



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICO MECÁNICO

TEMA:

**Análisis comparativo del desempeño de controladores PID y Fuzzy para
funciones de transferencia de un sistema de nivel de tanques**

AUTOR:

Carrera Soriano, Bryan Javier

Trabajo de Titulación previo a la obtención del grado de
INGENIERO ELÉCTRICO MECÁNICO

TUTOR:

Suarez Murillo, Efraín Oswaldo

Guayaquil, Ecuador

8 de Marzo del 2018



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICO MECÁNICO

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por el Sr.
Carrera Soriano, Bryan Javier como requerimiento para la obtención del
título de **INGENIERO ELÉCTRICO MECÁNICO**.

TUTOR

Suarez Murillo, Efraín Oswaldo

DIRECTOR DE CARRERA

Heras Sánchez, Miguel Armando

Guayaquil, a los 8 días del mes de marzo del año 2018



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICO MECÁNICO

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Carrera Soriano, Bryan Javier**

DECLARÓ QUE:

El trabajo de titulación “**Análisis comparativo del desempeño de controladores PID y Fuzzy para funciones de transferencia de un sistema de nivel de tanques**” previo a la obtención del Título de **Ingeniero Eléctrico Mecánico**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

Guayaquil, a los 8 días del mes de marzo del año 2018

EL AUTOR

Carrera Soriano, Bryan Javier



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICO MECÁNICO

AUTORIZACIÓN

Yo, **Carrera Soriano, Bryan Javier**

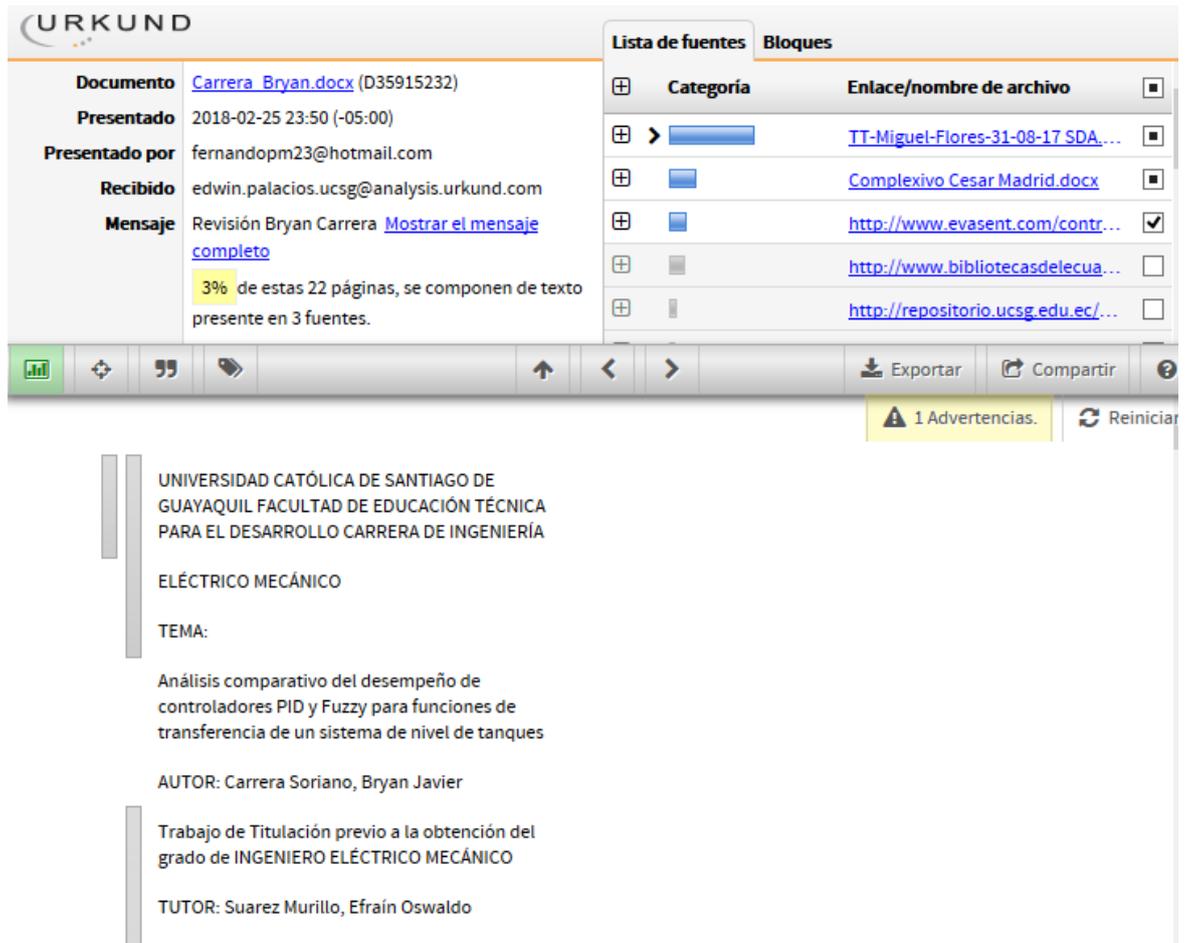
Autorizó a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la publicación, en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación: **“Análisis comparativo del desempeño de controladores PID y Fuzzy para funciones de transferencia de un sistema de nivel de tanques”**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 8 días del mes de marzo del año 2018

EL AUTOR

Carrera Soriano, Bryan Javier

REPORTE DE URKUND



The screenshot displays the URKUND interface. On the left, a document summary is shown: 'Documento: Carrera_Bryan.docx (D35915232)', 'Presentado: 2018-02-25 23:50 (-05:00)', 'Presentado por: fernandopm23@hotmail.com', 'Recibido: edwin.palacios.ucsg@analysis.orkund.com', and 'Mensaje: Revisión Bryan Carrera. 3% de estas 22 páginas, se componen de texto presente en 3 fuentes.' On the right, a 'Lista de fuentes' table lists three sources with their categories and URLs. Below the table is a toolbar with icons for search, navigation, and export. A yellow warning box at the bottom right indicates '1 Advertencias.' and a 'Reiniciar' button.

Lista de fuentes	Bloques		
+	Categoría	Enlace/nombre de archivo	
+	>	IT-Miguel-Flores-31-08-17 SDA...	▣
+		Complexivo Cesar Madrid.docx	▣
+		http://www.evasent.com/contr...	☑
+		http://www.bibliotecasdelecu...	☐
+		http://repositorio.ucsg.edu.ec/...	☐

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICO MECÁNICO

TEMA:

Análisis comparativo del desempeño de controladores PID y Fuzzy para funciones de transferencia de un sistema de nivel de tanques

AUTOR: Carrera Soriano, Bryan Javier

Trabajo de Titulación previo a la obtención del grado de INGENIERO ELÉCTRICO MECÁNICO

TUTOR: Suarez Murillo, Efraín Oswaldo

Reporte Urkund del trabajo de titulación **“Análisis comparativo del desempeño de controladores PID y Fuzzy para funciones de transferencia de un sistema de nivel de tanques”** del estudiante Bryan Carrera al 3% de coincidencias.

Atentamente

Ing. Efraín Suarez
Revisor

DEDICATORIA

A mis padres Jimmy Carrera Torres y Lorena Soriano Solís que a lo largo de toda mi vida han apoyado y motivado mi formación académica creyendo en mí en todo momento.

A mi hermano Jarod Carrera Soriano y a toda mi familia que me han brindado lo necesario para llegar hasta donde estoy, siendo ellos el soporte necesario para mi desarrollo.

EL AUTOR

Carrera Soriano, Bryan Javier

AGRADECIMIENTO

En primero lugar agradezco a Dios quien me ha guiado y me ha dado la fortaleza de seguir adelante.

Gracias a mis padres y a mi hermano por la dedicación y paciencia, por ser los principales promotores de mis metas y sueños, gracias por cada consejo y por cada palabra

A la universidad y a mis formadores, personas de gran sabiduría que fueron partícipes de este proceso, siendo responsables de realizar un aporte que el día de hoy se ve manifestado en la culminación de mi paso por la universidad.

EL AUTOR

Carrera Soriano, Bryan Javier



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICO MECÁNICO

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

f. _____

HERAS SÁNCHEZ, MIGUEL ARMANDO
DIRECTOR DE CARRERA

f. _____

PHILCO ASQUI, LUIS ORLANDO
COORDINADOR DE ÁREA

f. _____

PALACIOS MELÉNDEZ EDWIN FERNANDO
OPONENTE

Índice General

Índice de Figuras	XI
Índice de Tablas.....	XIII
Resumen	XIV
Capítulo 1: Descripción general del trabajo de titulación.	15
1.1. Introducción.....	15
1.2. Antecedentes del problema a investigar.	17
1.3. Definición del problema a investigar.....	18
1.4. Justificación del problema a investigar.....	19
1.5. Objetivos del problema a investigar.	19
1.5.1. Objetivo General.....	19
1.5.2. Objetivos específicos:.....	19
1.6. Hipótesis.....	20
1.7. Metodología de Investigación.....	20
Capítulo 2: Fundamentación Teórica.	21
2.1. Visión general de los controladores PID y Fuzzy.	21
2.2. Teoría de control básico.....	23
2.3. Teoría del control clásica.....	25
2.3.1. Conceptos básicos sobre el ciclo de control.....	26
2.3.2. Función de transferencia de bucle cerrado.....	29
2.4. Controlador PID.....	30
2.4.1. Introducción al controlador PID.....	30
2.4.2. Teoría de control PID.....	33
2.4.3. Término proporcional (P)	34
2.4.4. Término integral (I).	36
2.4.5. Término derivativo (D).	37

2.5.	Bucle de sintonización (Loop Tuning)	39
2.5.1.	Estabilidad	40
2.5.2.	Comportamiento óptimo	41
2.5.3.	Métodos de ajuste.	41
2.5.4.	Ajuste manual.....	43
2.5.5.	Método Ziegler-Nichols.....	44
Capítulo 3: Diseño y análisis de resultados.		48
3.1.	Modelado del sistema de nivel de tanques.....	48
3.2.	Función de transferencia del sistema de nivel de tanques.....	53
3.3.	Resultados de la simulación.....	56
Capítulo 4: Conclusiones y Recomendaciones.....		66
4.1.	Conclusiones.....	66
4.2.	Recomendaciones.....	67
Bibliografía		68

Índice de Figuras

Capítulo 2

Figura 2. 1: Sistema de control de bucle cerrado.....	29
Figura 2. 2: Diagrama de bloques del controlador PID.	31

Capítulo 3

Figura 3. 1: Diseño del diagrama de bloques para el controlador PID utilizando Matlab/Simulink.....	49
Figura 3. 2: Diseño del diagrama de bloques para el controlador PID utilizando Matlab/Simulink.....	49
Figura 3. 3: Diseño del diagrama de bloques para el controlador PID utilizando Matlab/Simulink.....	50
Figura 3. 4: Relación del desplazamiento de la válvula $u(t)$ con la presión $p(t)$	51
Figura 3. 5: Relación del transmisor del equipo y la presión (bar).	53
Figura 3. 6: Relación del transmisor del equipo y la presión (bar).	54
Figura 3. 7: Respuesta del escalón unitario para el sistema de nivel.	54
Figura 3. 8: Diseño del diagrama de bloques para el controlador PID utilizando Matlab/Simulink.....	56
Figura 3. 9: Resultados obtenidos para alturas de 50 y 70 cm del controlador PID simulado.....	57
Figura 3. 10: Esfuerzo de control para el controlador PID simulado para una altura de 50 cm.	57
Figura 3. 11: Esfuerzo de control para el controlador PID simulado para una altura de 70 cm.	58
Figura 3. 12: Aplicación de una perturbación para la simulación del controlador PID.....	58
Figura 3. 13: Diseño del diagrama de bloques para el controlador PID con perturbación utilizando Matlab/Simulink.....	59

Figura 3. 14: Diseño del diagrama de bloques para el controlador Fuzzy utilizando Matlab/Simulink.	60
Figura 3. 15: Aplicación de una altura de 0,5 y 0,7 metros para el controlador fuzzy simulado.	61
Figura 3. 16: Esfuerzo de control para la simulación del controlador Fuzzy a una altura de 50 cm.	61
Figura 3. 17: Esfuerzo de control para la simulación del controlador Fuzzy a una altura de 70 cm.	62
Figura 3. 18: Aplicación de una perturbación para la simulación del controlador Fuzzy.	62
Figura 3. 19: Cambios en Matlab / Simulink para la aplicación de la perturbación en el controlador fuzzy simulado.	63
Figura 3. 20: Comparativa de la simulación de los controladores PID y Fuzzy para una altura de 50 cm.	64
Figura 3. 21: Comparativa de la simulación de los controladores PID y Fuzzy para una altura de 70 cm.	65
Figura 3. 22: Comparativa de la simulación de los controladores PID y Fuzzy con perturbación en el sistema.	65

Índice de Tablas

Capítulo 2

Tabla 2. 1: Selección del método de ajuste.	42
Tabla 2. 2: Efectos de aumentar un parámetro de forma independiente	43
Tabla 2. 3: Método Ziegler-Nichols.	44

Capítulo 3

Tabla 3. 1: Datos numéricos para el modelado del sistema de nivel de tanques.	48
Tabla 3. 2: Relación experimental de apertura, desplazamiento y presión de las válvulas.	51
Tabla 3. 3: Relación del transmisor de presión.	53
Tabla 3. 4: Resumen de resultados obtenidos en la simulación del controlador PID para alturas de 50 y 70 centímetros.	59
Tabla 3. 5: Resumen de resultados obtenidos en la simulación del controlador Fuzzy para alturas de 50 y 70 centímetros.	63

Resumen

El presente trabajo de titulación permitió realizar el análisis comparativo del desempeño de controladores PID y Fuzzy para funciones de transferencia de un sistema de nivel de tanques. La primera parte, se especifica las generalidades del proyecto de titulación, donde se realiza una breve introducción de los controladores PID y Fuzzy. Después, se presentan los diferentes trabajos relacionados con los controladores PID y Fuzzy, con lo cual se define y justifica el problema a investigar, así como el objetivo general, objetivos específicos, hipótesis y la metodología utilizada. La segunda parte, se describe los fundamentos teóricos y clásicos de los sistemas de control, controladores PID con sus respectivos términos proporcional (P), integral (I) y derivativo (D) y Fuzzy. La tercera parte, se desarrolló el modelado y simulación del sistema de nivel de tanques mediante los controladores PID y Fuzzy sobre la plataforma MatLab/Simulink. Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones de posibles trabajos de titulación a desarrollarse a partir del presente trabajo de titulación.

Palabras clave: CONTROLADORES, PROPORCIONAL, INTEGRAL, DERIVATIVO, FUZZY, SIMULACIÓN.

Capítulo 1: Descripción general del trabajo de titulación.

1.1. Introducción.

Antes de que podamos introducir el controlador PID, definamos el sistema de propiedades del control de retroalimentación que busca llevar la cantidad medida al valor requerido o al punto de ajuste. El algoritmo PID es el algoritmo de control de retroalimentación más utilizado en investigaciones de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Para Albarghot, Alkarrami, O'Young, & Rolland, (2017) PID es un algoritmo robusto y fácil de entender que puede proporcionar un buen rendimiento de control independientemente de las características dinámicas variadas de los procesos.

