTULO 2

# 2. CONTROL DE NIVEL DE LÍQUIDO

La finalidad del control de nivel es conseguir exactitud en la cantidad de líquido, en un rango preestablecido de un sistema de tanques o recipientes, para esto es necesario la inclusión de sensores que retroalimenten al controlador con el estado actual de nivel del recipiente y actuadores mediante los cuales se modifique la cantidad de líquido que se almacena en determinado depósito.

En el presente capítulo se describen los conceptos necesarios para el diseño e implementación del *GSC* tolerante a falla, como son la medición de nivel y válvulas de control. También se realiza la descripción de la planta en la cual será implementado el controlador, analizando el lazo de control e identificando los posibles escenarios de falla. Finalmente se describe las diferentes formas de obtener el modelo matemático de la planta el cual servirá para diseñar y simular el controlador.

## 2.1. Medición de nivel

La medición de nivel es una parte fundamental del sistema de control, ya que todo controlador de lazo cerrado se basa en la retroalimentación del sistema, debiéndose entonces garantizar la correcta medición de la variable a controlar. Actualmente con el desarrollo tecnológico se han diversificado los tipos de sensores de nivel, estos se podrían clasificar por su método de medición o por su tipo de construcción.

### 2.1.1. Método de medición directa

- Método de medidor de sonda
- Método de medidor de cinta y plomada
- Método de medidor de nivel de cristal
- Método de medidor flotante

### 2.1.2. Método de medición indirecta

- Método de medidor por presión hidrostática
- Método de medidor de diafragma
- Método de medidor actuado por desplazamiento

## 2.1.3. Método por las características eléctricas del líquido

- Método de medidor resistivo
- Método de medidor capacitivo
- Método de medidor inductivo
- Método de medidor ultrasonido
- Método de medidor radiación
- Método de medidor laser

## 2.2. Válvulas de control

## 2.2.1. Definición de válvula de control

Es un dispositivo final de control que se encarga de variar el flujo de un fluido que circula por un canal o tubería, modificando a su vez el valor de la variable medida, comportándose como un orificio de área continuamente variable.

El cuerpo de la válvula contiene en su interior el obturador y los asientos, estando provistos de rosca o de bridas para conectar la válvula a la tubería. El obturador es quien realiza la función de paso del fluido y puede actuar en la dirección de su propio eje o bien tener un movimiento rotativo. Está unido a un vástago que pasa a través de la tapa del cuerpo y que es accionado por el servomotor fisicanet (2006).

## 2.2.2. Tipos de válvulas

Existen diferentes criterios para clasificar válvulas, ya sea por su principio de funcionamiento, por la operatividad del obturador o por la naturaleza y condiciones físicas del fluido. En este trabajo se las clasificará de acuerdo a su función según la norma *DIN/ISO 1219* conforme a una recomendación del *CETOP* y una clasificación de acuerdo al tipo de cuerpo de la válvula.

## 2.2.2.1. Clasificación según su función

- Válvulas de vías o distribuidoras
- Válvulas de caudal
- Válvulas de bloqueo
- Válvulas de cierre
- Válvulas de presión

## 2.2.2.2. Clasificación según el tipo de cuerpo de la válvula



**Figura 1.** Clasificación de las válvulas de control según el tipo de cuerpo de la válvula. **Fuente:** Rodas A. (2011).

## 2.3. Descripción del sistema MPS PA Compact Workstation

### 2.3.1. Descripción del sistema

El módulo didáctico *MPS PA. Compact Workstation* que se muestra en la Figura 2, dispone de cuatro lazos de control integrados. Los lazos de control de nivel y de caudal pueden configurarse como regulación en cascada mediante un controlador adecuado.

El diseño de los sensores y actuadores permite experimentar con controladores tanto continuos (p. ej., P, I, PI, PID) como discontinuos (p. ej., reguladores de 2 puntos). La bomba puede operarse con mando directo o con control de las revoluciones.

En los sistemas de control de caudal y de presión, la magnitud de ajuste del controlador actúa también sobre una válvula posicionadora. En el retorno entre el tanque elevado y el depósito de reserva inferior está instalada una válvula de bola de 2 vías con actuador neumático. La válvula se puede emplear para simular un "consumidor" a fin de activar magnitudes perturbadoras en el tramo de control de nivel Festo (2014).



Figura 2. Planta didáctica Festo MPS PA. Compact Workstation. Fuente: Festo (2014).

## 2.3.2. Características principales

Mecánica: 2 depósitos de 10 litros, un acumulador, sistema de tubos enchufable, bastidor de montaje, panel de prácticas perfilado.

Técnica de sensores: 2 sensores capacitivos, 2 interruptores de flotador, sensor ultrasónico, sensor de caudal de 0.3-9 L/min, sensor de presión de 0-10v, sensor de temperatura PT100 con un rango de -50 a 150 grados centígrados.

Actuadores: Bomba con un rango de control de 0-10 v, válvula posicionadora, válvula de bola con actuador neumático para procesos, calefacción.

Sistema eléctrico: Placa de conexión E/S con transformador de medición, regulador de motor, terminal de E/S SysLink, 8E/8S, terminal analógico SysLink.

#### 2.3.3. Diagramas de flujo

En la Figura 3 se describe el P&ID completo del sistema *MPS PA Compact Workstation*, en donde se observa los lazos de temperatura, presión, nivel, y caudal, los cuales pueden trabajar de forma individual o en conjunto.

También se observa que los tramos individuales de control pueden activarse mediante un cambio sencillo de las válvulas de bola. El sistema flexible de tuberías permite cambiar rápidamente el diagrama de flujo o integrar otros componentes.



**Figura 3.** *Diagrama de flujo del proceso.* **Fuente:** *Festo (2014).* 

## 2.4. Descripción del lazo de control

El lazo de control está compuesto de los siguientes sensores y actuadores como se indica en la Figura 4 y se describen a continuación:



Figura 4. Lazo para el control de nivel. Fuente: Autor.

Bomba de control centrifuga PUMP 101, esta se encargará de llevar el líquido desde el tanque BINN 101 a través del sistema de tuberías, el tipo de control sobre esta bomba puede ser digital (encendido-apagado) o analógico, tiene un rango de funcionamiento de 0 a 5 L/min.

Sensor de flujo B102, la velocidad de flujo es proporcional al caudal y se detecta sin contacto a través del sistema optoelectrónico acoplado, tiene un rango de operación de frecuencia entre los 40 y 1200 Hz, caudal 0.3 a 0.9 L/min.

Electroválvula V106, es una válvula de bola normalmente cerrada, tiene un accionamiento eléctrico mediante un solenoide, tipo de funcionamiento abierto/cerrado, puede trabajar en un rango de presión de 3 a 8 bares.

## 2.5. Escenario de falla

#### 2.5.1. Características

Se considera a una falla como un error en el funcionamiento de un componente, ya sea causado por un error de diseño, construcción, programación, daño físico, entre otros. Dicha falla puede desencadenar diferentes escenarios, simples como imprecisiones en el comportamiento normal del sistema o fatales como las denominadas fallas catastróficas.

El objetivo del control tolerante a falla, es garantizar el correcto funcionamiento del sistema, supervisando las posibles fallas que pudieran presentarse durante el proceso y de ser posible modificar los parámetros de control para que el sistema no se desestabilice con la presencia de dicha falla. El método general para la tolerancia a falla es el uso de redundancia, existen tres tipos

- Redundancia de información
- Redundancia del tiempo
- Redundancia física

#### 2.5.2. Especificaciones de confiabilidad

El grado o nivel de tolerancia a fallas requeridas por un sistema, puede explicarse de una forma cuantitativa o cualitativa.

Cuantitativa. Hace mención a la relación de fallas máximas permitidas.

*Cualitativa.* Se especifican de una forma cualitativa las características de confiabilidad:

- *Fail-safe*. Al presentarse alguna falla, el sistema es enviado a modo fallo seguro.
- *Fail-op*. Al presentarse alguna falla, el sistema mantiene activo un porcentaje de su procesamiento normal o se comporta de una manera programada.
- *Sin acción ante falla.* El sistema sigue con su funcionamiento, sin importar el número de fallas que se presenten en el sistema.

### 2.5.3. Clasificación de fallas

Se considera una falla como la avería de un componente del sistema, la avería de un subsistema del sistema o una avería de un sistema que ha interactuado con el sistema considerado.

Estas fallas se clasifican de acuerdo a tres criterios, por su localidad, por su efecto y por su causa, como se detalla en la Figura 5.



Figura 5. Clasificación de las fallas. Fuente: Autor.

### 2.5.3.1. Clasificación de fallas por su localidad

- *Fallas de componentes atómicos*. Está ubicado en el piso de fallas, este es un componente que no puede dividirse para su análisis.
- *Fallas de componentes compuestos.* Esta falla se presenta en una serie de componentes atómicos.
- *Fallas a nivel de sistema.* Esta falla aparece en la estructura del sistema más que en sus componentes.

#### 2.5.3.2. Clasificación de fallas por su efecto

- *Fallas de Datos.* Una falla de dato ocurre cuando un cómputo devuelve un dato que no cumple la especificación del sistema.
- *Fallas de Tiempo*. Se produce cuando un proceso o servicio no concluye dentro de un tiempo estipulado.

### 2.5.4. Administración de la redundancia

La administración de la redundancia es una parte fundamental para el diseño del controlador tolerante a fallos, esta evalúa los recursos sin fallas para proveer un resultado correcto. Para efectuar una correcta administración de la redundancia se deben efectuar las siguientes acciones, como se indica en la Tabla 1.

Acción	Características
Detección de Fallas	El proceso de determinar que ha ocurrido una falla.
Diagnóstico de Fallas	El proceso de determinar qué causó la falla, o exactamente qué subsistema o componente es el defectuoso.
Represión de Fallas	El proceso que previene la propagación de fallas desde su origen en un punto en el sistema a un punto donde puede tener efectos en el servicio al usuario.
Enmascaramiento de Fallas	El proceso de asegurar que sólo valores correctos pasarán a los límites del sistema a pesar de un componente fallado.
Compensación de Fallas	Si una falla ocurre y está confinada a un subsistema, puede ser necesario que el sistema provea una respuesta para compensar la salida del subsistema defectuoso.
Reparación de Fallas	El proceso en el cual las fallas son quitadas del sistema. En sistemas tolerantes a fallas bien diseñados, las fallas se reprimen antes de que se propaguen al extremo de que la provisión del servicio del sistema se vea afectada. Esto deja una porción de sistema inutilizable por fallas residuales. Si ocurren fallas subsecuentes, el sistema puede ser incapaz de hacer frente a la pérdida de recursos, a menos que estos recursos sean recuperados a través de un proceso de recupero el cual asegure que no quedan fallas en los recursos o en el estado del sistema.

