



**CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS  
AVANZADOS DEL INSTITUTO POLITÉCNICO  
NACIONAL**

**UNIDAD ZACATENCO**

**DEPARTAMENTO DE CONTROL AUTOMÁTICO**

**Desarrollo de Plataformas Experimentales de Bajo  
Costo Para la Enseñanza del Control Automático.**

**TESIS**

Que presenta

**M.C. JESSICA JAZMÍN MALDONADO RAMOS**

Para Obtener el Grado de

**DOCTORA EN CIENCIAS**

En la Especialidad de

**CONTROL AUTOMÁTICO**

Director de Tesis

**Dr. Rubén Alejandro Garrido Moctezuma**

Ciudad de México

Agosto 2021

# Índice general

<b>Índice de tablas</b>	<b>VIII</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>IX</b>
<b>Resumen</b>	<b>XIV</b>
<b>Abstract</b>	<b>XV</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	1
1.2. Objetivos . . . . .	5
1.3. Publicaciones . . . . .	6
1.3.1. Revista . . . . .	6
1.3.2. Congresos Internacionales . . . . .	6
1.3.3. Congresos Nacionales . . . . .	7
<b>2. Metodología Educativa</b>	<b>9</b>
2.1. Educación Integral . . . . .	9
2.2. Métodos de enseñanza . . . . .	11
2.2.1. Aprendizaje Pasivo . . . . .	11

# ÍNDICE GENERAL

2.2.2. Aprendizaje Activo . . . . .	12
2.3. Objetivos educativos . . . . .	13
2.4. Enseñanza del Control Automático . . . . .	16
<b>3. Entornos de experimentación</b>	<b>19</b>
3.1. Simulaciones numéricas . . . . .	20
3.1.1. Simulaciones virtuales . . . . .	20
3.1.2. Simulaciones numéricas <i>in situ</i> . . . . .	21
3.2. Plataformas experimentales . . . . .	23
3.2.1. Plataformas remotas . . . . .	23
3.2.2. Plataformas experimentales <i>in situ</i> . . . . .	24
<b>4. Descripción y construcción de las Plataformas Educativas Experimentales</b>	<b>26</b>
4.1. Plataforma Educativa Experimental V1 . . . . .	28
4.1.1. <i>Hardware</i> . . . . .	28
4.1.1.1. Servomotor de Radio Control . . . . .	28
4.1.1.2. Amplificador de potencia . . . . .	31
4.1.1.3. Sensor de Posición . . . . .	32
4.1.1.4. Fuentes de Alimentación . . . . .	33
4.1.1.5. Costo . . . . .	34
4.1.2. <i>Software</i> . . . . .	35
4.1.2.1. Matlab . . . . .	35
4.1.2.2. Simulink . . . . .	35

## ÍNDICE GENERAL

4.1.2.3. Quarc . . . . .	36
4.2. Plataforma Educativa Experimental V2 . . . . .	36
4.2.1. <i>Hardware</i> . . . . .	38
4.2.1.1. Servomotor LEGO . . . . .	38
4.2.1.2. Tarjeta STM32F4 Discovery . . . . .	39
4.2.1.3. Tarjeta H1D1A-V1 . . . . .	41
4.2.1.4. Costo . . . . .	44
4.2.2. <i>Software</i> . . . . .	44
4.2.2.1. Principio de operación . . . . .	44
4.2.2.2. Matlab/Simulink . . . . .	46
4.2.2.3. Waijung Blockset . . . . .	48
4.2.2.4. UC3M Addon Blockset . . . . .	48
4.2.2.5. STM32 ST-LINK Utility . . . . .	48
4.3. Estudio Comparativo . . . . .	48
<b>5. Identificación paramétrica y Teoría de Control: Algoritmos básicos</b>	<b>52</b>
5.1. Modelo matemático del servomotor de CD y su amplificador de potencia	53
5.2. Configuración Experimental . . . . .	53
5.2.1. PEE-V1 . . . . .	53
5.2.2. PEE-V2 . . . . .	55
5.3. Algoritmo PI con realimentación	
taquimétrica y <i>anti-windup</i> . . . . .	57
5.3.1. Teoría . . . . .	57



## ÍNDICE GENERAL

5.3.2. Resultados Experimentales . . . . .	61
5.3.2.1. Implementación del algoritmo de control PIRT + <i>anti-windup</i> usando la PEE-V1 . . . . .	61
5.3.2.2. Implementación del algoritmo de control PIRT + <i>anti-windup</i> usando la PEE-V2 . . . . .	66
5.4. Identificación paramétrica: Algoritmo de Mínimos Cuadrados . . . . .	71
5.4.1. Teoría . . . . .	71
5.4.2. Resultados Experimentales . . . . .	75
5.4.2.1. Implementación usando la PEE-V1 . . . . .	75
5.4.2.2. Implementación usando la PEE-V2 . . . . .	76
5.5. Observador de estados . . . . .	79
5.5.1. Teoría . . . . .	79
5.5.2. Resultados Experimentales . . . . .	82
5.5.2.1. Implementación del algoritmo de control PIRT + <i>anti-windup</i> + observador de estados usando la PEE-V1 . . . . .	82
5.5.2.2. Implementación del algoritmo de control PIRT + observador de estados + <i>antiwindup</i> usando la PEE-V2 . . . . .	88
5.6. Conclusiones . . . . .	93
<b>6. Teoría de Control: Algoritmos avanzados</b>	<b>95</b>
6.1. Observador de Perturbaciones . . . . .	96
6.1.1. Teoría . . . . .	96
6.1.2. Resultados Experimentales . . . . .	99

## ÍNDICE GENERAL

6.1.2.1. Implementación del algoritmo de control P+RT con ob- servador de perturbaciones (OP) usando la PEE-V2 . . . .	99
6.2. Diferenciador de Levant . . . . .	103
6.2.1. Teoría . . . . .	103
6.2.2. Resultados Experimentales . . . . .	106
6.2.2.1. PEE-V2 . . . . .	106
6.3. Conclusiones . . . . .	111
<b>7. Práctica de Laboratorio empleando la plataforma educativa PEE-V2</b>	<b>113</b>
7.1. Diseño de una exposición y de su práctica de laboratorio . . . . .	114
7.1.1. Práctica de Laboratorio: PIRT . . . . .	118
7.1.1.1. Preliminares . . . . .	118
7.1.1.2. Objetivos . . . . .	119
7.1.1.3. Práctica . . . . .	119
7.1.1.4. Preguntas . . . . .	120
<b>8. Evaluación de la plataforma PEE-V2 en un entorno de enseñanza</b>	<b>122</b>
8.1. Seminario de Control en Tiempo Real para Servomotores . . . . .	123
8.1.1. Conclusiones . . . . .	131
<b>9. Conclusiones y Trabajo Futuro</b>	<b>132</b>
9.1. Conclusiones . . . . .	132
9.2. Trabajo Futuro . . . . .	134
<b>A. Instalación de software para el uso de la PEE-V2</b>	<b>136</b>

## ÍNDICE GENERAL

<b>B. Modelo matemático de un servomotor y su amplificador de potencia</b>	<b>138</b>
<b>C. Esquemático de la plataforma PEE-V2</b>	<b>145</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>147</b>

# Índice de tablas

4.1. Características del servomotor Hitec HS-485HB. . . . .	30
4.2. Características técnicas básicas del LM675 . . . . .	31
4.3. Componentes del Amplificador de Potencia . . . . .	32
4.4. Componentes de la Fuente de Alimentación . . . . .	33
4.5. Lista de costo de la PEE-V1 en pesos mexicanos . . . . .	34
4.6. Componentes del Kit DV1.0 . . . . .	36
4.7. Características técnicas del servomotor LEGO . . . . .	38
4.8. Características del DRV8838 . . . . .	44
4.9. Costo de los componentes de la PEE-V2. Precios Enero 2021. . . . .	45
4.10. Ventajas y Desventajas de las Plataformas Educativas Experimentales. . . . .	50
4.11. Diferencias y Similitudes entre las Plataformas Educativas Experimentales. . . . .	51
5.1. Ganacias de los controladores PIRT y PIRT + <i>antiwindup</i> . Experimentos en la plataforma PEE-V1 . . . . .	62
5.2. Ganacias de los controladores PIRT y PIRT + <i>anti-windup</i> . Experimentos en la plataforma PEE-V2 . . . . .	67
5.3. Experimentos de Identificación Paramétrica . . . . .	76
5.4. Experimentos de Identificación Paramétrica . . . . .	77
5.5. Ganacias de los controladores PIRT + Observador y PIRT + Observador + <i>antiwindup</i> . Experimentos en la plataforma PEE-V1 . . . . .	83
5.6. Ganacias de los controladores PIRT + Observador y PIRT + Observador + <i>antiwindup</i> . Experimentos en la plataforma PEE-V2 . . . . .	88
6.1. Ganacias e índices de desempeño del controlador P+RT+OP. . . . .	100
6.2. Ganacias e índices de desempeño del controlador PIRT+DL. . . . .	107
B.1. Parámetros del modelo matemático del servomotor (B.1) . . . . .	140

# Índice de figuras

2.1. Pasos para la creación de una evaluación . . . . .	14
2.2. Enseñanza de Control Automático . . . . .	17
3.1. Entornos de experimentación . . . . .	20
4.1. Plataforma Educativa Experimental V1 . . . . .	27
4.2. Plataforma Educativa Experimental V2 . . . . .	27
4.3. Servomotor de RC HS-485HB. . . . .	29
4.4. Servomotor de RC HS-485HB y su tarjeta de control. . . . .	30
4.5. Servomotor de RC modificado sin la electrónica interna y con conexiones directas al potenciómetro y al motor de CD. . . . .	30
4.6. Diagrama del Amplificador de Potencia. . . . .	31
4.7. Diagrama de la conexión del potenciómetro. . . . .	32
4.8. Diagrama de la Fuente de Alimentación. . . . .	33
4.9. Vista cercana al servomotor de RC de la PEE-V1 . . . . .	35
4.10. Plataforma Experimental PEE-V2. . . . .	37
4.11. Servomotor LEGO NXT (izquierda) y EV3 (derecha) . . . . .	38
4.12. Codificador Óptico en el servomotor LEGO EV3. La disposición es la misma para el servomotor LEGO NXT. [1] . . . . .	39
4.13. Tarjeta STM32F4 Discovery . . . . .	41
4.14. Tarjeta H1D1A-V1 . . . . .	42
4.15. Montaje de las Tarjeta H1D1A-V1 y STM32F4 . . . . .	43
4.16. Principio de operación del software de la PEE-V2 . . . . .	46
4.17. Programa de Implementación del algoritmo PID . . . . .	47
4.18. Programa de Monitoreo correspondiente al algoritmo PID . . . . .	47
5.1. Configuración experimental de la PEE-V1 . . . . .	55
5.2. Transformación de la señal de control $u$ . . . . .	56
5.3. Configuración experimental de la PEE-V2 . . . . .	56
5.4. Diagrama de bloques del controlador PIRT con $F = 160$ . . . . .	59
5.5. Diagrama de bloques del controlador PIRT con <i>Anti-windup</i> y $F = 160$ . . . . .	61
5.6. Señal de Referencia R1 y salida del servosistema en lazo cerrado usando el algoritmo PIRT. . . . .	63
5.7. Señal de control usando la Referencia R1 y el algoritmo PIRT. . . . .	64
5.8. Señal de error de posición usando la Referencia R1 y el algoritmo PIRT. . . . .	64

## ÍNDICE DE FIGURAS

5.9. Señal de Referencia R2 y salida del servosistema en lazo cerrado usando los algoritmos PIRT y PIRT + <i>antiwindup</i> . . . . .	65
5.10. Señal de control usando la Referencia R2 y los algoritmos PIRT y PIRT + <i>antiwindup</i> . . . . .	65
5.11. Señal de error de posición usando la Referencia R2 y los algoritmos PIRT y PIRT + <i>antiwindup</i> . . . . .	66
5.12. Señal de Referencia R1 y salida del servosistema en lazo cerrado usando el algoritmo PIRT. . . . .	68
5.13. Señal de control usando la Referencia R1 y el algoritmo PIRT. . . . .	68
5.14. Señal de error de posición usando la referencia R1 y el algoritmo PIRT. . . . .	69
5.15. Señal de Referencia R2 y salida del servosistema en lazo cerrado usando los algoritmos de PIRT y PIRT + <i>antiwindup</i> . . . . .	69
5.16. Señal de control usando la Referencia R2 y los algoritmos PIRT y PIRT + <i>antiwindup</i> . . . . .	70
5.17. Señal de error de posición usando la Referencia R2 y los algoritmos PIRT y PIRT + <i>antiwindup</i> . . . . .	70
5.18. Diagrama de bloques del controlador P+RT y el algoritmo de identificación paramétrica . . . . .	75
5.19. Señal de referencia y salida usando el algoritmo de mínimo cuadrado . . . . .	76
5.20. Señal de referencia y salida usando el algoritmo de mínimo cuadrado . . . . .	77
5.21. Señal de referencia y salida usando el algoritmo de Mínimos Cuadrados . . . . .	78
5.22. Señal de control usando el algoritmo de Mínimos Cuadrados . . . . .	78
5.23. Diagrama de bloques del controlador PIRT con <i>Anti-windup</i> y el observador de estados . . . . .	82
5.24. Señal de Referencia R1 y salida del servosistema en lazo cerrado usando el algoritmo PIRT + observador de estados. . . . .	85
5.25. Señal de control usando la Referencia R1 y el algoritmo PIRT + observador de estados. . . . .	85
5.26. Señal de error de posición usando la Referencia R1 y el algoritmo PIRT + observador de estados. . . . .	86
5.27. Señal de Referencia R2 y salida del servosistema en lazo cerrado usando los algoritmos PIRT + observador de estados y PIRT + observador de estados + <i>antiwindup</i> . . . . .	86
5.28. Señal de control usando la Referencia R2 y los algoritmos PIRT + observador de estados y PIRT + observador de estados + <i>antiwindup</i> . . . . .	87
5.29. Señal de error de posición usando la Referencia R2 y los algoritmos PIRT + observador de estados y PIRT + observador de estados + <i>antiwindup</i> . . . . .	87
5.30. Señal de Referencia R1 y salida del servosistema en lazo cerrado usando el algoritmo PIRT + observador de estados. . . . .	90
5.31. Señal de control usando la Referencia R1 y el algoritmo PIRT + observador de estados. . . . .	90
5.32. Señal de error de posición usando la Referencia R1 y el algoritmo PIRT + observador de estados. . . . .	91

## ÍNDICE DE FIGURAS

5.33. Señal de Referencia R2 y salida del servosistema en lazo cerrado usando los algoritmos PIRT + observador de estados y PIRT + observador de estados + <i>antiwindup</i> . . . . .	91
5.34. Señal de control usando la Referencia R2 y los algoritmos PIRT + observador de estados y PIRT + observador de estados + <i>antiwindup</i> . . . . .	92
5.35. Señal de error de posición usando la Referencia R2 y los algoritmos PIRT + observador de estados y PIRT + observador de estados + <i>antiwindup</i> .	92
6.1. Diagrama de bloques del controlador PD+OP y el modelo nominal de la Plataforma Educativa Experimental considerando que la velocidad angular está disponible. . . . .	98
6.2. Diagrama de bloques del controlador PD+OP y el modelo nominal de la Plataforma Educativa Experimental considerando que la velocidad angular se estima usando un filtro con $F = 160$ . . . . .	99
6.3. Posición vs Referencia usando el controlador P+RT+OP. . . . .	101
6.4. Señales de control usando el controlador P+RT+OP con $\beta = 0, 0.21, 0.5$ . .	102
6.5. Señal de control usando el controlador P+RT+OP. . . . .	103
6.6. Diagrama de bloques del controlador PIRT+Diferenciador de Levant. . .	106
6.7. Posición vs Referencia usando el controlador PIRT+DL. . . . .	108
6.8. Señal de control usando el controlador PIRT+DL. . . . .	109
6.9. Señal de error de posición usando el controlador PIRT+DL. . . . .	110
6.10. Estimación de la velocidad usando el diferenciador de Levant. . . . .	111
7.1. Clasificación de los niveles cognitivos definidos por Bloom . . . . .	115
7.2. Clasificación de preguntas basadas en el nivel cognitivo . . . . .	116
7.3. Diagrama de Simulink para el controlador PIRT . . . . .	120
8.1. Seminario de Control en Tiempo Real para Servomecanismos . . . . .	124
8.2. Encuesta del Seminario de Control en Tiempo Real para Servomotores .	127
8.3. Resultados de la encuesta del Seminario de Control en Tiempo Real para Servomotores . . . . .	128
B.1. Esquema básico de un servomecanismo . . . . .	139
B.2. Diagrama de un servomotor de CD incluyendo sus subsistemas eléctrico y mecánico . . . . .	139
C.1. Esquema de conexión para la plataforma PEE-V2 . . . . .	146

*Dedicado a  
mi familia, mi pareja y mis amigos.*



# Agradecimientos

- A mi mamá, a mi papá y a mis hermanos por siempre creer en mí.
- A mi pareja por no dejarme caer.
- A mis amigos por ayudarme a levantarme una y otra vez.
- Al Ing. Jesús y al Ing. Gerardo, sin ustedes la plataforma no existiría.
- A mi asesor, el Dr. Rubén Garrido, por cambiarme la vida y ver un potencial en mí que desconocía.
- Al Departamento de Control Automático por aceptarme y formarme.
- Al CINVESTAV y a CONACyT por la beca y el apoyo que me permitió terminar mi doctorado.

