



**Diseño e implementación de un algoritmo de control PID con ajuste de ganancias basados en lógica difusa para un péndulo invertido QUBE-Servo 3.**

Pila Caiza, Richard Stalin y Yupangui Quevedo, Joel Alejandro

Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera en Electrónica y Automatización

Trabajo de unidad integración curricular, previo a la obtención del título de Ingeniero en  
Electrónica y Automatización

Ing. Velasco Sánchez, Paola Maritza Mgs.

20 de noviembre de 2023

Latacunga

## Reporte de verificación de contenido



### Plagiarism and AI Content Detection Report

MIC\_LOGICA DIFUSA.docx

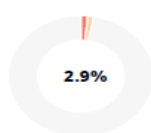
#### Scan details

Scan time:  
March 2th, 2024 at 16:46 UTC

Total Pages:  
37

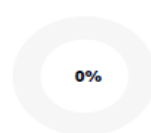
Total Words:  
9021

#### Plagiarism Detection



Types of plagiarism		Words
Identical	1.5%	134
Minor Changes	0.1%	7
Paraphrased	1.3%	121
Omitted Words	0%	0

#### AI Content Detection



Text coverage		Words
AI text	0%	0
Human text	100%	9021

[Learn more](#)

#### Plagiarism Results: (8)

**Control y Simulación del Péndulo de Furuta** 2.1%

<https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/90626/fichero/tfg+control+y+simulacion+furuta%2fctfg+contr...>

usuario

Trabajo Fin de Grado Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales Control y Simulación del Péndulo de Furuta Autor: Carlos Regal...

**(PDF) La ciencia de la ecología: un curso avanzado** 0.2%

[https://www.researchgate.net/publication/369088668\\_la\\_ciencia\\_de\\_la\\_ecologia\\_un\\_curso\\_avanzado](https://www.researchgate.net/publication/369088668_la_ciencia_de_la_ecologia_un_curso_avanzado)

Fernando Momo

Home Biological Science Ecology BookPDF AvailableLa ciencia de la ecología: un curso avanzado March 2023  
Publisher: Editorial Dun...

**TESIS PENDULO INVERTIDO.docx?sequence=1&isAllowed=y** 0.2%

<https://repositorio.itfip.edu.co/bitstream/handle/itfip/124/tesis%20pendulo%20invertido.docx?sequence=1&i...>

HAROL

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PÉNDULO INVERTIDO OPERADO POR MATLAB PARA CLASES PRÁCTICAS DE CONTROL EN LOS LABORATORIOS DE ELECTRÓNICA IT...



Firmado electrónicamente por:  
**PAOLA MARITZA  
VELASCO SANCHEZ**

Ing. Velasco Sánchez, Paola Maritza Mgs.

C. C.:0502519770



Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones  
Carrera de Electrónica y Automatización

### Certificación

Certifico que el trabajo de unidad de integración curricular: **“Diseño e implementación de un algoritmo de control PID con ajuste de ganancias basados en lógica difusa para un péndulo invertido QUBE-Servo 3.”** fue realizado por los señores **Pila Caiza, Richard Stalin** y el señor **Yupangui Quevedo, Joel Alejandro** el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizada en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Latacunga, 5 de marzo de 2024

Firma:

**Ing. Velasco Sánchez, Paola Maritza Mgs.**

C. C.:0502519770



Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Electrónica y Automatización

**Responsabilidad de Autoría**

Nosotros, **Pila Caiza, Richard Stalin**, con cédula de ciudadanía n° 0503968935 y **Yupangui Quevedo, Joel Alejandro**, con cédula de ciudadanía n° 1726063207, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de unidad de integración curricular: **“Diseño e implementación de un algoritmo de control PID con ajuste de ganancias basados en lógica difusa para un péndulo invertido QUBE-Servo 3”** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Latacunga, 5 de marzo de 2024

Pila Caiza, Richard Stalin

C. C.: 0503968935

Yupangui Quevedo, Joel Alejandro

C. C.: 1726063207



Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Electrónica y Automatización

### Autorización de Publicación

Nosotros, **Pila Caiza, Richard Stalin**, con cédula de ciudadanía n° 0503968935 y **Yupangui Quevedo, Joel Alejandro**, con cédula de ciudadanía n° 1726063207, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de unidad de integración curricular: **“Diseño e implementación de un algoritmo de control PID con ajuste de ganancias basados en lógica difusa para un péndulo invertido QUBE-Servo 3”** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad

Latacunga, 5 de marzo de 2024

Pila Caiza, Richard Stalin

C. C.: 0503968935

Yupangui Quevedo, Joel Alejandro

C. C.: 1726063207

## **Dedicatoria**

Dedicada a mis padres por su amor incondicional, por siempre confiar en mí y brindarme la oportunidad de educarme y llegar a cumplir uno de mis más anhelados sueños.

A mi hermano mayor por ser ese ejemplo a seguir, por siempre estar pendiente de mí y aconsejarme para que no renuncie.

A mi hermano menor por las alegrías que compartimos y por su apoyo incondicional.

A todos mis seres queridos y familiares por estar presentes siempre en lo que necesitaba y enseñarme a valorar las cosas.

A mis dos ángeles que siempre cuidan de mí y serán los que me guíen desde el cielo.

Dedicado también a todos mis amigos que siempre estuvieron presente en este largo camino y todos esos momentos desafiantes que superamos.

***Richard Pila***

**Dedicatoria**

Dedico este trabajo a mis padres amados, Luis Gerardo Yupangui Chiluisa y Corina Marisol Quevedo Herrera, que me han dedicado todo su amor y apoyo incondicional, y que durante este largo proceso han sido mi luz en los momentos más oscuros de este arduo viaje académico. Su sacrificio ha sido el combustible que me ha impulsado hacia este logro importante en mi vida. A mi querida familia, cuyo amor y aliento han sido el motor de mi lucha, les dedico este triunfo con el más profundo de los sentimientos. Con el corazón lleno de gratitud, espero que este logro sea el primer paso y con el tiempo les pueda compensar todo lo que han dado por mí.

**Joel Yupangui**

## **Agradecimientos**

Agradecido a Dios por siempre iluminarme en este camino largo pero satisfactorio.

El agradecimiento más grande para mi madre Elvia Caiza por ser extraordinaria, por su comprensión, sabiduría y motivación constante, siendo el pilar fundamental para poder culminar mi trabajo, también a mi padre Nelson Pila por ser la persona que me enseñó a ser constante, a nunca rendirme, ser una persona correcta y siempre dar lo mejor de mí.

Agradezco también a mis hermanos Jonathan y Joel quienes son los que me motivan a seguir adelante y están presentes en todos los momentos difíciles, brindándome todo el apoyo y la fuerza que necesito.

Para Joel Yupangui compañero de tesis y amigo para toda la vida, quien desde inicio de este gran trayecto académico me brindo su amistad y apoyo, gracias por esos buenos y malos momentos de vida universitaria.

Un agradecimiento profundo a mis amigos, futuros ingenieros Kelvin y Byron por ser personas sinceras, honestas y que nunca se rinden a cualquier adversidad que se encuentre en el camino.

También de parte de sus tesis Richard y Joel un agradecimiento sincero para la Ingeniera Jacqueline Llanos PhD y la Ingeniera Paola Velasco Mgtr, por toda su enseñanza, paciencia, dedicación y por ser las mejores profes de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE-, unas personas valientes e inteligentes que sin su ayuda este trabajo no sería posible.

A todos los que de alguna manera han aportado y contribuido a la realización de este trabajo mis más sinceros agradecimientos.

***Richard Pila***



## **Agradecimientos**

Agradezco a mis padres Luis Yupangui y Corina Quevedo, que me enseñaron el ejemplo de la perseverancia, y la determinación de seguir adelante pese a los malos resultados, agradezco por dedicarme su tiempo y que en los momentos más difíciles han estado ahí para levantarme, y motivarme a seguir luchando. Cada día me han inculcado la importancia de la integridad, responsabilidad y el trabajo honesto. Su sacrificio y dedicación no han sido en vano, hoy puedo decir con orgullo que su apoyo ha sido fundamental para lograr esta meta.

Agradezco a mis abuelitos, Flavio Quevedo y Gloria Herrera, por brindarme su aliento, amor puro, y la confianza para lograr ser una persona buena y un profesional ético en la vida.

A mis tías Geoconda Quevedo y Doris Quevedo por su apoyo infinito en los momentos más difíciles en mi vida. Su presencia ha sido un verdadero regalo en este logro importante en mi vida, a mis primos Joselyn Molina y Jairo Molina que fueron mis acompañantes durante este largo proceso, y a mi pequeña Isabellita Martina, que me dio la determinación para alcanzar esta meta, su presencia ha sido un regalo invaluable en mi camino.

A mi novia por ser mi inspiración, y su presencia me ha ayudado a superarme día a día y su amor ha sido la fuerza necesaria que me ha llevado a avanzar en mi desarrollo personal como profesional ha sido un verdadero tesoro en este viaje

Quiero reconocer a mi compañero de tesis y amigo Richard Pila, quien estuvo conmigo desde el inicio de este desafiante proceso académico, que a pesar de lo difícil que fue el camino, estuvo presente en los buenos y malos momentos, brindándome su amistad y su apoyo

**Joel Yupangui**

**ÍNDICE DE CONTENIDO**

<b>Carátula .....</b>	<b>1</b>
<b>Reporte de verificación de contenido.....</b>	<b>2</b>
<b>Certificación .....</b>	<b>3</b>
<b>Responsabilidad de Autoría.....</b>	<b>4</b>
<b>Autorización de Publicación .....</b>	<b>5</b>
<b>Dedicatoria .....</b>	<b>6</b>
<b>Dedicatoria .....</b>	<b>7</b>
<b>Agradecimientos.....</b>	<b>8</b>
<b>Agradecimientos.....</b>	<b>9</b>
<b>Índice de Contenido.....</b>	<b>10</b>
<b>Índice de Figuras .....</b>	<b>14</b>
<b>Índice de Tablas .....</b>	<b>16</b>
<b>Resumen.....</b>	<b>17</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>18</b>
<b>Capítulo I: Introducción.....</b>	<b>19</b>
<b>Antecedentes .....</b>	<b>19</b>
<b>Planteamiento del problema y justificación.....</b>	<b>22</b>
<b>Objetivos .....</b>	<b>24</b>
<b><i>Objetivo general .....</i></b>	<b>24</b>
<b><i>Objetivos específicos.....</i></b>	<b>24</b>

Hipótesis .....	24
Capítulo II: Fundamento Teórico .....	25
Péndulo invertido.....	25
<i>Péndulo invertido sobre base móvil</i> .....	25
<i>Péndulo rotatorio de furuta</i> .....	26
<i>Péndulo con rueda inercial</i> .....	27
<i>Doble Péndulo invertido</i> .....	28
Péndulo invertido Quanser Qube-Servo 3 .....	29
Algoritmos de control tradicionales .....	30
<i>Estructura general del algoritmo PID</i> .....	30
<i>Acción de control Proporcional (P)</i> .....	30
<i>Acción de control Integral (I)</i> .....	31
<i>Control Derivativo (D)</i> .....	32
<i>Control Proporcional – Integral - Derivativo (PID)</i> .....	32
Algoritmos de control inteligente .....	34
<i>Redes neuronales artificiales</i> .....	34
<i>Control difuso</i> .....	36
<i>Algoritmos genéticos</i> .....	38
<i>Control PID con ajuste de ganancias basado en lógica difusa</i> .....	39
Capítulo III: Diseño de Controlador Tradicional .....	40
Modelamiento no lineal del péndulo invertido.....	40
Diseño del modelo en Simulink .....	44
Diseño de la interfaz del péndulo invertido en 3D .....	51
Capítulo IV: Diseño del Controlador con Lógica Difusa.....	55

Definición de las variables lingüísticas.....	56
Definición de los conjuntos difusos.....	57
Establecimiento de las reglas difusos .....	63
Selección del método de defusificación. ....	65
Implementación de un control PD adaptativo con lógica difusa mediante Simulink de Matlab: .....	67
Respuesta del sistema con control PD adaptativo mediante lógica difusa.....	68
<b>Capítulo V: Implementación de Controladores.....</b>	<b>70</b>
Implementación de un control PID clásico en la planta real.....	70
Respuesta del sistema con control PID clásico en la planta real.....	71
Respuesta del sistema con control PID clásico ante una perturbación en la planta real .....	72
Implementación de un control PID adaptativo con ajuste de ganancias utilizando lógica difusa en la planta real. ....	73
Respuesta del sistema con el control PID avanzado en la planta real.....	75
Respuesta del sistema con el control PID avanzado en la planta real ante una perturbación .....	77
<b>Capítulo VI: Análisis Comparativo.....</b>	<b>79</b>
Respuesta del sistema con un control PID clásico versus un control PID adaptativo con lógica difusa en la planta real .....	79
<b>Capítulo VII: Conclusiones y Recomendaciones.....</b>	<b>85</b>
Conclusiones .....	85

<b>Recomendaciones .....</b>	<b>87</b>
<b>Bibliografía .....</b>	<b>88</b>
<b>Anéxos.....</b>	<b>93</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> <i>Péndulo invertido sobre base móvil</i> .....	25
<b>Figura 2</b> <i>Péndulo invertido de Furuta</i> .....	27
<b>Figura 3</b> <i>Péndulo con volante de inercia</i> .....	27
<b>Figura 4</b> <i>Doble péndulo invertido</i> .....	28
<b>Figura 5</b> <i>Péndulo invertido Quanser Qube-Servo 3</i> .....	29
<b>Figura 6</b> <i>Diagrama de bloques de un algoritmo PID tradicional</i> .....	30
<b>Figura 7</b> <i>Comparación de los diferentes algoritmos de control</i> .....	33
<b>Figura 8</b> <i>Forma esquemática de una red neuronal artificial</i> .....	35
<b>Figura 9</b> <i>Diagrama a bloques de un controlador difuso genérico</i> .....	37
<b>Figura 10</b> <i>Algoritmos genéticos aplicados a controladores PID</i> .....	38
<b>Figura 11</b> <i>Esquema general del control PID ajustable basados en lógica difusa</i> .....	39
<b>Figura 12</b> <i>Sistema de coordenadas definido del péndulo invertido</i> .....	40
<b>Figura 13</b> <i>Subsistema del modelo principal péndulo invertido en Simulink</i> .....	45
<b>Figura 14</b> <i>Lazo abierto del péndulo invertido en Simulink</i> .....	46
<b>Figura 15</b> <i>Comportamiento de los ángulos del péndulo invertido</i> .....	47
<b>Figura 16</b> <i>Esquema del control PD modificado en péndulo invertido por simulación</i> .....	49
<b>Figura 17</b> <i>Graficas resultantes de los ángulos <math>\phi</math> y <math>\theta</math> con un controlador clásico</i> .....	50
<b>Figura 18</b> <i>Creación y configuración del péndulo invertido en V Realm 3D</i> .....	51
<b>Figura 19</b> <i>Selección de parámetros para el péndulo invertido 3D</i> .....	52
<b>Figura 20</b> <i>Conexión del péndulo invertido 3D creado mediante V Realm</i> .....	53
<b>Figura 21</b> <i>Funcionamiento del péndulo invertido 3D con un setpoint de <math>45^\circ</math></i> .....	53
<b>Figura 22</b> <i>Diagrama del diseño del control PID adaptativo para el péndulo QUBE-Servo 3</i> .....	57
<b>Figura 23</b> <i>Conjuntos difusos de la variable de entrada del primer algoritmo Fuzzy</i> .....	58
<b>Figura 24</b> <i>Conjuntos difusos de la variable de salida del primer algoritmo Fuzzy</i> .....	59
<b>Figura 25</b> <i>Conjuntos difusos de la variable de entrada del segundo algoritmo Fuzzy</i> .....	60

<b>Figura 26</b>	<i>Conjuntos difusos de la variable de salida del tercer algoritmo Fuzzy .....</i>	61
<b>Figura 27</b>	<i>Conjuntos difusos de la variable de entrada del tercer algoritmo Fuzzy .....</i>	62
<b>Figura 28</b>	<i>Conjuntos difusos de la entrada para obtener los valores de <math>K_d</math> .....</i>	63
<b>Figura 29</b>	<i>Defusificación por el método del centroide para obtener los valores de <math>K_p</math> .....</i>	66
<b>Figura 30</b>	<i>Defusificación por el método del centroide para obtener los valores de <math>K_i</math> .....</i>	66
<b>Figura 31</b>	<i>Defusificación por el método del centroide para obtener los valores de <math>K_d</math> .....</i>	67
<b>Figura 32</b>	<i>Diseño del controlador PD adaptativo por simulación.....</i>	68
<b>Figura 33</b>	<i>Respuesta ángulo <math>\phi</math> al implementar un control PD clásico en la planta real .....</i>	68
<b>Figura 34</b>	<i>Respuesta del ángulo <math>\theta</math>.....</i>	69
<b>Figura 35</b>	<i>Diagrama de bloques en lazo cerrado con un control PID clásico en la planta real ..</i>	71
<b>Figura 36</b>	<i>Respuesta ángulo <math>\phi</math> al implementar un controlador PID clásico en la planta real .</i>	72
<b>Figura 37</b>	<i>Respuesta del ángulo <math>\phi</math> ante una perturbación.....</i>	72
<b>Figura 38</b>	<i>Diagrama de bloques del controlador PID adaptativo en la planta real.....</i>	74
<b>Figura 39</b>	<i>Respuesta ángulo <math>\phi</math> al implementar un PID adaptativo en la planta real .....</i>	75
<b>Figura 40</b>	<i>Valores de ganancia proporcional <math>K_p</math> en distintos puntos de operación .....</i>	76
<b>Figura 41</b>	<i>Valores de ganancia derivativa <math>K_d</math> en distintos puntos de operación.....</i>	76
<b>Figura 42</b>	<i>Valores de ganancia integral <math>K_i</math> en distintos puntos de operación .....</i>	77
<b>Figura 43</b>	<i>Respuesta de <math>\phi</math> ante perturbación al implementarse un control PID avanzado.....</i>	77
<b>Figura 44</b>	<i>Respuesta del sistema al implementar los controladores en la planta real .....</i>	79
<b>Figura 45</b>	<i>Respuesta del sistema al implementar los controladores en la planta real .....</i>	80
<b>Figura 46</b>	<i>Respuesta transitoria de un sistema de control PID clásico .....</i>	81
<b>Figura 47</b>	<i>Respuesta transitoria de un sistema de control PID avanzado.....</i>	82

**ÍNDICE DE TABLAS**

<b>Tabla 1</b> <i>Parámetros de simulación del péndulo invertido</i> .....	46
<b>Tabla 2</b> <i>Variables lingüistas de los tres algoritmos difusos implementados</i> .....	56
<b>Tabla 3</b> <i>Reglas difusas implementadas para determinar valores de ganancia proporcional <math>K_p</math></i> .....	64
<b>Tabla 4</b> <i>Reglas difusas implementadas para determinar valores de ganancia derivativa <math>K_d</math></i> .....	64
<b>Tabla 5</b> <i>Reglas difusas implementadas para determinar los valores de ganancia integral <math>K_i</math></i> .....	65
<b>Tabla 6.</b> <i>Parámetros de la respuesta transitoria de un sistema de control PID clasico</i> .....	82
<b>Tabla 7</b> <i>Parámetros de la respuesta transitoria de un sistema de control PID avanzado</i> .....	83



## Resumen

En el presente trabajo, se plantea diseñar e implementar un algoritmo de control PID con ajuste de ganancias basado en lógica difusa para el péndulo invertido QUBE-Servo 3, esta propuesta surge en el contexto de una planta experimental académica de laboratorio, la cual presenta un alta no linealidad, inestabilidad inherente y se comporta como un sistema SIMO con una entrada (voltaje) y dos salidas (ángulo  $\phi$  y ángulo  $\theta$ ). Controlar un péndulo invertido bajo estas condiciones representa un desafío significativo en el área de control, y es por ello que se busca encontrar la mejor forma de sintonizar el controlador para este sistema complejo. El primer paso en este proceso es la obtención del modelo matemático del péndulo invertido, lo que permite realizar simulaciones en el software Simulink. Estas simulaciones son fundamentales para llevar a cabo pruebas en lazo abierto y lazo cerrado, lo que a su vez permite verificar el comportamiento dinámico de las entradas y salidas de la planta, luego se procede al diseño de un controlador clásico PID, que servirá como base para la transformación adaptativa hacia un control avanzado con ajuste de ganancias mediante lógica difusa. La visualización de resultados se evidencia en el simulador 3D V Realm de Matlab, lo que proporciona una representación visual detallada del comportamiento del péndulo y contribuye a una comprensión más profunda del sistema. Posteriormente, se lleva a cabo la implementación del controlador avanzado en el péndulo invertido QUBE-Servo 3, este proceso se realiza mediante la integración de software enlazados y compatibles, como Simulink de Matlab, Microsoft Visual Studio y el software QUBE propio del péndulo invertido. Finalmente, se realiza una comparación exhaustiva y un análisis técnico entre las simulaciones realizadas y los resultados obtenidos en el entorno real, lo que permite validar la efectividad y precisión del algoritmo de control propuesto.

*Palabras clave:* Control Fuzzy, péndulo invertido, planta QUBE-Servo 3.

### **Abstract**

In this work, we propose to design and implement a PID control algorithm with gain tuning based on fuzzy logic for the inverted pendulum QUBE-Servo 3, this proposal arises in the context of an academic experimental laboratory plant, which has a high nonlinearity, inherent instability and behaves as a SIMO system with one input (voltage) and two outputs (phi angle and theta angle). Controlling an inverted pendulum under these conditions represents a significant challenge in the control area, and that is why we seek to find the best way to tune the controller for this complex system. The first step in this process is to obtain the mathematical model of the inverted pendulum, which allows simulations in Simulink software. These simulations are essential to carry out tests in open loop and closed loop, which in turn allows to verify the dynamic behavior of the inputs and outputs of the plant, then proceed to the design of a classical PID controller, which will serve as the basis for the adaptive transformation to an advanced control with gain adjustment using fuzzy logic. The visualization of simulation results is evidenced in the 3D V Realm simulator of Matlab, which provides a detailed visual representation of the pendulum behavior and contributes to a deeper understanding of the system. Subsequently, the implementation of the advanced controller in the real QUBE-Servo 3 inverted pendulum is carried out through the integration of linked and compatible software, such as Simulink from Matlab, Microsoft Visual Studio and the QUBE software of the inverted pendulum. Finally, an exhaustive comparison and technical analysis is performed between the simulations performed and the results obtained in the real environment, which allows validating the effectiveness and accuracy of the proposed control algorithm.

*Key words:* Fuzzy control, inverted pendulum, QUBE-Servo 3 plant.

## Capítulo I

### Introducción

#### Antecedentes

Los sistemas de control han permitido el desarrollo industrial, incluso con sistemas con alta complejidad de control. Los sistemas no lineales plantean grandes desafíos a la ingeniería electrónica debido a la complejidad de implementar técnicas capaces de controlar y estabilizar estos sistemas. El péndulo QUBE-Servo 3 demuestra ser un sistema altamente no lineal cuya linealización representa un alto grado de dificultad matemática, por lo que ha sido objeto de estudio e investigación a lo largo de los años, en donde se han implementado varias técnicas de control para poder interactuar con este (Martínez & González, 2021). El péndulo invertido a más de ser un dispositivo muy popular para el análisis de control lineal, no-lineal y para propósitos educativos posee aplicaciones en el control de satélites, estabilización de aviones ante flujo de aire turbulento, estabilización de la cabina de un barco, control de cohetes, control de scooters, control de estabilidad de grúas, construcción de vehículos de desplazamiento para humanos, aplicaciones fundamentales en la robótica, para proporcionar equilibrio para los robots. De ahí que varios trabajos simulados e implementados se han reportado respecto a su estudio.