Mientras que para Kiam Heong Ang, Chong, & Yun Li, (2005) el controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID) ofrece un método sencillo y efectivo para muchos problemas del mundo real con su funcionalidad de tres términos que puede manejar tanto las respuestas transitorias como las constantes. (Sharma & Palwalia, 2017)

Por lo tanto, los controladores PID se explotan muy comúnmente en bucles de control de velocidad convencionales. Los controladores PID convencionales tienen algunas deficiencias, como el sobreimpulso no deseado y la respuesta estancada debido a un cambio repentino en el par de carga y la sensibilidad a las ganancias del controlador. (Kandiban & Arulmozhiyal, 2012)

El controlador de lógica difusa conocido como “Fuzzy” según Rajgire, Wankhede, & Karvekar, (2017) es una clase de controlador inteligente artificial que utiliza el conocimiento humano para el diseño del sistema de control. Utiliza diversas variables lingüísticas para definir reglas if-then para control de procesos. Las funciones de membresía se definen para las entradas y salidas del sistema con la ayuda de estas variables lingüísticas.

Las primeras aplicaciones de Control Fuzzy fueron desarrollados a sistemas expertos de control difuso que consistía en aplicar reglas. Farfán, Cadena, & Villa, (2015) en su publicación sostiene que la lógica difusa necesita de un tiempo para su desarrollo antes de implementarlo.

El control Fuzzy para Tibaduiza, Amaya, Rodríguez, Mejia, & Flórez, (2011) es una técnica basada en representaciones de sistemas expertos, y son muy populares debido a la dificultad (o imposibilidad) de modelar determinados sistemas mediante ecuaciones matemáticas. De manera general, los modelos matemáticos del mundo real tienen un lugar especial en la evolución de la ciencia y la ingeniería. Sin embargo, muchas personas se han dado cuenta de que el mundo real no es cuadrático ni lineal y que muchas situaciones no pueden modelarse con precisión mediante ecuaciones matemáticamente tratables.

Los sistemas expertos, los sistemas de control fuzzy y los otros tipos de programas inteligentes que han evolucionado más recientemente utilizan

decisiones basadas en datos para adaptarse mediante la bifurcación a modelos y submodelos alternativos.

1.2. Antecedentes del problema a investigar.

Antes de iniciar con la definición del problema se procede a describir los trabajos relacionados a los controladores PID y Fuzzy (lógica difusa) que se encontraron en el repositorio digital de las carreras de Ingeniería Eléctrico-Mecánica y Electrónica en Control y Automatismo. A continuación, se describen los trabajos de titulación:

1. En la carrera de Ingeniería Eléctrico-Mecánico, Rivera V., (2017) realiza el diseño e implementación de un control PID en un sistema SCADA a través de las plataformas MatLab/Simulink y de instrumentación virtual LabView para motores DC utilizando un entrenador de planta de control. El trabajo no utiliza el controlador Fuzzy, pero esta aplicación permitió conocer y aprender más acerca de los controladores PID.
2. En la carrera de Ingeniería Eléctrico-Mecánico, Villalba P., (2017) realizó el diseño de control difuso de temperatura para protección de motores DC utilizando tarjeta de adquisición de datos DAQ y Software LabView.. El trabajo fue desarrollado mediante simulación en LabView y los resultados experimentales permitieron comprobar la funcionalidad del motor DC utilizando la planta de control EP y la tarjeta de adquisición de datos DAQ USB 6009 de National Instrument.

3. En la carrera de Ingeniería Electrónica en Control y Automatismo, Rodríguez S. & Daza B., (2016) realizaron el estudio y diseño de un controlador difuso implementado en un módulo basado en microcontroladores. El trabajo implementa un control difuso mediante el diseño de una placa utilizando microcontroladores PIC, donde asigna las reglas de pertenencia para su posterior evaluación.
4. En la carrera de Ingeniería Electrónica en Control y Automatismo, Koeller N. & Alcívar B., (2014) realizaron el diseño e implementación de un controlador PID para la presión de un electrolizador en una termoeléctrica. El trabajo fue implementado a través de microelectrónica que permitió controlar la presión de un electrolizador.
5. En la carrera de Ingeniería Electrónica en Control y Automatismo, Benalcázar T. & Verduga F., (2013) realizaron el diseño e implementación de un sistema de control PID de posición de un motor de corriente continua por medio de hardware y software Matlab-Simulink para uso didáctico en la Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo. El trabajo fue modelado en Simulink y la parte experimental fue utilizada la tarjeta de adquisición de datos NI DAQ USB 6009.

1.3. Definición del problema a investigar.

De acuerdo con la revisión bibliográfica de los trabajos relacionados en el empleo de controladores PID y Fuzzy. Se pudo evidenciar que en la Carrera de Ingeniería Eléctrico-Mecánica existen dos trabajos, uno en el que trabajaba

con el controlador PID, y el otro trabajo de titulación utilizaba el controlador Fuzzy. Mientras que en la carrera de Electrónica Escasa información en el repositorio de la carrera de Ingeniería Eléctrico Mecánica relacionada al modelado de sistemas de control. De acuerdo con lo descrito, es necesario realizar un análisis comparativo del desempeño de controladores PID y Fuzzy para funciones de transferencia de un sistema de nivel de tanques

1.4. Justificación del problema a investigar.

El análisis comparativo del desempeño de controladores PID y Fuzzy para funciones de transferencia de un sistema de nivel de tanques permite contribuir con una herramienta didáctica a nivel de simulación en MatLab/Simulink para el desarrollo de futuras investigaciones en el empleo individual de los controladores PID y Fuzzy o tal vez utilizar un controlador híbrido PID-Fuzzy para aplicaciones en el control de motores de corriente directa y alterna.

1.5. Objetivos del problema a investigar.

1.5.1. Objetivo General.

Analizar comparativamente el desempeño de los controladores PID y Fuzzy para funciones de transferencia de un sistema de nivel de tanques.

1.5.2. Objetivos específicos:

- Describir la fundamentación teórica de los sistemas controladores PID y Fuzzy.
- Diseñar el modelado matemático del sistema de nivel de tanques.

- Implementar el modelado del sistema de nivel utilizando los controlados PID y Fuzzy.
- Evaluar comparativamente los resultados obtenidos del sistema de nivel de tanques.

1.6. Hipótesis.

A través del análisis comparativo del desempeño de controladores PID y Fuzzy para funciones de transferencia de un sistema de nivel de tanques se demostrará la eficacia del controlador difuso o Fuzzy y a la vez se contribuirá como una herramienta didáctica para simular en MatLab/Simulink.

1.7. Metodología de Investigación.

El método de investigación es una estrategia de investigación, que se mueve desde los supuestos subyacentes hasta el diseño de la investigación y la recopilación de datos. Aunque existen otras distinciones en los modos de investigación, la clasificación más común de los métodos de investigación es cualitativa y cuantitativa. En un nivel, cualitativo y cuantitativo se refiere a las distinciones sobre la naturaleza del conocimiento: cómo uno entiende el mundo y el propósito final de la investigación. En otro nivel del discurso, los términos se refieren a métodos de investigación, es decir, la forma en que se recopilan y analizan los datos, y el tipo de generalizaciones y representaciones derivadas de los datos.

Capítulo 2: Fundamentación Teórica.

2.1. Visión general de los controladores PID y Fuzzy.

A pesar del desarrollo de los recursos de la electrónica de potencia, las máquinas de corriente continua son cada vez más útiles en la medida en que han encontrado aplicaciones amplias, como la industria de automóviles (vehículos eléctricos), la tracción eléctrica en los sistemas multimáquinas, etc. La velocidad del motor de CC se puede ajustar en gran medida para proporcionar un control fácil y un alto rendimiento.

Existen varios controladores convencionales y numéricos destinados a controlar la velocidad del motor de CC, por ejemplo, controladores PID, controladores de lógica difusa; o la combinación entre ellos, redes neuronales difusas, etc. La no linealidad de los motores conectados en serie / shunt complica su uso en aplicaciones que requieren control de velocidad automático. Los principales problemas en la aplicación de un algoritmo de control convencional (Liu et al., 1999) en un controlador de velocidad son los efectos de la no linealidad en un motor de CC.

Una de las técnicas inteligentes, es la lógica difusa de Zadeh, se aplica para el diseño de controladores en muchas aplicaciones. La ventaja de los métodos de control borroso es el hecho de que no son sensibles a la precisión del modelo dinámico. En los sistemas de control de movimiento, la lógica difusa se puede considerar como un enfoque alternativo al control de retroalimentación convencional.

Se demuestra en la literatura que el rendimiento dinámico de los accionamientos eléctricos así como la robustez con respecto a las variaciones de los parámetros se pueden mejorar adoptando las técnicas de control de velocidad no lineal. El control difuso es un control no lineal y permite el diseño de un controlador no lineal optimizado para mejorar el rendimiento dinámico de los reguladores convencionales.

Se han revisaron varios trabajos en la literatura (Diordiev, Ursaru, Lucanu, & Tigaeru, 2003; Fattah, 2015; Li, 2011) donde el controlador convencional PID se combina con el controlador difuso para mejorar la respuesta de los convertidores DC/DC, nuevo algoritmo híbrido y otros que permiten al motor de CC en caso de no linealidades, perturbaciones de carga, variaciones de parámetros, etc.

De la aplicación del control difuso surgen dos problemas: cómo seleccionar las reglas de control borroso y cómo establecer las funciones de membresía. Normalmente, se utilizan dos enfoques para realizar esta tarea. Uno consiste en adquirir conocimiento directamente de operadores capacitados y traducirlo en reglas difusas. Este proceso, sin embargo, puede ser difícil de implementar y consumir mucho tiempo.

Como alternativa, las reglas difusas se pueden obtener a través de técnicas de aprendizaje automático, donde el conocimiento del proceso se extrae automáticamente o se induce a partir de muestras de casos o ejemplos. Muchos de los métodos de aprendizaje automático desarrollados para

construir sistemas lógicos nítidos se pueden ampliar para aprender reglas difusas.

2.2. Teoría de control básico.

La teoría de control es una rama interdisciplinaria de la ingeniería y las matemáticas, que se ocupa del comportamiento de los sistemas dinámicos. La salida deseada de un sistema se llama referencia. Cuando una o más variables de salida de un sistema necesitan seguir una cierta referencia en el tiempo, un controlador manipula las entradas a un sistema para obtener el efecto deseado en la salida del sistema.

La teoría de control es una "Teoría que trata de influir en el comportamiento de los sistemas dinámicos un subcampo interdisciplinario de la ciencia, que se originó en la ingeniería y las matemáticas, y se convirtió en uso de las ciencias sociales, como la psicología, la sociología y la criminología".

Veamos un ejemplo del control de cruce del automóvil, que es un dispositivo diseñado para mantener una velocidad constante del vehículo; la velocidad deseada o de referencia, proporcionada por el conductor. El sistema en este caso es el vehículo. La salida del sistema es la velocidad del vehículo, y la variable de control es la posición del acelerador del motor que influye en la salida del par del motor.

Una forma primitiva de implementar el control de crucero es simplemente bloquear la posición del acelerador cuando el conductor activa el control de crucero. Sin embargo, en terrenos montañosos, el vehículo disminuirá la velocidad al subir una cuesta y acelerar al ir cuesta abajo. De hecho, cualquier parámetro diferente de lo que se asumió en el momento del diseño se traducirá en un error proporcional en la velocidad de salida, incluida la masa exacta del vehículo, la resistencia al viento y la presión de los neumáticos.

Este tipo de controlador se denomina controlador de circuito abierto porque no hay conexión directa entre la salida del sistema (la velocidad del vehículo) y las condiciones reales encontradas; es decir, el sistema no compensa ni puede compensar fuerzas inesperadas.

En un sistema de control de circuito cerrado, un sensor monitorea la salida (velocidad del vehículo) y alimenta los datos a una computadora que ajusta continuamente la entrada de control (el acelerador) según sea necesario para mantener el error de control al mínimo (es decir, mantener la velocidad deseada). La retroalimentación sobre cómo funciona realmente el sistema permite que el controlador (computadora del vehículo a bordo) compense dinámicamente las perturbaciones del sistema, como los cambios en la pendiente del suelo o la velocidad del viento.

Un sistema ideal de control de retroalimentación cancela todos los errores, mitiga de manera efectiva los efectos de cualquier fuerza que pueda o no surgir durante la operación y produce una respuesta en el sistema que

se adapta perfectamente a los deseos del usuario. En realidad, esto no se puede lograr debido a errores de medición en los sensores, retrasos en el controlador e imperfecciones en la entrada de control.

2.3. Teoría del control clásica.

Para evitar los problemas del controlador de circuito abierto, la teoría de control introduce la retroalimentación del controlador de circuito cerrado que utiliza la retroalimentación para controlar estados o salidas de un sistema dinámico. Su nombre proviene del camino de información en el sistema: las entradas del proceso (por ejemplo, voltaje aplicado a un motor eléctrico) tienen un efecto sobre las salidas del proceso (por ejemplo, velocidad o par motor), que se mide con sensores y procesa el controlador; el resultado (la señal de control) se usa como entrada al proceso, cerrando el ciclo.

Los controladores de circuito cerrado tienen las siguientes ventajas sobre los controladores de circuito abierto:

1. Rechazo de perturbaciones (como fricción no medida en un motor)
2. Rendimiento garantizado incluso con incertidumbres del modelo, cuando la estructura del modelo
3. No coincide perfectamente con el proceso real y los parámetros del modelo no son exactos
4. Los procesos inestables se pueden estabilizar
5. Sensibilidad reducida a las variaciones de los parámetros
6. Rendimiento de seguimiento de referencia mejorado

En algunos sistemas, el control de bucle cerrado y de bucle abierto se usa simultáneamente. En dichos sistemas, el control de bucle abierto se denomina alimentación directa y sirve para mejorar aún más el rendimiento del seguimiento de referencia.

2.3.1. Conceptos básicos sobre el ciclo de control.

Un ejemplo familiar de un lazo de control es la acción que se lleva a cabo al ajustar las válvulas del grifo de agua fría y caliente para mantener el agua del grifo a la temperatura deseada. Esto normalmente implica la mezcla de dos corrientes de proceso, el agua caliente y fría. La persona toca el agua para detectar o medir su temperatura. En base a esta retroalimentación, realizan una acción de control para ajustar las válvulas de agua fría y caliente hasta que la temperatura del proceso se estabilice al valor deseado.

La detección de la temperatura del agua es análoga a la medición del valor del proceso o la variable de proceso (*Process Variable, PV*). La temperatura deseada se llama punto de ajuste (*Set Point, SP*). La entrada al proceso (la posición de la válvula de agua) se denomina variable manipulada (*Manipulated Variable, MV*). La diferencia entre la medición de la temperatura y el punto de ajuste es el error (e), que cuantifica si el agua está demasiado caliente o demasiado fría y en qué cantidad.

Después de medir la temperatura (PV), y luego calcular el error, el controlador decide cuando cambiar la posición de toma (MV) y en qué cantidad. Cuando el controlador enciende la válvula por primera vez, pueden

girar la válvula de agua caliente solo ligeramente si se desea agua caliente, o pueden abrir la válvula por completo si se desea agua muy caliente.

Este es un ejemplo de un control proporcional simple. En caso de que el agua caliente no llegue rápidamente, el controlador puede intentar acelerar el proceso abriendo más y más la válvula de agua caliente a medida que pasa el tiempo. Este es un ejemplo de control integral. Al utilizar solo los métodos de control proporcional e integral, es posible que en algunos sistemas la temperatura del agua pueda oscilar entre caliente y fría, porque el controlador está ajustando las válvulas demasiado rápido y sobre compensando o sobrepasando el punto de referencia.