# Resumen

En este trabajo se presenta dos propuestas de plataformas educativas experimentales cuyo objetivo principal es apoyar la enseñanza de las carreras de Mecatrónica, Robótica y Control Automático mediante la evaluación de algoritmos de control bajo una metodología de educación como transacción. Se explica la metodología de educación y se hace hincapié en el uso de métodos de aprendizaje activo y la creación de objetivos educativos basados en los niveles cognitivos definidos en la taxonomía de Bloom.

Se detalla la construcción y ensamble de las plataformas educativas experimentales y la implementación de algoritmos de Control Clásico y Avanzado. Se presentan experimentos en tiempo real para evaluar el desempeño de las plataformas. También se considera el diseño de una práctica de laboratorio empleando una de las plataformas y la evaluación de ésta en un entorno de enseñanza con estudiantes de posgrado.

# Abstract

This paper presents two proposals of experimental educational platforms whose main objective is to support the teaching of Mechatronics, Robotics, and Automatic Control careers by evaluating control algorithms under an education as a transaction approach. The education methodology is explained and emphasis is placed on the use of active learning methods and the creation of educational objectives based on the cognitive levels defined in Bloom's taxonomy.

The construction and assembly of the experimental educational platforms and the implementation of Classical and Advanced Control algorithms are detailed. Real-time experiments are presented to evaluate the platform's performance. The design of a laboratory practice using one of the platforms and its evaluation in a teaching environment with graduate students is also considered.

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Motivación

La educación está ligada a la calidad de vida de los habitantes de un país, y desde el año 2010 es calculada como parte del índice de desarrollo humano creado por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). Este índice mide el nivel de alfabetización, los años de duración de la educación obligatoria y la matrícula en todos los grados educativos [2]. Tomando en cuenta esto, en 2015 la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) realizó un estudio donde se señala que el acceso a la educación superior en América Latina y el Caribe ha aumentado considerablemente desde el año 2000 [3].

Por lo mencionado anteriormente, en un país como México con una población estimada de más de 126 millones de habitantes según lo reportado en el año 2021 por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) [4], la educación se ha conver-

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

tido en una prioridad para actuales y pasadas administraciones. De acuerdo con un estudio realizado en el año 2017, por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) [5], sólo el 17 % de la población mexicana entre los 25 y 64 años tiene un título universitario. A pesar del panorama anterior, el estudio también muestra que el 32 % de los alumnos de nuevo ingreso a la educación superior eligieron carreras relacionadas con áreas de la Ciencia, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas (CTIM), siendo un porcentaje que ha aumentado en los últimos años.

Dos de los retos que se han propuesto los gobiernos en México durante los últimos años han sido que los estudiantes elijan carreras en áreas de CTIM y la disminución de brecha de género existente en estas carreras [6]. Entre las políticas y apoyos que se han implementado recientemente en México están iniciativas como "Niñas STEM Pueden" [7], un programa que invita a mujeres con carreras en áreas CTIM a motivar a niñas y adolescentes a estudiar una carrera relacionada con estas áreas a través de talleres y charlas. Otra instancia que promueve lo anterior es el la Ley de Ciencia y Tecnología que rige el funcionamiento del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) en su artículo 2 fracción VIII [8].

Otro informe de la OCDE [9] sobre perspectivas económicas para América Latina muestra que existe un incremento salarial considerable para las personas que trabajan en estas carreras debido a la creciente competitividad mundial y al aumento de la automatización de los trabajos repetitivos.

En concordancia con lo mencionado anteriormente, se ha observado un incremento de estudiantes en carreras CTIM [10], [11] lo cual ha hecho necesario mejorar la infraestructura experimental en las instituciones educativas. Dentro de las áreas re-

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

lacionadas con CTIM se encuentran las carreras de Mecatrónica, Robótica y Control Automático.

Un problema en la enseñanza en estas carreras es la evaluación de información teórica. Por ejemplo, en la enseñanza de Teoría de Control es importante realizar simulaciones numéricas y experimentos en tiempo real utilizando prototipos de laboratorio para probar y comprender los principios de los algoritmos de control.

Los prototipos experimentales comerciales [12] usualmente tienen un costo elevado por lo que muchas universidades no tienen suficiente presupuesto para comprar un prototipo por persona o más de un prototipo, siendo muy difícil para los estudiantes y profesores realizar prácticas de laboratorio en estos.

Las plataformas educativas experimentales propuestas en este trabajo tienen como objetivo principal apoyar a la enseñanza de las carreras comentadas anteriormente mediante la evaluación de algoritmos de control, bajo una metodología de enseñanza explicada en el Capítulo 2 basada en métodos de aprendizaje activo. Estas plataformas están basadas en prototipos experimentales de bajo costo, y gracias a esta característica, las universidades podrían comprar las unidades necesarias para que cada alumno tenga una. La simplicidad de las propuestas experimentales permite que el estudiante sea capaz de comprar y armar su propio prototipo.

Bajo la metodología que se explicará en el Capítulo 2, los profesores pueden combinar conocimiento teórico - práctico usando las plataformas experimentales ayudando a la enseñanza de conceptos teóricos que pueden ser difíciles de entender. Los estudiantes podrán en un entorno seguro evaluar algoritmos y condiciones de operación que pueden aparecer en el mundo real, a un precio accesible.

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Vale la pena señalar que antes de integrar y usar las plataformas es preferible que los estudiantes tengan antecedentes en materias tales como Ecuaciones Diferenciales, Variable Compleja, Programación y Electrónica, entre otros.

Aunque las plataformas están dirigidas principalmente hacia temas de Control Clásico y Avanzado, la versatilidad que presentan las hacen perfectas para ser consideradas material de apoyo en otras materias como Circuitos Electrónicos, Microprocesadores, Diseño de circuitos impresos, Modelado de Sistemas, por mencionar algunas.

Todo lo anterior se vuelve más importante debido a la pandemia por COVID-19 iniciada en el 2020 [13], donde la educación pasó de ser presencial a virtual. Una de las ventajas de la plataforma educativa PEE-V2 mencionada en el Capítulo 4 es que los estudiantes pueden usarla en su domicilio gracias a su portabilidad. Esto aunado a su facilidad de uso y su bajo costo la convierte en una herramienta complementaria adecuada para cursos en línea, donde la parte experimental no se puede realizar en los centros educativos. La plataforma le da al estudiante la experiencia de poder traducir la clase teórica virtual a un experimento presencial en tiempo real.

La aportación principal de este trabajo como se describirá en capítulos subsecuentes es la combinación de una plataforma experimental de bajo costo con una metodología de enseñanza basada en aprendizaje activo y en la educación como transacción o descubrimiento.

### 1.2. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es el desarrollo de plataformas educativas de bajo costo que sean herramientas de apoyo en cursos de Mecatrónica, Control Automático y Robótica. Además, se incluye la propuesta de una metodología educativa basada en educación como transacción utilizando un método de aprendizaje activo.

Las plataformas deberán tener las siguientes características

- Portabilidad.
- De fácil construcción para estudiantes de licenciatura.
- Fáciles de usar.
- Que tengan la capacidad de probar algoritmos de Control Clásico y Avanzado.
- Ser una herramienta en cursos de licenciatura y posgrado.

La metodología que se pretende aplicar utilizando las plataformas deberá:

- Permitir que los estudiantes interactúen con las plataformas educativas para crear conocimiento.
- Permitir que los estudiantes participen activamente durante las clases y en su propio aprendizaje.
- Permitir que el profesor obtenga realimentación por parte de los estudiantes, por ejemplo, mediante encuestas.
- Ayudar a los estudiantes a complementar los conocimientos prácticos y teóricos.



## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Este reporte se divide de la siguiente manera. En el Capítulo 2 se describe la metodología educativa. Los entornos de experimentación se presentan en el Capítulo 3. Las plataformas experimentales se detallan en el Capítulo 4, y en el Capítulo 5 se exponen la implementación de los algoritmos de control básico y de identificación paramétrica, todos ellos probados en ambas plataformas así como sus resultados experimentales. En el Capítulo 6 se detalla la implementación de algoritmos de control avanzado y se reportan los resultados experimentales correspondientes. En el Capítulo 7 se describe el diseño de una práctica de laboratorio empleando la plataforma educativa PEE-V2, y la evaluación de esta última en un entorno de enseñanza con estudiantes se expone en el Capítulo 8. El Capítulo 9 resume las conclusiones de la tesis y el trabajo futuro a desarrollar.

## **1.3. Publicaciones**

### **1.3.1. Revista**

- Ramos, J. J. M., Pineda, J. L. L., Moctezuma, R. A. G., y Zavala, J. G. C. (2019). A Teaching Methodology Based on an Educational Experimental Platform. *IEEE Latin America Transactions*, 17(08), 1363-1370.

### **1.3.2. Congresos Internacionales**

- Maldonado, J. J., Garrido, R., y Castro, G. (2018, September). A Methodology to Teach Mechatronics through Building a Hands-on Platform. In 2018 15th Inter-

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

national Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE) (pp. 1-6). IEEE.

- J. Luis Luna, Jessica Maldonado, Rubén Garrido. Active Disturbance Rejection Control Applied to a Low-Cost Educational Prototype. Proceedings of the XVIII Latin American Conference in Automatic Control CLCA 2018. Quito, Ecuador, 24 a 26 de octubre (2018): 93-94.
- Cortez-Vega, R., Maldonado, J., y Garrido, R. (2019, April). Parameter Identification using PSO under measurement noise conditions. In 2019 6th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT) (pp. 103-108). IEEE.
- Jiménez, O., Maldonado, J., Garrido, R. (2020) Estudio comparativo de servomotores de CD orientados a la construcción de prototipos educativos . VII Congreso Internacional de Robótica y Computación 2020.

### 1.3.3. Congresos Nacionales

- Maldonado, J. J., y Garrido, R. (2017). Prototipo educativo basado en un servomotor analógico de radio control. In Memorias del Congreso Nacional de Control Automático (pp. 569-574).
- Maldonado, J., López, K., Garrido, R., y Mondié, S. (2018, September). Implementing Time-delay Controllers on an Educational Motion Control Platform. In 2018 XX Congreso Mexicano de Robótica (COMRob) (pp. 1-6). IEEE.

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

- Maldonado, J. J., y Garrido, R., Castro, G. (2020). Real-time control prototype and its use in Automatic Control courses. AMCA 2020.

# Capítulo 2

## Metodología Educativa

En este capítulo se explica la metodología de enseñanza que complementa a las plataformas educativas experimentales la cual está basada en una filosofía educativa integral, donde se implementa el aprendizaje activo y la taxonomía de Bloom para la creación y evaluación de objetivos.

### 2.1. Educación Integral

La educación integral u holística es una filosofía educativa centrada en el estudiante, cuyo objetivo principal es la formación integral del mismo [14], [15]. Se busca que la enseñanza sea completa, es decir, que incluya aspectos cognitivos, físicos, emocionales y mentales.

Esta filosofía busca el desarrollo de habilidades científicas, el uso de recursos tecnológicos actuales y la adaptación de los alumnos a nuevos desafíos. Bajo este esquema el estudiante será capaz de:

## CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA EDUCATIVA

- Adaptarse a nuevas situaciones.
- Combinar conocimientos teóricos con inteligencia práctica y social.

De acuerdo con John P. Miller [16], se presentan tres enfoques que facilitan el uso de la educación integral, es decir, educación como transmisión, como transacción y como transformación.

- En la educación como transmisión el profesor es el que suministra la información y es su trabajo dar ese conocimiento a sus estudiantes. En este punto de vista, el logro de un estudiante se mide a través de la habilidad de éste de poder replicar y demostrar las ideas transmitidas.
- La educación como transacción, que también se le puede denominar educación mediante el descubrimiento, tiene como idea principal el uso de situaciones donde el estudiante pueda interactuar con material educativo para construir conocimiento. Este se genera usando experiencias pasadas y nueva información que proviene de diferentes materiales y situaciones. Los profesores se convierten en facilitadores de la información creando así nuevas experiencias para los estudiantes, quienes aprenden habilidades para solucionar problemas en el mundo real y mejorar sus antecedentes prácticos y teóricos.
- La educación como transformación ayuda creando situaciones para transformar al aprendiz. Tanto el profesor como el estudiante se convierten en aprendices con el objetivo de descubrir y desarrollar sus talentos y capacidades individuales.

## **2.2. Métodos de enseñanza**

### **2.2.1. Aprendizaje Pasivo**

El aprendizaje pasivo es un método de enseñanza que se centra en el maestro [17]. En este método se busca que el estudiante absorba la información dada por el profesor, escuchando, y sin dar o recibir realimentación.

Entre las ventajas del aprendizaje pasivo se encuentran las siguientes:

- Mayor control por parte del profesor sobre su clase.
- La clase tiene un formato estructurado.
- El material se puede preparar con mucha anticipación.
- Los conceptos se presentan de manera organizada y estructurada.

Y entre sus desventajas se encuentran:

- Supone que el estudiante tiene un aprendizaje exitoso.
- No da suficientes oportunidades para que los estudiantes realicen preguntas, aclaraciones o participen en discusiones.
- Requiere que el instructor sea hábil para presentar la información.
- Utiliza un modelo de comunicación en una sola dirección, así que el oyente no se involucra.

## CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA EDUCATIVA

- Algunos instructores pueden enfatizar la memorización de la información sin su comprensión.
- No da la oportunidad de aplicar la información al estudiante.
- Para algunos alumnos este método no despierta interés.

### **2.2.2. Aprendizaje Activo**

El aprendizaje activo es un método de enseñanza que se centra en el estudiante, ya que se enfatiza que éste participe durante las clases en vez de sólo escuchar [18] [19]. Este método promueve las acciones cognitivas de memoria y comprensión como sus objetivos centrales, recalcando que los estudiantes aprenden más haciendo que observando o escuchando.

Las actividades que se pueden realizar durante una clase que usa este método son: Crear equipos para discutir la clase, ejercicios de sólo 10 o 5 minutos, colaborar en equipos para resolver un ejercicio o llegar a una definición, realización de debates, y prácticas de laboratorio, en el caso que sean posibles. Por todo lo anterior, algunos alumnos y profesores encuentran el aprendizaje activo difícil de aplicar. Entre sus ventajas se encuentran las siguientes:

- Se tiene realimentación por parte de los estudiantes.
- La enseñanza se centra en comprender los temas y no sólo memorizarlos.
- El estudiante participa activamente aprendiendo sin saber que está aprendiendo.

## CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA EDUCATIVA

- Los estudiantes aprenden, además de los temas del curso, habilidades como ser pro-activos, trabajar en equipo y ejercitar la reflexión sobre los temas de estudio.

Sus desventajas serían:

- Requiere tiempo para planear las actividades a realizar.
- Requiere más participación estudiantil, lo cual a veces puede resultar difícil.
- Se cubre menos del temario que con aprendizaje pasivo.
- No se tiene el control completo de la clase.