A lo largo de los años, han surgido diferentes enfoques para abordar el control de sistemas, y los dos enfoques más prominentes son el control tradicional y el control inteligente. Estos enfoques buscan regular y ajustar variables de interés en un sistema con el objetivo de lograr un desempeño deseado y eficiente. El control del péndulo invertido presenta un reto por su no linealidad y la perturbación persistente que excita el sistema.

Los controles no tradicionales implican un desarrollo matemático complejo y en muchos casos la implementación física presenta problemas mecánicos que dificultan el diseño del

controlador (Macías, 2020). Por ejemplo, en (Prasad et al., 2011) proponen un control LQR regulador cuadrático lineal, los estados no lineales alimentan al LQR el cual está diseñado usando modelos de espacio de estado lineal de esta manera se controla la posición del carro y la estabilización del péndulo invertido. Otras propuestas utilizan controladores inteligentes a través de redes neuronales o algoritmos genéticos, en el caso de usar redes neuronales lo hacen con RBFNN (redes neuronales de función de base radial) esta red permite aproximar el enlace no lineal del modelo de péndulo invertido lo cual combinado con la teoría de control moderno hace que el control del péndulo sea eficiente (Xu et al., 2023). El control fuzzy es utilizado junto a las redes neuronales para compensar las entradas de referencia del sistema, la red neuronal se usa en línea de manera que se ajuste la compensación del controlador (Lee & Jung, 2008), estos controladores requieren de complejidad en su diseño.

Sin duda los controladores tradicionales actualmente son los más implementados en la industria, como por ejemplo controles PI, PID. En el trabajo de (Rithirun et al., 2021) se implementa un control PID convencional para un sistema de péndulo invertido que puede controlar el equilibrio del sistema, sin embargo, frente a alguna perturbación, la respuesta del sistema de control no es lo suficientemente rápida. Pese a su alta aplicabilidad se sabe que las técnicas de sintonía del PID convencional son basadas en curvas de respuesta o modelos que utilizan un punto de operación y en sistemas altamente no lineales la dinámica de respuesta no necesariamente es la misma en todos los puntos. En algunos procesos industriales para mejorar el desempeño de los controladores PID se han implementado ganancias adaptivas que recalculan en línea los parámetros de sintonía de este controlador y han demostrado alta eficiencia. Los controles PID han sido modificados con el fin de alcanzar mejores desempeños es así como en (Paliwal, 2017) se propone la utilización de controladores PID de orden fraccional para proporcionar un diseño robusto de los controladores para la estabilización del sistema MIP (péndulo invertido móvil). Se ha utilizado un esquema de control de dos bucles

para la estabilización del sistema MIP: un controlador se utiliza para controlar la posición del sistema MIP y el otro controlador se utiliza para controlar el ángulo del péndulo del sistema. En un enfoque similar en (Wang et al., 2018) se presenta el control de estabilidad basado en orden fraccional para el sistema de péndulo invertido giratorio de un solo enlace. El modelo matemático se deriva utilizando la ecuación de Lagrange y el cálculo fraccionario G-L. Luego se diseñan respectivamente el controlador PID de orden entero y el controlador PID de orden fraccionario. En (Wang et al., 2016) se implementa un controlador de orden fraccionario para el control compuesto, tomando como planta el sistema de péndulo invertido de primer orden, en el cual se utiliza un compensador directo para alcanzar el estado estable.

También se han reportado PID de programación de ganancia adaptativa para un péndulo invertido en (Hakim & Sanhoury, 2018) se muestra un PID de programación de ganancia que mejora la respuesta transitoria con respecto al controlador PID tradicional. En un similar contexto en (Kuo et al., 2009), se propone un novedoso PID adaptativo con control de modo deslizante para el péndulo invertido giratorio, los tres parámetros del controlador PID, ganancia proporcional, ganancia integral y ganancia derivativa, se pueden obtener sistemáticamente de acuerdo con la ley adaptativa. Los resultados de la simulación muestran que se eliminan las vibraciones y el error de estado estable.

Los PID adaptivos aún no han sido altamente explorados en sistemas con naturaleza no lineal e inestables en lazo abierto como el péndulo invertido. Por lo que se presenta un tema de alto interés en donde las ganancias del controlador se puedan obtener por técnicas de aprendizaje o algoritmos inteligentes. Controles PID adaptable con lógica difusa es un área innovadora para explorar que aún no es común en este tipo de sistema lo cual puede ser una solución a la no linealidad y perturbación persistente del péndulo.

## **Planteamiento del problema y justificación**

El problema asociado al péndulo invertido es por la falta de estabilidad, el desafío surge debido a la compleja dinámica del sistema, que dificulta mantener el péndulo en una posición vertical y equilibrada, ya que está constantemente influenciado por las fuerzas gravitacionales y perturbaciones como el movimiento giratorio, a medida que el péndulo se desvía de su posición vertical, la gravedad ejerce una fuerza que lo impulsa a moverse en direcciones no deseadas. Esta sensibilidad a las perturbaciones mínimas hace que el péndulo invertido sea un problema en la teoría del control, siendo un caso de estudio fundamental para desarrollar estrategias de control en áreas como la robótica y la ingeniería de control.

Existen varios factores que afectan la estabilidad del péndulo invertido tales como el movimiento rotatorio o la fuerza de gravedad, al ser un sistema no lineal y con perturbación presenta un reto de eficiencia para los controles tradicionales por ello en la actualidad se usan distintos controles unos más sofisticados que otros para solucionar el problema. Los controladores actuales más utilizados son bastante funcionales, pero no todos compensan la perturbación del péndulo de manera óptima, este reto es fundamental solucionarlo ya que tiene una aplicación por ejemplo en robots bípedos a la hora de caminar.

Por otro lado existen varios resultados de aprendizaje de la carrera de Ingeniería Electrónica y Automatización alineados a aplicaciones de control con su implementación, como por ejemplo; “Diseño, simulación e implementación sistemas automatizados de servicios, integrando técnicas y estrategias de control avanzado, hardware electrónico y software especializado, demostrando en su accionar valores universales y propios de la profesión” , con el objetivo de cumplir estos se requiere de una etapa de implementación con la necesidad de equipamiento para prácticas experimentales que direccionen a su cumplimiento, actualmente es escaso el disponer de plantas con dinámicas especiales para este tipo de aplicaciones por lo

que la ejecución de este trabajo permite dar a conocer un control avanzado optimo en este tipo de planta altamente inestable.

Esta investigación se enfoca en un área de gran relevancia en el campo de la ingeniería en Electrónica y Automatización, ya que busca contribuir al avance de la tecnología en sistemas de control.

El diseño e implementación de un algoritmo de control PID con ajuste de ganancias basados en lógica difusa para un péndulo invertido es un tema relevante debido a su aplicabilidad en diversos campos de la ingeniería y la robótica, debido a que el péndulo invertido es un sistema no lineal y altamente inestable, lo que lo convierte en un desafío interesante para el control automático. El controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo) es ampliamente utilizado en la industria debido a su simplicidad y eficacia en el control de sistemas lineales. Sin embargo, su desempeño puede verse limitado en sistemas no lineales como el péndulo invertido QUBE-Servo Rotatorio.

Por otro lado, la lógica difusa es una técnica que permite modelar y controlar sistemas complejos y no lineales de manera más precisa y robusta. Al combinar la lógica difusa con un controlador PID, es posible ajustar las ganancias del controlador de manera adaptativa y en tiempo real, lo que puede mejorar significativamente el rendimiento del sistema de control.

## **Objetivos**

### ***Objetivo general***

Diseñar e implementar un algoritmo de control PID con ajuste de ganancias basados en lógica difusa para un péndulo invertido QUBE-Servo Rotatorio.

### ***Objetivos específicos***

Modelar y simular el péndulo invertido QUBE-Servo rotatorio.

Diseñar una interfaz interactiva del péndulo invertido QUBE-Servo rotatorio.

Diseñar e implementar por simulación una estrategia de control PID con ganancias fijas para el péndulo invertido QUBE-Servo rotatorio.

Diseñar e implementar por simulación una estrategia de control PID con ajuste de ganancias basado en lógica difusa para el péndulo invertido QUBE-Servo rotatorio.

Implementar, validar y comparar las estrategias de control propuestas en la planta real.

## **Hipótesis**

¿El controlador PID adaptivo con lógica difusa presenta mejor desempeño que el controlador PID tradicional?



## Capítulo II

### Fundamento Teórico

En este capítulo se describe los fundamentos teóricos y conceptos utilizados para el desarrollo de esta tesis, consideran investigaciones y publicaciones más relevantes en la literatura de autores expertos en el tema de controladores avanzados.

#### **Péndulo invertido**

Los péndulos invertidos son grandes artefactos que forman una infinidad de pruebas muy complejas e interesantes para toda la ingeniería de control no lineal, consiste en una varilla con una masa en un extremo y en el otro un eje que puede pivotar bidireccionalmente, existen diferentes tipos de péndulos invertidos y a continuación se citan según (Aracil Santonja & Gordillo Álvarez, 2005).

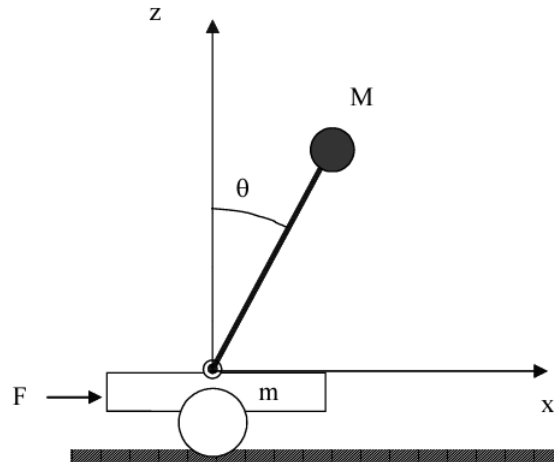
- Péndulo invertido sobre base móvil
- Péndulo rotatorio de furuta
- Péndulo con rueda inercial
- Doble péndulo invertido

#### ***Péndulo invertido sobre base móvil***

En la **Figura 1** se ve representado el subsistema formado por el péndulo invertido sobre una plataforma móvil.

#### **Figura 1**

*Péndulo invertido sobre base móvil*



*Nota.* El gráfico representa un péndulo invertido sobre una base móvil, que se utiliza elementalmente sobre un carro móvil. Tomado de (Viguria Jiménez et al., 2004)

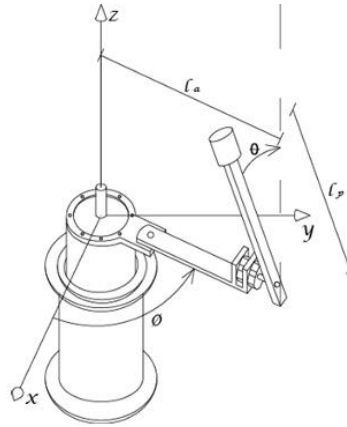
### **Péndulo rotatorio de furuta**

El péndulo de Furuta fue inventado por Katsuhisa Furuta en 1992, en el Instituto de Tecnología de Tokio. El péndulo de Furuta es un sistema no lineal subactuado de dos grados de libertad que se ha convertido en un sistema clásico para la aplicación de teorías de control lineal y no lineal. Su estudio es importante debido que su modelo tiene aplicación en el control de satélites, estabilización de aviones ante flujo de aire turbulento o estabilización de la cabina de un barco y por último se lo está utilizando en los carros tecnológicos que se manejan automáticamente y se debe controlar la trayectoria de manejo. (Åström & Furuta, 1996)

El péndulo de Furuta es un péndulo invertido rotatorio. Este péndulo radica en un péndulo acoplado a un brazo que gira sobre una base como se lo puede observar en la **Figura 2**, el objetivo es controlar la posición del péndulo para que este se mantenga vertical hacia arriba y a su vez se controla la posición del brazo y se mantenga en un ángulo correcto.

## Figura 2

### *Péndulo invertido de Furuta*



*Nota.* Se evidencia un péndulo invertido de furuta o rotatorio con los dos ángulos que le afectan al sistema. Tomado de (Regalo Núñez, 2016).

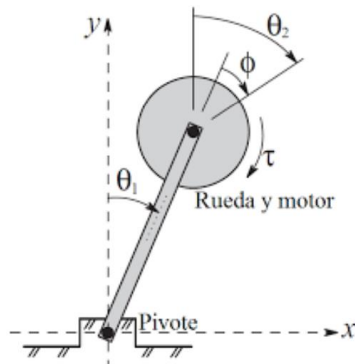
### ***Péndulo con rueda inercial***

El péndulo con volante de inercia, es un sistema que netamente se debe conocer la posición angular respecto a su vertical  $0^\circ$ , la cual esta censada mediante un encoder óptico incremental, donde dicha posición se utiliza en el sistema de control para que realice las acciones necesarias de acelerar o desacelerar en el sentido del volante de inercia para así mantenerlo en equilibrio. (Rocchi, s. f.)

El péndulo invertido con rueda de reacción es una variante del péndulo invertido en la cual un motor, sujeto al extremo libre de una barra, hace girar una rueda de inercia simétrica con respecto a su eje de rotación, como se ve en la **Figura 3**.

## Figura 3

### *Péndulo con volante de inercia*



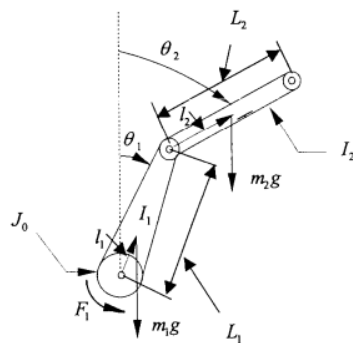
*Nota.* El péndulo con volante de inercia o rueda de tracción, contiene un disco que imprime aceleraciones angulares mediante un motor y mueve la barra suspendida. Tomado de (Martín-Bustamante González-Iglesias, 2019)

### **Doble Péndulo invertido**

Un doble péndulo invertido se trata de un sistema no lineal subactuado no lineal (Es decir se tiene menos entradas de control que grados de libertad) es decir presenta dos grados de libertad completos ( $\theta_1$  y  $\theta_2$ ) y una entrada de control ( $\mu$ ). Considerando un sistema más complejo que consta de dos péndulos rotatorios invertidos como se lo puede observar en la **Figura 4.** (Felipe Tolentino, 2021)

### **Figura 4**

*Doble péndulo invertido*



*Nota.* Se debe tener en cuenta que el péndulo doble son dos péndulos invertidos unidos.

Tomado de (*Felipe Tolentino, 2021*).

### **Péndulo invertido Quanser Qube-Servo 3**

Es un péndulo invertido del tipo furuta o rotatorio invertido, con un sistema de un brazo impulsado que gira en el plano horizontal, unido a un péndulo que puede girar libremente en el plano vertical.

El Quanser Qube-Servo 3 es una plataforma de servomotor portátil y totalmente integrada diseñada específicamente para enseñar conceptos de control a nivel universitario. Este sistema contiene un motor DC con escobillas de accionamiento directo con dos codificadores, internamente contiene una adquisición de datos y amplificador, contiene un péndulo invertido y un disco de inercia rápida como se observa en la **Figura 5**. (*Qube - Servo 3 - Quanser, s. f.*)

### **Figura 5**

*Péndulo invertido Quanser Qube-Servo 3*



*Nota.* El Quanser Qube-Servo 3 es un péndulo invertido a nivel universitario para su manipulación y control.

## Algoritmos de control tradicionales

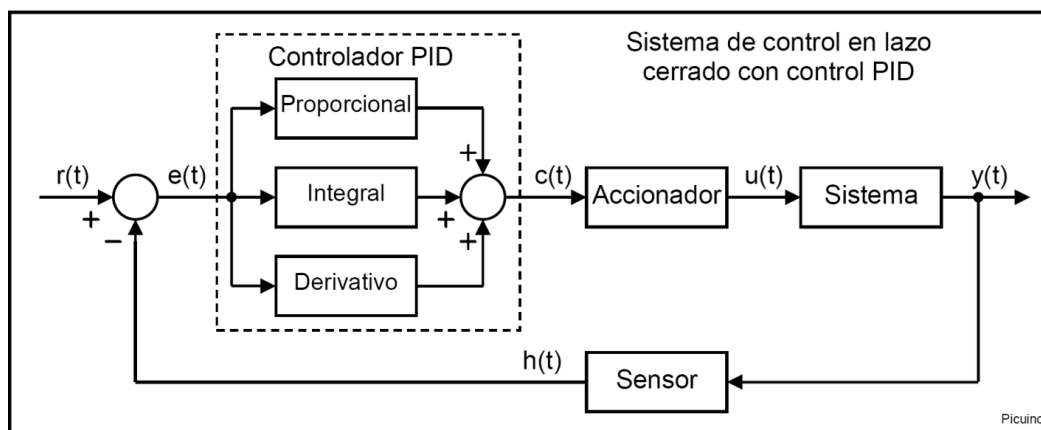
Al recordar algoritmos de control tradicionales directamente para toda persona que encamina la parte de control y automatización de plantas o procesos ya sea profesional o académico hace referencia a los controladores básicos que se basan en el lazo o bucle de control realimentado, es decir de los algoritmos clásicos como es el control PID que consta de tres parámetros distintos como es P (proporcional), I (integral), D (derivativo). (Astudillo Roblero et al., 2020).

### Estructura general del algoritmo PID

Consideremos un lazo de control de una entrada y una salida de un grado de libertad por lo tanto se tiene el siguiente diagrama general como se observa en la **Figura 6**.

**Figura 6**

*Diagrama de bloques de un algoritmo PID tradicional.*



*Nota.* Se tiene un diagrama general de un algoritmo PID tradicional.

### **Acción de control Proporcional (P).**

Tal y como su nombre lo indica esta acción es proporcional a la señal de error, internamente la acción proporcional es la que multiplica a la señal del error del sistema con una constante  $K_p$  la cual determina la cantidad de acción proporcional que tendrá el controlador

matemáticamente se ilustra la **Ecuación 1**. Esta acción de control intenta minimizar el error del sistema, pero a su vez tiene efectos como el aumento de velocidad de respuesta del sistema, aumenta la inestabilidad del sistema. (James Brown, & Sara Zak, 2022).

$$c(t) = K_p e(t) \quad (1)$$

Donde;

$c(t)$  = Salida del controlador

$K_p$  = Ganancia del controlador

$e(t)$  = Error

### ***Acción de control Integral (I).***

Es la encargada de calcular la integral de la señal del error y la multiplica por un constante control integral  $K_i$ , a medida que pasa el tiempo pequeños errores se van sumando acumulando a la señal de control y a su vez reduce el error del sistema, pero añade una cierta inercia al sistema.

La integral del error se toma con respecto al tiempo. Es el error total asociado a lo largo de una cantidad de tiempo especificada. Este comportamiento I-control se ilustra matemáticamente en la **Ecuación 2**.

$$c(t) = \frac{1}{T_i} \int e(t) dt \quad (2)$$

Donde;

$c(t)$  = Salida del controlador

$T_i$  = Tiempo integral

$$e(t) = \text{Error}$$

### **Control Derivativo (D).**

A diferencia de los controles solo P y solo I, el control D es una forma de control de avance. D-control anticipa las condiciones del proceso analizando el cambio en el error. Funciona para minimizar el cambio de error, manteniendo así el sistema en una configuración consistente. El principal beneficio de los controladores D es resistir el cambio en el sistema, siendo el más importante de estos las oscilaciones.

Este comportamiento del control D se ilustra matemáticamente en la **Ecuación 3**.

$$c(t) = K_d \frac{de}{dt} \quad (3)$$

Donde;

$c(t)$  = Salida del controlador

$K_d$  = Constante de tiempo derivada

$de$  = Cambio diferencial en el error

$dt$  = cambio diferencial en el tiempo

### **Control Proporcional – Integral - Derivativo (PID).**

El control proporcional-integral-derivado es una combinación de los tres tipos de métodos de control. El control PID es el más utilizado porque combina las ventajas de cada tipo de control. Este comportamiento de control de PID se ilustra matemáticamente en la **Ecuación 4** .(Astudillo Roblero et al., 2020)



$$c(t) = K_c \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de}{dt} \right) \quad (4)$$

Donde;

$c(t)$  = Salida del controlador

$K_c$  = Ganancia del controlador

$T_i$  = Tiempo integral

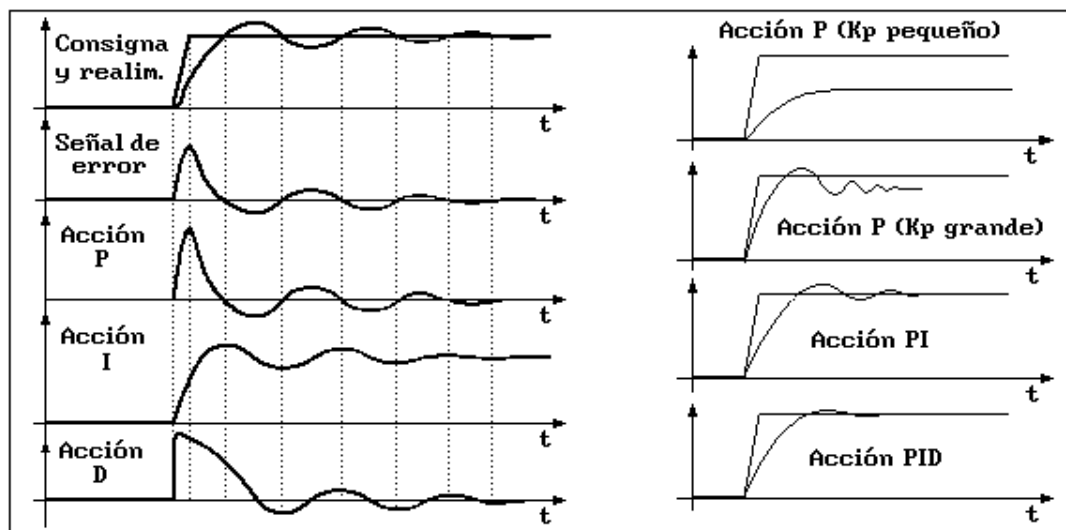
$T_d$  = Constante de tiempo derivada

$e(t)$  = Error

A continuación, se puede evidenciar en la **Figura 7**, la comparación de los diferentes algoritmos de control clásico.

**Figura 7**

*Comparación de los diferentes algoritmos de control.*



*Nota.* En el gráfico observan diferentes acciones de control PID, se debe tener en cuenta que dependen de los diferentes sintonizados de control que se apliquen, para obtener un control apropiado. Tomado de (Astudillo Roblero et al., 2020).