Tabla 2.Acciones para Administrar la Redundancia.Fuente:Rogina P. (1999).

#### 2.5.5. Tolerancia a falla en sensores y actuadores

Los sensores y actuadores forman parte del hardware del sistema, colocándose así en la parte más baja de los niveles de jerarquía de control. La falla de sensores y actuadores afectan el control de bajo nivel, ya que los sensores virtuales usan las mediciones de los sensores reales (físicos) para realizar los respectivos cálculos y así retroalimentar al controlador.

Esto deja abierta la posibilidad que se pueda afectar también al control de alto nivel, ya que si existe una mala referencia en el cálculo de los sensores virtuales, también se verá afectado el control en sus niveles superiores.

#### 2.5.5.1. Esquema de diagnóstico y aislamiento de fallas basado en un observador

Según el criterio de Chen J. y Patton R. (1999), los sistemas de detección de fallas pueden clasificarse por el número de observadores.

Un observador

• Observadores de orden completo *Simplified Observer Scheme (SOS)*/orden reducido.

Banco de Observadores

- Dedicated Observer Scheme (DOS), orden (reducido/completo)
- *Generalized Observer Scheme (GOS)*, orden (reducido/completo)

De acuerdo al tipo de falla, los esquemas de diagnóstico se clasifican en:

- Falla en sensores Instrument Fault Detection (IFD)
- Falla en actuadores Actuator Fault Detection (AFD)
- Falla en componentes *Component Fault Detection (CFD)*

## 2.6. Obtención del modelo matemático del sistema

#### 2.6.1. Definición del sistema

Según lo expuesto en López M. (2008), un sistema es toda realidad en la que interactúan variables de diferentes tipos para producir señales observables. Las señales observables que son de interés para el observador se denominan salidas del sistema, mientras que las señales que pueden ser manipuladas libremente por dicho observador son las entradas del mismo.

El resto de señales que influyen en la evolución de las salidas pero no pueden ser manipuladas por el observador se denominan perturbaciones, en la Figura 6 se observa el esquema de un sistema dinámico compuesto por una entrada u(t), la perturbación representada por e(t) y salida y(t).



**Figura 6.** Sistema dinámico con entrada u(t), perturbación e(t) y salida y(t). **Fuente:** López M. (2008).

#### 2.6.2. Modelo del sistema

Para efectuar el control de un sistema es necesario encontrar un modelo matemático que lo represente, este modelo está compuesto de una o varias ecuaciones que describen el comportamiento del sistema, por lo tanto existe más de una forma de representar la misma dinámica del sistema.

El modelo puede representarse por ecuaciones de estado o por la función de transferencia. Existen dos métodos básicos para la identificación de modelos, la identificación analítica y la identificación experimental.

#### 2.6.2.1. Identificación analítica

Se trata de un método analítico, en el que se recurre a leyes de la física fundamentales, para describir el comportamiento dinámico del sistema, existen algunas restricciones para implementar este método, ya que hay sistemas que no pueden ser modelados a través de las leyes que lo rigen, ya sea por su complejidad o porque se desconocen las leyes físicas que los representa.

Otra desventaja de este método, es que el modelo obtenido está en función de parámetros desconocidos que solo pueden determinarse a través de experimentación sobre el sistema físico, por lo que este método es utilizado en sistemas sencillos que no requieran mayor exactitud en el modelo obtenido.

#### 2.6.2.2. Identificación experimental

Se trata de un método experimental que permite obtener el modelo de un sistema a partir de datos de entrada y salida reales aplicados a la planta, este método incluye cuatro pasos:

- Adquisición de datos de entrada-salida bajo un protocolo experimental
- Selección o estimación de la estructura del modelo
- Estimación de los parámetros del modelo
- Validación del modelo identificado

La desventaja de este método radica en que el modelo obtenido tiene un rango de validez limitado, este rango está en función de la gama de valores de entrada con los que se experimenta para obtener el modelo. En la identificación por el método experimental, la validación es obligatoria ya que nos ayuda a concluir si el modelo identificado caracteriza correctamente el comportamiento del sistema real, en la Figura7 se propone una metodología para el proceso de identificación de sistemas.



Figura 7. Metodología para identificación de sistemas. Fuente: Bravo D. Rengifo C. (2011).

#### 2.6.3. Identificación paramétrica del modelo del sistema

La identificación paramétrica consiste en obtener un modelo discreto cuya estructura está compuesta de parámetros desconocidos, para lo cual se deberá tener en cuenta una cierta estructura para el modelo. La identificación de los parámetros se calcula minimizando ciertos errores entre el modelo y el sistema, el método más utilizado para la identificación paramétrica es el de mínimos cuadrados recursivos.

El método de mínimos cuadrados se caracteriza por poseer una serie de propiedades estadísticas muy convenientes, además de ser fácil implementar para que trabaje de una forma recursiva, esto permite que el modelo pueda ser obtenido en línea.

Para la obtención del modelo se plantea una estructura llamada *Auto Regressive* eXogen (*ARX*), que representa de una forma simplificada un sistema, que tiene una entrada u(k) y una salida y(k), con ruido aditivo v(k) y P denota las propiedades dinámicas del sistema como se indica en la Figura 8.



Figura 8. Descripción del modelo ARX. Fuente: Autor.

De manera explícita la estructura del modelo ARX se puede representar como:

$$y(k) = a_1 y(k-1) + \dots + a_n y(k-na) + b_0 u(k-d) + b_1 u(k-1-d) + \dots + b_m u(k-nb-d)$$
(1)

Esto da lugar a un sistema de ecuaciones donde las incógnitas a representan los coeficientes de la salida y(k) retrasados n muestras, b representan los coeficientes de la entrada u(k) retrasados m muestras, el retardo del sistema está representado por d.

Donde las incógnitas  $a \ y \ b$  serán los coeficientes de la función de transferencia discreta, los que se obtienen según el método de mínimos cuadrados, el cual minimiza la suma de los cuadrados de la parte izquierda con respecto a los coeficientes  $a \ y \ b$ . La obtención de los coeficientes mediante el método de mínimos cuadrados, se realiza con la función de *ARX* en el software de *MATLAB*.

$$G(z^{-1}) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_m z^{-m}}{1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_n z^{-n}}$$
(2)

En el presente trabajo se someterá el sistema a una señal binaria pseudoaleatoria (*PRBS*), en la entrada u(k), para obtener la respuesta del sistema y(k) en cada instante de tiempo k, ya que por sus características la señal *PRBS* maximiza la varianza cuando la amplitud es limitada y su función de autocorrelación se aproxima a la del ruido blanco.

La señal *PRBS* es generada con *N* bits de registro de corrimiento y una función lógica *XOR* en la retroalimentación que toma el dato de salida y algún otro anterior de manera que sea muy difícil repetir una secuencia como se muestra en la Figura 9.



Figura 9. PRBS con cinco celdas. Fuente: Autor

Para aplicar de forma correcta la señal *PRBS* en la identificación del sistema se debe tomar en cuenta el tiempo de duración de la prueba y el tiempo de establecimiento del sistema, para determinar el número de bits de corrimiento.

La longitud de la señal de prueba PRBS está dada por:

$$L = 2^N - 1 \tag{3}$$

Para garantizar el correcto funcionamiento de la señal pseudoaleatoria debe cumplirse:

$$t_r = \mathrm{NT}_\mathrm{S} \tag{4}$$

Donde  $T_s$  es la mínima duración del pulso y  $t_r$  es el tiempo de establecimiento del sistema.
#### 2.7. Adquisición de datos

Para la adquisición de datos de la planta *MPS PA*. *Compact Workstation* se utiliza la tarjeta de datos *EasyPort USB de Festo*, la interfaz USB se conecta directamente al PC, la conexión de la tarjeta hacia los componentes de la planta se realiza mediante acoples rápidos SysLink, estableciendo así la comunicación bidireccional entre la planta y el computador.

La tarjeta *EasyPort USB* está compuesta por una fuente de voltaje de 24V a través de bornes atornillados, la interfaz con el computador se realiza mediante protocolo USB o RS232, y a través de un hub pueden conectar hasta 4 módulos con una velocidad de transmisión de 115 kBaud. Posee además una interfaz analógica SUB-D, 7 entradas digitales, 5 salidas digitales, 4 entradas analógicas, 2 salidas analógicas.

### CAPÍTULO 3

## 3. DISEÑO DEL CONTROLADOR DIFUSO TOLERANTE A FALLA.

El presente capítulo está enfocado al diseño del controlador no lineal tolerante a falla, mediante la técnica de *gain scheduling* y lógica difusa, para lo cual fue necesario realizar la identificación del modelo de la planta, el cual es obtenido de una manera analítica y experimental para corroborar resultado.

También se plantea los escenarios de falla a los que está expuesto el sistema. Para este caso se tomó en consideración exclusivamente escenarios de falla en el actuador, que es la bomba que se encarga del suministro del líquido al tanque BINN 102.

Finalmente se detalla el diseño de un caudalímetro virtual, que es usado para describir un escenario de falla cuando no se cuenta con un caudalímetro físico, para lo cual se implemento el uso del filtro de *Savitzky-Golay*, que se utilizó para obtener y suavizar la derivada del volumen.

### 3.1. Identificación de la planta

La identificación del modelo del sistema se tomó de la investigación de Idrovo A. Peña M. (2014), en el cual se propone implementar un controlador lineal PID para el sistema *MPS PA. Compact Workstation* del laboratorio de la Universidad Politécnica Salesiana.

En el mencionado trabajo los autores proponen obtener el modelo de la planta de forma analítica y experimental, las cuales se describirán brevemente a continuación.