### **2.3. Objetivos educativos**

Evaluar a los alumnos es una parte necesaria en la impartición de cursos. Para ésto se usan exámenes, presentaciones orales, ensayos, entre otros. Con lo anterior se consigue información importante que influye en la estructura y enfoque de las clases y de otros factores educativos. Esto se puede hacer de dos formas:

- Pruebas usando como referencia una norma: Tiende a ser general. Se compara el rendimiento del estudiante con un alumno promedio hipotético determinado con resultados estadísticos.
- Pruebas usando como referencia un criterio: Es más específico. Este tipo de prueba compara el conocimiento o habilidades de un estudiante con un estándar establecido, un objetivo educativo, un nivel de rendimiento u otro tipo de criterio.



## CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA EDUCATIVA

Una vez identificado el tipo de prueba a usar ésta se realiza, como se observa en la Fig. 2.1, con base en:

- Construir los objetivos educativos.
- Implementar una actividad.
- Medir el logro de los objetivos.

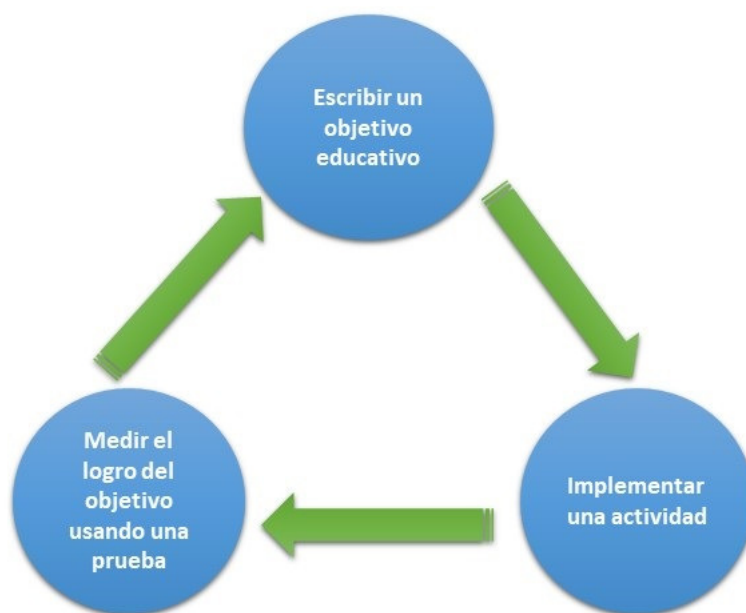


Figura 2.1: Pasos para la creación de una evaluación

Los objetivos educativos son una declaración clara y específica de la habilidad y conocimiento que se espera que obtengan los estudiantes después de completar una clase.

Una vez que se tiene definido el objetivo educativo, se procede a crear los elementos o preguntas dentro de una prueba. La regla básica para que coincidan las preguntas

## CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA EDUCATIVA

con los objetivos educativos es que las respuestas de las preguntas deben coincidir con el resultado de aprendizaje descrito en el objetivo educativo. Esta regla asegura la validación del contenido.

Para construir un objetivo educativo una de las metodologías mas conocidas es recurrir a diferentes niveles de complejidad cognitiva. A esta forma de categorizar los objetivos se le conoce como Taxonomía de Bloom, ideada por Benjamin Bloom en 1956 [20] y actualizada en el año 2001 [21]. Esta es una metodología de objetivos educativos usando niveles de complejidad cognitiva, específicamente seis, que van desde el más simple hasta el más complejo. Cada uno tiene características especiales listadas a continuación:

- Recordar: Los objetivos a este nivel requieren que los estudiantes recuerden.
- Comprender: Se requiere que los estudiantes tengan un nivel de entendimiento.
- Aplicar: En este nivel se busca que los estudiantes usen información adquirida previamente para aplicarla en otro entorno.
- Analizar: En este caso se necesita que el estudiante identifique errores o contradicciones o que pueda diferenciar entre hechos, opiniones, sugerencias, hipótesis o conclusiones.
- Evaluar: Aquí el estudiante debe validar y dar una opinión sobre la información aprendida.
- Crear: Se busca que el estudiante produzca algo nuevo y original.

## 2.4. Enseñanza del Control Automático

Considerando lo anterior, vale la pena mencionar brevemente qué es el modelo educativo de STEM (*Science, Technology, Engineering and Mathematics*) o en español CTIM (Ciencia, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas). Este modelo busca enseñar las áreas que corresponden a CTIM en conjunto y dependientes una de otra. El objetivo es que los estudiantes tengan más interés por acceder a carreras dentro de estas áreas, que obtengan pensamiento crítico y que complementen su aprendizaje realizando experimentos.

Para la enseñanza del Control Automático cabe recalcar que esta carrera se basa en las áreas de CTIM, las cuales en conjunto son usadas para validar, explicar y aplicar los conocimientos de esta materia, por lo que se beneficia de la enseñanza bajo el modelo educativo CTIM descrito previamente.

La enseñanza de esta ciencia se puede dividir en teoría y aplicaciones. Existen definiciones dentro de la teoría de Control Automático que puede resultar difícil de explicar para los profesores o de comprender por parte de los estudiantes hasta que se realizan experimentos. En este sentido, para aplicar esta teoría es importante evaluar un algoritmo de control en un entorno experimental seguro y bajo condiciones conocidas. Estos, de los que se hablarán con más detalle en el siguiente capítulo, pueden ser simulaciones numéricas o plataformas experimentales.

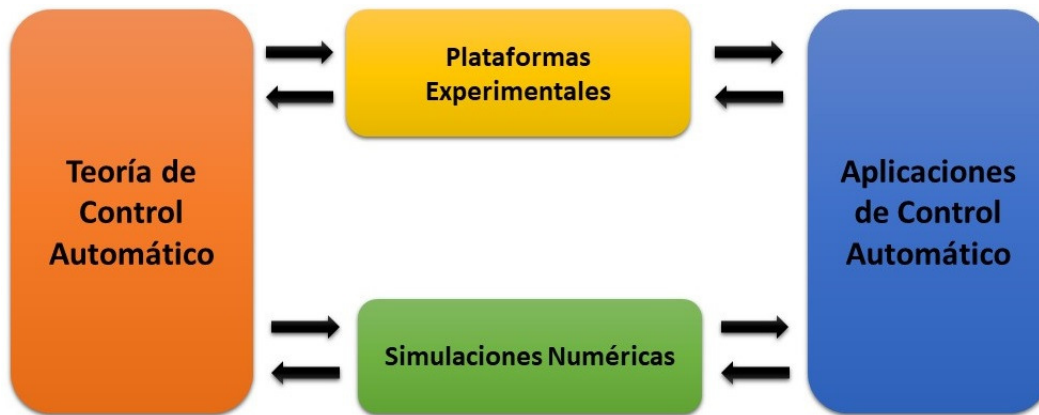


Figura 2.2: Enseñanza de Control Automático

Las simulaciones numéricas permiten una evaluación rápida de una ley de control, pero pasan por alto ciertas características de la planta a controlar tales como ruido de medición, dinámicas no modeladas y perturbaciones. Lo anterior puede ser difícil de modelar ya que pueden resultar en modelos demasiado complicados.

Por otro lado, las plataformas experimentales suelen tener costos elevados pero su uso permite obtener resultados que complementan a las simulaciones numéricas. En estas plataformas se pueden observar los efectos de ruido de medición y de perturbaciones sobre el sistema de control.

Tomando en cuenta lo anterior, esta tesis propone utilizar plataformas experimentales de bajo costo cuyo fin sea complementar simulaciones numéricas que tradicionalmente son empleadas para la enseñanza del Control Automático. Bajo la metodología de educación como transacción, el estudiante puede interactuar con las plataformas lo cual le permite tener experiencias de primera mano con situaciones similares a las que podría encontrar en el mundo real. Esta forma de interacción se puede llevar a

## CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA EDUCATIVA

cabo mediante prácticas de laboratorio.

Uno de los aspectos educativos más importantes de las plataformas experimentales propuestas es que los estudiantes las construyan como parte de proyectos dentro de las materias en las carreras de Control Automático, Mecatrónica y Robótica. Cabe recalcar que debido sus características estas pueden utilizarse en otros cursos tales como circuitos electrónicos, circuitos analógicos, diseño de circuitos impresos, modelado de sistemas, microprocesadores, entre otros.

# Capítulo 3

## Entornos de experimentación

En este capítulo se explicarán conceptos relacionados con los entornos de experimentación, además de dar ejemplos de cada uno. Como se observa en la Fig. 3.1, los entornos se dividen en simulaciones numéricas y plataformas experimentales. Las simulaciones numéricas se pueden realizar *in situ* o a través de un simulador virtual. En el caso de las plataformas experimentales, éstas se clasifican como plataformas *in situ* o como laboratorios remotos.

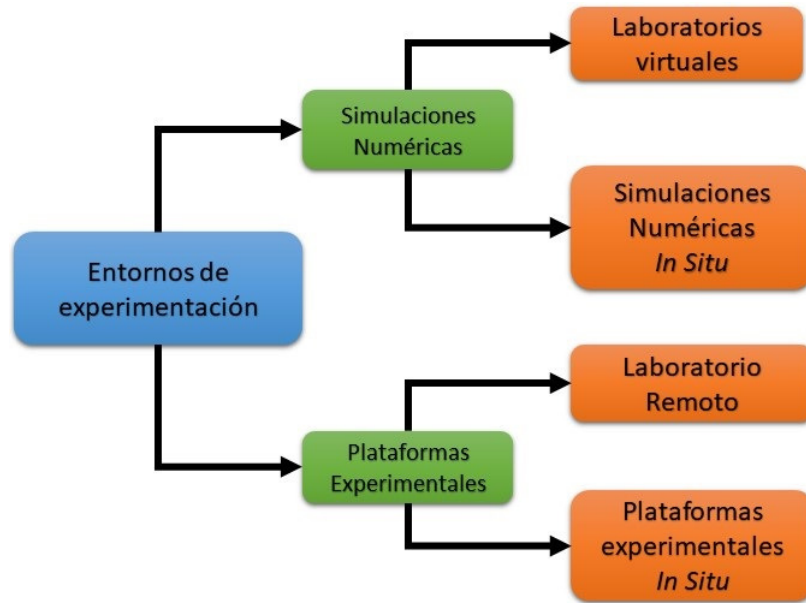


Figura 3.1: Entornos de experimentación

### 3.1. Simulaciones numéricas

Las simulaciones numéricas se ejecutan mediante *software* especializado o utilizando una red de servidores cuyo fin es simular un sistema usando un modelo matemático. En ellos se puede verificar y evaluar tanto la veracidad del modelo matemático como las condiciones para el funcionamiento de un controlador.

#### 3.1.1. Simulaciones virtuales

Un laboratorio virtual es una simulación numérica la cual se accede remotamente. También es conocida como una simulación numérica *on-line* [22]. La interfaz usada por el estudiante para utilizar este tipo de simulación consiste en una página HTML

## CAPÍTULO 3. ENTORNOS DE EXPERIMENTACIÓN

(en inglés *HyperText Markup Language*), el lenguaje *Active X* o una aplicación conectada a un servidor donde el *software* realiza la simulación.

La referencia [23] muestra una recopilación de laboratorios virtuales, cada uno de ellos dedicado a un tema específico. En el área de diseño de sistemas de control se encuentra un laboratorio virtual desarrollado por la Universidad de Newcastle [24]. Este simulador usa un ambiente industrial simulado que ayuda a los estudiantes en la aplicación de algoritmos de control. CONTROLWEB [25] es otro laboratorio virtual que simula sistemas lineales de una entrada una salida. Otros laboratorios virtuales encontrados en esta recopilación no están disponibles o son sólo accesibles localmente a miembros de la misma universidad.

Analizando las referencias mostradas, otros laboratorios virtuales que valen la pena mencionar se describen en [26] y [27].

Las principales ventajas de un laboratorio virtual es su bajo costo, que es accesible desde cualquier dispositivo con una conexión a internet. Otra gran ventaja de estos laboratorios es que el estudiante no necesita una computadora con requerimientos mínimos ya que ningún tipo de *software* es instalado. Las desventajas principales son que el usuario siempre necesita una conexión a Internet estable y el precio de mantener un servidor puede ser muy alto para algunas universidades.

### **3.1.2. Simulaciones numéricas *in situ***

La simulación numérica está basada en un *software* matemático *in situ* [22], y usualmente se instala en la computadora del estudiante o del laboratorio. El *soft-*



### CAPÍTULO 3. ENTORNOS DE EXPERIMENTACIÓN

*ware* matemático más conocido para enseñanza y análisis en Control Automático es Matlab/Simulink [28] de *The MathWorks, Inc.*

En la referencia [29] se muestra una integración de simulaciones numéricas y modelos usando Matlab/Simulink para cursos de ingeniería donde se hace énfasis en las ventajas de este enfoque y la importancia de tener una interfaz gráfica para aquellas personas que no están familiarizadas con el Entorno Matlab/Simulink.

La referencia [30] describe el *software* Sysquake de la compañía Calerga Sarl. Este ofrece gráficos interactivos, acceso gratuito en la edición básica y una interfaz gráfica simple, pero no es tan versátil como Matlab/Simulink. La referencia [31] expone el *software* de código abierto SciLab el cual es similar en funcionalidad a Matlab, pero no es tan popular o versátil como Matlab.

Otro *software* conocido es LabView [32] de *National Instruments*. Este programa utiliza un lenguaje de programación visual y tiene una interfaz gráfica fácil de usar. La referencia [33] muestra la programación de algoritmos Proporcional Integral Derivativo (PID) y algoritmos de control *Fuzzy* usando LabView.

Después de examinar las referencias anteriores, las principales ventajas de las simulaciones numéricas son que el estudiante puede acceder al *software* sin la necesidad de una conexión a Internet además de no necesitar mantenimiento. Por otro lado, una desventaja es el uso de una computadora con requerimientos mínimos para la instalación del *software* especializado.

## 3.2. Plataformas experimentales

### 3.2.1. Plataformas remotas

Un laboratorio remoto está compuesto por varias plataformas experimentales que se controlan mediante una página web y una cámara [22]. El usuario puede interactuar con una plataforma experimental utilizando una página web y ver su respuesta a través de un video en tiempo real. Dependiendo de la configuración de los laboratorios remotos, se puede agregar un micrófono. En este caso el estudiante puede escuchar los sonidos producidos por la plataforma experimental durante su funcionamiento. Por lo general, un laboratorio remoto es conveniente cuando las plataformas experimentales son caras o su número es insuficiente.

La referencia [34] presenta el *Automatic Control Telelab*, el cual es un laboratorio remoto que puede controlar cuatro prototipos diferentes, entre los cuales se encuentra un helicóptero de dos grados de libertad. El laboratorio remoto reportado en la referencia [35] usa el software *LabView* para implementar los algoritmos de control y emplea la interfaz gráfica de este programa. Otros laboratorios remotos se muestran en las siguientes referencias [36], [37], [38], [39].

Después de examinar las referencias anteriores, se puede observar que una de las principales ventajas de los laboratorios remotos para estudiantes es el acceso a equipos costosos que de otro modo estarían fuera de su alcance. Además, la configuración remota del laboratorio permite operar las plataformas experimentales desde cualquier dispositivo con conexión a Internet.

## CAPÍTULO 3. ENTORNOS DE EXPERIMENTACIÓN

A diferencia de los laboratorios virtuales, un laboratorio remoto brinda al usuario información de video y audio de un dispositivo físico en un entorno real. Además, el usuario puede apreciar los problemas relacionados con las dinámicas no modelada, perturbaciones y ruido de medición.

Por otro lado, una de sus desventajas es el hecho de que sólo un número limitado de estudiantes puede usar las plataformas al mismo tiempo, y el costo sigue siendo alto debido al costo de las plataformas experimentales y al mantenimiento del sistema. Además, el estudiante puede realizar un comportamiento no deseado, quizás destructivo, en las plataformas que puede necesitar la intervención del responsable del laboratorio remoto.