## **Algoritmos de control inteligente**

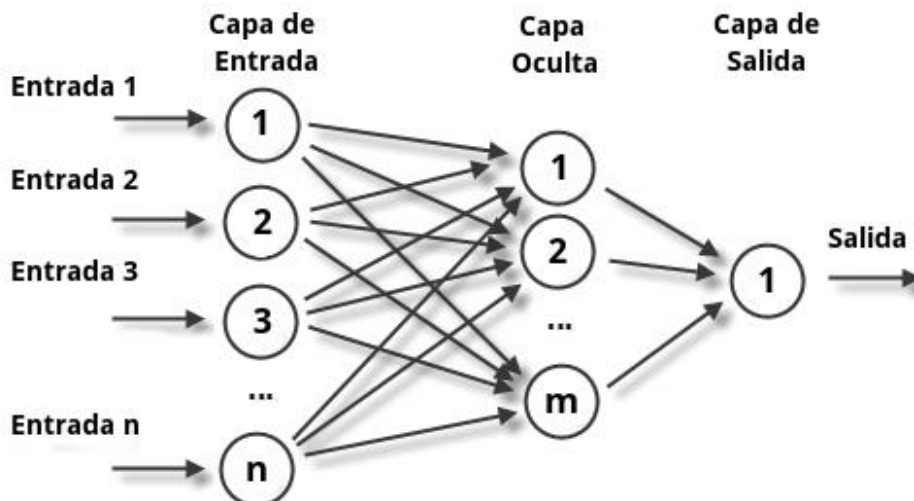
### ***Redes neuronales artificiales.***

Las redes neuronales artificiales se encuentran inspiradas en la estructura y funcionamiento del cerebro humano, imitando la forma en que las neuronas biológicas envían señales entre sí, para procesar información, realizar cálculos y transmitir la información a otras neuronas. Este tipo de algoritmo, son comúnmente empleadas para la identificación y control de sistemas con dinámicas complejas, especialmente en el caso de plantas no lineales que varían en el tiempo. Son muy utilizados debido a la capacidad que tienen las redes neuronales artificiales para estimar funciones, en contraste con los algoritmos de control tradicionales. (Zou et al., 2009)

En el contexto de las redes neuronales, existen varios tipos de capas que se utilizan para construir diferentes arquitecturas de redes. Algunos de los tipos más comunes son: capas de entrada, capas intermedias ocultas, y capas de salida, como se puede evidenciar en la **Figura 8**, el funcionamiento esquemático de una red neuronal, es importante señalar que cada capa puede tener un número diferente de neuronas ya que no existe una fórmula exacta que determine el número de neuronas por utilizar. Además, cada neurona puede tener coeficientes que modifican el algoritmo de aprendizaje, como el umbral de activación en un perceptrón o los centros de la red en una función de base radial., Así mismo el algoritmo de aprendizaje ajusta los pesos de la red y los coeficientes de las neuronas para que la red implemente la función esperada. Además, dependiendo de la función matemática realizada por las neuronas y la estructura de la red, las redes neuronales se clasifican en diversos tipos, como redes de base radial, perceptrón multicapa, entre otros. (Sierra-García & Santos, 2021)

**Figura 8**

*Forma esquemática de una red neuronal artificial*



*Nota.* Se puede evidenciar un esquema gráfico que representa una red neuronal artificial; el cual está compuesto por capa de entradas, capa oculta, capa de salida. Tomado de (Techtalks, 2019)

A continuación, se muestra una breve descripción de cada tipo de red neuronal:

- **Redes de Base Radial (RBF):** Estas redes utilizan funciones de base radial como funciones de activación. Tienen una capa de entrada, una capa oculta con funciones de base radial y una capa de salida. Son comúnmente utilizadas para problemas de aproximación de funciones y reconocimiento de patrones.
- **Perceptrón Multicapa (MLP):** También conocidas como redes neuronales feedforward, estas redes constan de una capa de entrada, una o más capas ocultas y una capa de salida. Se caracteriza por utilizar una función de activación no lineal y son capaces de aproximar funciones no lineales de manera efectiva.

- Redes Neuronales Convolucionales (CNN): Este tipo de red son especializadas en el procesamiento de datos con una estructura de cuadrícula, como imágenes. Utilizan capas convolucionales para detectar patrones visuales.
- Redes Neuronales Recurrentes (RNN): Son diseñadas para trabajar con datos secuenciales, como series temporales o texto. Tienen conexiones retroalimentadas que les permiten recordar información previa.
- Redes Neuronales de Memoria a Corto y Largo Plazo (LSTM): Este tipo de red neuronal recurrente, puede aprender dependencias a largo plazo. Es útil para tareas que implican recordar información durante largos períodos de tiempo.

### ***Control difuso.***

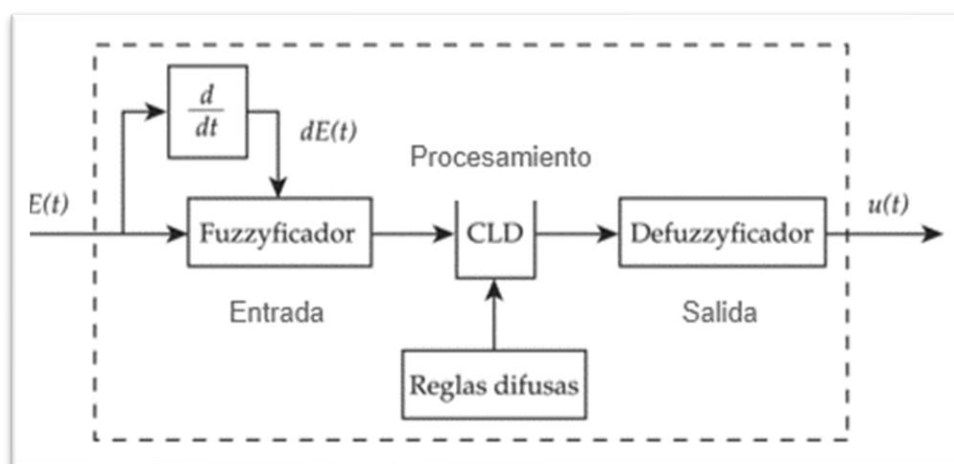
El control difuso es una técnica utilizada en sistemas complejos que son difíciles de modelar mediante ecuaciones matemáticas. Su utilidad radica en la capacidad de aprovechar el conocimiento humano y su experiencia con el proceso, sin necesidad de modelar matemáticamente, para realizar tareas como el reconocimiento de patrones, clasificación, control difuso, monitoreo, diagnóstico, optimización, entre otros. Además, la lógica difusa es una extensión de la lógica clásica que permite el razonamiento sobre conceptos imprecisos, y se aplica en el desarrollo de sistemas expertos difusos para diversas tareas. (Tibaduiza et al., 2011)

Los controladores difusos son sistemas sencillos que permiten representar relaciones de entrada-salida mediante conjuntos y reglas difusos. Estos sistemas generalmente se comprenden de tres fases: entrada, procesamiento y salida, como se puede evidenciar en la **Figura 9**, se muestra un diagrama de bloques de un controlador difuso genérico. Durante la fase de entrada, a las entradas se les asignan funciones de membresía y valores de verdad. Por otro lado, en la fase de procesamiento se evalúa las reglas y se produce resultados que se

combinan posteriormente. Por último, la fase de salida se encarga de convertir el resultado combinado en un valor de salida específico, mediante el método del centroide. Existen diferentes tipos de sistemas difusos, como Mamdani que se encuentra compuesto por reglas de la forma Si-Entonces, utilizando términos lingüísticos representados por conjuntos difusos en el entrada y salida. Por otro lado tenemos el sistema difuso impuesto por Takagi-Sugeno, el cual utiliza reglas compuestas por conjuntos difusos en el antecedente y funciones singleton en la salida (Espitia Cuchango et al., 2020)

### Figura 9

*Diagrama a bloques de un controlador difuso genérico.*



*Nota.* Diagrama de bloques de un controlador difuso genérico; el cual está compuesto por tres etapas; la etapa de entrada que tiene como el objetivo principal asignar funciones de membresía y valores de verdad a los valores que entran, luego se tiene la etapa de procesamiento cuyo objetivo es evaluar las reglas difusas y finalmente la etapa de salida se encarga de convertir el resultado en una salida específica. Tomado de (MaterialsDr.Sc, s. f.)

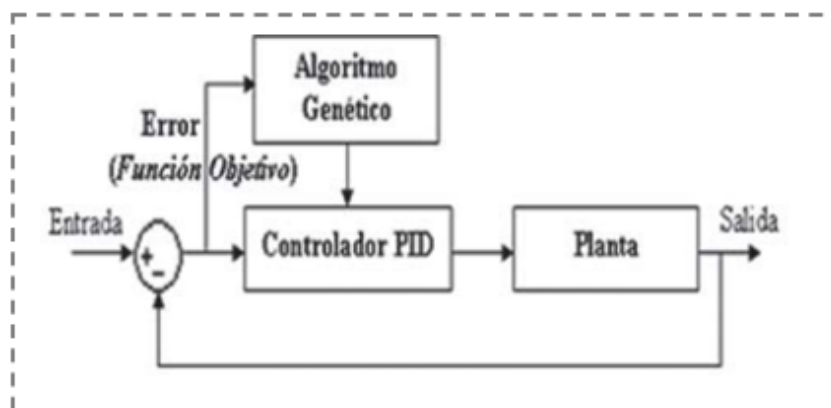
### **Algoritmos genéticos.**

Los algoritmos genéticos en sistemas de control son técnicas de optimización y búsqueda que se inspiran en la evolución biológica, comparándola con organismos vivos capaces de evolucionar para adaptarse al entorno, donde las reglas más efectivas sobreviven y se transmiten a las generaciones futuras, mientras que las menos efectivas son descartadas. (Galán et al., 2000)

Este algoritmo utiliza operadores genéticos como la selección, la recombinación y la mutación, para mejorar una población de posibles soluciones y encontrar la mejor solución a un problema de control. Es especialmente útil para ajustar los parámetros de los controladores o para optimizar estrategias de control, Como se puede apreciar en la **Figura 10**, se aplica un algoritmo genético a un controlador PID para modificar dinámicamente las ganancias proporcional, derivativo e integral del controlador PID. Además, se destaca por su sólido fundamento teórico y su capacidad para resolver problemas sin requerir un conocimiento detallado del problema en cuestión. (Diego Más, 2006)

**Figura 10**

*Algoritmos genéticos aplicados a controladores PID*



*Nota.* Esquema general para aplicar un algoritmo genético a un controlador PID para obtener dinámicamente las ganancias del controlador. Tomado de (Ruge & Alvis, 2009)

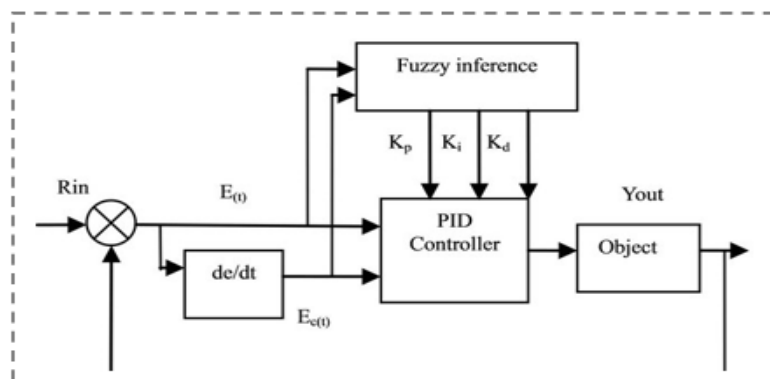
### **Control PID con ajuste de ganancias basado en lógica difusa.**

Es un algoritmo de control que emplea la lógica difusa para modificar dinámicamente las ganancias del controlador proporcional, integral y derivativo (PID), con el fin de ajustar su comportamiento en respuesta a cambios en la dinámica del proceso o a perturbaciones, siendo especialmente útil para controlar plantas o sistemas no lineales que operan en un amplio rango. A diferencia de un PID convencional, donde las ganancias son estáticas, este enfoque permite que las ganancias se ajusten de manera automática utilizando reglas de lógica difusa. Esto proporciona una adaptación más flexible y robusta del controlador PID a medida que cambian las condiciones de operación, lo que puede resultar en un mejor rendimiento del sistema de control en una amplia gama de situaciones. (Naranjo, s. f.)

La Figura 11 se presenta el diseño general del controlador PID autoajustable difuso, en el cual el bloque adaptativo ajusta los parámetros del controlador según la información sobre perturbaciones medibles, el estado actual de operación del proceso y la dinámica de la variable controlada.

**Figura 11**

*Esquema general del control PID ajustable basados en lógica difusa*



*Nota.* Esquema general para aplicar un algoritmo difuso a un controlador PID para obtener dinámicamente las ganancias del controlador. Tomado de (Jin et al., 2013)

## Capítulo III

### Diseño de Controlador Tradicional

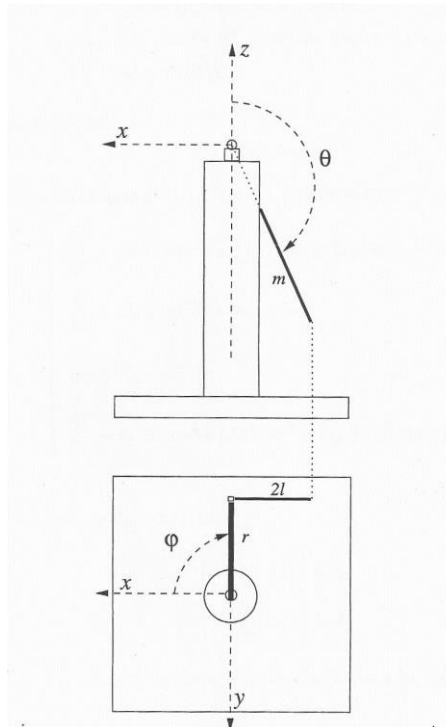
En este capítulo se detalla el procedimiento para el diseño del controlador tradicional, para ello, se inicia el proceso con el desarrollo de un modelo matemático para simular la dinámica de la planta del péndulo invertido QUBE Servo 3.

#### Modelamiento no lineal del péndulo invertido

Primero se debe considerar que este péndulo este compuesto por dos ángulos,  $\phi$  ( $\phi$ ) es el ángulo que existe en el brazo del motor, es decir el que controla la posición en el eje x de  $0^\circ$  a  $90^\circ$  o  $0^\circ$  a  $-90^\circ$  y  $\theta$  ( $\theta$ ) es el ángulo que forma la barra del péndulo con dirección paralela al eje z. A continuación, en la **Figura 12** se puede observar el sistema de coordenadas del péndulo.

#### Figura 12

*Sistema de coordenadas definido del péndulo invertido*





*Nota.* Los parámetros fundamentales incluyen los ángulos de inclinación, la masa del sistema, las longitudes de los brazos del péndulo y su sistema de coordenadas. Estos elementos son críticos para caracterizar y modelar adecuadamente el comportamiento del péndulo invertido.

Tomado de (Regalo Núñez, 2016).

Se considera como un sistema de brazo robótico de dos grados de libertad, por lo tanto, se calcula la cinemática y la dinámica del sistema para encontrar las ecuaciones de movimiento del péndulo.

Mediante análisis de cinemática y centro de masas se obtiene las **Ecuaciones 5, 6, 7** según el eje de coordenadas.

$$x_G = r \cos \varphi - l \sin \theta \sin \varphi , \quad (5)$$

$$y_G = r \sin \varphi + l \sin \theta \cos \varphi , \quad (6)$$

$$z_G = l \cos \theta \quad (7)$$

Se aplica la derivada a las ecuaciones de la cinemática, para encontrar la velocidad.

$$\dot{x}_G = -r \dot{\varphi} \sin \varphi - l \dot{\varphi} \cos \varphi \sin \theta - l \dot{\theta} \sin \varphi \cos \theta , \quad (8)$$

$$\dot{y}_G = r \dot{\varphi} \cos \varphi - l \dot{\varphi} \sin \varphi \sin \theta + l \dot{\theta} \cos \varphi \cos \theta , \quad (9)$$

$$\dot{z}_G = -l \dot{\theta} \sin \theta \quad (10)$$

Empleando la ecuación de la cinemática  $v^2 = \dot{x}_G^2 + \dot{y}_G^2 + \dot{z}_G^2$ , mediante despeje y reducción de términos de las **Ecuaciones 8, 9, 10** se llega a la ecuación principal de la velocidad del sistema.

$$v^2 = r^2 \dot{\varphi}^2 + l^2 \dot{\varphi}^2 (\sin \theta)^2 + 2rl \dot{\varphi} \dot{\theta} \cos \theta + l^2 \dot{\theta}^2 \quad (11)$$

En el péndulo se considera la suma de los momentos de inercia del brazo y del motor por lo que se obtiene la **Ecuación 12**.

$$J_a = J_{motor} + J_{brazo} \quad (12)$$

También se considera el momento de inercia del péndulo descrita en la **Ecuación 13**.

$$J_p = \frac{4}{3}ml^2 \quad (13)$$

Por lo tanto, la energía cinética del péndulo mediante los momentos de inercia que afectan al sistema, **Ecuación 12, 13** se tiene la **Ecuación 14**

$$2T = mv^2 + J_a\dot{\varphi}^2 + J_p(\dot{\theta}^2 + \dot{\varphi}^2 (\sin \theta)^2) \quad (14)$$

Ejecutando el respectivo despeje y aplicando operaciones matemáticas se llega a la ecuación de la cinemática  $T$ .

$$2T = (J_a + mr^2 + (J_p + ml^2) (\sin \theta)^2) \dot{\varphi}^2 + 2mrl\dot{\varphi}\dot{\theta} \cos \theta + (J_p + ml^2)\dot{\theta}^2 \quad (15)$$

Para encontrar la ecuación dinámica del péndulo se debe encontrar la energía potencial aplicando la **Ecuación 16**.

$$V = mgl(\cos \theta - 1) \quad (16)$$

Para ello se debe aplicar el lagrangiano considerando la diferencia entre la energía cinética y la energía potencial, ver **Ecuación 17, 18**.

$$L = T - V \quad (17)$$

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} - \frac{\partial L}{\partial \theta} = 0 \\ \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}} - \frac{\partial L}{\partial \varphi} = F \end{cases} \quad (18)$$

Donde;

$L$  = Lagrangiano

$T$  = Energía Cinética

$V$  = Energía Potencial

Luego de aplicar las derivadas parciales respectivas del lagrangiano se llega a encontrar la ecuación de movimiento del péndulo.

$$\begin{cases} (J_p + ml^2)(\ddot{\theta} - \dot{\varphi}^2 \sin \theta \cos \theta) + mrl\ddot{\varphi} \cos \theta - mgl \sin \theta = 0 \\ mrl\ddot{\theta} \cos \theta - mrl\dot{\theta}^2 \sin \theta + 2(J_p + ml^2)\dot{\theta}\dot{\varphi} \sin \theta \cos \theta + (J_a + mr^2 + (J_p + ml^2)\sin^2 \theta)\ddot{\varphi} = F \end{cases} \quad (19)$$

Se aplica normalización a la **Ecuación 19**, para que la derivada mayor sea uno definido, es decir ordenando respecto a la función con mayor derivada del sistema.

$$\begin{aligned} \omega_0 &= \sqrt{\frac{mgl}{J_p + ml^2}} = \sqrt{\frac{3g}{7l}} \\ \alpha &= \frac{mrl}{J_p + ml^2} = \frac{3r}{7l} \\ \beta &= \frac{J_a + mr^2}{J_p + ml^2} \\ \tau &= \omega_0 t \end{aligned} \quad (20)$$

Por lo tanto, las ecuaciones de movimientos del péndulo se evidencian en la **Ecuación 21**.

$$\begin{cases} \ddot{\theta} - \dot{\varphi}^2 \sin \theta \cos \theta + \alpha \ddot{\varphi} \cos \theta - \sin \theta = 0 \\ \alpha \ddot{\theta} \cos \theta - \alpha \dot{\theta}^2 \sin \theta + 2\dot{\theta}\dot{\varphi} \sin \theta \cos \theta + (\beta + \sin^2 \theta)\ddot{\varphi} = \gamma u \end{cases} \quad (21)$$

Donde  $\gamma = \frac{k_m}{mgl}$ ,  $k_m$  es la ganancia equivalente a los subsistemas del motor,  $u$  la acción de control, mediante la ecuación expresada en forma matricial mediante la velocidad y la posición se obtiene las siguientes matrices.

$$\begin{bmatrix} 1 & \alpha \cos \theta \\ \alpha \cos \theta & \beta + \sin^2 \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \ddot{\varphi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\dot{\varphi} \sin \theta \cos \theta \\ -\alpha \dot{\theta} \sin \theta + \dot{\varphi} \sin \theta \cos \theta & \dot{\theta} \sin \theta \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\sin \theta \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \gamma u \end{bmatrix} \quad (22)$$

Se realiza una pre multiplicación a la parte matricial, llegando a la ecuación (23).

$$\begin{bmatrix} 1 & \alpha \cos \theta \\ \alpha \cos \theta & \beta + \sin^2 \theta \end{bmatrix}^{-1} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} \beta + \sin^2 \theta & -\alpha \cos \theta \\ -\alpha \cos \theta & 1 \end{bmatrix} \quad (23)$$

Donde

$$\Delta = \beta + \sin^2 \theta - \alpha^2 \cos^2 \theta \quad (24)$$

$$\begin{cases} \Delta\ddot{\theta} = -\alpha^2\dot{\theta}^2 \sin\theta \cos\theta + (\beta + \sin^2\theta)\dot{\varphi}^2 \sin\theta \cos\theta + 2\alpha\dot{\theta}\dot{\varphi} \sin\theta \cos^2\theta + \beta \sin\theta + \sin^3\theta - \gamma u \alpha \cos\theta \\ \Delta\ddot{\varphi} = \alpha\dot{\theta}^2 - \alpha\dot{\varphi}^2 \sin\theta \cos^2\theta - 2\dot{\theta}\dot{\varphi} \sin\theta \cos\theta - \alpha \sin\theta \cos\theta + \gamma u \end{cases} \quad (25)$$

Por lo tanto, el modelo del péndulo como se observa en la ecuación (25) es un sistema de cuarto orden sin considerar términos disipativos.

Donde las condiciones iniciales del sistema están descritas  $x_1 = \theta, x_2 = \dot{\theta}, x_3 = \varphi$  y  $x_4 = \dot{\varphi}$  y considerando la fricción en el movimiento del péndulo se obtiene la ecuación (26)

$$\begin{cases} \Delta\ddot{\theta} = -\alpha^2\dot{\theta}^2 \sin\theta \cos\theta + (\beta + \sin^2\theta)\dot{\varphi}^2 \sin\theta \cos\theta + 2\alpha\dot{\theta}\dot{\varphi} \sin\theta \cos^2\theta + \beta \sin\theta + \sin^3\theta - \gamma u \alpha \cos\theta - c_p \dot{\theta} \\ \Delta\ddot{\varphi} = \alpha\dot{\theta}^2 \sin\theta - \alpha\dot{\varphi}^2 \sin\theta \cos^2\theta - 2\dot{\theta}\dot{\varphi} \sin\theta \cos\theta - \alpha \sin\theta \cos\theta + \gamma u - c_a \dot{\varphi} \end{cases} \quad (26)$$

$c_p$  y  $c_a$  son parámetros que hacen referencia a términos de fricción viscosa del péndulo del brazo y del motor respectivamente.