#### 3.1.1. Identificación experimental

Mediante un programa desarrollado en *LABVIEW*, se adquieren los datos de la tarjeta de interfaz *Festo Easy Port USB*. Como se describió en secciones anteriores, esta tarjeta se encarga de la comunicación entre la planta y el controlador. La planta es sometida a una señal pseudoaleatoria *PRBS* y los datos que se obtienen como respuesta del sistema, se guardan en un registro del computador, para luego realizar la identificación respectiva.

Para realizar una correcta identificación del modelo se deberá tener en cuenta el periodo con el cual se genera la señal *PRBS*. Para la identificación del período, el autor propone obtener este valor de la respuesta del sistema a lazo abierto, el cual resultó en un valor de 15.42 segundos.

Según Dasgupta D. Michalewicz Z. (1997), recomienda que para sistemas no lineales, se debe aplicar la señal pseudoaleatoria alrededor de un punto de equilibrio, variando la amplitud en +/- 5% del voltaje de alimentación del sistema.



Figura 10. Señal PRBS y Respuesta del Sistema en Lazo de Nivel Fuente: Idrovo A. Peña M. (2014).

Posteriormente, el registro de los datos de entrada y la respuesta del sistema de la Figura 10, se ordenan de tal forma que se pueda realizar el proceso de identificación, para esto se utiliza el *toolbox ident* de *MATLAB*, obteniendo así la siguiente función de transferencia, que representa la salida de caudal en respuesta a una entrada de voltaje aplicada al motor de la bomba.

$$G(s) = \frac{0.02258}{s + 0.004843} \tag{5}$$

La respuesta al escalón del modelo identificado de la planta se muestra en la Figura11, en la cual se observa, que el tiempo de establecimiento del sistema es de 808 segundos y se estabiliza a una altura de 45 mm, con un sobrepico de 0 %.



Figura 11. Respuesta al escalón del modelo obtenido mediante experimentación. Fuente: Autor.

#### 3.1.2. Identificación analítica

Para la identificación analítica se considera en primer lugar un tanque de área constante, el cual se llena mediante la bomba b1 y se vacía por medio de un desfogue ubicado en la parte inferior del tanque, como se muestra en Figura12. Posteriormente se ajusta el modelo, reemplazando el tanque de área constante por el modelo real de área variable que posee la planta, como se indica en la Figura 14.

El problema consiste en controlar el nivel en el tanque BINN 102, actuando sobre la velocidad del motor de la bomba PUMP101, variando así el caudal de ingreso  $q_i$ . El tanque tiene un desfogue en la parte inferior el cual está representado como caudal de salida  $q_o$ .



Figura 12. Esquema del tanque con superficie constante. Fuente: Autor.

Haciendo un balance de materias en el tanque se obtiene:

$$\frac{dm}{dt} = \rho_1 q_i - \rho_2 q_o \tag{6}$$

$$\frac{dm}{dt} = \frac{d(A(t)h(t))}{dt} = q_i - q_o \tag{7}$$

donde:

- *A* Es la superficie del nivel de líquido.
- $q_i$  Caudal de entrada.
- $q_o$  Caudal de salida.
- $\hat{h}$  Altura del líquido respecto a la salida del flujo.
- $h_2$  Altura del líquido antes que el nivel supere la tubería del suministro.

Basándose en el teorema de Bernoulli se plantean las siguientes ecuaciones, que representan el balance de energía

$$\frac{dE}{dt} = \frac{dE_1}{dt} - \frac{dE_2}{dt} \tag{8}$$

$$P1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho gh_1 = P2 + \frac{1}{2}\rho v_{12}^2 + \rho gh_2$$
(9)

$$P1 + E_{c1} + E_{p1} = P2 + E_{c2} + E_{p2}$$
(10)

donde:

- P Presión a lo largo de la línea de flujo
- $\rho$  Densidad del fluido
- v Velocidad del fluido
- g Aceleración gravitatoria
- $E_p$  Energía potencial
- $E_c$  Energía cinética

Si se asume que  $P_1$  y  $P_2$  son iguales, y se descarta la presencia de energía cinética en el tanque BINN 102, el valor de la velocidad  $v_1$  estaría dada por:

$$v_1 = \sqrt{2g(h_2 + 220 - h_1)} \tag{11}$$

En donde la constante 220 es la distancia en mm existente entre los dos tanques, como lo indica la Figura 3. Debido a que el presente trabajo está enfocado en el control de nivel del tanque BINN 102 se reemplaza el valor de h1, teniendo en cuenta la siguiente relación

$$h_1 = h_0 - h_2$$

$$v_1 = \sqrt{2g(2h_2 + 220 - h_0)}$$
(12)

El caudal de salida  $q_0$  está representado por la velocidad del fluido (8), multiplicada por la sección del agujero del desfogue en donde *r* es el radio de la tubería

$$s = \pi r^2$$

$$q_0 = \pi r^2 \sqrt{2g(2h_2 + 22 - h_0)}$$
(13)

Para el cálculo del caudal de ingreso  $q_i$ , se consideran dos escenarios, el primero cuando el nivel del líquido en el tanque es menor a  $h_2$ ', en donde el caudal de ingreso es constante y el segundo cuando el nivel haya superado  $h_2$ ', en donde el caudal de ingreso varía en función de la altura.

Para el presente trabajo se considera como zona de control el segundo escenario, por lo que se analiza el comportamiento del caudal de ingreso en función de la altura del tanque.

Para determinar el valor real de  $q_i$  se utilizan las gráficas proporcionadas por el fabricante y se muestran en la Figura 13. En estas se detallan el caudal en función de la altura cuando la bomba está alimentada con 10 V.



Figura 13. Curva del flujo de ingreso en función de la altura. Fuente: Idrovo A. Peña M. 2014.

En donde el caudal de ingreso en función de la altura está expresado como

$$q_i = q_i' - 0.376h + 1.5792 \text{ (cm}^3/\text{s)}$$
 (14)

Expresando el valor  $q_i$  en términos del voltaje que alimenta la bomba, el caudal de ingreso total está representado como:

$$q_i' = 7.9365 * v$$
  
 $q_i = 7.9365 * v - 0.376h + 1.5792 \text{ (cm}^3/\text{s)}$  (15)

Para el cálculo del volumen del tanque BINN102 se considera que la superficie del nivel no es constante, debido a la forma del tanque, la cual se muestra en la Figura 14, resultando así una superficie variable en función de la altura.



Figura 14. Tanque de superficie variable. Figura 14: Autor.

$$A = \left(b + 2\frac{B-b}{H}h(t)\right)^2$$
(16)

donde:

- *b* Longitud de la base del tanque
- *B* Longitud de la parte superior del tanque
- *H* Altura total del tanque
- h Altura del líquido

$$V = \frac{h}{3} \left( A + A_{base} + \sqrt{A A_{base}} \right)$$
(17)

Reemplazando 16 en la 17 y derivando respecto al tiempo obtenemos el cambio de volumen respecto al tiempo

$$V = h(t)b^{2} + 2\frac{B-b}{H}bh(t)^{2} + \frac{4}{3}\left(\frac{B-b}{H}\right)^{2}h(t)^{3}$$
(18)

$$\frac{dV}{dt} = \left(b^2 + 4\frac{B-b}{H}bh + 4\left(\frac{B-b}{H}\right)^2h^2\right)\dot{h}$$
(19)

Relacionando las ecuaciones de balance de masa (7) y energía (13), (14), se obtiene:

$$\frac{dV}{dt} = q_i(t) - q_o(t)$$

$$\frac{dV}{dt} = (7.9365 * v - 0.376h + 1.5792) - (q_0 \pi r^2 \sqrt{2g(2h_2 + 22 - h_0)})$$
(20)

Reemplazando (19) en la ecuación (20) se obtiene:

$$\frac{dV}{dt} = \left(b^2 + 4\frac{B-b}{H}bh + 4\left(\frac{B-b}{H}\right)^2h^2\right)\dot{h}$$
$$\frac{dV}{dt} = q\dot{i}(t) - \left(q_0\pi r^2\sqrt{2g(2h_2 + 22 - h_0)}\right)$$
(21)

$$\dot{h} = \frac{7.9365 * \nu - 0.376h + 1.5792 - \pi r^2 \sqrt{2g(2h_2 + 22 - h_0)}}{b^2 + 4\frac{B - b}{H}bh + 4\left(\frac{B - b}{H}\right)^2 h^2}$$
(22)

Estableciendo un punto de operación en h = l, obtenemos como resultado la siguiente ecuación que relaciona el voltaje de la bomba con la altura.

$$v = \pi r^2 \sqrt{2g(2h_2 + 22 - h_0)} + 0.376 * h - 1.5792$$
(23)

Se linealiza el modelo para obtener las matrices de estados que gobiernan el sistema.

$$\frac{\partial f \, \mathbf{1}(h, v)}{\partial h}_{l, v_l} = \boldsymbol{A}_{\boldsymbol{m}} \tag{24}$$

$$\frac{\partial f \, \mathbf{1}(h, v)}{\partial v}_{l, v_l} = \boldsymbol{B}_{\boldsymbol{m}} \tag{25}$$

La representación en espacio de estados del sistema está en función de la altura y del voltaje en la bomba:

$$\dot{h} = A_m h + B_m \nu \tag{26}$$

$$y = h \tag{27}$$

La función de transferencia del sistema se obtiene mediante la siguiente ecuación.

$$G(s) = \boldsymbol{B}_{\boldsymbol{m}}(s \boldsymbol{I} - \boldsymbol{A}_{\boldsymbol{m}})^{-1}$$
(28)

Los datos de las constantes del tanque son: Altura Total H=350 mm Base menor b=170 mm Base mayor B= 190 mm Diámetro de salida D=3.5 mm

En el Anexo 1 se detalla el programa con el que se linealiza y se obtiene la función de transferencia del sistema de primer orden, que representa el nivel de líquido en el tanque, en respuesta a una variación de voltaje en la bomba.

$$G(s) = \frac{Hs(s)}{Hi(s)} = \frac{0.02351}{s + 0.004874}$$
(29)

La Figura 15 muestra la respuesta del sistema identificado analíticamente cuando se le aplica un escalón, en ella se observa la similitud que tiene con la gráfica del modelo que se obtuvo con el método de experimentación, validando así el modelo encontrado.