### **3.2.2. Plataformas experimentales *in situ***

Una plataforma experimental *in situ* es un dispositivo físico que puede ser empleado directamente por los estudiantes [22]. Las referencias [40], [41] describen una plataforma experimental basada en un motor de DC, ésta tiene un alto costo debido a la calidad de los componentes y una interfaz *Plug-and-Play* fácil de usar. Este dispositivo no puede ser modificado por el usuario y tampoco se le pueden realizar mejoras. La plataforma experimental mostrada en la referencia [42] puede modificarse fácilmente, pero su costo es alto.

Dado que el costo es uno de los principales problemas de las plataformas experimentales, se pueden encontrar alternativas de bajo costo en las referencias [43], [44], [45]. Estas plataformas experimentales utilizan tarjetas de adquisición de datos de

### CAPÍTULO 3. ENTORNOS DE EXPERIMENTACIÓN

bajo costo, como la popular Arduino y la Raspberry Pi. A pesar de sus ventajas, algunos problemas en común en éstas son: la falta de un reloj en tiempo real preciso, el uso de *software* con licencia como Matlab para realizar los algoritmos de control y el hecho de que los estudiantes no participan activamente en la construcción de la plataforma.

Teniendo en cuenta los comentarios anteriores, las dos principales desventajas de una plataforma experimental de alta gama es su costo y que los estudiantes no pueden modificarlas o construirlas. Los siguientes capítulos se centran en la propuesta de plataformas experimentales que abordan los problemas anteriores.

# Capítulo 4

## Descripción y construcción de las Plataformas Educativas Experimentales

Este capítulo describe dos plataformas experimentales propuestas en esta tesis las cuales tienen como características ser de bajo costo, versátiles, fáciles de construir por un estudiante y portátiles. Estas consisten en un motor de Corriente Directa (CD), amplificadores de potencia y sensores de posición. El modelo matemático que las describen es lineal invariante en el tiempo lo cual permite aplicar una amplia gama de técnicas de control disponibles tanto en libros de texto como en artículos de investigación.

Las plataformas propuestas se muestran en las figuras Fig. 4.1 y Fig.4.2. Cada plataforma se explica en 3 subsecciones; la primera describe el *hardware* usado para la construcción de la plataforma. La segunda subsección muestra el *software* para el

## CAPÍTULO 4. DESCRIPCIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE LAS PLATAFORMAS EDUCATIVAS EXPERIMENTALES

control de ésta y la última subsección expone la configuración experimental que se usa en la plataforma para realizar los experimentos mostrados capítulo 5.

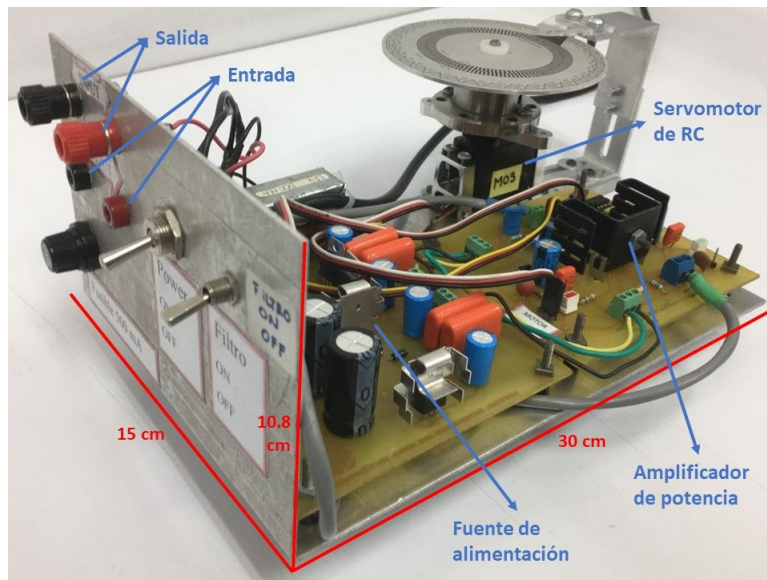


Figura 4.1: Plataforma Educativa Experimental V1

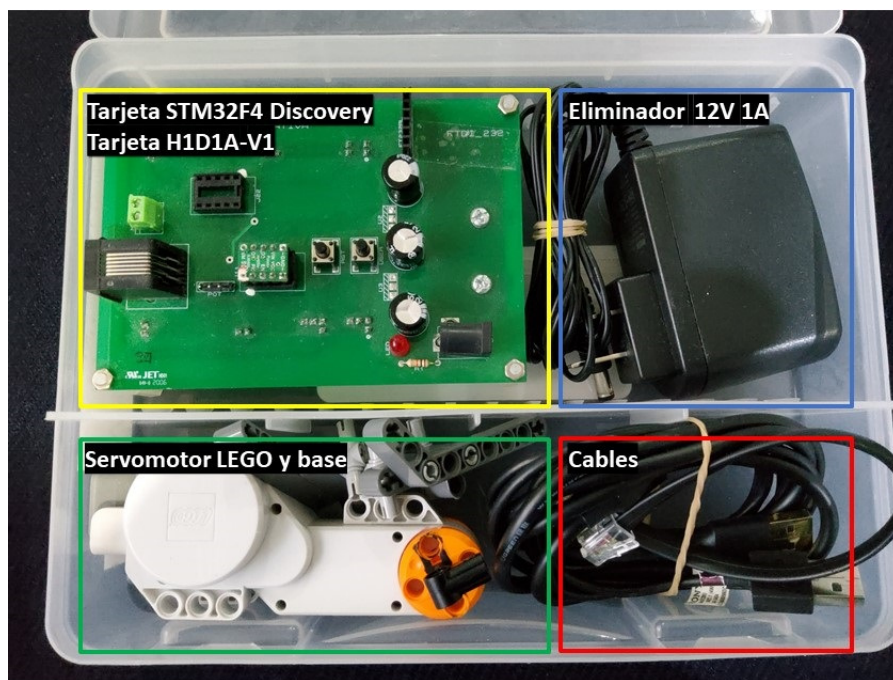


Figura 4.2: Plataforma Educativa Experimental V2

## 4.1. Plataforma Educativa Experimental V1

La Plataforma Educativa Experimental V1 (PEE-V1) se basa en un servomotor de Radio Control (RC) conectado a un potenciómetro que sirve como sensor de posición. Esta plataforma utiliza un amplificador de potencia analógico. La configuración experimental se complementa con una tarjeta de adquisición de datos y el uso de *software* como Simulink y Quarc. Los detalles se dan a continuación.

### 4.1.1. *Hardware*

#### 4.1.1.1. Servomotor de Radio Control

Un servomotor de RC típico es un sistema realimentado compuesto por un motor de CD, un tren de engranajes, un potenciómetro y una tarjeta con los circuitos del controlador. El motor de CD mueve un tren de engranajes cuyo eje de salida está conectado a un potenciómetro lineal, el cual actúa como un divisor de voltaje y cuya señal alimenta al circuito de control. La posición angular deseada es proporcionada a través de una señal de Modulación de ancho de pulso o denominada en inglés *PWM* (*Pulse Width Modulation*).

Los servomotores de RC son usados frecuentemente para construir robots manipuladores y robots móviles, pero ya que no se puede modificar la tarjeta de control, su uso para enseñanza y aprendizaje de la Teoría de Control es limitado puesto que no se pueden implementar algoritmos de control diferentes al que posee la tarjeta de control.

## CAPÍTULO 4. DESCRIPCIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE LAS PLATAFORMAS EDUCATIVAS EXPERIMENTALES



Figura 4.3: Servomotor de RC HS-485HB.

Considerando los comentarios anteriores, para construir una plataforma experimental orientada a las carreras de Control Automático, Robótica, y Mecatrónica, se tomó la decisión de desechar la tarjeta de control en el servomotor de RC y remplazarla con circuitería externa la cual incluye un amplificador de potencia y un controlador programable. Únicamente se emplea el motor de DC, el tren de engranajes, el sensor de posición y la estructura mecánica que los contiene, evitándose así tener que comprar estos componentes por separado y tener que integrarlos mecánicamente.

El servomotor de RC usado para construir la PEE-V1 es el modelo HS-485HB de Hitec mostrado en la Fig. 4.3 [46] . Tiene un bajo costo y sus especificaciones pueden observarse en la Tabla 4.1.

El primer paso para la modificación del servomotor de RC es remover la tarjeta de control interna como se observa en la Fig 4.4. Después de remover la tarjeta se sueldan nuevos cables para alimentar al motor de CD y al potenciómetro como se muestra en la Fig. 4.5.



## CAPÍTULO 4. DESCRIPCIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE LAS PLATAFORMAS EDUCATIVAS EXPERIMENTALES

Dimensiones	4cm × 2cm × 3.78cm
Peso	0.045 Kg
Rango de Voltaje de alimentación	4.8v - 6.0v
Velocidad sin carga (4.8-6.0V)	0.22 - 0.18 sec/ 60°
Par motor (4.8-6.0V)	4.8 - 6.0 Kg×cm
Rango de movimiento	180°
Corriente consumida (sin carga) (4.8 - 6.0 V)	150 -180 mA
Corriente consumida (con carga) (4.8 - 6.0 V)	1200 mA
Radio de reducción $n$	132
Sensor de posición	Potenciómetro
Valor de la resistencia	5K $\Omega$

Cuadro 4.1: Características del servomotor Hitec HS-485HB.

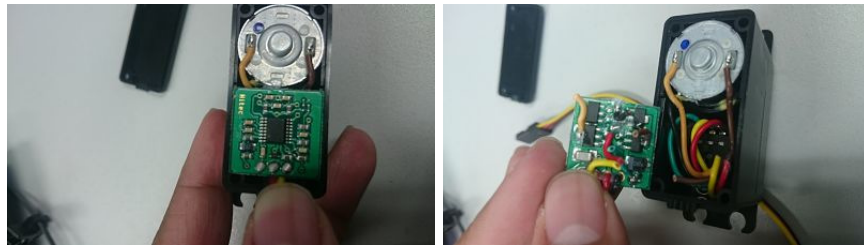


Figura 4.4: Servomotor de RC HS-485HB y su tarjeta de control.

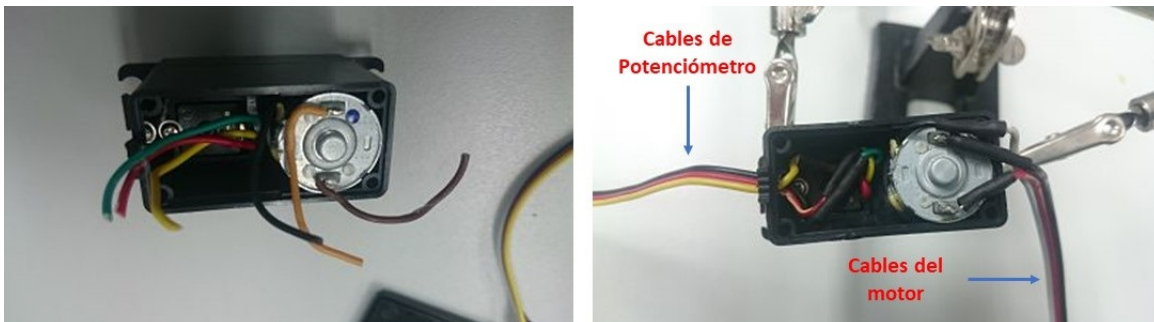


Figura 4.5: Servomotor de RC modificado sin la electrónica interna y con conexiones directas al potenciómetro y al motor de CD.

## CAPÍTULO 4. DESCRIPCIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE LAS PLATAFORMAS EDUCATIVAS EXPERIMENTALES

Corriente Máxima	3A
Voltaje de alimentación máximo	$\pm 30V$
Señal de entrada	Voltaje
Señal de salida	Voltaje

Cuadro 4.2: Características técnicas básicas del LM675

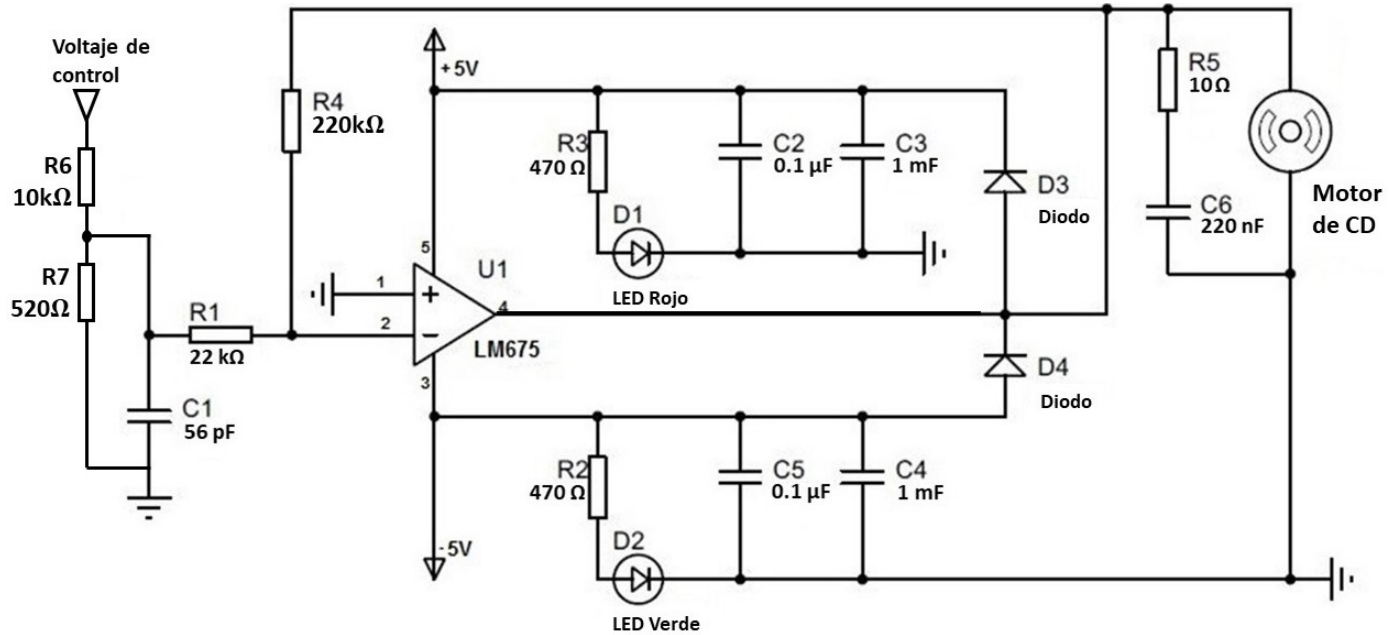


Figura 4.6: Diagrama del Amplificador de Potencia.

### 4.1.1.2. Amplificador de potencia

Un amplificador operacional lineal de potencia modelo LM675 de Texas Instruments [47] alimenta al motor de CD. Este circuito integrado emplea pocos componentes externos comparado con circuitos basados en transistores discretos, las características técnicas se muestran en la Tabla 4.2. En la Fig. 4.6 se presenta el diagrama para el amplificador de potencia y en la Tabla 4.3 se enlistan los componentes electrónicos para su construcción. Es importante mencionar que este amplificador operacional requiere de una fuente bipolar para su funcionamiento.

## CAPÍTULO 4. DESCRIPCIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE LAS PLATAFORMAS EDUCATIVAS EXPERIMENTALES

Nombre	Elemento
U1	LM675
R1	22K $\Omega$
R2 y R3	470 $\Omega$
R4	220K $\Omega$
R5	10 $\Omega$
R6	10K $\Omega$
R7	520 $\Omega$
C1	56pF
C2 y C5	0.1 $\mu$ F
C3 y C4	1000 $\mu$ F
C6	220nF
D1	LED-ROJO
D2	LED-VERDE
D3 and D4	Diodo

Cuadro 4.3: Componentes del Amplificador de Potencia

### 4.1.1.3. Sensor de Posición

El servomotor de RC utiliza como sensor de posición un potenciómetro lineal de 5K $\Omega$ , éste se conecta como se muestra en la Fig. 4.7 al eje de salida del tren de engranajes del servomotor. Se alimenta usando una fuente de alimentación de  $\pm 5$ V.