### Diseño del modelo en Simulink

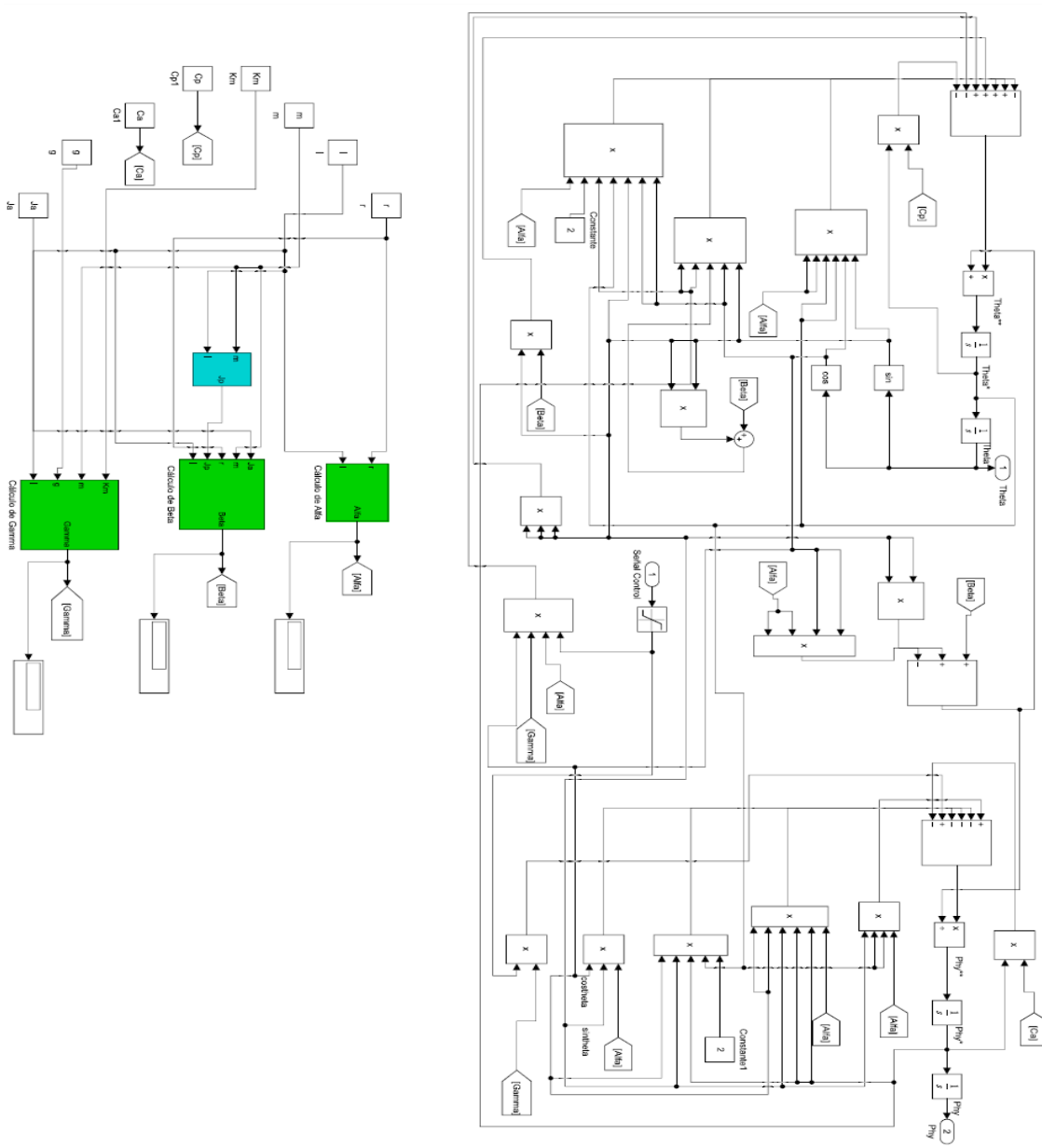
Simulink es una herramienta de alto nivel que permite resolver ecuaciones diferenciales mediante lógica de bloques, por lo tanto, se va a utilizar para desarrollar el modelo del péndulo invertido aplicando las ecuaciones de la dinámica de la planta. Para ello se debe considerar lo siguiente:

- Las condiciones iniciales de la posición y la velocidad para los dos ángulos  $\varphi$  y  $\theta$  ( $\theta_0 = 0, \varphi_0 = 0, \dot{\theta}_0 = 0$  y  $\dot{\varphi}_0 = 0$ ).
- Etiquetas Goto y From para una comprensión clara del diagrama y mejor calidad del modelo.
- Parámetros propios de la planta QUBE Servo 3 como la masa, longitud del brazo, longitud del péndulo, gravedad, constantes de fricción, momentos de inercia, y constantes propias de la planta que ayudan al modelo dinámico. Los mismos que se ingresan directamente desde Matlab para facilitar los cambios que se requieran.

En la **Figura 13** se muestra el sistema principal del modelo del péndulo invertido en simulink y un subsistema para encontrar los valores de *alfa*, *beta* y *gamma*, que se interconectan mediante las etiquetas Goto y From, formando el modelo dinámico de la planta del péndulo invertido.

**Figura 13**

*Subsistema del modelo principal péndulo invertido en Simulink*



*Nota.* Se trata de un sistema complejo, ya que involucra ecuaciones de cuarto orden y, a su vez, posee una entrada y dos salidas distintas. Esta combinación de características lo hace un sistema amplio y desafiante de analizar y controlar.

Para trabajar con datos reales de la planta se obtiene los parámetros reales del péndulo QUBE Servo 3, estos se observan en la **Tabla 1**.

**Tabla 1**

*Parámetros de simulación del péndulo invertido*

<b>PARAMETRO</b>	<b>VALOR</b>
Masa (m)	0,024 kg
Longitud del brazo (r)	0,085 m
Mitad de la longitud del péndulo (l)	0.0645 m
Ganancia del motor (Km)	0,036 V/(rad/s)
Gravedad (g)	9,8 m/s <sup>2</sup>
Momento de inercia Brazo y motor (Ja)	0 kg m <sup>2</sup>
Fricción viscosa del péndulo (Cp)	0,5
Fricción viscosa del brazo del motor (Ca)	0,5

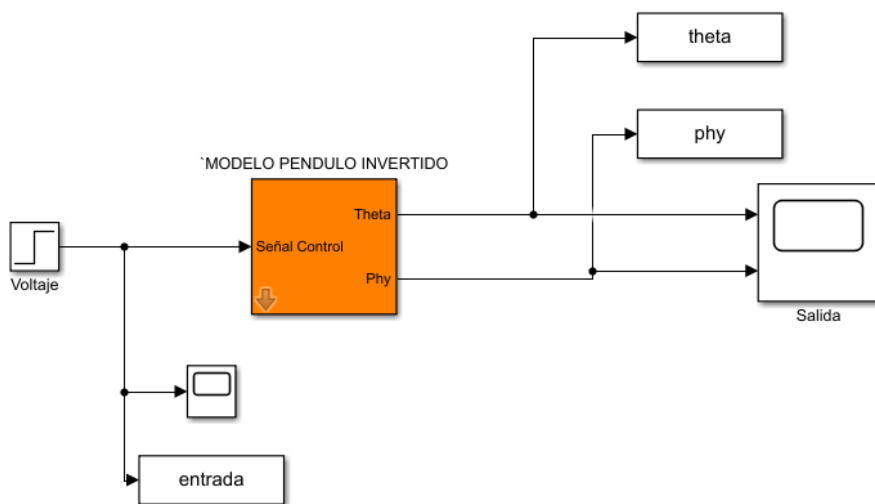
*Nota.* Estos parámetros son netamente para simulación y se ingresa directamente desde Matlab.

Se realiza un enmascaramiento para formar un bloque general donde se visualiza la señal de control (voltaje) como entrada y los ángulos *phi* y *theta* como salidas, el bloque se identifica como “modelo péndulo invertido” Al obtener el modelo de la planta se da inicio a las pruebas de lazo abierto, ver **Figura 14**.

**Figura 14**

*Lazo abierto del péndulo invertido en Simulink*

### MODELO DEL PÉNDULO INVERTIDO LAZO ABIERTO

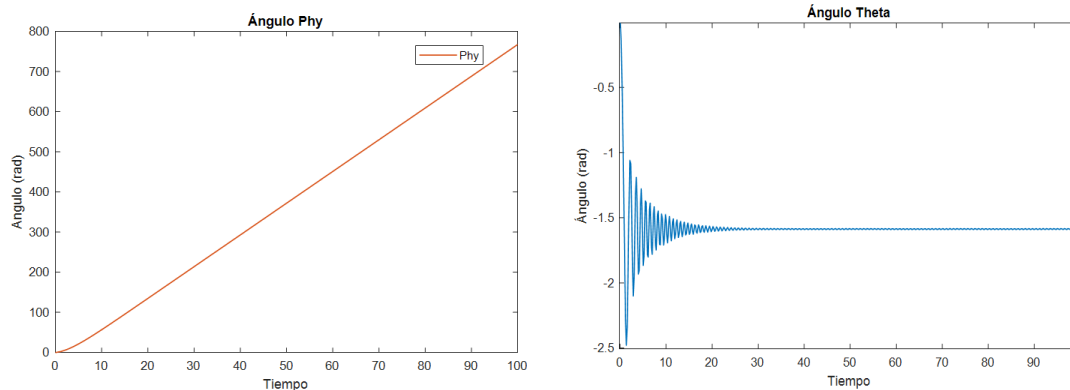


*Nota.* Se utiliza los bloques To workspace para guardar y graficar datos de entrada y salidas del modelo.

Al trabajar en lazo abierto se puede analizar el comportamiento de los ángulos  $phy$  y  $theta$ , para ello se envían los datos al workspace de Matlab para representar gráficamente. Utilizando un escalón de 2V en la entrada se puede verificar el comportamiento de los ángulos  $phy$  y  $theta$ . Ver **Figura 15**.

**Figura 15**

*Comportamiento de los ángulos del péndulo invertido*



*Nota.* En lazo abierto se puede trabajar con entradas de voltaje de -5V a 5V.

Se analiza el comportamiento para diferentes entradas de voltaje, sin embargo, el resultado no varía, es decir, el ángulo  $\phi$  no alcanza a estabilizarse en ningún punto, siempre tiende a infinito y el ángulo  $\theta$  es oscilatorio y se mantiene en un punto de reposo sin realizar ninguna acción.

Dado que se trata de una planta altamente inestable, se anticipaba este tipo de comportamiento de las variables  $\phi$  y  $\theta$ , por lo que no es factible aplicar un sistema de identificación para determinar los parámetros del controlador PID, como se haría con otros modelos de sistemas dinámicos no lineales a partir de datos de entrada y salida

Para la planta del péndulo invertido se aplica el método de sintonía fina, es decir realizar prueba y error hasta encontrar los parámetros óptimos de control, para que la planta llegue a estabilizarse en el punto de consigna o set point (SP) de forma rápida y en un tiempo favorable, para ello se analizan los ángulos  $\phi$  y  $\theta$ .

En este tipo de planta de alta inestabilidad, se implementa un control PID modificado, con el propósito de mejorar tanto la estabilidad como el rendimiento del sistema. Adaptándose de manera más efectiva a las características específicas del sistema, pudiendo incluir filtros y ajuste de ganancias para asegurar el control de estos sistemas inestables.

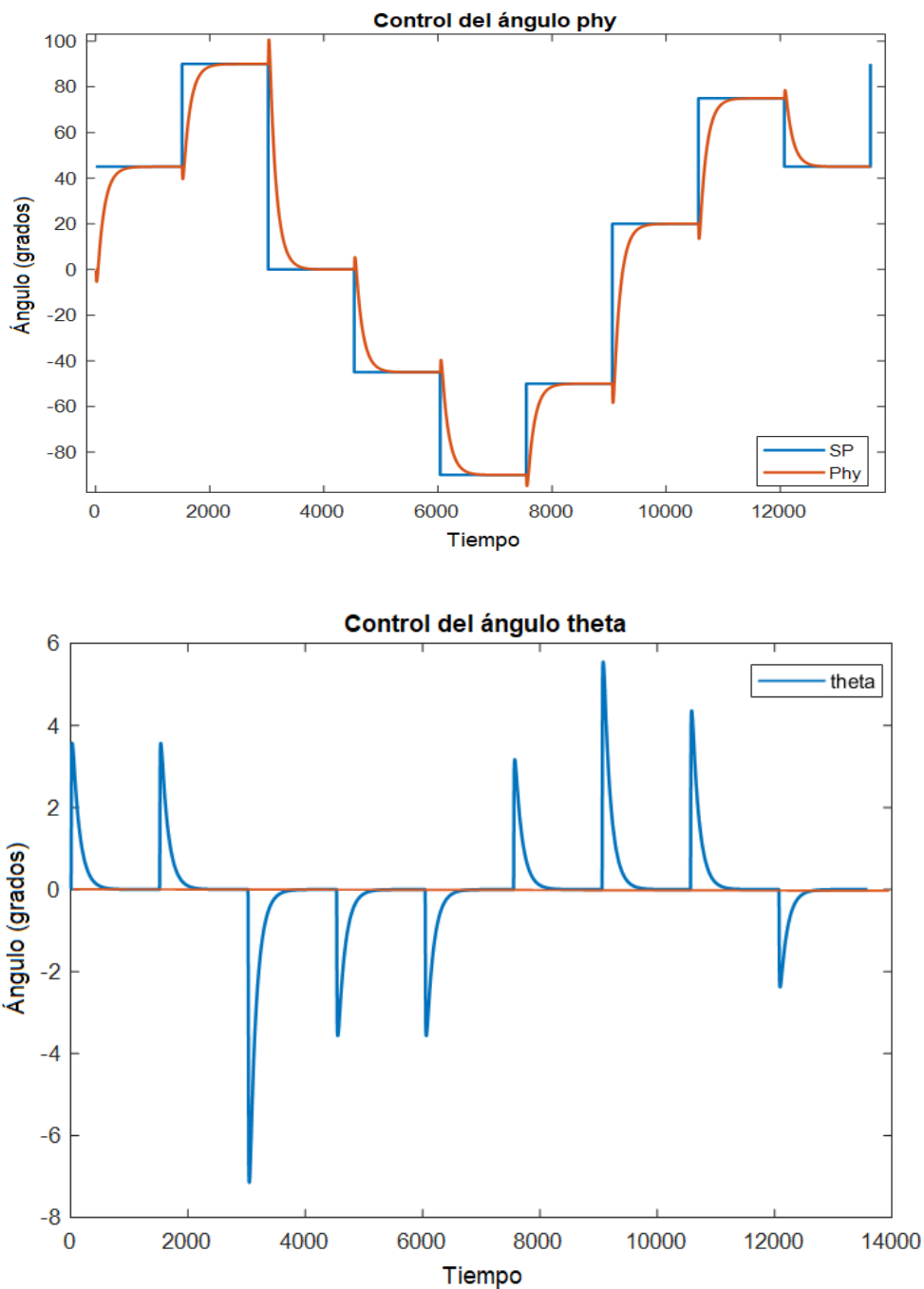
En los ángulos  $\phi$  y  $\theta$  se diseñan controles individuales; el ángulo  $\theta$  actúa como compensador para el ángulo  $\phi$ , utilizando un controlador PD. Este controlador favorece directamente a minimizar el error del sistema en estado estacionario mediante la ganancia proporcional  $K_p$ , evitando así el sobre impulso; mientras que la ganancia derivativa  $K_d$  atenúa las oscilaciones del ángulo. Para el ángulo  $\phi$  se aplica un control PID, dado que el sistema no se estabiliza en ningún punto, se le aplican filtros para corregir señales no deseadas, la ganancia  $K_p$  previene que se exceda el error en estado estacionario, la ganancia  $K_d$  permite que el sistema se estabilice en el punto deseado mediante la derivada del ángulo (velocidad).





Figura 17

Graficas resultantes de los ángulos  $\phi$  y  $\theta$  con un controlador clásico



*Nota.* Por simulación el controlador clásico presenta un control favorable para este tipo de planta altamente inestable.

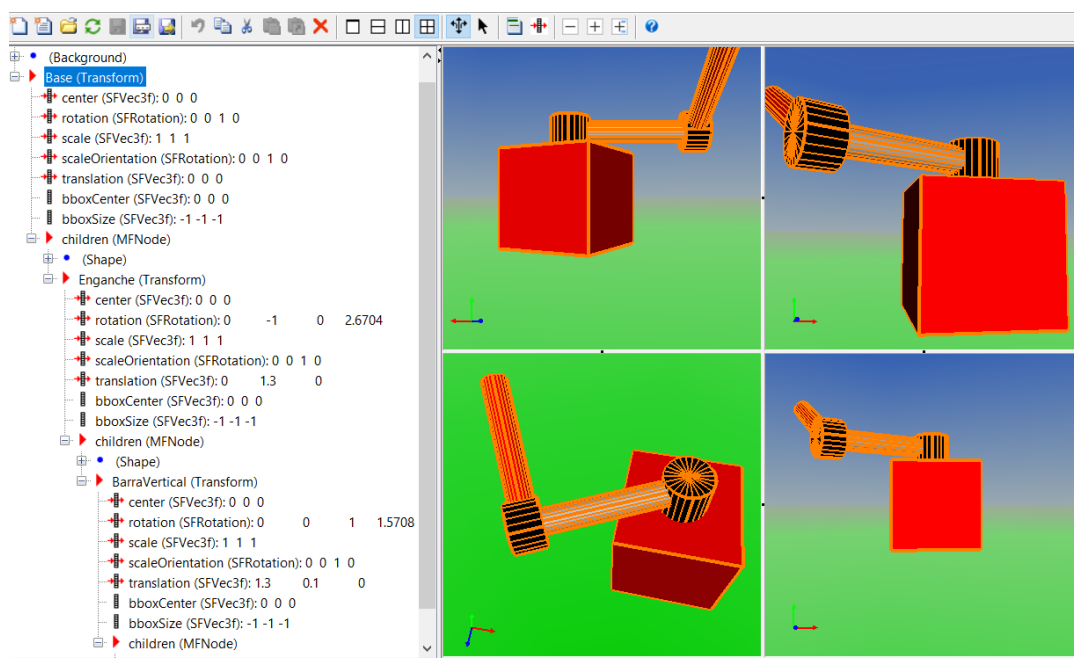
## Diseño de la interfaz del péndulo invertido en 3D

Para tener un modo interactivo y detallado del movimiento de los dos ángulos  $\phi$  y  $\theta$  mediante simulación, se emplea un toolbox especializado para diseños de modelos en 3D, el mismo que facilita la visualización del movimiento en función de las señales proporcionadas.

Este toolbox es V Realm, donde se va a modelar el péndulo invertido en 3D para analizar sistema dinámico mediante el movimiento de los ángulos. En la librería Simulink 3D Animation, se crea una nueva ventana para diseñar el péndulo invertido, para esto se debe configurar la acción de cada parte, en este caso, el brazo y el péndulo, según el sentido de eje de coordenadas. De igual forma se configuran los rangos de operación que tendrá el modelo, el color de cada pieza, la rotación y translación. En la **Figura 18** se presenta un el modelo en 3D del péndulo invertido.

**Figura 18**

*Creación y configuración del péndulo invertido en V Realm 3D*

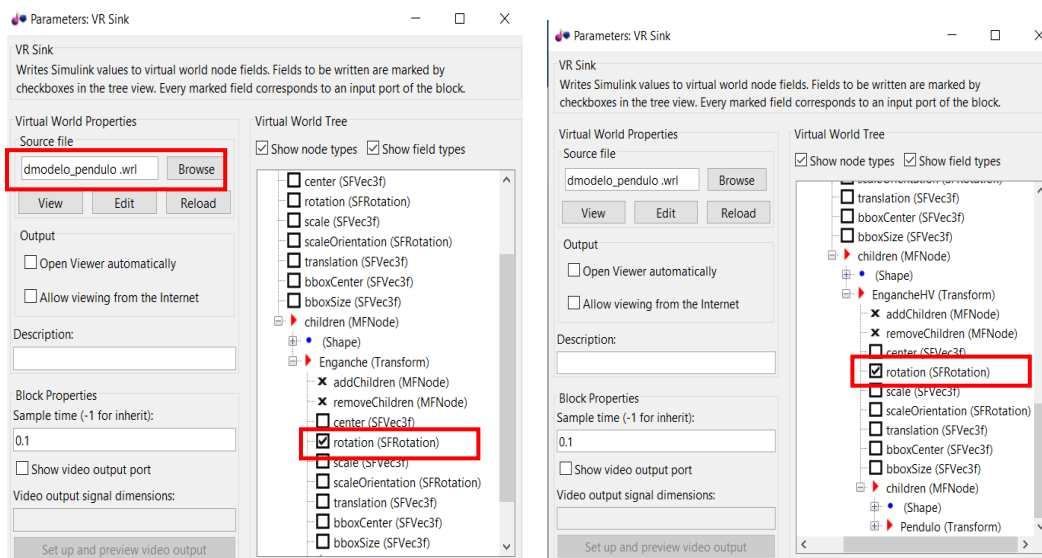


*Nota.* Para ejecutar la simulación 3D se deben considerar los ejes de coordenadas de los ángulos, ya que, existe el riesgo que el sistema pierda la cohesión estructural y se separe. Por lo tanto, es preciso asegurar que los ángulos se representen correctamente en relación con los ejes de coordenadas para garantizar una simulación precisa y estable.

Al terminar la configuración se realiza el llamado de las señales que necesita el péndulo para funcionar, por lo tanto, se seleccionan los dos ángulos que intervienen en el movimiento del péndulo como se visualiza en la **Figura 19**.

**Figura 19**

### *Selección de parámetros para el péndulo invertido 3D*

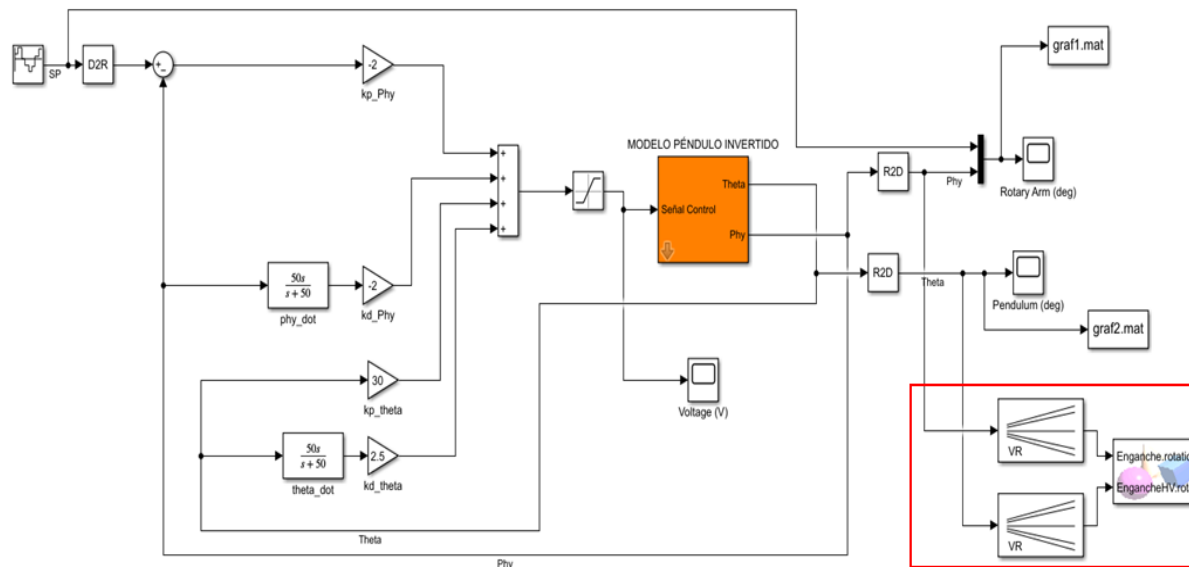


*Nota.* Para crear los parámetros se utiliza la configuración del péndulo creado.

El modelo en 3D del péndulo invertido, permite el análisis del movimiento de los ángulos en lazo abierto y lazo cerrado; antes de ingresar al bloque creado en V Realm se incluye un bloque VR signal que ayuda a que las señales de ingreso sean compatibles con el bloque V Realm, a continuación, se puede comprobar la conexión del modelo 3D del péndulo invertido al controlador PD clásico como muestra la **Figura 20**.

**Figura 20**

Conexión del péndulo invertido 3D creado mediante V Realm

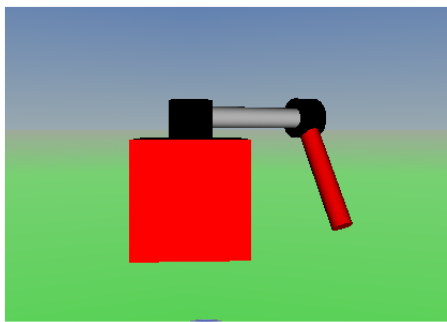
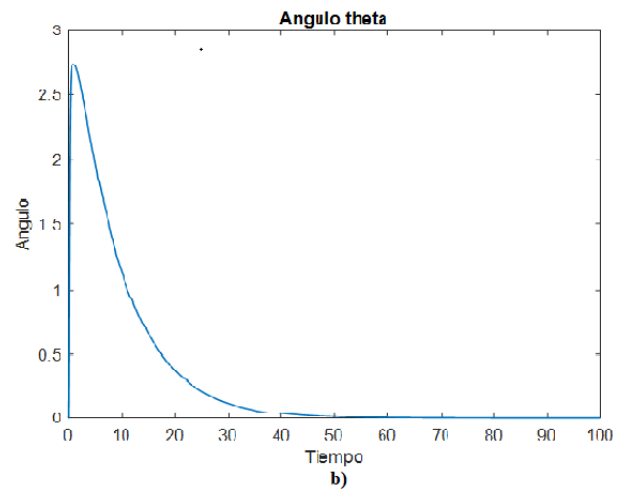
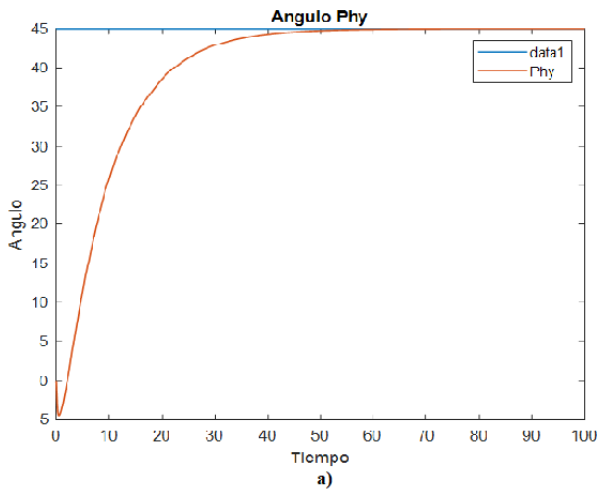


*Nota.* Conexión del bloque V Realm va directo en las señales de los ángulos.

