



Levitador magnético para evaluar algoritmos clásicos y modernos, mediante dispositivos de bajo costo

Aldana Tapia, Jair Alexander y Tipantuña Lovato, María Daniela

Departamento de Eléctrica Y Electrónica

Carrera de Ingeniería en Electrónica e Instrumentación

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero en Electrónica e Instrumentación

Ing. Pilatasig Panchi, Marco Antonio

Latacunga, 18 de agosto del 2021



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA E INSTRUMENTACIÓN

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, **“Levitador magnético para evaluar algoritmos clásicos y modernos, mediante dispositivos de bajo costo.”**, fue realizado por el señor **Aldana Tapia, Jair Alexander** y señorita **Tipantuña Lovato, María Daniela**, el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido, por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Latacunga, 18 de agosto del 2021



Ing. Pilatasig Panchi, Marco Antonio

C.C.: 0502375876

REPORTE DEL URKUND



Document Information

Analyzed document	Levitador magnético_Aldana_Tipantuña.pdf (D111430794)
Submitted	8/18/2021 5:55:00 PM
Submitted by	Pilatasig Panchi Marco Antonio
Submitter email	mapilatagsig@espe.edu.ec
Similarity	5%
Analysis address	mapilatagsig.espe@analysis.orkund.com

Sources included in the report

W	URL: https://www.ecured.cu/Sensor_hall Fetched: 8/18/2021 5:56:00 PM		1
W	URL: https://core.ac.uk/download/pdf/301208069.pdf Fetched: 7/21/2020 7:18:17 AM		1
W	URL: https://hetpro-store.com/TUTORIALES/i2c/ Fetched: 8/18/2021 5:56:00 PM		1
SA	Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE / TesisPadillaPalomo.docx Document TesisPadillaPalomo.docx (D98664670) Submitted by: jfacosta@espe.edu.ec Receiver: jfacosta.espe@analysis.orkund.com		4
W	URL: https://controlautomaticoeducacion.com/control-realimentado/metodo-de-la-integral-del-error-sintonia-controlador-pid/ Fetched: 8/18/2021 5:56:00 PM		3
W	URL: http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/7714/1/CastroSolanoErwinFabian_2017.pdf Fetched: 11/26/2020 7:02:44 AM		1
W	URL: https://arduino.cl/arduino-nano/ Fetched: 8/18/2021 5:56:00 PM		2
SA	Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE / Proyecto de titulación Liliana Cayo y Andrés Pilicita.pdf Document Proyecto de titulación Liliana Cayo y Andrés Pilicita.pdf (D97660950) Submitted by: epruna@espe.edu.ec Receiver: epruna.espe@analysis.orkund.com		1
SA	Puerchambud Valencia Proyecto Calculo.docx Document Puerchambud Valencia Proyecto Calculo.docx (D63454179)		1
W	URL: https://doi.org/10.1109/SIBCON.2016.7491828 Fetched: 8/18/2021 5:56:00 PM		1



Firmado digitalmente por
MARCO ANTONIO
PILATASIG
PANCHI

Ing. Pilatasig Panchi, Marco Antonio

C.C.: 0502375876



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA E INSTRUMENTACIÓN
RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Nosotros, *Aldana Tapia, Jair Alexander* con célula de identidad N° 0503218133 y *Tipantuña Lovato, María Daniela* con cédula de identidad N° 0550013031, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación **“Levitador magnético para evaluar algoritmos clásicos y modernos, mediante dispositivos de bajo costo.”**, 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, 18 de agosto del 2021

Aldana Tapia, Jair Alexander

C.C.: 0503218133

Tipantuña Lovato, María Daniela

C.C.: 0550013031



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA E INSTRUMENTACIÓN

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Nosotros, **Aldana Tapia, Jair Alexander** con cédula de identidad N° 0503218133 y **Tipantuña Lovato, María Daniela**, con cédula de identidad N°0550013031, SI autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación “**Levitador magnético para evaluar algoritmos clásicos y modernos, mediante dispositivos de bajo costo.**” en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi/nuestra responsabilidad.

Latacunga, 18 de agosto del 2021

Aldana Tapia, Jair Alexander

C.C.: 0503218133

Tipantuña Lovato, María Daniela

C.C.: 0550013031

DEDICATORIA

El presente trabajo investigativo lo dedico principalmente a Dios y a la Virgen de Mercedes, por ser mi fuerza e inspiración para continuar en este proceso y lograr una de mis metas más deseadas.

A mis padres, Alex y Tatiana por ser el pilar fundamental de apoyo, amor, sacrificio y trabajo en todos estos años, gracias a ustedes he logrado llegar hasta aquí y me he forjado como la persona que soy, muchos de mis logros se los debo a ustedes.

A mis hermanos, Alexa y Daniel por estar presentes y acompañándome en este camino tan difícil, me han dado la fuerza para seguir adelante y poder culminar mi carrera universitaria, son mi motivación para superarme cada día.

A mis abuelitos, Washington e Isabel quienes con su amor, paciencia y esfuerzo me han permitido llegar a cumplir un sueño más, gracias por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo, disciplina y valentía, de no temer las adversidades y de tener siempre la frente en alto. Papi Washo este logro te lo dedico a tí especialmente.

A mi novia, Fernanda por brindarme su apoyo y estar a mi lado incluso en los momentos más tormentosos ayudándome siempre, tus palabras de aliento me ayudaron a culminar esta meta.

A mis compañeros y amigos Yordan, Marco, Anderson, Daniel, Wilson, Diego, Sebastián, Richard, Kevin, Polo, Paul y Adrián quienes sin esperar nada a cambio compartieron conmigo su conocimiento, alegrías y tristezas durante este tiempo, gracias por estar a mi lado apoyándome y lograr que este sueño se haga realidad.

Jair Alexander Aldana Tapia

DEDICATORIA

Quiero dedicar el presente trabajo de titulación a mi madre Soledad Lovato y a mi padre José Tipantuña por el apoyo incondicional que siempre me han brindado a lo largo de mi carrera universitaria, por estar conmigo siempre en momentos difíciles con el gran amor que ellos me enseñaron y el amor inmenso que yo les tengo, enseñándome buenos valores y respeto ante cualquier situación, por siempre ayudarme para conseguir las herramientas necesarias para realizar mis estudios y seguir adelante por mí misma.

A mi hermana Diana con quien crecí y a quien amo por ayudarme en los momentos difíciles de mi carrera, apoyándome siempre para no rendirme, no solo siendo mi hermana si no mi amiga incondicional en todo momento, quien se desvelaba conmigo y me ayudaba cuando la necesitaba y sé que ella va a estar siempre así conmigo.

A mi familia, mis abuelitos, mis tíos y primos por estar siempre estar ahí, en especial a mi tío Carlos por ser buen amigo, por brindarme sus consejos y apoyarme en momentos difíciles, por ser mi amigo por decirme las cosas que no debo hacer en base a su experiencia y por estar conmigo mientras iba creciendo.

María Daniela Tipantuña Lovato

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis padres, Alex y Tatiana por ser los principales promotores de mis sueños, gracias a ellos por cada día de confiar y creer en mí y en mis expectativas, gracias a mi madre por estar dispuesta a acompañarme en cada larga y agotadora noche de estudio, su compañía era aliento aún con mis enojos; gracias a mi padre por cada consejo y cada palabra que guía mi vida.

Agradezco a mis abuelitos, Washington e Isabel por su comprensión, cariño y apoyo en los buenos y malos momentos. Me han enseñado a encarar las adversidades sin perder nunca la dignidad ni desfallecer en el intento, me han dado todo lo que soy como persona, mis valores, mis principios, mi perseverancia y mi empeño, todo ello con una gran dosis de amor y sin pedir nunca nada a cambio.

Agradezco a la ayuda que me brindaron mis hermanos Alexa y Daniel quienes han sido incondicionales, con quienes disfruto y aprendo cada día, gracias por estar siempre presentes.

Agradezco a mi novia Fernanda quien me apoyo y alentó para continuar, cuando parecía que me iba a rendir.

Agradezco también al Ing. Marco Pilatasig, tutor de tesis, por haberme brindado la oportunidad de recurrir a su capacidad y conocimiento científico, así como también por su paciencia para guiarme durante este proceso.

Cada momento que he vivido durante todos estos años, son simplemente únicos, por eso quiero agradecer a cada uno de mis amigos Yordan, Marco, Anderson, Daniel, Wilson, Diego, Sebastián, Richard, Kevin, Polo, Paul y Adrián, todos hemos aprendido

continuamente de todos, tanto personal como de aprendizaje y eso es enriquecedor, gracias por su apoyo brindado su ánimos y consejos durante estas últimas semanas.

Jair Alexander Aldana Tapia

AGRADECIMIENTO

Agradezco primero a Dios ante todo por ayudarme a culminar la carrera que sin él no hubiese sido posible afrontando todas las adversidades, y dándome la fuerza para no rendirme.

A la Universidad de la Fuerzas Armadas "ESPE", porque ahí es donde conocí buenos amigos que me ayudaron en todo momento, donde me llevo gratos momentos de anécdotas y buenas enseñanzas, en sus instalaciones es donde me fui formando cada día más que profesional como mejor persona.

Al ingeniero Marco Pilatasig por guiarme y apoyarme en la culminación del trabajo de titulación.

A toda mi familia abuelitos, tíos y primos que formaron parte de mi proceso a lo largo de mi carrera y mi vida personal por todas las experiencias vividas con ellos, que siempre fueron un apoyo en todo momento.

Finalmente, a todos mis amigos por su apoyo y acompañarme a lo largo de mi carrera universitaria a mi amigo Andrés y en especial a mi amigo Danny Martínez que lo quiero es el hermano que nunca tuve, por estar siempre en los momentos buenos y malos siempre apoyándome, que a pesar de que teníamos a veces diferencias siempre estaba ahí para apoyarme y motivarme y espero que nuestra amistad siga siempre.

María Daniela Tipantuña Lovato

Tabla de Contenidos

Carátula.....	1
Certificación	2
Reporte del urkund.....	3
Responsabilidad de autoría.....	4
Autorización de publicación	5
Dedicatoria.....	6
Dedicatoria.....	7
Agradecimiento	8
Agradecimiento	10
Tabla de contenidos.....	11
Índice de Figuras.....	15
Índice de Tablas	22
Índice de Ecuaciones	23
Resumen	25
Abstract.....	26
Introducción.....	27
Planteamiento del problema	27
 Antecedentes	27

Justificación e Importancia	28
Objetivos	29
Objetivo General	29
Objetivos Específicos	29
Variables de la investigación	29
Variable Independiente	29
Variable Dependiente	29
Hipótesis	29
Marco Teórico.....	30
Levitación Magnética.....	30
<i>Fuerza magnética</i>	32
Suspensión electrodinámica.....	33
Sensor de posición.....	33
<i>Sensor de efecto Hall</i>	35
Protocolo I2C	35
Modelo Teórico de un Proceso	36
<i>Modelo matemático</i>	38
Control.....	38
<i>Control lineal clásico</i>	38
<i>Métodos de sintonización</i>	42
<i>Control Fuzzy (Lógica difusa)</i>	48
<i>Control Fuzzy PID</i>	50
<i>Control MPC (Control Predictivo no lineal basado en modelo)</i>	51
Tarjetas de Desarrollo	52
<i>Arduino Nano</i>	53

Arduino Mega	53
Raspberry PI	54
Modulo	55
MCP4725	55
Diseño e Implementación	58
Cálculos para el diseño del circuito de potencia	58
Diseño del levitador magnético	65
Funcionamiento de la placa de potencia	68
Construcción del levitador magnético	69
Montaje de la placa de circuito de potencia de levitador magnético	70
Montaje del electroimán	71
Medición de la salida	72
Principio de funcionamiento	74
Análisis del Circuito de Potencia	76
Obtención del modelo matemático	84
Análisis y Resultados Obtenidos	94
Obtención de las constantes del controlador PID con los diferentes métodos de sintonía	94
Simulación del comportamiento del sistema	98
Comportamiento del sistema real	105
Comparación mediante la aplicación de los controladores en el sistema simulado y real	113
Conclusiones y Recomendaciones	122
Conclusiones	122

Recomendaciones	124
Bibliografía	126
Anexos.....	130

Índice de Figuras

Figura 1 <i>Levitación Magnética</i>	31
Figura 2 <i>Efecto Meissner</i>	32
Figura 3 <i>Regla de la palma derecha</i>	33
Figura 4 <i>Comportamiento de polos</i>	34
Figura 5 <i>Sensor de efecto Hall</i>	36
Figura 6 <i>Comunicación I2C</i>	37
Figura 7 <i>Modelo teórico y proceso real</i>	38
Figura 8 <i>Diagrama de control PID</i>	40
Figura 9 <i>Respuesta escalón</i>	43
Figura 10 <i>Curva para sintonía IAE</i>	48
Figura 11 <i>Lógica clásica versus lógica difusa</i>	49
Figura 12 <i>Estructura básica de un controlador Fuzzy</i>	50
Figura 13 <i>Ejemplo de fuzzyficación de una variable</i>	51
Figura 14 <i>Diagrama de bloques del sistema de control difuso</i>	52
Figura 15 <i>Estrategia MPC</i>	53
Figura 16 <i>Tarjeta Arduino Nano</i>	54

Figura 17 Tarjeta Arduino Mega	55
Figura 18 Tarjeta Raspberry.....	56
Figura 19 Modulo MCP4725.....	58
Figura 20 Diagrama de circuito en los ejes X, Y por etapas	59
Figura 21 Diagrama de circuito eje Z.....	64
Figura 22 Cálculos realizados en la etapa 4.....	65
Figura 23 Curva de comportamiento del mosfet.....	66
Figura 24 Diseño PCB de la placa de control de los electroimanes.....	66
Figura 25 Diseño Proteus de la placa de control de los electroimanes.....	67
Figura 26 Diseño 3D de la placa de potencia	68
Figura 27 Circuito Posición altura.....	69
Figura 28 Circuito Posición X.....	69
Figura 29 Circuito Posición Y.....	70
Figura 30 Impresión de la placa de potencia	71
Figura 31 Instalación completa de la placa de control y potencia	71
Figura 32 Impresión de la placa de electroimanes	72
Figura 33 Instalación de sensores Hall.....	72

Figura 34	<i>Instalación de los imanes</i>	73
Figura 35	<i>Medición de voltajes en la posición H1 y H2</i>	73
Figura 36	<i>Imán suspendido</i>	74
Figura 37	<i>Alineación del imán suspendido</i>	74
Figura 38	<i>Ajuste fino de la corriente</i>	75
Figura 39	<i>Principio de funcionamiento mediante suspensión electrodinámica</i>	76
Figura 40	<i>Prueba para identificar los polos dentro del electroimán</i>	76
Figura 41	<i>Conexión y funcionamiento electroimanes Eje X y Eje Y:(1) Conexión,(2) Funcionamiento en Reposo y (3) Funcionamiento en movimiento</i>	77
Figura 42	<i>Funcionamiento en reposo del circuito: (1) Eje X, (2) Eje Y, (3) Eje Z y (4) Funcionamiento Físico</i>	78
Figura 43	<i>Funcionamiento del levitador en X+: (1) Simulación y (2) Funcionamiento Físico</i>	81
Figura 44	<i>Funcionamiento del levitador en X-: (1) Simulación y (2) Funcionamiento Físico</i>	82
Figura 45	<i>Funcionamiento del levitador en Y+: (1) Simulación y (2) Funcionamiento Físico</i>	83
Figura 46	<i>Funcionamiento del levitador en Y-: (1) Simulación y (2) Funcionamiento Físico</i>	84

Figura 47 <i>Abrir el programa</i>	85
Figura 48 <i>Ejecución del programa</i>	86
Figura 49 <i>Ejecución función ident de Matlab</i>	86
Figura 50 <i>Importación de los datos para el movimiento de la planta en el eje X</i> ... 87	
Figura 51 <i>Importar los datos en el dominio del tiempo</i>	87
Figura 52 <i>Datos importados</i>	88
Figura 53 <i>Cálculo del modelo matemático para el movimiento en el eje X</i>	88
Figura 54 <i>Función de transferencia eje X</i>	89
Figura 55 <i>Modelo matemático obtenido para el movimiento en el eje X</i>	89
Figura 56 <i>Parámetros del modelo matemático para el movimiento en el eje X</i>	90
Figura 57 <i>Porcentaje de efectividad del modelo en el eje x</i>	90
Figura 58 <i>Importación de los datos para el movimiento en el eje Y</i>	91
Figura 59 <i>Importar datos en el dominio del tiempo</i>	91
Figura 60 <i>Datos importados</i>	92
Figura 61 <i>Cálculo del modelo matemático</i>	92
Figura 62 <i>Modelo matemático del sistema del movimiento en el eje Y</i>	93
Figura 63 <i>Parámetros del matemático del sistema del movimiento en el eje Y</i>	93

Figura 64	<i>Porcentaje de efectividad del modelo en el eje y.....</i>	94
Figura 65	<i>Valores de las constantes obtenidas con el método de sintonía Ziegler & Nichols para el eje x.....</i>	95
Figura 66	<i>Valores de las constantes obtenidas con el método de sintonía Lambda agresivo para el eje x.....</i>	96
Figura 67	<i>Valores de las constantes obtenidas con el método de sintonía Cohen Coon para el eje x.....</i>	96
Figura 68	<i>Valores de las constantes obtenidas con el método de sintonía IAE para el eje x.....</i>	97
Figura 69	<i>Valores de las constantes obtenidas con el método de sintonía Ziegler & Nichols para el eje y.....</i>	97
Figura 70	<i>Valores de las constantes obtenidas con el método de sintonía Lambda agresivo para el eje y.....</i>	98
Figura 71	<i>Valores de las constantes obtenidas con el método de sintonía Cohen Coon para el eje y.....</i>	98
Figura 72	<i>Valores de las constantes obtenidas con el método de sintonía IAE para el eje y.....</i>	99
Figura 73	<i>Curva de respuesta del sistema con el control PID.....</i>	99
Figura 74	<i>Curva de respuesta del sistema con el control Fuzzy.....</i>	100
Figura 75	<i>Curva de respuesta del sistema con el control Fuzzy PID.....</i>	100

Figura 76 <i>Curva de respuesta del sistema con el control MPC</i>	101
Figura 77 <i>Curva de respuesta del sistema comparando los diferentes controladores</i>	101
Figura 78 <i>Curva de respuesta del controlador PID con el método de sintonía Ziegler & Nichols</i>	102
Figura 79 <i>Curva de respuesta del controlador PID con el método de sintonía Lambda agresivo</i>	103
Figura 80 <i>Curva de respuesta del controlador PID con el método de sintonía Cohen Coon</i>	104
Figura 81 <i>Curva de respuesta del controlador PID con el método de sintonía IAE</i>	105
Figura 82 <i>Curva de respuesta del sistema frente a perturbaciones con el controlador PID con sintonía Ziegler & Nichols</i>	106
Figura 83 <i>Curva de respuesta del sistema frente a perturbaciones con el controlador PID con sintonía Lambda agresivo</i>	107
Figura 84 <i>Curva de respuesta del sistema frente a perturbaciones con el controlador PID con sintonía Cohen Coon</i>	108
Figura 85 <i>Curva de respuesta del sistema frente a perturbaciones con el controlador PID con sintonía IAE</i>	109
Figura 86 <i>Curva de respuesta del sistema frente a perturbaciones con el controlador Fuzzy</i>	110

Figura 87 <i>Curva de respuesta del sistema frente a perturbaciones con el controlador Fuzzy PID</i>	111
Figura 88 <i>Diagrama de lógica Fuzzy</i>	113
Figura 89 <i>Curva de respuesta del sistema simulado vs real, frente a perturbaciones con el controlador PID mediante sintonía Ziegler & Nichols</i>	114
Figura 90 <i>Curva de respuesta del sistema simulado vs real, frente a perturbaciones con el controlador PID mediante sintonía Lambda agresivo</i>	115
Figura 91 <i>Curva de respuesta del sistema simulado vs real, frente a perturbaciones con el controlador PID mediante sintonía Cohen Coon</i>	117
Figura 92 <i>Curva de respuesta del sistema simulado vs real, frente a perturbaciones con el controlador PID mediante sintonía IAE</i>	118
Figura 93 <i>Curva de respuesta del sistema simulado vs real, frente a perturbaciones con el controlador Fuzzy</i>	120
Figura 94 <i>Curva de respuesta del sistema simulado vs real, frente a perturbaciones con el controlador Fuzzy PID</i>	121

Índice de Tablas

Tabla 1. <i>Características de los sensores de posición</i>	35
Tabla 2 <i>Parámetros del controlador método de Ziegler-Nichols</i>	43
Tabla 3 <i>Medición de voltajes en la posición H1 y H2</i>	74
Tabla 4 <i>Reglas para el sistema difuso (Fuzzy)</i>	112
Tabla 5 <i>Comparación sistema simulado vs real sintonía Ziegler & Nichols</i>	115
Tabla 6 <i>Comparación sistema simulado vs real sintonía Lambda agresivo</i>	116
Tabla 7 <i>Comparación sistema simulado vs real sintonía Cohen Coon</i>	118
Tabla 8 <i>Comparación sistema simulado vs real sintonía IAE</i>	119
Tabla 9 <i>Comparación sistema simulado vs real controlador Fuzzy</i>	121
Tabla 10 <i>Comparación sistema simulado vs real controlador Fuzzy PID.</i>	122

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1 <i>Modelo matemático función de transferencia</i>	38
Ecuación 2 <i>Fórmula controlador PID</i>	40
Ecuación 3 <i>Fórmula controlador PID Discreta</i>	42
Ecuación 4 <i>Sintonía Lambda</i>	45
Ecuación 5 <i>Sintonía Haalman</i>	46
Ecuación 6 <i>Sintonía Cohen-Coon</i>	47
Ecuación 7 <i>Sintonía IAE</i>	48
Ecuación 8 <i>Cálculos realizados en la etapa 1</i>	60
Ecuación 9 <i>Cálculos realizados en la etapa 2</i>	60
Ecuación 10 <i>Cálculos realizados en la etapa 3</i>	60
Ecuación 11 <i>Cálculos realizados en la etapa 4</i>	60
Ecuación 12 <i>Cálculos realizados en la etapa 5</i>	61
Ecuación 13 <i>Cálculos realizados en la etapa 6</i>	61
Ecuación 14 <i>Cálculos realizados en la etapa 7</i>	61
Ecuación 15 <i>Cálculos realizados en la etapa 8</i>	61
Ecuación 16 <i>Cálculos realizados en la etapa 9</i>	62

Ecuación 17 <i>Cálculos realizados en la etapa 10</i>	62
Ecuación 18 <i>Cálculos realizados en la etapa 11</i>	62
Ecuación 19 <i>Cálculos realizados en la etapa 12</i>	62
Ecuación 20 <i>Cálculos realizados en la etapa 1</i>	64
Ecuación 21 <i>Cálculos realizados en la etapa 2</i>	64
Ecuación 22 <i>Cálculos realizados en la etapa 3</i>	65

Resumen

En el presente trabajo de titulación se implementó un sistema levitador magnético para evaluar algoritmos de control clásicos y modernos, mediante dispositivos de bajo costo. Para lograr la levitación del imán se obtendrá el modelamiento matemático del sistema construido, con los datos físicos obtenidos de los tres sensores de efecto Hall 49E para los ejes x, y y z, midiendo la posición del objeto para desarrollar los algoritmos de control clásicos y modernos que envían señales de mando hacia los actuadores, en este caso siendo los cuatro electroimanes, mediante el circuito de control se mantiene la posición del objeto suspendido ante una perturbación. El sistema utiliza una tarjeta de desarrollo Arduino Nano para la adquisición de datos que se obtienen de los sensores, una etapa de potencia que permite alimentar cuatro electroimanes que producen un campo electromagnético, se implementó un algoritmo de control clásico PID con los métodos de sintonía Ziegler & Nichols, Lambda agresivo, Cohen Coon y el IAE y modernos en donde se implementó los controladores como: Fuzzy y Fuzzy PID, para el sistema de levitación magnética, mediante el uso de la plataforma de programación MATLAB se desarrolla los algoritmos de control, se realiza diferentes pruebas en los algoritmos de control implementados.

Palabras clave:

- **SISTEMA LEVITADOR**
- **CONTROL PID**
- **CONTROL FUZZY**
- **CONTROL FUZZY PID**

Abstract

In the present titration work, a magnetic levitation system was implemented to evaluate classic and modern control algorithms, using low-cost devices. To achieve the levitation of the magnet, the mathematical modeling of the built system will be obtained, with the physical data obtained from the three Hall effect sensors 49E for the x, y and z axes, measuring the position of the object to develop the classic and modern control algorithms that They send command signals to the actuators, in this case they are the four electromagnets, through the control circuit the position of the suspended object is maintained in the event of a disturbance. The system uses an Arduino Nano development board for the acquisition of data obtained from the sensors, a power stage that allows feeding four electromagnets that produce an electromagnetic field, a classic PID control algorithm was implemented with Ziegler tuning methods & Nichols, Aggressive Lambda, Cohen Coon and IAE and modern where controllers such as: Fuzzy and Fuzzy PID were implemented, for the magnetic levitation system, through the use of the MATLAB programming platform, the control algorithms are developed, performs different tests on the implemented control algorithms.

Keywords:

- **LEVITATING SYSTEM**
- **PID CONTROL**
- **FUZZY CONTROL**
- **FUZZY PID CONTROL**

Capítulo I

1. Introducción

1.1. Planteamiento del problema

La levitación magnética está en pleno crecimiento que abarca diferentes campos de la ingeniería, ya que tiene diversas aplicaciones industriales. (Perren, 2003)

En la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE” Sede Latacunga, específicamente en la Carrera de Electrónica e Instrumentación no se desarrollan prácticas de laboratorio en el área de sistemas de control, debido a la falta de sistemas didácticos en los laboratorios, al tener un elevado costo no pueden ser adquiridos por los estudiantes, por lo cual no se desarrolla su conocimiento práctico perjudicando el proceso de enseñanza y aprendizaje.

1.2. Antecedentes

El uso de la levitación magnética se ha desarrollado con mucho más enfoque con los trenes de levitación magnética, que permite un medio de transporte más rápido y menos ruidoso, este medio de transporte está llamado a jugar un papel importante en el transporte urbano. El término ‘maglev’ procede de abreviar la expresión ‘magnetic levitation’ y se refiere a un transporte que no tiene contacto con ninguna superficie, porque se apoya en un campo de gravitación magnética, que también sirve para impulsar un vehículo. (Bejarano, 2013)

Los sistemas de levitación magnética en los últimos años se han utilizado para pruebas en diferentes tipos de control (Lei, 2008), (Golob, 2003), (Qin,

2014), (Bächle, 2013) y (Beltran, 2015). Además, se ha dado un gran desarrollo en aplicaciones que tienen, tales como: cojinetes magnéticos (Chen, 2010) y (Du, 2010); sistemas de trenes de levitación magnética (Hasirci, 2011); aislamiento de vibraciones (Tsuda, 2009); microrobots magnéticos (Kummer, 2010); máquinas eléctricas (Arredondo, 2008); sistema de transportación magnética (Wai, 2011); sistemas de posicionamiento nanométrico (Kim, 2007), entre otras (Peijnenburg, 2006), (Kimman, 2010), (Lee, 2006).

Actualmente existen en el mercado sistemas de levitación magnética con fines educativos, pero de un costo alto debido a la dificultad del diseño, el objetivo de uso de este sistema es por sus características de inestabilidad y no linealidad por lo que es útil en pruebas de control avanzado.

1.3. Justificación e Importancia

El estudio del fenómeno de levitación magnética toma importancia única por su uso creciente en aplicaciones de la vida cotidiana, como en el área del tráfico. (Ollervides, Santibáñez, Llama, & Dzul, 2013)

El sistema de levitación magnética al ser un campo emergente, en el ámbito industrial las plantas que existen en el mercado tienen un costo elevado, por lo cual su adquisición es complicada para los estudiantes. Este proyecto se desarrollará para proporcionar a la Carrera de Electrónica e Instrumentación un modelo didáctico que puede ser utilizado por los estudiantes, para realizar prácticas de control clásico y moderno. Al igual que el costo de implementación de la planta no será elevado, ya que será construida con una tarjeta de desarrollo de bajo costo. Además, se complementará los conocimientos prácticos que son muy importantes en la formación de Carreras técnicas.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Implementar un levitador magnético para evaluar algoritmos de control clásicos y modernos, mediante dispositivos de bajo costo.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Investigar acerca de las características y principios de funcionamiento de los campos magnéticos generados por los electroimanes para una correcta levitación.
- Investigar sobre algoritmos de control clásicos y modernos.
- Diseñar e implementar un prototipo de un sistema de levitación magnética.
- Obtener el modelo matemático del sistema de levitación magnética.
- Desarrollar algoritmos de control para evaluar el comportamiento de la planta.
- Analizar los resultados obtenidos al aplicar los algoritmos de control.

1.5. Variables de la investigación

1.5.1. Variable Independiente

Levitador magnético

1.5.2. Variable Dependiente

Evaluación de algoritmos de control

1.6. Hipótesis

La implementación del levitador magnético permitirá evaluar algoritmos de control clásico y modernos mediante dispositivos de bajo costo.