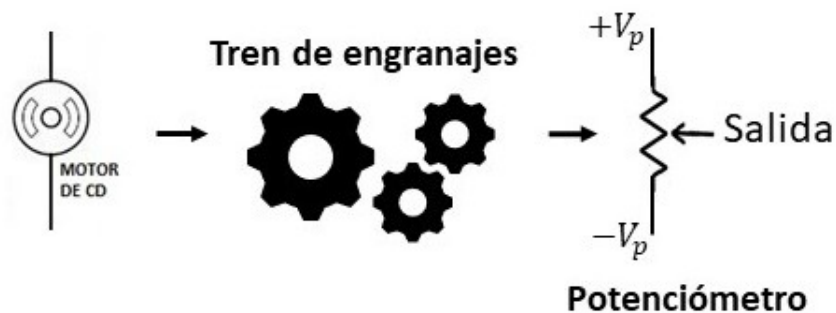


Figura 4.7: Diagrama de la conexión del potenciómetro.

## CAPÍTULO 4. DESCRIPCIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE LAS PLATAFORMAS EDUCATIVAS EXPERIMENTALES

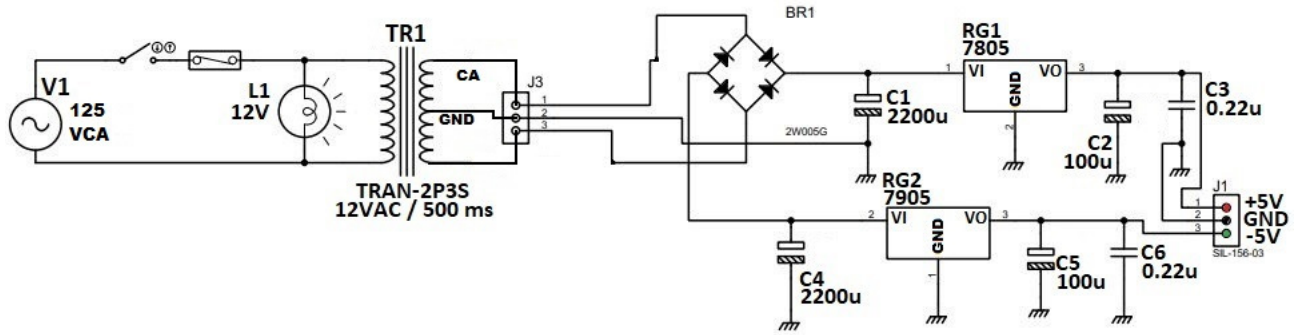


Figura 4.8: Diagrama de la Fuente de Alimentación.

Nombre	Elemento
RG1	LM7805
RG2	LM7905
C1 y C4	2200 uF
C2 y C5	100 uF
C3 y C6	0.22 uF
TR1	12 VAC/500 ms

Cuadro 4.4: Componentes de la Fuente de Alimentación

### 4.1.1.4. Fuentes de Alimentación

El prototipo PEE-V1 emplea dos fuentes de alimentación, cada una de ellas están construidas usando un transformador de 120V Corriente alterna a 12V 500mA, y dos reguladores de voltaje LM7805 y LM7905, como se observa en la Fig. 4.8 . Una fuente alimenta al amplificador, y la otra al potenciómetro. Este arreglo se hizo para desacoplar la alimentación del potenciómetro y del motor, de esta manera los transitorios que pudieran suceder a nivel del amplificador no se reflejan en el voltaje de alimentación del potenciómetro. Sin embargo se puede usar solo una fuente teniendo en cuenta este inconveniente.

## CAPÍTULO 4. DESCRIPCIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE LAS PLATAFORMAS EDUCATIVAS EXPERIMENTALES

	<b>Nombre</b>	<b>Precio</b>
Servomotor de RC	HS-485HB	\$360.17
Amplificador de Potencia	Amplificador LM675	\$211.86
	Resistencias R1,R2,R3,R4	\$6.36
	Diodo D3,D4	\$6.36
	Capacitor 4.7 $\mu$ F	\$10.59
	Capacitor 1000 $\mu$ F	\$21.19
	Capacitor 0.1 $\mu$ F	\$8.47
	Capacitor 220 nF	\$4.24
	Leds Rojo y Verde	\$12
	Circuito impreso	\$105.93
	Disipador	\$53
Fuente de alimentación	Voltaje dual $\pm$ 5V	\$303.05
	<b>Costo Final</b>	<b>\$1103.22</b>

Cuadro 4.5: Lista de costo de la PEE-V1 en pesos mexicanos

### 4.1.1.5. Costo

La PEE-V1, mostrada en la Fig. 4.1, tiene un costo aproximado de \$1030 pesos y el precio de cada componente que forma parte de la plataforma se muestra en la Tabla 4.5. Los circuitos del amplificador y de las fuentes emplean tarjetas impresas diseñadas *ex profeso*, sin embargo, se pueden usar tarjetas perforadas para reducir costos. Otras formas de reducir el precio de la plataforma son la comprar los componentes al mayoreo y el empleo de otro tipo de servomotor de RC con un precio más bajo. La Fig. 4.9 muestra el servomotor de RC modificado y se puede observar que se agregó una carga mecánica, soportes para sujetar el servomotor de RC a la plataforma, un disco graduado y un puntero. Todas estas partes no se consideran en el costo porque no son absolutamente necesarias para el funcionamiento de la plataforma. El estudiante puede encontrar otras formas de montaje que sean más adecuadas a su presupuesto, habilidades y recursos.

## CAPÍTULO 4. DESCRIPCIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE LAS PLATAFORMAS EDUCATIVAS EXPERIMENTALES

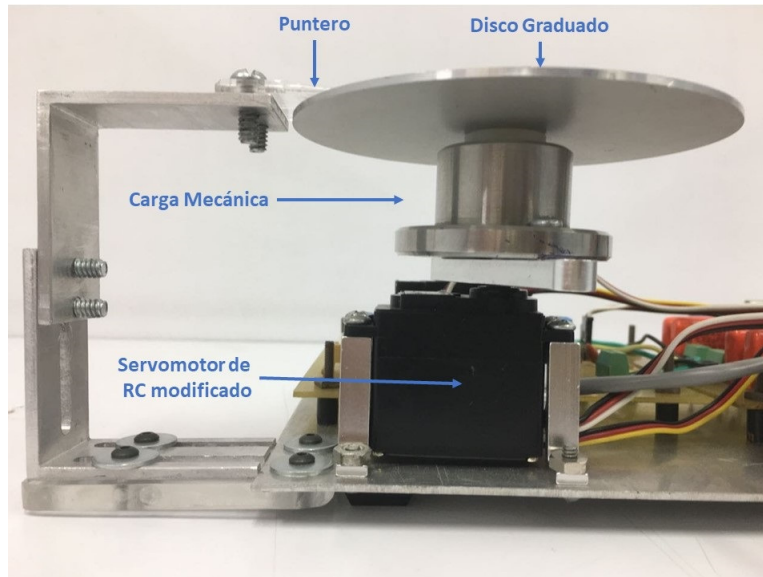


Figura 4.9: Vista cercana al servomotor de RC de la PEE-V1

### 4.1.2. *Software*

#### 4.1.2.1. **Matlab**

Matlab [48] es un *software* de computación matemática el cual posee muchas características que lo convierten en una herramienta importante. Entre ellas se tienen la manipulación de matrices, la representación gráfica de datos y la comunicación con otros programas y dispositivos. Existen herramientas, algunas de ellas dentro de este *software*, que lo complementan y que se describen a continuación.

#### 4.1.2.2. **Simulink**

Es un *software* de programación visual que funciona dentro del entorno de Matlab. Este tipo de programación ayuda al usuario a visualizar los algoritmos programados y ejecutados a través de bloques.

## CAPÍTULO 4. DESCRIPCIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE LAS PLATAFORMAS EDUCATIVAS EXPERIMENTALES

Cantidad	Componente
1	Cable mini USB
1	Cable micro USB
1	Motor LEGO con cable
1	Eliminador 12V 1A
1	Tarjeta STM32F4 Discovery
1	Tarjeta H1D1A-V1

Cuadro 4.6: Componentes del Kit DV1.0

### 4.1.2.3. Quarc

El nombre completo de esta herramienta es Quarc Real-Time Control Software [49] y combinado con Simulink permite realizar control en tiempo real.

## 4.2. Plataforma Educativa Experimental V2

La plataforma educativa experimental V2 (PEE-V2), mostrada en la Fig. 4.10, se basa en un servomotor LEGO con un codificador óptico como sensor de posición. El *hardware* necesario para armar la PEE-V2 está dentro del Kit DV1.0, mostrado en la Fig. 4.10, estos componentes se presentan en la Tabla 4.6. La PEE-V2 usa el *software* Simulink y STLink. Los detalles tanto del Kit como del *software* se describirán en las siguientes subsecciones.

CAPÍTULO 4. DESCRIPCIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE LAS PLATAFORMAS EDUCATIVAS EXPERIMENTALES

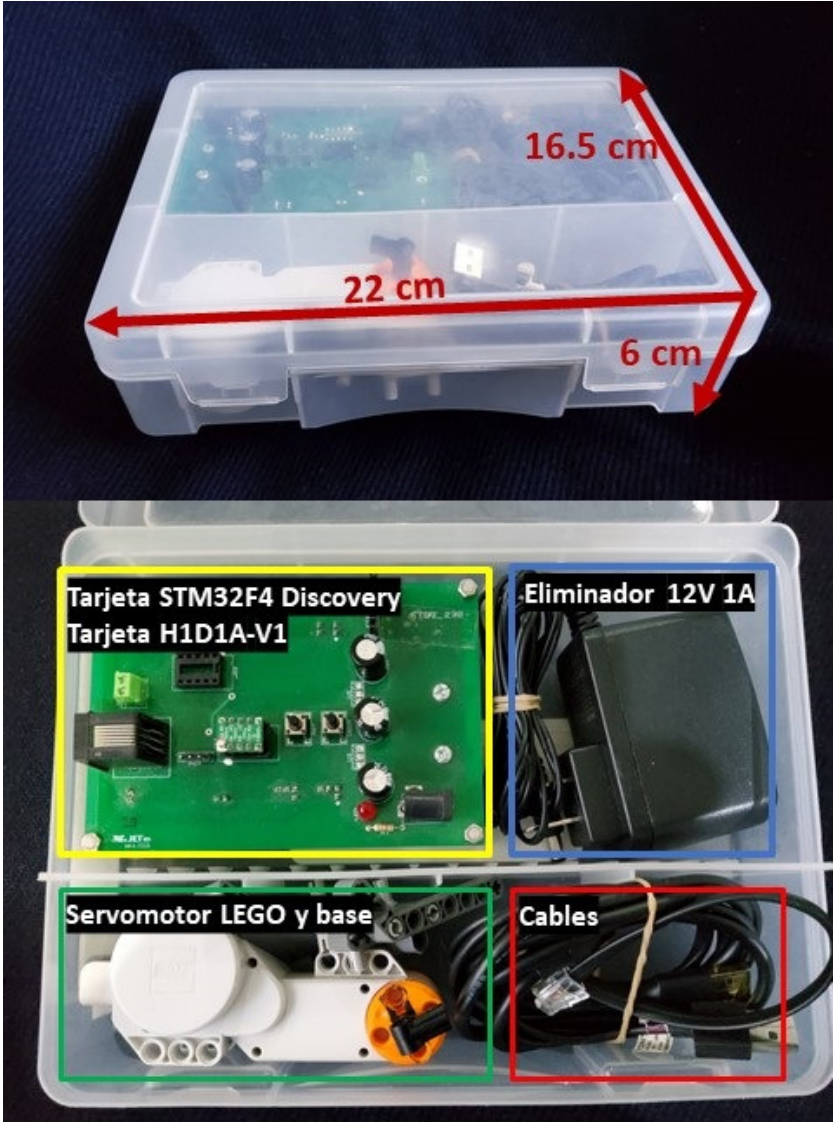


Figura 4.10: Plataforma Experimental PEE-V2.



## CAPÍTULO 4. DESCRIPCIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE LAS PLATAFORMAS EDUCATIVAS EXPERIMENTALES

Dimensiones	11.9cm × 7.6cm × 4.8cm
Peso	0.08 Kg
Voltaje de alimentación	9v
Velocidad	160-170 RPM
Rango de movimiento	Ilimitado
Corriente consumida (sin carga)	60 mA
Radio de reducción $n$	48
Sensor de posición	Codificador óptico
Resolución del codificador óptico	180 ppr

Cuadro 4.7: Características técnicas del servomotor LEGO

### 4.2.1. *Hardware*

#### 4.2.1.1. Servomotor LEGO

El servomotor LEGO está compuesto por un motor de CD, un codificador óptico y un tren de engranajes. Sus características técnicas se encuentran en la Tabla 4.7. En la Fig. 4.11, se presentan los dos modelos de servomotores LEGO que se usan con la plataforma: NXT y EV3. Estos son iguales en características técnicas, la diferencia radica en los años en que salieron al mercado.

El codificador óptico en el servomotor LEGO mide la posición angular del motor de CD y esta conectado al eje de la salida de este, como se muestra en la Fig. 4.12. Las señales del codificador óptico y la alimentación hacia el servomotor se realizan a través de un conector RJ45 izquierdo hembra montado en su carcasa.



Figura 4.11: Servomotor LEGO NXT (izquierda) y EV3 (derecha)

## CAPÍTULO 4. DESCRIPCIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE LAS PLATAFORMAS EDUCATIVAS EXPERIMENTALES

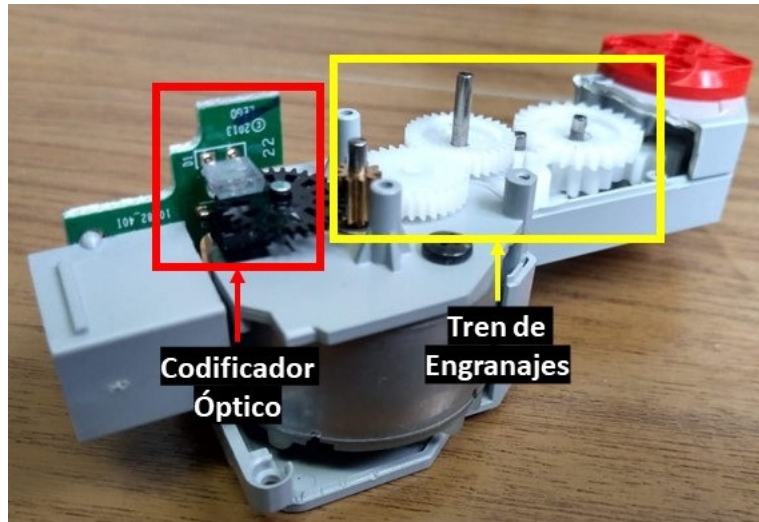


Figura 4.12: Codificador Óptico en el servomotor LEGO EV3. La disposición es la misma para el servomotor LEGO NXT. [1]

### 4.2.1.2. Tarjeta STM32F4 Discovery

La STM32F4 Discovery es una tarjeta de desarrollo de bajo costo creada por STMicroelectronics [50]. Esta emplea un microcontrolador STM32F07VGT6 y un procesador ARM Cortex M4F el cual es capaz de realizar operaciones usando punto flotante lo que permite la ejecución de algoritmos en tiempo real, además de realizar interrupciones para todos los procesos dentro del ARM Cortex M4F. Como se muestra en la Fig. 4.13 se utiliza un cable mini usb para la alimentación de la tarjeta y la programación de los algoritmos de control y un cable micro usb para el monitoreo de datos y ajuste de ganancias.

Algunas de las características que posee la tarjeta son:

- GPIOs o Puertos de entrada/salida generales: 82 .
- Frecuencia máxima del CPU: 160 MHz.
- Reloj del CPU: 16MHz.