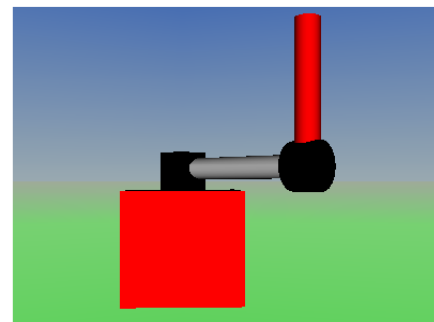
El funcionamiento del péndulo invertido 3D se puede visualizar en la **Figura 21**, donde se muestra como el sistema llega a la posición deseada y se mantiene en equilibrio, para un valor de SP de 45°.

**Figura 21**

*Funcionamiento del péndulo invertido 3D con un Setpoint de 45°.*



e)



d)

*Nota.* En la figura se muestra a) el comportamiento del ángulo  $\phi$ , b) el comportamiento del ángulo  $\theta$ , c) el péndulo invertido 3D antes de enviar el punto de consigna d) el péndulo invertido 3D en funcionamiento con consigna de  $45^\circ$ .

## Capítulo IV

### Diseño del Controlador con Lógica Difusa

En este capítulo se detallan los parámetros de diseño del controlador PID adaptativo mediante lógica difusa para el péndulo invertido QUBE-Servo 3. Para este proceso se utiliza un controlador PID tradicional, el cual fue sintonizado en diferentes puntos de operación, para así obtener los valores de ganancias proporcional  $K_p$ , integral  $K_i$  y derivativa  $K_d$  más eficientes. Posteriormente, estos valores se incorporan en tres funciones difusas independientes, una para cada ganancia, así se pueden tomar decisiones más precisas y adaptativas, contribuyendo a la robustez y eficiencia del controlador.

En un controlador PID tradicional, las ganancias  $K_p$ ,  $K_d$  y  $K_i$ , se fijan manualmente o mediante métodos de ajuste automático, como por ejemplo el método de Ziegler-Nichols, o el de Cohen Coon. Estas ganancias pueden no ser perfectas para todas las situaciones en las que el sistema esté funcionando, por lo que el sistema presenta inconsistencias. Por otro lado, al utilizar un algoritmo mediante lógica difusa para calcular las ganancias del PID, se obtiene un controlador con ajuste automático de sus parámetros en tiempo real, de este modo el sistema tiene una adaptación dinámica a cambios y perturbaciones externas.

Para la implementación es necesario, conocer el proceso e identificar las variables a controlar en el sistema. En el caso del péndulo invertido QUBE servo 3, las dos variables a controlar son las posiciones de los ángulos,  $\phi$  en el eje horizontal y  $\theta$  en el eje vertical. Una vez analizado el rango de operación, se determina que la posición angular ( $\phi$ ) del péndulo varía entre  $90^\circ$  y  $-90^\circ$ , lo que implica un rango de trabajo de 180 grados. En este intervalo, el actuador operará en un rango de voltaje de -10V a 10V.

### Definición de las variables lingüísticas.

Para la implementación de un algoritmo difuso, se deben identificar las variables lingüísticas que describen las entradas y salidas de cada función difusa. En este caso, se implementó tres algoritmos difusos independientes para recalcular los valores de las ganancias  $K_p$ ,  $K_d$ , y  $K_i$  en un control PID con auto sintonización como se indica en la **Tabla 2**.

**Tabla 2**

*Variables lingüísticas de los tres algoritmos difusos implementados*

<b>Algoritmo difuso</b>	<b>Variable lingüística (entrada)</b>	<b>Variable lingüística (salida)</b>
<i>Fuzzy 1: Algoritmo difuso para encontrar valores de <math>K_p</math></i>	Error	$K_p$
<i>Fuzzy 2: Algoritmo difuso para encontrar valores de <math>K_i</math></i>	Error	$K_i$
<i>Fuzzy 3: Algoritmo difuso para encontrar valores de <math>K_d</math></i>	Derivada del ángulo $Phy (\phi)$	$K_d$

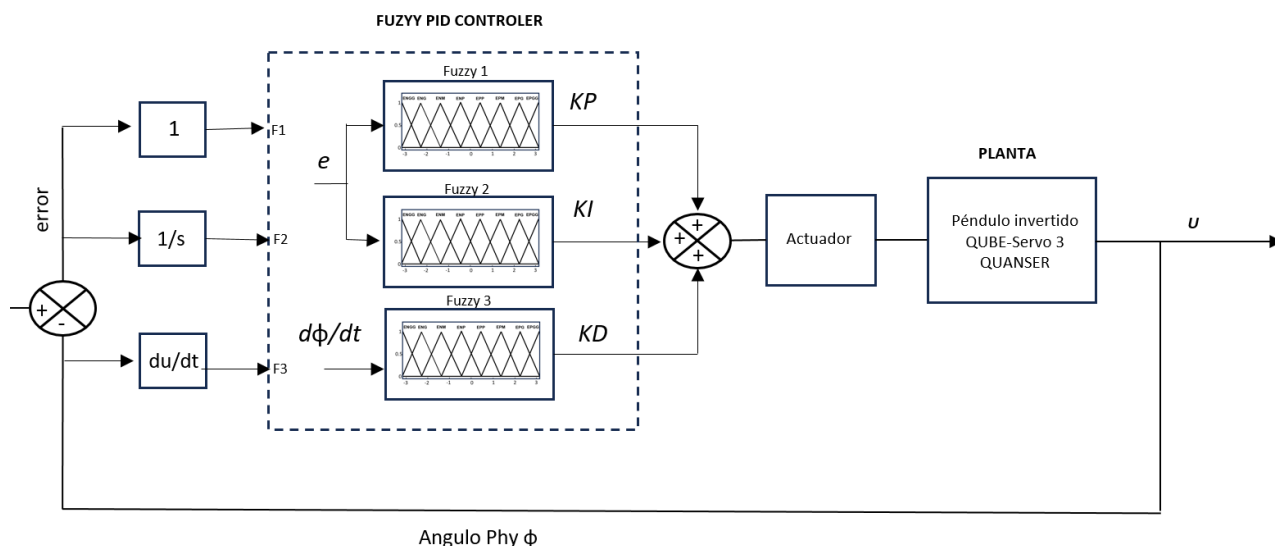
*Nota.* Para estimar los valores de la ganancia proporcional  $K_p$ , se usó el error como entrada, y la misma variable  $K_p$  como salida. Del mismo modo para estimar los valores de la ganancia derivativa  $K_d$ , se usó la derivada del ángulo como entrada y como salida la misma variable  $K_d$ , Y por último para obtener los valores de la ganancia integral  $K_i$ , se usó el error como entrada y la misma variable  $K_i$ .

En la **Figura 22**, se muestra la estructura de control en lazo cerrado con controlador PID que recalcula sus ganancias basado en lógica difusa. Esta estrategia une las particularidades de la lógica difusa con los fundamentos del control PID con el propósito de mejorar el funcionamiento del sistema en diversas situaciones de operación.



Figura 22

Diagrama del diseño del control PID adaptativo para el péndulo QUBE-Servo 3



*Nota.* Se definen tres algoritmos difusos independientes para obtener los valores de las ganancias proporcional  $K_p$ , Integral  $K_i$  y derivativa  $K_d$  respectivamente.

### Definición de los conjuntos difusos

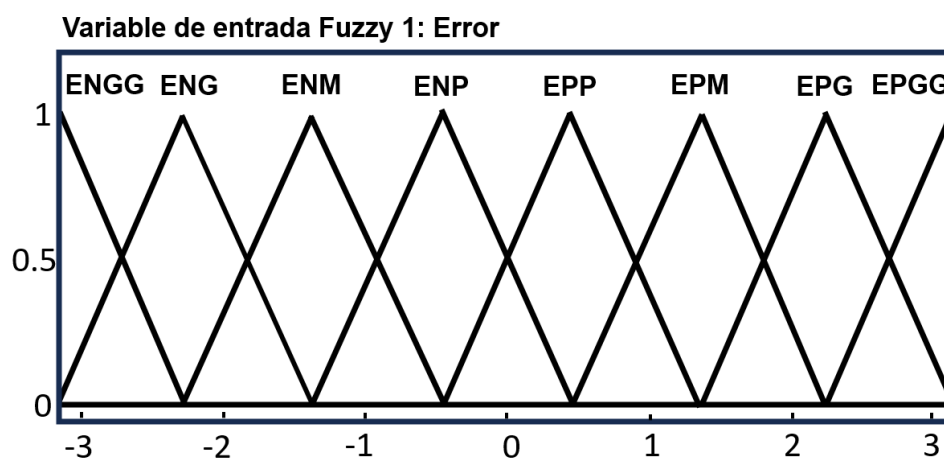
Para obtener los valores de ganancia proporcional  $K_p$ , se definen ocho conjuntos difusos a la entrada, representados por funciones de membresía de tipo triangular como se muestra en la **Figura 23**. Estos conjuntos difusos hacen referencia al error que entra al controlador, de los ocho, cuatro conjuntos difusos son para evaluar errores positivos, y los otros cuatro para evaluar errores negativos. A continuación, se muestran las etiquetas lingüísticas asignadas:

- Error positivo pequeño EPP, para errores que no superen los 45 grados
- Error positivo mediano EPM, para errores que no superen los 90 grados
- Error positivo grande EPG, para errores que no superen los 135 grados
- Error positivo extragrande EPGG, para errores que no superen los 180 grados

- Error negativo pequeño ENP, para errores que no superen los -45 grados
- Error negativo mediano ENM, para errores que no superen los -90 grados
- Error negativo grande ENG, para errores que no superen los -135 grados
- Error negativo extragrande ENGG, para errores que no superen los -180 grados

**Figura 23**

*Conjuntos difusos de la variable de entrada del primer algoritmo Fuzzy*



*Nota.* El universo de la variable de entrada está definido por un rango de [-3.15 a 3.15], dicho valores hacen referencia al rango de trabajo del péndulo QUBE-Servo3

Del mismo modo para la salida del primer algoritmo difuso, se definen cuatro conjuntos difusos, representados por funciones de membresía de tipo triangulares, los cuales representan los valores de ganancia proporcional  $K_p$  como se muestra en la **Figura 24**.

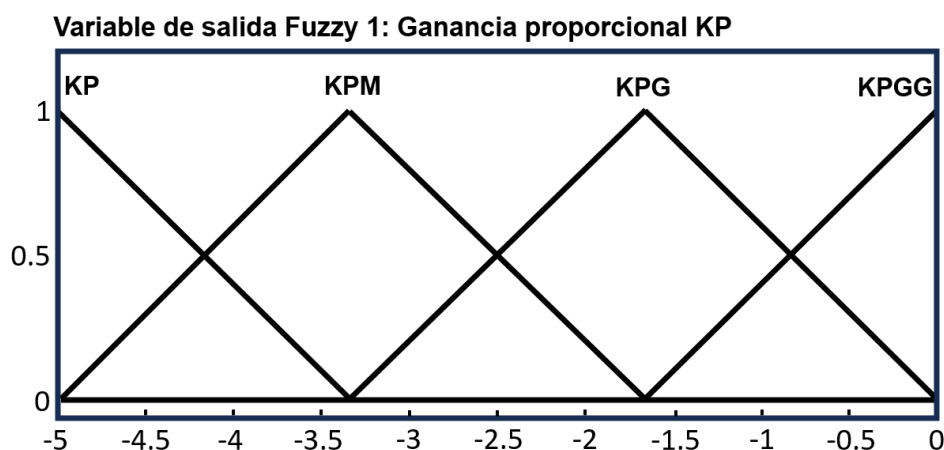
Donde:

- KPGG. - Hace referencia a un valor de ganancia proporcional  $K_p$  extragrande, considerando su magnitud absoluta
- KPG. - Hace referencia a un valor de ganancia proporcional  $K_p$  grande, su magnitud absoluta

- KPM. - Hace referencia a un valor de ganancia proporcional KP medio, su magnitud absoluta
- KPP. - Hace referencia a un valor de ganancia proporcional KP pequeño, su magnitud absoluta

**Figura 24**

*Conjuntos difusos de la variable de salida del primer algoritmo Fuzzy*



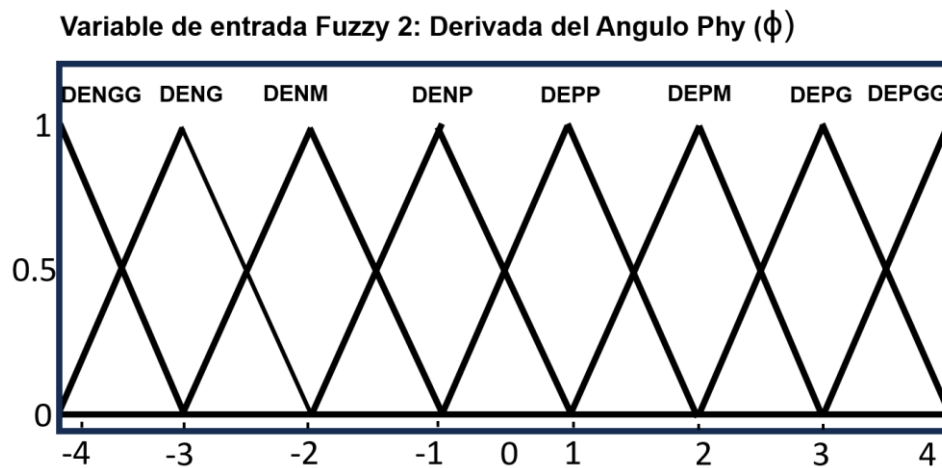
*Nota.* El universo de la salida está definido por un rango de  $[-5 \text{ a } 0]$ , estos datos se obtienen manualmente mediante la sintonización fina en distintos puntos de operación, con el objetivo de recopilar los valores más eficientes de  $K_p$  para el sistema, utilizando un control PID tradicional.

Para obtener los valores de ganancia derivativa  $K_d$ , se definen ocho conjuntos difusos a la entrada del segundo algoritmo difuso, representados por funciones de membresía de tipo triangular como se muestra en la **Figura 25**, estos conjuntos difusos hacen referencia a la derivada del ángulo, que a su vez está relacionada con la velocidad angular con la que el ángulo  $\phi$  gira respecto a las diferentes consignas, a continuación, se describen las etiquetas lingüísticas asignadas.

- DEGG. - Hace referencia a un valor de velocidad Extragrande.
- DEG. - Hace referencia a un valor de velocidad grande.
- DEM. - Hace referencia a un valor de velocidad medio.
- DEP. - Hace referencia a un valor de velocidad pequeño.

**Figura 25**

*Conjuntos difusos de la variable de entrada del segundo algoritmo Fuzzy*



*Nota.* El universo de la entrada está definido por un rango de  $[-4$  a  $4]$ , Estos datos fueron recopilados mediante mediciones realizadas mediante un Display implementado en Simulink. Se observó que cuando el valor de consigna es alto, el péndulo alcanza una velocidad significativa, mientras que cuando el valor de consigna es bajo, la velocidad es menor.

Debido a que la rotación del ángulo  $\phi$  está vinculada con la velocidad, se llevaron a cabo pruebas en puntos que incluían cambios de consigna de  $\pm 45$ ,  $\pm 90$ ,  $\pm 135$  y  $\pm 180$  grados. Las velocidades resultantes se registraron mediante un Display implementado en Simulink. Dando como resultado los siguientes valores; Para un valor de consigna de  $\pm 170$  grados, se observó que el péndulo alcanza una velocidad angular de  $\pm 4$  rad/s. Mientras que para un valor

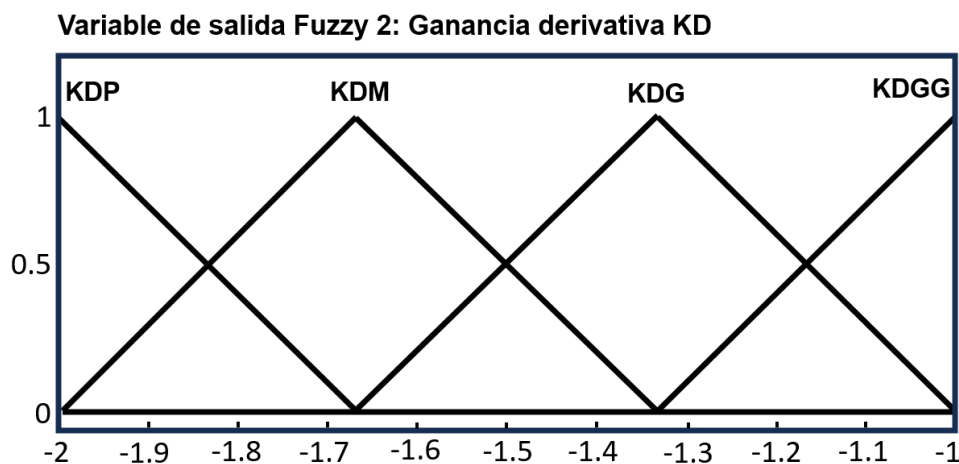
de consigna pequeño de  $\pm 45$  grados, se observó que el péndulo alcanza una velocidad angular de  $\pm 1$  rad/s

Del mismo modo a la salida del segundo algoritmo difuso, se definen cuatro conjuntos difusos representados por funciones de membresía de tipo triangulares, los cuales representan los valores de ganancia derivativa  $K_d$  como se muestra en la **Figura 26**.

- KDP. - Hace referencia a un valor de ganancia derivativa  $K_d$  pequeño,
- KDM. - Hace referencia a un valor de ganancia derivativa  $K_d$  medio,
- KDG. - Hace referencia a un valor de ganancia derivativa  $K_d$  grande,
- KDGG. - Hace referencia a un valor de ganancia derivativa  $K_d$  extragrande,

**Figura 26**

*Conjuntos difusos de la variable de salida del segundo algoritmo Fuzzy*



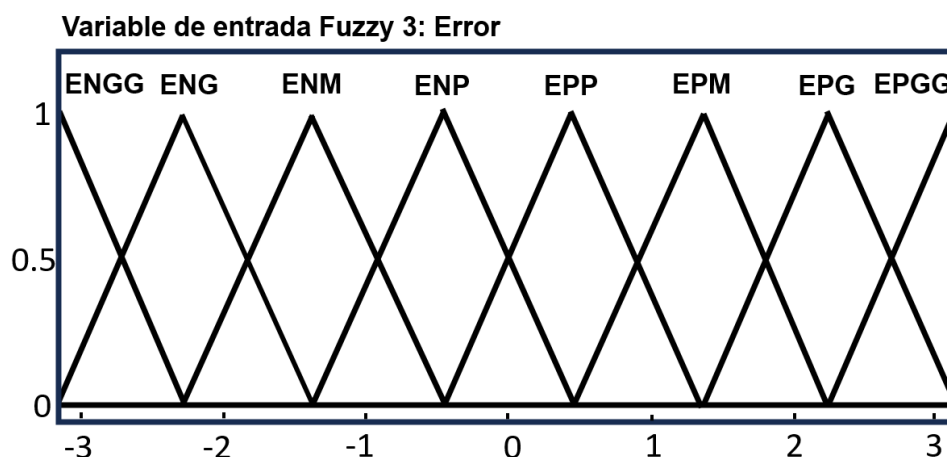
*Nota.* El universo de la salida está definido por un rango de  $[-2$  a  $-1]$ , estos datos se obtienen manualmente mediante la sintonización fina en distintos puntos de operación, con el objetivo de recopilar los valores de  $K_d$  más eficientes para el sistema utilizando en control PID tradicional.

Para obtener los valores de ganancia integral  $K_i$ , se definen ocho conjuntos difusos a la entrada del tercer algoritmo difuso, representados por funciones de membresía de tipo

triangular como se muestra en la **Figura 27**. Estos conjuntos difusos están asociados al error, y fueron empleados los mismos conjuntos difusos de la variable de entrada en el primer algoritmo difuso descrito en la **Figura 24**.

**Figura 27**

*Conjuntos difusos de la variable de entrada del tercer algoritmo Fuzzy*



*Nota.* El universo de la variable de entrada del Fuzzy 3 está definido por un rango de [-3.15 a 3.15], dicho valores hacen referencia al rango de trabajo del péndulo QUBE-Servo3

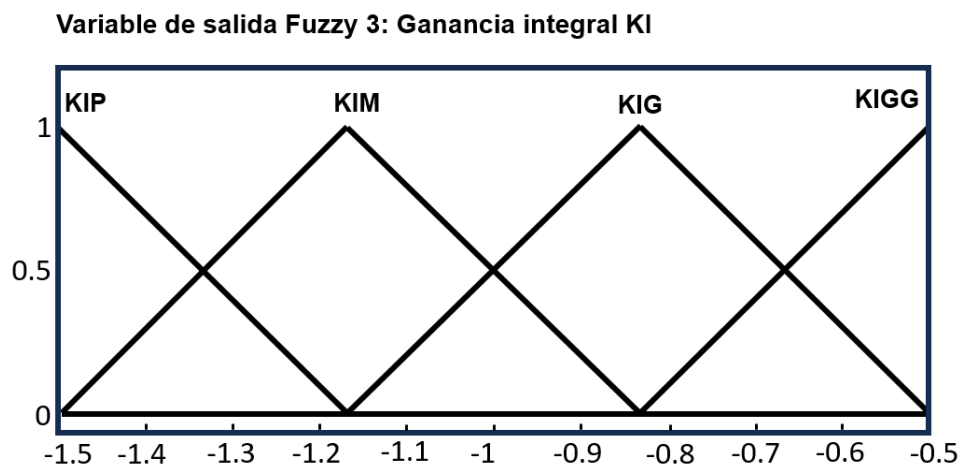
Del mismo modo a la salida del tercer algoritmo difuso, se definen cuatro conjuntos difusos representados por funciones de membresía de tipo triangulares como se muestra en la figura 28, los cuales representan los valores de ganancia derivativa  $K_i$ .

- KIP. - Hace referencia a un valor de velocidad Extragrande, considerando su magnitud absoluta
- KIM. - Hace referencia a un valor de velocidad grande, considerando su magnitud absoluta
- KIG. - Hace referencia a un valor de velocidad medio, considerando su magnitud absoluta

- KIGG. - Hace referencia a un valor de velocidad pequeño, considerando su magnitud absoluta

## Figura 28

*Conjuntos difusos de la variable de salida del tercer algoritmo Fuzzy*



*Nota.* El universo de la entrada está definido por un rango de [-1.5 a -0.5], Estos datos se obtuvieron a partir de mediciones tomadas en cuatro puntos de operación.

### Establecimiento de las reglas difusas

Las reglas difusas se establecen en base a la experiencia y conocimiento en el manejo y experimentación con el péndulo invertido QUBE-Servo 3. Con el objetivo de determinar los valores más óptimos de las ganancias proporcional  $K_p$ , integral  $K_i$ , y derivativa  $K_d$ , para desarrollar un control PID adaptativo robusto de respuesta rápida, en contraste a un controlador PID tradicional, para ello se debe tomar en consideración lo siguiente: Cuando existe un error grande, la ganancia proporcional  $K_p$  y la ganancia integral  $K_i$  son grandes, ya que quiere decir que el sistema se encuentra alejado de su punto de referencia deseado. Por lo tanto, se necesita un esfuerzo de control más intenso para corregir el error, por otro lado, cuando exista un error pequeño, la ganancia proporcional  $K_p$  y  $K_i$  deben ser pequeñas.