Capítulo II

2. Marco Teórico

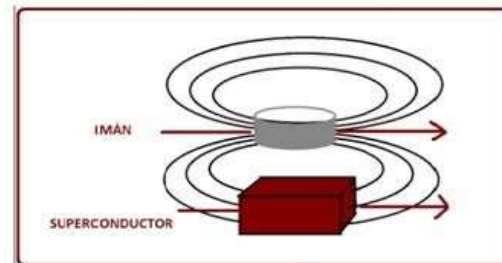
2.1. Levitación Magnética

La levitación magnética se denomina al efecto que se da cuando un material generalmente ferromagnético puede levitar, entre polos iguales de dos imanes existe la repulsión que se conoce como el efecto Meissner, mientras que entre polos diferentes existe atracción. (Perren, 2003)

La superconductividad es la característica de algunos materiales, los cuales que, por debajo de una cierta temperatura, crean una resistencia completamente nula que no se opone al paso de la corriente eléctrica. En esta condición de temperatura son capaces de transportar energía sin ninguna pérdida por lo cual posee la propiedad de rechazar las líneas de un campo magnético que se aplicara. El efecto Meissner se denomina a la acción que producen los superconductores para tener la capacidad de rechazar un campo magnético que intente ingresar, por lo tanto, si acercamos un imán se genera una fuerza de repulsión que contrarresta el peso del imán y que permite el efecto de levitación magnética. (Sánchez, 2012)

Figura 1

Levitación magnética



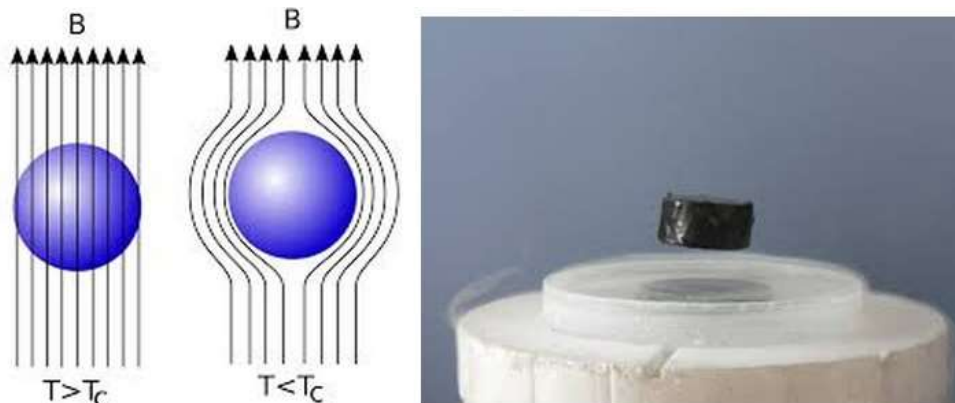
Nota. En la imagen se muestra cómo se comporta el campo magnético en presencia de un superconductor y un imán. Tomado de: (Magnetismo, 2012)

Existen materiales ferromagnéticos, como el hierro que atraen el campo magnético, al igual que los materiales diamagnéticos que se comportan de manera diferente repeliendo el campo por completo. En resumen, todos los materiales en el fondo responden al campo magnético de una forma u otra ya sea repeliéndose o atrayéndose con más o menor intensidad. Por la reacción que producen los materiales estos son aprovechados para crear la levitación magnética que permite hacer flotar las cosas. (Ciencia Canaria, 2015)

La levitación magnética es conocida como Maglev debido a su significado en inglés, es un fenómeno, el cual se trata de un procedimiento que tiene como característica mantener un objeto a flote por la acción del campo magnético. Esto quiere decir que la presión magnética se opone a la gravedad, en cualquier caso, un objeto puede ser levitado siempre y cuando exista la suficiente fuerza de campo magnético. (Lundberg, Lilienkamp, & Marsden, 2004)

Figura 2

Efecto Meissner.



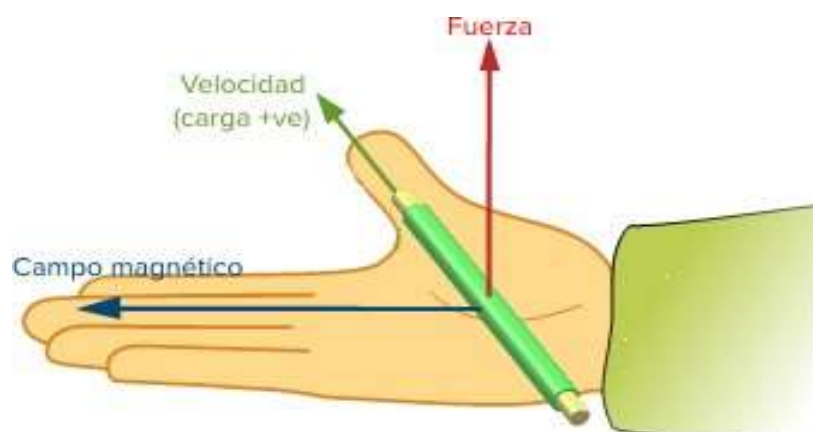
Nota. En la imagen se muestra cómo se comporta el campo magnético según el efecto Meissner. Tomado de: (Magnetismo, 2012)

2.1.1. Fuerza magnética

La fuerza magnética proviene de la fuerza electromagnética, la cual es una de las fuerzas que existen y se da por el movimiento de las cargas, dos materiales con carga que se mueven en la misma dirección poseen una fuerza de atracción magnética, mientras que los materiales con carga que se mueven en diferente dirección poseen una fuerza de repulsión. (Khan Academy, 2021)

Figura 3

Regla de la palma derecha



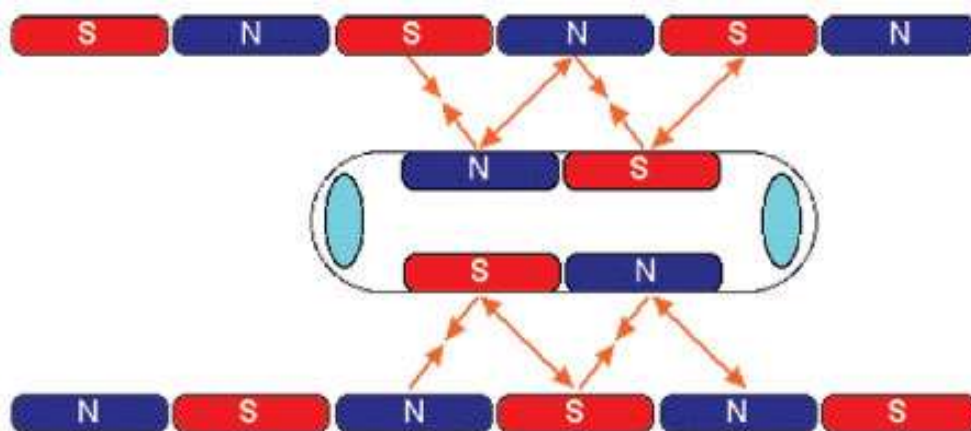
Nota. En la imagen se muestra la regla de la palma derecha para la fuerza debida al movimiento de una carga positiva en un campo magnético. Tomado de: (Khan Academy, 2017)

2.2. Suspensión electrodinámica

La suspensión electrodinámica EDS rechaza el campo magnético que intente penetrar en función de las características de ciertos materiales. Este atributo se da en superconductores y es llamada Efecto Meissner. Por tanto, la está compuesta por superconductores y rechazará las líneas magnéticas de fuerza para que no atraviesen internamente, esto hará que el imán se suspenda. (Perren, 2003)

Figura 4

Comportamiento de polos



Nota. En la imagen se muestra cómo se comportarán los polos creando una nueva sucesión de polos norte y sur en presencia del campo magnético que empujarán al imán. Tomado de: (Doe John, 2009).

2.3. Sensor de posición

Los sensores de posición permiten determinar la posición lineal o angular de un objeto y la convierte en una señal estándar que puede ser enviada a un controlador, donde se hará el proceso de lectura de datos para posteriormente ser enviada a un actuador dependiendo del proceso que se quiera realizar, la

posición es la segunda magnitud física más medida en la industria después de la temperatura de ahí deriva los diferentes tipos de sensores que existen dependiendo de la aplicabilidad, las condiciones de trabajo y ambientales que posea el proceso en la que se va aplicar. (Direct Industry, 2021)

Tabla 1

Características de los sensores de posición

TIPO DE SENSOR	SIN CONTACTO	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Potenciométricos		Alta precisión Precio reducido	Desgaste Sensibles al polvo Sensibles a temperaturas altas
LVDT o RVDT		Alta precisión Robustez Poco alterables en entornos hostiles	Alto precio Pesados
Ópticos		Alta precisión Alta resolución	Frágiles Sensibles al polvo Sensibles a temperaturas altas
Magnéticos Efecto Hall	X	Robustez Poco alterables frente a los líquidos	Sensibles a los golpes Sensible a interferencias magnéticas y cables eléctricos Histéresis
Magnetostrictivos	X	Robustez Alta precisión en longitudes largas	Sensible a los cambios de temperatura Precisión baja en longitudes cortas Costo elevado

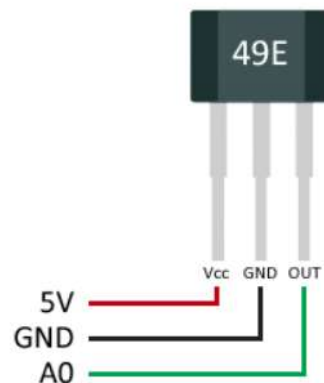
Nota. En la tabla se muestra las características de los tipos de sensor de posición que existe en el mercado. Tomado de: (Direct Industry, 2021)

2.3.1. Sensor de efecto Hall

El sensor es un dispositivo que se basa en el efecto Hall que permite detectar o medir los campos magnéticos, corrientes y la posición en diferentes dispositivos sin necesidad de estar en contacto directamente con el material. Al pasar la corriente por el sensor Hall y aproximarse un campo magnético que fluye en dirección vertical al sensor, entonces el sensor crea un voltaje saliente proporcional al producto de la fuerza del campo magnético y de la corriente. (EcuRed, 2012)

Figura 5

Sensor de efecto Hall



Nota. En la imagen se muestra el sensor de efecto Hall con sus respectivos pines. Tomado de: (Llamas, 2021)

2.4. Protocolo I2C

I2C es un puerto y protocolo de comunicación en serie, que define un marco de datos y una conexión física para transferir bits entre 2 dispositivos digitales. Este puerto incluye dos cables de comunicación, SDA y SCL. Además, el protocolo permite el uso de estas dos líneas para conectar hasta 127 dispositivos esclavos a velocidades de hasta 100, 400 y 1000 kbits/s.

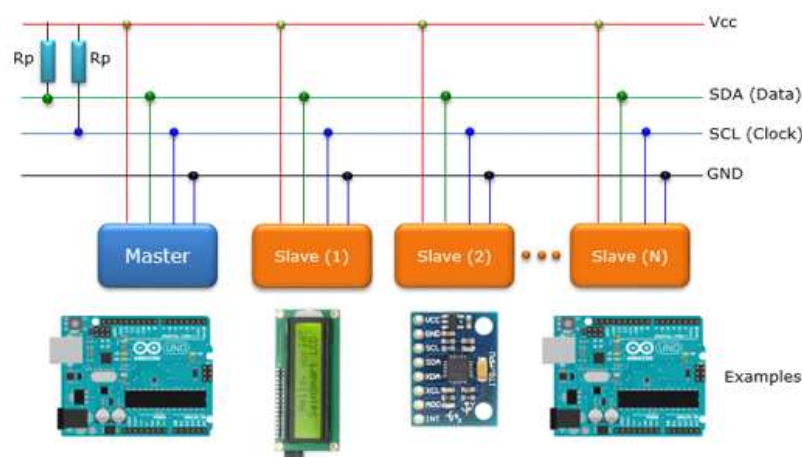
El protocolo I2C es uno de los más utilizados para comunicarse con sensores digitales, ya que a diferencia de los puertos serie, su arquitectura permite confirmar los datos recibidos en la misma trama.

Conectar tantos dispositivos al mismo bus es una de las principales ventajas. Además, si comparamos I2C con otro protocolo serie (como TTL), su trama de comunicación contiene más bits, lo que permite enviar mensajes más completos y detallados.

Además del byte de información, los mensajes enviados a través del puerto I2C también incluyen las direcciones de registros y sensores. Para la información enviada, el dispositivo siempre confirmara la recepción. Por tanto, lo mejor es distinguir los diferentes elementos que intervienen en este tipo de comunicación. (HETPRO, 2021)

Figura 6

Comunicación I2C



Nota. En la imagen se muestra la conexión I2C con Arduino. Tomado de: (HETPRO, 2021)

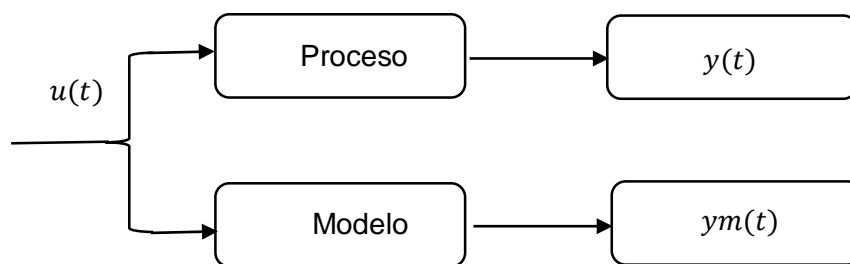
2.5. Modelo Teórico de un Proceso

Como primer paso para realizar el control, es la obtención del modelo

matemático el cual debe tratar de aproximarse al comportamiento de la planta y reproducir fielmente la respuesta ante una misma entrada $u(t)$, suponiendo las mismas condiciones iniciales, obteniendo $y(t) \approx ym(t)$.

Figura 7

Modelo teórico y proceso real



Nota. En la imagen se muestra un diagrama teórico del proceso. Tomado de: (García, 2015)

Los modelos se generan por dos métodos principalmente:

- Modelado: Conociendo los valores de los parámetros de un sistema, así como las leyes físicas mediante las cuales se rige.
- Identificación experimental: Se somete el sistema a varias pruebas y a partir de los resultados se construye un modelo matemático. Se utiliza este método en procesos complejos o de los cuales se desconocen partes. (García,2015)

$$G(s) = \frac{K_p}{(1 + \tau s)} e^{-\theta s} = \frac{\Delta Y(s)}{\Delta U(s)}$$

Ecuación 1

Modelo matemático función de transferencia.

Nota: Tomada de (García, 2015)

Las constantes que se definen son:

K_p : Es la constante de proporcionalidad del proceso y es adimensional.

τ : Es la constante de tiempo.

θ : Es el retardo.

2.5.1. Modelo matemático

El modelo matemático toma diferentes formas según el sistema y cómo se comporta. Se debe considerar que, para obtener un mejor procesamiento, el modelo matemático debe ser lo más simple posible, y se debe considerar una mayor complejidad a la hora de obtener sistemas variables en el tiempo y no lineales. Los modelos matemáticos utilizan diferentes métodos de análisis. (Perez, Hidalgo , & Berenguer, 2008)

2.6. Control

Tomando como referencia los trenes Maglev son equipos esencialmente no lineales e inestables, esta inestabilidad hace necesario el uso de un controlador para estabilizar la planta. Al controlar un proceso o una planta existen diferentes tipos de configuraciones. (Milena, 2010)

2.6.1. Control lineal clásico

a. Controlador PID

El controlador PID se considera uno de los lazos de control tradicionales más importantes utilizados en la mayoría de las aplicaciones industriales debido a su estructura simple y las ventajas que posee con respecto a la respuesta transitoria y el error en estado estacionario. Este controlador necesita ajustar sus parámetros de acuerdo con la aplicación que se realice, y se vuelve

constante durante todo el proceso de control, lo que hace que estos controladores no puedan controlar cuando ocurre las perturbaciones en el sistema. (Ibrahim & Al Akkad, 2016)

Los controladores PID se utilizan más en aplicaciones prácticas, principalmente porque son fáciles de ajustar los parámetros.

El primero es sencillo, incluida la adición de un controlador PI en serie con el PD para obtener un controlador PI-PD. La segunda es encontrar la función de transferencia del servo $M(s)$ considerando que el controlador utilizado es un PID.

$$C_{PID} = K_p + K_D \cdot s + \frac{K_1}{s}$$

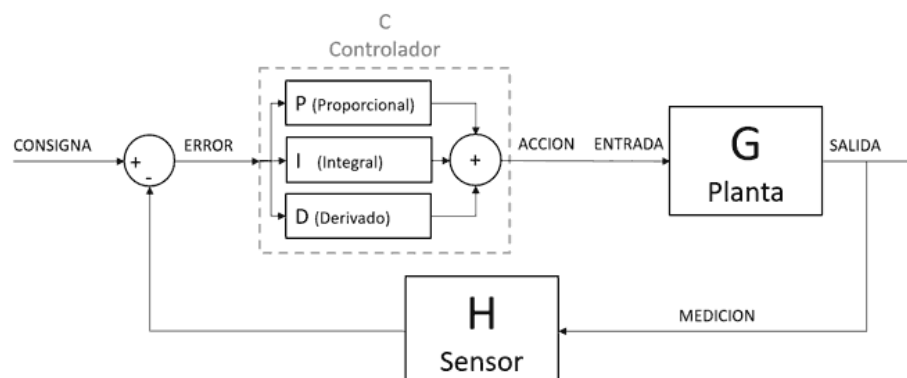
Ecuación 2

Fórmula controlador PID.

Nota: Tomada de (Milena, 2010)

Figura 8

Diagrama de control PID



Nota. En la imagen se muestra el diagrama de un proceso con un controlador PID. Tomado de: (Milena, 2010)

Cada componente tiene los parámetros K_p , K_i y K_d , respectivamente. Estos parámetros indican su peso o “la fuerza al resultado final. La respuesta del PID es buena, el motivo del fallo radica en el correcto ajuste de estos tres parámetros.

Lógicamente, la dificultad con el PID (que no está mal) es ajustar los parámetros K , K_i y K_d , para que el comportamiento sea bueno. (Llamas, 2019)

Aproximación discreta PID

Ecuación del controlador PID

$$u(t) = k_c e(t) + \frac{k_c}{T_i} \int_0^t e(t) dt + k_c T_d \frac{de(t)}{dt}$$

Aproximación trapezoidal

$$u(k) = k_c [e(k) + \frac{T_s}{2T_i} \sum_{h=0}^k [e(h) + e(h-1)] + \frac{T_d}{T_s} [e(k) - e(k-1)]]$$

Salida del controlador en el tiempo $k - 1$

$$u(k-1) = k_c [e(k-1) + \frac{T_s}{2T_i} \sum_{h=0}^k [e(h-1) + e(h-2)] + \frac{T_d}{T_s} [e(k-1) - e(k-2)]]$$

$$u(k) - u(k-1) =$$

$$\begin{aligned}
& k_c [e(k) - e(k-1)] \\
& + \frac{T_s}{2T_i} \sum_{h=0}^k [e(h) - e(h-1) - e(h-2)] \\
& + \frac{T_d}{T_s} [e(k) - 2e(k-1) - e(k-2)] \\
& u(k) - u(k-1) =
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& k_c [e(k) - e(k-1)] \\
& + \frac{T_s}{2T_i} \sum_{h=0}^k [e(k) - e(k-1)] + \frac{T_d}{T_s} [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \\
& u(k) - u(k-1) =
\end{aligned}$$

$$k_c \left[\left(1 + \frac{T_s}{2T_i} + \frac{T_d}{T_s} \right) e(k) - \left(1 - \frac{T_s}{2T_i} + \frac{2T_d}{T_s} \right) e(k-1) + \frac{T_d}{T_s} e(k-2) \right]$$

La ecuación del PID se podría escribir de la siguiente forma

$$u(k) = u(k-1) + q_0 e(k) + q_1 e(k-1) + q_2 e(k-2)$$

Donde se sabe que:

$$\begin{aligned}
q_0 &= k_c \left(1 + \frac{T_s}{2T_i} + \frac{T_d}{T_s} \right) \\
q_2 &= \frac{k_c T_d}{T_s}
\end{aligned}$$

Se obtiene la ecuación del controlador PID discreto en función de la transformada z

$$C(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = \frac{q_0 + q_1 z^{-1} + q_2 z^{-2}}{1 - z^{-1}}$$

Ecuación 3

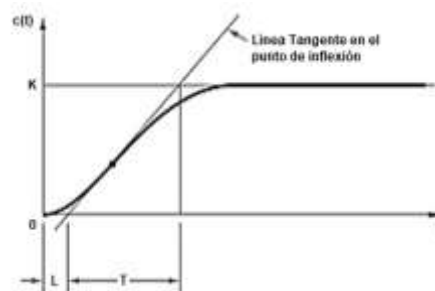
Fórmula controlador PID Discreta.

2.6.2. Métodos de sintonización**a. Ziegler-Nichols**

El método de Ziegler y Nichols trata de obtener la información del proceso en la forma de la respuesta a un escalón en lazo abierto. Este método es tradicional que se basa en el modelado y el control donde se utiliza un modelo muy simple del proceso. La respuesta a un escalón tiene como característica que posee dos parámetros como a y L . Primero, se determina el punto donde la pendiente de la respuesta a un escalón tiene su máximo punto y se dibuja la tangente en este punto. Las intersecciones entre la tangente y los ejes de coordenadas nos permiten hallar parámetros a y L . Ziegler y Nichols entregan directamente los parámetros del PID como funciones de a y L . En la Tabla se muestran los valores (Mcs. Ing. Alfonso Muñoz, s.f.).

Figura 9

Respuesta escalón



Nota. En la imagen se muestra el proceso para hallar los valores de los parámetros. Tomado de: (Mcs. Ing. Alfonso Muñoz, s.f.)

Tabla 2

Parámetros del controlador método de Ziegler-Nichols

TIPO DE CONTROLADOR	Kp	Ti	Td
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0.9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

Nota. En la tabla se muestra los parámetros a calcular. Tomado de: (Mcs. Ing. Alfonso Muñoz, s.f.)

b. Sintonía Lambda

En la sintonía lambda ocurre un caso especial de asignación de polos que se utiliza en el ámbito de la industria de procesos. El proceso se modela por el modelo FOTD (Mcs. Ing. Alfonso Muñoz, s.f.).

$$P(s) = \frac{K_p}{1 + sT} e^{-sL}$$

Para el diseño del PID, se usa la forma interactuante del controlador PID como se muestra:

$$C(s) = K \frac{(1 + sT_i)(1 + sT_d)}{sT_i}$$

Se procede aproximar el tiempo de retardo, del cual se obtiene la función de transferencia:

$$P(s) = \frac{K_p}{1 + sT} e^{-sL} \approx \frac{K_p \left(1 - \frac{sL}{2}\right)}{(1 + sT) \left(1 + \frac{sL}{2}\right)}$$

El tiempo integral se escribe como $T_i = T$ y el tiempo derivativo como $T_d = L/2$. Los ceros del controlador entonces cancelarán los polos del proceso, y la función de transferencia del lazo se hace:

$$G_1(s) = P(s)C(s) \approx \frac{K_p K \left(1 - \frac{sL}{2}\right)}{sT}$$

La ecuación obtenida es la siguiente:

$$s \left(T - K_p K \frac{L}{2} \right) + K_p K = 0$$

Requiriendo que el polo en lazo cerrado sea $s = -1/T_{cl}$.

$$K_p K = \frac{T}{\frac{L}{2} + T_{cl}}$$

$T_{CL} = 3T$ para control robusto, y $T_{CL} = T$ para sintonía agresiva

Parámetros del controlador método de Lambda:

PID:

$$K = \frac{1}{K_p} \frac{\frac{L}{2} + T}{\frac{L}{2} + T_{CL}}$$

$$T_i = T + \frac{L}{2}$$

$$T_d = \frac{TL}{L + 2T}$$

Ecuación 4

Sintonía Lambda.

c. Sintonía Haalman

En los sistemas con retardo de tiempo L, en la sintonía Haalman se recomienda elegir la función de transferencia del lazo.

$$G_1(s) = P(s)C(s) = \frac{2}{3Ls} e^{-sL}$$

El valor correspondiente a 2/3 se halla minimizando el error cuadrático medio para un cambio en escalón en el punto de consigna. Al realizar esto da una sensibilidad $M_s = 1,9$, el cual es un valor razonable. En este caso el tiempo de retardo del influye en la función de transferencia. Todos los otros polos y ceros del proceso se anulan, lo que puede conducir a dificultades. (Mcs. Ing.

Alfonso Muñoz, s.f.)

Aplicando el método de Haalman a un proceso con la función de transferencia se tiene.

$$P(s) = \frac{K_p}{1 + sT e^{-sL}}$$

$$C(s) = \frac{2(1 + sT)}{3K_p L s} = \frac{2T}{3K_p L} \left(1 + \frac{1}{sT}\right)$$

Ecuación 5

Sintonía Haalman.

El cual corresponde a un controlador PI con $K = \frac{2T}{3K_p L}$ y $T_i = T$. Estos parámetros se comparan con valores $K = \frac{0,9T}{L}$ y $T_i = 3L$ obtenidos por el método de la respuesta a un escalón de Ziegler-Nichols.

Comparando el método de Haalman con la sintonía lambda se nota que los tiempos integrales son los mismos las ganancias si se selecciona $T_{cl} = L/2$. Como la sintonía lambda se basa en aproximaciones del tiempo de retardo parece es mejor usar el método de Haalman cuando L es grande. (Mcs. Ing. Alfonso Muñoz, s.f.).

Parámetros del controlador método de Haalman:

$$K = \frac{2T}{3K_p L}$$

$$T_i = T$$

$$T_d = 0$$

d. Sintonía Cohen-Coon

A este método se le conoce como método de ajuste de lazo abierto. En este método se aplica un escalón directamente a la planta sin considerar el controlador. La respuesta obtenida al aplicar el estímulo escalón se convierte en la fuente de información para completar los parámetros que poseerá el controlador (Mcs. Ing. Alfonso Muñoz, s.f.).

Parámetros del controlador método de Cohen-Coon

$$K = \frac{T}{K_p L} \left(\frac{4}{3} + \frac{L}{4T} \right)$$

$$T_i = \frac{L(32T + 6L)}{13T + 8L}$$

$$T_d = \frac{4LT}{11T + 2L}$$

Ecuación 6

Sintonía Cohen-Coon.

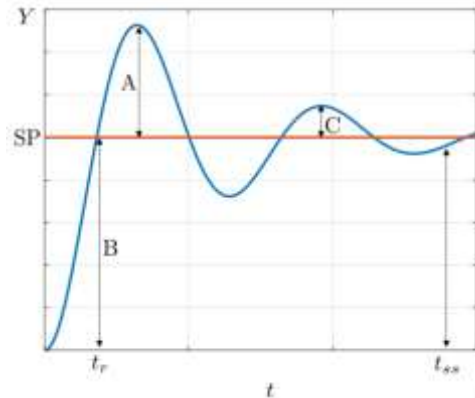
e. Sintonía IAE

En el método de la integral del error se recomienda utilizar los criterios de rendimiento de la integral del error dentro de un periodo de tiempo necesario para eliminar el error en el régimen permanente.

La ventaja de este método de sintonía es que considera la curva completa del sistema en lugar de considerar la relación de caída de $\frac{1}{4} \left(\frac{C}{A} \right)$ de los métodos de sintonía Ziegler & Nichols y Cohen Coon. (Castaño Giraldo S. A., 2021)

Figura 10

Curva para sintonía IAE



Nota. En imagen se muestra la curva que se toma para los cálculos de los parámetros de sintonía IAE. Tomado de: (Giraldo, 2021)

En la vida real se usa el criterio IAE como se muestra

$$IAE = \int_0^T |e(t)| dt$$

Este método de sintonía utiliza la ecuación del controlador PID paralelo clásico como se muestra

$$C(s) = k_c \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

El método también asume que la dinámica tiene un comportamiento en forma de S que puede ser representada por una función de transferencia de primer orde con retardo.

$$Gp = \frac{K e^{-\theta s}}{\tau s + 1}$$

Ecuación 7

Sintonía IAE.

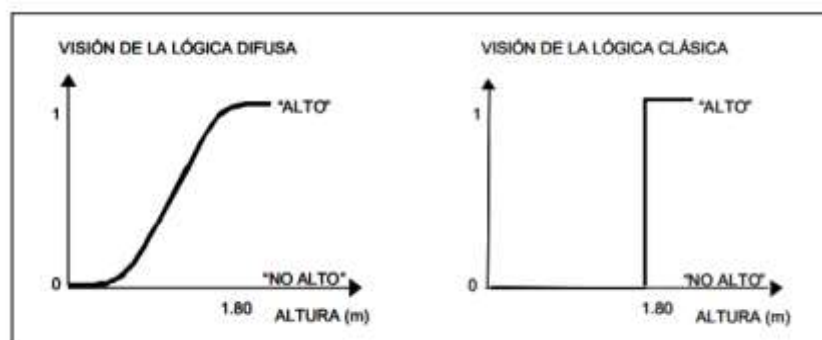
2.6.3. Control Fuzzy (Lógica difusa)

La lógica difusa o borrosa actualmente tiene mucha aceptación, la cual usa expresiones que no son ciertas ni falsas en su totalidad, es decir se refiere a conceptos que pueden tomar cualquier valor dentro de un grupo de valores que oscilan entre la verdad absoluta y la falsedad total en sus extremos, lo difuso no trata de la lógica sino del objeto que estudia. La lógica difusa ayuda a resolver información imprecisa.

Se puede decir que los conjuntos difusos toman en cuenta si un elemento pertenece de forma parcial a un conjunto, por eso cada elemento muestra un grado de pertenencia a este conjunto, el cual toma cualquier valor comprendido entre 0 y 1 que al contrario del control clásico que muestra si un elemento pertenece o no a un conjunto como se muestra en la imagen. (Zadeh, s.f.)

Figura 11

Lógica clásica versus lógica difusa



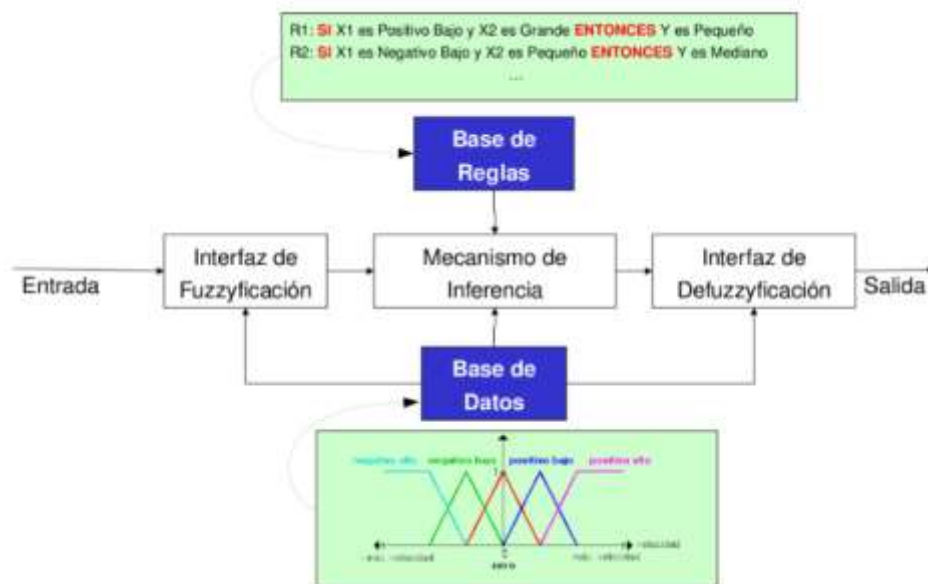
Nota. En la imagen se muestra el comportamiento de la lógica difusa con respecto a la lógica clásica. Tomado de: (Zadeh, s.f.)