Con el interés de lograr una convergencia gradual a la temperatura deseada (SP), el controlador puede desear amortiguar las oscilaciones futuras anticipadas. Entonces, para compensar este efecto, el controlador puede elegir moderar sus ajustes. Esto puede considerarse como un método de control derivado.

Hacer un cambio que es demasiado grande cuando el error es pequeño, es equivalente a un controlador de alta ganancia y provocará un sobre impulso. Si el controlador realizara repetidamente cambios que fueran demasiado grandes y sobrepasara repetidamente el objetivo, la salida oscilaría alrededor del punto de ajuste en una senoide constante, creciente o en descomposición. Si las oscilaciones aumentan con el tiempo, entonces el sistema es inestable, mientras que si disminuyen, el sistema es estable.

Si las oscilaciones permanecen en una magnitud constante, el sistema es marginalmente estable. Un humano no haría esto porque somos controladores adaptativos, aprendiendo del historial del proceso; sin embargo, los controladores PID simples no tienen la capacidad de aprender y deben configurarse correctamente. Seleccionar las ganancias correctas para un control efectivo se conoce como sintonización del controlador.

Si un controlador comienza desde un estado estable con error cero ($PV = SP$), los cambios posteriores del controlador serán en respuesta a cambios en otras entradas medidas o no medidas en el proceso que impactan en el proceso y, por lo tanto, en PV . Las variables que impactan en el proceso que no sea MV se conocen como perturbaciones. En general, los controladores se usan para rechazar perturbaciones y/o implementar cambios de puntos de referencia. Los cambios en la temperatura del agua de alimentación constituyen una perturbación del proceso de control de temperatura de la llave.

En teoría, un controlador se puede usar para controlar cualquier proceso que tenga una salida medible (PV), un valor ideal conocido para esa salida (SP) y una entrada al proceso (MV) que afectará la PV relevante. Los controladores se utilizan en la industria para regular la temperatura, la presión, la velocidad de flujo, la composición química, la velocidad y prácticamente cualquier otra variable para la que exista una medida.

El control de velocidad del automóvil es un ejemplo de un proceso que utiliza control automático. Los controladores PID son los controladores de elección para muchas de estas aplicaciones, debido a su teoría bien fundamentada, historial establecido, simplicidad y requisitos simples de configuración y mantenimiento. Una arquitectura de controlador de circuito cerrado común es el controlador PID.

2.3.2. Función de transferencia de bucle cerrado.

La salida del sistema $y(t)$ se realimenta a través de una medición de sensor F al valor de referencia $r(t)$. El controlador C toma el error e (diferencia) entre la referencia y la salida para cambiar las entradas u al sistema bajo control P . Esto se muestra en la figura 2.1. Este tipo de controlador es un controlador de circuito cerrado o un controlador de realimentación.

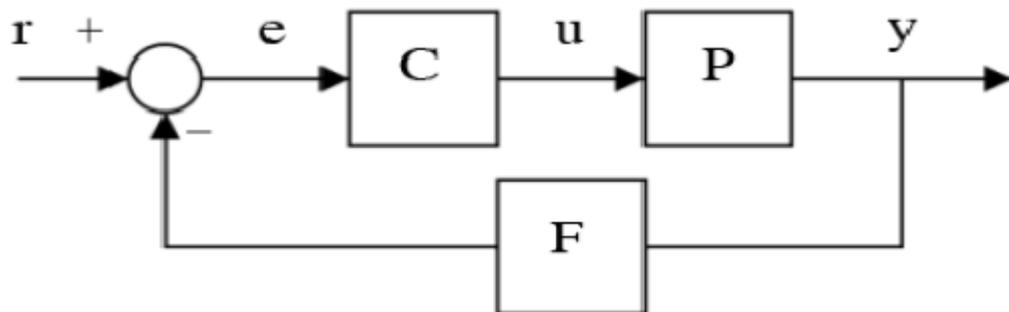


Figura 2. 1: Sistema de control de bucle cerrado.

Fuente: (Garcia, 2018)

Esto se llama un sistema de control de entrada única de salida única (SISO); los sistemas MIMO (es decir, Multi-Input-Multi-Output), con más de una entrada/salida, son comunes. En tales casos, las variables se representan a través de vectores en lugar de simples valores escalares. Para algunos sistemas de parámetros distribuidos, los vectores pueden ser infinitamente dimensionales (típicamente funciones).

Si suponemos que el controlador C , la planta P y el sensor F son lineales e invariantes en el tiempo (es decir, los elementos de su función de transferencia $C(s), P(s)$ y $F(s)$ no dependen del tiempo), los sistemas anteriores se pueden analizar utilizando la transformada de Laplace en las variables. Esto da las siguientes relaciones:

$$\begin{aligned} Y(s) &= P(s)U(s) \\ U(s) &= C(s)E(s) \\ E(s) &= R(s) - F(s)Y(s) \end{aligned}$$

La solución para $Y(s)$ en términos de $R(s)$ da:

$$\begin{aligned} Y(s) &= \left(\frac{P(s)C(s)}{1 + F(s)P(s)C(s)} \right) R(s) = H(s)R(s) \\ H(s) &= \frac{P(s)C(s)}{1 + F(s)P(s)C(s)} \end{aligned}$$

La expresión anterior se conoce como la función de transferencia de bucle cerrado del sistema. El numerador es la ganancia directa (de ciclo abierto) desde R a Y , y el denominador es uno más la ganancia en recorrer el ciclo de retroalimentación, la llamada ganancia de lazo. Si $|P(s)C(s)| \gg 1$, es decir, tiene una norma grande con cada valor de s , y si $|F(s)| \approx 1$, entonces $Y(s)$ es aproximadamente igual a $R(s)$. Esto simplemente significa establecer la referencia para controlar la salida.

2.4. Controlador PID

2.4.1. Introducción al controlador PID

Un controlador proporcional-integral-derivativo (controlador PID) es un mecanismo de retroalimentación de bucle de control genérico (controlador) ampliamente utilizado en sistemas de control industrial: un PID es el

controlador de realimentación más comúnmente utilizado. Un controlador PID calcula un valor de "error" como la diferencia entre una variable de proceso medida y un punto de ajuste deseado.

El controlador intenta minimizar el error ajustando las entradas de control del proceso. A falta de conocimiento del proceso subyacente, los controladores PID son los mejores controladores. Sin embargo, para un mejor rendimiento, los parámetros PID utilizados en el cálculo deben ajustarse de acuerdo con la naturaleza del sistema; mientras que el diseño es genérico, los parámetros dependen del sistema específico.

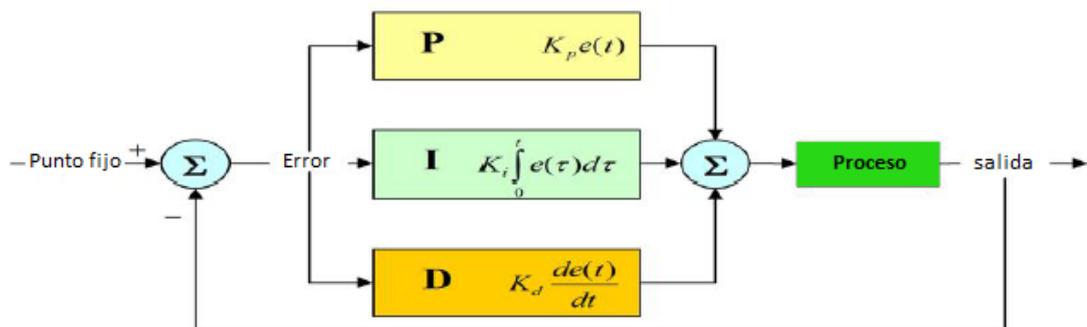


Figura 2. 2: Diagrama de bloques del controlador PID.

Fuente: (Blascarr, 2018)

El cálculo del controlador PID (algoritmo) involucra tres parámetros separados, y en consecuencia se denomina a veces control de tres términos: los valores proporcional, integral y derivado, denotados como P, I y D. El valor proporcional determina la reacción al error actual, el valor integral determina la reacción en función de la suma de errores recientes, y el valor derivado determina la reacción en función de la velocidad a la que el error ha estado cambiando.

La suma ponderada de estas tres acciones se usa para ajustar el proceso a través de un elemento de control 15 como la posición de una válvula de control o la fuente de alimentación de un elemento de calentamiento. Heurísticamente, estos valores pueden interpretarse en términos de tiempo: P depende del error presente, I en la acumulación de errores pasados, y D es una predicción de errores futuros, en función de la tasa de cambio actual.

Al ajustar las tres constantes en el algoritmo del controlador PID, el controlador puede proporcionar una acción de control diseñada para requisitos específicos del proceso. La respuesta del controlador se puede describir en términos de la capacidad de respuesta del controlador a un error, el grado en que el controlador sobrepasa el punto de referencia y el grado de oscilación del sistema. Tenga en cuenta que el uso del algoritmo PID para el control no garantiza un control óptimo del sistema o la estabilidad del sistema.

Algunas aplicaciones pueden requerir el uso de solo uno o dos modos para proporcionar el control del sistema apropiado. Esto se logra al establecer la ganancia de salidas de control no deseadas en cero. Un controlador PID se denominará controlador PI, PD, P o I en ausencia de las acciones de control respectivas.

Los controladores PI son bastante comunes, ya que la acción derivada es sensible al ruido de medición, mientras que la ausencia de un valor integral puede evitar que el sistema alcance su valor objetivo debido a la acción de control. Más detalles sobre la teoría de control PID.

2.4.2. Teoría de control PID

El controlador PID es probablemente el diseño de control de retroalimentación más utilizado. PID es un acrónimo de Proporcional-Integral-Derivativo, que hace referencia a los tres términos que operan en la señal de error para producir una señal de control. Si $u(t)$ es la señal de control enviada al sistema, $y(t)$ es la salida medida y $r(t)$ es la salida deseada, y el error de seguimiento $e(t) = r(t) - y(t)$, un controlador PID tiene la forma general

$$u(t) = K_p e(t) + K_I e(t) + K_D \frac{d}{dt} e(t)$$

La dinámica de lazo cerrado deseada se obtiene ajustando los tres parámetros K_p , K_I y K_D , a menudo iterativamente mediante "ajuste" y sin conocimiento específico de un modelo de planta. La estabilidad a menudo puede garantizarse utilizando solo el término proporcional. El término integral permite el rechazo de una perturbación escalonada (a menudo una especificación llamativa en el control del proceso).

El término derivado se usa para proporcionar amortiguación o configuración de la respuesta. Los controladores PID son la clase más establecida de sistemas de control: sin embargo, no se pueden usar en varios casos más complicados, especialmente si se consideran los sistemas MIMO. La aplicación de los resultados de la transformación de Laplace en la ecuación del controlador PID transformado es:

$$U(s) = K_p e(s) + K_I \frac{1}{s} e(s) + K_D s e(s)$$
$$U(s) = \left(K_p + K_I \frac{1}{s} + K_D s \right) e(s)$$

Con la función de transferencia del controlador PID

$$C(s) = \left(k_p + K_I \frac{1}{s} + K_d s \right)$$

En otras palabras, el esquema de control PID recibe su nombre por sus tres términos correctores, cuya suma constituye la variable manipulada (MV).

Por lo tanto:

$$MV(t) = P_{out} + I_{out} + D_{out}$$

Donde, P_{out} , I_{out} , y D_{out} son las contribuciones al resultado del controlador PID de cada uno de los tres términos, como se define a en las siguientes subsecciones.

2.4.3. Término proporcional (P)

El término proporcional (a veces llamado ganancia) realiza un cambio en la salida que es proporcional al valor de error actual. La respuesta proporcional se puede ajustar multiplicando el error por una constante K_p , llamada ganancia proporcional. El término proporcional viene dado por:

$$P_{out} = K_p e(t)$$

Dónde,

P_{out} , es el término proporcional de salida

K_p , es la ganancia proporcional, un parámetro de ajuste

$e(t)$, es el error igual a SP – PV

t , es el tiempo o tiempo instantáneo (presente)

Una ganancia proporcional alta resulta en un gran cambio en la salida para un cambio dado en el error. Si la ganancia proporcional es demasiado alta, el sistema puede volverse inestable (consultar la sección 2.5 sobre ajuste de bucle). Por el contrario, una pequeña ganancia da como resultado una respuesta de salida pequeña a un error de entrada grande, y un controlador menos sensible (o sensible). Si la ganancia proporcional es demasiado baja, la acción de control puede ser demasiado pequeña al responder a las perturbaciones del sistema.

En ausencia de perturbaciones, el control proporcional puro no se establecerá en su valor objetivo, pero conservará un error de estado estacionario (conocido como caída o droop) que es una función de la ganancia proporcional y la ganancia del proceso.

Específicamente, si la ganancia del proceso (la deriva a largo plazo en ausencia de control, como el enfriamiento de un horno hacia la temperatura ambiente) se denota por G y se supone que es aproximadamente constante en el error, entonces la caída es cuando esta ganancia constante es igual al término proporcional de la salida, P_{out} , que es lineal en el error, $G = K_p e$ entonces:

$$e = \frac{G}{K_p}$$

Esto es cuando el término proporcional, que está empujando el parámetro hacia el punto de ajuste, se compensa exactamente con la ganancia del proceso, que está alejando el parámetro del punto establecido.

Si la ganancia del proceso es baja, como en el enfriamiento, entonces el estado estacionario estará por debajo del punto establecido, de ahí el término "caída".

Solo el componente derivativo (promedio a largo plazo, componente de frecuencia cero) de la ganancia de proceso es importante para la caída: las fluctuaciones regulares o aleatorias por encima o por debajo de la deriva se cancelan. La ganancia del proceso puede cambiar con el tiempo o en presencia de cambios externos; por ejemplo, si cambia la temperatura ambiente, el enfriamiento puede ser más rápido o más lento.

Droop es proporcional a la ganancia del proceso e inversamente proporcional a la ganancia, y es un defecto inevitable del control puramente proporcional. Droop se puede mitigar agregando un término de sesgo (estableciendo el punto de consigna por encima del verdadero valor deseado), o corrigiendo un término de integración (en un controlador PI o PID), que efectivamente calcula un sesgo de forma adaptativa. A pesar de la caída, tanto la teoría del ajuste como la práctica industrial indican que es el término proporcional el que debe contribuir con el cambio de producción.

2.4.4. Término integral (I).

La contribución del término integral (a veces llamado reinicio) es proporcional tanto a la magnitud del error como a la duración del error. Al sumar el error instantáneo a lo largo del tiempo (integrando el error) se obtiene el desplazamiento acumulado que debería haberse corregido previamente. El

error acumulado se multiplica por la ganancia integral y se agrega a la salida del controlador. La magnitud de la contribución del término integral a la acción de control global está determinada por la ganancia integral, K_i . El término integral está dado por:

$$I_{out} = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau$$

Donde,

I_{out} , es el término integral de salida

K_i , es la ganancia integral, un parámetro de ajuste

$e(\tau)$, es el error = SP – PV

t: Tiempo o tiempo instantáneo (el presente)

τ : una variable de integración ficticia

El término integral (cuando se agrega al término proporcional) acelera el movimiento del proceso hacia el punto de referencia y elimina el error de estado estacionario residual que ocurre con un controlador proporcional solamente. Sin embargo, dado que el término integral está respondiendo a los errores acumulados del pasado, puede causar que el valor presente exceda el valor del punto de ajuste (cruce el punto de ajuste y luego cree una desviación en la otra dirección). Para obtener más información sobre la optimización de ganancia integral y la estabilidad del controlador, consulte la sección sobre ajuste de bucle.