Figura 15. Respuesta al escalón del modelo encontrado analíticamente. Fuente: Autor.

# **3.2.** Descripción del controlador difuso de ganancias programadas

#### 3.2.1. Controlador de ganancias programadas

Un controlador de ganancias programadas, es un tipo de control adaptativo que es muy útil para sistemas que poseen modelos no lineales. Esta técnica se basa en el diseño de controladores lineales locales, que realizan un control adecuado en diferentes puntos de funcionamiento del sistema no lineal, ajustando sus parámetros de acuerdo a las características de la dinámica del sistema.

Para el diseño de este controlador es fundamental conocer la dinámica del sistema, y los cambios que presenta al moverse del punto de operación, esto permite diseñar los controladores lineales locales para cada tramo de la dinámica.

Para la programación de los parámetros del controlador lineal se utiliza una o más variables llamadas variables de ajuste o variables programadoras, las cuales son las encargadas de definir los parámetros del controlador en función de la zona de trabajo en que se encuentre el sistema.

Es de gran importancia la elección de la variable de ajuste, ya que es la encargada de decidir sobre el cálculo de los parámetros que ajustan el controlador, la variable de ajuste deberá reflejar la dinámica del sistema, además deberá estar bien correlacionada con los cambios en la misma.

En la Figura 16 se muestra un esquema de un controlador con ganancias programadas, donde se describe la forma como se modifica los parámetros de un controlador lineal, para que trabaje como un controlador no lineal dependiendo de la zona de trabajo en la que se encuentre.



Figura 16. Esquema de un controlador con ganancias programadas. Fuente: Autor.

A continuación en la Figura 17 se propone un esquema para el diseño del controlador de ganancias programadas, en el cual, el primer paso es definir la variable de ajuste que represente la dinámica del sistema, esta deberá variar lentamente y capturar las no linealidades del sistema.

Luego hay que definir los puntos en los que va a operar el sistema, delimitando así las zonas lineales en las que se divide el sistema no lineal.

Los controladores lineales serán diseñados para las zonas antes definidas, la ventaja de los controladores de ganancias programadas es que se puede escoger entre varios tipos de controladores lineales como es el PID clásico, entre otros.

Finalmente se obtendrá un controlador no lineal, formado por un controlador lineal de ganancias programadas, el cual se simulara para validar el rendimiento del controlador y posteriormente se implementará en la planta real.



Figura 17. Proceso para diseñar un controlador de ganancias programadas. Fuente: Autor.

#### 3.2.2. Controlador de ganancias programadas con lógica difusa

En los controladores de ganancia programada es muy importante el mecanismo que se utilice para la programación de los parámetros del controlador, este mecanismo deberá incluir el conocimiento de la dinámica de la planta para calcular y aplicar los parámetros necesarios para el óptimo funcionamiento del controlador.

En este trabajo, se enfocará la programación de los parámetros mediante el método de lógica difusa, ya que su principio de funcionamiento trabaja bastante bien con sistemas no lineales, los cuales son difíciles de modelar matemáticamente. La lógica difusa está basada en el conocimiento de un experto por lo que es necesario un conocimiento a priori del funcionamiento de la planta.

La Figura 18 muestra un esquema de un sistema difuso, que está compuesto de un *fusificador* que modifica las entradas de forma que puedan ser interpretadas y comparadas en el conjunto de reglas difusas, el *mecanismo de inferencia*, que evalúa qué reglas de control son relevantes en ese instante, el *conjunto de reglas* que poseen el conocimiento, estas reglas tienen la forma de condición (si-entonces) que utilizan para representar el conocimiento del experto y la *interfaz de defusificación* que es la conclusión difusa a la que llega el sistema, mediante una variable lingüística cuyos valores han sido asignados por grados de pertenencia, para posteriormente asignar un valor escalar que corresponda a estos grados de pertenencia.



Figura 18. Esquema de un sistema difuso. Fuente: Autor.

Se propone para esta investigación diseñar un controlador PID lineal autosintonizado con ganancias programadas con el método de lógica difusa. Este controlador está compuesto por un PID y un sistema difuso que varía sus parámetros en línea mediante su base de reglas difusas. En la Figura 19 se representa dicho sistema de control, como lo expone Juran J. Hengshuo H. Junman S. Yongchao P. (2013).



Figura 19. Control PID de ganancias programadas mediante lógica difusa. Fuente: Autor.

#### **3.3. Diseño del controlador PID con ganancias programadas con lógica difusa**

Una vez obtenido el modelo del sistema, se procede a diseñar el controlador de ganancias programadas, partiendo del diseño de un controlador lineal PI, el cual se sintoniza en diferentes zonas de trabajo del sistema no lineal, obteniendo así las ganancias kp, ki y kd, que nos servirán para elaborar el sistema de ganancias programadas mediante lógica difusa.

#### 3.3.1. Diseño del controlador PI

El diseño del controlador lineal se lo realiza para una zona de trabajo específica y se lo sintoniza mediante la herramienta *sisotool* de *MATLAB*, para lo cual es necesaria la función de transferencia (29), encontrada de forma experimental y analítica, en secciones anteriores.

Con la ayuda de *sisotool* se diseña el controlador adecuado para el sistema, al ser un *proceso lento se recomienda un controlador PI*. Para el diseño del controlador, en primer lugar se agrega un integrador para eliminar el error en estado estacionario, posteriormente se registran las condiciones de trabajo del controlador, como son el tiempo de establecimiento en 100 segundos, lo que se considera un tiempo aceptable debido a la lentitud propia del proceso, además un sobrepico de 12%.

Obteniendo así las condiciones en el lugar geométrico de raíces como se muestra en la Figura 20. También se observa la respuesta al escalón, con un tiempo de establecimiento de 75 segundos y un sobrepico del 15%.



Figura 20. Sintonización del PI en sisotool de MATLAB y respuesta de sistema al escalón. Fuente: Autor.

En la Tabla 2 se observan los diferentes controladores diseñados para el sistema de ganancias programadas, para esta investigación se utilizaron 6 puntos de funcionamiento, para la linealización de la planta, posteriormente se diseñó un controlador lineal para cada zona de trabajo.

Referencia (mm)	Planta Linealizada	Controlador
100	$G = \frac{0.0241}{s + 0.05976}$	$G(s) = \frac{0.004 + 4s}{s}$
120	$G = \frac{0.02351}{s + 0.004874}$	$G(s) = \frac{0.004 + 4.5s}{s}$
140	$G = \frac{0.02294}{s + 0.00428}$	$G(s) = \frac{0.004 + 5s}{s}$
160	$G = \frac{0.02239}{s + 0.003785}$	$G(s) = \frac{0.004 + 5.5s}{s}$
180	$G = \frac{0.02185}{s + 0.003452}$	$G(s) = \frac{0.004 + 6.5s}{s}$
200	$G = \frac{0.02134}{s + 0.003189}$	$G(s) = \frac{0.004 + 7s}{s}$

Tabla 2. Controladores lineales para cada zona de trabajo.Fuente: Autor.

# 3.3.2. Diseño del sistema difuso para la autosintonización del controlador PI.

Se procedió al diseño de un sistema difuso para la programación de las ganancias del controlador lineal antes mencionado, el cual está compuesto de 2 entradas (variables programadoras) y dos salidas (constantes kp y ki).

#### 3.3.2.1. Variables de entrada (variable programadora)

En esta investigación se han tomado como variables programadoras la altura h y el error entre el set point y la variable de salida, también definida como error de seguimiento, ya que estas variables reflejan bastante bien el comportamiento de la planta.

Tomando en cuenta que la altura varia de 100 hasta 200 mm, las funciones de membrecía del sistema difuso se representan mediante 5 conjuntos difusos como se observa en la Figura 21a.



**Figura 21.** Variables de entrada a) altura, b) error. **Fuente:** Autor.

En donde los conjuntos difusos están representados como altura H10, H12, H14, H16, H18, H20, para cada altura respectivamente, estos conjuntos están representados con 2 funciones tipo trapezoidal para los extremos y 4 funciones tipo triangular para los conjuntos intermedios, los umbrales de cada función se encuentran ubicados en los puntos kp, que se obtuvieron en el diseño de los controladores lineales para cada sistema linealizado como se describe en la Tabla 2.

La siguiente variable de entrada está representada por el error de seguimiento como se observa en la Figura 21b, esta variable está compuesta por 7 funciones, 2 tipo trapezoidal en los extremos y 5 funciones tipo triangular para los conjuntos intermedios. En donde los conjuntos difusos están representados como, bajada, muy negativo (MN), negativo (N), cero (cero), positivo (P), muy positivo (MP) y subida.

Los 5 conjuntos intermedios tienen sus umbrales ubicados en zonas estratégicas, las cuales fueron identificadas del comportamiento del sistema, tomando en cuenta que el sobrepico máximo es de 3 mm y el error de estado estacionario es menor a 1 mm, finalmente los conjuntos de los extremos representan el ascenso o descenso en un cambio de referencia brusco.

#### 3.3.2.2. Variables de salida

El sistema difuso tiene dos variables de salida kp y ki, en donde la primera contiene 7 conjuntos difusos, que son los que caracterizan a los controladores lineales en cada zona de trabajo.

En la Figura 22a se muestra la variable de salida que representa la ganancia kp, en donde los conjuntos están representados como kp\_B, kp\_N10, kp\_N12, kp\_N14, kp\_N16, kp\_N18, kp\_A, cuyos umbrales están ubicados en los valores kp obtenidos en la sintonización de los controladores lineales.

En la Figura 22b se observa la variable de salida ki que está representada por los conjuntos difusos como constante integral baja ki\_B, constante integral normal ki\_N y constante integral alta ki\_A. Estos conjuntos tienen la función tipo singleton y sus umbrales están ubicados en valores obtenidos mediante experimentación en la planta real, en donde se analizó su rendimiento en las diferentes zonas de trabajo del sistema no lineal, tanto en la dinámica y en estado estacionario.