La incorporación de la lógica difusa en el sistema de control produjo lo que se conoce como sistema de control difuso. A dos factores principales en el sistema de control como el modelado o identificación y el control propio o control

directo. Suponiendo que se conozca el modelo, hay que centrarse en el control de procesos. La idea es simple, se trata de determinar que se debe hacer de forma lógica para lograr los objetivos de control de la mejor manera a partir de un conocimiento proporcionado por los operadores humanos es imposible sin esta base crear una aplicación y que funcione correctamente. (Zadeh, s.f.)

Figura 12

Estructura básica de un controlador Fuzzy



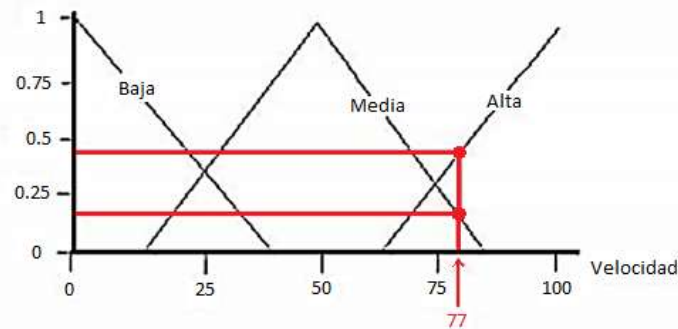
Nota. En la imagen se muestra el diagrama de bloques de un controlador Fuzzy. Tomado de: (ULE, 2021)

a. Fuzzyficación

Este proceso siempre se realiza en el control Fuzzy y esta operación se ejecuta en todo momento, es la puerta de entrada al sistema de inferencia difusa. Es un procedimiento matemático que transforma un elemento del campo de discurso (variable medida del proceso) en un valor en cada función de membresía a las cuales pertenece. (Guerra, 2007)

Figura 13

Ejemplo de fuzzyficación de una variable



Nota. En la imagen se muestra un ejemplo de la etapa de Fuzzyficación. Tomado de: (Guerra, 2007)

b. Defuzzyficación

Es un proceso matemático que se utiliza para convertir conjuntos difusos en números reales. El sistema de inferencia difusa saca conclusiones de la información de la entrada, pero es difuso. Esta salida difusa se obtiene por la etapa de inferencia difusa, genera un conjunto difuso, pero los datos de salida del sistema deben ser números reales, y deben representar el conjunto completo obtenido en la etapa donde se agrega, por lo que existen diferentes resoluciones de Defuzzyficación y entregan diferentes resultados, el “más común y ampliamente usado” es el centroide. (Guerra, 2007)

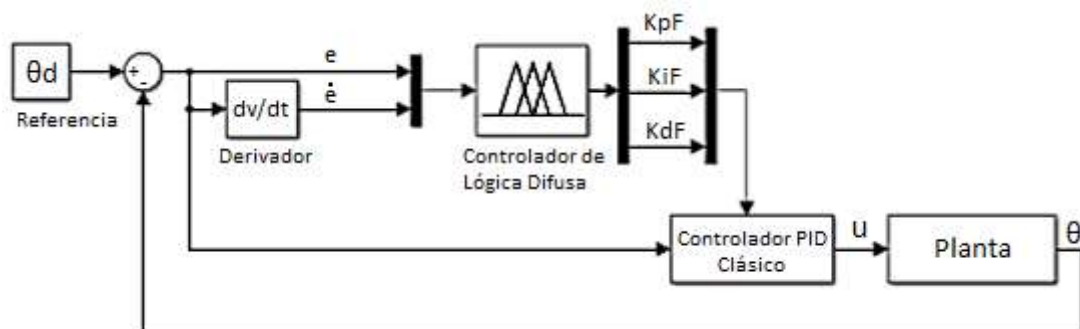
2.6.4. Control Fuzzy PID

El control difuso no se basa en modelos matemáticos precisos, sino las reglas estimulantes de toma de decisiones basadas en el conocimiento y el lenguaje para mejorar la adaptabilidad del sistema de control. Sin embargo, cuando el error y la tasa de cambio de error son bajos, solo el control difuso no puede garantizar la precisión del control. Para lograr un mejor efecto de control, se introduce un algoritmo de control PID difuso. (Zhen & Yan, 2013)

Aunque es posible diseñar controladores PID de lógica difusa mediante modificaciones simples a los controladores tradicionales, insertando algunas reglas importantes de lógica difusa IF-THEN en el sistema de control, estos métodos suelen complicar el diseño general y no aparecerán. El nuevo controlador PID difuso captura las características y propiedades básicas del controlador PID tradicional. Además, no suelen tener fórmulas analíticas para especificaciones de control y análisis de estabilidad. Los controladores difusos PD, PI y PI + D que se describen a continuación son extensiones naturales. La versión tradicional conserva la estructura lineal del controlador PID y utiliza fórmulas de análisis simples y tradicionales como resultado final del diseño. Por lo tanto, pueden reemplazar directamente los controladores PID tradicionales en cualquier sistema de control de operación. (Padhee, 2011)

Figura 14

Diagrama de bloques del sistema de control difuso



Nota. En la imagen se muestra el diagrama de bloques de un sistema con control difuso. Tomado de: (Guerra, 2007)

2.6.5. Control MPC (Control Predictivo no lineal basado en modelo)

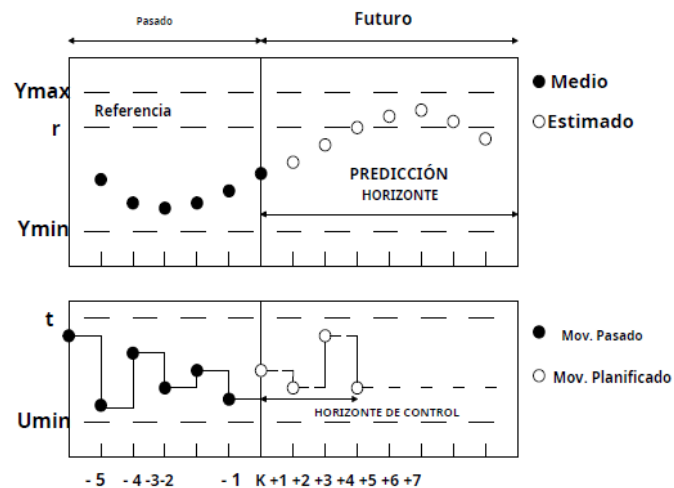
El objetivo de MPC es obtener la ruta futura de la variable manipulada u . En este caso, se establece un rango de predicción N que siempre predecirá la

salida futura. Por lo tanto, se utiliza un modelo predictivo que tiene como objetivo describir el comportamiento de la variable del proceso que se va a controlar. La predicción depende de los valores obtenidos actualmente y de las señales de control futuras.

Para el cálculo de las señales de control futuras, se requiere una función de coste o un criterio de optimización. Esto es responsable de penalizar cualquier error que ocurra entre la salida esperada y la ruta de referencia. El algoritmo de optimización iterativa devuelve un vector que contiene las acciones de control futuras y la dimensión del vector depende del rango de control. Solo es necesario enviar el primer elemento del vector a la planta. Este proceso se repite para cada instante. (Pruna, y otros, 2016)

Figura 15

Estrategia MPC



Nota. En la imagen se muestra la estrategia MPC y la idea de términos involucrados. Tomado de: (Pruna, y otros, 2016)

2.7. Tarjetas de Desarrollo

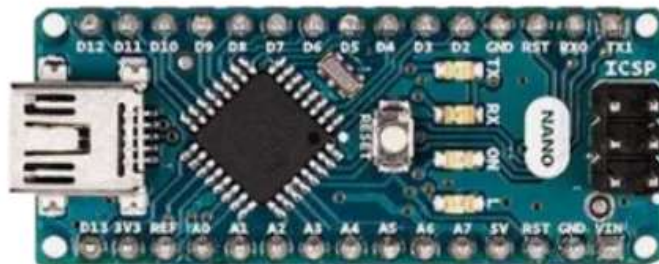
2.7.1. Arduino Nano

Arduino Nano al igual que el Arduino uno es una placa compacta que tiene como característica ser completa y compatible con otras placas, está basada en el microcontrolador ATmega328P. este controlador posee 14 pines de entrada/salida digital, 6 se puede usar para PWM y 6 para entradas analógicas, un cristal de 16Mhz, conexión Mini-USB, terminales para conexión ICSP y un botón de reseteo.

Tiene la misma función que Arduino UNO, ya sea el poder del microcontrolador o en términos de conectividad, simplemente se corta en su conector USB y el conector Jack de alimentación, y los pines han cambiado el formato del pin header. (ARDUINO.cl, 2010)

Figura 16

Tarjeta Arduino Nano



Nota. En la imagen se muestra en la estructura física de la tarjeta Arduino Nano. Tomado de: (Arduino.cl, 2010)

2.7.2. Arduino Mega

El Arduino Mega 2560 es una placa de microcontrolador basada en el ATmega2560 . Tiene 54 pines de entrada y salida digital (de los cuales 15 pueden ser utilizados como salidas PWM), 16 entradas analógicas, 4 UART (puertos serie de hardware), un oscilador de cristal de 16 MHz, una conexión

USB, un conector de alimentación, un encabezado ICSP, y un botón de reinicio. Contiene todo lo necesario para soportar el microcontrolador, se debe conectar a una computadora con un cable USB o encenderlo con un adaptador de CA a CC o una batería para comenzar a usarlo. La placa Mega 2560 es compatible con la mayoría de los protectores diseñados para las placas arduino Uno y las antiguas placas Duemilanove o Diecimila que son anteriores. (ARDUINO.cc, 2021)

Figura 17

Tarjeta Arduino Mega



Nota. En la imagen se muestra en la estructura física de la tarjeta Arduino Mega 2560 REV3. Tomado de: (ARDUINO.cc, 2021)

2.7.3. Raspberry PI

Raspberry PI es una placa computadora de bajo costo (SBC), se puede decir que es una computadora pequeña, equivalente a una tarjeta de crédito, fue desarrollada en el Reino Unido por la Fundación Raspberry PI (Universidad de Cambridge) en 2011 para estimular la escuela Docencia informática, aunque su comercialización no se inició hasta 2012.

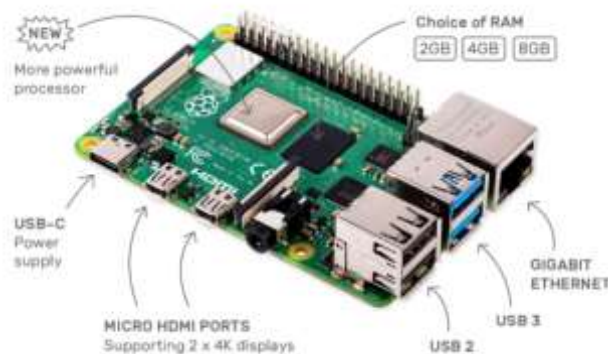
Este concepto es una computadora con todos los accesorios que se pueden desmontar sin afectar las operaciones básicas. Consiste en una placa

que admite varios componentes necesarios en una computadora común y puede funcionar normalmente. Raspberry Pi se define como un milagro en miniatura, contiene una poderosa potencia informática en un tamaño muy pequeño. Tiene la capacidad de hacer cosas extraordinarias.

Tiene un conector GPIO de 8 pines y no tiene un propósito específico. Su comportamiento (incluyendo si es un pin de entrada o salida) puede ser controlado (programado) por el usuario en tiempo de ejecución. (Raspberry Pi 4, 2021)

Figura 18

Tarjeta Raspberry



Nota. En la imagen se muestra en la estructura física del Raspberry Pi. Tomado de: (Raspberry Pi 4, 2021)

2.8. Modulo

2.8.1. MCP4725

El MCP4725 es un DAC de 12 bits, un dispositivo que permite obtener señales de voltaje analógicas de un procesador digital (como Arduino). Las salidas analógicas en realidad proporcionan una señal PWM entre GND y Vcc. Incluso cuando si se aplica el filtro RC, no se obtendrá una señal de voltaje

analógica real.

Por el contrario, un DAC ideal generara una señal, es decir, la salida generada toma cualquier valor intermedio entre GND y V_{cc} , generando así un verdadero analógico. Sin embargo, el DAC real no puede usar cualquier valor de voltaje, pero la salida se compone de N niveles, lo que proporcionan señales analógicas discretas de 2^N niveles.

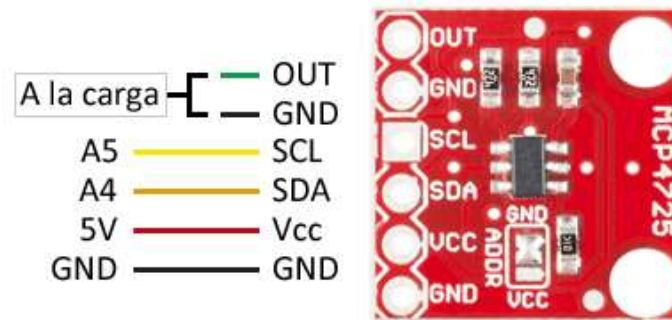
El MCP4725 se controla por I2C, por lo que es fácil de leer. Tiene dos direcciones posibles, que se pueden seleccionar conectando el pin ADDR. También contiene una memoria EEPROM, que puede mantener el nivel de voltaje incluso después de un corte de energía.

El voltaje de la fuente de alimentación del MCP4725 es de 2,7V a 5,5V. el voltaje máximo que puede proporcionar es V_{cc} . Esta alimentado por un voltaje de 5V y se supone que su precisión de 4096 niveles (12 bits), es de aproximadamente de 1mV. La corriente máxima que puede proporcionar es de 25mA. Esta es una intensidad reducida, pero es similar a la intensidad de salida del Arduino. El tiempo de cambio de salida típico es de 6 μ s.

El MCP4725 se puede utilizar para cualquier tipo de proyecto que necesite generar una verdadera señal analógica en lugar de PWM, por ejemplo, para alimentar equipos especialmente sensibles, calibración de sensores, sistemas de adquisición de datos, o generadores de funciones (como ondas triangulares). (LLamas, 2021)

Figura 19

Modulo MCP4725



Nota. En la imagen se muestra cómo se compone el módulo MCP4725.

Tomado de: (LLamas, 2021)

Capítulo III

3. Diseño e Implementación

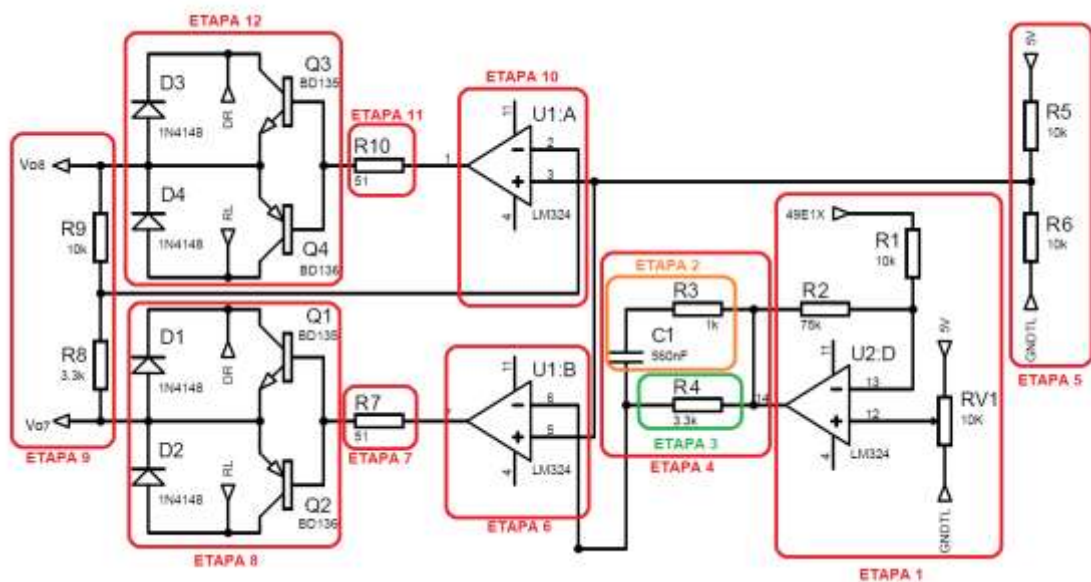
En el presente capítulo se realiza el diseño, construcción y modelado del levitador magnético, el cual posee sensores de posición y sus respectivas características tomando en cuenta los requisitos de hardware y software necesarios para el correcto funcionamiento del sistema.

3.1. Cálculos para el diseño del circuito de potencia

Se presenta el análisis de los cálculos que se realizaron en cada etapa del circuito de potencia con la finalidad de conocer los valores de voltaje de salida de cada sección.

Figura 20

Diagrama de circuito en los ejes X, Y por etapas.



Nota. En la imagen se muestra las etapas que compone el circuito de potencia para los ejes X, Y.

Ecuación 8

Cálculos realizados en la etapa 1.

$$V_o = \frac{R_2}{R_1} \left(\left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) (VPOT - V_{49E}) \right)$$

$$V_o = \frac{R_2}{R_1} \left((VPOT - V_{49E}) + \frac{R_1(VPOT - V_{49E})}{R_2} \right)$$

$$V_o = \frac{R_2}{R_1} \left(\frac{R_2(VPOT - V_{49E}) + R_1(VPOT - V_{49E})}{R_2} \right)$$

$$V_o = \left(\frac{(R_2 + R_1)(VPOT - V_{49E})}{R_1} \right)$$

Ecuación 9

Cálculos realizados en la etapa 2.

$$H(w) = \frac{-V_{o1}}{V_o} = \frac{-\frac{1}{j\omega C_1}}{R_3 - \frac{1}{j\omega C_1}}$$

Ecuación 10

Cálculos realizados en la etapa 3.

$$V_{o2} = V_o = R_4 * I$$

Ecuación 11

Cálculos realizados en la etapa 4.

$$V_{o3} = H(w) + V_{o2}$$

$$V_{o3} = \frac{-\frac{1}{j\omega C_1}}{R_3 - \frac{1}{j\omega C_1}} + R_4 * I_2$$

$$V_{o3} = \frac{-\frac{1}{j\omega C_1} + V_o * R_3 - \frac{1}{j\omega C_1}}{R_3 - \frac{1}{j\omega C_1}}$$

Ecuación 12

Cálculos realizados en la etapa 5.

$$V_{o4} = \frac{R_6}{R_5 + R_6} * 5V$$

Ecuación 13

Cálculos realizados en la etapa 6.

$$V_{o5} = +V_{cc} \text{ si } V_{o4} > V_{o3}$$

$$V_{o5} = -V_{cc} \text{ si } V_{o3} > V_{o4}$$

Ecuación 14

Cálculos realizados en la etapa 7.

$$V_{o6} = V_{o5} = R_7 * I$$

Ecuación 15

Cálculos realizados en la etapa 8.

$$V_B = \text{Voltaje de base}$$

$$V_E = \text{Voltaje de emisor}$$

$$V_C = \text{Voltaje de colector}$$

$$V_B = V_{o6}$$

$$V_E = V_{o7} + V_D + V_{DR}$$

$$V_{BE} = V_B - V_E$$

$$V_{BE} = V_{o6} - V_{o7} - V_D - V_{DR}$$

$$V_{o7} = V_{o6} - V_{BE} - V_D - V_{DR}$$

$$V_{o7} = R_7 * I - V_{BE} - V_D - V_{DR}$$

$$V_B = V_{o6}$$

$$V_E = V_{o7} - V_D - V_{DR}$$

$$V_{BE} = V_B - V_E$$

$$V_{BE} = V_{o6} - V_{o7} + V_D + V_{DR}$$

$$V_{o7} = V_{o6} - V_{BE} + V_D + V_{DR}$$

$$V_{o7} = R_7 * I - V_{BE} + V_D + V_{DR}$$

Ecuación 16

Cálculos realizados en la etapa 9.

$$V_{o9} = \frac{R_8}{R_8 + R_9} * V_{o8} + \frac{R_9}{R_8 + R_9} * V_{o7}$$

$$V_{o9} = \frac{R_8 * V_{o8} + R_9 * V_{o7}}{R_8 + R_9}$$

Ecuación 17

Cálculos realizados en la etapa 10.

$$V_{o10} = +V_{cc} \text{ si } V_{o4} > V_{o9}$$

$$V_{o10} = -V_{cc} \text{ si } V_{o9} > V_{o4}$$

Ecuación 18

Cálculos realizados en la etapa 11.

$$V_{o11} = V_{o10} = R_{10} * I$$

Ecuación 19

Cálculos realizados en la etapa 12.

$$V_B = \text{Voltaje de base}$$

$$V_E = \text{Voltaje de emisor}$$

$VC = \text{Voltaje de colector}$

$$VB = Vo11$$

$$VE = Vo8 + VD + VDR$$

$$VBE = VB - VE$$

$$VBE = Vo11 - Vo8 - VD - VDR$$

$$Vo8 = Vo11 - VBE - VD - VDR$$

$$Vo8 = R10 * I4 - VBE - VD - VDR$$

$$VB = Vo11$$

$$VE = Vo8 - VD - VDR$$

$$VBE = VB - VE$$

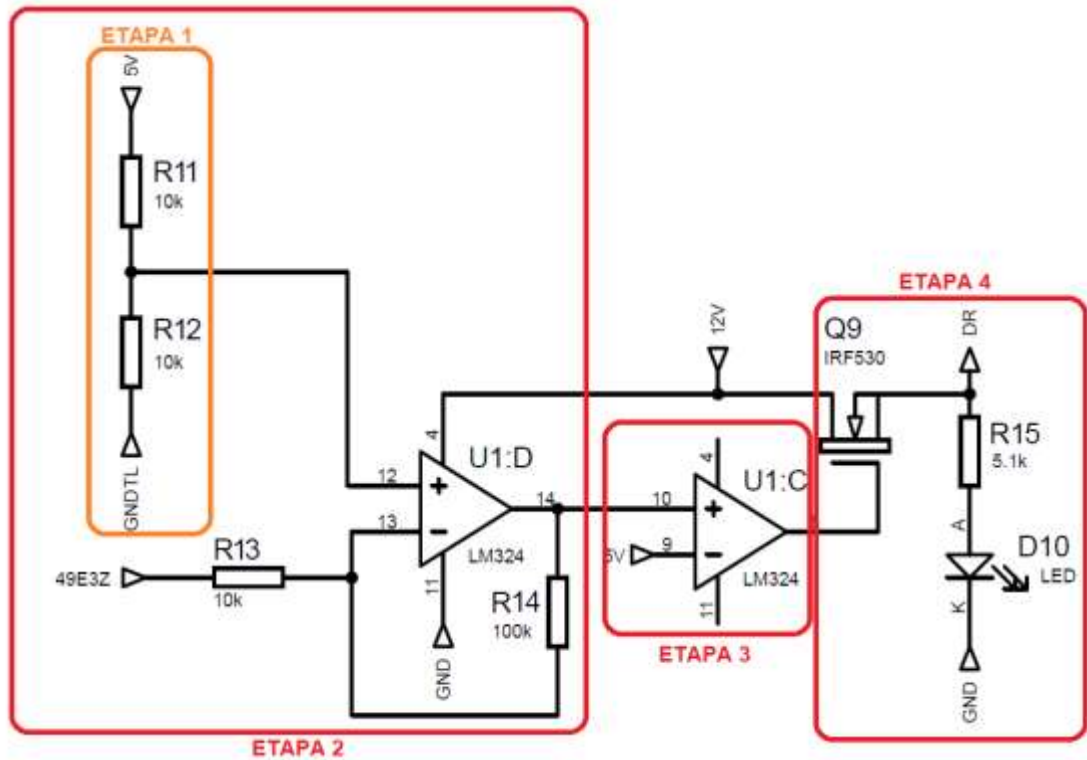
$$VBE = Vo11 - Vo8 + VD + VDR$$

$$Vo8 = Vo11 - VBE + VD + VDR$$

$$Vo8 = R10 * I4 - VBE + VD + VDR$$

Figura 21

Diagrama de circuito eje Z.



Nota. En la imagen se muestra las etapas que compone el circuito de potencia para el eje Z.

Ecuación 20

Cálculos realizados en la etapa 1.

$$V_{o12} = \frac{R_{12}}{R_{11} + R_{12}} * 5V$$

Ecuación 21

Cálculos realizados en la etapa 2.

$$V_{o13} = \frac{R_{14}}{R_{13}} \left(\left(1 + \frac{R_{13}}{R_{14}} \right) (V_{o12} - V_{49E}) \right)$$

$$V_{o13} = \frac{R_{14}}{R_{13}} \left(\left(V_{o12} - V_{49E} + \frac{R_{13}(V_{o12} - V_{49E})}{R_{14}} \right) \right)$$

$$V_{o13} = \frac{R_{14}}{R_{13}} \left(\frac{R_{14}(V_{o12} - V_{49E}) + R_{13}(V_{o12} - V_{49E})}{R_{14}} \right)$$

$$V_{o13} = \left(\frac{(R_{14} + R_{13})(V_{o12} - V_{49E})}{R_{13}} \right)$$

Ecuación 22

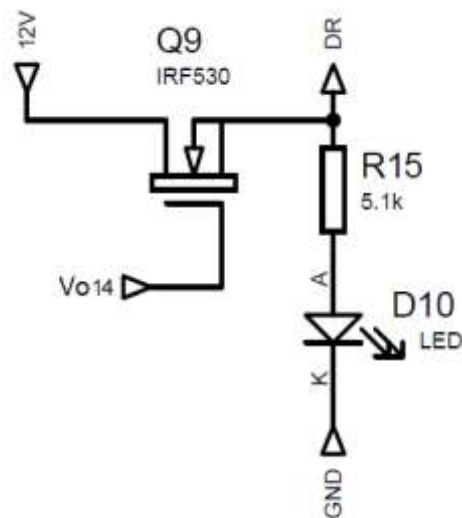
Cálculos realizados en la etapa 3.

$$V_{o14} = +V_{cc} \text{ si } V_{o13} > 5V$$

$$V_{o14} = -V_{cc} \text{ si } 5V > V_{o13}$$

Figura 22

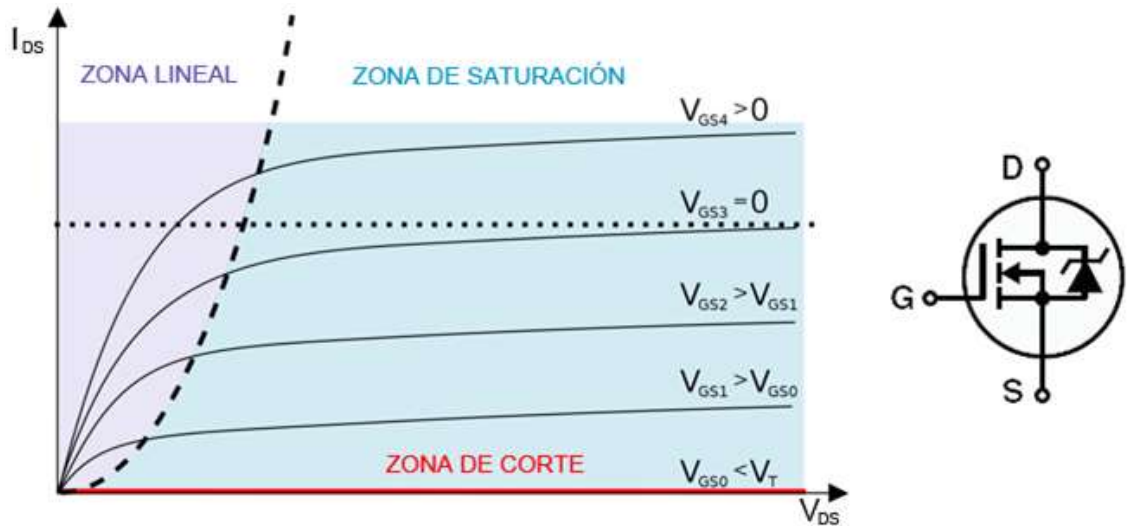
Cálculos realizados en la etapa 4.



Nota. En la imagen se muestra el funcionamiento del mosfet en la última etapa.

Figura 23

Curva de comportamiento del mosfet.

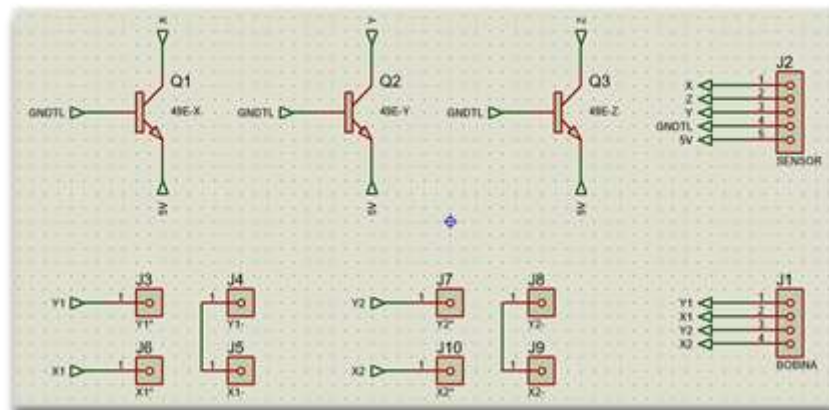


Nota. Para obtener el comportamiento del mosfet al activarse y desactivarse se debe tener en cuenta su zona de saturación según el voltaje que este recibiendo el gate. Tomado de (Llamas, 2021).