2.4.5. Término derivativo (D).

La tasa de cambio del error de proceso se calcula determinando la pendiente del error a lo largo del tiempo (es decir, su primera derivada con

respecto al tiempo) y multiplicando esta tasa de cambio por la ganancia derivativa K_d . La magnitud de la contribución del término derivativo (a veces llamado tasa) a la acción de control general se denomina ganancia derivada, K_d . El término derivativo viene dado por:

$$D_{out} = K_d \frac{d}{dt} e(t)$$

Donde,

D_{out} , es el término derivativo del resultado

K_d , es la ganancia derivativa, un parámetro de ajuste

$e(t)$, es el error = SP – PV

t: Tiempo o tiempo instantáneo (el presente)

El término cercano evidente perceptible disminuye la velocidad de cambio de la salida del controlador y este efecto se debe principalmente al punto de ajuste del controlador. Por lo tanto, el control derivado se usa para reducir la magnitud del sobre impulso producido por el componente integral y mejorar la estabilidad combinada del proceso del controlador.

Sin embargo, la diferenciación de una señal amplifica el ruido y, por lo tanto, este término en el controlador es altamente sensible al ruido en el término de error, y puede causar que un proceso se vuelva inestable si el ruido y la ganancia derivada son suficientemente grandes. Por lo tanto, una aproximación a un diferenciador con un ancho de banda limitado se usa más comúnmente. Tal circuito se conoce como un compensador de fase-plomo.

Los términos proporcional, integral y derivado se suman para calcular la salida del controlador PID. Definiendo $u(t)$ como la salida del controlador, la forma final del algoritmo PID es:

$$u(t) = MV(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) + K_d \frac{d}{dt} e(t)$$

Donde los parámetros de ajuste son:

a. Ganancia proporcional, K_p

Los valores más grandes normalmente significan una respuesta más rápida ya que cuanto mayor es el error, mayor es la compensación del término proporcional. Una ganancia proporcional excesivamente grande conducirá a inestabilidad y oscilación del proceso.

b. Ganancia integral, K_i

Los valores más grandes implican que los errores de estado estacionario se eliminan más rápidamente. La compensación (trade-off) es un exceso (overshoot) mayor: cualquier error negativo integrado durante la respuesta transitoria debe integrarse por error positivo antes de alcanzar el estado estable.

c. Ganancia derivada, K_d

Los valores más grandes disminuyen el sobre impulso, pero ralentizan la respuesta transitoria y pueden provocar inestabilidad debido a la amplificación del ruido de la señal en la diferenciación del error.

2.5. Bucle de sintonización (Loop Tuning)

El ajuste de un lazo de control es el ajuste de sus parámetros de control (ganancia/banda proporcional, ganancia/reinicio integral, ganancia/tasa

derivada) a los valores óptimos para la respuesta de control deseada. Estabilidad (oscilación limitada) es un requisito básico, pero más allá de eso, los diferentes sistemas tienen un comportamiento diferente, diferentes aplicaciones tienen diferentes requisitos y algunos requieren un conflicto.

Además, algunos procesos tienen un grado de no linealidad y, por lo tanto, los parámetros que funcionan bien en condiciones de carga completa no funcionan cuando el proceso se inicia sin carga; esto se puede corregir mediante la programación de ganancia (usando diferentes parámetros en diferentes regiones operativas). Los controladores PID a menudo proporcionan un control aceptable incluso en ausencia de sintonización, pero el rendimiento en general puede mejorarse mediante una sintonización cuidadosa, y el rendimiento puede ser inaceptable con un ajuste deficiente.

El ajuste PID es un problema difícil, aunque solo hay tres parámetros y, en principio, es fácil de describir, ya que debe cumplir criterios complejos dentro de las limitaciones del control PID. En consecuencia, existen varios métodos para la sintonización de bucles, y las técnicas más sofisticadas son el tema de las patentes; esta sección describe algunos métodos manuales tradicionales para el ajuste de bucle.

2.5.1. Estabilidad

Si los parámetros del controlador PID (las ganancias de los términos proporcional, integral y derivado) se eligen incorrectamente, la entrada del proceso controlado puede ser inestable, es decir, su salida diverge, con o sin

oscilación, y está limitada solo por saturación o rotura mecánica. La inestabilidad es causada por el exceso de ganancia, especialmente en presencia de un retraso significativo. En general, se requiere estabilidad de respuesta (el reverso de la inestabilidad) y el proceso no debe oscilar para ninguna combinación de condiciones de proceso y puntos de referencia, aunque a veces la estabilidad marginal (oscilación limitada) es aceptable o deseada.

2.5.2. Comportamiento óptimo

El comportamiento óptimo en un cambio de proceso o cambio de punto de ajuste varía según la aplicación. Dos reglas básicas son la regulación (rechazo de perturbaciones, permanecer en un punto de consigna determinado) y el seguimiento de comandos (implementación de cambios de punto de ajuste), que se refieren a qué tan bien la variable controlada rastrea el valor deseado. Los criterios específicos para el seguimiento de comandos incluyen el tiempo de subida y el tiempo de establecimiento.

Algunos procesos no deben permitir un sobre impulso de la variable de proceso más allá del punto de ajuste si, por ejemplo, esto no es seguro. Otros procesos deben minimizar el gasto de energía para alcanzar un nuevo punto de referencia.

2.5.3. Métodos de ajuste.

Hay varios métodos para ajustar un ciclo PID. Los métodos más efectivos generalmente implican el desarrollo de alguna forma de modelo de

proceso, y luego la elección de P, I y D en función de los parámetros del modelo dinámico. Los métodos de ajuste manual pueden ser relativamente ineficientes, particularmente si los bucles tienen tiempos de respuesta del orden de minutos o más.

La elección del método (ver tabla 2.1) dependerá en gran medida de si el ciclo se puede tomar "fuera de línea" para el ajuste y el tiempo de respuesta del sistema. Si el sistema se puede desconectar, el mejor método de ajuste a menudo implica someter al sistema a un cambio de paso en la entrada, medir la salida en función del tiempo y usar esta respuesta para determinar los parámetros de control.

Tabla 2. 1: Selección del método de ajuste.

Método	Ventajas	desventajas
Manual Sintonización	No se requieren matemáticas Método en línea	Requiere personal experimentado.
Ziegler-Nichols	Método comprobado. Método en línea	Proceso molesto, algo de prueba y error, ajuste muy agresivo.
Software Herramientas	Afinación constante. Método en línea o fuera de línea. Puede incluir análisis de válvula y sensor. Permite la simulación antes de descargar.	Algunos costos y capacitación involucrados.
Cohen-Coon	Buenos modelos de proceso.	Algunas matemáticas Método de oficio Solo es bueno para procesos de primer orden.

Fuente: Autor.

2.5.4. Ajuste manual.

Si el sistema debe permanecer en línea, un método de ajuste consiste primero en establecer los valores K_i y K_d en cero. Aumentar la constante K_p hasta que la salida del bucle oscile, entonces K_p debería ajustarse a aproximadamente la mitad de ese valor para una respuesta de tipo "cuarto de disminución de amplitud". Luego se aumenta la constante K_i hasta que cualquier compensación sea correcta con tiempo suficiente para el proceso. Sin embargo, demasiado K_i causará inestabilidad.

Tabla 2. 2: Efectos de aumentar un parámetro de forma independiente

Parámetro	Tiempo de subida	Excederse	Tiempo de estabilización	Error de estado estable	Estabilidad
K_p	Disminución	Incrementar	pequeño cambio	Disminución	Degradar
K_i	Disminución	Incrementar	incrementar	Disminuir significativamente	Degradar
K_d	Disminución menor	Disminución menor	Disminución menor	Sin efecto en teoría	Mejora si k_d pequeño

Fuente: Autor.

Finalmente, aumentando la constante K_d , si es necesario, hasta que el ciclo sea aceptablemente rápido para alcanzar su referencia después de una perturbación de la carga. Sin embargo, demasiado K_d causará una respuesta excesiva y un exceso. Una afinación rápida del bucle PID generalmente se sobrepasa ligeramente para alcanzar el punto de ajuste más rápidamente; sin embargo, algunos sistemas no pueden aceptar el sobreimpulso, en cuyo caso se requiere un sistema de circuito cerrado sobre amortiguado, que requerirá

un ajuste de K_p significativamente menor que la mitad del ajuste de K_p que causa la oscilación.

2.5.5. Método Ziegler-Nichols

Otro método de ajuste heurístico se conoce formalmente como el método de Ziegler-Nichols, presentado por John G. Ziegler y Nathaniel B. Nichols. Como en el método anterior, las ganancias K_i y K_d se establecen primero en cero. La ganancia P aumenta hasta que alcanza la ganancia final, K_u , en la cual la salida del bucle comienza a oscilar. K_u y el período de oscilación P_u se usan para establecer las ganancias, tal como se muestra en la tabla 2.3.

Tabla 2. 3: Método Ziegler-Nichols.

Tipo de control	K_p	K_i	K_d
P	$0.50K_u$	-	-
PI	$0.45K_u$	$1.2K_p/P_u$	-
PID	$0.60K_u$	$2K_p/P_u$	$K_pP_u/8$

Fuente: Autor.

2.6. Breve reseña de los sistemas Fuzzy o difusos.

Los sistemas Fuzzy se desarrollaron como una alternativa a los métodos clásicos de control utilizando en lugar de la teoría del control analítico, la lógica de toma de decisiones originada por la inteligencia artificial. Además de otras técnicas de toma de decisiones como redes neuronales o algoritmos genéticos, la lógica difusa proporciona una forma más intuitiva de ajustar un controlador.

Incluso si el nombre "fuzzy" se asocia con algo indefinidamente definido, utilizando la técnica de base de reglas, se convierte en una teoría rigurosa y establecida. Usando las declaraciones "IF-THEN", los controladores difusos es posible lograr un muy buen control para los sistemas dinámicos no lineales. El punto fuerte de diseñar el controlador fuzzy es que puede sintetizarse fácilmente usando lenguaje natural.

2.7. Lógica Fuzzy o difusa.

Un controlador difuso es un método de control basado en lógica difusa. Esto significa que un controlador difuso se puede describir simplemente como "control con oraciones en lugar de ecuaciones". La lógica difusa proporciona una forma razonable de diseñar un controlador. Es una aproximación o cuantificación del conocimiento en el cual no estamos tratando con la lógica 1 o 0, sino con un grado de membresía de un enunciado. En la lógica difusa, la implicación de cada premisa se puede modelar de muchas maneras diferentes utilizando técnicas computacionales. La lógica difusa define una decisión como la mejor opción factible de una acción. Por lo tanto, la lógica difusa busca la solución óptima para la cual la función de utilidad se maximiza

2.8. Controlador Fuzzy o difuso.

Un controlador Fuzzy consta de cuatro pasos comunes: "Fuzzification", "Rule-Base", "Inference System" y "Defuzzification" tal como se muestra en la figura 2.3. Las oraciones, usadas para controlar la planta, son las reglas del controlador, que representa el conocimiento del experto. Estos pasos se describen con más detalle de la siguiente manera:

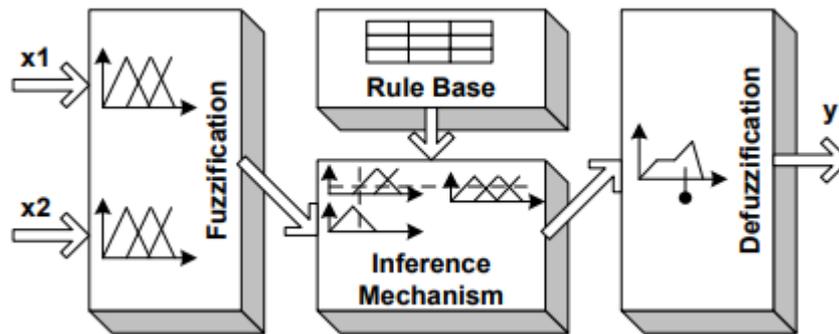


Figura 2. 3: Diagrama de bloques del controlador Fuzzy.
Fuente: (Karakose & Akin, 2010)

2.8.1. Fuzzificación.

Este es el procedimiento donde el controlador convierte las entradas en un conjunto de variables difusas. Este tipo de clasificación se realiza dando valores a cada valor de un conjunto de funciones de membresía. Un clasificador difuso muy común divide la señal de entrada en cinco niveles, dando a la entrada un grado de membresía, que son: **(a)** grande positivo, **(b)** medio positivo, **(c)** pequeño, **(d)** medio negativo, y **(e)** gran negativo.

En el controlador difuso, debe definir las restricciones en cada entrada de tal manera que el mecanismo de fuzzificación pueda determinar el grado correspondiente de función de pertenencia para cada valor.

2.8.2. Base de reglas.

La base de reglas define las reglas que cuantifican el conocimiento del experto sobre la mejor manera de controlar la planta en un lenguaje natural. Estas reglas generalmente se dan en el formato "IF-THEN". Usando esta representación, el número de reglas aumentará exponencialmente con el número de entradas, por ejemplo, con 3 entradas divididas en 5 niveles cada una, hay $5^3 = 125$ reglas juntas.

Por lo tanto, en general, es un procedimiento bastante tedioso definir todas las reglas posibles. Por lo tanto, el experto debe elegir el número de entradas lo menos posible. Tenga en cuenta que cuando hay más de 2 reglas involucradas, debemos usar los conectivos como en una conversación normal. El conector más extendido es el "Y" pero también es posible usar "O", "NO" "SI Y SOLO SI" y así sucesivamente.

2.8.3. Mecanismo de interferencia.

El Mecanismo de Inferencia lleva a cabo el procedimiento de toma de decisiones. Aquí el controlador Fuzzy intenta imitar el comportamiento de un controlador diseñado por un humano en una planta. El mecanismo de inferencia se divide en 2 fases. La primera fase es la coincidencia en la que se comparan las premisas de las reglas con las entradas. Este proceso implica determinar el grado de membresía. La segunda fase está dedicada a derivar la conclusión de las entradas. Una vez que se concluye con el mecanismo de inferencia, el último paso es Defuzzificación.

2.8.4. Difuminación.

El proceso de difuminación es lo opuesto a la fuzzificación. Aquí el controlador traduce (también utilizando un conjunto de reglas) las conclusiones del mecanismo de inferencia y las pone en valores numéricos disponibles para la planta. Este paso da la entrada a la planta, la señal que determinará el comportamiento del procedimiento disponible.

Capítulo 3: Diseño y análisis de resultados.

El presente capítulo se desarrollan dos métodos de control para un sistema de nivel de tanques, tales como, controladores PID y Fuzzy, que fueron proyectados en simulación utilizando Matlab/Simulink. Así como también, fue posible observar los resultados obtenidos y efectuar su análisis de comportamiento entre los dos.

3.1. Modelado del sistema de nivel de tanques.

El modelo del sistema del tanque fue diseñado para que se pudiera observar la altura real del tanque a través de la herramienta de simulación MatLab/Simulink. El sistema de nivel tiene todos los instrumentos necesarios para la aplicación de los controladores PID (Proporcional, Integral y Derivativo) y Fuzzy. Para realizar el modelado de instrumentación del tanque se presentan algunos datos numéricos (ver la tabla 3.1).

Tabla 3. 1: Datos numéricos para el modelado del sistema de nivel de tanques.