En la **Tabla 3**, se muestra las reglas difusas implementadas para determinar los valores de ganancia proporcional  $K_p$

**Tabla 3**

*Reglas difusas implementadas para determinar los valores de ganancia proporcional  $K_p$*

<b>Reglas del algoritmo Fuzzy 1</b>
1. Si (ERROR es EPP), Entonces (Kp es KP)
2. Si (ERROR es EPM), Entonces (Kp es KPM)
3. Si (ERROR es EPG), Entonces (Kp es KPG)
4. Si (ERROR es EPGG), Entonces (Kp es KPGG)
5. Si (ERROR es ENP), Entonces (Kp es KPP)
6. Si (ERROR es ENM), Entonces (Kp es KPM)
7. Si (ERROR es ENG), Entonces (Kp es KPG)
8. Si (ERROR es ENGG), Entonces (Kp es KPGG)

*Nota.* Para obtener los valores de la ganancia proporcional  $K_p$  se dispone de ocho reglas difusa, en función del error se determinó una variable  $K_p$

En la **Tabla 4**, se muestra las reglas difusas implementadas para determinar los valores de ganancia proporcional  $K_d$

**Tabla 4**

*Reglas difusas implementadas para determinar los valores de ganancia derivativa  $K_d$*

<b>Reglas del algoritmo Fuzzy 2</b>
1. Si (DERIVADA es DENG), Entonces (Kd es KDGG)
2. Si (DERIVADA es DENG), Entonces (Kd es KDG)
3. Si (DERIVADA es DENM), Entonces (Kd es KDM)
4. Si (DERIVADA es DENP), Entonces (Kd es KDP)
5. Si (DERIVADA es DEPP), Entonces (Kd es KDP)
6. Si (DERIVADA es DEPM), Entonces (Kd es KDM)
7. Si (DERIVADA es DEPG), Entonces (Kd es KDG)



---

8. Si (DERIVADA es DEPGG), Entonces (Kd es KDGG)

---

*Nota.* Los valores de Kd se obtuvo cuatro reglas difusas, en función de la velocidad se determinó una variable Kp

En la **Tabla 5**, se muestra las reglas difusas implementadas para determinar los valores de ganancia integral Ki

**Tabla 5**

*Reglas difusas implementadas para determinar los valores de ganancia integral Ki*

---

<b>Reglas del algoritmo Fuzzy 3</b>
1. Si (ERROR es EPP), Entonces (Ki es KIP)
2. Si (ERROR es EPM), Entonces (Ki es KIM)
3. Si (ERROR es EPG), Entonces (Ki es KIG)
4. Si (ERROR es EPGG), Entonces (Ki es KIGG)
5. Si (ERROR es ENP), Entonces (Ki es KIP)
6. Si (ERROR es ENM), Entonces (Ki es KIM)
7. Si (ERROR es ENG), Entonces (Ki es KIG)
8. Si (ERROR es ENGG), Entonces (Ki es KIGG)

---

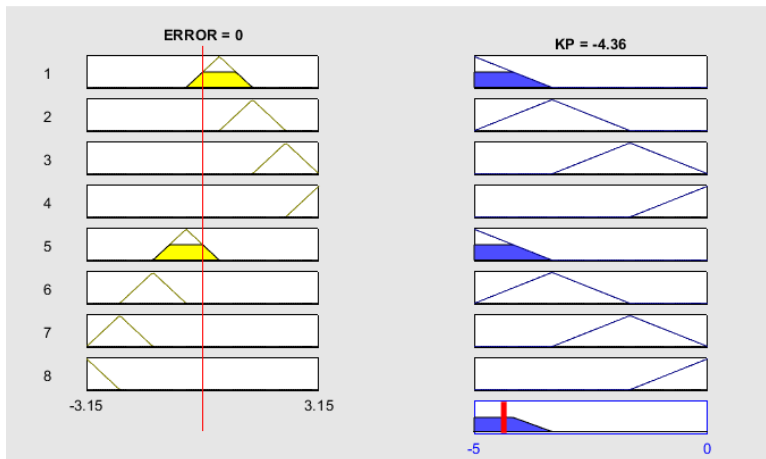
*Nota.* Los valores de Ki se obtienen ocho reglas difusas

#### **Selección del método de defusificación.**

En este trabajo se aplica el procedimiento de defusificación por el método del centroide, para los tres algoritmos difusos utilizados en la obtención de los valores de la ganancia proporcional, integral y derivativa, de manera independiente como se muestra en las **Figuras 29,30 y 31** respectivamente. El método del centroide es ampliamente reconocido y empleado en esta área debido a su simplicidad y eficacia. Este método consiste en convertir una señal difusa en un valor numérico el cual hace referencia a la coordenada del centro de gravedad en el eje de las abscisas del conjunto difuso de salida.

**Figura 29**

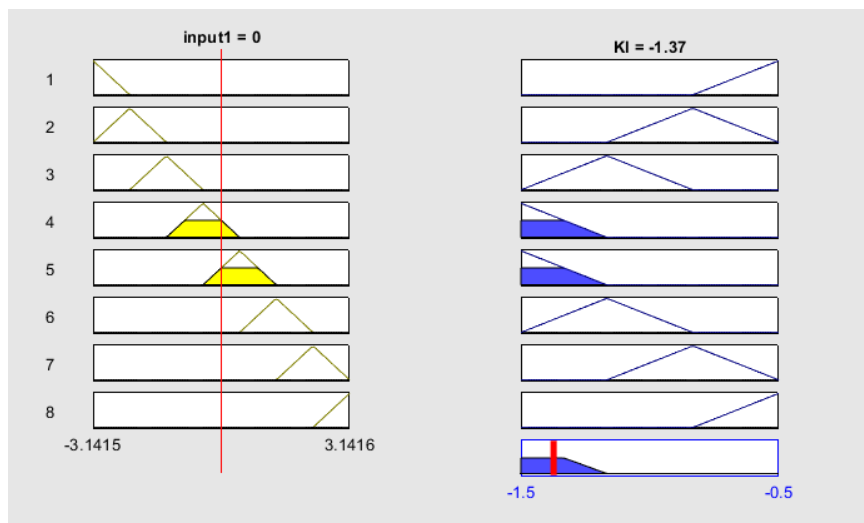
*Defusificación por el método del centroide para obtener los valores de Kp*



*Nota.* En la Figura se observa que cuando el error sea igual a cero el valor de Kp va ser igual a -4.36

**Figura 30**

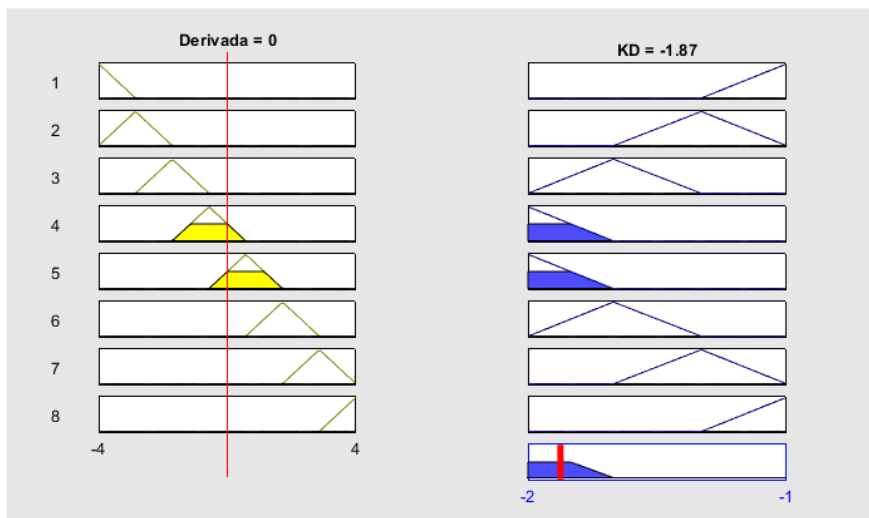
*Defusificación por el método del centroide para obtener los valores de Ki*



*Nota.* Cuando el error sea igual a cero, el valor de Ki va ser igual a -1.37

**Figura 31**

*Defusificación por el método del centroide para obtener los valores de Kd*



*Nota.* Cuando la velocidad sea igual a cero, el valor de Kd va ser igual a -1.87

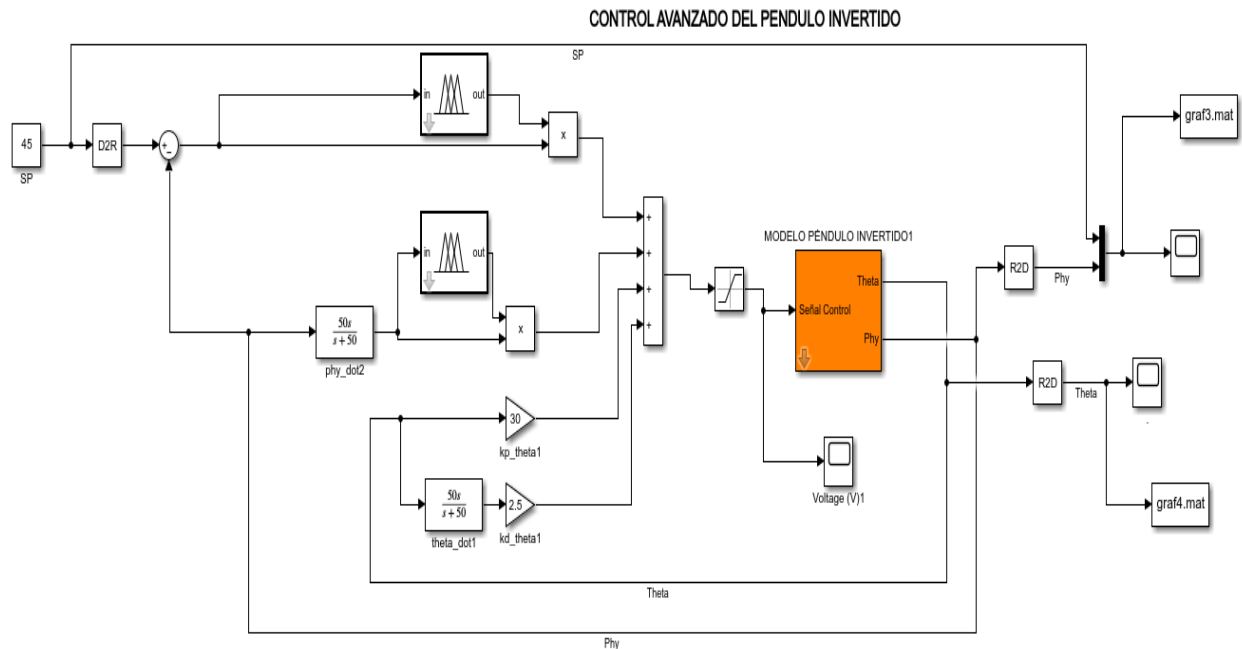
### **Implementación de un control PD adaptativo con lógica difusa mediante Simulink de Matlab:**

Para implementar una estrategia de control mediante lógica difusa utilizando el método de inferencia del tipo Mandami, se utiliza la herramienta Fuzzy Logic Toolbox de Matlab. El método de inferencia calcula los grados de activación en cada regla y al final combina estos grados para obtener el resultado final el cual ayudar a tomar decisiones.

Como se observa en la **Figura 32**, se presenta la simulación del sistema de control en lazo cerrado basado en lógica difusa el cual ajusta los parámetros según sea necesario para mejorar el rendimiento del control.

**Figura 32**

*Diseño del controlador PD adaptativo por simulación*



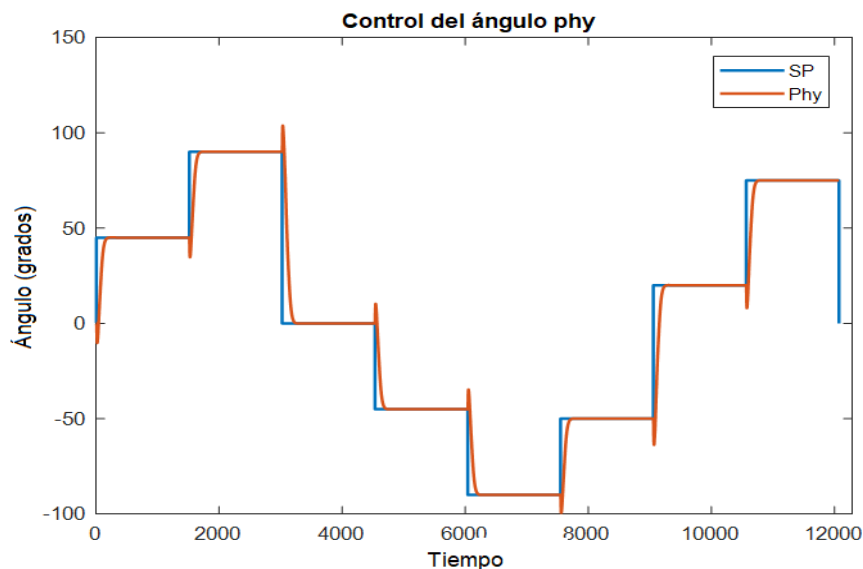
*Nota.* La simulación se realizó mediante el software de Simulink

### **Respuesta del sistema con control PD adaptativo mediante lógica difusa**

En la **Figura 33**, se puede observar la respuesta del controlador PD mediante lógica difusa para distintos puntos de SP, en los puntos analizados el ángulo *phy* llega al punto de consigna de manera más rápida que un controlador PD clásico.

**Figura 33**

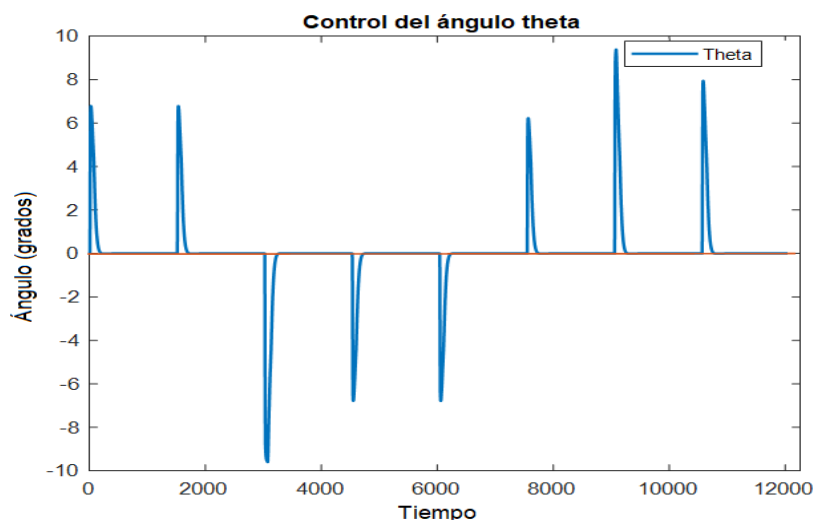
*Respuesta del ángulo phy al implementar un controlador PD clásico en la planta real*



*Nota.* Los resultados de la simulación muestran que el controlador PD con auto sintonización mediante lógica difusa logra un mejor rendimiento en comparación con un controlador PD tradicional con parámetros fijos. Ya que se observa una reducción en el tiempo de establecimiento, lo que demuestra la eficacia de la técnica de auto sintonización propuesta.

**Figura 34**

*Respuesta del ángulo theta*



*Nota.* De manera similar, se puede observar cómo el ángulo theta varía hasta el punto de estabilizarse en los puntos de referencia dados en la **Figura 34**.

## Capítulo V

### Implementación de Controladores

En este apartado del documento se muestra las respuestas del sistema al implementar los controladores clásico y avanzado respectivamente en la planta real.

#### Implementación de un control PID clásico en la planta real.

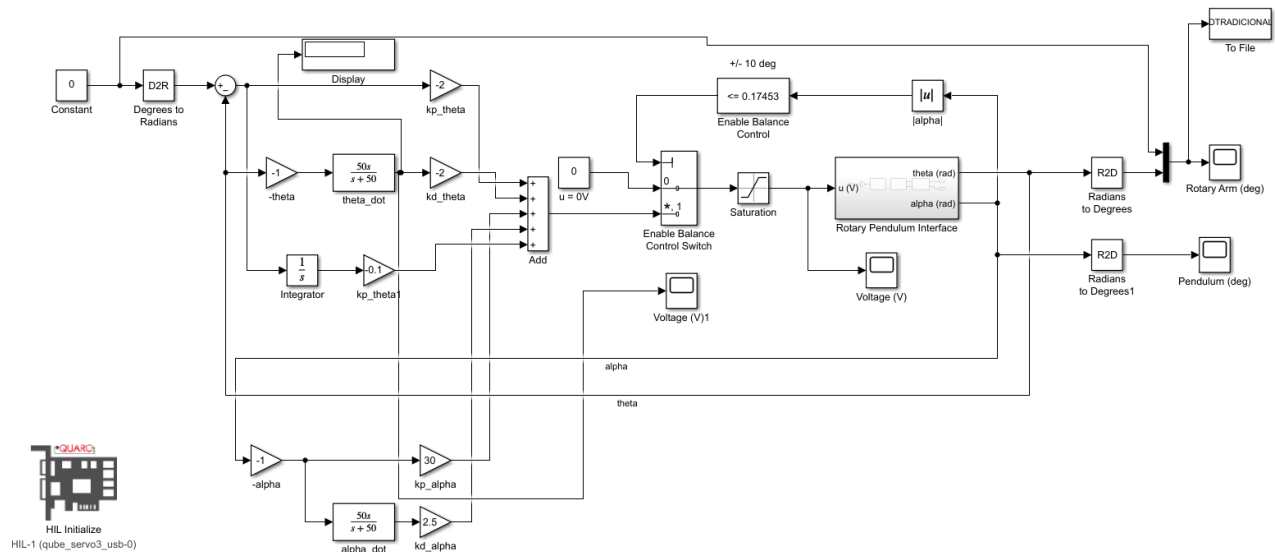
A diferencia de la simulación, en la implementación en la planta real se emplea un controlador proporcional-derivativo-integral PID. Ya que, durante la experimentación, se verificó que la respuesta del sistema con un controlador PD no alcanza el punto de consigna SP, donde los errores son grandes. Por lo tanto, se incorpora un término integral al controlador para corregir este problema.

En la **Figura 35**, se muestra el esquema del sistema en lazo cerrado implementado mediante diagrama de bloques en Simulink, en el cual se han incorporado dos controladores. En primer lugar, un controlador PID clásico con ganancias fijas para controlar la posición del brazo, estas ganancias se obtienen mediante una sintonización fina a fin de garantizar una respuesta óptima del sistema. Por otro lado, para controlar el ángulo *theta* del péndulo invertido se implementa un controlador PD clásico.

En el diagrama de bloques dado en la **Figura 35**, se muestra un dispositivo de conmutación (Enable balance control Switch), que opera de acuerdo con el siguiente criterio: cuando el péndulo está cerca de su punto de equilibrio, el controlador se activa. Sin embargo, si el péndulo se desvía a un valor igual o mayor a 0.17453, el controlador se desactiva. Este proceso se lleva a cabo para evitar que el controlador actúe si el péndulo experimenta movimientos bruscos fuera de control. Además, la salida del controlador tiene un saturador con el objetivo de proteger los picos de voltaje que pueda existir-

Figura 35

Diagrama de bloques en lazo cerrado con un control PID clásico en la planta real



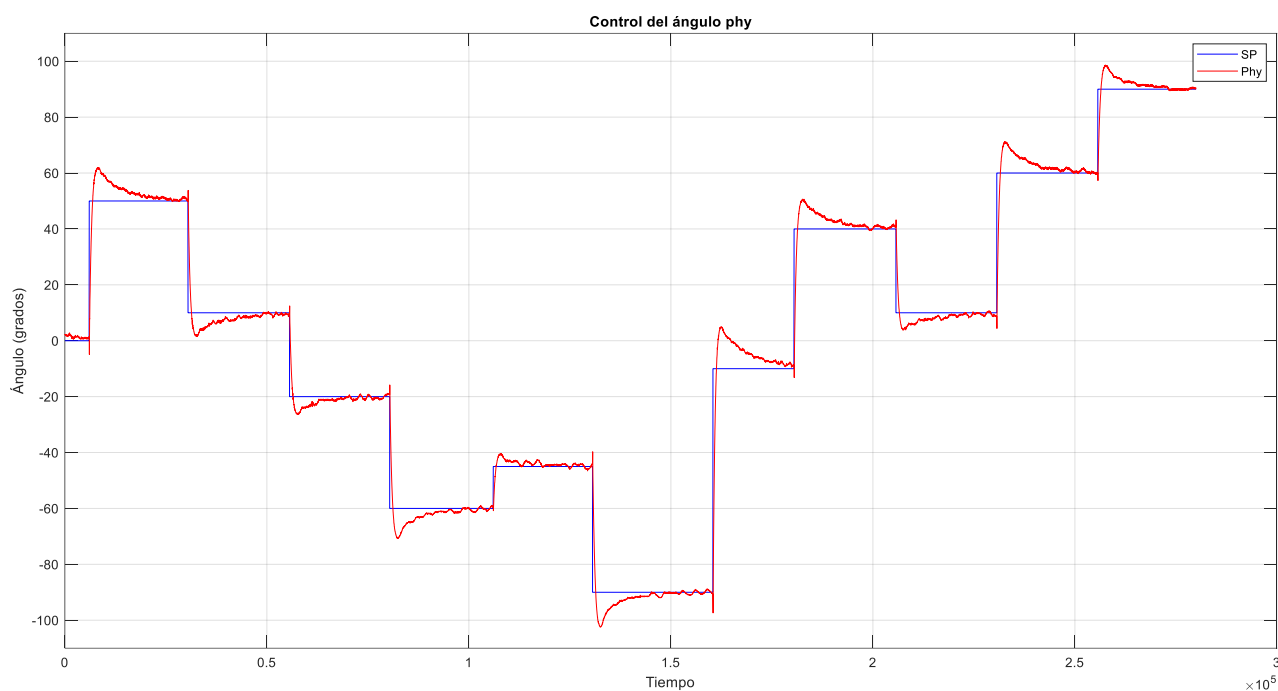
*Nota.* La implementación del controlador se realizó en Simulink previamente instalados los paquetes del péndulo Qube servo 3

### Respuesta del sistema con control PID clásico en la planta real

En la **Figura 36**, se muestra la respuesta del sistema al aplicar un controlador PID clásico con ganancias fijas, evaluado en diferentes puntos de operación. Se observa que el ángulo *phy*, tiende a alcanzar el SP en los puntos analizados. Sin embargo, también se nota que el tiempo necesario para que el sistema se estabilice en estos diferentes puntos de operación es prolongado, lo que indica un tiempo de asentamiento lento.

**Figura 36**

*Respuesta del ángulo  $\phi$  al implementar un controlador PID clásico en la planta real*



*Nota.* La señal de color azul hace referencia al SP, mientras que la señal de color rojo corresponde a la respuesta del ángulo  $\phi$  al aplicar un control PID clásico con ganancias fijas al péndulo invertido QUBE-Servo3.