3.2. Diseño del levitador magnético

Figura 24

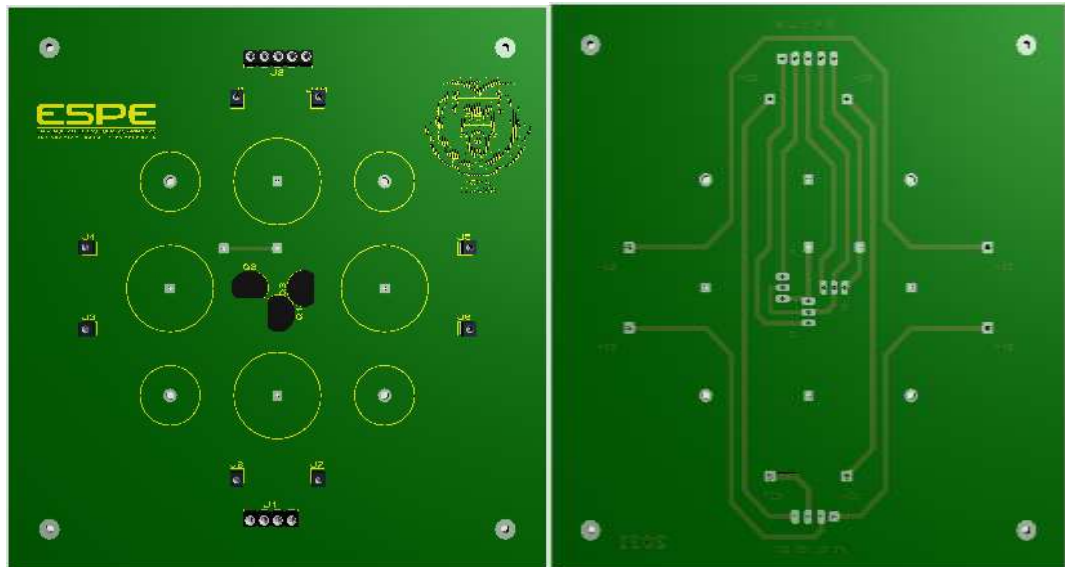
Diseño PCB de la placa de control de los electroimanes.



Nota. Se realizó el diseño de los electroimanes para conocer el comportamiento que estos tendrán.

Figura 25

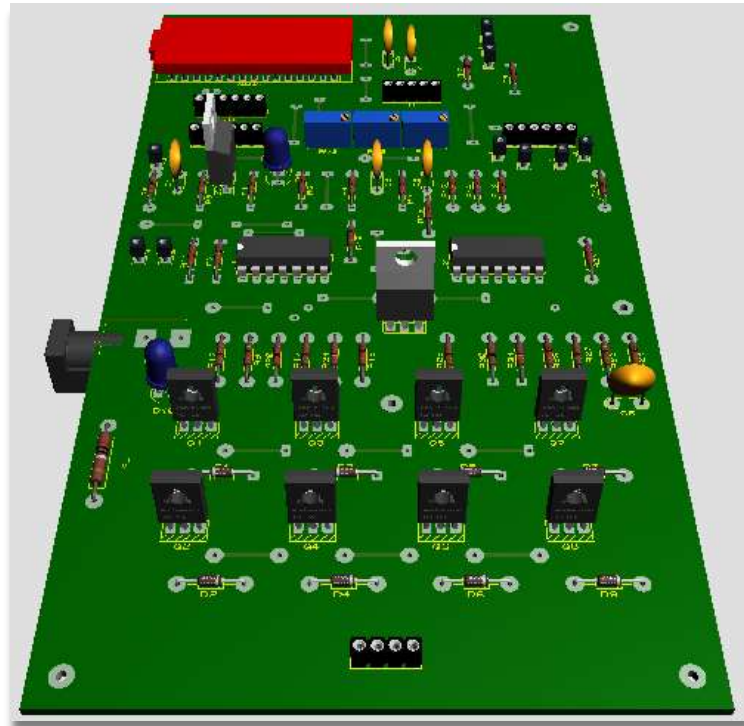
Diseño Proteus de la placa de control de los electroimanes.



Nota. Para realizar la implementación de la placa de electroimanes se realizó el diseño en proteus que permite tener una perspectiva de la posición de los electroimanes.

Figura 26

Diseño 3D de la placa de potencia.

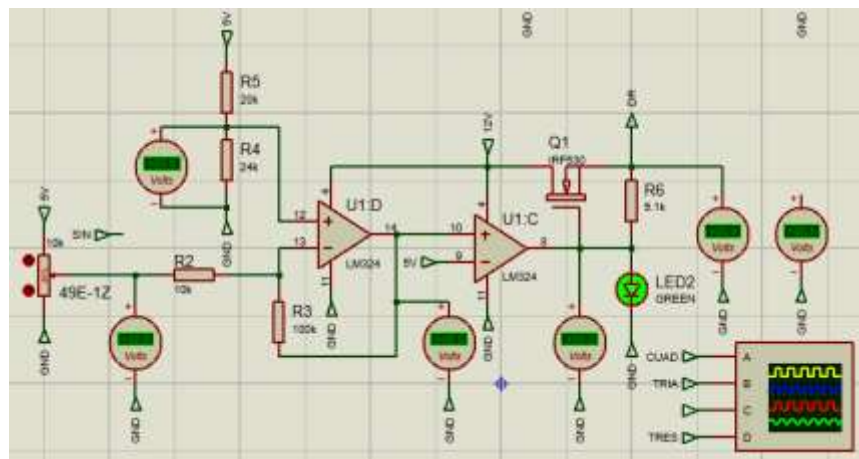


Nota. En la imagen se muestra las diferentes etapas que compone el circuito de potencia en los ejes X, Y, y Z en visualización 3D.

3.2.1. Funcionamiento de la placa de potencia

Figura 27

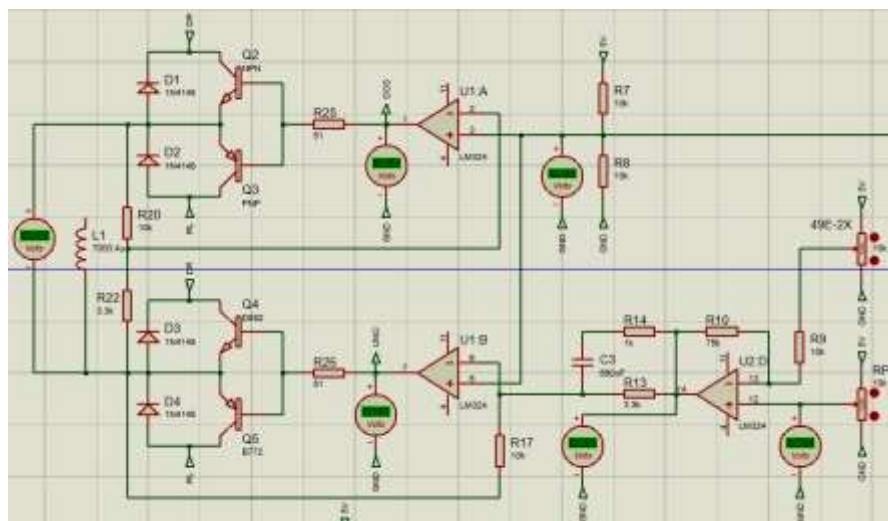
Circuito Posición altura.



Nota. En la imagen se muestra cómo se conforma el circuito que mantiene la altura fija del imán suspendido.

Figura 28

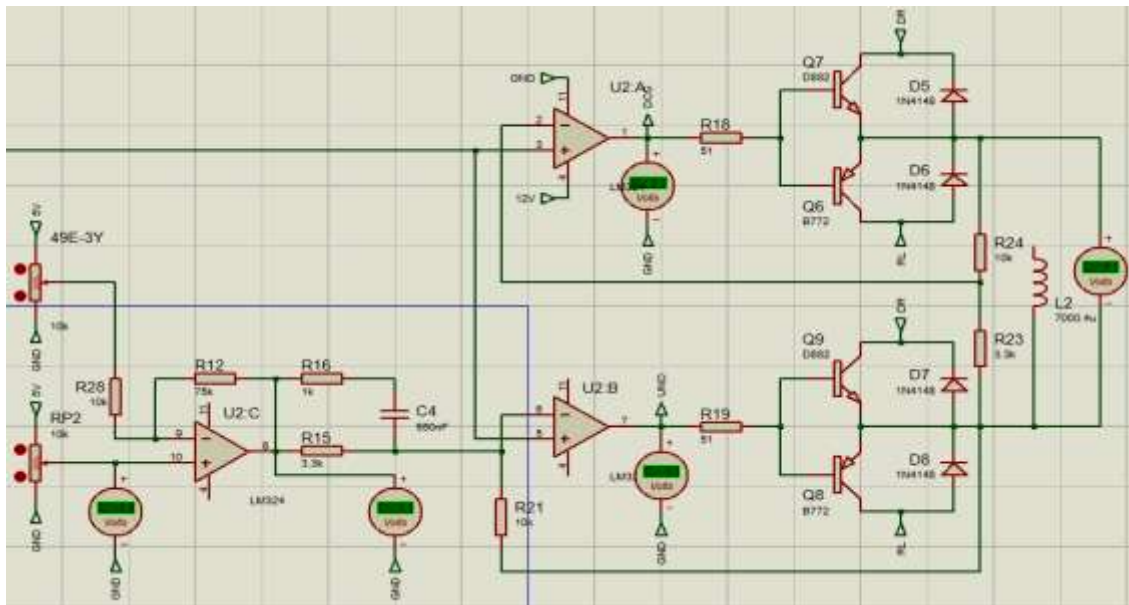
Circuito Posición X.



Nota. En la imagen se muestra cómo se conforma el circuito que permite modificar la posición en X+ y X- del imán que se encuentra suspendido.

Figura 29

Circuito Posición Y.



Nota. En la imagen se muestra cómo se conforma el circuito que permite modificar la posición en Y+ y Y- del imán que se encuentra suspendido.

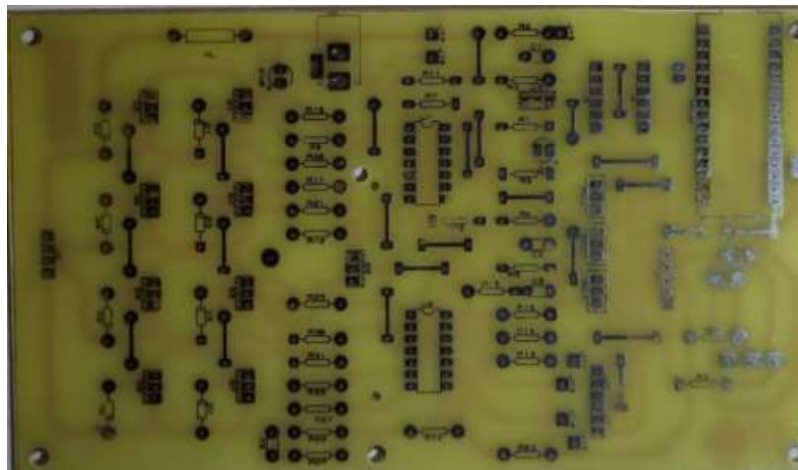
3.3. Construcción del levitador magnético

La referencia se obtiene a través de un diseño realizado en el software Proteus, a continuación, se presenta la construcción del levitador magnético.

3.3.1. Montaje de la placa de circuito de potencia de levitador magnético

Figura 30

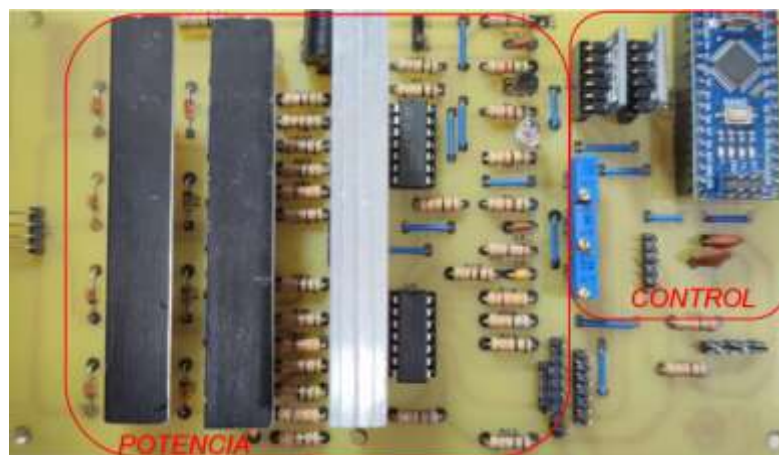
Impresión de la placa de potencia.



Nota. En la imagen se muestra la impresión de la placa de potencia donde se encuentran los elementos que contendrá la placa.

Figura 31

Instalación completa de la placa de control y potencia.

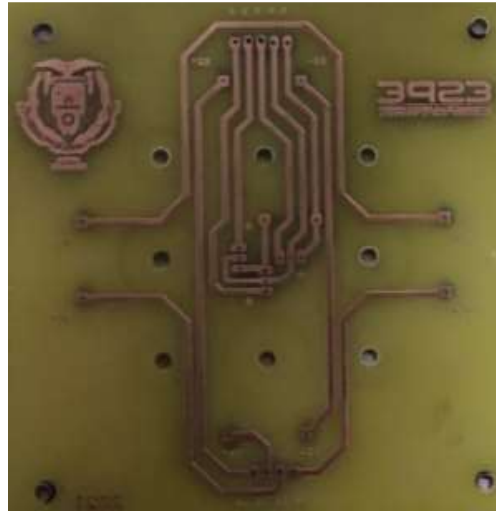


Nota. En la imagen se muestra cómo se compone la placa de levitación magnética que se divide en dos etapas de potencia y control.

3.3.2. Montaje del electroimán

Figura 32

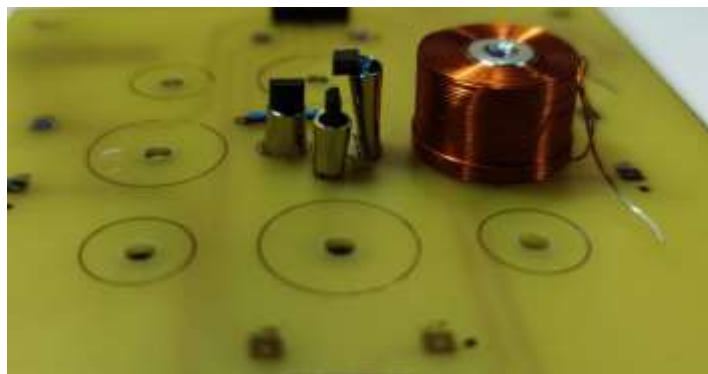
Impresión de la placa de electroimanes.



Nota. En la imagen se muestra la impresión de la placa de los electroimanes en donde estarán los electroimanes que permitirán que el imán se encuentre suspendido.

Figura 33

Instalación de sensores Hall.



Nota. En la imagen se muestra la instalación de los sensores Hall, dos de ellos permiten detectar el cambio magnético en el eje x y y, el otro que está a mayor altura permite la detección de flotación.

Figura 34

Instalación de los imanes.



Nota. En la imagen se muestra la instalación de los imanes que estarán de manera permanente.

3.4. Medición de la salida

Figura 35

Medición de voltajes en la posición H1 y H2.



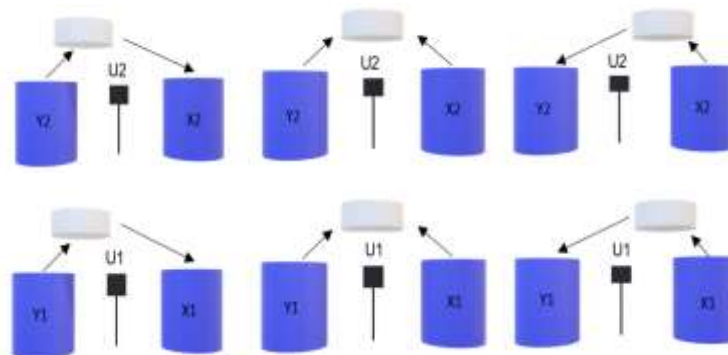
Nota. En la imagen se muestra la medición de voltaje de los sensores que controlaran la posición en X y Y cuando estos se encuentren en reposo.

Tabla 3*Medición de voltajes en la posición H1 y H2*

Sensor Hall	Valor de voltaje (V)
H1	2,46
H2	2,47

Figura 36*Imán suspendido.*

Nota. En la imagen se muestra un imán de neodimio.

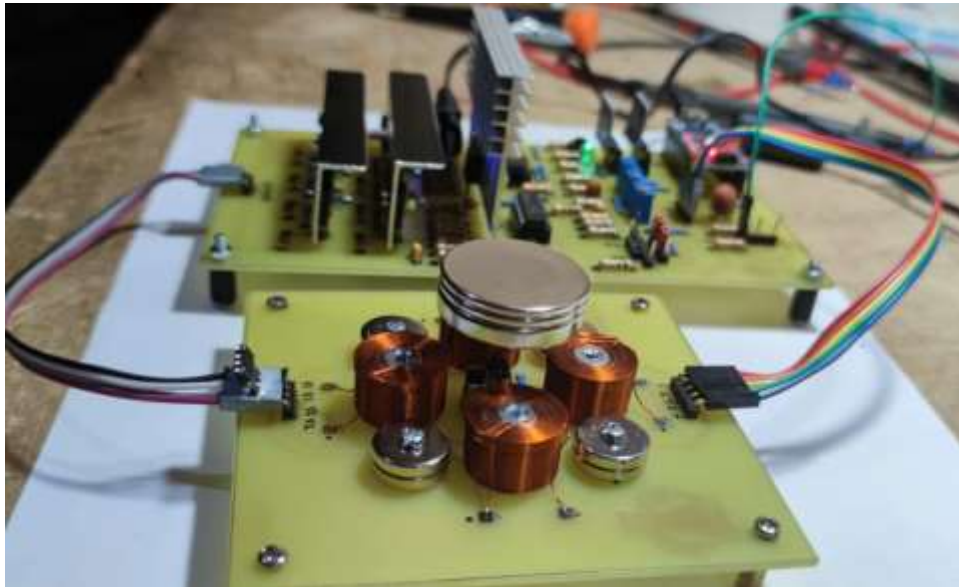
Figura 37*Alineación del imán suspendido*

Nota. En la imagen se muestra como el sensor U1 recopila el valor del cambio magnético de la bobina X1 y Y1, el sensor U2 recopila el valor del cambio

magnético de la bobina X2 y Y2.

Figura 38

Ajuste fino de la corriente.



Nota. Las resistencias de precisión permitirán la calibración del voltaje de muestreo de la fuente para obtener mayor estabilidad.

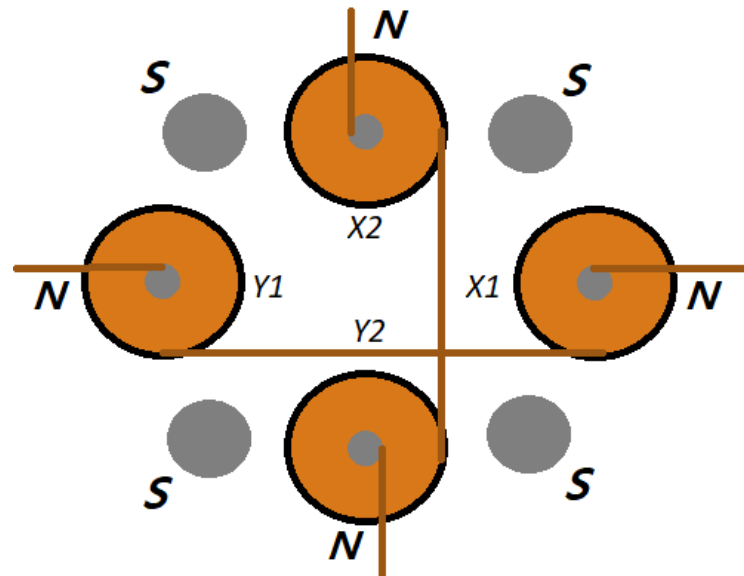
3.5. Principio de funcionamiento

La suspensión electrodinámica (EDS) es una forma de levitación magnética en la cual los conductores están excitados por líneas de campos magnéticos que varían en el tiempo, se impulsa por una fuente eléctrica produciendo un campo magnético cambiante, por el electroimán se induce corriente generando ondas electromagnéticas repulsivas rechazando las líneas de campo del objeto manteniéndolo en suspensión.

En este prototipo se ubica al objeto en medio de los electroimanes e imanes para lograr la repulsión de las líneas de campo permitiendo una levitación y un control del objeto para posicionarlo dentro de los campos magnéticos generados por los electroimanes.

Figura 39

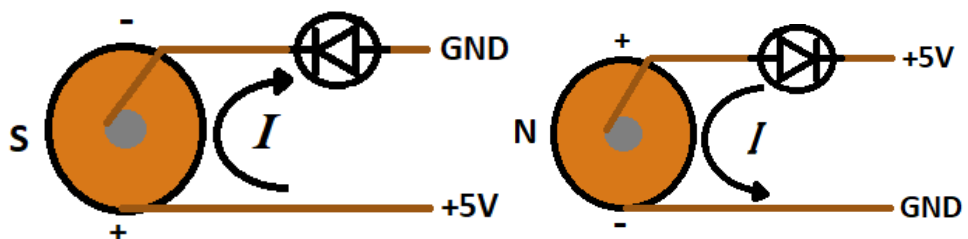
Principio de funcionamiento mediante suspensión electrodinámica.



Nota. En la imagen se muestra cómo se realiza la conexión de los electroimanes polarizados norte que permitirán la suspensión.

Figura 40

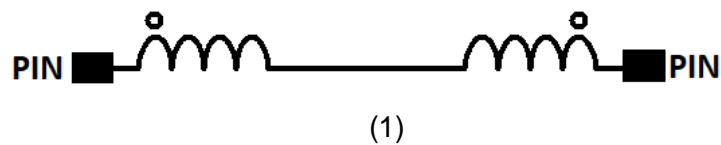
Prueba para identificar los polos dentro del electroimán.



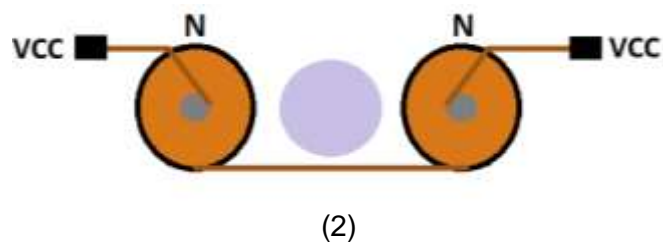
Nota. Se realizó una prueba de identificación de polo en los electroimanes mediante la conexión de un led en serie con la bobina y polarizando el circuito como se indica en la figura, con esto se determinó qué lado del electroimán es norte y que lado es sur para posteriormente conectar las dos bobinas en serie al circuito de potencia.

Figura 41

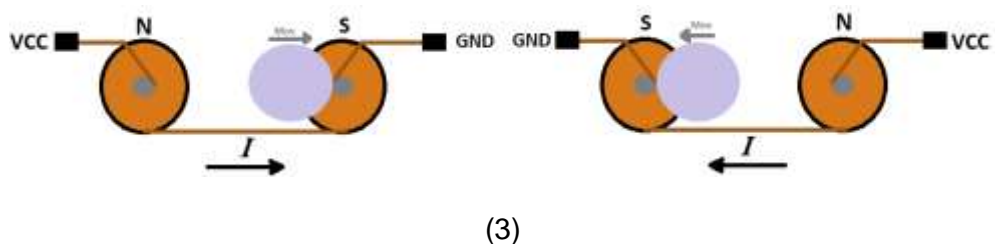
Conexión y funcionamiento electroimanes Eje X y Eje Y: (1) Conexión, (2) Funcionamiento en Reposo y (3) Funcionamiento en movimiento.



Nota. Se realiza la conexión de los dos electroimanes en serie tanto para el eje x como para el eje y, al realizar la conexión debe estar con la polaridad invertida para suprimir la independencia de cada uno de los electroimanes y poder controlarlos con un solo circuito de potencia.



Nota. Al tener polaridades iguales en los electroimanes el objeto se suspende, ya que no atraviesa las líneas de campo magnético por lo que tiende a repelerse y mantenerse flotando en la mitad de los dos electroimanes.



Nota. Cuando se ejerce un movimiento al objeto el electroimán cambia su polaridad por lo que atrae al mismo, mientras el otro electroimán sigue teniendo la polaridad contraria, esto se tiene por la conexión realizada anteriormente entre los electroimanes.

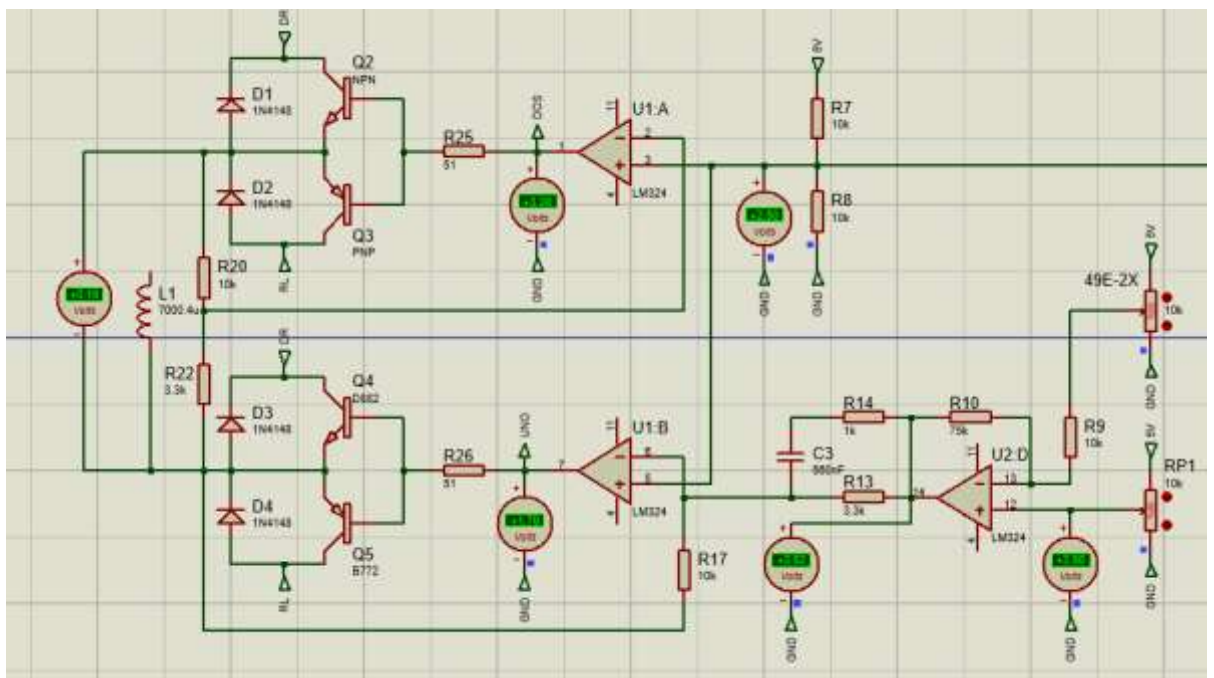
3.6. Análisis del Circuito de Potencia

El análisis del circuito de potencia se realizó en tres etapas, las cuales están compuestas por tres ejes como: X, Y y Z en reposo. En el eje X se puede

observar el valor de voltaje de salida constante de 0,18V y en el eje Y con el mismo valor, al ser el valor positivo de voltaje se conoce que los electroimanes tendrán polaridad norte como se indica en la figura anterior lo que permite que el imán permanezca en el punto de reposo. En la etapa donde se encuentra el eje Z se mantiene un voltaje fijo de 11,4V para mantener al objeto en una altura fija.

Figura 42

Funcionamiento en reposo del circuito: (1) Eje X, (2) Eje Y, (3) Eje Z y (4) Funcionamiento Físico.



(1)

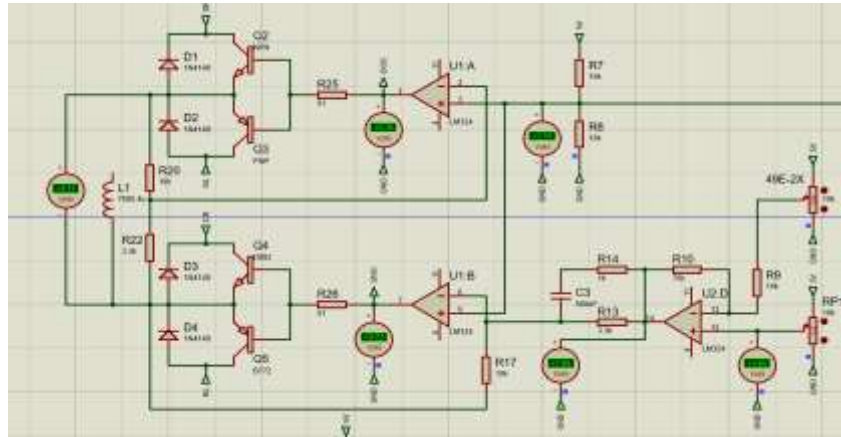


(4)

Nota. En las imágenes se muestra el funcionamiento del levitador magnético en reposo, manteniendo valores de voltaje similares tanto en el eje X como en el eje Y, en este caso como el objeto suspendido tiene polaridad NORTE los electroimanes se mantienen en polaridad NORTE y los imanes en polaridad SUR, lo cual permite que el objeto se posicione en el punto 0 (reposo) y exista una correcta suspensión electrodinámica en el objeto, mientras que en el eje z se mantiene una salida de voltaje constante para que la altura del mismo se mantenga estable.

Figura 43

Funcionamiento del levitador en X+: (1) Simulación y (2) Funcionamiento Físico.



(1)

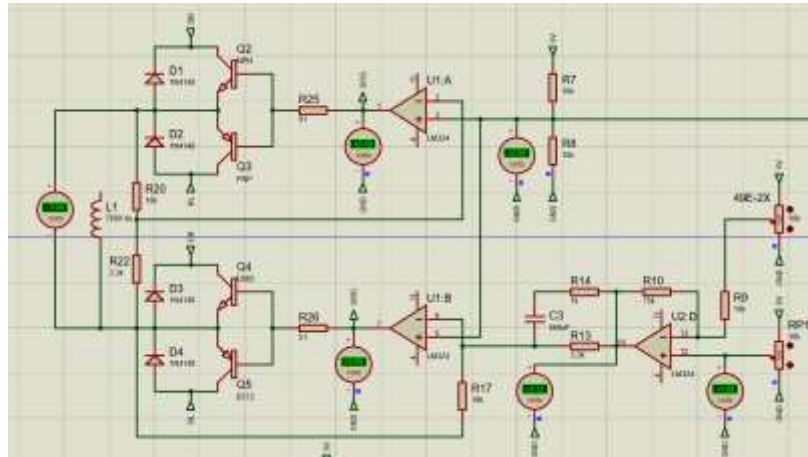


(2)

Nota. En las imágenes se muestra como los valores de voltaje y la posición del objeto varía en una dirección X+, para que se de este comportamiento ambos electroimanes poseen una polaridad diferente, el electroimán hacia donde se dirige el objeto tendrá una polaridad SUR mientras el electroimán contrario tendrá una polaridad NORTE, teniendo el siguiente comportamiento se determina que el un electroimán lo atrae y el otro se repele provocando el cambio de posición.

Figura 44

Funcionamiento del levitador en X-: (1) Simulación y (2) Funcionamiento Físico.