## CAPÍTULO 4. DESCRIPCIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE LAS PLATAFORMAS EDUCATIVAS EXPERIMENTALES

- Canales Convertidor Analógico-Digital (CAD) de 12 Bits:16.
- Canales Convertidor Digital- Analógico (CDA) de 12 Bits: 2.
- Temporizadores divididos de la siguiente forma
  - Temporizadores especiales para generar las señales de modulación de ancho de pulso (*PWM*) *Pulse width modulation* de 16 bits: 2.
  - Temporizadores de 32 bits: 2.
  - Temporizadores de uso general de 16 bits: 10. Dos de estos temporizadores se emplean en la lectura de las señales generadas por codificadores ópticos.
- Interfaces de comunicación
  - Transmisores - Receptores Síncrono/Asíncrono Universal (USART): 4.
  - Transmisores - Receptores Asíncrono Universal. (UART): 2.
  - Puertos de I2C (*Inter-Integrated Circuit*): 3.
  - Puertos SPI (*Serial Peripheral Interface*): 3.
  - Puerto USB OTG (*On-The-Go*) de alta velocidad : 1.

Algunas de las ventajas de esta tarjeta son

- Costo menor a los \$500 pesos mexicanos.
- Bajo consumo energético.
- Se puede programar tanto en lenguaje C++ como en Simulink.

## CAPÍTULO 4. DESCRIPCIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE LAS PLATAFORMAS EDUCATIVAS EXPERIMENTALES



Figura 4.13: Tarjeta STM32F4 Discovery

- Las librerías necesarias para su empleo son de código abierto.

Dentro de sus desventajas se encuentran

- Memoria FLASH limitada.
- Información sobre la tarjeta es escasa.
- Para implementar algoritmos en el lenguaje C++ se requiere más tiempo.

### 4.2.1.3. Tarjeta H1D1A-V1

La tarjeta de entrada-salida H1D1A-V1, mostrada en la Fig. 4.14, fue creada en el Departamento de Control Automático del CINVESTAV para ser la interfaz entre la

## CAPÍTULO 4. DESCRIPCIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE LAS PLATAFORMAS EDUCATIVAS EXPERIMENTALES

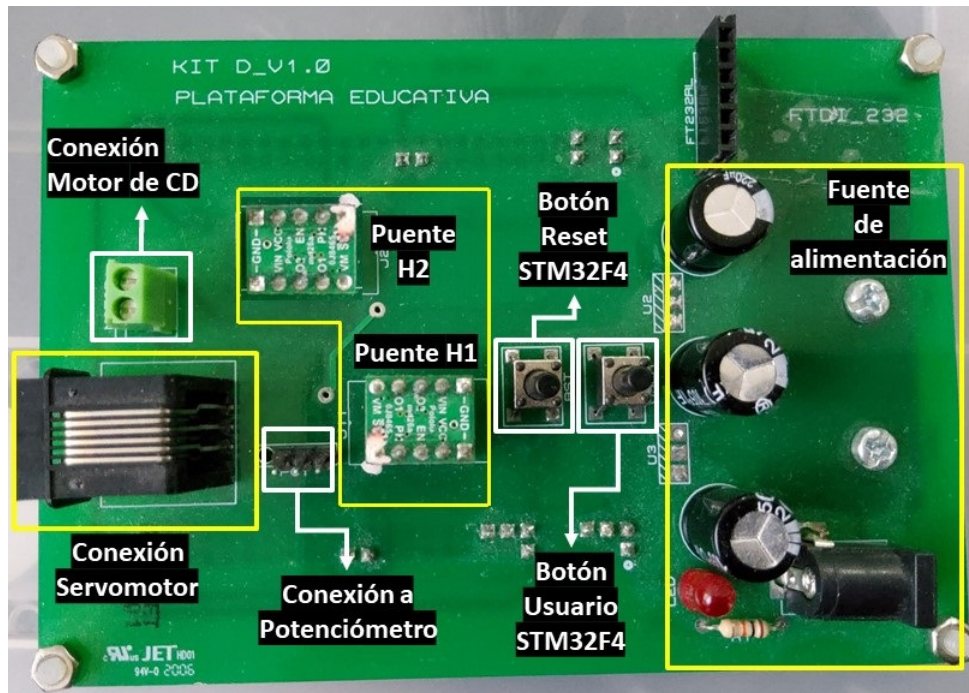


Figura 4.14: Tarjeta H1D1A-V1

tarjeta de desarrollo, los motores y la electrónica de potencia. Esta se monta mecánicamente sobre la tarjeta STM32F4 Discovery tal como se muestra en la Fig. 4.15.

Gracias a su montaje HAT (*hardware attached on top*) o sin soldadura, la tarjeta se puede reemplazar fácilmente cuando existen fallas. Esta contiene los siguientes elementos

- Puentes H: La tarjeta esta dotada de dos puentes H modelo DRV8838 de Texas Instruments [51], sus características son mostradas en la Tabla 4.8. El Puente H1 es el que se emplea con el servomotor LEGO, mientras que el Puente H2 puede alimentar a un segundo motor de CD. El circuito integrado empleado permite frecuencias de conmutación de 250 Khz, y convierte la señal de *PWM* que proviene del algoritmo de control ejecutado en la tarjeta STM32F4 en una señal *PWM* de mayor voltaje y corriente para controlar la velocidad y dirección del ser-



## CAPÍTULO 4. DESCRIPCIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE LAS PLATAFORMAS EDUCATIVAS EXPERIMENTALES

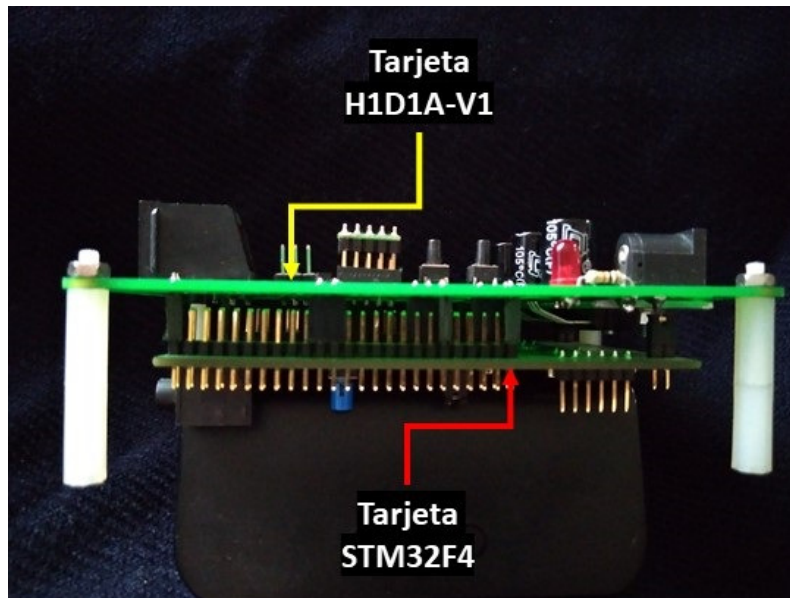


Figura 4.15: Montaje de las Tarjeta H1D1A-V1 y STM32F4

vomotor. Este circuito necesita dos fuentes de alimentación, una para alimentar la etapa de potencia de salida y que tiene un voltaje máximo  $V_M = 11V$  y otra fuente con un valor máximo  $V_{CC} = 7V$  para alimentar la parte de potencia al amplificador. Ambos puentes H se utilizan en el modo *phase enable*.

- Fuentes de alimentación: La tarjeta utiliza un adaptador de corriente de 12 V, capacitores y dos reguladores de voltaje LM7809 y LM7805. El regulador LM7809 produce el voltaje  $V_M$  que alimenta al puente H1, mientras que el regulador LM7805 produce el voltaje  $V_M$  del puente H2. Los voltajes  $V_{CC}$  para ambos puentes H se obtienen de la tarjeta STM32F4.
- Conexión entre el servomotor LEGO y la tarjeta H1D1A-V1: Esta se realiza utilizando un cable, un extremo de éste posee un conector RJ45 central el cual se conecta a la tarjeta H1D1A-V1, el otro extremo del cable se conecta al servomotor LEGO utilizando un conector RJ45 izquierdo. Este cable permite alimentar al

## CAPÍTULO 4. DESCRIPCIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE LAS PLATAFORMAS EDUCATIVAS EXPERIMENTALES

Voltaje máximo de alimentación a motor	12V
Voltaje máximo de alimentación al circuito	7V
Corriente máxima	1.8 A
Señal de entrada	<i>PWM</i>
Señal de salida	<i>PWM</i>
Frecuencia máxima de conmutación	250 kHz

Cuadro 4.8: Características del DRV8838

servomotor LEGO empleando el puente H1, y enviar las señales del codificador óptico a la tarjeta STM32F4 a través de la tarjeta H1D1A-V1.

- Conexión con un motor de CD: Este conector permite alimentar un motor de CD.
- Conexión con un potenciómetro: Este conector permite conectar un potenciómetro a la tarjeta STM32F4. El potenciómetro se alimenta con 3V.

### 4.2.1.4. Costo

El costo del prototipo está detallado en la Tabla 4.9. El precio total de la plataforma está por debajo de los \$2000 pesos mexicanos, incluyendo los cables, forma de montaje del servomotor LEGO y la tarjeta STM32F4. Se recomienda comprar al mayoreo para que el costo de envío sea menor.

## 4.2.2. Software

### 4.2.2.1. Principio de operación

La Fig. 4.16 muestra el principio de operación del software implementado en la plataforma, el cual se explica como sigue: En la computadora personal primero se crea un

## CAPÍTULO 4. DESCRIPCIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE LAS PLATAFORMAS EDUCATIVAS EXPERIMENTALES

Descripción	Cantidad	Precio (MXN)
STM32F407G-DISC1	1	440
Hardware on Top (HAT) H1D1A-V1	1	450
Servomotor LEGO EV3	1	550
Eliminador 12 V 1 A	1	70
Cable Mini-USB	1	65
Cable Micro USB	1	50
Cable Motor	1	35
Caja de Plástico	1	120
	<b>TOTAL</b>	<b>1780</b>

Cuadro 4.9: Costo de los componentes de la PEE-V2. Precios Enero 2021.

programa de Simulink que se denomina Programa de Implementación, en el cual se diseña el algoritmo de control deseado usando bloques de Simulink y de las librerías Waijung y UC3M, éstas últimas se explicarán posteriormente. Como segundo paso se utilizan las herramientas de Matlab y las librerías antes mencionadas para compilar, verificar y descargar el Programa de Implementación a la tarjeta STM32F4 a través de un cable mini USB. En esta última el programa descargado se convierte en un programa ejecutable. Para monitorear en tiempo real las señales y cambiar las ganancias del algoritmo de control se elabora otro programa en Simulink denominado Programa de Monitoreo usando las librerías antes mencionadas. El monitoreo y el cambio de las ganancias se realiza a través de un cable micro USB conectado a la tarjeta STM32F4. Si se desean realizar cambios en el Programa de Implementación es necesario repetir los pasos antes mencionados. En la Fig. 4.17, se muestra un ejemplo del Programa de Implementación del algoritmo de control Proporcional-Integral-Derivativo (PID) donde se observan los diferentes bloques que lo componen. En la Fig. 4.18, se presenta un ejemplo del Programa de Monitoreo del algoritmo de control PID, en éste los paráme-



## CAPÍTULO 4. DESCRIPCIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE LAS PLATAFORMAS EDUCATIVAS EXPERIMENTALES

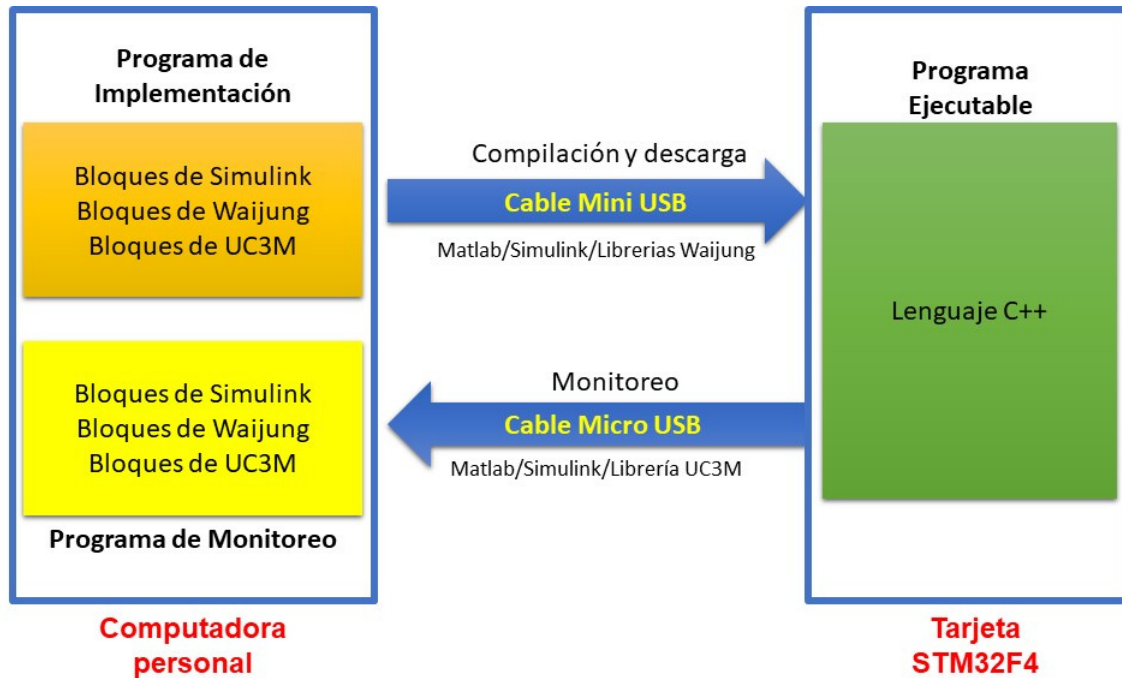


Figura 4.16: Principio de operación del software de la PEE-V2

tros que pueden modificarse corresponden a la ganancia proporcional, integral y derivativa, y se observan las señales que se monitorean, en el ejemplo éstas corresponden a la señal de posición angular medida del servomotor LEGO, la señal de control y la señal de posición angular deseada. El *software* con el que se maneja la plataforma es Matlab, descrito en la sección de *software* de la plataforma PEE-V1. Las librerías y el *software* adicionales para el uso de la plataforma se instalan como se menciona en el Apéndice A y se explican a continuación

### 4.2.2.2. Matlab/Simulink

En el caso de esta plataforma la versión que se utiliza es Matlab 2015A, la cual es compatible con las librerías descritas en los párrafos siguientes.