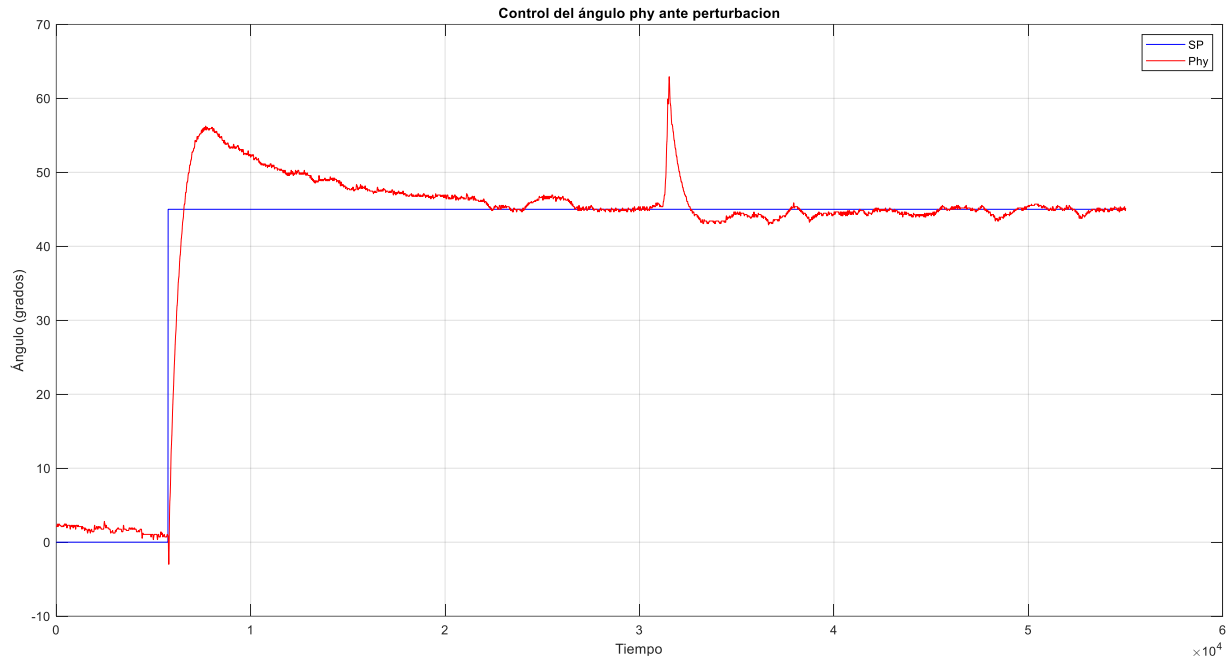
### **Respuesta del sistema con control PID clásico ante una perturbación en la planta real**

En la **Figura 37**, se muestra la respuesta del sistema ante una perturbación en la planta real

**Figura 37**

*Respuesta del ángulo  $\phi$  ante una perturbación*





*Nota.* En la figura, se muestra la respuesta del sistema frente a una perturbación, donde se puede notar cómo el controlador logra retornar la posición del ángulo *phy* al punto de referencia deseado.

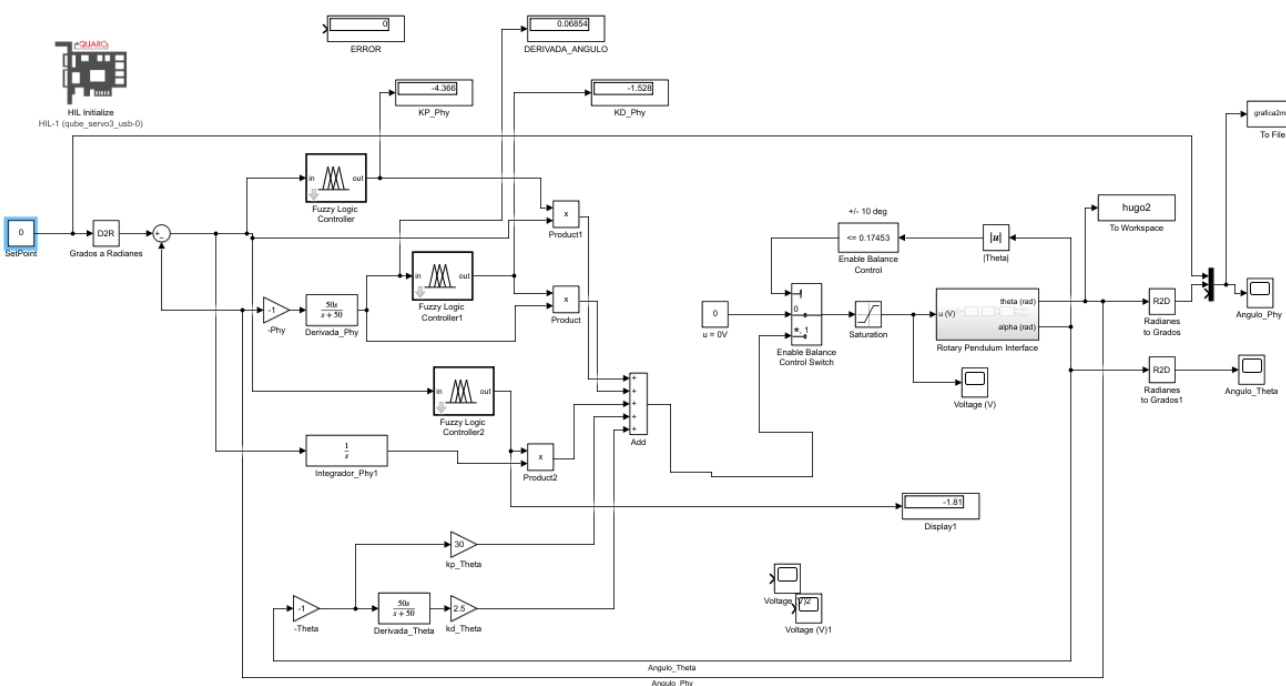
### Implementación de un control PID adaptativo con ajuste de ganancias utilizando lógica difusa en la planta real.

En la **Figura 38**, se observa el sistema en lazo cerrado para controlar tanto la posición del brazo como el ángulo del péndulo representado mediante diagrama de bloques en Simulink, Para ello, se emplean dos controladores diferentes: un controlador PID adaptativo para controlar la posición del brazo, el cual utiliza tres algoritmos difusos independientes para ajustar dinámicamente los parámetros de las ganancias proporcional-integral-derivativo del controlador PID, con el objetivo de mejorar el rendimiento del control. Por otro lado, para controlar la posición del péndulo, se implementa un controlador proporcional-derivativo (PD) de ganancias fijas.

En el diagrama de bloques dado en la **Figura 38** se muestra un dispositivo de conmutación (Enable balance control Switch), que opera de acuerdo con el siguiente criterio: cuando el péndulo está cerca de su punto de equilibrio, el controlador se activa. Sin embargo, si el péndulo se desvía a un valor igual o mayor a 0.17453, el controlador se desactiva. Este proceso se lleva a cabo para evitar que el controlador actúe si el péndulo experimenta movimientos bruscos fuera de control.

**Figura 38**

*Diagrama de bloques del controlador PID adaptativo en la planta real*



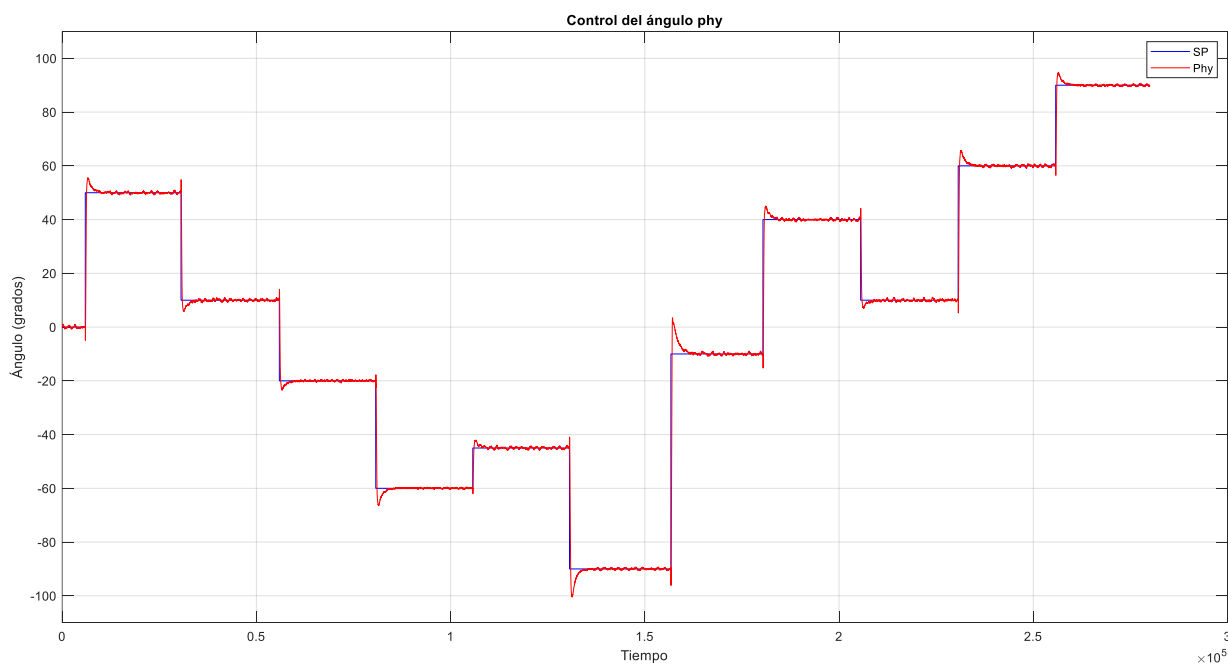
*Nota.* La implementación del controlador se realizó en Simulink previamente instalados los paquetes del péndulo Qube servo 3

## Respuesta del sistema con el control PID avanzado en la planta real

En la **Figura 39**, se puede observar la respuesta del sistema al implementarse un controlador PID avanzado para distintos puntos de SP, en los puntos analizados el ángulo  $phy$  llega al punto de consigna en donde el error tiende a cero, además de que se puede ver que el tiempo de asentamiento en los diferentes puntos de operación son rápidos. Del mismo modo en las **Figuras 40, 41 y 42** se puede ver como varían las ganancias proporcional, integral y derivativa respectivamente de acuerdo a los distintos puntos del SP asignados en la figura 38.

### Figura 39

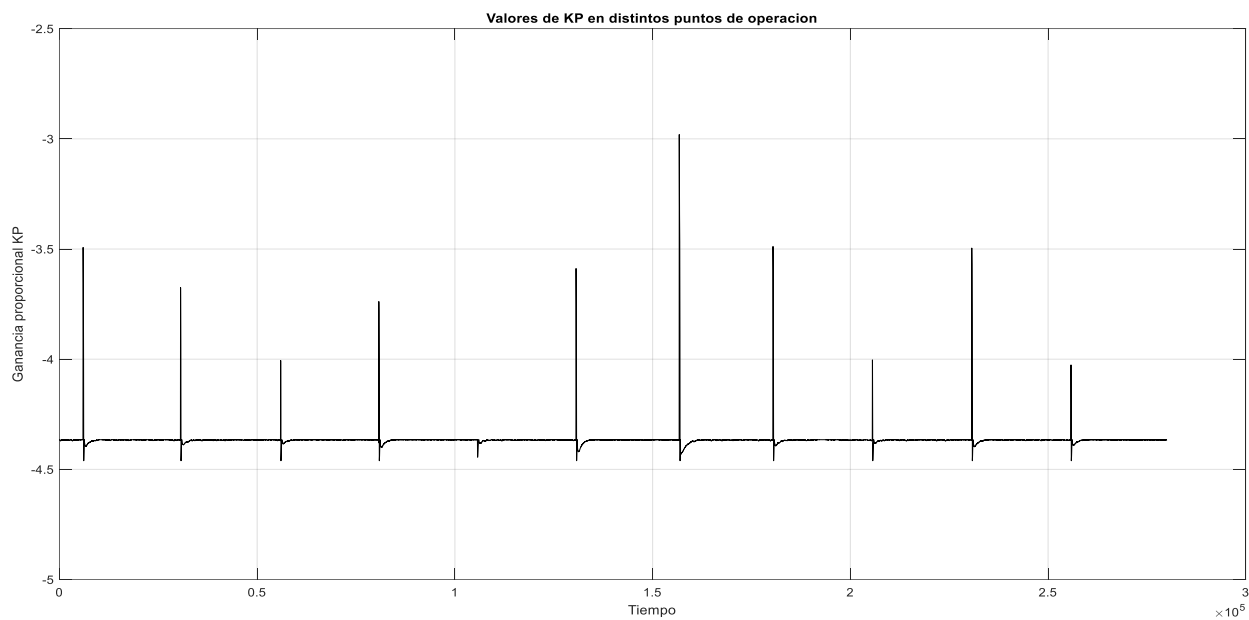
*Respuesta del ángulo  $phy$  al implementar un controlador PID adaptativo en la planta real*



*Nota.* La señal de color azul hace referencia al Setpoint SP, mientras que la señal de color rojo hace referencia a la respuesta del ángulo  $phy$  al implementarse un control PID adaptativo con ajuste de ganancia mediante lógica difusa, aplicado al péndulo invertido QUBE-Servo 3.

**Figura 40**

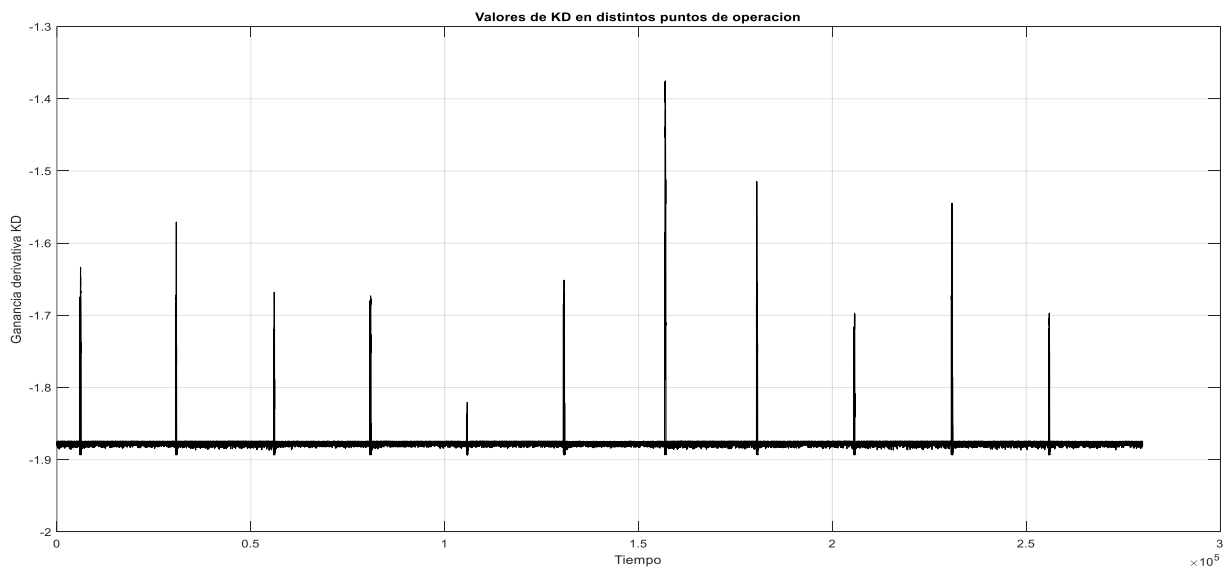
*Valores de ganancia proporcional  $K_p$  en distintos puntos de operación*



*Nota. Valores que toma la ganancia proporcional a distintos puntos de operación dados en la Figura 36*

**Figura 41**

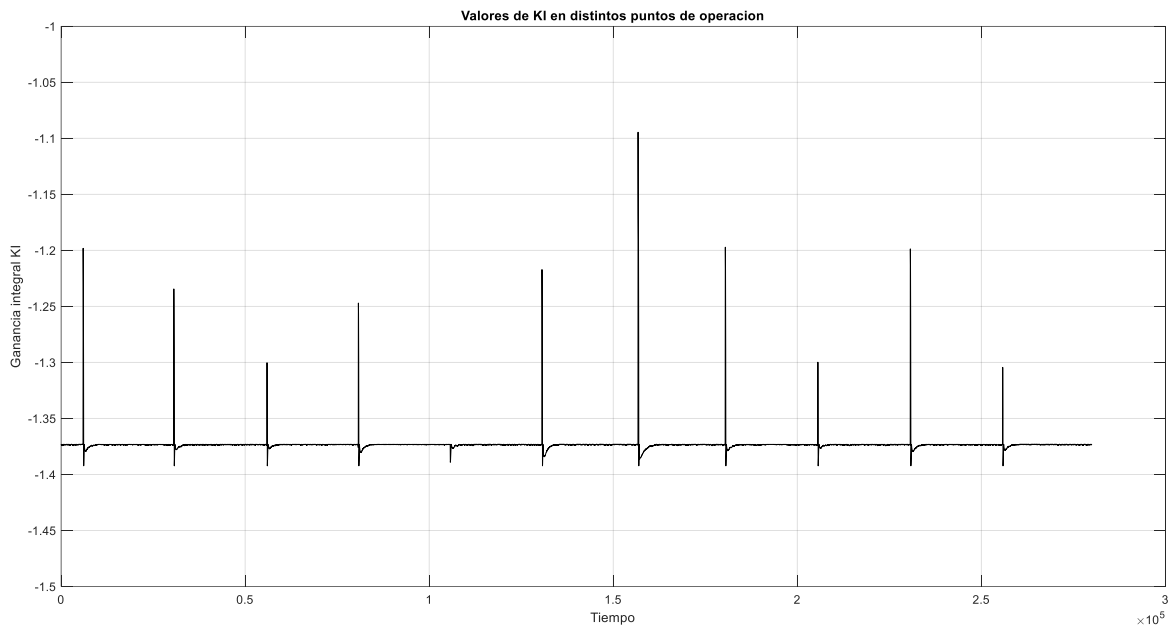
*Valores de ganancia derivativa  $K_d$  en distintos puntos de operación*



*Nota. Valores que toma la ganancia derivativa a distintos puntos de operación dados en la **Figura 36***

### **Figura 42**

*Valores de ganancia integral  $K_i$  en distintos puntos de operación*



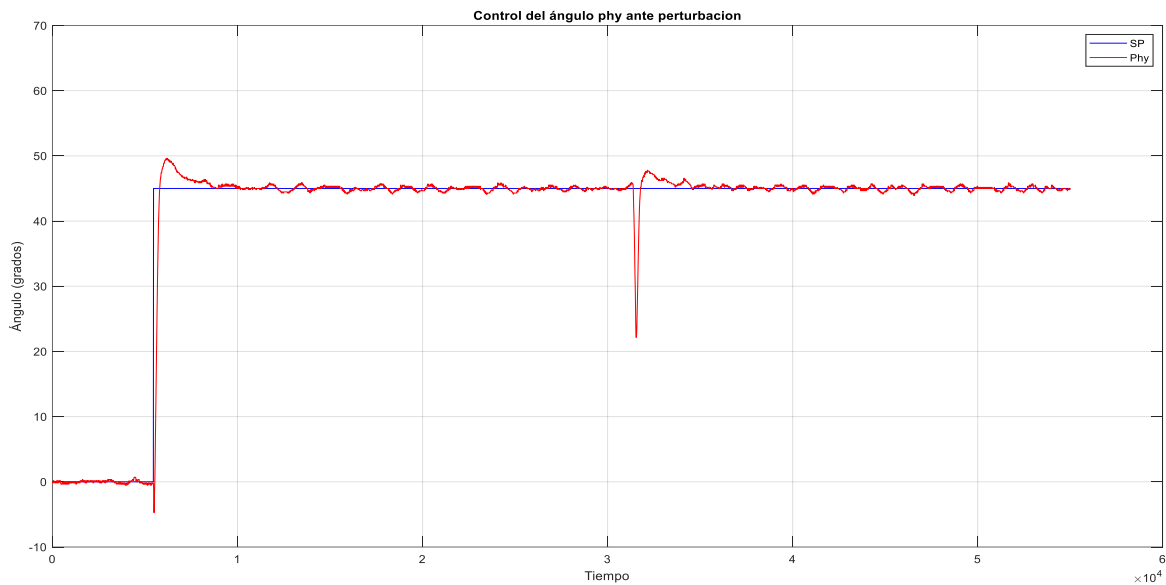
*Nota. Valores de la ganancia integral a distintos puntos de operación dados en la **Figura 36***

### **Respuesta del sistema con el control PID avanzado en la planta real ante una perturbación**

En la **Figura 43**, se muestra la respuesta del sistema ante una perturbación en la planta real

### **Figura 43**

*Respuesta del ángulo  $\phi$  ante una perturbación al implementarse un control PID avanzado*



*Nota.* En la **Figura 43**, se puede evidenciar la respuesta del sistema frente a una perturbación, al implementar un control PID avanzado, en el cual se puede notar cómo el controlador logra retornar la posición del ángulo *phy* al punto de referencia deseado con un tiempo de asentamiento más rápido.

## Capítulo VI

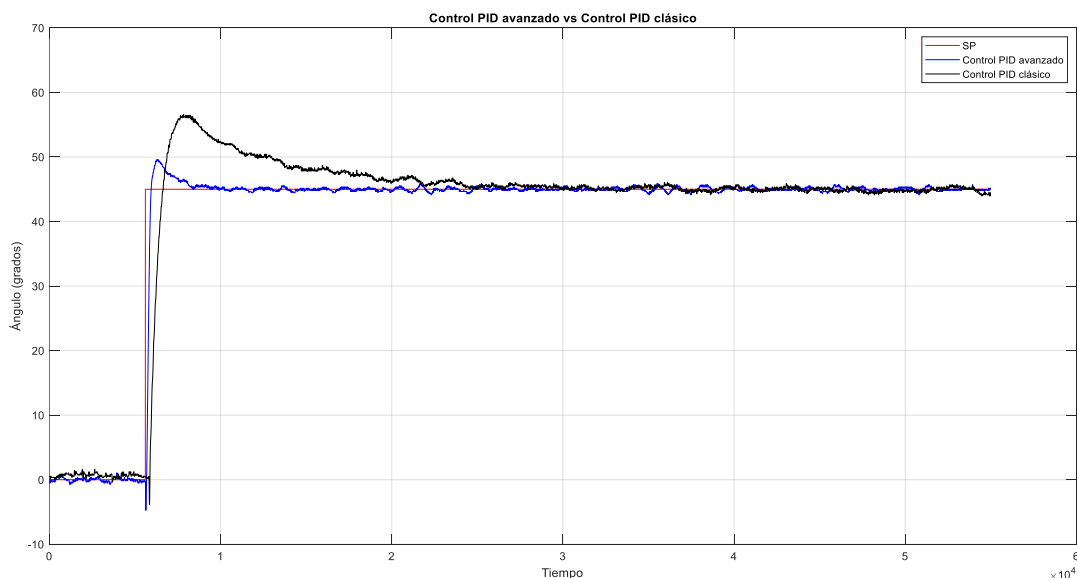
### Análisis Comparativo

#### Respuesta del sistema con un control PID clásico versus un control PID adaptativo con lógica difusa en la planta real

En la **Figura 44**, Se puede apreciar la comparación entre la señal de color azul, que representa la respuesta del ángulo phy al implementar un controlador PID adaptativo, y la señal de color negro, que corresponde a la respuesta del ángulo phy al implementar un controlador PID clásico, ambas señales convergen hacia un error en estado estable cercano a cero, pero difieren en la velocidad de respuesta del sistema. En el caso del control PID clásico, el tiempo de establecimiento es más lento, en contraste con el control avanzado que logra una estabilización más rápida. Esta diferencia es significativa, ya que un tiempo de establecimiento más corto es muy ventajoso en sistemas altamente inestables, ya que permite una respuesta más rápida y precisa. Además, el control PID clásico tiene un sobre impulso más pronunciado.