(1)



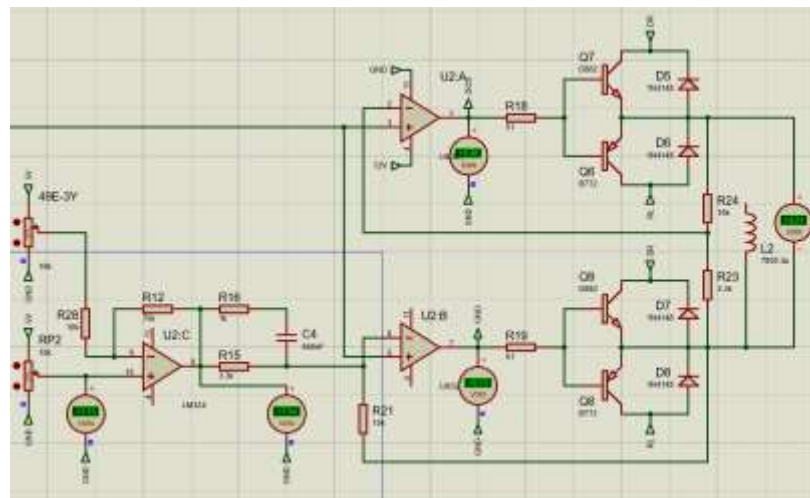
(2)

Nota. En las imágenes se muestra como los valores de voltaje y la posición del objeto varía en una dirección X-, para que se de este comportamiento ambos electroimanes poseen una polaridad diferente, el electroimán hacia donde se dirige el objeto tendrá una polaridad SUR mientras el electroimán contrario tendrá una polaridad NORTE, teniendo el siguiente comportamiento se determina que el un electroimán lo atrae y el otro se repele provocando el

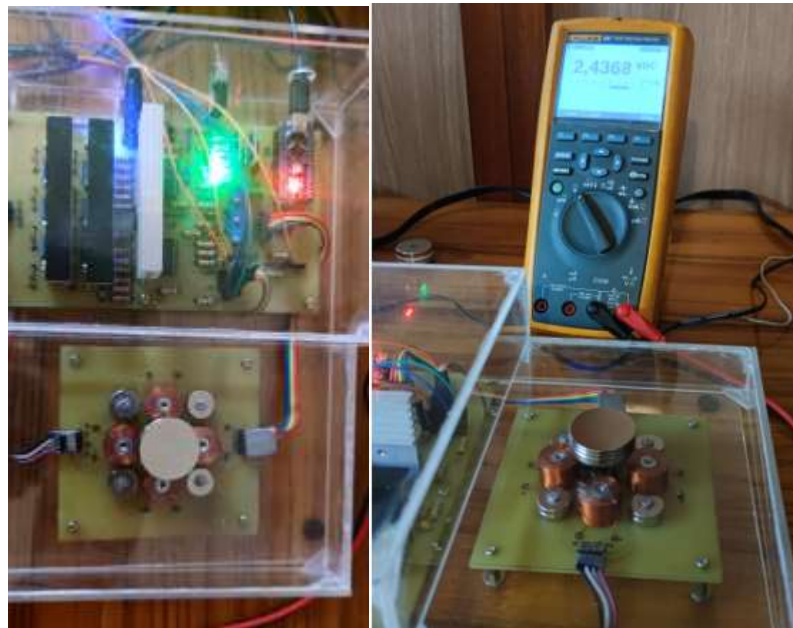
cambio de posición.

Figura 45

Funcionamiento del levitador en Y+: (1) Simulación y (2) Funcionamiento Físico.



(1)



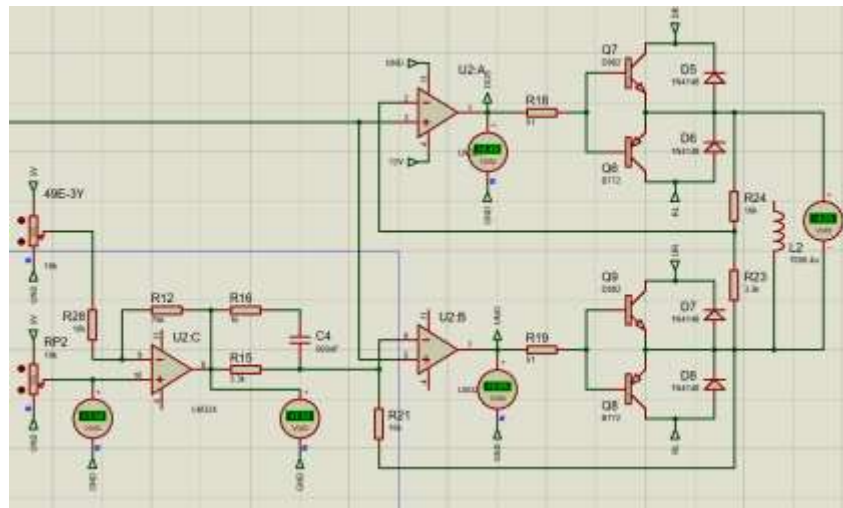
(2)

Nota. En las imágenes se muestra como los valores de voltaje y la posición del objeto varía en una dirección Y+, para que se de este comportamiento ambos electroimanes poseen una polaridad diferente, el electroimán hacia donde se dirige el objeto tendrá una polaridad SUR mientras el electroimán contrario tendrá una polaridad NORTE, teniendo el siguiente comportamiento se

determina que el un electroimán lo atrae y el otro se repele provocando el cambio de posición.

Figura 46

Funcionamiento del levitador en Y-: (1) Simulación y (2) Funcionamiento Físico.



(1)



(2)

Nota. En las imágenes se muestra como los valores de voltaje y la posición del objeto varía en una dirección Y-, para que se de este comportamiento ambos electroimanes poseen una polaridad diferente, el electroimán hacia donde se

dirige el objeto tendrá una polaridad SUR mientras el electroimán contrario tendrá una polaridad NORTE, teniendo el siguiente comportamiento se determina que el un electroimán lo atrae y el otro se repele provocando el cambio de posición.

3.7. Obtención del modelo matemático

En esta sección se realizó la obtención del modelo matemático a través de la función `ident` de Matlab. A continuación, se detalla el proceso de obtención de los modelos para conocer el comportamiento del sistema en los ejes X y Y.

Figura 47

Abrir el programa.

```

Modelo_Funcion_Transferenciaum x +
1 -  clc;clear all;
2 -  load('DataX_1.mat');
3 -  load('DataY_1.mat');
4 -  pv1=PV1v;
5 -  cv1=CV1v;
6 -  pv2=PV2v;
7 -  cv2=CV2v;
8
9 -  unax1=2.63; %2.63-2.44    2.53    574 - 548 - 524
10 - unin1=2.44;
11 - unax2=2.59; %2.59-2.42    2.47    565 - 532 - 520
12 - unin2=2.42;
13
14 - disp('Start!')
15 - for k=1:length(t)
16 -     %%Ecuacion de la Recta 1
17 -     y2_1=100;
18 -     y1_1=0;
19 -     x1_1=umin1;
20 -     x2_1=unax1;
21 -     pendiente_1=(y2_1-y1_1)/(x2_1-x1_1);
22 -     x_1=cv1(k);
23 -     y_1=pendiente_1*x_1-pendiente_1*x1_1+yi_1;
24
25 -     %%Ecuacion de la Recta 2
26 -     y2_2=100;
27 -     y1_2=0;
28 -     x1_2=umin2;
29 -     x2_2=unax2;
30 -     pendiente_2=(y2_2-y1_2)/(x2_2-x1_2);
31 -     x_2=cv2(k);
32 -     y_2=pendiente_2*x_2-pendiente_2*x1_2+yi_2;
33

```

Nota. En la imagen se muestra el código que permite obtener el modelo matemático del sistema en las dimensiones correspondientes en X y Y.

Figura 48

Ejecución del programa.



Nota. En la imagen se muestra la ejecución del programa que permitirá la importación de datos guardados.

Figura 49

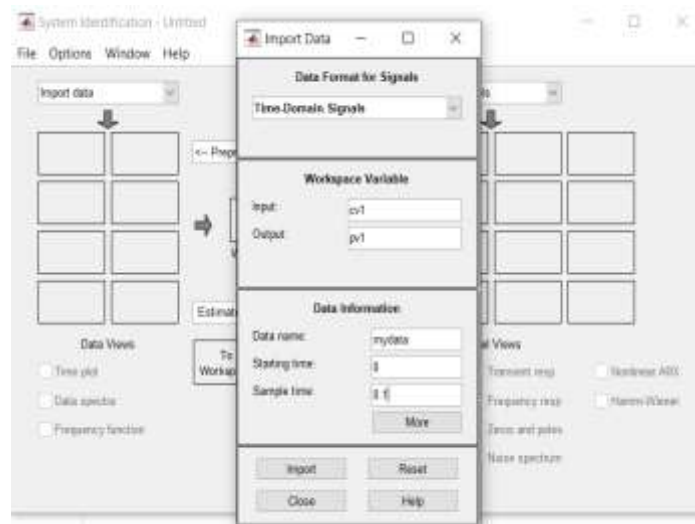
Ejecución función ident de Matlab.



Nota. En la imagen se muestra la función ident en el recuadro.

Figura 50

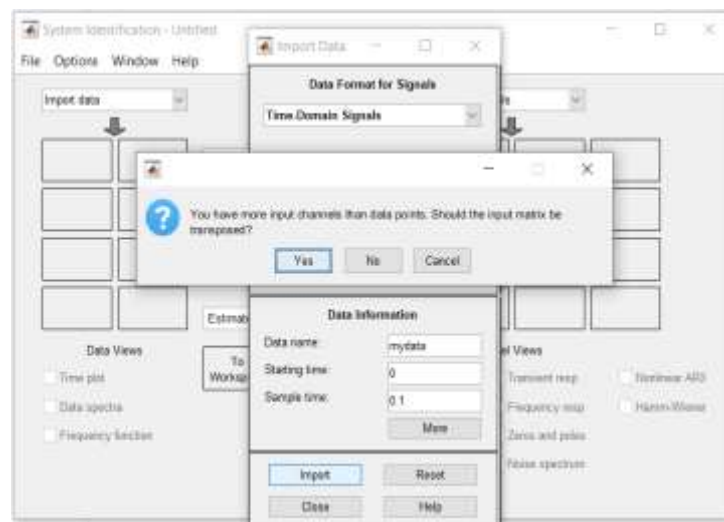
Importación de los datos para el movimiento de la planta en el eje X.



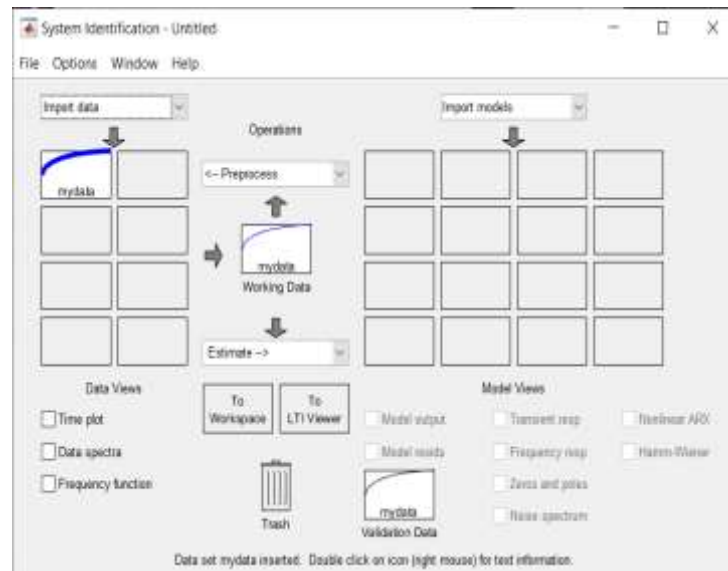
Nota. En la imagen se muestra los valores de entrada y salida, el tiempo de arranque el tiempo de muestreo que se colocó para la obtención del modelo en el eje X.

Figura 51

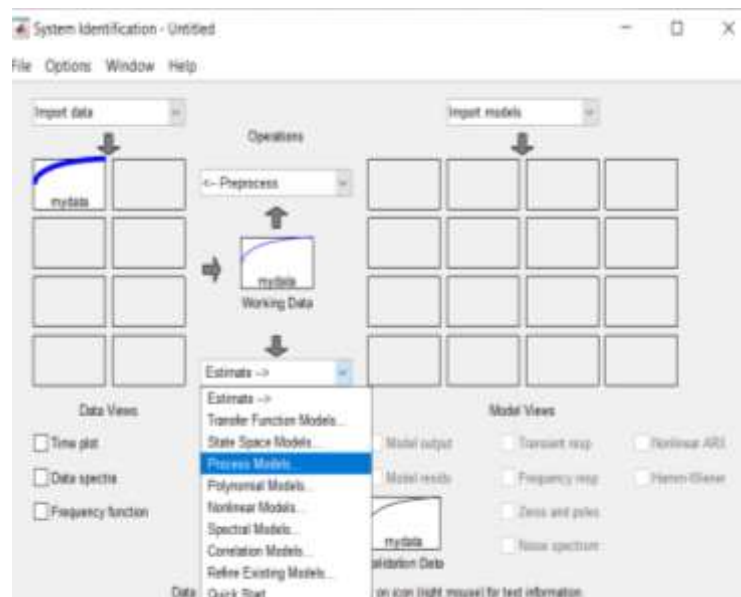
Importar los datos en el dominio del tiempo.



Nota. En la imagen se muestra que para importar los datos se debe elegir la opción Import.

Figura 52*Datos importados.*

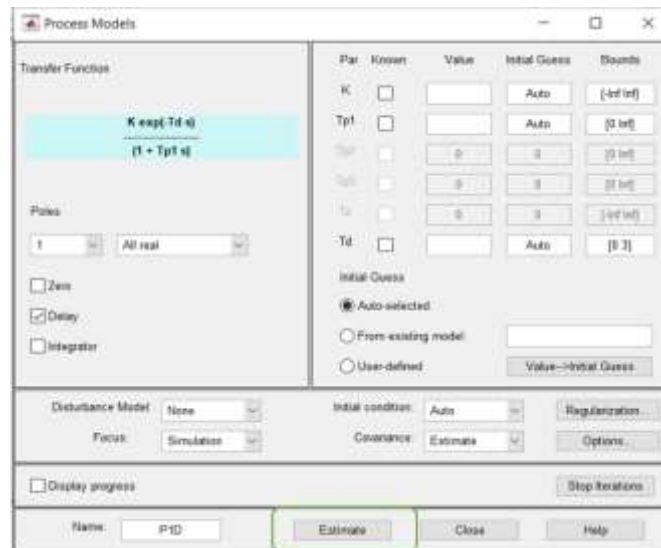
Nota. En la imagen se observa que los datos fueron importados correctamente.

Figura 53*Cálculo del modelo matemático para el movimiento en el eje X.*

Nota. En la imagen se muestra que para calcular el modelo se debe elegir la opción Process Models.

Figura 54

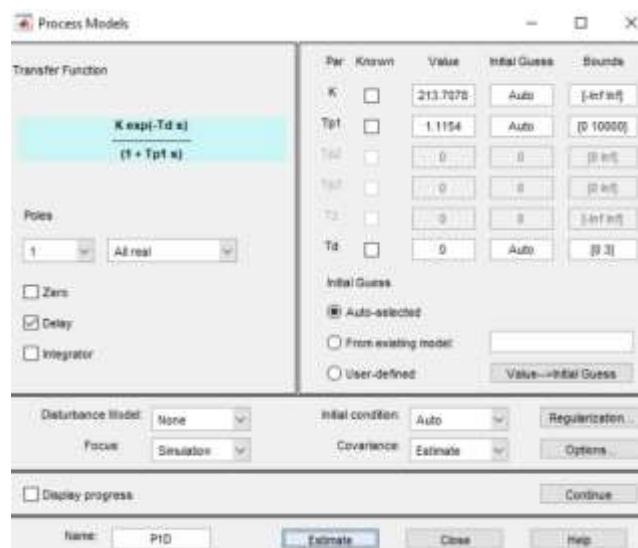
Función de transferencia eje X.



Nota. En la imagen se muestra todos los datos que serán calculados para obtener el modelo matemático en el eje X.

Figura 55

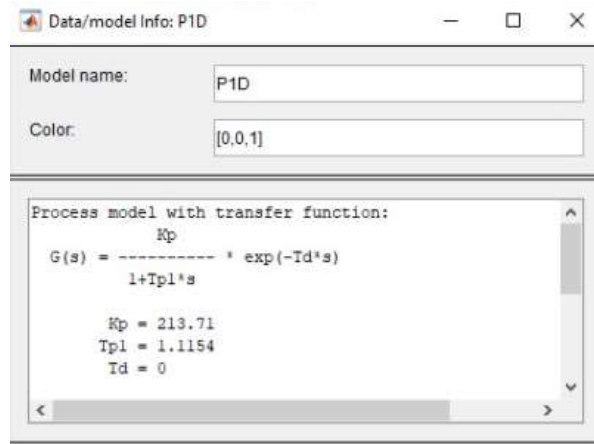
Modelo matemático obtenido para el movimiento en el eje X.



Nota. En la imagen se muestra el modelo matemático obtenido en el IDENT de Matlab para el eje X.

Figura 56

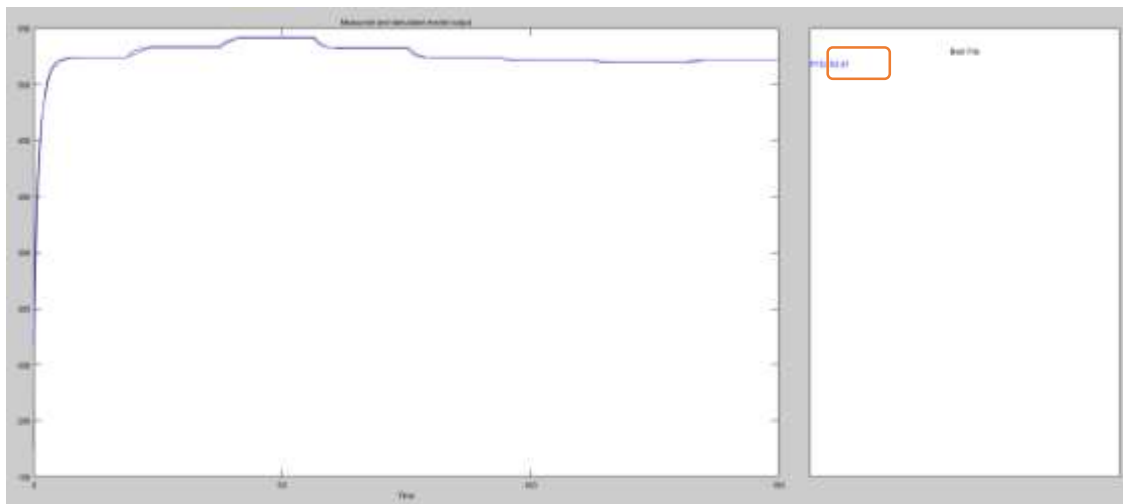
Parámetros del modelo matemático para el movimiento en el eje X.



Nota. En la imagen se muestra los valores de Kp, Td y θ del sistema para el movimiento en el eje X.

Figura 57

Porcentaje de efectividad del modelo en el eje x.



Nota. En la imagen se observa el porcentaje máximo de efectividad alcanzado del modelo matemático que es de 83.47% para el movimiento en el eje X.

Figura 58

Importación de los datos para el movimiento en el eje Y.



Nota. En la imagen se muestra los datos que se colocaron para el movimiento en el eje Y como: son la entrada, salida y los valores de tiempo de inicialización y tiempo de muestreo.

Figura 59

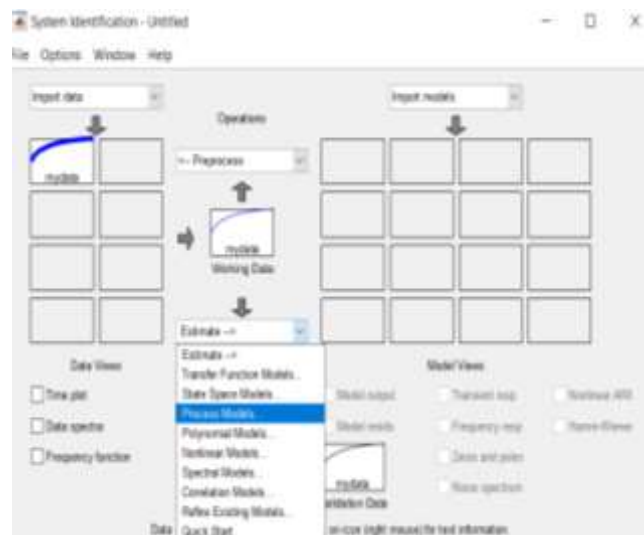
Importar datos en el dominio del tiempo.



Nota. En la imagen se muestra que para importar los datos se debe elegir la opción Import.

Figura 60*Datos importados.*

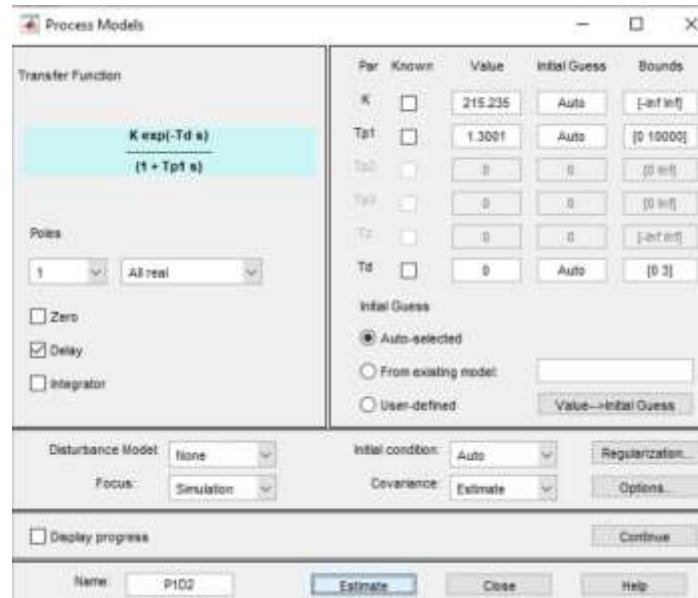
Nota. En la imagen se muestra que los datos para el movimiento en el eje Y fueron importados de manera correcta.

Figura 61*Cálculo del modelo matemático.*

Nota. En la imagen se muestra para calcular los valores de las constantes para el cálculo del modelo matemático se debe elegir la opción Process Models.

Figura 62

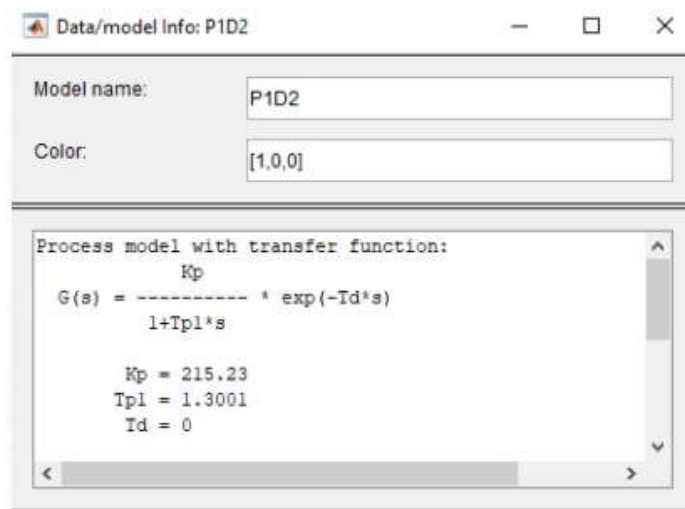
Modelo matemático del sistema del movimiento en el eje Y.



Nota. En la imagen se muestra el modelo matemático obtenido en el IDENT de Matlab para el eje Y.

Figura 63

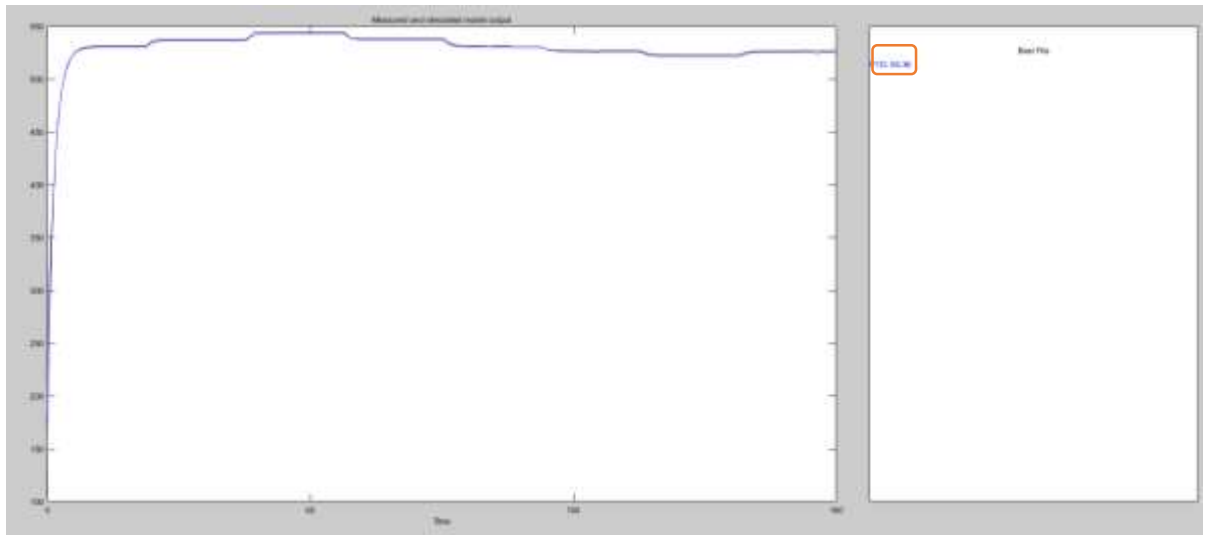
Parámetros del matemático del sistema del movimiento en el eje Y.



Nota. En la imagen se muestra los valores de Kp, Td y θ obtenidos del sistema en el eje Y.

Figura 64

Porcentaje de efectividad del modelo en el eje y.



Nota. En la imagen se observa el porcentaje máximo de efectividad alcanzado del modelo matemático de 90.36% para el movimiento en el eje Y.

Capítulo IV

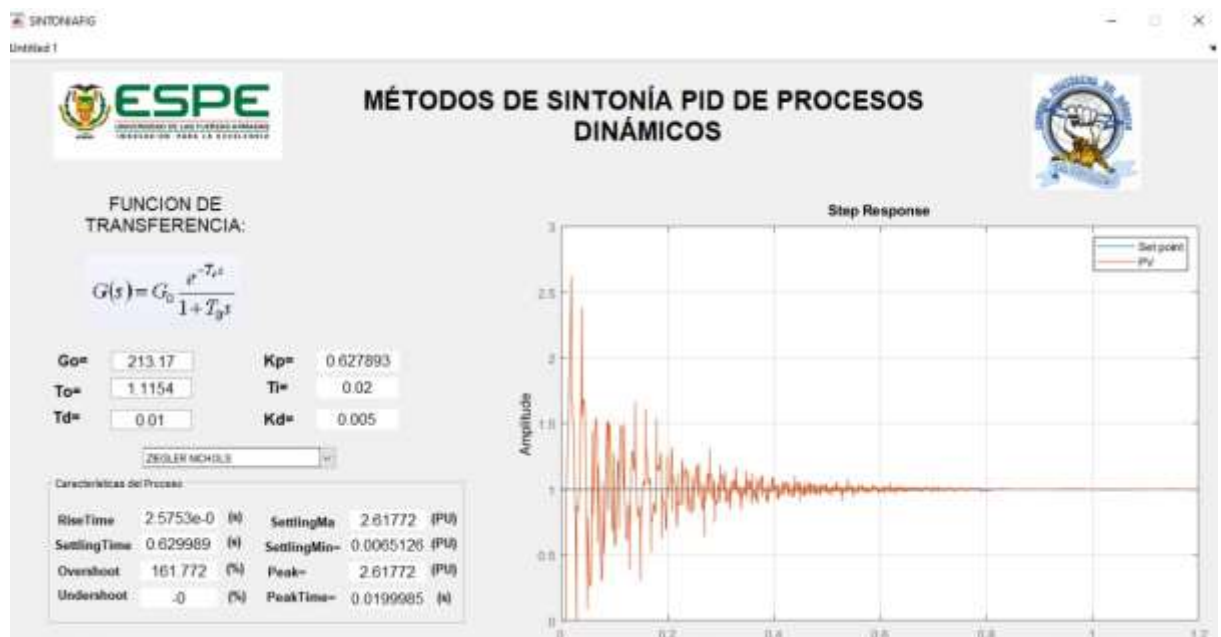
4. Análisis y Resultados Obtenidos

En este capítulo se presenta las pruebas y resultados obtenidos de la evaluación de los diferentes tipos de control en el sistema de levitación magnética y se comprueba el correcto funcionamiento.

4.1. Obtención de las constantes del controlador PID con los diferentes métodos de sintonía.

Figura 65

Valores de las constantes obtenidas con el método de sintonía Ziegler & Nichols para el eje x.



Nota. En la imagen se muestra los parámetros obtenidos en el método de sintonía de Ziegler & Nichols como: k_p , T_i y K_d y las características del proceso para el eje x.

Figura 66

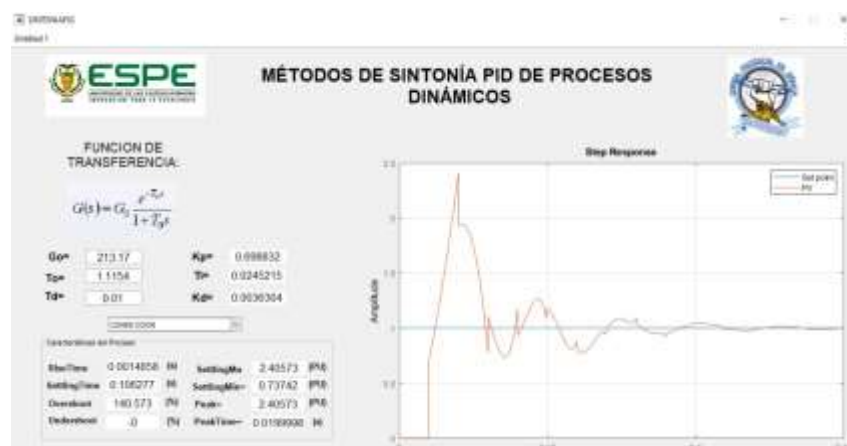
Valores de las constantes obtenidas con el método de sintonía Lambda agresivo para el eje x.