# CAPÍTULO 4. DESCRIPCIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE LAS PLATAFORMAS EDUCATIVAS EXPERIMENTALES

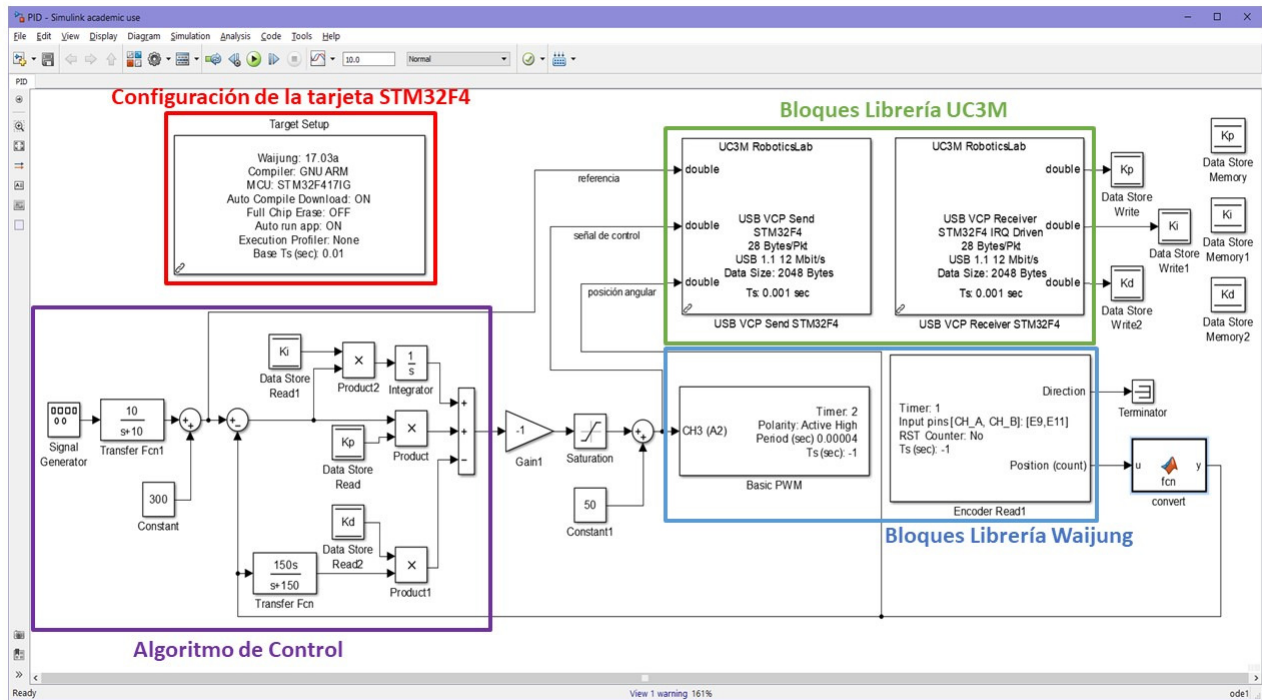


Figura 4.17: Programa de Implementación del algoritmo PID

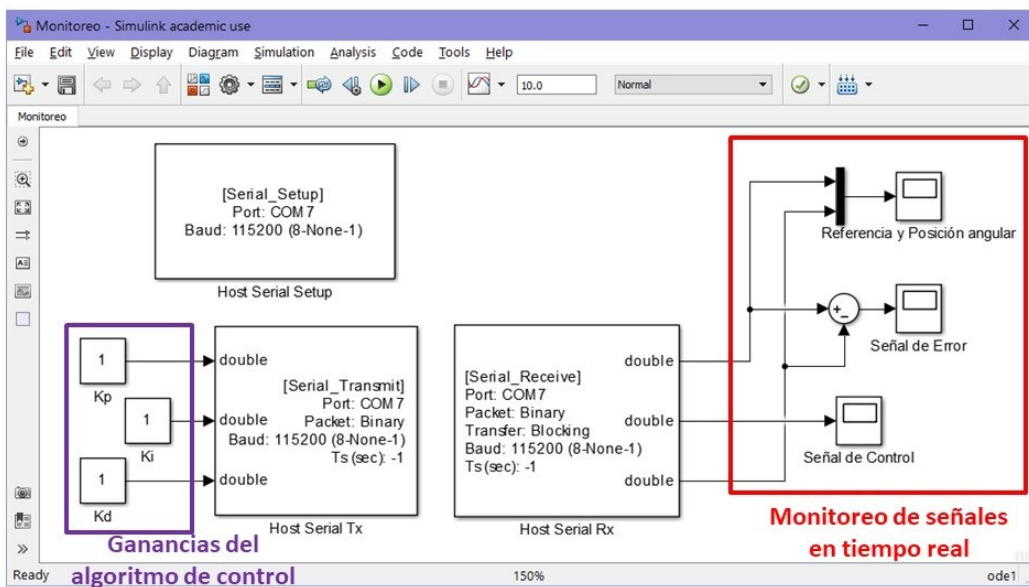


Figura 4.18: Programa de Monitoreo correspondiente al algoritmo PID

## CAPÍTULO 4. DESCRIPCIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE LAS PLATAFORMAS EDUCATIVAS EXPERIMENTALES

### 4.2.2.3. **Waijung Blockset**

Esta librería [52] se instala como un *toolbox* dentro del *software* de Simulink. Una de sus funciones es la de proporcionar una programación basada en los bloques de Simulink y en bloques especiales para entradas, salidas y funciones particulares de la tarjeta STM32F4. En la versión actual de la librería de Waijung, el bloque *Encoder*, que permite la lectura de codificadores, tiene como limitación la lectura de una sola rotación de un codificador. Cada vez que el codificador realiza una vuelta el contador asociado a éste se reinicializa impidiendo la lectura de más de una rotación.

### 4.2.2.4. **UC3M Addon Blockset**

Permite el monitoreo de datos y ajuste de ganancias en tiempo real y fue desarrollada en la Universidad Carlos III de Madrid [53].

### 4.2.2.5. **STM32 ST-LINK Utility**

Este programa [54] verifica que entre la tarjeta STM32F4 y la computadora exista una conexión estable a través de un cable mini USB.

## 4.3. **Estudio Comparativo**

Hasta este punto se han considerado las plataformas educativas en forma separada, desde su construcción hasta el *software* necesario para utilizarlas, pero para destacar los diferentes escenarios para su uso se deben entender las diferencias, simi-

## CAPÍTULO 4. DESCRIPCIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE LAS PLATAFORMAS EDUCATIVAS EXPERIMENTALES

litudes, ventajas y desventajas de las mismas. La mayor diferencia entre las plataformas es la tecnología que usa cada una. La plataforma PEE-V1 se basa en electrónica analógica como se ha observado en las secciones anteriores. Esto tiene como ventaja que el estudiante puede construir la plataforma desde cero y los materiales para realizarla se pueden encontrar en el país. Sin embargo, el uso de elementos analógicos conlleva a la existencia de ruido de medición. Este es normalmente una desventaja debido a que el ruido limita el valor máximo de las ganancias que se pueden usar en los controladores y observadores de estado. Sin embargo, la presencia de ruido de medición permite a los estudiantes observar de manera práctica los efectos que tiene en un sistema de control en lazo cerrado. Además, esta plataforma necesita de una fuente de alimentación bipolar lo cual podría requerir mas tiempo y recursos para construirla.

Por el contrario, la plataforma PEE-V2 usa electrónica digital. Las ventajas de esta elección son que no necesita una fuente bipolar y utiliza un eliminador de 12V de bajo costo disponible en el mercado nacional. Además, el empleo de un servomotor LEGO con un codificador óptico elimina el ruido de medición. Una desventaja de esta plataforma es que varios de sus componentes, principalmente la tarjeta de adquisición de datos, se deben adquirir fuera del país, lo cual aumenta el costo debido a su transporte e importación.

El precio de las plataformas difiere en un aspecto clave, a pesar de que ambas tienen un costo menor a los \$2000 pesos mexicanos, la plataforma PEE-V1 no incluye el precio de una tarjeta de adquisición de datos ni el del *software* QUARC para control en tiempo real. Algunas diferencias y similitudes se muestran en la Tabla 4.11, mientras que las ventajas y desventajas se encuentran en la Tabla 4.10.

## CAPÍTULO 4. DESCRIPCIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE LAS PLATAFORMAS EDUCATIVAS EXPERIMENTALES

Plataforma Experimental	Ventajas	Desventajas
PEE-V1	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ El estudiante puede construir-la desde cero.</li> <li>■ Se puede modificar fácilmente.</li> <li>■ Se pueden observar con mayor claridad perturbaciones como ruido de medición y su efecto en el sistema de control en lazo cerrado.</li> <li>■ Es fácil de usar y transportar.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ El precio de la plataforma no incluye la tarjeta de adquisición de datos ni el <i>software</i> de control en tiempo real QUARC.</li> <li>■ Debido al uso del potenciómetro como elemento de medición, existe una cantidad considerable de ruido.</li> <li>■ Requiere una fuente de alimentación bipolar.</li> </ul>
PEE-V2	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ El estudiante puede construir-la.</li> <li>■ Es fácil de modificar, usar y transportar.</li> <li>■ Su precio incluye la tarjeta de adquisición de datos STM32F4.</li> <li>■ Las librerías especializadas son gratuitas.</li> <li>■ Emplea un eliminador de voltaje unipolar de bajo costo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ La tarjeta STM32F4 donde se ejecuta los algoritmos de control tiene memoria limitada.</li> <li>■ Ya que las librerías no son reconocidas por Mathworks, Inc pueden ocurrir problemas de compilación.</li> </ul>

Cuadro 4.10: Ventajas y Desventajas de las Plataformas Educativas Experimentales.

## CAPÍTULO 4. DESCRIPCIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE LAS PLATAFORMAS EDUCATIVAS EXPERIMENTALES

	Plataformas Educativas Experimentales
Similitudes	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ambas plataformas usan el entorno Matlab/Simulink para la implementación de algoritmos de control.</li> <li>▪ Son compactas y se pueden implementar algoritmos básicos y avanzados de control.</li> <li>▪ El costo de las plataformas es menor a los \$2000 pesos mexicanos.</li> <li>▪ Un estudiante puede contruirlas y modificarlas.</li> <li>▪ Pueden manejar tiempos de muestreo menores a 20 ms.</li> <li>▪ No incluyen en su costo la licencia de Matlab/Simulink.</li> </ul>
Diferencias	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ La plataforma PEE-V1 usa electrónica analógica mientras que la PEE-V2 emplea electrónica digital.</li> <li>▪ La PEE-V1 usa como sensor de posición un potenciómetro, la PEE-V2 emplea un codificador óptico.</li> <li>▪ El costo de la plataforma PEE-V1 no incluye la tarjeta de adquisición de datos.</li> <li>▪ La plataforma PEE-V2 es más pequeña que la PEE-V1.</li> </ul>

Cuadro 4.11: Diferencias y Similitudes entre las Plataformas Educativas Experimentales.

# Capítulo 5

## Identificación paramétrica y Teoría de Control: Algoritmos básicos

El objetivo de este capítulo es evaluar las plataformas educativas descritas en capítulos anteriores mediante la implementación de algoritmos de control básicos y el algoritmo de identificación paramétrica de Mínimos Cuadrados. Los experimentos permitirán también determinar diferencias y similitudes en el funcionamiento y en su desempeño con los algoritmos implementados.

Este capítulo inicia con una breve explicación del modelo matemático del servomotor de CD y del amplificador que lo alimenta, los cuales son usados en las plataformas educativas desarrolladas en este trabajo. Se especifica el tiempo de muestreo y la conexión de las plataformas con una computadora personal. Posteriormente, se presenta la teoría de algunos algoritmos de control básicos y de identificación paramétrica que fueron implementados en las PEE, así como los resultados experimentales correspondientes.

## 5.1. Modelo matemático del servomotor de CD y su amplificador de potencia

Al conjunto del servomotor de CD, amplificador de potencia y sensor de posición se denominan dentro de este trabajo como un servosistema. La siguiente ecuación diferencial describe el modelo del servosistema (Ver (B.22) en el Apéndice B)

$$\ddot{y} = -a\dot{y} + bu \quad (5.1)$$

La variable  $y$  es la posición angular del motor y  $u$  la señal de control. Los parámetros  $a$  y  $b$  son constantes positivas. La función de transferencia para el modelo (5.1) es la siguiente (Ver (B.19) en el Apéndice B)

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b}{s^2 + as} \quad (5.2)$$

## 5.2. Configuración Experimental

### 5.2.1. PEE-V1

La configuración usada para emplear la plataforma experimental PEE-V1 se muestra en la Fig. 5.1. La plataforma se controla a través de una computadora personal dotada con una tarjeta de adquisición de datos Sensoray modelo 626. Esta tarjeta tiene 6 contadores de 24 bits con soporte para codificadores incrementales, 48 entra-



## CAPÍTULO 5. IDENTIFICACIÓN PARAMÉTRICA Y TEORÍA DE CONTROL: ALGORITMOS BÁSICOS

das/salidas digitales bidireccionales, 16 entradas analógicas y 4 salidas analógicas con una resolución de 14 bits y con un rango de voltaje de  $\pm 10V$ . Las conexiones hacia la tarjeta se realizan a través de un panel de conexiones.

La señal calculada mediante el algoritmo de control se convierte a un voltaje a través de uno de los convertidores digitales-analógicos de esta tarjeta y esta señal alimenta al amplificador de potencia LM675.

La programación y la ejecución de los algoritmos de control en tiempo real en la PEE-V1 se realiza usando Matlab/Simulink y Quarc descritos en el Capítulo 4. El periodo de muestreo se establece a 1 ms y el algoritmo de integración es el método de Euler01. Para obtener un estimado  $\dot{y}_e$  de la derivada de la posición angular  $y$  se utiliza el siguiente filtro pasa altas

$$F(s) = \frac{\mathcal{L}\{\dot{y}_e\}}{\mathcal{L}\{y\}} = \frac{160s}{s + 160} \quad (5.3)$$

## CAPÍTULO 5. IDENTIFICACIÓN PARAMÉTRICA Y TEORÍA DE CONTROL: ALGORITMOS BÁSICOS

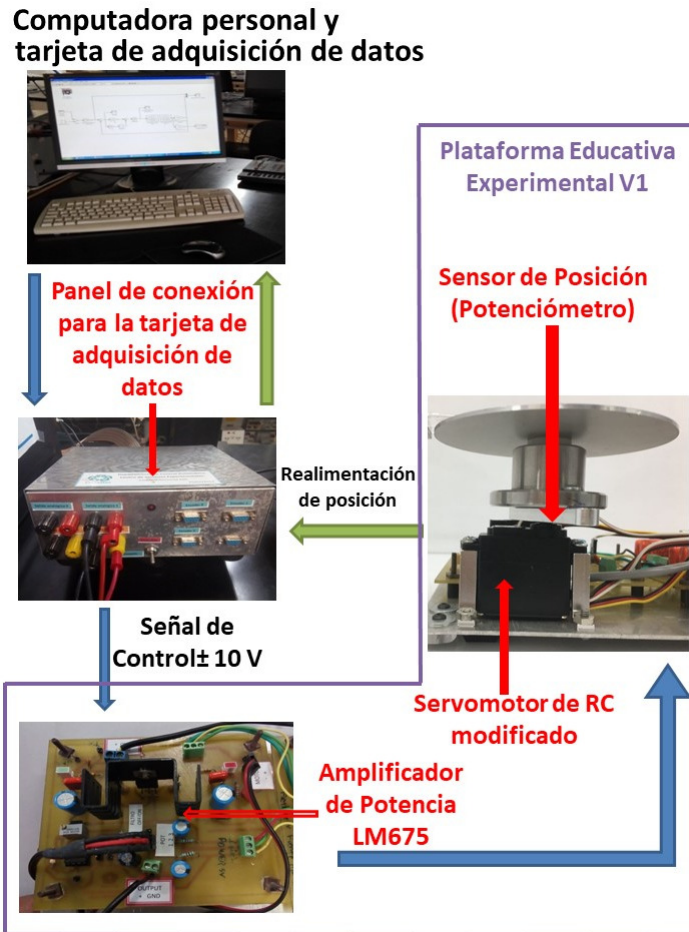


Figura 5.1: Configuración experimental de la PEE-V1

### 5.2.2. PEE-V2

La configuración experimental para utilizar el prototipo se muestra en la Fig. 5.3. El periodo de muestreo es de 1 ms salvo que se indique lo contrario y el algoritmo de integración corresponde al método Euler01. Los pasos específicos para realizar la implementación del algoritmo de control y monitoreo de señales en tiempo real se encuentran en el Apéndice A y el esquemático de la plataforma PEE-V2 está en el Apéndice C. Se utiliza el filtro pasa altas (5.3) para obtener un estimado  $\dot{y}_e$  de  $\dot{y}$  usando