Parámetros	Valor
Área de sección transversal del tanque	0.0336 m ²
Curso máximo de la válvula	20 mm
Altura máxima del tanque	1 m

Elaborado por: Autor.

A continuación, se considera que $u(t)$ es la posición de la válvula de entrada que determina el caudal de entrada $q_i(t)$. Se desea controlar el nivel del tanque a través del caudal de entrada. La posición de la válvula define el flujo de entrada del tanque que cambia el nivel de líquido, de esta manera se

puede hacer una relación entre la posición de la válvula $u(t)$ y la altura $h(t)$, tal como se muestra en la figura 3.1.



Figura 3. 1: Diseño del diagrama de bloques para el controlador PID utilizando Matlab/Simulink.
Elaborado por: Autor.

Por ejemplo, con una altura $h(t)$ se obtiene una presión $p(t)$, que se relaciona con un valor de la resistencia eléctrica $r(t)$, y que se relaciona con la corriente de salida del sensor $I_S(t)$. La figura 3.2 se muestra la relación entre la altura $h(t)$ e $I_S(t)$.

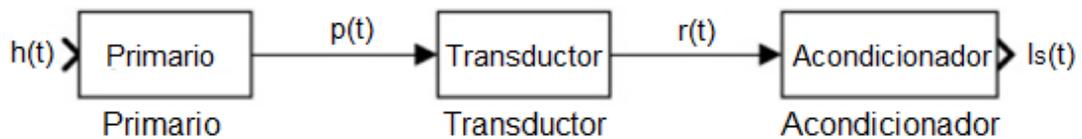


Figura 3. 2: Diseño del diagrama de bloques para el controlador PID utilizando Matlab/Simulink.
Elaborado por: Autor.

Por la Ley de Stevin la presión $p(t)$ puede ser relacionada con la altura $h(t)$, por lo tanto, esta relación es:

$$p(t) = \rho gh(t) \quad (1)$$

Donde, ρ es la masa específica del líquido igual a 1000 kg/m^3 , g es la aceleración de la gravedad igual a 9.806 m/s^2 . Estos valores se sustituyen en la ecuación (1), para lo cual la nueva expresión queda:

$$p(t) = 0.0981h(t) [\text{bar}] \quad (2)$$

Sabiendo que la altura máxima del tanque es de 1 metro, la presión máxima que el sistema puede tener es 0,0981 bar. El sensor trabaja en un

rango de corriente entre 4 y 20mA. Con esta información se calcula la ganancia asociada, y la expresión queda:

$$g_{aso} = \frac{I_{m\acute{a}x}}{p_{m\acute{a}x}} = 203,84 \quad (3)$$

Con dicho valor de la ganancia asociada se puede realizar la relación de la corriente de salida del sensor $I_S(t)$ y la presión $p(t)$, para lo cual la ecuación queda:

$$I_S(t) = 203,84 \cdot 0,0981h(t) = 20h(t) \quad (4)$$

La figura 3.3 muestra la estructura del actuador del sistema de nivel. La válvula electroneumática transforma corriente en presión para actuar en la apertura y cierre de la válvula. La corriente de operación de la válvula electroneumática está entre 4 y 20 mA con una salida entre 0 y 2 bar. La relación de corriente y presión IP_r se expresa así:

$$IP_r = \frac{2 \text{ bar}}{20 \text{ mA}} = 0,1 \left[\frac{\text{bar}}{\text{mA}} \right]$$

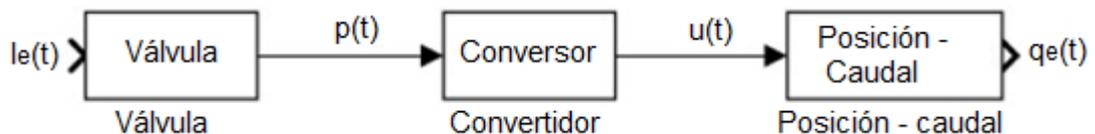


Figura 3. 3: Diseño del diagrama de bloques para el controlador PID utilizando Matlab/Simulink.

Elaborado por: Autor.

Con la relación IP_r definida, se puede realizar la relación entre presión y corriente de entrada, tal como se observa en la ecuación (5). La relación del desplazamiento de la válvula electroneumática en mm (milímetros) y la presión en bar fue hecha experimentalmente. Se considera una válvula abierta en un 100% con una presión de 2 bar y la válvula cerrada con 0% la presión indicada es 0 bar.

$$p(t) = 0,1I_e(t) \quad (5)$$

Sabiendo que el desplazamiento de la válvula es de 20 mm y que es directamente proporcional a la apertura de la válvula se han hecho algunas observaciones experimentales, tal como se muestra en la tabla 3.2.

Tabla 3. 2: Relación experimental de apertura, desplazamiento y presión de las válvulas.

Apertura de válvula (%)	Desplazamiento de la válvula (mm)	Presión (bar)
0	0	0
25	5	0,5
50	10	1
75	15	1,5
100	20	2

Elaborado por: Autor.

Con la información proporcionada por la tabla 3.2 se realiza una gráfica (véase la 3.4) para observar el comportamiento de la relación del desplazamiento de la válvula $u(t)$ con la presión $p(t)$.

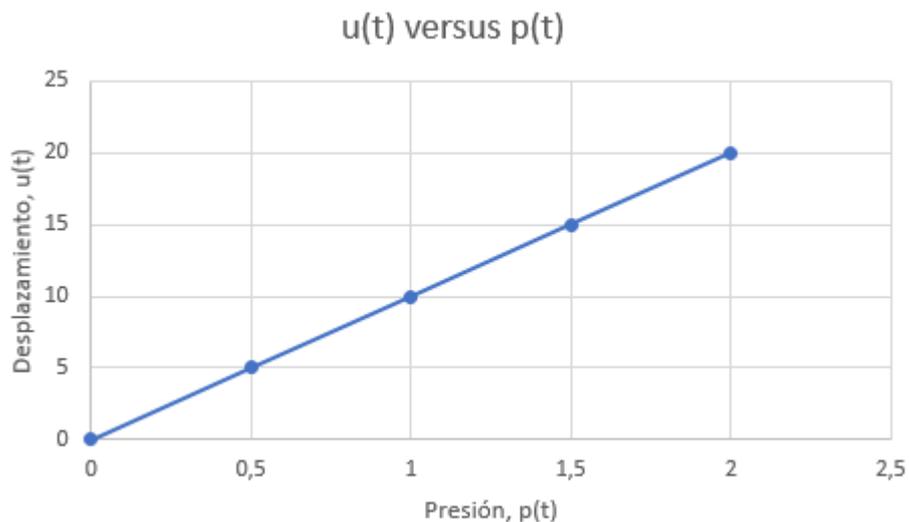


Figura 3. 4: Relación del desplazamiento de la válvula $u(t)$ con la presión $p(t)$.

Elaborado por: Autor.

La figura 3.4 es una función lineal del tipo $ax + b$, y aplicando la ecuación de la recta, la relación del desplazamiento de la válvula $u(t)$ con la presión $p(t)$ está definida por:

$$u(t) = 10p(t) \quad (6)$$

Se asume el caudal del sistema de nivel $v(t)$ cuyo valor sería aproximadamente $0,49 \text{ m}^3/\text{h}$. Con el caudal $v(t)$ definido se puede hacer la relación del caudal de entrada con el desplazamiento de la válvula que se puede observar en la ecuación (7):

$$q_i(t) = \frac{0,49 \text{ (m}^3/\text{h)}}{20 \text{ mm}} = 0,0245u(t) \quad (7)$$

Una vez definida la ecuación (7), se establece la relación del caudal de entrada con la corriente de entrada, sustituyendo la ecuación (5) en (7) se obtiene una nueva expresión que relaciona el caudal de entrada con la presión:

$$q_i(t) = 0,245p(t) \quad (8)$$

Ahora, se sustituye la ecuación (5) en la (8) con lo que la nueva expresión que relaciona el caudal de entrada con la corriente de salida es:

$$q_i(t) = 0,0245I_o(t) \quad (8)$$

Para el modelado del sistema se escogen los parámetros del transmisor de presión que tiene en su cuerpo las características de presión en inH₂O @ 20C para el rango del 0 al 100%. En la tabla 3.3 se muestra la relación de la actuación del transmisor de presión con la presión.

Tabla 3. 3: Relación del transmisor de presión.

Transmisor de presión (%)	Presión del equipo	Presión (bar)
0	5	0,0125
100	200	0,4917

Elaborado por: Autor.

Esta relación es lineal, en la figura 3.5 se muestra el comportamiento del transmisor de presión y también se obtiene la ecuación que relaciona la lectura del transmisor de presión $I(t)$ con la altura del tanque $h(t)$:

$$h(t) = 5 \left(\frac{0,0048I(t) - 0,0786}{0,0981} \right) \quad (9)$$

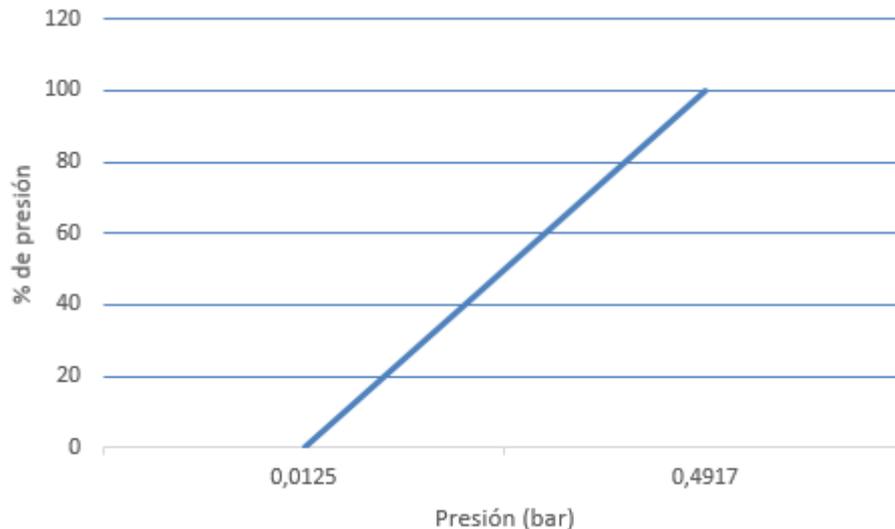


Figura 3. 5: Relación del transmisor del equipo y la presión (bar).
Elaborado por: Autor.

3.2. Función de transferencia del sistema de nivel de tanques.

El siguiente paso consiste en obtener el modelo matemático del sistema a ser controlado. De esta forma, se tiene que estimar una función transferencia del sistema de nivel, y para ello se aplicó un escalón unitario a la planta de nivel. Siendo que para aplicar un escalón unitario es equivalente a abrir el 100% de la válvula de la tubería de entrada, y luego verificar la dinámica resultante del sistema. La figura 3.6 muestra el diagrama de bloques de la

comunicación establecida y la entrada del sistema siendo un escalón con una amplitud igual a 100.

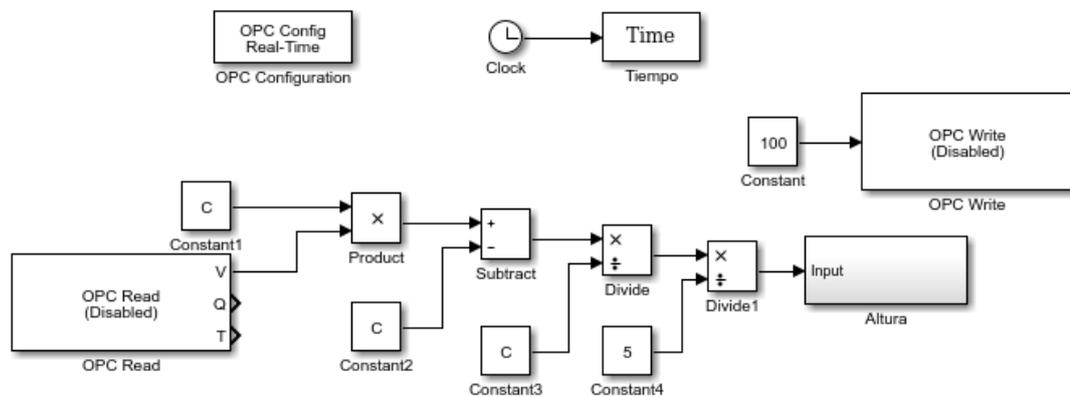


Figura 3. 6: Relación del transmisor del equipo y la presión (bar).
Elaborado por: Autor.

La figura 3.7 muestra la respuesta al escalón del sistema de nivel de líquido obtenido en Matlab/Simulink.

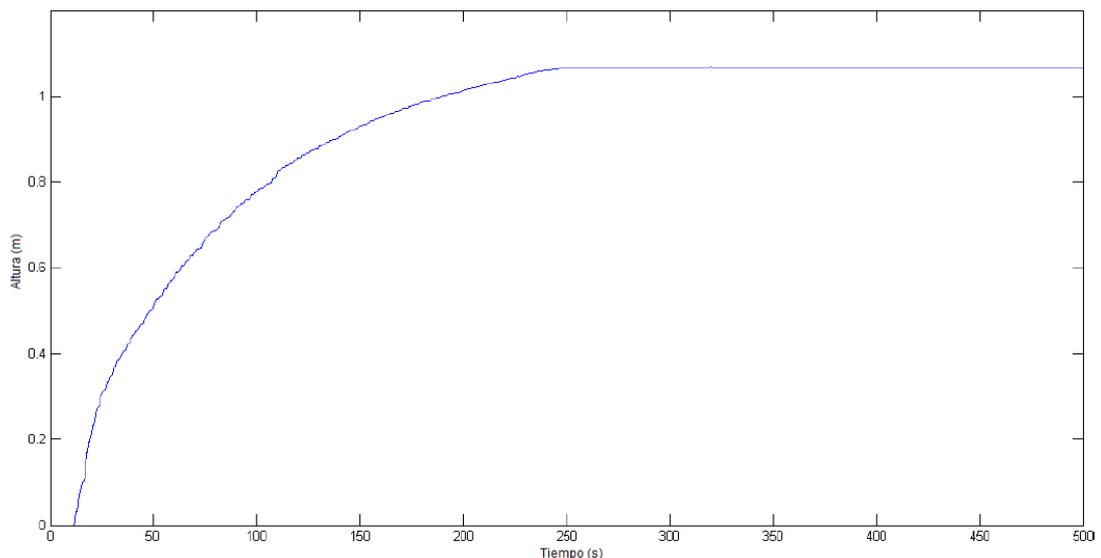


Figura 3. 7: Respuesta del escalón unitario para el sistema de nivel.
Elaborado por: Autor.