Nota. En la imagen se muestra los parámetros obtenidos en el método de sintonía Lambda agresivo como: k_p , T_i y K_d y las características del proceso para el eje x.

Figura 67

Valores de las constantes obtenidas con el método de sintonía Cohen Coon para el eje x.



Nota. En la imagen se muestra los parámetros obtenidos en el método de sintonía Cohen Coon como: k_p , T_i y K_d y las características del proceso para el eje x.

Figura 68

Valores de las constantes obtenidas con el método de sintonía IAE para el eje

x.



Nota. En la imagen se muestra los parámetros obtenidos en el método de sintonía IAE como: k_p , T_i y K_d y las características del proceso para el eje x.

Figura 69

Valores de las constantes obtenidas con el método de sintonía Ziegler & Nichols para el eje y.



Nota. En la imagen se muestra los parámetros obtenidos en el método de sintonía de Ziegler & Nichols como: k_p , T_i y K_d y las características del proceso para el eje y.

Figura 70

Valores de las constantes obtenidas con el método de sintonía Lambda agresivo para el eje y.



Nota. En la imagen se muestra los parámetros obtenidos en el método de sintonía Lambda agresivo como: k_p , T_i y K_d y las características del proceso para el eje y.

Figura 71

Valores de las constantes obtenidas con el método de sintonía Cohen Coon para el eje y.



Nota. En la imagen se muestra los parámetros obtenidos en el método de sintonía Cohen Coon como: k_p , T_i y K_d y las características del proceso para el eje y.

Figura 72

Valores de las constantes obtenidas con el método de sintonía IAE para el eje y.

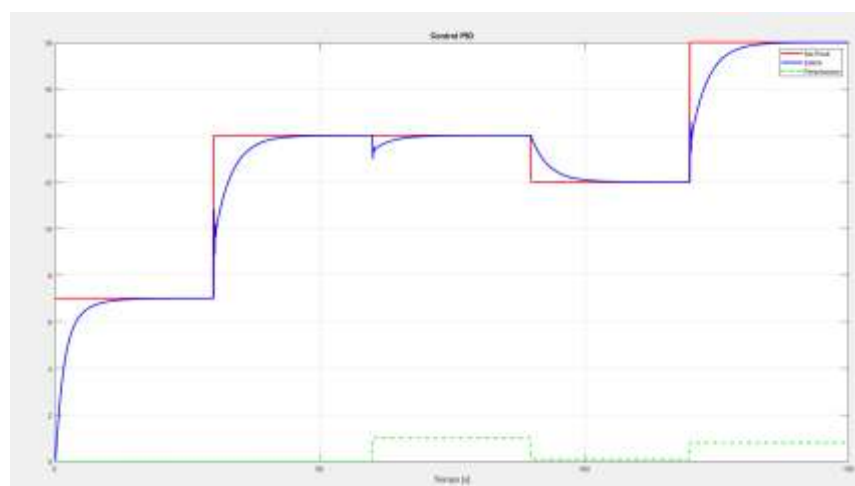


Nota. En la imagen se muestra los parámetros obtenidos en el método de sintonía IAE como: k_p , T_i y K_d y las características del proceso para el eje y.

4.2. Simulación del comportamiento del sistema

Figura 73

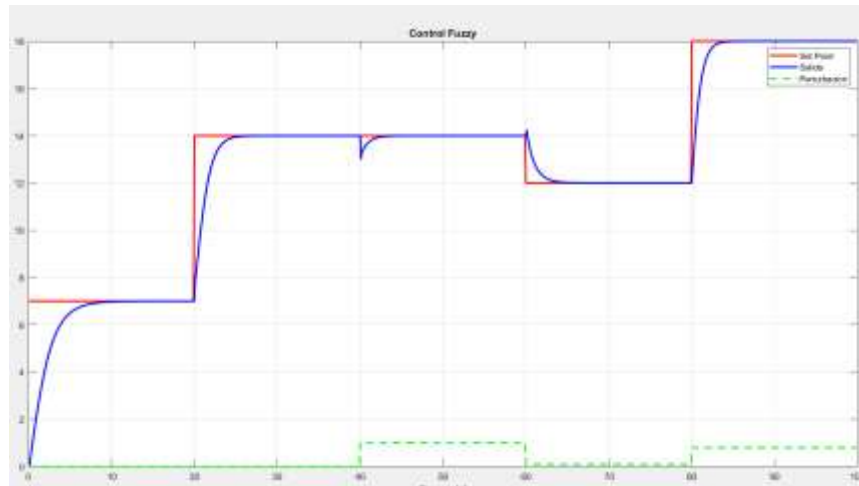
Curva de respuesta del sistema con el control PID.



Nota. En la imagen se muestra la curva de respuesta aplicado el controlador PID de color azul, mientras que el de color rojo corresponde al SET POINT y el de color verde a la perturbación aplicada.

Figura 74

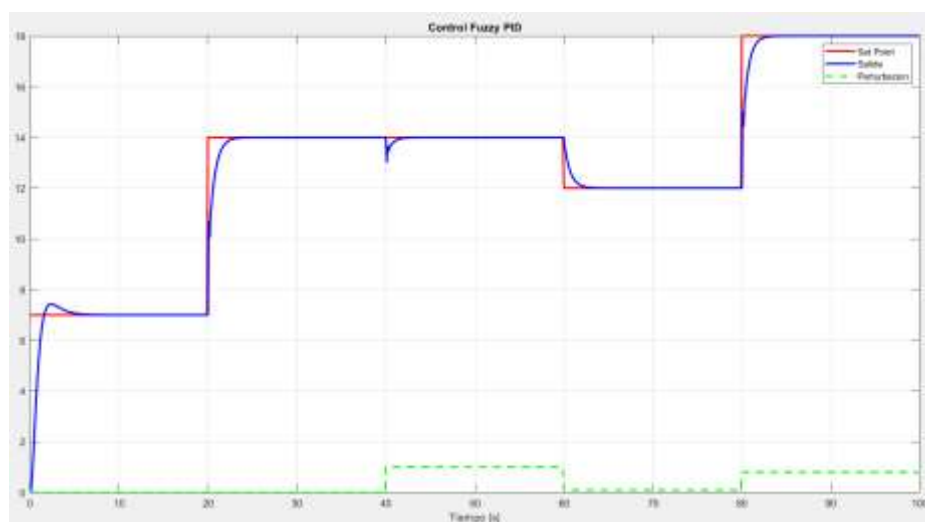
Curva de respuesta del sistema con el control Fuzzy.



Nota. En la imagen se muestra la curva de respuesta aplicado el controlador Fuzzy de color azul, mientras que el de color rojo corresponde al SET POINT y el de color verde a la perturbación aplicada.

Figura 75

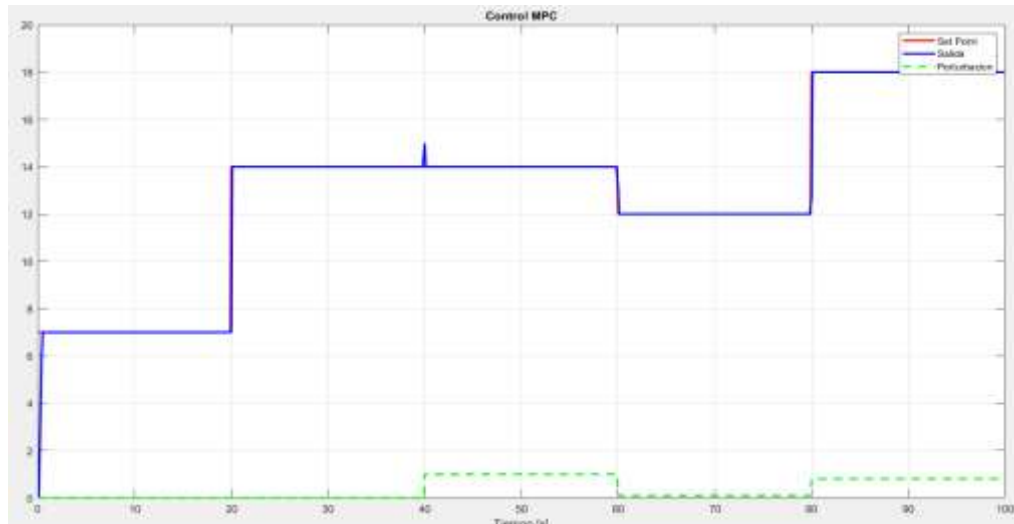
Curva de respuesta del sistema con el control Fuzzy PID.



Nota. En la imagen se muestra la curva de respuesta aplicado el controlador Fuzzy PID de color azul, mientras que el de color rojo corresponde al SET POINT y el de color verde a la perturbación aplicada.

Figura 76

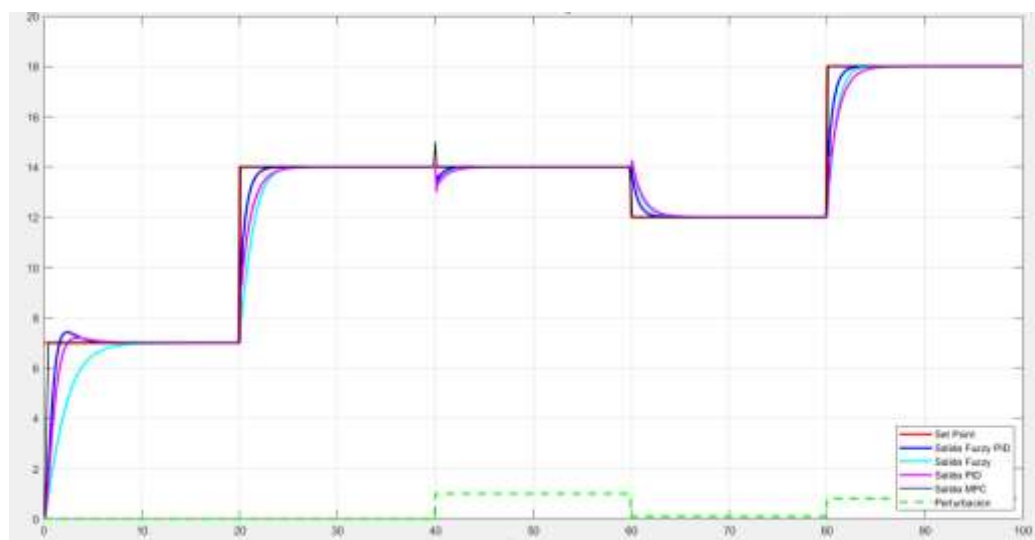
Curva de respuesta del sistema con el control MPC.



Nota. En la imagen se muestra la curva de respuesta aplicado el controlador MPC de color azul, mientras que el de color rojo corresponde al SET POINT y el de color verde a la perturbación aplicada.

Figura 77

Curva de respuesta del sistema comparando los diferentes controladores.



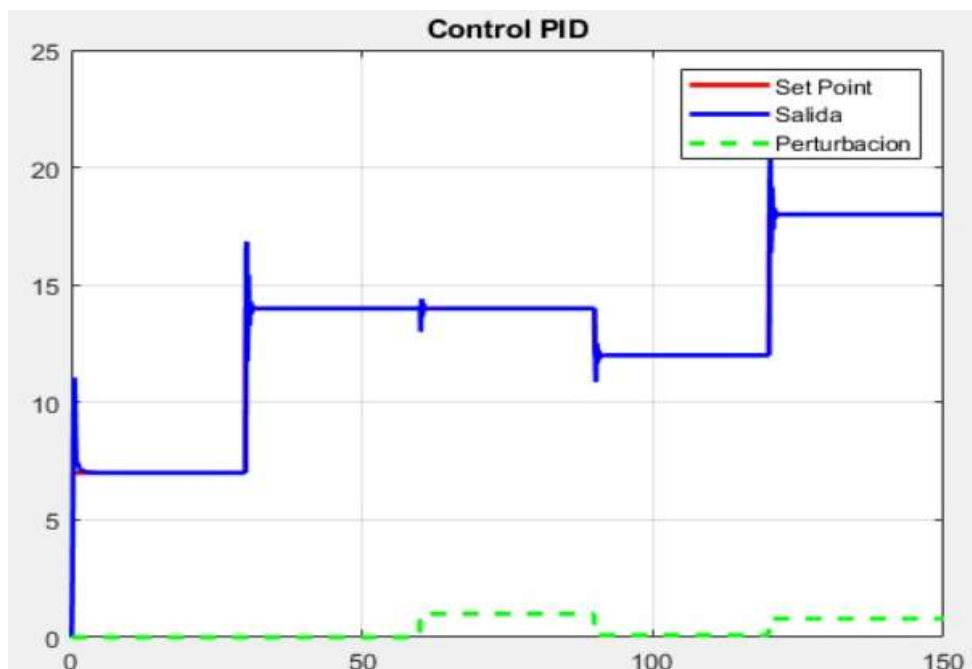
Nota. Al modelo matemático se aplica una función escalón a la que debe seguir aplicando los diferentes tipos de controladores propuestos, las curvas de

respuesta que se tiene a partir del modelo matemático del levitador, en este caso se comparó con el clásico PID y tres controladores modernos: en el primer caso se observa la curva de color rosa correspondiente al controlador PID la rapidez que reacciona pero obtiene un sobre impulso, en el segundo caso con el controlador Fuzzy se mantiene más estable sin sobre impulso pero es de respuesta más lenta que el PID, en el tercer caso el controlador Fuzzy PID se combina con la rapidez que proporciona el PID y se obtiene una respuesta más rápida pero con mayor sobre impulso de todos, mientras que la curva de color negro corresponde al controlador MPC que se trata de un control que predice el comportamiento de la planta en este caso como es simulación se puede observar que es el mejor ya que está en un modelo ya establecido.

a. Respuesta del controlador con el método Ziegler & Nichols

Figura 78

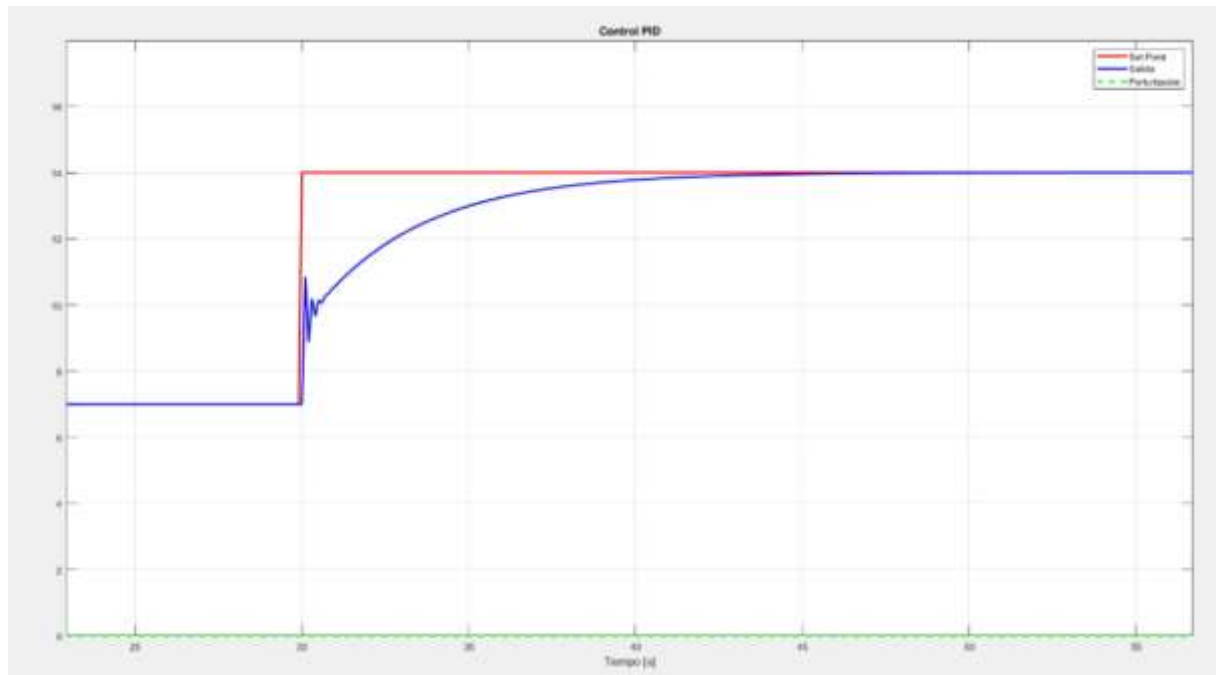
Curva de respuesta del controlador PID con el método de sintonía Ziegler & Nichols.



Nota. En la imagen se muestra la curva de respuesta del control PID aplicando el método de sintonía Ziegler & Nichols de color azul, mientras que el de color rojo corresponde al SET POINT y el de color verde a la perturbación aplicada.

b. Respuesta del controlador con el método Lambda agresivo**Figura 79**

Curva de respuesta del controlador PID con el método de sintonía Lambda agresivo.

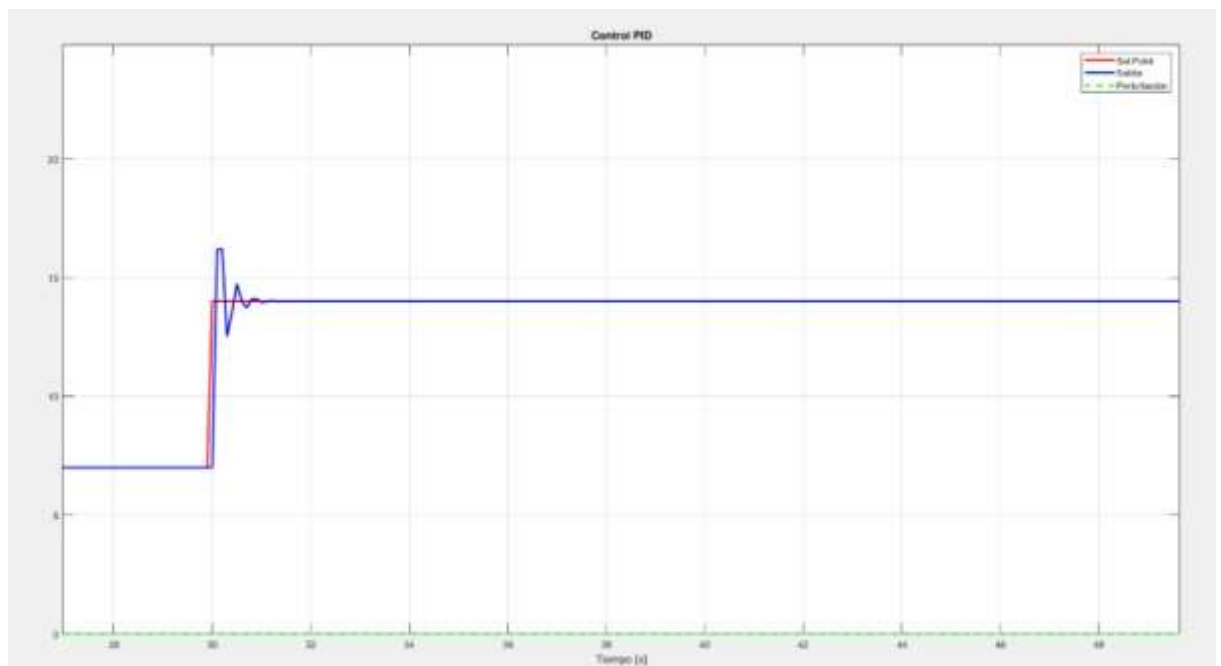


Nota. En la imagen se muestra la curva de respuesta del control PID aplicando el método de sintonía Lambda agresivo de color azul, mientras que el de color rojo corresponde al SET POINT y el de color verde a la perturbación aplicada.

c. Respuesta del controlador con el método Cohen Coon

Figura 80

Curva de respuesta del controlador PID con el método de sintonía Cohen Coon.

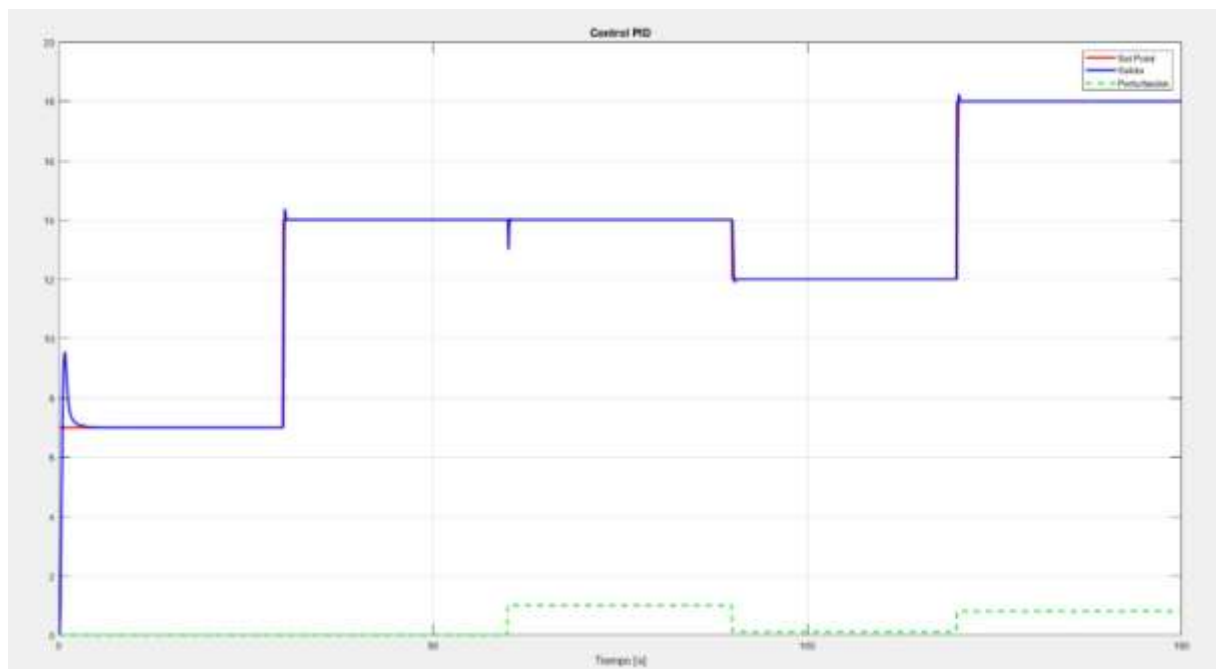


Nota. En la imagen se muestra la curva de respuesta del control PID aplicando el método de sintonía Cohen Coon de color azul, mientras que el de color rojo corresponde al SET POINT y el de color verde a la perturbación aplicada.

d. Respuesta del controlador con el método IAE

Figura 81

Curva de respuesta del controlador PID con el método de sintonía IAE.

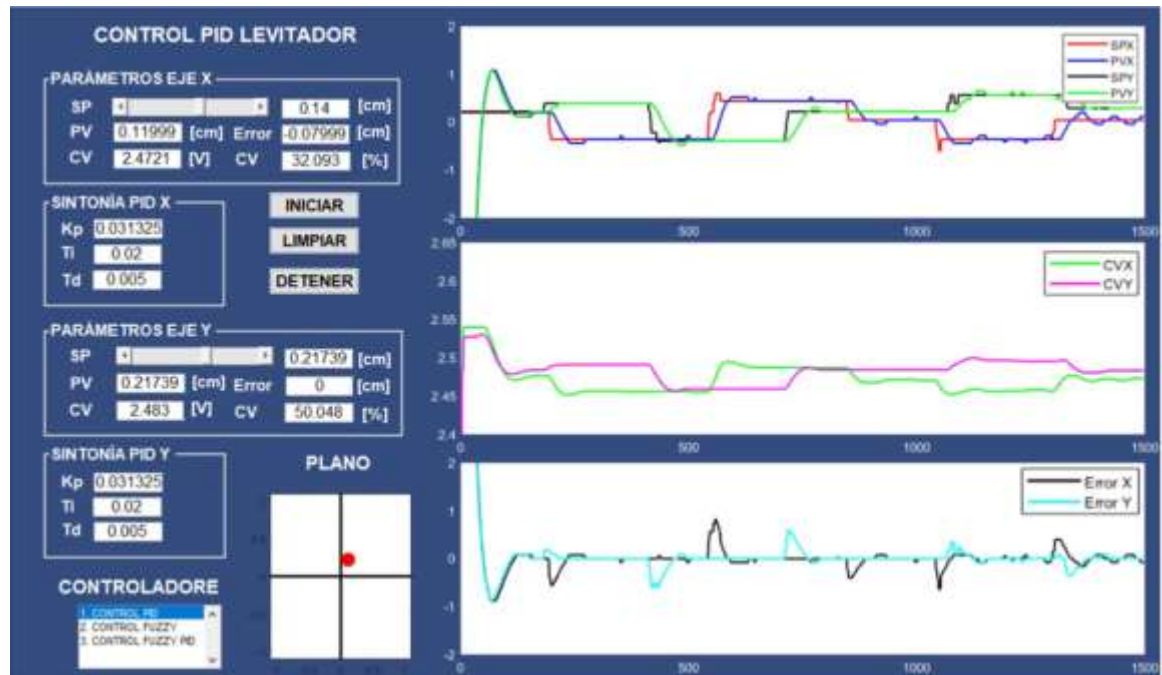


Nota. En la imagen se muestra la curva de respuesta del control PID aplicando el método de sintonía IAE de color azul, mientras que el de color rojo corresponde al SET POINT y el de color verde a la perturbación aplicada.

4.3. Comportamiento del sistema real.

Figura 82

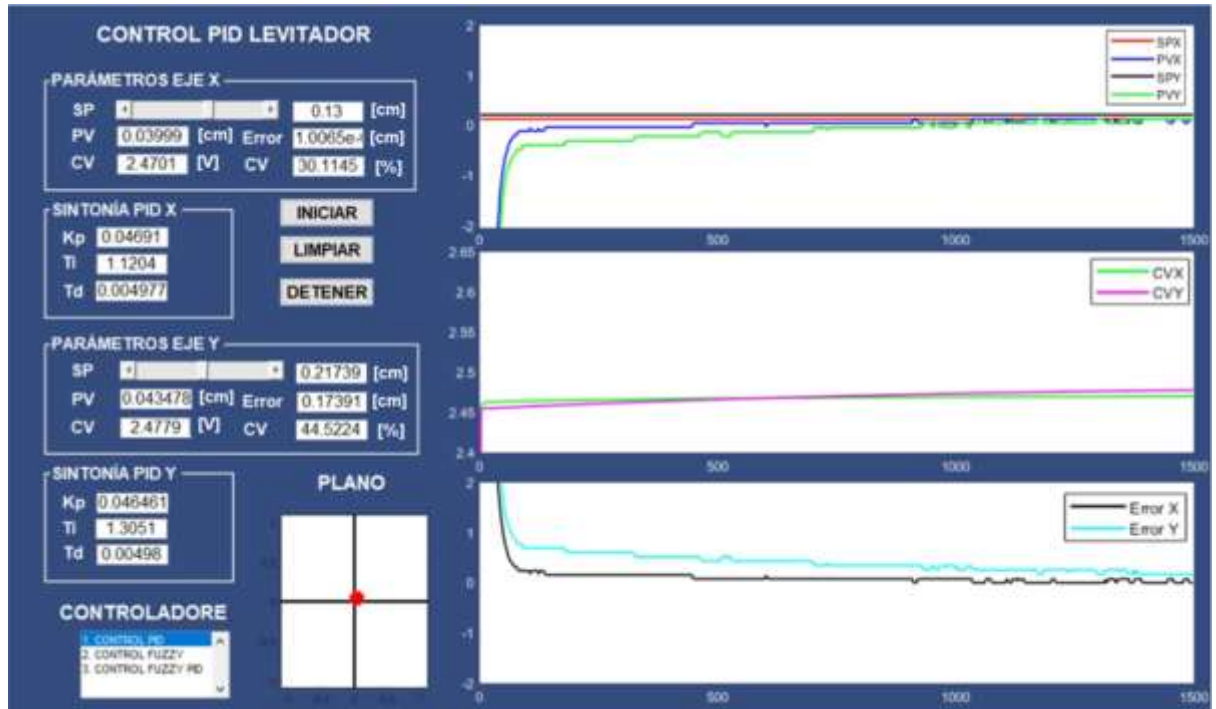
Curva de respuesta del sistema frente a perturbaciones con el controlador PID con sintonía Ziegler & Nichols.



Nota. En la imagen se muestra las constantes K_p , T_i y T_d para el controlador PID con el método de sintonía Ziegler & Nichols en el caso del K_p varía con respecto al valor simulado debido que en el sistema real se realizó sintonía fina, en la primera grafica como se observa la curva de color rojo corresponde al SET POINT en el eje X (SPX) y la curva de color negro el SET POINT en el eje Y (SPY), la curva de color azul corresponde a la variable de proceso (PVX) en el eje X y la curva de color verde a la variable de proceso (PVY) del eje Y, en la segunda grafica se observa la curva de las variables de control tanto en X (CVX) y Y (CVY) y en la última grafica se observa la variación del error tanto en X como en Y.