**Figura 22.** Variables de salida a) kp, b) ki. **Fuente:** Autor.

#### 3.3.2.3. **Reglas difusas**

Las reglas utilizadas para el sistema difuso que se encarga de actualizar las ganancias del controlador PI, son de tipo *proporción difusa compuesta* ya que agrupan dos proposiciones difusas simples como son el error de seguimiento y la altura, según Passino K. Yurkovich S. (1998). Entonces, si el error es muy negativo y la atura es de 120 mm las variables de salida están definidas por las constantes proporcional alta kpA y la constante integral baja kiB como se describe en el siguiente ejemplo

If error MN and altura H12 then kp es kpA and ki es kiB

kp	ERROR						
ALTURA	Bajada	MN	Ν	Cero	Р	MP	Subida
H10	kpA	kp_N10	kp_N10	kp_B	kp_N10	kp_N10	kpA
H12	kpA	kp_N12	kp_N12	kp_B	kp_N12	kp_N12	kpA
H14	kpA	kp_N14	kp_N14	kp_B	kp_N14	kp_N14	kpA
H16	kpA	kp_N16	kp_N16	kp_B	kp_N16	kp_N16	kpA
H18	kpA	kp_N18	kp_N18	kp_B	kp_N18	kp_N18	kpA
H20	kpA	kp_N20	kp_N20	kp_B	kp_N20	kp_N20	kpA

La Tabla 3a contiene las reglas difusas para la ganancia kp mientras que la Tabla 3b contiene las reglas difusas para la ganancia ki.

Tabla 3a. Reglas para el sistema difuso encargado de actualizar la ganancia kp.Fuente: Autor.

ki	ERROR						
ALTURA	Bajada	MN	N	Cero	Р	MP	Subida
H10	ki_B	ki_B	ki_N	ki_A	ki_N	ki_B	ki_B
H12	ki_B	ki_B	ki_N	ki_A	ki_N	ki_B	ki_B
H14	ki_B	ki_B	ki_N	ki_A	ki_N	ki_B	ki_B
H16	ki_B	ki_B	ki_N	ki_A	ki_N	ki_B	ki_B
H18	ki_B	ki_B	ki_N	ki_A	ki_N	ki_B	ki_B
H20	ki_B	ki_B	ki_N	ki_A	ki_N	ki_B	ki_B

Tabla 3b. Reglas para el sistema difuso encargado de actualizar la ganancia ki.Fuente: Autor.

#### 3.4. Modelado difuso de los escenarios de falla

Los escenarios de falla que se han contemplado en este trabajo son a nivel del actuador, que en este caso es la bomba, la cual hace circular el líquido por la tubería para el llenado del tanque.

En primera instancia se propone realizar un control tolerante a falla basado en un caudalímetro ubicado a la salida de la bomba, mientras que para el segundo caso de falla se propone diseñar un caudalímetro virtual que está en función de la altura medida.

#### 3.4.1. Control tolerante a falla de la bomba basado en un caudalímetro

El error en la bomba está representado como la disminución en la cantidad de caudal suministrado al tanque. La Figura 23 ilustra el funcionamiento del sistema de bombeo, el cual está compuesto de un motor de corriente continua que varía su velocidad en función del voltaje de entrada, que varía de 0 a 10 V de corriente continua.

Al motor se encuentra acoplada mecánicamente la bomba que se encarga de la circulación del agua, por lo que el caudal es proporcional a las revoluciones del motor. En consecuencia el caudal que entrega la bomba también será proporcional al voltaje suministrado al motor.



Figura 23. Esquema del motor más la bomba. Fuente: Autor.

La falla que se analiza es una posible avería en la parte mecánica de la bomba ya sea por desgaste o por una rotura de los componentes mecánicos (impeler). El efecto de esta avería se presenta como la disminución del caudal. Para la identificación de la falla se propone elaborar un modelo difuso de la bomba como se describe en la Figura 24, el cual tiene como variables de entrada al voltaje suministrado al motor y el caudal de salida de la bomba, y como variable de salida se obtiene el residuo que sirve para el diagnóstico y reajuste del control de la planta. El reajuste del controlador es considerado como la modificación de los parámetros que permite que el proceso siga trabajando de una manera controlada aún bajo falla del actuador.



Figura 24. Sistema difuso tolerante a falla en el actuador. Fuente: Autor.

Mediante experimentación se obtuvieron los datos que relacionan el caudal en función del voltaje suministrado, como se ilustra en la Tabla 4.

Medición	Voltaje (V)	Caudal (L/min)		
1	1	0.21		
2	2	0.21		
3	3	0.21		
4	4	0.18		
5	5	1.56		
6	6	2.28		
7	7	2.28		
8	8	3.45		
9	9	4		
10	10	4		

**Tabla 4.** Caudal de salida de la bomba con el voltaje aplicado.**Fuente:** Autor.

La variable de voltaje está representada por siete conjuntos difusos como se observa en la Figura 25a, en donde V123 representa al sistema cuando está alimentado con un voltaje igual o menor a 3V, V4 cuando está alimentado con 4V, V5 para una alimentación de 5V, V6, V7, V8 para una alimentación de 6, 7 y 8V respectivamente, V910 representa una alimentación mayor a 9V. De los 7 conjuntos difusos dos son de tipo trapezoidal, estos representan el voltaje en los extremos de la variable, donde el caudal es constante como se observa en la Tabla 4. Los otros cinco son de tipo triangular y sus umbrales se encuentran distribuidos uniformemente en un rango de voltaje de 4 a 8 V.

La variable de caudal está compuesta de siete conjuntos difusos con una distribución que concuerda con la entrada de voltaje, como se muestra en la Figura 25b, es decir hay dos funciones tipo trapezoidal para los extremos y cinco triangulares para la parte central, cuyos umbrales están ubicados según la distribución de la Tabla 4.



**Figura 25.** Variables de entrada, a) voltaje y b) caudal. **Fuente:** Autor.

El sistema tiene como variable de salida tres conjuntos difusos como se observa en la Figura 26, estos representan la diferencia entre el caudal nominal en condiciones normales y el caudal entregado con la bomba averiada. Cada conjunto está denominado como R0, R1, R2 y R3, donde R0 indica que la bomba no tiene avería, R1 indica que el caudal de la bomba cuando está alimentada con un voltaje Vn es igual al caudal con un voltaje Vn-1, en donde n varía de tres a nueve voltios según la Tabla 4, R2 indica que el caudal de la bomba cuando está alimentada con Vn es igual al caudal en Vn-2, finalmente R3 indica que el caudal de la bomba cuando está alimentada con Vn es igual al caudal en Vn-3.



Figura 26. Variable de salida Residuo. Fuente: Autor.

Con la ayuda de la Tabla 4, se obtiene el porcentaje de caudal que varía por cada voltio suministrado al motor, con lo que un voltio representa un 16.5% del caudal, teniendo así, a los nueve voltios el 100% del caudal, que son los 4 L/min que es el caudal de saturación de la bomba.

Se plantea realizar un control sobre falla de la bomba, incrementando el voltaje del motor, en donde el incremento de voltaje será proporcional al porcentaje de caudal perdido por la presente falla, el sistema podrá trabajará con una avería de hasta el 32%, que representa una compensación de 2 voltios en la entrada del motor.

Este valor fue propuesto en función al voltaje promedio en el cual se estabiliza el sistema, el cual oscila entre 5 y 6 voltios dependiendo del punto de referencia, además se considera que ante una falla mayor al 32% no sería recomendable seguir con el proceso.

En la Tabla 5 se plantean el conjunto de reglas difusas para el sistema tolerante a falla, en donde se observan las diferentes acciones que toma el controlador en presencia de una falla.

Se debe tomar en cuenta que el controlador tolerante a falla no podrá compensar la pérdida de caudal cuando el motor este alimentado con un voltaje superior a los nueve voltios, ya que estaría en su punto de saturación, mientras que si el motor está alimentado con 8 voltios podrá compensar una falla máxima del 16.5% que equivale a 1 voltio, el cual lo llevaría a saturación.

Entonces, para que el controlador pueda compensar una pérdida de caudal del 32% el motor deberá tener una alimentación menor a 7V cuando la planta se encuentre en estado estable.

	Caudal						
Voltaje	C123	C4	C5	C6	C7	C8	C910
0	R1	R2	R3	-	-	-	-
V123	R0	R1	R2	R3	-	-	-
V4	-	R0	R1	R2	-	-	-
V5	-	-	R0	R1	R2	-	-
V6	-	-	-	R0	R1	-	-
V7	-	-	-	-	R0	R1	-
V8	-	-	-	-	-	R0	-
V910	-	-	-	-	-	-	R0

Tabla 5. Tabla de reglas difusas para el control tolerante a fallas.

# 3.4.2. Control tolerante a falla de la bomba basado en un caudalímetro virtual

Para el segundo escenario de fallas se utilizará el mismo sistema difuso de control de falla propuesto en el primer escenario, con la diferencia, que para este caso se considera que no se dispone de un caudalímetro físico, por lo cual se procede a calcular el caudal en función de la altura usando el sensor ultrasónico. Tomando en consideración que el caudal de ingreso está definido por:

$$qi(t) = \frac{dV}{dt} + qo \tag{30}$$

$$qi(t) = \frac{dV}{dt} + \frac{\pi D^2}{4} \sqrt{2gh(t)}$$
(31)

donde:

 $\begin{array}{ll} D & \text{Diámetro de desfogue} \\ \frac{dV}{dt} & \text{Velocidad de llenado del tanque} \\ h(t) & \text{Altura} \end{array}$ 

Para calcular la velocidad de llenado, es preciso calcular el volumen en cada instante t en el tanque (18), este volumen está en función de la altura que es retroalimentada del sistema mediante el sensor ultrasónico, que presenta una precisión de décimas de milímetro, sin embargo, presenta un porcentaje de variación que dificulta el cálculo de la derivada del volumen en tiempo real, por lo que se propone usar un filtro que suavice el comportamiento de la derivada.

#### 3.4.2.1. Filtro de Savitzky–Golay

El filtro de *Savitzky-Golay* descrito por primera vez en 1964, permite disminuir el ruido considerablemente sin distorsionar la señal de origen, además calcula la primera derivada de la señal suavizada. El método se basa en el cálculo de una regresión polinomial local de grado M, con al menos M+1 puntos equiespaciados para determinar el nuevo valor de cada punto, el resultado será la primera derivada de los datos de entrada suavizados, Savitzky A. Golay M. (1964).