Como el sistema de nivel de líquidos es de primer orden se tiene que R es K_0 y RC es δ , lo que permite que las constantes de la función de transferencia de primer orden sean calculadas. Por análisis de respuesta transitoria del sistema de primer orden al escalón unitario se encuentra que:

$$H(s) = \frac{K_0}{\delta s + 1} \quad (10)$$

Pero, la respuesta al escalón unitario está definida por:

$$C(s) = \frac{1}{s} - \frac{1}{s + \frac{1}{T}} \quad (11)$$

Aplicando transformada inversa de Laplace a la ecuación (11), se tiene que:

$$c(t) = \left(1 - e^{-\frac{t}{\delta}}\right), \text{ para } t \geq 0 \quad (12)$$

La expresión (12) indica que la salida $c(t)$ es nula y se vuelve unitaria, en el instante $t = T$, para lo cual el valor de $c(t) = 0,6321$. En la figura 3.8 se puede definir que el valor de $K_0 = 1,15$, este valor fue observado considerando la diferencia entre el valor máximo y el valor mínimo de la altura mostrada en la figura 3.7. La altura mínima es igual a $-0,1016$ m y la altura máxima es $1,059$ m, con esto el valor de K_0 está definida por:

$$K_0 = h_{\text{máx}} - h_{\text{mín}} = 1,059 + 0,1016 = 1,1606$$

Para encontrar el valor de $y(t)$ se multiplica el valor de K_0 por la constante $c(t)$ que representa la respuesta transitoria de primer orden siendo una característica importante de la curva de respuesta exponencial es $0,6321$. La expresión queda así:

$$y(t) = K_0 c(t) \quad (13)$$

El valor encontrado para $y(t) = 0,7336$, mientras que para encontrar el valor de δ observar la figura 3.7 donde el valor de $y(t)$ está en el eje y, el valor de δ será el eje x, este valor correspondiente es 86 , es decir, que el valor de $\delta = 86$. Finalmente, sustituyendo los valores de K_0 y δ queda la función de transferencia del sistema:

$$H(s) = \frac{R}{RCs + 1} = \frac{1,1606}{86s + 1}$$

3.3. Resultados de la simulación.

En el software Matlab/Simulink se desarrolla la simulación del controlador PID a través del método de las raíces. La figura 3.8 muestra el diseño del controlador construido en Matlab/Simulink. En el mismo se aplican los valores correspondientes de las constantes de ganancia: **(a)** proporcional k_p , **(b)** integral k_i , y **(c)** derivativo k_d .

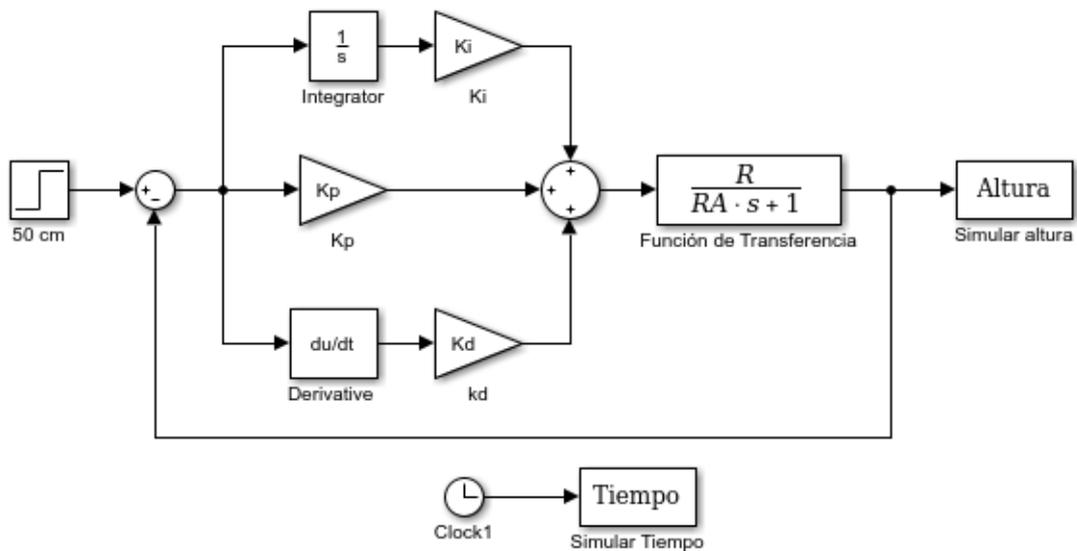


Figura 3. 8: Diseño del diagrama de bloques para el controlador PID utilizando Matlab/Simulink.

Elaborado por: Autor.

Al aplicar dichas constantes de ganancia se pueden visualizar las respuestas a las alturas deseadas. En la figura 3.9 se muestra la respuesta a las alturas de 50 y 70 cm. También, se observa una similitud de los resultados del controlador PID simulando para las alturas de 50 y 70 cm. Para el caso, de los esfuerzos de control de las alturas ya mencionadas, fueron adquiridas para observar cuál es el esfuerzo que el controlador PID hace para estabilizar en la altura deseada.

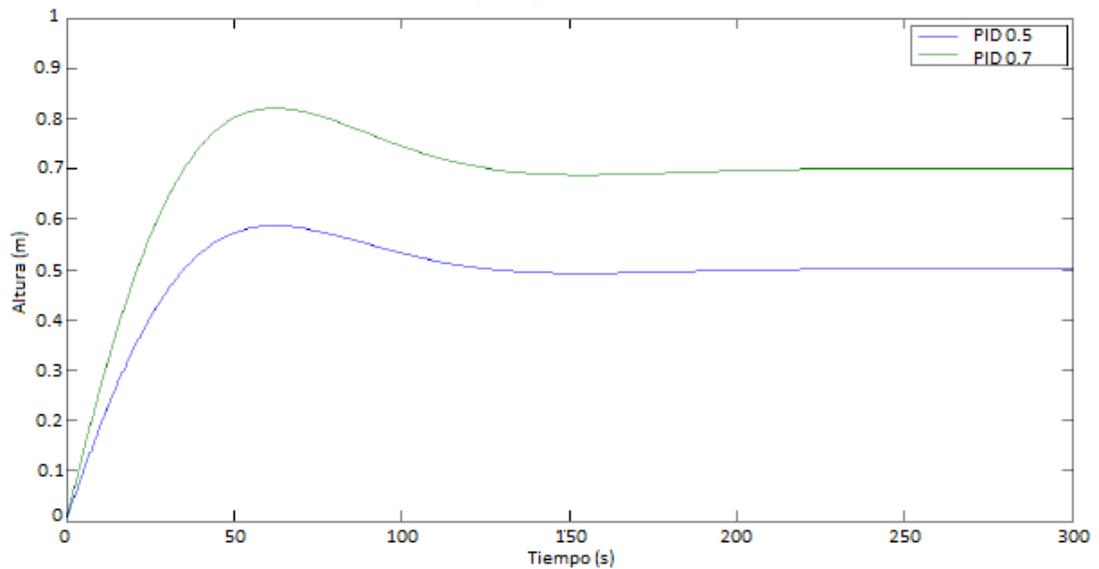


Figura 3. 9: Resultados obtenidos para alturas de 50 y 70 cm del controlador PID simulado.

Elaborado por: Autor.

Mientras, que la figura 3.10 muestra el esfuerzo de control a la altura de 50 centímetros. De manera similar, la figura 3.11 muestra el esfuerzo de control a la altura de 70 centímetros. En otras palabras, las figuras 3.10 y 3.11 muestran cómo la simulación del controlador PID actúa en una válvula de control neumática para alcanzar la altura deseada.

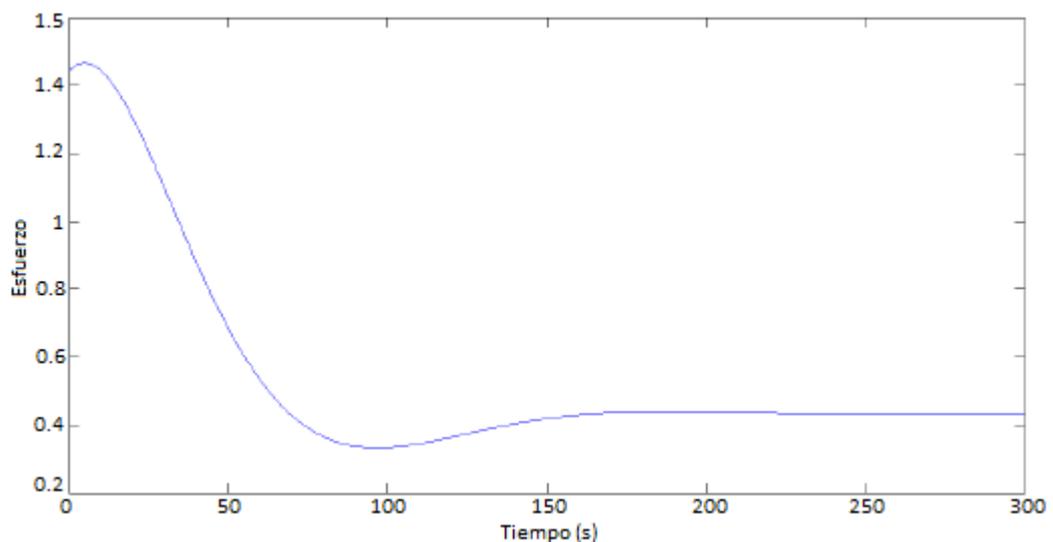


Figura 3. 10: Esfuerzo de control para el controlador PID simulado para una altura de 50 cm.

Elaborado por: Autor.

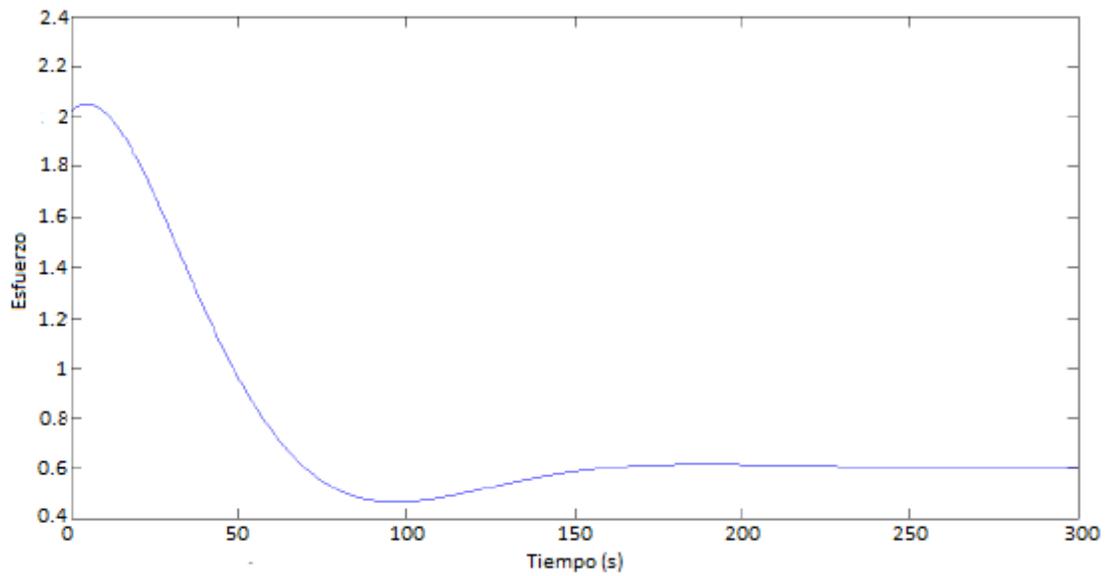


Figura 3. 11: Esfuerzo de control para el controlador PID simulado para una altura de 70 cm.

Elaborado por: Autor.

Ahora se procede a realizar pruebas adicionales agregando algún tipo de perturbación. En la figura 3.12 se muestra la respuesta con perturbación para el controlador PID simulado, donde la simulación se inició con una altura de 50 cm y en el tiempo 300 s se colocó una altura de 70 cm.

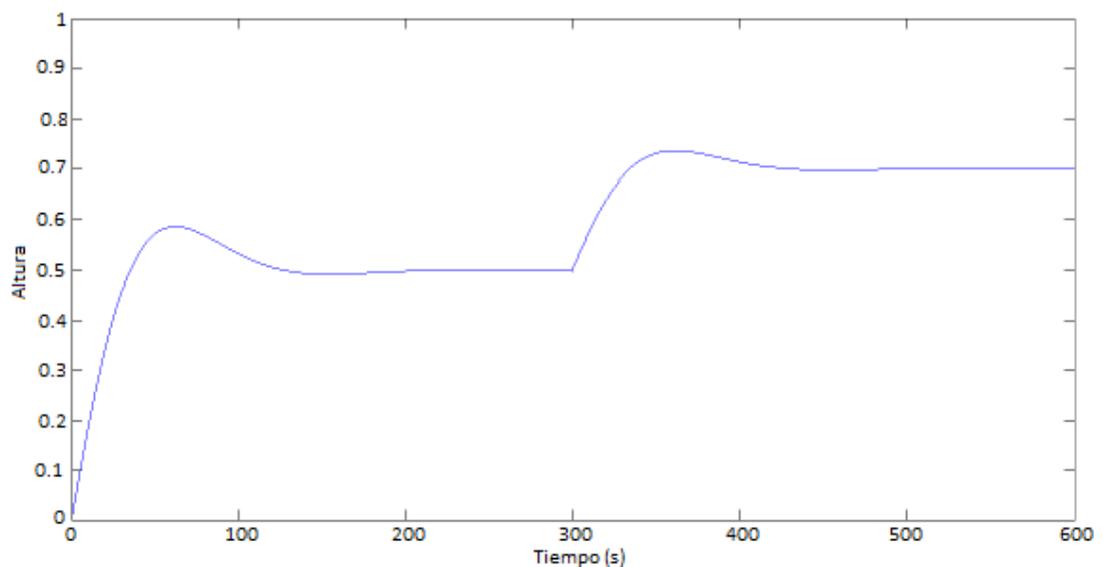


Figura 3. 12: Aplicación de una perturbación para la simulación del controlador PID.

Elaborado por: Autor.

En general, la simulación del controlador PID no presenta errores mediante la aplicación de una perturbación. El diseño de esta simulación sufrió algunos cambios con relación al realizado en la figura 3.8. Dichos cambios pueden ser observados en la figura 3.13. La plataforma de simulación MatLab/Simulink nos muestra los resultados obtenidos para la simulación del controlador PID para las alturas de 50 y 70 cm. La tabla 3.4 muestra todos los valores obtenidos durante la ejecución del controlador PID.

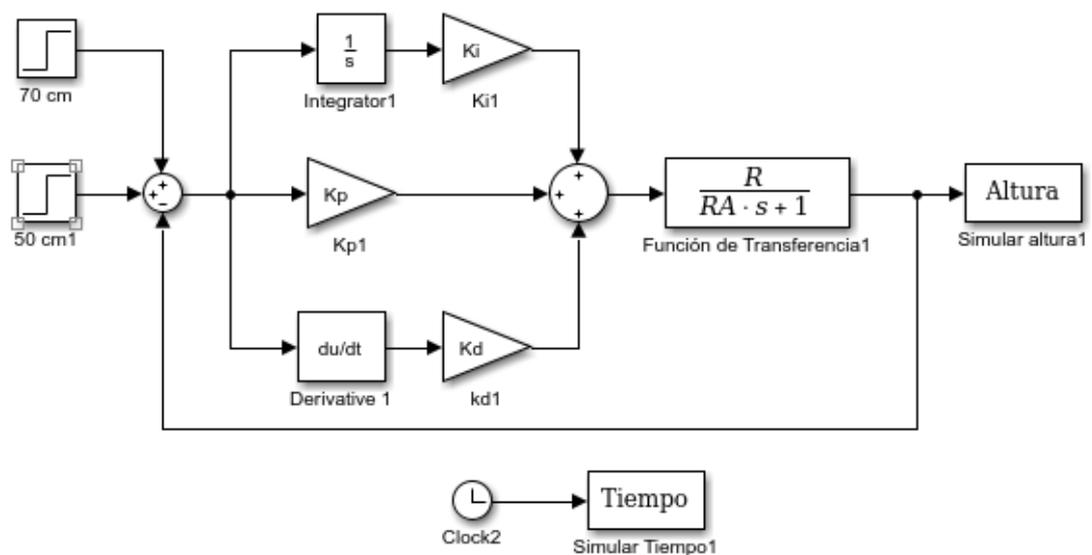


Figura 3. 13: Diseño del diagrama de bloques para el controlador PID con perturbación utilizando Matlab/Simulink.