Figura 83

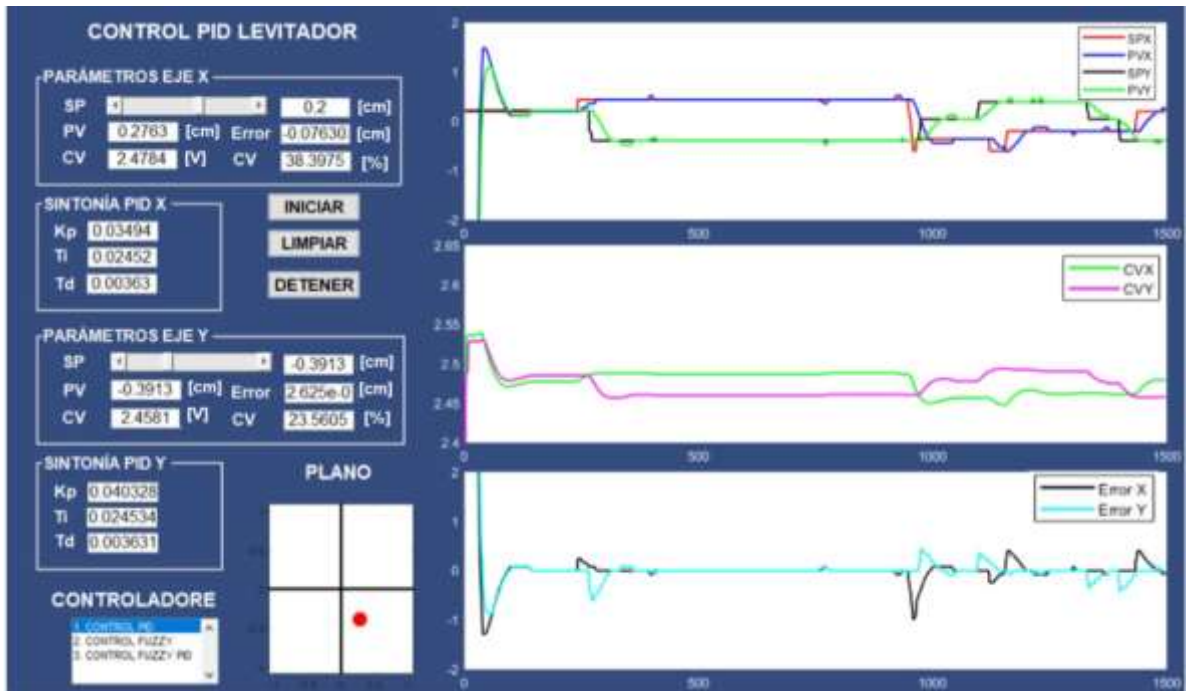
Curva de respuesta del sistema frente a perturbaciones con el controlador PID con sintonía Lambda agresivo.



Nota. En la imagen se muestra las constantes K_p , T_i y T_d para el controlador PID con el método de sintonía Lambda agresivo en el caso del K_p varia con respecto al valor simulado debido que en el sistema real se realizó sintonía fina, en la primera grafica como se observa la curva de color rojo corresponde al SET POINT en el eje X (SPX) y la curva de color negro el SET POINT en el eje Y (SPY), la curva de color azul corresponde a la variable de proceso (PVX) en el eje X y la curva de color verde a la variable de proceso (PVY) del eje Y, en la segunda grafica se observa la curva de las variables de control tanto en X (CVX) y Y (CVY) y en la última grafica se observa la variación del error tanto en X como en Y.

Figura 84

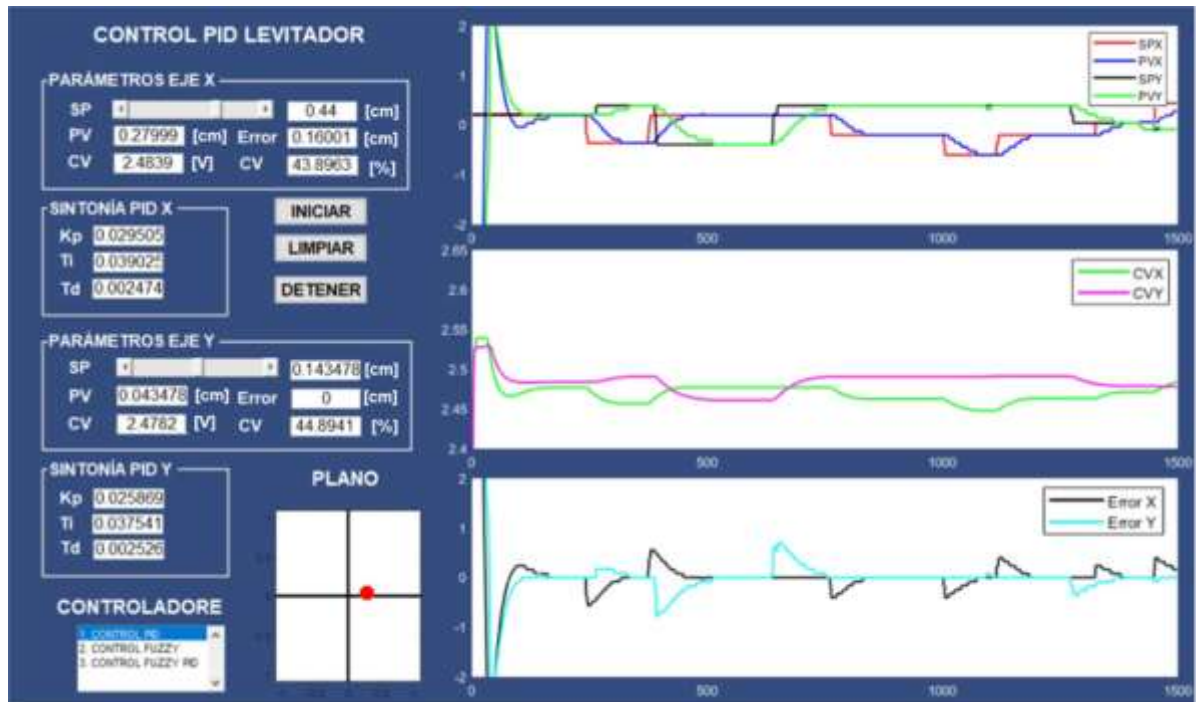
Curva de respuesta del sistema frente a perturbaciones con el controlador PID con sintonía Cohen Coon.



Nota. En la imagen se muestra las constantes K_p , T_i y T_d para el controlador PID con el método de sintonía Cohen Coon en el caso del K_p varía con respecto al valor simulado debido que en el sistema real se realizó sintonía fina, en la primera grafica como se observa la curva de color rojo corresponde al SET POINT en el eje X (SPX) y la curva de color negro el SET POINT en el eje Y (SPY), la curva de color azul corresponde a la variable de proceso (PVX) en el eje X y la curva de color verde a la variable de proceso (PVY) del eje Y, en la segunda grafica se observa la curva de las variables de control tanto en X (CVX) y Y (CVY) y en la última grafica se observa la variación del error tanto en X como en Y.

Figura 85

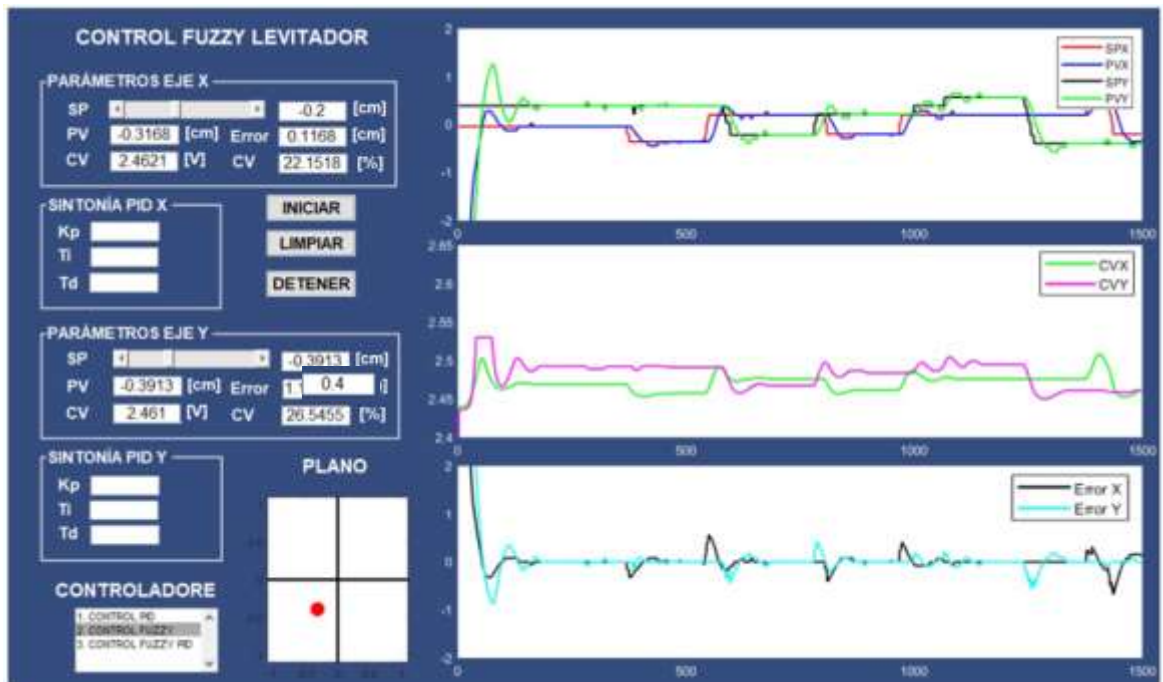
Curva de respuesta del sistema frente a perturbaciones con el controlador PID con sintonía IAE.



Nota. En la imagen se muestra las constantes K_p , T_i y T_d para el controlador PID con el método de sintonía IAE en el caso del K_p varía con respecto al valor simulado debido que en el sistema real se realizó sintonía fina, en la primera grafica como se observa la curva de color rojo corresponde al SET POINT en el eje X (SPX) y la curva de color negro el SET POINT en el eje Y (SPY), la curva de color azul corresponde a la variable de proceso (PVX) en el eje X y la curva de color verde a la variable de proceso (PVY) del eje Y, en la segunda grafica se observa la curva de las variables de control tanto en X (CVX) y Y (CVY) y en la última grafica se observa la variación del error tanto en X como en Y.

Figura 86

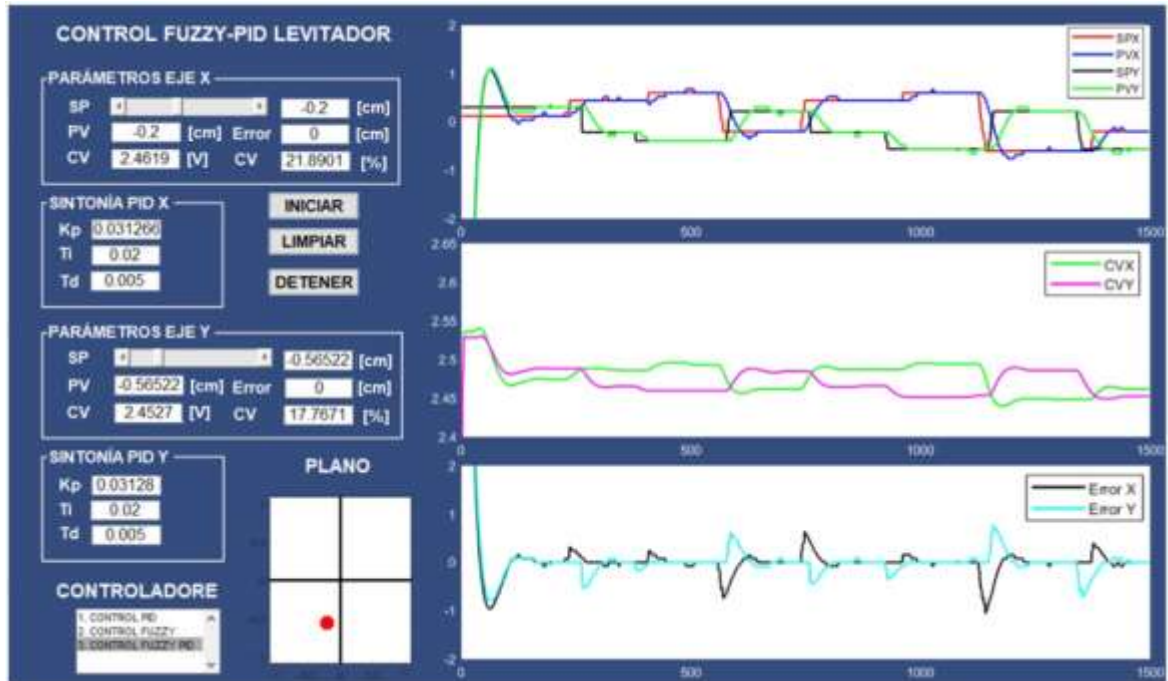
Curva de respuesta del sistema frente a perturbaciones con el controlador Fuzzy.



Nota. En la imagen se muestra las constantes K_p , T_i y T_d para el Controlador Fuzzy en el caso del K_p varía con respecto al valor simulado debido que en el sistema real se realizó sintonía fina, en la primera grafica como se observa la curva de color rojo corresponde al SET POINT en el eje X (SPX) y la curva de color negro el SET POINT en el eje Y (SPY), la curva de color azul corresponde a la variable de proceso (PVX) en el eje X y la curva de color verde a la variable de proceso (PVY) del eje Y, en la segunda grafica se observa la curva de las variables de control tanto en X (CVX) y Y (CVY) y en la última grafica se observa la variación del error tanto en X como en Y.

Figura 87

Curva de respuesta del sistema frente a perturbaciones con el controlador Fuzzy PID.



Nota. En la imagen se muestra las constantes K_p , T_i y T_d para el controlador Fuzzy PID en el caso del K_p varía con respecto al valor simulado debido que en el sistema real se realizó sintonía fina, en la primera grafica como se observa la curva de color rojo corresponde al SET POINT en el eje X (SPX) y la curva de color negro el SET POINT en el eje Y (SPY), la curva de color azul corresponde a la variable de proceso (PVX) en el eje X y la curva de color verde a la variable de proceso (PVY) del eje Y, en la segunda grafica se observa la curva de las variables de control tanto en X (CVX) y Y (CVY) y en la última grafica se observa la variación del error tanto en X como en Y.

Tabla 4*Reglas para el sistema difuso (Fuzzy)*

	NG	NM	NP	Z	PP	PM	PG
NG	NGG	NGG	NGG	NG	NM	NP	Z
NM	NGG	NGG	NG	NM	NP	Z	PP
NP	NGG	NGG	NM	NP	Z	PP	PM
Z	NG	NM	NP	Z	PP	PM	PG
PP	NM	NP	Z	PP	PM	PG	PGG
PM	NP	Z	PP	PM	PG	PGG	PGG
PG	Z	PP	PM	PG	PGG	PGG	PGG

NG: Negativo Grande

NM: Negativo Mediano

NP: Negativo Pequeño

Z: Cero

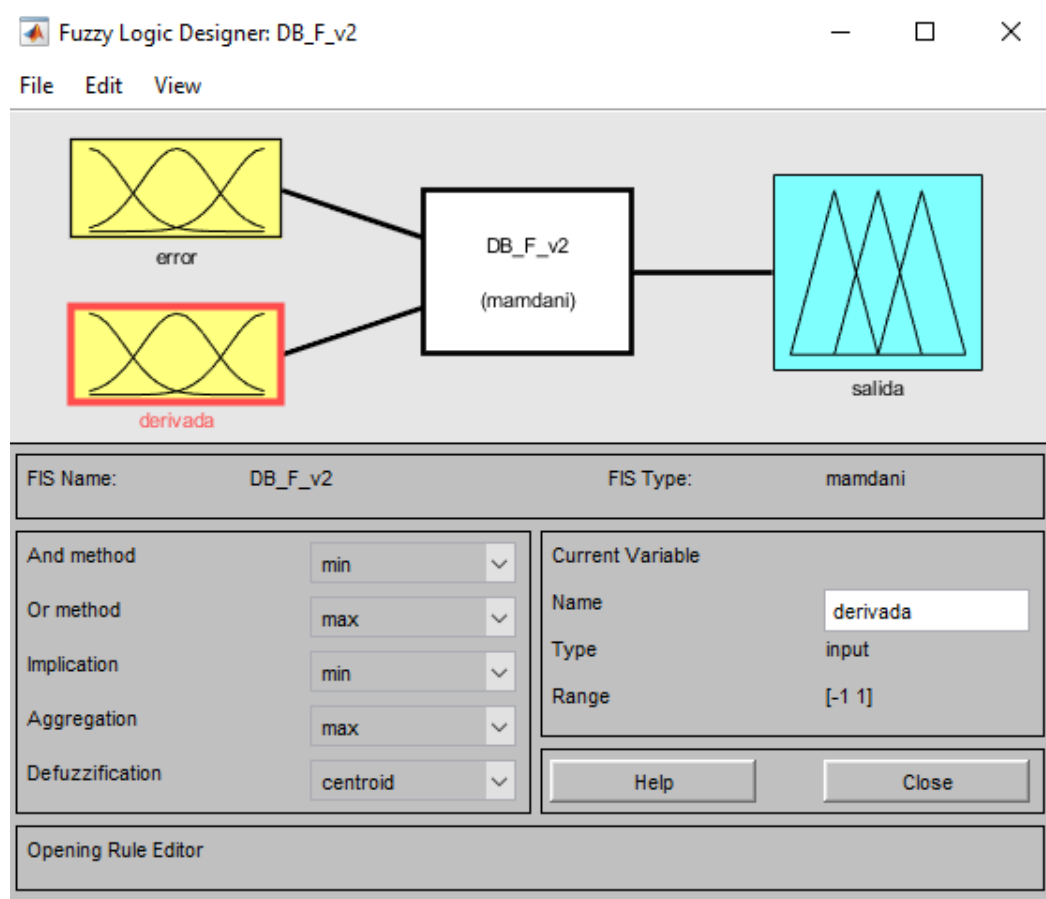
PP: Positivo Pequeño

PM: Positivo Mediano

PG: Positivo Grande

Figura 88

Diagrama de lógica Fuzzy.

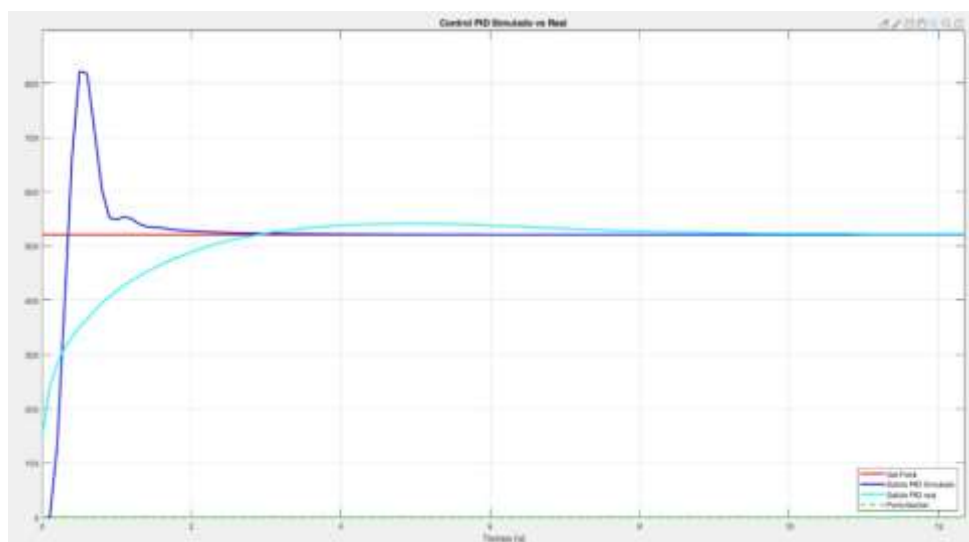
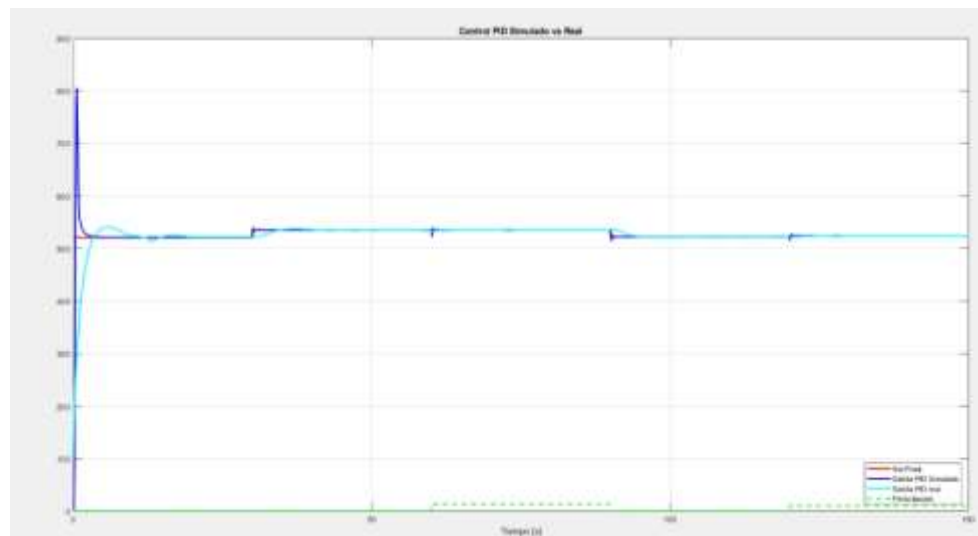


Nota. En la imagen se muestra el diagrama de la lógica difusa las entradas y la salida que se obtiene.

4.4. Comparación mediante la aplicación de los controladores en el sistema simulado y real.

Figura 89

Curva de respuesta del sistema simulado vs real, frente a perturbaciones con el controlador PID mediante sintonía Ziegler & Nichols.



Nota. En la imagen se muestra las gráficas de comparación del controlador PID con el método de sintonía Ziegler & Nichols simulado de color azul y real de color celeste, en el cual se observa el comportamiento de la planta.

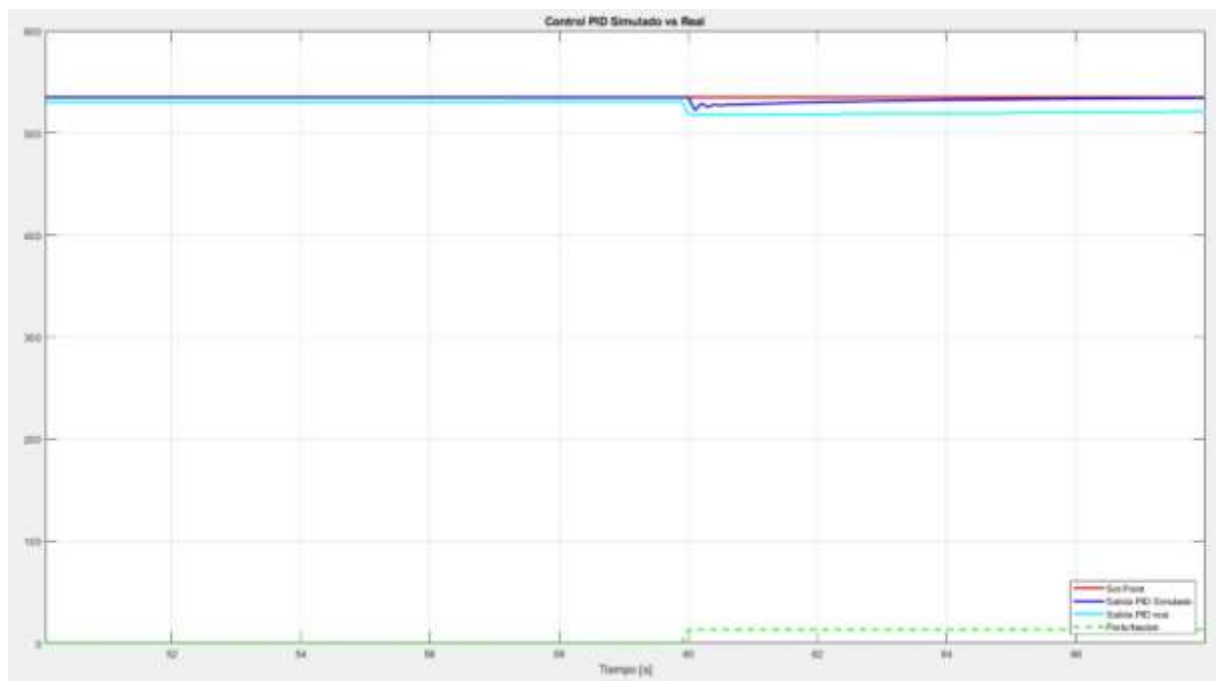
Tabla 5

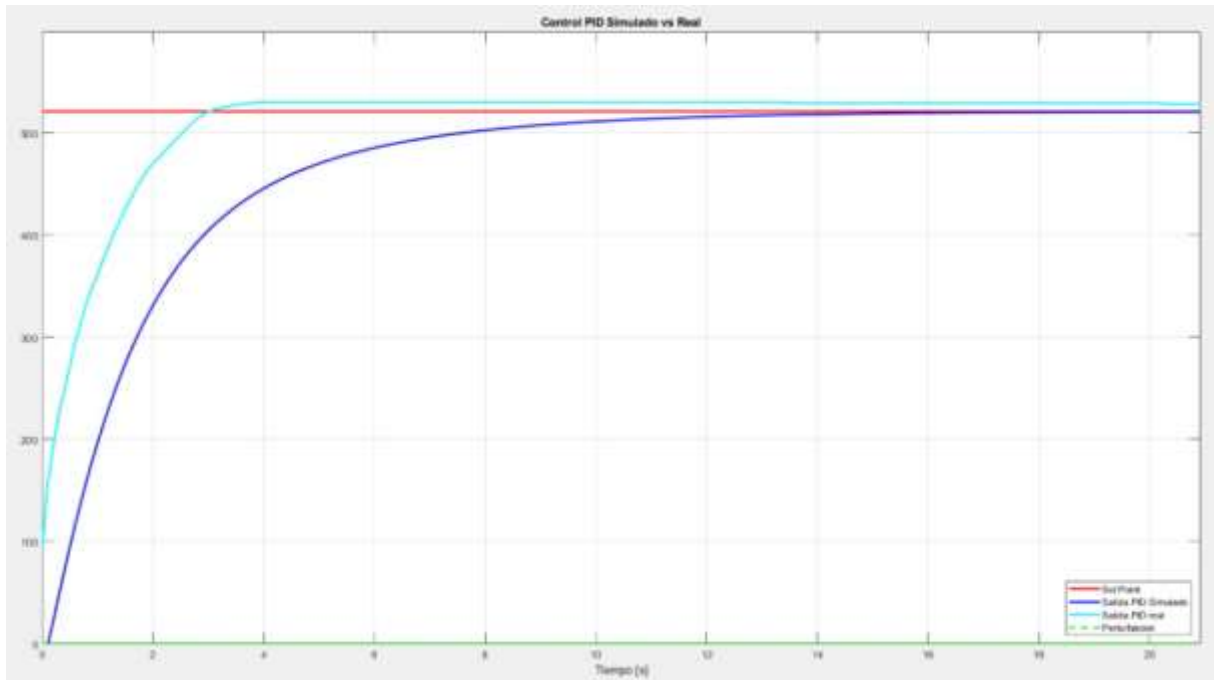
Comparación sistema simulado vs real con el controlador PID con método Ziegler & Nichols

PARÁMETROS	SISTEMA SIMULADO	SISTEMA REAL
Tiempo pico	$tp = 0,1 s$	$tp = 5 s$
Máximo sobreimpulso	$Mp = 80,5\%$	$Mp = 54\%$
Tiempo de establecimiento	$ts = 2,7 s$	$ts = 8,5 s$

Figura 90

Curva de respuesta del sistema simulado vs real, frente a perturbaciones con el controlador PID mediante sintonía Lambda agresivo.





Nota. En la imagen se muestra las gráficas de comparación del controlador PID con el método de sintonía Lambda agresivo simulado de color azul y real de color celeste, en el cual se observa el comportamiento de la planta.

Tabla 6

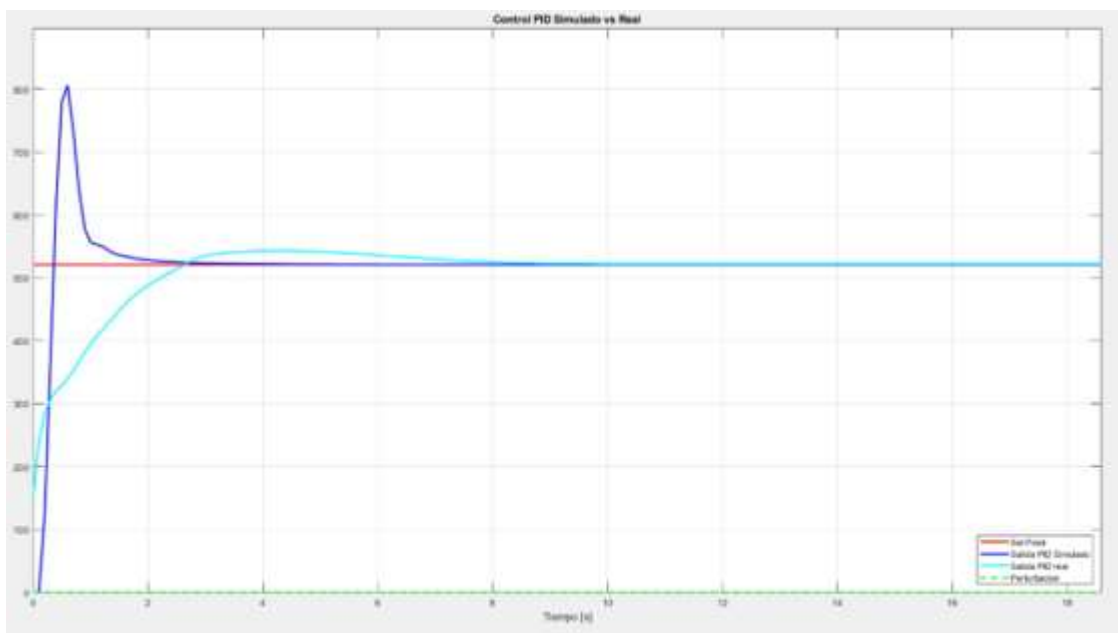
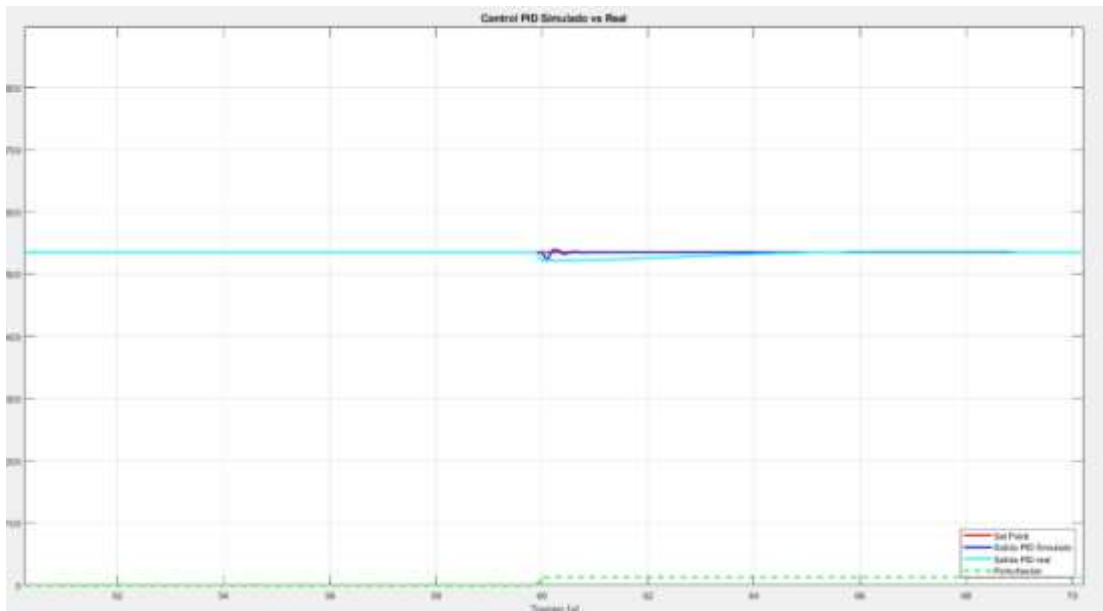
Comparación sistema simulado vs real con el controlador PID con el método

Lambda agresivo

PARÁMETROS	SISTEMA SIMULADO	SISTEMA REAL
Tiempo pico	$tp = 14 \text{ s}$	$tp = 4 \text{ s}$
Máximo sobreimpulso	$Mp = 53\%$	$Mp = 50\%$
Tiempo de establecimiento	$ts = 16 \text{ s}$	$ts = 25 \text{ s}$

Figura 91

Curva de respuesta del sistema simulado vs real, frente a perturbaciones con el controlador PID mediante sintonía Cohen Coon.