En la Figura 27 se indica el funcionamiento del filtro *Savitzky-Golay*, donde se utiliza un segmento de una señal muestreada, con x[n] muestras. Para elaborar el filtro se considera un grupo de 2N+1 muestras centradas en n=0, el objetivo es obtener los coeficientes a de un polinomio p(n).



$$p(n) = \sum_{k=0}^{N} a_k n^k \tag{32}$$

Figura 27. Obtención del polinomio para el filtro de Savitzky-Golay. Fuente: Schafer R. (2011).

Los coeficientes del polinomio se obtienen mediante una aproximación local de mínimos cuadrados en las inmediaciones del punto de trabajo. El número de puntos con respecto a los que se realiza la aproximación y el grado del polinomio, son factores que caracterizan el proceso de suavización del filtrado Schafer R. (2011).

$$\varepsilon_N = \sum_{n=-M}^{M} (p(n) - x[n])^2$$
$$\varepsilon_N = \sum_{n=-M}^{M} (\sum_{k=0}^{N} a_k n^k - x[n])^2$$
(33)

En la figura 27 se observa una curva solida que representa el polinomio p(n) para un valor de M=2 y N=2, también se observa el valor de la salida suavizada que es obtenida después de ser evaluada con el polinomio p(n) en el punto central n = 0.

En el Anexo 2 describe como se obtienen los coeficientes del filtro de *Savitzky-Golay* mediante un código desarrollado en MATLAB.

Una vez obtenidos los coeficientes del filtro (34), necesarios para suavizar la señal y obtener de esta la primera derivada, se aplica la señal de volumen V, para lo cual es necesario almacenar 7 muestras (34), debido a que el polinomio trabaja con tres muestras en retraso, la muestra central y tres muestras en adelanto

$$b = \begin{bmatrix} -0.1071 & -0.0714 & -0.0357 & 0 & 0.0357 & 0.0714 & 0.1071 \end{bmatrix}$$
(34)

$$V = [v_1 v_2 v_3 v_4 v_5 v_6 v_7]$$
(35)

Aplicando el filtro como la convolución entre el volumen y el vector de coeficiente *b* se obtiene la derivada de la señal suavizada (35).

$$\frac{dv}{dt} = [b_1v_7 + b_2v_6 + b_3v_5 + b_4v_4 + b_5v_3 + b_6v_2 + b_7v_1]$$
(36)

La figura 28 muestra la diferencia entre la derivada numérica del volumen (36) y la derivada filtrada, donde se hace evidente la mejora en la calidad de la señal, lo cual permite una mayor precisión en el cálculo del caudal de entrada  $q_i$  (31), necesario para el diseño del controlador tolerante a falla.

$$\frac{dv}{dt} = \frac{v_n - v_{n-1}}{t_s} \tag{37}$$



Figura 28. Filtro Savitzky-Golay, señal derivada numérica color roja, señal filtrada color azul. Fuente: Autor.

### CAPÍTULO 4

# 4. IMPLEMENTACIÓN Y RESULTADOS.

Este capítulo está enfocado a la simulación e implementación del controlador de ganancias programadas mediante lógica difusa. Luego se evaluará el rendimiento de este controlador, comparándolo con un controlador lineal y un controlador predictivo CMP.

Finalmente se evaluará el rendimiento del control tolerante a falla, sometiendo al sistema a una falla simulada del actuador. Disminuyendo el rendimiento de la bomba en un 18 y 25%.

#### 4.1. Simulaciones

Las simulaciones de los controladores diseñados para el sistema del tanque, fueron realizadas en *simulink* de *MATLAB*, con un tiempo de duración de 1000 segundos. En estas pruebas se sometió a la planta a cambios de referencia, variando el valor del punto de referencia de la altura y se analizó el trabajo que realiza el controlador de ganancias fijas y el *GSC*, para posteriormente evaluar y valorar su eficiencia.

#### 4.1.1. Simulación del controlador PI

En principio se diseñó un control lineal PI clásico, para el cual se linealizó el modelo no lineal de la planta en un punto de trabajo de 150 mm de altura, que representa el punto medio de trabajo de la planta. La linealización se realizó con la ayuda de las herramientas de *MATLAB* con el método de series de Taylor, con la cual se obtuvo la siguiente ecuación lineal.

$$G(s) = \frac{0.02258}{s + 0.004843} \tag{37}$$

Con la ayuda de *sisotool* de *MATLAB* se sintonizaron los parámetros del controlador PI, para la función de transferencia del modelo linealizado.

$$G(s) = \frac{0.004 + 5s}{s}$$
(38)

Una vez obtenido el modelo de la planta y del controlador se procedió a simular el sistema, con el software de *simulink*. Para la simulación se realizó un cambio de referencia de 125 a 160 mm, como se muestra en la Figura 29, en donde se observó que el tiempo de establecimiento es de 4 minutos y el sobreimpulso es menor a 1 mm.



**Figura 29.** Simulación del controlador lineal PI en simulink: señal de control color rojo (volt), referencia color azul (cm), variable controlada verde (cm). **Fuente:** Autor.

#### 4.1.2. Simulación del controlador de ganancias programadas

Para la simulación del *GSC* se diseñó un sistema difuso mediante el *toolbox fuzzy* de *MATLAB*, como se indica en la Figura 30. El sistema está compuesto de dos variables de entrada que son la altura y el error (antecedentes) y dos variables de salida kp y ki (consecuentes), el método de inferencia utilizado es Mamdani. En el Anexo 4 se detallan las reglas difusas que fueron utilizadas para el sistema, estas reglas fueron diseñadas en el capítulo 3 en la Tabla 5.



Figura 30. Diseño del sistema difuso para el GSC. Fuente: Autor.

La Figura 31 muestra la implementación del sistema difuso en el controlador PI lineal realizado en *simulink*.



Figura 31. Diseño del controlador de ganancias programadas en simulink. Fuente: Autor.

En la simulación del *GSC* Figura 32, se observa la disminución del tiempo de establecimiento a menos de un minuto, mientras que el sobrepico, al igual que en el controlador PI de ganancias fijas, no supera 1 mm. Analizando el comportamiento de la señal de control, se evidencia el trabajo eficiente del sistema difuso, que es el encargado de programar las ganancias del controlador PI.



Figura 32. Comportamiento de la variable controlada ante un cambio de referencia: variable controlada color verde (cm), señal de control rojo (volt), referencia color azul (cm). Fuente: Autor.

#### 4.2. Implementación del controlador de ganancias programadas

La implementación del controlador se la realizó mediante el software *LABVIEW 2012*, en el cual se programó el controlador PI en un código de *MATLAB* como se indica en el Anexo 3, además se programaron los dos sistemas difusos en el *toolbox fuzzy* system designer de *LABVIEW*. El primer sistema difuso se encarga de programar las ganancias para el PI y el segundo se encarga del control de falla.

La Figura 33 indica la pantalla principal del programa, en donde se observan los diferentes indicadores de las variables, como son la variable controlada, que varía de 0 a 250 mm. Se observa también las ganancias del PI que pueden trabajar como ganancias fijas o como ganancias programadas, la variable caudal que toma los datos del caudalímetro físico mientras que la variable q<sub>i</sub> calcula el caudal en función de la altura, como se indicó en capítulos anteriores.



Figura 33. Panel frontal del controlador de ganancias programadas. Fuente: Autor.

El programa permite simular la falla porcentual en la bomba, mediante la disminución del voltaje entregado a la bomba de tal forma que disminuya el caudal entregado. Se debe tomar en cuenta que la disminución del voltaje fue aplicado exclusivamente al motor de la bomba, mientras que el controlador no se vio afectado por la disminución. Así se produce una disminución intencional en el caudal. Con la ayuda de la Tabla 4 se calculó que 1V representa el 16.5% del caudal de la bomba.

#### 4.2.1. Evaluación del rendimiento del GSC con respecto al controlador PI lineal

#### Evaluación del control PI lineal.

Se procedió a evaluar el controlador lineal PI, el cual fue implementado sobre el sistema no lineal antes descrito. Para lo cual fue sometido a un cambio de referencia de 125 a 160 mm, en t = 1s, donde se observó que el sistema respondió con un tiempo de estabilización de 3:00 min y un sobrepico de 15mm como se observa en la Figura 34.

Posteriormente se cambió de referencia a 180 mm, en t=3:30 min teniendo como resultado el mismo tiempo de estabilización e igual sobrepico.



Figura 34. Controlador PI lineal, señal de referencia color azul (cm), variable controlada color verde (cm), señal de control color roja (volt). Fuente: Autor.

Luego, como lo indica la Figura 35, se procedió a someter al sistema a una perturbación de 80 mm en el t= 6:45 min, donde el tiempo de estabilización del sistema fue de 3:45 min.

Finalmente se cambió la referencia de 200 a 160 mm en t=12:55 min y el tiempo de estabilización fue de 3:20 min. Otro valor importante que se consideró para la evaluación del controlador es el sobrepico máximo, que en este caso llegó a los 15 mm.



Figura 35. Controlador PI lineal, señal de referencia color azul (cm), variable controlada color verde (cm), señal de control color rojo (volt). Fuente: Autor.

#### Evaluación del controlador de ganancias programadas

Se evaluó el controlador de ganancias programadas con lógica difusa, implementado en el sistema de control de nivel antes mencionado. Para lo cual fue sometido a un cambio de referencia de 125 a 160 mm en t=10s, donde se observó que el sistema respondió con un tiempo de establecimiento de 1 min y un sibrepico de 3 mm, como se indica en la Figura 36.

Posteriormente se cambió de referencia de 160 a 180 mm en t=1:10, con un tiempo de establecimiento de 55 segundos y un sobrepico de 2.5 mm.

En t=2:00 min se sometió al sistema a una perturbación simulada de 140 mm, donde se observó que el controlador estabiliza al sistema en 30s con un sobrepico máximo de 2 mm.

Finalmente se evaluó al controlador en un cambio de referencia negativo de 180 a 140 mm en t=2:50 min, el tiempo de establecimiento fue de 1:00 min.

Se observó que el sobrepico máximo del sistema llegó a los 3 mm incluso cuando el controlador fue sometido a perturbaciones extremas.