Elaborado por: Autor.

Tabla 3. 4: Resumen de resultados obtenidos en la simulación del controlador PID para alturas de 50 y 70 centímetros.

información	50 cm	70 cm
Tiempo de subida (s)	26,72	26,72
Tiempo de estabilización (s)	115,98	115,98
Tiempo _{mínimo} de estabilización (s)	0,45	0,63
Tiempo _{máximo} de estabilización (s)	0,59	0,82
Overshoot (%)	17,37	17,37
Overshoot inferior (%)	0	0
Valor pico	0,59	0,82
T _{máximo} (s)	62,24	62,24

Elaborado por: Autor.

Ahora, se aplicará el diseño del mismo utilizando el controlador Fuzzy sobre la plataforma Matlab/Simulink. En la figura 3.14 se muestra el diseño de bloques de Simulink del controlador fuzzy. La aplicación de las alturas deseadas para el controlador Fuzzy se aplican de manera similar al controlador PID.

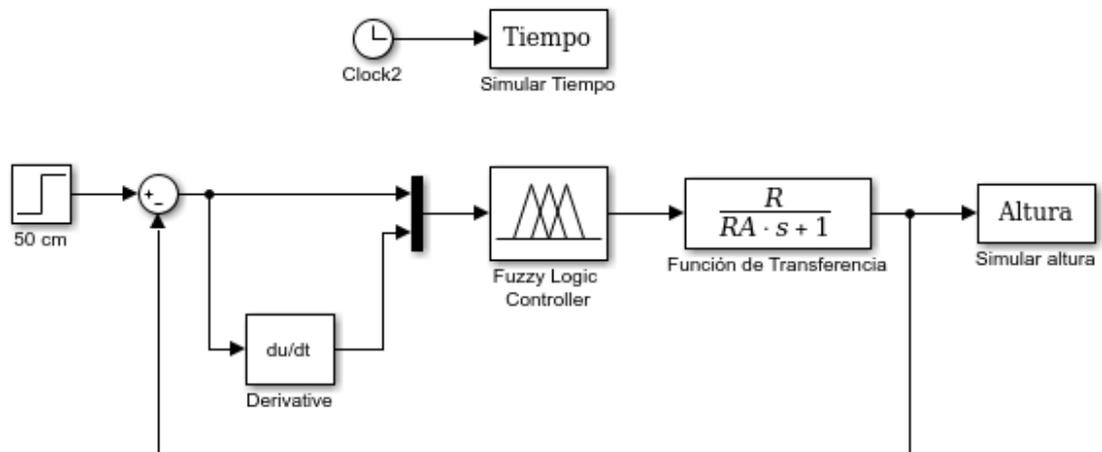


Figura 3. 14: Diseño del diagrama de bloques para el controlador Fuzzy utilizando Matlab/Simulink.
Elaborado por: Autor.

La figura 3.15 muestra las respuestas a las alturas de 50 y 70 centímetros, el resultado obtenido en la simulación del controlador Fuzzy nos indica que hay similitud de los resultados para las alturas ya mencionadas. Ahora, se consideran los esfuerzos de control para las alturas de 50 y 70 centímetros. Estos resultados fueron adquiridos para observar cuál es el esfuerzo que el controlador Fuzzy hace para estabilizar en la altura deseada.

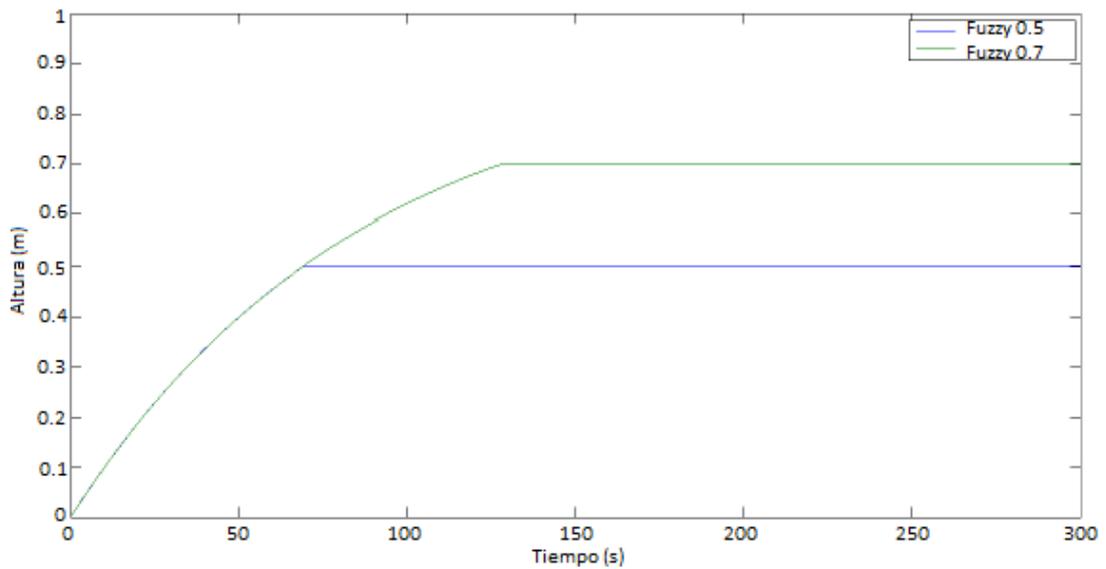


Figura 3. 15: Aplicación de una altura de 0,5 y 0,7 metros para el controlador fuzzy simulado.

Elaborado por: Autor.

En la figura 3.16 se muestra el esfuerzo de control Fuzzy para una altura de 50 centímetros.

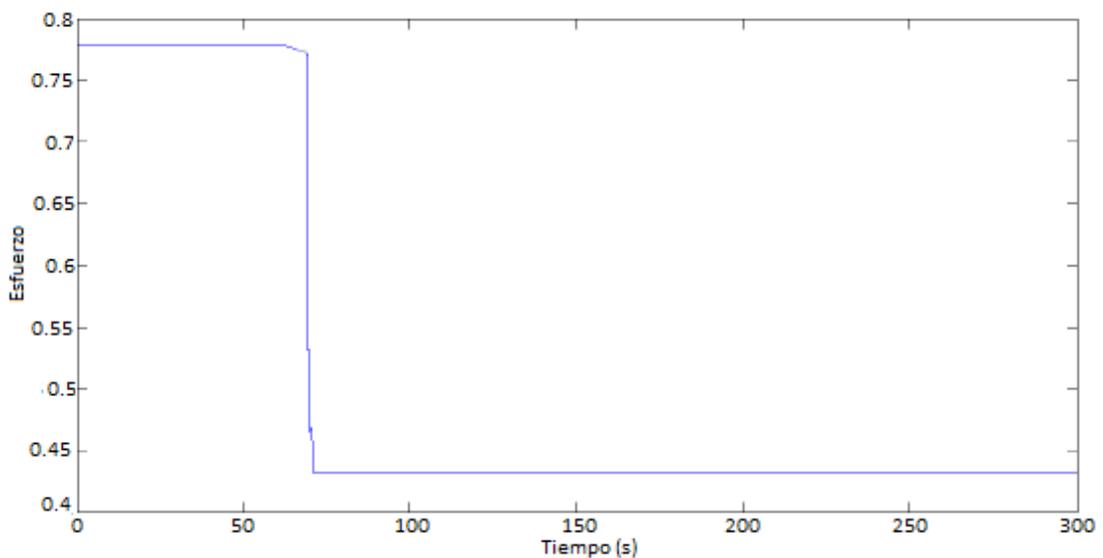


Figura 3. 16: Esfuerzo de control para la simulación del controlador Fuzzy a una altura de 50 cm.

Elaborado por: Autor.

Mientras que la figura 3.17 nos muestra el esfuerzo de control de Fuzzy para una altura de 70 centímetros. Las figuras 3.16 y 3.17 muestran el modo en que la simulación del controlador Fuzzy actúa en la válvula de control neumática para alcanzar la altura deseada.

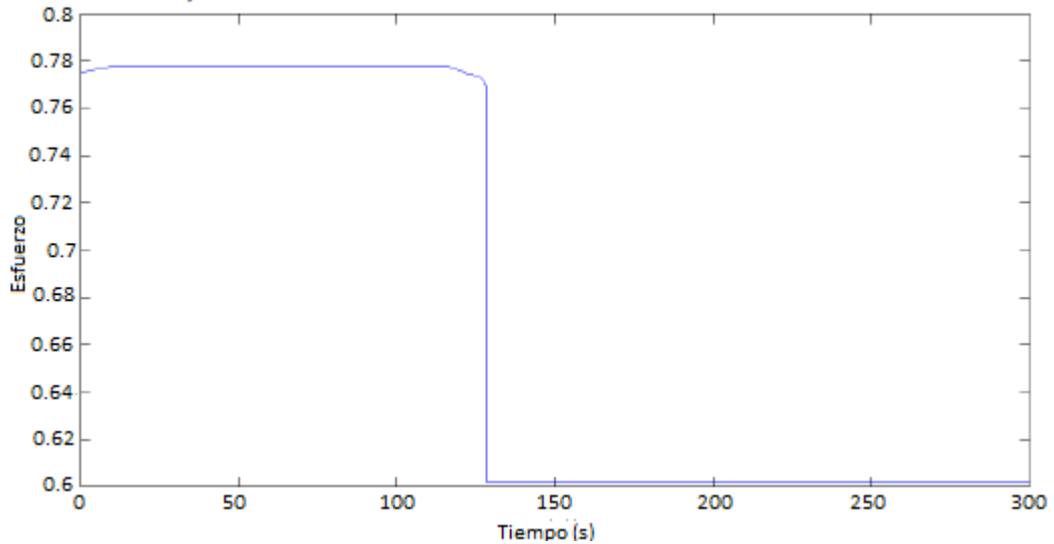


Figura 3. 17: Esfuerzo de control para la simulación del controlador Fuzzy a una altura de 70 cm.
Elaborado por: Autor.

De manera similar al controlador PID, ahora para Fuzzy se agrega una perturbación al sistema. La figura 3.18 muestra la respuesta con perturbación para la simulación del controlador Fuzzy. Inicialmente, la simulación empieza con una altura de 50 cm, y después en el tiempo de 300 segundos se coloca a una altura de 70 cm, tal como se hizo para la simulación del controlador PID.

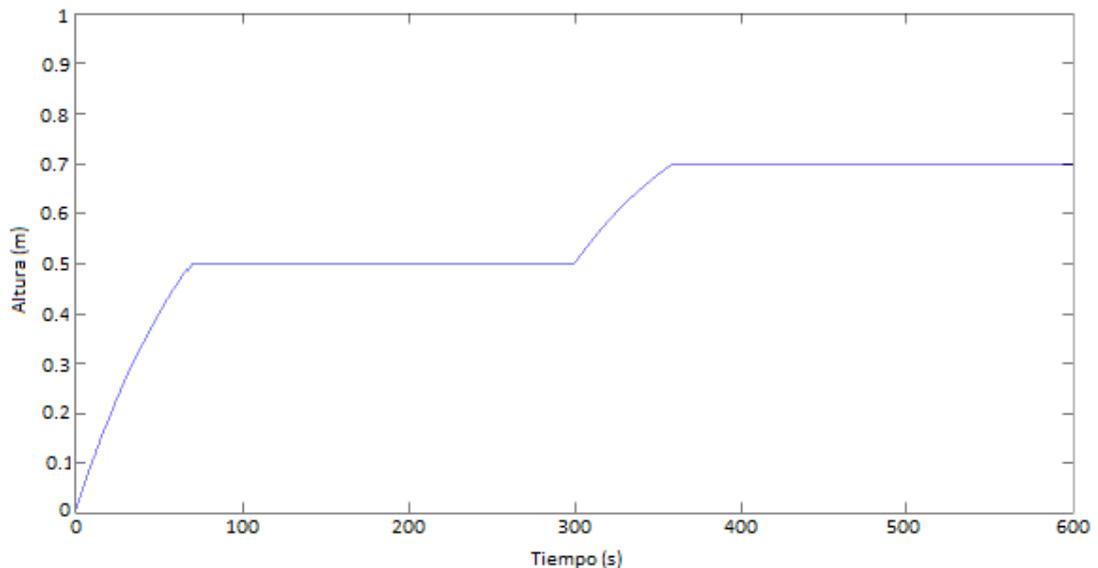


Figura 3. 18: Aplicación de una perturbación para la simulación del controlador Fuzzy.
Elaborado por: Autor.

Finalmente, se puede concluir que la simulación del controlador fuzzy no presenta errores mediante la aplicación de una perturbación, tal como se observa en la figura 3.18.

El diseño de esta simulación sufrió algunos cambios en relación con el diseño visto en la figura 3.14, y dichos cambios pueden ser observados en la figura 3.19. Utilizando Matlab/Simulink se podrá visualizar los resultados obtenidos para la simulación del controlador Fuzzy para las alturas de 50 y 70 cm. En la tabla 3.5 se muestra en resumen los resultados obtenidos durante la ejecución del controlador Fuzzy.

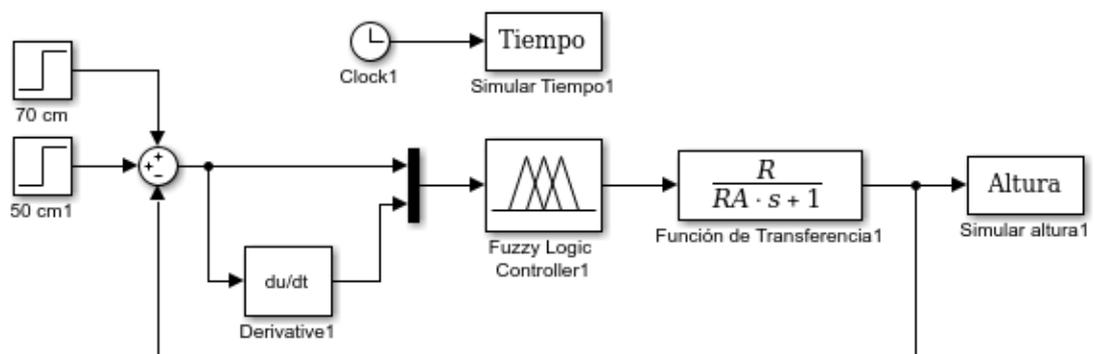


Figura 3. 19: Cambios en Matlab / Simulink para la aplicación de la perturbación en el controlador fuzzy simulado.

Elaborado por: Autor.

Tabla 3. 5: Resumen de resultados obtenidos en la simulación del controlador Fuzzy para alturas de 50 y 70 centímetros.

Información	50 cm	70 cm
Tiempo de subida (s)	54,48	95,70
Tiempo de estabilización (s)	67,37	122,36
Tiempo _{mínimo} de estabilización (s)	0,45	0,63
Tiempo _{máximo} de estabilización (s)	0,50	0,69
Overshoot (%)	0	0
Overshoot inferior (%)	0	0
Valor pico	0,50	0,69
T _{máximo} (s)	71,94	128,73

Elaborado por: Autor.