Nota. En la imagen se muestra las gráficas de comparación del controlador PID con el método de sintonía Cohen Coon simulado de color azul y real de color celeste, en el cual se observa el comportamiento de la planta.

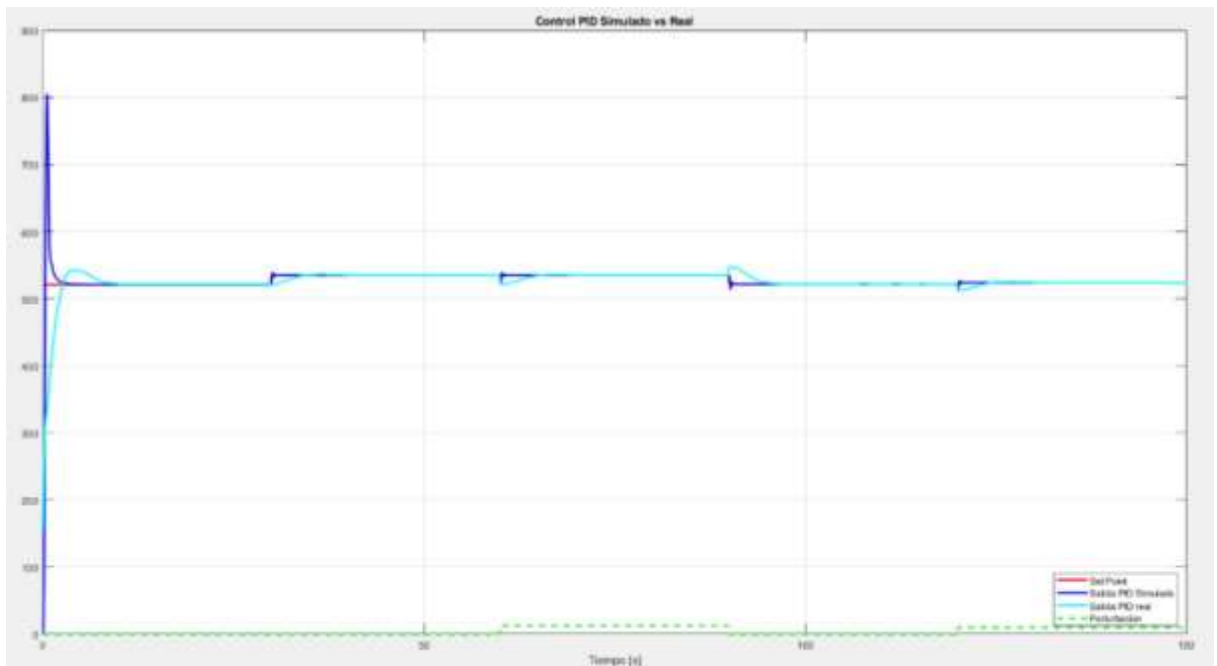
Tabla 7

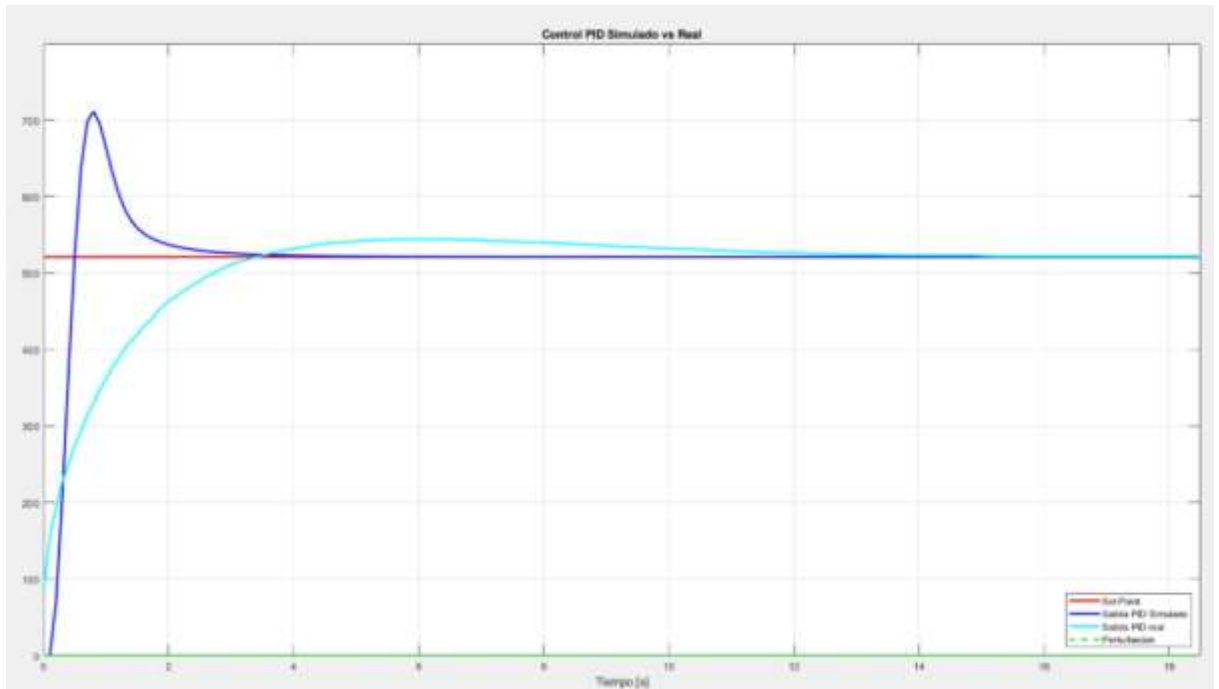
Comparación sistema simulado vs rea con el controlador PID con el método Cohen Coon

PARÁMETROS	SISTEMA SIMULADO	SISTEMA REAL
Tiempo pico	$tp = 0,77 s$	$tp = 4 s$
Máximo sobreimpulso	$Mp = 80\%$	$Mp = 54\%$
Tiempo de establecimiento	$ts = 2,62 s$	$ts = 8 s$

Figura 92

Curva de respuesta del sistema simulado vs real, frente a perturbaciones con el controlador PID mediante sintonía IAE.





Nota. En la imagen se muestra las gráficas de comparación del controlador PID con el método de sintonía IAE simulado de color azul y real de color celeste, en el cual se observa el comportamiento de la planta.

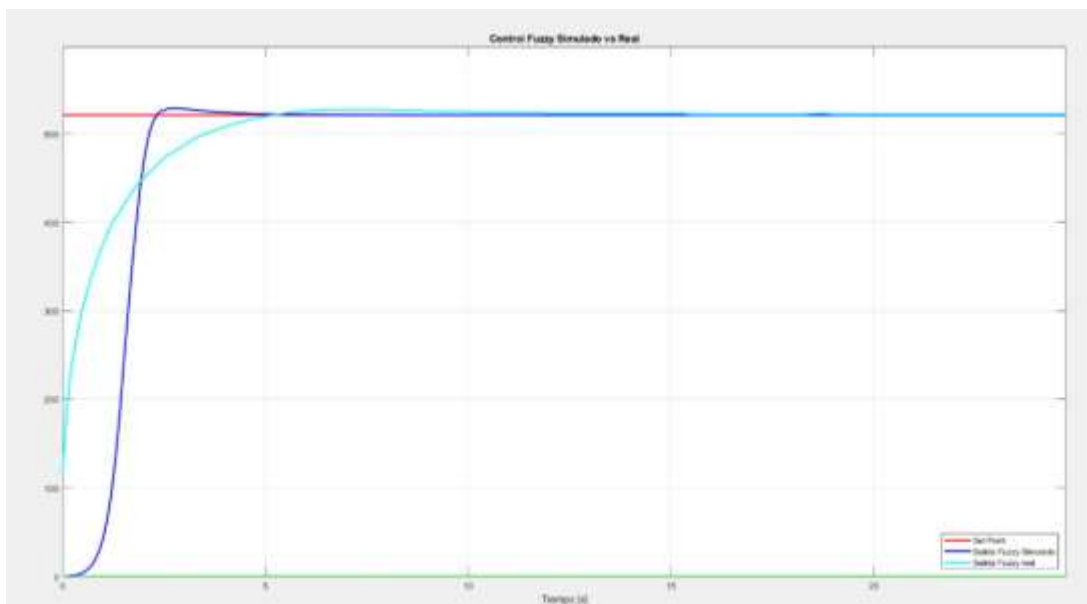
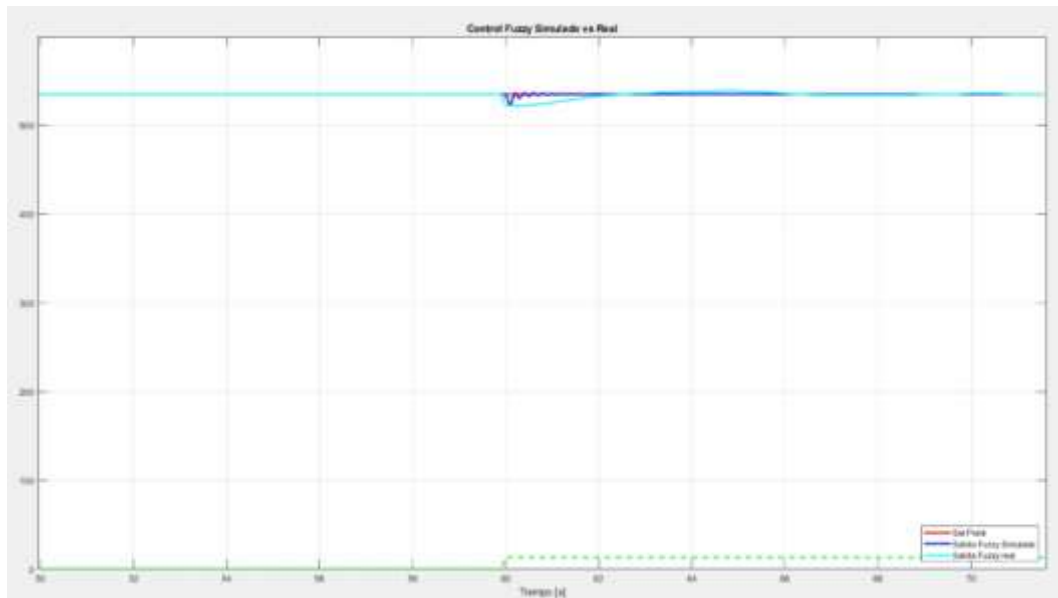
Tabla 8

Comparación sistema simulado vs real con el controlador PID con el método IAE

PARÁMETROS	SISTEMA SIMULADO	SISTEMA REAL
Tiempo pico	$tp = 0,857 s$	$tp = 6 s$
Máximo sobreimpulso	$Mp = 71\%$	$Mp = 54\%$
Tiempo de establecimiento	$ts = 3,428 s$	$ts = 13,714 s$

Figura 93

Curva de respuesta del sistema simulado vs real, frente a perturbaciones con el controlador Fuzzy.



Nota. En la imagen se muestra las gráficas de comparación del controlador Fuzzy con el simulado de color azul y real de color celeste, en el cual se observa el comportamiento de la planta.

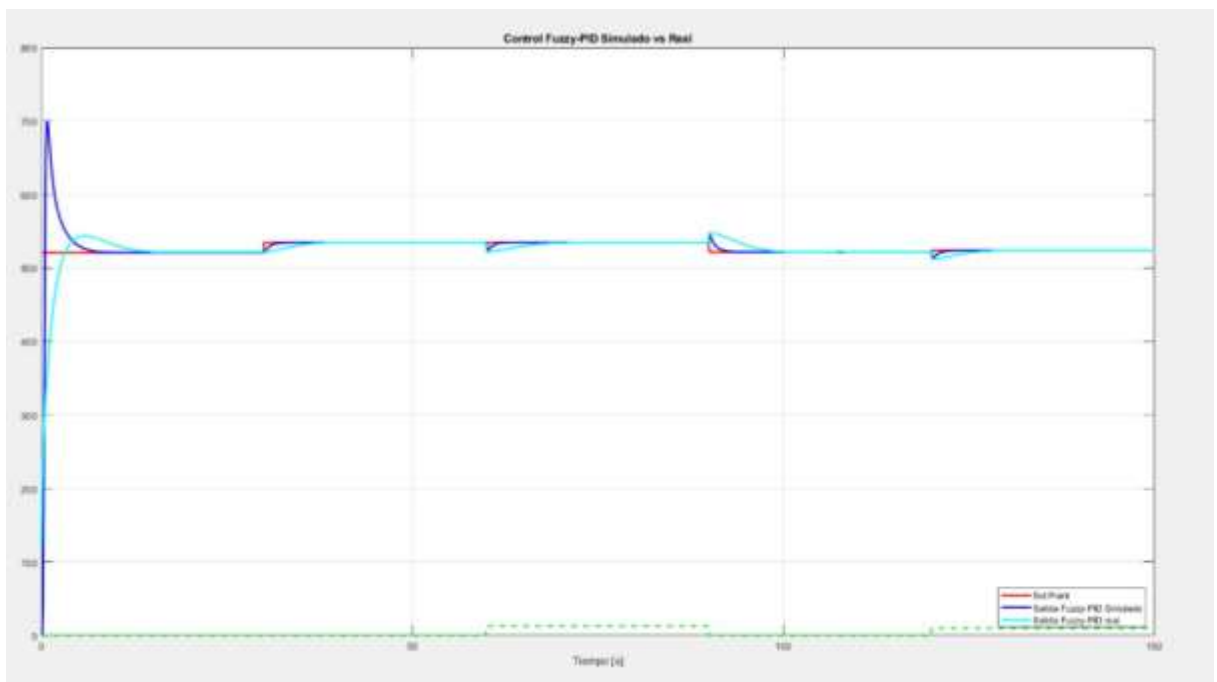
Tabla 9

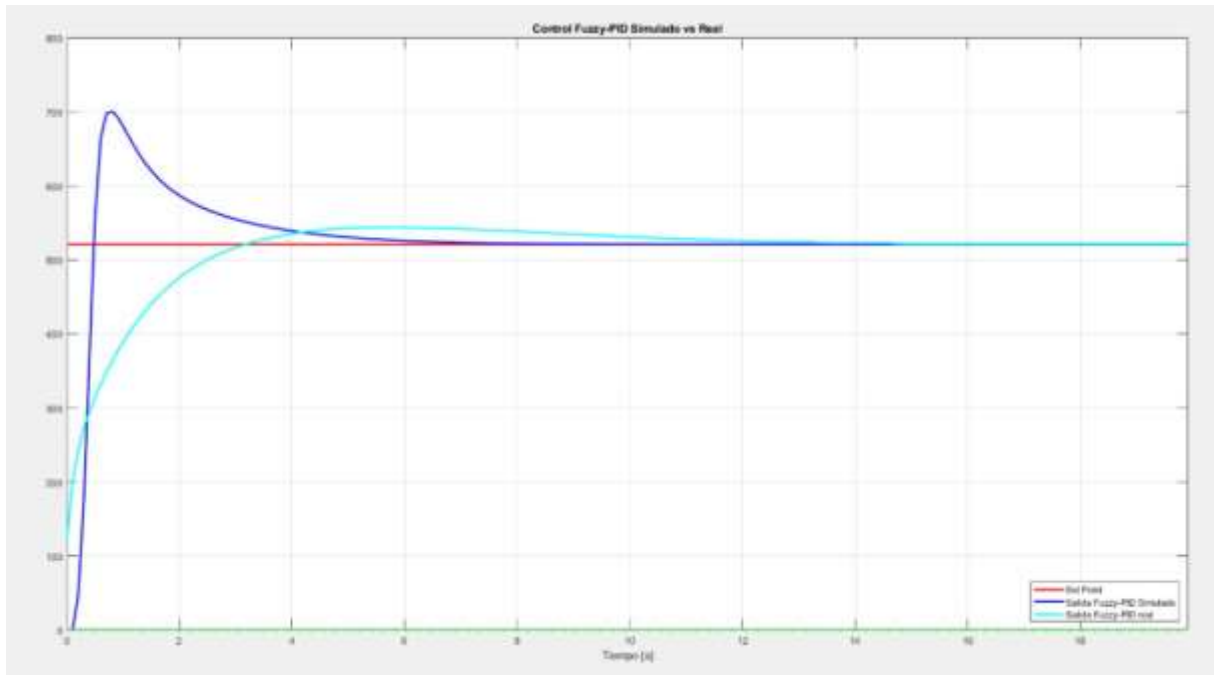
Comparación sistema simulado vs real con el controlador Fuzzy

PARÁMETROS	SISTEMA SIMULADO	SISTEMA REAL
Tiempo pico	$tp = 1,2s$	$tp = 7,2s$
Máximo sobreimpulso	$Mp = 54\%$	$Mp = 53\%$
Tiempo de establecimiento	$ts = 5,3$	$ts = 12s$

Figura 94

Curva de respuesta del sistema simulado vs real, frente a perturbaciones con el controlador Fuzzy PID.





Nota. En la imagen se muestra las gráficas de comparación del controlador Fuzzy PID con el simulado de color azul y real de color celeste, en el cual se observa el comportamiento de la planta.

Tabla 10

Comparación sistema simulado vs real con el controlador Fuzzy PID

PARÁMETROS	SISTEMA SIMULADO	SISTEMA REAL
Tiempo pico	$tp = 1,2s$	$tp = 4,2s$
Máximo sobreimpulso	$Mp = 70\%$	$Mp = 54\%$
Tiempo de establecimiento	$ts = 7,72s$	$ts = 12,7s$

Capítulo V

5. Conclusiones y Recomendaciones

5.1. Conclusiones

Con la investigación e implementación del proyecto se pudo concluir que el principio de la suspensión electrodinámica corta las líneas de campo magnética del imán levitado, con lo que se produce un campo magnético cambiante, creando líneas de campo repulsivas permitiendo que el imán tenga una correcta suspensión.

Se realizó la investigación de los algoritmos de control clásicos como: el PID con los métodos de sintonía Ziegler & Nichols, Lambda agresivo, Cohen Coon y el IAE, en la evaluación del algoritmo clásico se determina que la mejor respuesta se obtuvo con el método de sintonía IAE y los algoritmos de control modernos como: Fuzzy y Fuzzy PID, se obtuvo mejor resultado con el controlador Fuzzy PID.

Se diseñó e implementó un prototipo de levitación magnética para ello fue necesario la ayuda del software Proteus, debido a que es una herramienta que facilita la construcción de esquemas electrónicos, simulación y diseño de circuitos impresos. Este software facilitó la construcción de la planta con todas las medidas, donde va a estar ubicado cada componente, tanto en la placa de control y de potencia.

El modelo matemático obtenido es válido para controlar la posición del imán, donde se obtuvo un porcentaje de efectividad para el movimiento del eje x de 83.47% y para el movimiento en el eje y de 90.36%, en el modelo se considera un comportamiento ideal por lo tanto los métodos de control utilizados son efectivos y presentan respuestas satisfactorias.

El control clásico (PID) y moderno (Fuzzy y Fuzzy PID) se lo realizó en el software Matlab, el cual permite tener una interfaz interactiva para el estudiante y de fácil comprensión, que mediante las curvas de respuestas obtenidas permiten la visualización del comportamiento del sistema y el movimiento del electroimán en el plano de dimensiones 2D.

En el proyecto se realizó las respectivas comparaciones de los controladores clásicos y modernos, tanto en el sistema simulado y el real obteniendo las curvas de respuesta del comportamiento del sistema en ambos casos, observando una diferencia debido a que el sistema simulado puede aproximarse al real pero no va a ser igual. Se puede concluir que un trabajo a futuro es factible debido a la manera de cómo se encuentra realizado el proyecto, hacer un estudio para ampliar la distancia de movimiento en los ejes x e y, como también un control de levitación en el eje z, permitiendo un sistema de levitación magnética en tres dimensiones.

5.2. Recomendaciones

Realizar pruebas de polaridad en los imanes, electroimanes e imán de levitación, para asegurar un correcto funcionamiento al momento de excitar los mismos y no se produzcan errores en el sistema de levitación magnética.

Tomar en cuenta las dimensiones de la placa de levitación para ubicar los elementos (electroimán, imán y sensores), debido a que la parte estructural también influye al momento del desarrollo del control y el funcionamiento del sistema.

Al realizar pruebas de funcionamiento se debe tomar en cuenta no alterar la posición de los sensores de Efecto Hall, ya que este influye en la correcta lectura de la posición del imán suspendido dando un error.

Revisar los voltajes de los ejes x,y,z tanto de los sensores como de los potenciómetros lineales para la operación inicial y posteriores pruebas desde la tarjeta de control(DAC).

Se debe realizar varios filtrados al momento de obtener la señal del sensor ya que el sensor adquirido proporciona una señal sinusoidal por lo que se dificulta la lectura de datos y se requiere realizar la linealización.

Para posteriores proyectos realizar pruebas de la posición de los imanes y electroimanes para incrementar el rango de desplazamiento en los ejes x e y.

Bibliografía

- Cho, D., Kato, Y., & Spilman, D. (1993). Sliding Mode and Classical Control Magnetic Levitation System. *IEEE*.
- Bejerano, P. (2013). Maglev: cómo funcionan los trenes de levitación magnética. *Blogthinkbig.com*.
- Checa, F. (2009). Diseño e implementación de controladores.
- Espinosa, U., Aceves, A., Vega, A., & Carbajal, C. (1995). Sistema de levitación magnética controlado con lógica difusa y control clásico.
- Ollervides, J., Santibáñez, V., Llama, M., & Dzul, A. (2010). Aplicación de Control Borroso a un Sistema de Suspensión Magnética: Comparación Experimental. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*.
- Direct Industry*. (2021). *Qué sensor de posición elegir*. Recuperado el 02 de Agosto del 2021, de <https://guide.directindustry.com/es/que-sensor-de-posicion-elegir/>
- EcuRed*. (22 de Enero de 2012). *Sensor hall*. Recuperado el 21 de Enero del 2021, de https://www.ecured.cu/Sensor_hall
- Perez, M., Hidalgo, A., & Berenguer, E. (2008). INTRODUCCION A LOS SISTEMAS DE CONTROL Y MODELO MATEMÁTICO PARA SISTEMAS LINEALES.
- Lei, S., & Palazzolo, A. (2008). Control of flexible rotor systems with active magnetic bearings. *Journal of Sound and Vibration*, 314(1), 19-38.
- Golob, M., & Tovornik, B. (2003). Modeling and control of the magnetic suspension system. *ISA transactions*, 42(1), 89-100.
- Qin, Y., Peng, H., Ruan, W., Wu, J., & Gao, J. (2014). A modeling and control approach to magnetic levitation system based on state-dependent ARX model. *Journal of Process Control*, 24(1), 93-112.
- Bächle, T., Hentzelt, S., & Graichen, K. (2013). Nonlinear model predictive control of a magnetic levitation system. *Control Engineering Practice*, 21(9), 1250-1258.

- Ciencia Canaria*. (13 de Noviembre de 2015). *Campos magnéticos*. Recuperado el 02 de Agosto del 2021, de <https://www.cienciacanaria.es/secciones/a-fondo/593-los-secretos-de-la-levitacion>
- Chen, S. L., & Weng, C. C. (2010). Robust control of a voltage-controlled three-pole active magnetic bearing system. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 15(3), 381-388.
- Lundberg, Lilienkamp, & Marsden. (2004). Low-Cost Magnetic Levitation Project Kits. *IEEE Control Systems Magazine*.
- Khan Academy*. (15 de Octubre 2021). *Fuerza magnética*. Recuperado el 01 de Agosto del 2021, de <https://es.khanacademy.org/science/physics/magnetic-forces-and-magnetic-fields/magnets-magnetic/a/what-is-magnetic-force>
- Du, H., Zhang, N., Ji, J. C., & Gao. W. (2010). Robust fuzzy control of an active magnetic bearing subject to voltage saturation. *IEEE transactions on control systems technology*, 18(1), 164-169.
- Beltran-Carbajal, F., Valderrabano-Gonzalez, A., Rosas-Caro, J. C., & Favela-Contreras, A. (2015). Output feedback control of a mechanical system using magnetic levitation. *ISA transactions*, 57, 352-359.
- Tsuda, M., Tamashiro, K., Sasaki, S., Yagai, T., Hamajima, T., Yamada, T., & Yasui, K. (2009). Vibration transmission characteristics against vertical vibration in magnetic levitation type HTS seismic/vibration isolation device. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 19(3), 2249-2252.
- Hasirci, U., Balikci, A., Zabar, Z., & Birenbaum, L. (2011). A novel magnetic-levitation system: design, implementation, and nonlinear control. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 39(1), 492-497.
- Kummer, M. P., Abbott, J. J., Kratochvil, B. E., Borer, R., Sengul, A., & Nelson, B. J. (2010). OctoMag: An electromagnetic system for 5-DOF wireless micromanipulation. *IEEE Transactions on Robotics*, 26(6), 1006-1017.

- Arredondo, I., Jugo, J., & Etxebarria, V. (2008). Modeling and control of a flexible rotor system with AMB-based sustentation. *ISA transactions*, 47(1), 101-112.
- Wai, R. J., Lee, J. D., & Chuang, K. L. (2011). Real-time PID control strategy for maglev transportation system via particle swarm optimization. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(2), 629-646.
- Peijnenburg, A. T. A., Vermeulen, J. P. M., & Van Eijk, J. (2006). Magnetic levitation systems compared to conventional bearing systems. *Microelectronic engineering*, 83(4), 1372-1375.
- Kimman, M. H., Langen, H. H., & Schmidt, R. M. (2010). A miniature milling spindle with active magnetic bearings. *Mechatronics*, 20(2), 224-235.
- Lee, J. H., Allaire, P. E., Tao, G., Decker, J. A., & Zhang, X. (2003). Experimental study of sliding mode control for a benchmark magnetic bearing system and artificial heart pump suspension. *IEEE Transactions on control systems technology*, 11(1), 128-138.
- ARDUINO.cl. (2010). *Arduino Nano*. Recuperado el 02 de Agosto del 2021, de <https://arduino.cl/arduino-nano/>
- LLamas, L. (Lunes de Junio de 2021). *Ingeniería, informática y diseño*. Recuperado el 02 de agosto de 2021, de <https://www.luisllamas.es/salida-analogica-real-con-arduino-y-dac-de-12bits-mcp4725/>
- HETPRO. (2021). *I2C*. Recuperado el 02 de agosto de 2021, de <https://hetpro-store.com/TUTORIALES/i2c/>
- Perren, G. (2003). *ESTUDIO DE LAS APLICACIONES PRÁCTICAS DE LEVITACIÓN MAGNÉTICA (TRENES MAGLEV)*.

Zadeh. (s.f.). *Descripción general de las técnicas de lógica difusa*. Recuperado el 02 de Agosto del 2021, de <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6887/04Rpp04de11.pdf>

Carvajal, J., Chen, G., & Haluk, O. (2000). Fuzzy PID controller: Design, performance evaluation, and stability analysis.

Zhen, Z., & Yan, G. A. O. (2013). Design of the Fuzzy PID Controller for the Hot Runner Temperature Control System.

Padhee, S. (2011). *Control of a Ball and Beam System*. M. Recuperado el 02 de Agosto del 2021, de http://data.mecheng.adelaide.edu.au/robotics/projects/2007/BallBeam/Wei_Final_Thesis.pdf

Ibrahim, I. N., & Al Akkad, M. A. (2016). *Exploiting an intelligent fuzzy-PID system in nonlinear aircraft pitch control*. Recuperado el 03 de Agosto del 2021, de <https://doi.org/10.1109/SIBCON.2016.7491828>

Castaño Giraldo, S. (s.f.). *Control Predictivo*. Recuperado el 03 de Agosto del 2021, de <https://controlautomaticoeducacion.com/control-predictivo/>

Guerra, C. (2007). *LÓGICA DIFUSA Y SISTEMAS DE CONTROL*.

Pruna, E., Andaluz, V., Proaño, L., Carvajal, C., Escobar, I., & Pilatásig, M. (2016). Construcción y Análisis de PID, Fuzzy y Controladores predictivos en el sistema de flujo.

Castaño Giraldo, S. A. (2021). *Control Automático Educación*. Recuperado el 03 de Agosto del 2021, de <https://controlautomaticoeducacion.com/control-realimentado/metodo-de-la-integral-del-error-sintonia-controlador-pid/>

Milena, J. (2010). Control Lineal y No Lineal de un Levitador Magnético.

Zhen, Z., & Yan, G. (2013). Design of fuzzy PID controller for the hot runner temperature control system.

Padhee, S. (06 de Julio de 2011). *Control of a Ball and Beam System*. Recuperado el 03 de Agosto del 2021, de http://data.mecheng.adelaide.edu.au/robotics/projects/2007/BallBeam/Wei_Final_Thesis.pdf

ARDUINO.cc. (2021). *Arduino Mega 2560 REV3*. Recuperado el 03 de Agosto del 2021, de <https://store.arduino.cc/usa/mega-2560-r3>

Raspberry Pi 4. (2021). *Completely upgraded*. Recuperado el 03 de Agosto del 2021, de <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-4-model-b/>

Anexos