Otra característica importante del controlador es la estabilidad en la señal de control, disminuyendo así los cambios bruscos y continuos que se presenta en el control lineal.


Figura 36. Controlador de ganancias programadas, señal de referencia color azul (cm), variable controlada color verde (cm), señal de control color rojo (volt). Fuente: Autor.

### 4.2.2. Evaluación del rendimiento del GSC con respecto al controlador CMP

Se procedió a realizar un análisis comparativo entre el *GSC* y el controlador *CMP* propuesto por Carpio M. (2013). En la Figura 37 se observan los resultados obtenidos por el autor de la implementación de un controlador *CMP* a la planta *MPS PA*. *Compact Workstation*.



Figura 37. Controlador CMP, señal de referencia color verde (cm), variable controlada color azul (cm), señal de control color rojo (volt). Fuente: Carpio M. (2013).

De donde se observa que el tiempo de estabilización supera los 4 minutos ante un cambio de referencia de 15 mm, presentando un sobrepico alrededor de 1.2 mm, y un error de estado estable mayor a los 2.5 mm.

### 4.2.3. Evaluación del GSC tolerante a falla

Para la evaluación del *GSC* tolerante a falla se tomó en consideración tres escenarios diferentes. En el primero se sometió al sistema a la falla y se observó el comportamiento del GSC sin tolerancia a fallas, el segundo escenario evaluó el comportamiento del GSC tolerante a falla utilizando el caudalímetro físico y finalmente el tercer escenario que evaluó el comportamiento del mismo controlador tolerante a fallas usando el caudalímetro virtual.

#### Evaluación del comportamiento del GSC sin tolerancia a falla

Para la evaluación del comportamiento del *GSC* sin tolerancia a falla, se sometió al sistema a una falla del 18% en t=1:15 y una falla del 25% en t=1:30. La Figura 38 indica la respuesta del controlador y la variable controlada.

Se observa que la variable controlada se altera en el instante que entra la falla, causando una desviación de 5mm con respecto a la referencia, siendo aun más notorio el comportamiento del controlador en donde se produjo un incremento notable en la señal de control.

También se observa que el *GSC* actuó rápidamente, suministrando más voltaje a la bomba, para compensar el caudal perdido y no permitiendo que el sistema se desestabilice.



Figura 38. Controlador de ganancias programadas sin tolerancia a falla, señal de referencia color azul (cm), variable controlada color verde (cm), señal de control color rojo (volt). Fuente: Autor.

# Evaluación del comportamiento del GSC tolerante a falla utilizando el caudalímetro físico.

Para la evaluación del comportamiento del *GSC* tolerante a falla, se sometió al sistema a una falla simulada del 18% en t=1:15 min y una falla del 25% en t=1:30 min.

En la Figura 39 se observa la respuesta del sistema tolerante a falla, donde se observó que la variación del nivel es mínima, con un sobrepico menor a 1 mm y un tiempo de establecimiento de 10 s.

En lo que respecta a la señal de controlador no se observó un cambio brusco en su comportamiento manteniendo así el sistema estable.



Figura 39. Controlador de ganancias programadas tolerante a falla (caudalímetro físico), señal de referencia color azul (cm), variable controlada color verde (cm), señal de control color roja (volt). Fuente: Autor.

# Evaluación del comportamiento del controlador GSC tolerante a falla utilizando el caudalímetro virtual

Para la evaluación del comportamiento del *GSC* tolerante a falla utilizando el caudalímetro virtual, se sometió al sistema a una falla del 18% en t=1:15 min y una falla del 25% en t=1:30 min.

En la Figura 40 se observa que la variable controlada prácticamente no es alterada al igual que la señal de control, lo que garantiza el correcto funcionamiento del caudalímetro virtual.

Es evidente que existe una oscilación más marcada en este controlador, debido a que el sensor virtual posee un retraso provocado por el tipo de filtro que se utilizó para suavizar la señal.



Figura 40. Controlador de ganancias programadas tolerante a falla (caudalímetro virtual), señal de referencia color azul (cm), variable controlada color verde (cm), señal de control color rojo (volt). Fuente: Autor.

### 4.3. Resultados y análisis

Para evaluar los resultados es preciso plantear puntos específicos de comparación, entre los controladores, como son el tiempo de establecimiento, sobrepico, el error de estado estable y la amplitud máxima de la señal de control.

En primera instancia se compara la evaluación del controlador lineal PI con la del *GSC*, para lo cual usaremos las Figuras 34, 35 y 36 las que indican a priori, que existe un mejor rendimiento del controlador de ganancias programadas.

En lo que respecta al tiempo de establecimiento, el *GSC* se demora un tercio del tiempo que le toma al controlador de ganancias fijas PI. El sobrepico del *GSC* llega a tres milímetros, ocho milímetros menos que el sobrepico del controlador PI de ganancias fijas. El error de estado estable en el *GSC* es menor al 50% del controlador PI de ganancias fijas. Finalmente el valor del voltaje pico a pico máximo a la salida del controlador, es menor en el *GSC*, que en el de ganancias fijas como se indica en la Tabla 6.

Al comprar el *GSC* con el controlador *CMP*, se observa que el tiempo de establecimiento del *GSC* es mucho menor, incluso tomando en consideración que el cambio de referencia en el *CMP* es menor al *GSC*, en lo que se refiere al sobrepico se observa una pequeña ventaja del *CMP*. Otra desventaja notoria del *CMP* es su error en estado estable que llega a los 2.5 mm debido a que la señal del controlador es muy variante, llegando a tener una variación de 4 voltios en estado estable.

Parámetros	Controlador PI	Controlador (GSC)	Controlador CMP
Tiempo de establecimiento (min)	3	1	t>4
Sobrepico (mm)	11	3	2.5
Error estado estable (mm)	1.5	0.5	2.5
Voltaje pico a pico (V)	5	1.5	4

Tabla 6. Comparación entre	los controladores PI de	ganancias fijas y GSC.
	Fuente: Autor	

El segundo análisis está enfocado al sistema tolerante a fallas, en donde se evaluaron los mismos parámetros de la Tabla 6, para lo cual se planteó comparar el rendimiento del *GSC* en los tres escenarios antes descritos.

El análisis se realiza con la ayuda de las Figuras 38, 39 y 40 que muestran el comportamiento de la variable controlada y del controlador ante un falla del 18% y 25% en los tres casos antes mencionados. En la Tabla 7 se observan los parámetros obtenidos de dichas simulaciones.

Analizando el tiempo de establecimiento se observó que en el segundo escenario, el tiempo es menor que en el primero, también se observó que en el tercer escenario con el caudalímetro virtual posee un tiempo de establecimiento menor a sus antecesores.

Otra ventaja del *GSC* tolerante a falla es el sobrepico, pues en la Tabla 7 se observa que es mucho menor en comparación con el sobrepico del *GSC* sin tolerancia a falla.

El error de estado estable se mantiene igual que los reportados en la Tabla 6. En lo que se refiere al análisis del voltaje entregado por el controlador, se observó que en el primer escenario las señales de control sufrieron un incremento en el instante que se produjo la falla, al contrario que en el segundo escenario en donde la señal del controlador no sufrió mayor cambio.

Sin embargo en el tercer escenario, que es el que usa el caudalímetro virtual, se observó una alteración en el comportamiento del controlador, esto es comprensible debido al retraso que posee el caudalímetro virtual con respecto al caudal real, lo que dificulta el trabajo del controlador, haciendo que el control sea un poco más brusco.

Parámetros	GSC	GSCTF C. físico	GSCTF C. virtual
Tiempo de establecimiento (min)	0:33	0:9	0:7
Sobrepico (mm)	2	0.6	0.5
Error estado estable(mm)	1.5	0.5	0.5
Voltaje pico a pico (V)	4	2	3.2

Tabla 7. Comparación entre los controladores GSC y GSC Tolerante a falla.Fuente: Autor.

### 4.4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

### 4.4.1. Conclusiones

El modelo de la planta fue correctamente identificado, el cual fue verificado mediante la comparación de los dos métodos propuestos, en donde se destaca la consideración de la curva del caudal en función de la altura, que se tomó en la identificación analítica para ajustar mejor el modelo a la planta real. Para la identificación experimental se considera muy importante el periodo con el que se va a generar la señal *PRBS*, este valor es obtenido de pruebas a lazo abierto de la planta.

Se demostró una clara supremacía del controlador de ganancias programadas sobre el control PI de ganancias fijas, la ventaja del *GSC* es clara en todos los parámetros que se utilizaron para su comparación.

Se realizó un análisis comparativo entre el *GSC* y el controlador *CMP* para el mismo sistema, propuesto por Carpio M. (2013). De donde se concluye una ventaja del *GSC* sobre el controlador antes mencionado.

El esquema difuso utilizado para el control de falla trabajó eficientemente, esto se debe a que las variables difusas fueron diseñadas de acuerdo a la curva del caudal en función del voltaje suministrado al motor de la bomba. El sistema de control de falla está diseñado para compensar hasta una falla equivalente al 33% del rendimiento normal de la bomba.

La selección de las variables programadoras error y altura, fueron acertadas, ya que describen bien el comportamiento de la planta en las diferentes zonas de trabajo, como el cambio de referencia y perturbaciones.

Se destaca como característica importante del controlador de ganancias programadas (sin control tolerante a falla), la adaptabilidad que presentó frente a la falla en el actuador, impidiendo que el sistema se desestabilice cuando el modelo de bomba cambia debido a la pérdida de flujo.

La implementación del filtro *Savitzky-Golay* utilizada para suavizar y obtener la primera derivada del volumen dio resultados satisfactorios, consiguiendo así elaborar un caudalímetro confiable para el control tolerante a falla.

Los valores de las variables de entrada del sistema difuso, se obtuvieron de la experimentación de la planta, por lo que se hizo necesario realizar varias pruebas para una mejor interpretación del funcionamiento de la misma.

Es importante mencionar el comportamiento de la señal de control del *GSC*, la cual no presenta variaciones bruscas, como sí lo hacen en el PI de ganancias fijas y el *CMP*,

esto representa una ventaja que se puede interpretar como ahorro de energía, sin someter, a su vez, al motor a cambios bruscos de voltaje, alargando así la vida útil del mismo.