Los resultados obtenidos de las simulaciones de los controladores PID y Fuzzy son comparados para las alturas de 50 y 70 centímetros, incluyendo la perturbación del sistema. El resultado obtenido de las simulaciones de los controladores PID y Fuzzy para una altura de 50 cm son observados en la figura 3.20.

De manera similar a la comparativa para una altura de 50 cm, la figura 3.21 muestra la comparativa entre los resultados obtenidos de la simulación de los controladores PID y Fuzzy para una altura de 70 cm. Ahora, también se representa la comparativa de las simulaciones de los controladores PID y Fuzzy con perturbación en el sistema, tal como se muestra en la figura 3.15. Finalmente, en las figuras 3.20, 3.21 y 3.22 muestran que la simulación del controlador Fuzzy presenta mejores resultados en comparación con la simulación del controlador PID. Esto ocurre, porque el controlador Fuzzy no se muestra sobre la señal y presenta un tiempo de estabilización menor.

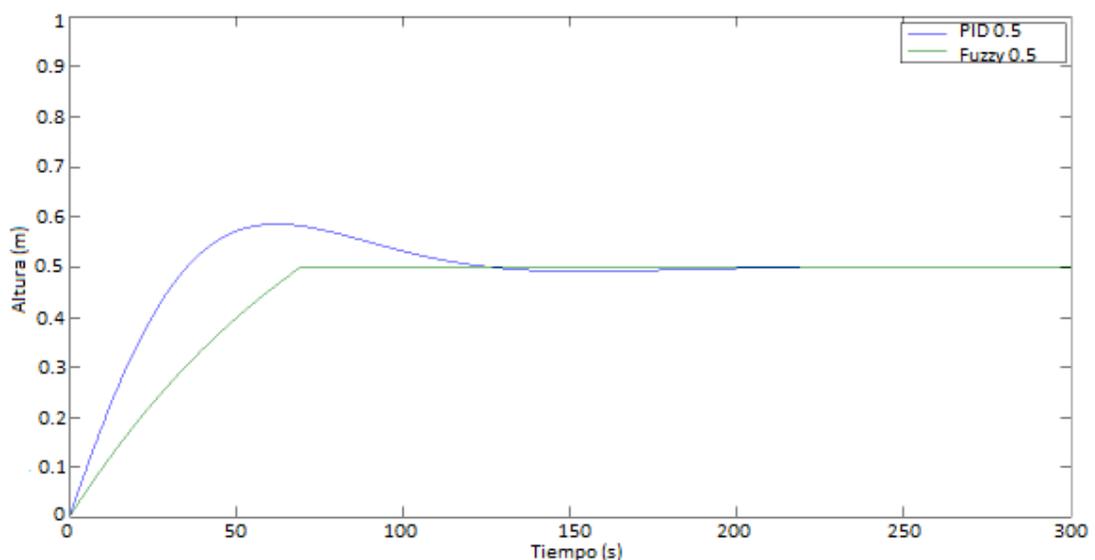


Figura 3. 20: Comparativa de la simulación de los controladores PID y Fuzzy para una altura de 50 cm.
Elaborado por: Autor.

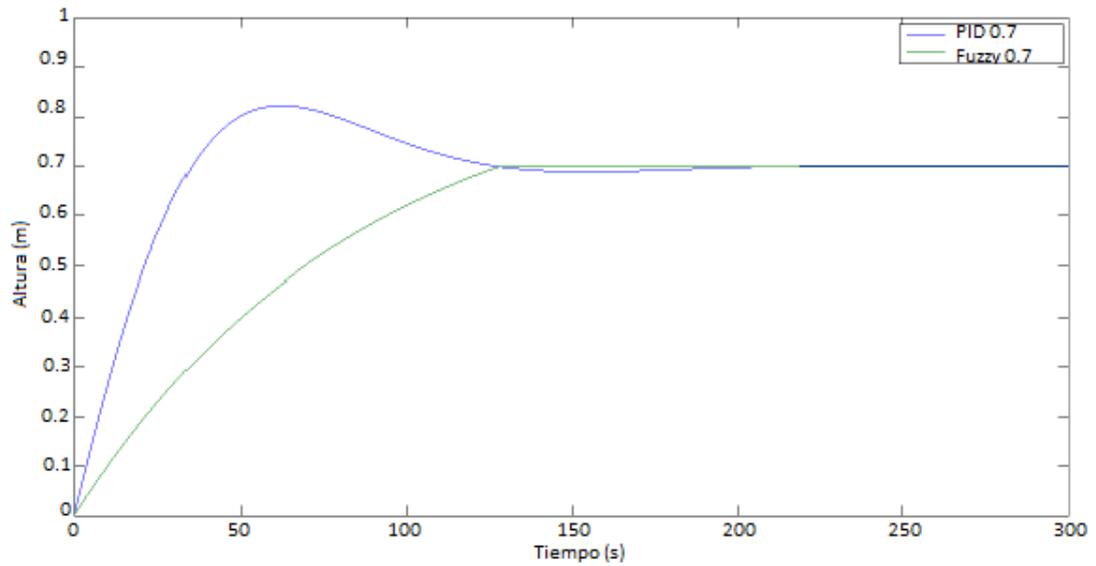


Figura 3. 21: Comparativa de la simulación de los controladores PID y Fuzzy para una altura de 70 cm.
Elaborado por: Autor

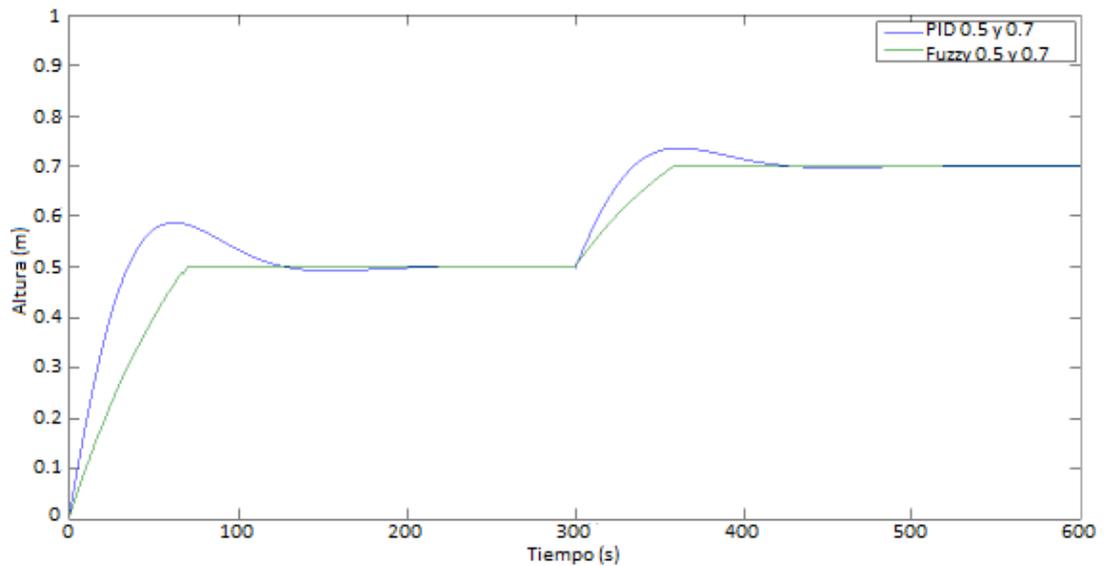


Figura 3. 22: Comparativa de la simulación de los controladores PID y Fuzzy con perturbación en el sistema.
Elaborado por: Autor

Capítulo 4: Conclusiones y Recomendaciones.

4.1. Conclusiones

- La amplia presencia del controlador PID en la industria muestra el buen empleo de este controlador en sistemas simples y sistemas complejos, pero esta técnica de control presenta limitaciones.
- En este trabajo, los requisitos de diseño no fueron atendidos pues el controlador fue proyectado para tener un tiempo de estabilización de 156 segundos y un sobre señal del 9,48%, pero los resultados fueron un tiempo de estabilización de 115,979 segundos y un sobre de 17,3729% para las alturas 50 y 70 cm. Existen factores que pueden haber provocado la no atención de los requisitos de diseño, la imposibilidad teórica de atender simultáneamente a todas las especificaciones de desempeño con un controlador del tipo PID y la necesidad de sintonía adicional de los parámetros de proyecto, estos factores pueden haber provocado el no cumplimiento de los requisitos de diseño.
- El controlador Fuzzy tiene ventaja en relación con el controlador PID por ser un controlador robusto que no depende de la variación de la válvula de salida (válvula de carga R) para obtener resultados satisfactorios. El controlador PID depende de la válvula de salida para encontrar las constantes proporcional, integral y derivada. Una pequeña variación en la válvula de salida hace que las ganancias del controlador PID no cumplan con los requisitos de diseño definidos inicialmente.

4.2. Recomendaciones.

- Realizar el diseño de un controlador híbrido PID-Fuzzy en aplicaciones de sistemas de control industrial.
- Aplicar el modelado matemático y de simulación en sistemas de máquinas eléctricas DC y AC.

Bibliografía

- Albarghot, M., Alkarrami, F., O'Young, S., & Rolland, L. (2017). Comparison between experimental results and simulation of a fuel cell powered DC motor using PID controller (pp. 1–5). IEEE. <https://doi.org/10.1109/EPEC.2017.8286196>
- Benalcázar T., J. I., & Verduga F., G. A. (2013). *Diseño e implementación de un sistema de control PID de posición de un motor de corriente continua por medio de hardware y software Matlab - Simulink para uso didáctico en la Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo*. (Trabajo de Titulación). Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Guayaquil. Recuperado a partir de <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/1604>
- Diordiev, A., Ursaru, O., Lucanu, M., & Tigaeru, L. (2003). A hybrid PID-fuzzy controller for dc/dc converters (Vol. 1, pp. 97–100). IEEE. <https://doi.org/10.1109/SCS.2003.1226957>
- Farfán, R. F., Cadena, C. A., & Villa, L. T. (2015). Experiencia en el uso de la Lógica Difusa para el Control del Seguimiento del Punto de Máxima Potencia en Convertidores para Módulos Fotovoltaicos. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 12(2), 208–217. <https://doi.org/10.1016/j.riai.2015.03.004>
- Fattah, A. (2015). *Design and Analysis of Speed Control Using Hybrid PID-Fuzzy Controller for Induction Motors* (Tesis de Maestría).
- Kandiban, R., & Arulmozhiyal, R. (2012). Speed Control of BLDC Motor Using Adaptive Fuzzy PID Controller. *Procedia Engineering*, 38, 306–313. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.06.039>
- Karakose, M., & Akin, E. (2010). Block based Fuzzy Controllers. *International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences*, 3(1), 100–110.

- Kiam Heong Ang, Chong, G., & Yun Li. (2005). PID control system analysis, design, and technology. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 13(4), 559–576. <https://doi.org/10.1109/TCST.2005.847331>
- Koeller N., C. H., & Alcívar B., J. E. (2014). *Diseño e implementación de un controlador PID para la presión de un electrolizador en una termoeléctrica*. (Trabajo de Titulación). Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Guayaquil. Recuperado a partir de <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/1668>
- Li, Q. (2011). A New PID Fuzzy Controller (Fuzzy P(I+D)) (pp. 310–313). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICIII.2011.220>
- Rajgire, C. M., Wankhede, M. M. N., & Karvekar, S. S. (2017). Design and implementation of sensorless vector control of induction motor drive using fuzzy-adaptive controller (pp. 313–317). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICCMC.2017.8282699>
- Rivera V., J. (2017). Diseño e implementación de un control PID en un sistema SCADA a través de las plataformas MatLab/Simulink y de instrumentación virtual LabView para motores DC utilizando un entrenador de planta de control. Recuperado a partir de <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/7742>
- Rodríguez S., R. D., & Daza B., P. J. (2016). *Estudio y diseño de un controlador difuso implementado en un módulo basado en microcontroladores*. (Trabajo de Titulación). Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Guayaquil. Recuperado a partir de <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/5341>
- Sharma, K., & Palwalia, D. K. (2017). A modified PID control with adaptive fuzzy controller applied to DC motor (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICOMICON.2017.8279151>

Tibaduiza, D. A., Amaya, I., Rodríguez, S., Mejía, N., & Flórez, M. (2011). Implementación de un control fuzzy para el control cinemático directo en un robot manipulador. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 19(3), 312–322. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052011000300002>

Villalba P., K. R. (2017). *Diseño de control difuso de temperatura para protección de motores DC utilizando tarjeta de adquisición de datos DAQ y Software LabView*. (Trabajo de Titulación). Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Guayaquil. Recuperado a partir de <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/9080>



DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **CARRERA SORIANO, BRYAN JAVIER** con C.C: # 0931776363 autor del Trabajo de Titulación: **Análisis comparativo del desempeño de controladores PID y Fuzzy para funciones de transferencia de un sistema de nivel de tanques** previo a la obtención del título de **INGENIERO ELÉCTRICO MECÁNICO** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, 17 de Febrero del 2018

f. _____
Nombre: Carrera Soriano, Bryan Javier
C.C: 0931776363

REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN

TÍTULO Y SUBTÍTULO:	ANÁLISIS COMPARATIVO DEL DESEMPEÑO DE CONTROLADORES PID Y FUZZY PARA FUNCIONES DE TRANSFERENCIA DE UN SISTEMA DE NIVEL DE TANQUES		
AUTOR(ES)	Carrera Soriano, Bryan Javier		
REVISOR(ES)/TUTOR(ES)	Suarez Murillo, Efraín Oswaldo		
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
FACULTAD:	Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo		
CARRERA:	Ingeniería en Eléctrico Mecánica		
TÍTULO OBTENIDO:	Ingeniero en Eléctrico Mecánica		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	17 de Febrero del 2018	No. DE PÁGINAS:	70
ÁREAS TEMÁTICAS:	Controles Eléctricos y Controles Electrónicos		
PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:	Controladores, Proporcional, Integral, Derivativo, Fuzzy, Simulación.		
RESUMEN/ABSTRACT (150-250 palabras):	<p>El presente trabajo de titulación permitió realizar el análisis comparativo del desempeño de controladores PID y Fuzzy para funciones de transferencia de un sistema de nivel de tanques. La primera parte, se especifica las generalidades del proyecto de titulación, donde se realiza una breve introducción de los controladores PID y Fuzzy. Después, se presentan los diferentes trabajos relacionados con los controladores PID y Fuzzy, con lo cual se define y justifica el problema a investigar, así como el objetivo general, objetivos específicos, hipótesis y la metodología utilizada. La segunda parte, se describe los fundamentos teóricos y clásicos de los sistemas de control, controladores PID con sus respectivos términos proporcional (P), integral (I) y derivativo (D) y Fuzzy. La tercera parte, se desarrolló el modelado y simulación del sistema de nivel de tanques mediante los controladores PID y Fuzzy sobre la plataforma MatLab/Simulink. Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones de posibles trabajos de titulación a desarrollarse a partir del presente trabajo de titulación.</p>		
ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
CONTACTO CON AUTOR/ES:	Teléfono: +593-939856225	E-mail: bryan.cherokee@hotmail.com	
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN:	Nombre: Philco Asqui, Luis Orlando		
COORDINADOR DEL PROCESO DE UTE	Teléfono: +593-9-80960875		
	E-mail: luis.philco@cu.ucsg.edu.ec		
SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA			
No. DE REGISTRO (en base a datos):			
No. DE CLASIFICACIÓN:			
DIRECCIÓN URL (tesis en la web):			