#### Figura 44

*Respuesta del sistema al implementar los controladores en la planta real*

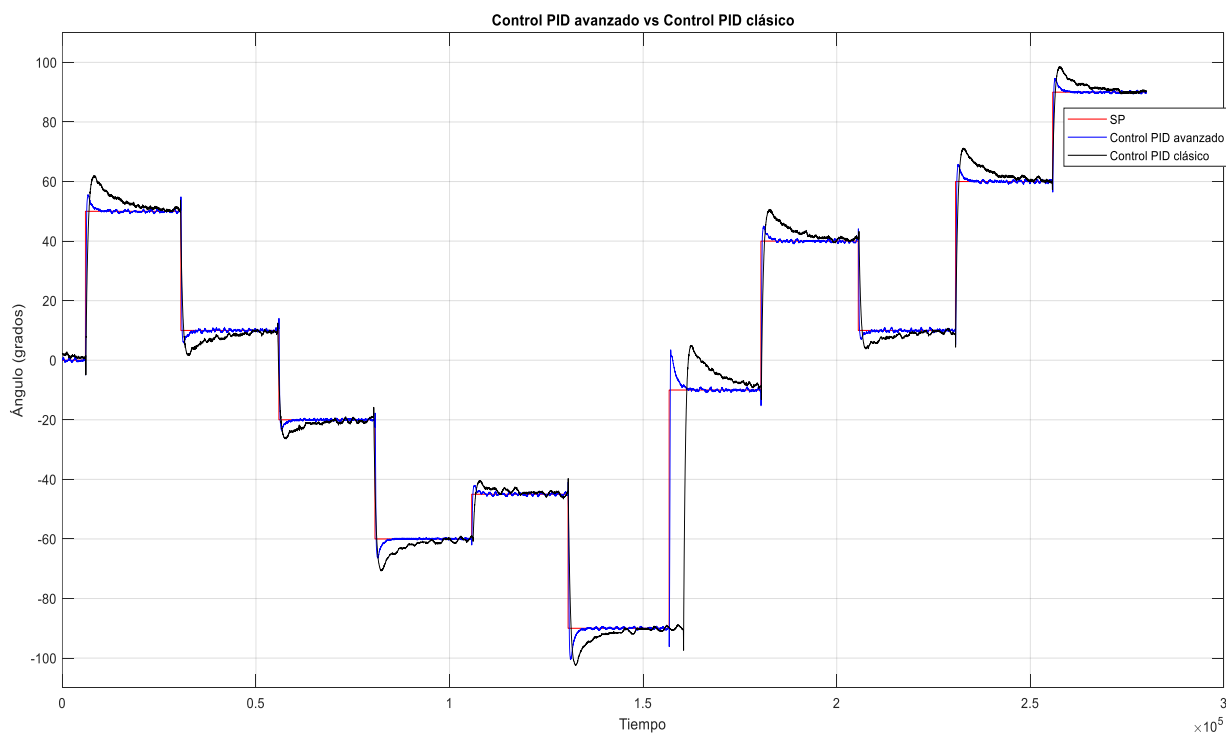


*Nota.* La respuesta transitoria de la **Figura 44**, muestra que el controlador PID con auto sintonización mediante lógica difusa, logra un mejor rendimiento en comparación con un controlador PID tradicional ya que el tiempo de asentamiento es más rápido

En la **Figura 45**, Se presenta una gráfica comparativa entre la respuesta del ángulo  $\phi$  al implementar un controlador PID clásico, representado por la señal de color negro, y la respuesta del ángulo  $\phi$  al aplicar un control PID avanzado utilizando lógica difusa, representado por la señal de color azul. En la gráfica, se evidencia que el controlador PID clásico requiere un tiempo de estabilización mayor en comparación con el controlador PID avanzado. Esto se debe a que las ganancias del controlador PID avanzado se ajustan dinámicamente según las necesidades del sistema, lo que resulta en un rendimiento más eficiente para una estabilización más rápida.

### Figura 45

*Respuesta del sistema al implementar los controladores en la planta real*





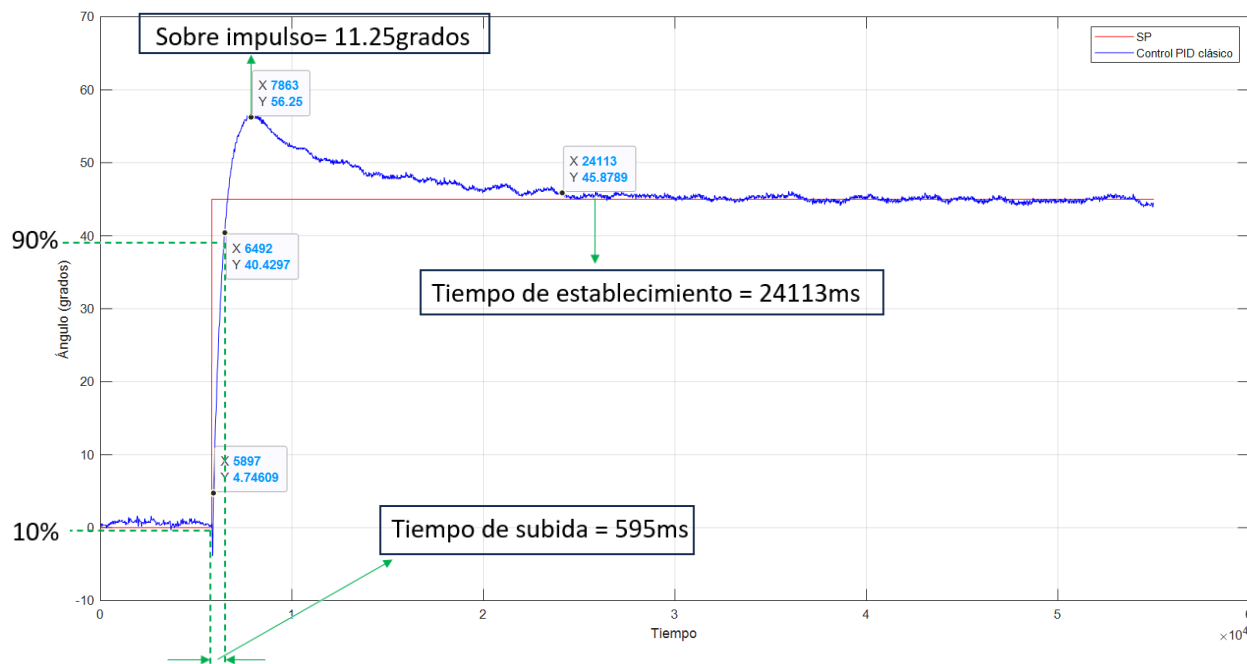
*Nota.* Los resultados en la planta real al igual que en la simulación muestran que el controlador PID con auto sintonización mediante lógica difusa logra un mejor rendimiento en comparación con un controlador PID tradicional ya que el tiempo de asentamiento es más rápido

### Análisis a la respuesta de los controladores

A continuación, se procede a analizar detalladamente los parámetros, como el tiempo de asentamiento, tiempo de subida y overshoot, con el objetivo de evaluar y comparar el rendimiento de los dos sistemas de control implementados en la planta real.

### Figura 46

Respuesta transitoria de un sistema de control PID clásico



*Nota.* En la **Figura 46** Se presenta la respuesta del ángulo *phy* al implementar un sistema de control PID clásico, en el cual se destaca un sobre impulso de 11.25 grados, un tiempo de asentamiento aproximado de 24.113 segundos, y un tiempo de subida cercano a 5.96 segundos.

En la tabla 6, se describen los parámetros para analizar la respuesta transitoria de un sistema de control PID clásico, es decir, tiempo de asentamiento, tiempo de subida, y overshoot.

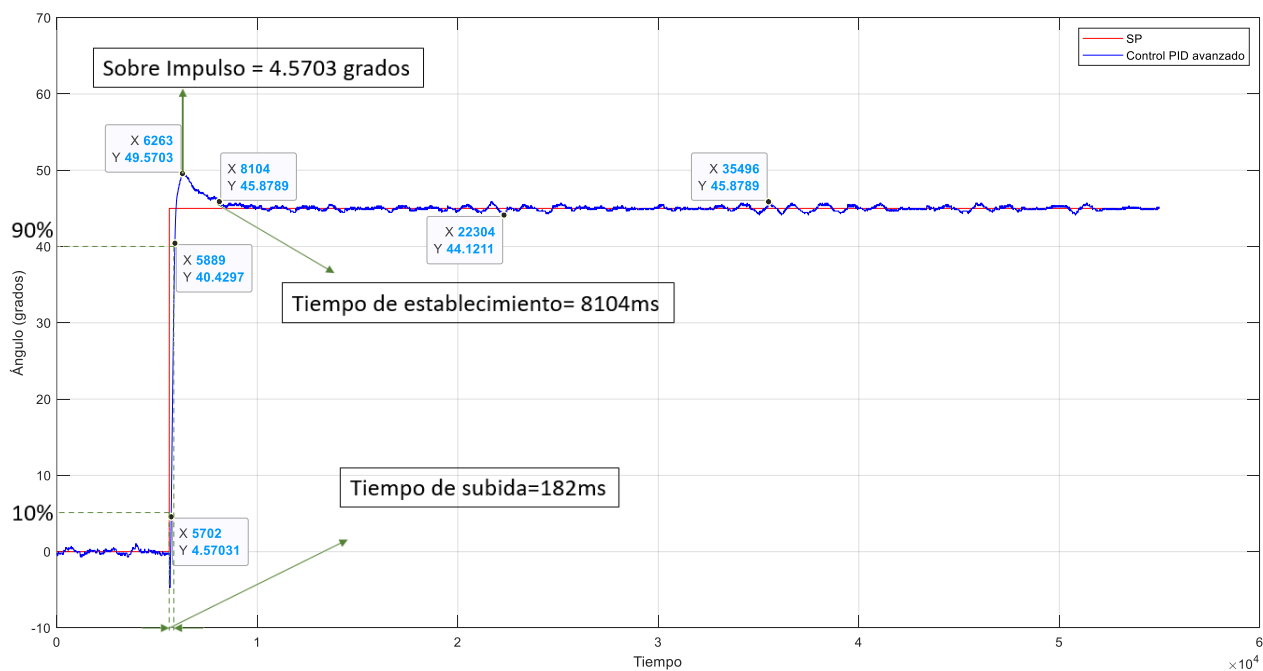
**Tabla 6.**

*Parámetros de la respuesta transitoria de un sistema de control PID clasico*

	KP	Ti(min)	Td(min)	Tr (mseg)	Ts (mseg)	%OS
Controlador	Ganancia Proporcional	Tiempo Integral	Tiempo derivativo	Tiempo de subida	Tiempo de Asentamiento	Sobre impulso
PID clásico	La ganancia proporcional fija es de -2	La ganancia integral fija es de -0.1	La ganancia derivativa fija es de -2	595	24113	11.25

**Figura 47**

*Respuesta transitoria de un sistema de control PID avanzado*



*Nota.* En la **Figura 47**. Se presenta la respuesta del ángulo phy al implementar un sistema de control PID adaptativo, en el cual se destaca un sobre impulso de 4.57 grados, un tiempo de asentamiento aproximado de 8.104 segundos, y un tiempo de subida cercano a 1.82 segundos.

En la **Tabla 7**, se describen los parámetros más importantes para analizar la respuesta transitoria de un sistema de control PID avanzado, entre estos se destacan, el tiempo de asentamiento, el tiempo de subida, y el overshoot.

**Tabla 7**

*Parámetros de la respuesta transitoria de un sistema de control PID avanzado*

	KP	Ti(min)	Td(min)	Tr (mseg)	Ts (mseg)	%OS
Controlador	Ganancia Proporcional	Tiempo Integral	Tiempo derivativo	Tiempo de subida	Tiempo de Asentamiento	Sobre impulso
PID adaptativo con ajuste de ganancias utilizando lógica difusa	La ganancia proporcional varía en función del error, este rango esta dado de [-5 a -0]	La ganancia integral varía en función de la velocidad del ángulo phy, este rango esta dado de [-2 a -1]	La ganancia derivativa varía en función del error, este rango esta dado de [-1.5 a -0.5]	182	8104	4.5703

Una vez analizados los parámetros de respuesta transitoria del sistema de control PID avanzado e implementado en la planta real, se llega a la conclusión, que los dos controladores, el controlador PID clásico con ganancias fijas y el controlador PID avanzado con auto ajuste de ganancias, llevan la variable de salida al punto de consigna y, el error en estado estacionario tiende a cero. Sin embargo, el controlador PID adaptativo al tener capacidad de ajustar dinámicamente sus parámetros de ganancia en función de las características cambiantes del sistema en tiempo real, tiene un mejor rendimiento en contraste de un controlador PID clásico,

esto se puede evidenciar en la tabla 6 donde se observa que el controlador avanzado disminuye el sobre impulso, siendo un factor importante en los procesos de control, ya que el sobre impulso puede reducir la vida útil de los actuadores y esto a su vez podría aumentar los costos de mantenimiento. Además, el tiempo de establecimiento en el control avanzado es rápido, siendo un aspecto importante en sistemas altamente inestables, ya que permite una respuesta más rápida y precisa.

## Capítulo VII

### Conclusiones y Recomendaciones

#### Conclusiones

Dada la naturaleza no lineal y altamente inestable de la planta, se desarrolló un modelo matemático aproximado del péndulo invertido QUBE-Servo 3. Este modelo se implementó utilizando diagramas de bloques en Simulink, permitiendo un análisis detallado del comportamiento del sistema mediante pruebas tanto en lazo abierto como en lazo cerrado, utilizando un controlador clásico y un controlador adaptativo con ajuste de ganancias mediante lógica difusa, antes de su aplicación en la planta real. Además, la creación de un modelo tridimensional del péndulo invertido facilitó la visualización y comprensión del comportamiento del sistema.

En los simuladores, los sistemas tienden a ser ideales al no estar sujetos a factores externos. Por esta razón, se diseñaron controladores PID clásicos con ganancias fijas y controladores PID adaptativos con ajuste de ganancias mediante lógica difusa, estableciendo la ganancia integral en cero, los mismos que fueron implementados por simulación, dando como resultado un desempeño satisfactorio. Sin embargo, al implementar los controles en la planta real, se realizó un análisis para introducir una ganancia integral para el control PID avanzado. Esto debido a que durante las pruebas experimentales se observaron fallos significativos cuando el error aumentaba considerablemente. Por consiguiente, la incorporación de una ganancia integral permitió contrarrestar este comportamiento y mejorar la respuesta del sistema en condiciones reales.

Al comparar el controlador PID clásico con el controlador PID con ajustes de ganancias mediante lógica difusa por simulación, se observa que éste presenta un tiempo de

asentamiento menor y carece de sobre impulso inicial. Por lo tanto, a partir de la simulación, el controlador avanzado supera al controlador clásico en términos de desempeño.

Una vez implementados los controladores en la planta real, se observa que el controlador avanzado PID con ajuste de ganancias basado en lógica difusa presenta menor sobre impulso inicial, tiempo de establecimiento reducido y una corrección más eficaz del error en estado permanente. Esto confirma la eficiencia, precisión y capacidad del control avanzado respecto a un control clásico.

En la implementación del control PID tradicional, el rango de trabajo máximo es de  $90^\circ$ , mientras que, el control avanzado PID adaptativo con lógica difusa tiene un rango máximo de  $160^\circ$ . Por lo que, la amplitud de operación del control avanzado permite un mejor rendimiento del sistema.

## **Recomendaciones**

Se recomienda inspeccionar y asegurar la correcta conexión del encoder del péndulo a la base de la planta. Esto implica examinar visualmente la integridad de la conexión y verificar la fijación adecuada de los cables del encoder para evitar posibles fallos en el funcionamiento del péndulo QUBE - Servo 3.

Para asegurar una implementación efectiva del sistema mediante simulación, se recomienda consultar el manual proporcionado por la plataforma Quanser. Este manual ofrece una detallada orientación sobre cómo obtener un modelo matemático que se asemeje con precisión el comportamiento de la planta real.

Se recomienda seguir las instrucciones proporcionadas en el manual, ya que asegura una integración eficiente del péndulo QUBE - Servo 3 en el entorno de simulación.

## Bibliografía

- Aracil Santonja, J., & Gordillo Álvarez, F. (2005). *El péndulo invertido: Un desafío para el control no lineal*. <https://doi.org/10.4995/riai.v2i2.1050>
- Åström, K. J., & Furuta, K. (1996). Swinging Up a Pendulum by Energy Control\*. *IFAC Proceedings Volumes*, 29(1), 1919-1924. [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)57951-3](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)57951-3)
- Astudillo Roblero, H., Gallardo Arancibia, J., Ayala Bravo, C., Astudillo Roblero, H., Gallardo Arancibia, J., & Ayala Bravo, C. (2020). Estudio comparativo de algoritmos de control PID clásico para el control angular de un brazo electromecánico. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 28(4), 612-628. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052020000400612>
- Diego Más, J. A. (2006). *Optimización de la distribución en planta de instalaciones industriales mediante algoritmos genéticos. Aportación al control de la geometría de las actividades*. [Universitat Politècnica de València]. <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/135821>
- Espitia Cuchango, H. E., Machón González, I., & López García, H. (2020). Optimization of compact fuzzy controllers used for temperature regulation. *Visión Electrónica*, 14(1), 3.
- Felipe Tolentino, W. (2021). *Implementación del algoritmo Linear Q-Learning para la convergencia de un Doble Péndulo Invertido a su estado de equilibrio*.
- Galán, R., Jiménez, A., Sanz, R., & Martíá, F. (2000). Control Inteligente. *INTELIGENCIA ARTIFICIAL*, 4(10), 276. <https://doi.org/10.4114/ia.v4i10.661>
- Hakim, A. A. M., & Sanhoury, I. M. H. (2018). Adaptive Control for x Inverted Pendulum Utilizing Gain Scheduling Approach. *2018 International Conference on Computer, Control, Electrical, and Electronics Engineering (ICCCEEE)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/ICCCEEE.2018.8515839>
- James Brown, & Sara Zak. (2022, octubre 30). 9.2: Control de P, I, D, PI, PD y PID. LibreTexts Español.



- [https://espanol.libretexts.org/Ingenieria/Ingenier%C3%ADa/Industrial\\_y\\_de\\_Sistemas/Libro%3A\\_Din%C3%A1mica\\_y\\_Control\\_de\\_Procesos\\_Qu%C3%ADmicos\\_\(Woolf\)/09%3A\\_Control\\_proporcional-integral-derivado\\_\(PID\)/9.02%3A\\_Control\\_de\\_P%2CI%2CD%2C\\_PI%2CPD\\_y\\_PID](https://espanol.libretexts.org/Ingenieria/Ingenier%C3%ADa/Industrial_y_de_Sistemas/Libro%3A_Din%C3%A1mica_y_Control_de_Procesos_Qu%C3%ADmicos_(Woolf)/09%3A_Control_proporcional-integral-derivado_(PID)/9.02%3A_Control_de_P%2CI%2CD%2C_PI%2CPD_y_PID)
- Jin, J., Huang, H., Sun, J., & Pang, Y. (2013). *Study on Fuzzy Self-Adaptive PID Control System of Biomass Boiler Drum Water*. 2013. <https://doi.org/10.4236/jsbs.2013.31013>
- Kuo, T. C., Huang, Y. J., & Hong, B. W. (2009). Adaptive PID with sliding mode control for the rotary inverted pendulum system. *2009 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, 1804-1809. <https://doi.org/10.1109/AIM.2009.5229784>
- Lee, G. H., & Jung, S. (2008). Reference compensation technique of a fuzzy controlled inverted pendulum system for control education. *2008 International Conference on Control, Automation and Systems*, 1704-1708. <https://doi.org/10.1109/ICCAS.2008.4694502>
- Macías, L. G. T. (2020). *Modelado, simulación y control de un péndulo invertido*.
- Martín-Bustamante González-Iglesias, I. (2019). *Diseño de sistema de control de un péndulo invertido accionado mediante volante de inercia*. <https://repositorio.comillas.edu/xmlui/handle/11531/35364>
- Martínez, J. R., & Gonzalez, G. A. P. (2021). *DISEÑO DE UN CONTROLADOR APLICADO A UN PÉNDULO INVERTIDO UTILIZANDO ESTRATEGIAS BASADAS EN APRENDIZAJE DE MÁQUINA*.
- MaterialsDr.Sc, V. M. C. N. A. de M. | U. · D. of M. E. of. (s. f.). Victor CASTAÑO | Professor (Full) | Dr.Sc. | Universidad Nacional Autónoma de México, Mexico City | UNAM | Department of Molecular Engineering of Materials | Research profile. ResearchGate. Recuperado 3 de diciembre de 2023, de <https://www.researchgate.net/profile/Victor-Castano-3>

- Naranjo, E. M. A. (s. f.). *DISEÑO, SIMULACIÓN Y COMPARACIÓN DE ESQUEMAS DE CONTROL ADAPTATIVO APLICADOS A PLANTAS NO LINEALES DE PARÁMETROS VARIABLES Y RETARDO DE TIEMPO DOMINANTE.*
- Paliwal, S. (2017, agosto 12). *Stabilization of Mobile Inverted Pendulum Using Fractional Order PID Controllers.* <https://doi.org/10.1109/ICICCIS.2017.8660816>
- Prasad, L. B., Tyagi, B., & Gupta, H. O. (2011). Optimal control of nonlinear inverted pendulum dynamical system with disturbance input using PID controller & LQR. *2011 IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering*, 540-545. <https://doi.org/10.1109/ICCSCE.2011.6190585>
- Quanser. (2023). *Quanser Qube-Servo 3.* Innovate - Educate. <https://www.quanser.com/products/qube-servo-2/>
- Qube—Servo 3—Quanser.* (s. f.). Recuperado 1 de diciembre de 2023, de <https://www.quanser.com/products/qube-servo-3/>
- Regalo Núñez, C. (2016). *Control y simulación del Péndulo de Furuta.* <https://idus.us.es/handle/11441/45247>
- Rithirun, C., Charean, A., & Sawaengsinkasikit, W. (2021). Comparison Between PID Control and Fuzzy PID Control on Invert Pendulum System. *2021 9th International Electrical Engineering Congress (iEECON)*, 337-340. <https://doi.org/10.1109/iEECON51072.2021.9440344>
- Rocchi.* (s. f.). Recuperado 1 de diciembre de 2023, de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/112115/Rocchi%20-%20DISE%c3%91O%2c%20IMPLEMENTACI%c3%93N%20Y%20CONTROL%20DEL%20PENDULO%20INVERTIDO%20CON%20VOLANTE%20DE%20INERCIA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Sierra-García, J. E., & Santos, M. (2021). Redes neuronales y aprendizaje por refuerzo en el control de turbinas eólicas. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 18(4), Article 4. <https://doi.org/10.4995/riai.2021.16111>
- Techtalks. (2019, octubre 22). Qué son las redes neuronales y sus funciones. *ATRIA Innovation*. <https://www.atriainnovation.com/que-son-las-redes-neuronales-y-sus-funciones/>
- Tibaduiza, D. A., Amaya, I., Rodríguez, S., Mejia, 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>
- Viguria Jiménez, L. A., Cano González, R., Fiacchini, M., Prieto, A., Vela, B. J., Rodríguez Rubio, F., Aracil Santonja, J., & Canudas de Wit, C. (2004). *PPCar (Personal Pendulum Car): Vehículo basado en péndulo invertido*. <https://idus.us.es/handle/11441/105445>
- Wang, C., Liu, X., Shi, H., Xin, R., & Xu, X. (2018). *Design and implementation of fractional PID controller for rotary inverted pendulum*. 6730-6735. <https://doi.org/10.1109/CCDC.2018.8408317>
- Wang, C., Yin, G., Liu, C., & Fu, W. (2016). Design and simulation of inverted pendulum system based on the fractional PID controller. *2016 IEEE 11th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, 1760-1764. <https://doi.org/10.1109/ICIEA.2016.7603871>
- Xu, Z., Zhu, B., Wang, B., & Luo, Z. (2023). RBF Neural Network Control Based on Inverted Pendulum Model. *2023 5th International Conference on Intelligent Control, Measurement and Signal Processing (ICMSP)*, 328-331. <https://doi.org/10.1109/ICMSP58539.2023.10171086>

Zou, J., Han, Y., & So, S.-S. (2009). Overview of Artificial Neural Networks. En D. J. Livingstone (Ed.), *Artificial Neural Networks: Methods and Applications* (pp. 14-22). Humana Press.  
[https://doi.org/10.1007/978-1-60327-101-1\\_2](https://doi.org/10.1007/978-1-60327-101-1_2)

**Anéxos**