### 4.4.2. Recomendaciones

Se recomienda para futuras investigaciones en el *MPS PA*. *Compact Workstation* realizar la identificación de la planta, para la zona de trabajo menor a  $h_2$ ', y a su vez diseñar controladores que trabajen en esa zona.

Al realizar el diseño del controlador se deberá tomar en cuenta el modelo del caudal de salida  $q_0$ , ya que este se encuentra en función de la sección transversal de la válvula de desfogue la cual no se puede medir fácilmente.

Antes de diseñar el controlador se recomienda realizar pruebas a lazo abierto de la bomba para obtener el modelo y comprarlo con las tablas, esto garantiza la correcta identificación de la planta.

Debido al sistema difuso utilizado para programar las ganancias, se recomienda realizar varias pruebas del sistema para adquirir los conocimientos del experto que son utilizados para establecer las reglas del sistema difuso.

# ANEXOS

Anexo 1. Programa para linealizar y obtener la función de transferencia del sistema.



Anexo 2. Programa para calcular los coeficientes del filtro Savitzky-Golay.

```
%%OBTENCIÓN DE LOS COEFICIENTES DEL FILTRO ZAVITZKY-GOLAY
%%AUTOR: DR.JULIO VIOLA
function [Coeff] = sgcoeff(n,m)
%n is the order of the polynomial
m is the number of points used for smoothing
%B is the output array
% first we start with the even index equations
F=zeros(n, 2*m+1);
i=-m:m;
for r=0:n,
F(r+1,:)=i.^r;
for k=0:n,
if rem(r+k,2)==0
 B(r+1, k+1) = sum(i.^(r+k));
else
 B(r+1, k+1)=0;
end
end
end
Coeff=INV(B)*F;
```

Anexo 3.Código del controlador PI y cálculo de la derivada del volumen.



**Anexo 4.** Conjunto de reglas difusas para el controlador fuzzy empleado en la simulación del GSC.

1. If (Error is bajada) and (Altura is h10) then (KP is kA)(KI is kiB) (1) 2. If (Error is bajada) and (Altura is h10) then (KP is kA)(KI is kiB) (1) If (Error is bajada) and (Altura is h12) then (KP is kA)(KI is kiB) (1) If (Error is bajada) and (Altura is h14) then (KP is kA)(KI is kiB) (1) If (Error is bajada) and (Altura is h18) then (KP is kA)(KI is kiB) (1) If (Error is bajada) and (Altura is h20) then (KP is kA)(KI is kiB) (1) 7. If (Error is MN) and (Altura is h10) then (KP is kn10)(KI is kiB) (1) 8. If (Error is MN) and (Altura is h12) then (KP is kn12)(KI is kiB) (1) 9. If (Error is MN) and (Altura is h14) then (KP is kn14)(KI is kiB) (1) 10. If (Error is MN) and (Altura is h16) then (KP is kn16)(KI is kiB) (1) 11. If (Error is MN) and (Altura is h18) then (KP is kn18)(KI is kiB) (1) 12. If (Error is MN) and (Altura is h20) then (KP is kA)(KI is kiB) (1) 13. If (Error is N) and (Altura is h10) then (KP is kn10)(KI is KIN) (1) 14. If (Error is N) and (Altura is h12) then (KP is kn12)(KI is KIN) (1) 15. If (Error is N) and (Altura is h14) then (KP is kn14)(KI is KIN) (1) 16. If (Error is N) and (Altura is h16) then (KP is kn16)(KI is KIN) (1) 17. If (Error is N) and (Altura is h18) then (KP is kn18)(KI is KIN) (1) 18. If (Error is N) and (Altura is h20) then (KP is kA)(KI is KIN) (1) 19. If (Error is cero) and (Altura is h10) then (KP is kn10)(KI is KIA) (1) 20. If (Error is cero) and (Altura is h14) then (KP is kn14)(KI is KIA) (1) 21. If (Error is cero) and (Altura is h16) then (KP is kn16)(KI is KIA) (1) 22. If (Error is cero) and (Altura is h18) then (KP is kn18)(KI is KIA) (1) If (Error is cero) and (Altura is h20) then (KP is kA)(KI is KIA) (1) 24. If (Error is cero) and (Altura is h12) then (KP is kn12)(KI is KIA) (1) 25. If (Error is P) and (Altura is h10) then (KP is kn10)(KI is KIN) (1) 26. If (Error is P) and (Altura is h12) then (KP is kn12)(KI is KIN) (1) 27. If (Error is P) and (Altura is h14) then (KP is kn14)(KI is KIN) (1) 28. If (Error is P) and (Altura is h16) then (KP is kn16)(KI is KIN) (1) 29. If (Error is P) and (Altura is h18) then (KP is kn18)(KI is KIN) (1) 30. If (Error is P) and (Altura is h20) then (KP is kA)(KI is KIN) (1) 31. If (Error is MP) and (Altura is h10) then (KP is kn10)(KI is kiB) (1) 32. If (Error is MP) and (Altura is h12) then (KP is kn12)(KI is kiB) (1) 33. If (Error is MP) and (Altura is h14) then (KP is kn14)(KI is kiB) (1) 34. If (Error is MP) and (Altura is h16) then (KP is kn16)(KI is kiB) (1) If (Error is MP) and (Altura is h18) then (KP is kn18)(KI is kiB) (1) If (Error is MP) and (Altura is h20) then (KP is kA)(KI is kiB) (1) If (Error is subida) and (Altura is h10) then (KP is kA)(KI is kiB) (1) 38. If (Error is subida) and (Altura is h12) then (KP is kA)(KI is kiB) (1) 39. If (Error is subida) and (Altura is h14) then (KP is kA)(KI is kiB) (1) 40. If (Error is subida) and (Altura is h16) then (KP is kA)(KI is kiB) (1) 41. If (Error is subida) and (Altura is h18) then (KP is kA)(KI is kiB) (1) 42. If (Error is subida) and (Altura is h20) then (KP is kA)(KI is kiB) (1) 43. If (Error is bajada) then (KP is kA)(KI is kiB) (1) 44. If (Error is subida) then (KP is kA)(KI is kiB) (1)

## **BIBLIOGRAFÍA**

Acuña, W. (2007). A fault tolerant approach to anti-windup gain implementation. Maracaibo: Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia v.31, n.3.

Ambardar, A. (2002). *Procesamiento de señales analógicas y digitales*. Thomson Mexico, (2da ed.).

Bravo, D., Rengifo, C. (2011). *Identificación en lazo cerrado de sistemas dinámicos*, Revista Colombiana de física.

Carpio, M. (2013). Evaluación de desempeño de los controladores digitales PID y predictivo tolerante a fallas, aplicadas al control de nivel de líquido en un tanque (tesis de maestría). Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador.

Chen, J., Patton, R. (1999). *Robust Model-based Fault Diagnosis for Dynamics Systems*. Boston: Kluwer Academic Publishers.

Dasgupta, D., Michalewicz, Z. (1997). *Evolutionary Algorithms in Engineering Applications*. Memphis: Springer Science & Business Media

Festo. (n.d.). (2014). *Compact Workstation*. <u>http://www.festo-didactic.com/es-es/</u>productos/automatizacion-de-procesos/compact-workstation.

Fisicanet. (n.d.). (2006). Válvulas de control. <u>http://www.fisicanet.com. ar/quimica/</u> industrial/ap01\_valvulas.php

Idrovo, A., Peña, M. (2014). Construcción de una plataforma de instrumentación virtual sobre Labview, monitoreo remoto e implementación de controladores PID para las variables de nivel, caudal, temperatura y presión de la planta MPS.PA Compact Workstation (tesis pregrado). Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador.

López, M. (2008). *Identificación de Sistemas*. Aplicación al modelado de un motor continuo.

Juran, J., Hengshuo, H., Junman, S., Yongchao, P. (2013). *Study on Fuzzy Self-Adaptive PID Control System of Biomass Boiler Durm Water*. Journal of Sustainable Bioenergy Systems.

Passino, K., Yurkovich, S. (1998). *Fuzzy Control.* California: Addison Wesley Longman, Inc.

Rodas, A. (2011). INSTRUMENTACIÓN, UPS – Cátedra de Instrumentación, Cuenca, Ecuador.

Rogina, P. (1999). *Tolerancia a Fallas en Tiempo Real* (tesis de licenciatura). Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina.

Savitzky, A., Golay, M. (1964). Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. Analytical Chemistry 36. p. 1627-1639.

Schafer, R. W. (2011). What Is a Savitzky-Golay Filter? [Lecture Notes]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 28(4), 111–117. doi:10.1109/MSP.2011.941097



### UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA UNIDAD DE POSGRADOS

## MAESTRÍA EN CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIALES

Tesis previa a la obtención del Grado de Magister en Control y Automatización Industriales

## DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROLADOR DIFUSO TOLERANTE A FALLA, APLICADO AL CONTROL DE NIVEL DE LÍQUIDO

Autor: Edgar Augusto Criollo Ayala

Dirigido por: Julio César Viola Ph.D.

## UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA UNIDAD DE POSGRADOS

## MAESTRÍA EN CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIALES

Autor:

Dirigido por:

Edgar Augusto Criollo Ayala

Julio César Viola Ph.D.

## DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROLADOR DIFUSO TOLERANTE A FALLA, APLICADO AL CONTROL DE NIVEL DE LÍQUIDO

En la presente investigación se describen el diseño e implementación de un controlador de ganancias programadas con lógica difusa, tolerante a falla, para el sistema de control de nivel de líquido *MPS PA Compact Workstation*, que dispone la Universidad Politécnica Salesiana.

Los controladores diseñados para esta investigación, son de tipo clásico PI y un controlador moderno que usa la técnica de *gain scheduling*. Los cuales se utilizan para evaluar las ventajas y desventajas existentes entre estos controladores.

Al controlador moderno se le agrega un control difuso tolerante a falla del actuador, el cual puede trabajar con un caudalímetro físico o un caudalímetro virtual.

El caudalímetro virtual está diseñado con la derivada del volumen, que está en función de la altura para lo cual se implementó el filtro de *Savitzky-Golay* para suavizar y obtener la primera derivada del volumen.