## CAPÍTULO 5. IDENTIFICACIÓN PARAMÉTRICA Y TEORÍA DE CONTROL: ALGORITMOS BÁSICOS

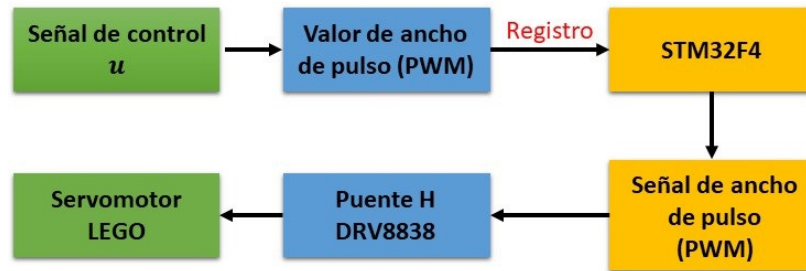


Figura 5.2: Transformación de la señal de control  $u$

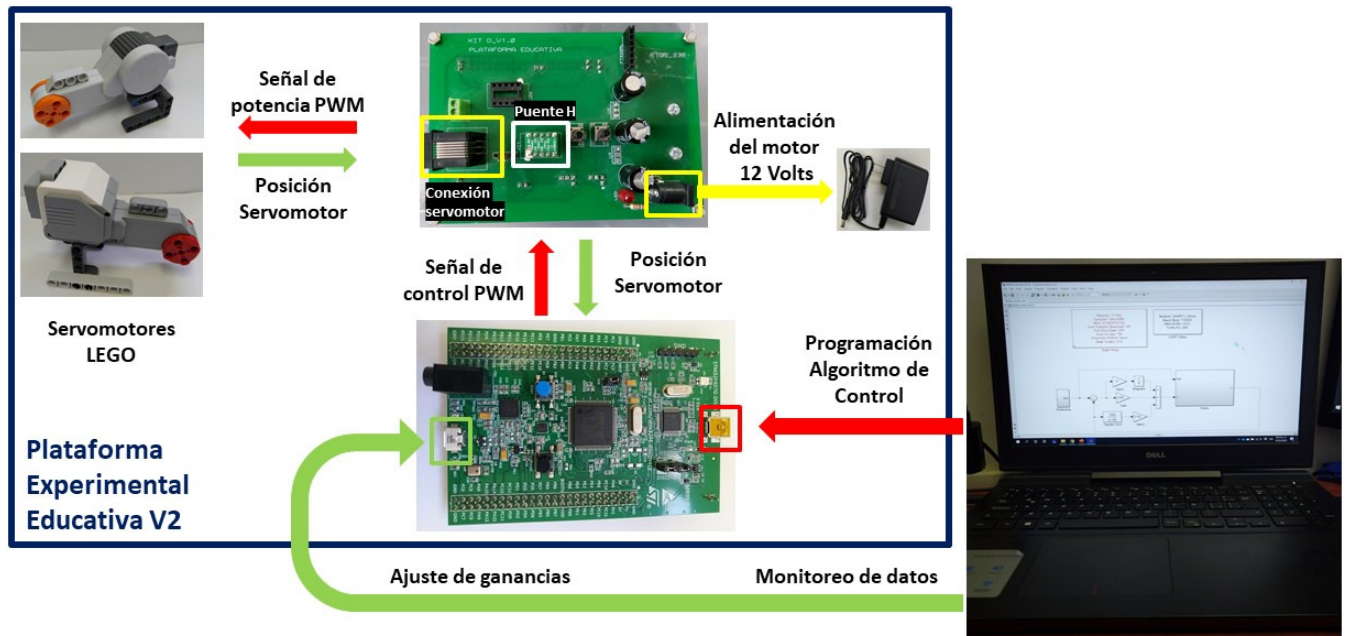


Figura 5.3: Configuración experimental de la PEE-V2

la posición angular del codificador óptico. Notar que la señal de control  $u$  se transforma en un valor de ancho de pulso  $PWM$  que genera la tarjeta STM32F4 mediante la siguiente expresión

$$PWM = \text{sat}(-u) + 50 \quad (5.4)$$

Lo anterior se observa en la Fig. 5.2. La frecuencia de la señal de ancho de pulso es de  $20kHz$ .

## 5.3. Algoritmo PI con realimentación

### taquimétrica y *anti-windup*

#### 5.3.1. Teoría

Uno de los controladores más utilizados en la industria y en la enseñanza del Control Automático como punto de partida y de comparación con otros algoritmos es el controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID). Esto se debe a varias razones:

- Únicamente se requiere la sintonización de tres ganancias.
- La sintonización se puede llevar a cabo de forma heurística.
- Existen numerosas reglas de sintonización tales como el método de Ziegler-Nichols [55].
- Es posible realizar la sintonización usando métodos basados en modelos [56].
- En el caso de los servosistemas, la interpretación de las acciones proporcional, integral y derivativa es relativamente sencilla.

El controlador PID es descrito por la siguiente ecuación en el dominio del tiempo

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \dot{e}(t) \quad (5.5)$$

Los términos  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$  corresponden a las ganancias proporcional, integral y derivativa respectivamente. El error de posición se define como  $e = r - y$  donde  $r$  es la posición angular deseada.

## CAPÍTULO 5. IDENTIFICACIÓN PARAMÉTRICA Y TEORÍA DE CONTROL: ALGORITMOS BÁSICOS

Las ganancias de este controlador tienen los siguientes efectos cuando el algoritmo PID se utiliza para controlar un servosistema:

- **Ganancia Proporcional:** Modifica la velocidad de respuesta del servosistema. Incrementando su valor se aumenta la velocidad de respuesta.
- **Ganancia Integral:** Permite modular la acción integral para eliminar los errores de posición en estado estacionario. Valores demasiado grandes pueden inestabilizar al servosistema.
- **Ganancia Derivativa:** Modifica el perfil de respuesta del servosistema. Incrementando su valor se eliminan los sobretiros debido a la falta de amortiguamiento.

Un problema que necesita consideración para el uso práctico del controlador PID está relacionado con la acción derivativa. Cuando la referencia  $r$  cambia súbitamente, el valor de su derivada  $\dot{r}$  puede tomar valores muy grandes. Lo anterior sucede con señales de tipo escalón o con señales de referencia que cambian muy rápidamente. Consecuentemente, la derivada del error  $\dot{e} = \dot{r} - \dot{y}$  puede tomar valores muy grandes lo cual se traduce en un sobretiro en la posición angular del servosistema. Lo anterior puede provocar problemas de saturación en el amplificador de potencia y de oscilaciones en la carga [57]. Por lo anterior, la versión que se utiliza en este trabajo es el controlador Proporcional-Integral (PI) con realimentación taquimétrica (PIRT) [58], [59] descrito por la siguiente ecuación en el dominio del tiempo

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau - K_d \dot{y}_e \quad (5.6)$$

CAPÍTULO 5. IDENTIFICACIÓN PARAMÉTRICA Y TEORÍA DE CONTROL:  
ALGORITMOS BÁSICOS

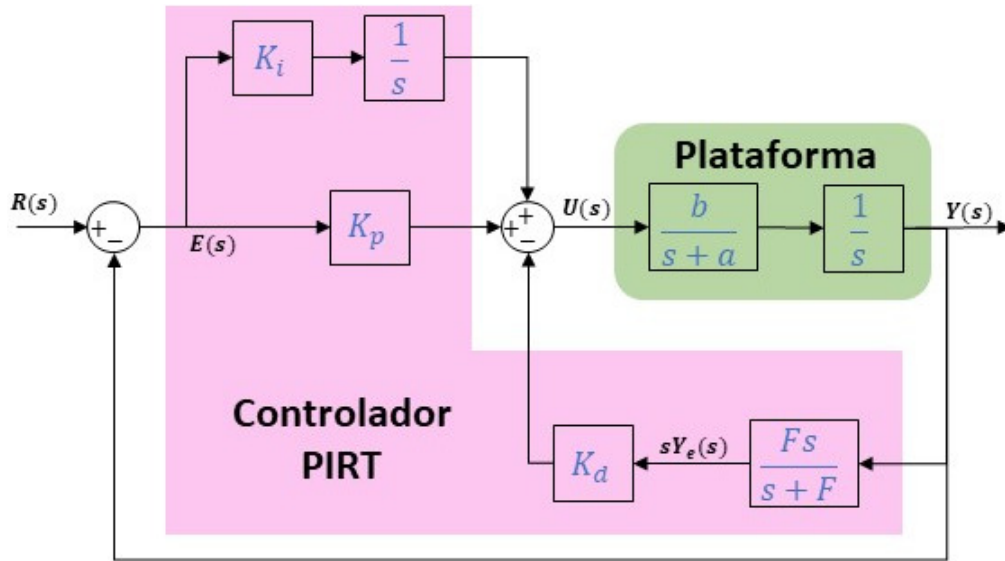


Figura 5.4: Diagrama de bloques del controlador PIRT con  $F = 160$

A diferencia del controlador (5.5), el algoritmo PIRT no emplea la derivada  $\dot{e}$ , en su lugar sólo emplea la derivada de la salida  $\dot{y}$ . Lo anterior evita el empleo de  $\dot{r}$  que como se mencionó anteriormente puede tomar valores muy grandes si existen cambios en la referencia muy rápidos. La Fig. 5.4 muestra el diagrama de bloques del controlador PIRT.

Un efecto que puede presentarse en la aplicación del controlador (5.6) es conocido como *wind-up*; éste se produce cuando un sistema en lazo cerrado tiene cambios grandes en la señal de referencia, sufre de perturbaciones muy grandes, existen fallas en el equipo o cuando la señal de control  $u(t)$  alcanza magnitudes elevadas que provocan saturación en los actuadores. En particular en los servosistemas provoca saturación en el amplificador que alimenta al motor de CD.

Si existe una saturación en la señal de control  $u$  y el error  $e$  es grande, por ejemplo cuando existe una referencia elevada, el error  $e$  tomará un tiempo largo en disminuir y bajo esas condiciones el sistema en lazo cerrado puede oscilar cuando el actuador

## CAPÍTULO 5. IDENTIFICACIÓN PARAMÉTRICA Y TEORÍA DE CONTROL: ALGORITMOS BÁSICOS

regrese a su condición no saturada.

Una forma de solucionar este problema es utilizar un mecanismo de *anti-windup*, el cual se activa cuando la señal de control  $u$  sobrepasa un límite propuesto. Durante el funcionamiento del *antiwindup* se cierra un lazo de realimentación alrededor del integrador lo cual impide que su señal de salida crezca de manera no controlada, cuando no existe saturación en el actuador, el mecanismo de *antiwindup* deja de funcionar y el lazo alrededor del integrador deja de existir. Como se observa en la Fig. 5.5, éste mecanismo de *anti-windup* se agrega al controlador PIRT (5.6) que se tenía anteriormente utilizando el método de *back calculation* [60], mostrado en la ecuación (5.7).

$$u_s(t) = \begin{cases} u_s(t) = u(t) & \text{si } -U_{lim} \leq u(t) \leq U_{lim}(t) \\ u_s(t) = U_{lim}(t) & \text{si } u(t) > U_{lim}(t) \\ u_s(t) = -U_{lim}(t) & \text{si } u(t) < -U_{lim}(t) \end{cases} \quad (5.7)$$

donde  $U_{lim}(t)$  depende de la señal máxima del amplificador y  $u(t)$  se describe de la siguiente forma

$$u(t) = K_p e(t) + \int_0^t (K_i e(\tau) + K_{aw} e_s) d\tau - K_d \dot{y}_e \quad (5.8)$$

El término  $K_{aw}$  corresponde a la ganancia de *anti-windup* y el error de *anti-windup* se describe como  $e_s = u_s(t) - u(t)$ . Notar que cuando no existe saturación se cumple que  $e_s = 0$ .

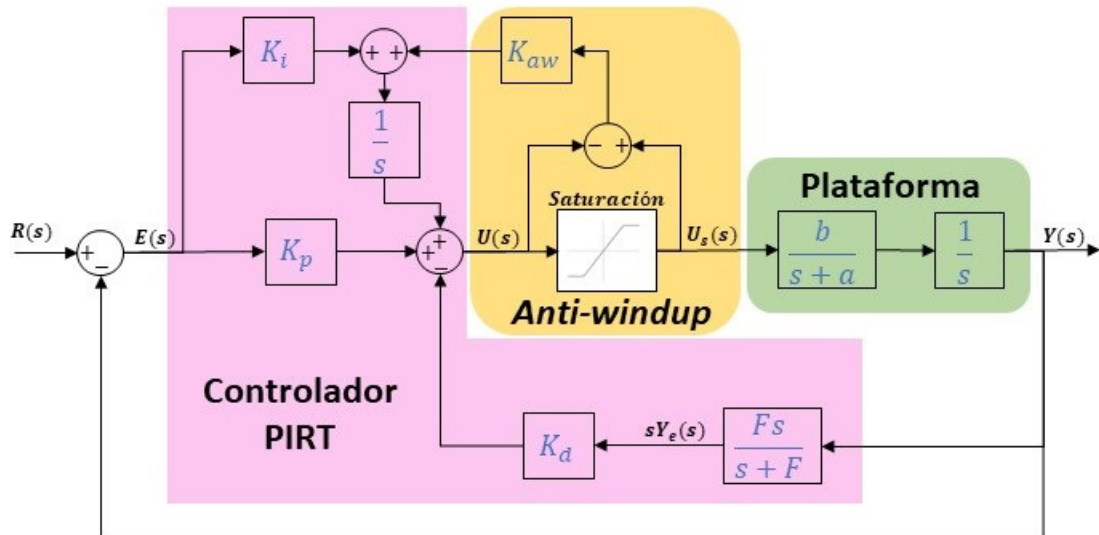


Figura 5.5: Diagrama de bloques del controlador PIRT con *Anti-windup* y  $F = 160$

## 5.3.2. Resultados Experimentales

### 5.3.2.1. Implementación del algoritmo de control PIRT + *anti-windup* usando la PEE-V1

Para los experimentos en tiempo real se usaron como referencia

- R1: Señal de onda cuadrada filtrada que varía de  $0^\circ$  a  $90^\circ$ .
- R2: Señal de onda cuadrada filtrada que varía de  $0^\circ$  a  $170^\circ$ .

El filtro empleado para procesar la señal de onda cuadrada es el siguiente:

$$G_r = \frac{20}{s + 20} \quad (5.9)$$

Se presentan experimentos usando el algoritmo PIRT con y sin *antiwindup*. Las ganancias usadas en los experimentos se encuentran en la Tabla 5.1



## CAPÍTULO 5. IDENTIFICACIÓN PARAMÉTRICA Y TEORÍA DE CONTROL: ALGORITMOS BÁSICOS

Controlador	Referencia	$K_p$	$K_d$	$K_i$	$K_{aw}$
PIRT	R1	4	0.03	1.75	0
PIRT	R2	4	0.03	1.75	0
PIRT+ <i>antiwindup</i>	R2	4	0.03	1.75	1.25

Cuadro 5.1: Ganancias de los controladores PIRT y PIRT + *antiwindup*. Experimentos en la plataforma PEE-V1

La Fig. 5.6 muestra la posición deseada y la respuesta del servosistema en lazo cerrado usando la referencia R1. Las Figuras 5.7 y 5.8 presentan respectivamente las señales control y de error de posición correspondientes.

Se observa en la Fig. 5.6 que la respuesta del servosistema usando la Referencia 1 presenta un sesgo en la primera parte de la señal eliminándose éste por completo cuando se completa un periodo de la señal. Aunque puede parecer que se necesita modificar las ganancias, en el experimento en tiempo real la modificación no mejoró el desempeño. Este comportamiento puede deberse a la fricción dentro de la caja de engranes que impulsa el motor. Se observa que la señal de salida  $y(t)$  no presenta sobretiros ni ruido de medición apreciable. La Fig. 5.7 muestra que la señal de control no presenta variaciones importantes. Notar que las señales de control no alcanzan los límites máximos de  $\pm 10V$  y por lo tanto no se tienen problemas de *windup*.

La referencia R2 practicamente cubre el rango de movimiento del servomotor de RC (ver Tabla 4.1). Las figuras 5.9, 5.10 y 5.11 muestran la referencia y la respuesta del servosistema en lazo cerrado, las señales de control y de error de posición. Como se muestra en la Fig. 5.9, la respuesta  $y(t)$  cuando se usa la Referencia 2 y el algoritmo de control PIRT sin *antiwindup* no es la esperada. Se observa a simple vista un error en estado estacionario apreciable, el cual puede deberse a la fricción estática no con-

## CAPÍTULO 5. IDENTIFICACIÓN PARAMÉTRICA Y TEORÍA DE CONTROL: ALGORITMOS BÁSICOS

siderada en el modelo (5.1) y como se mencionó con anterioridad se origine en la caja de engranajes. Como se observa en la gráfica 5.10 la señal de control  $u(t)$  sobrepasa los límites de  $\pm 10V$ , lo cual produce el efecto de *windup* en el integrador. Sin embargo, en ambas gráficas 5.9 y 5.10 se observa que cuando se aplica el controlador PIRT + *antiwindup*, no se presenta un error en estado estacionario apreciable y la señal de control  $u(t)$  queda acotada a  $\pm 10V$ .

Notar que durante la aplicación de ambos controladores, las señales de salida  $y(t)$ , control  $u(t)$  y error  $e(t)$ , no presentaron niveles de ruido considerables.

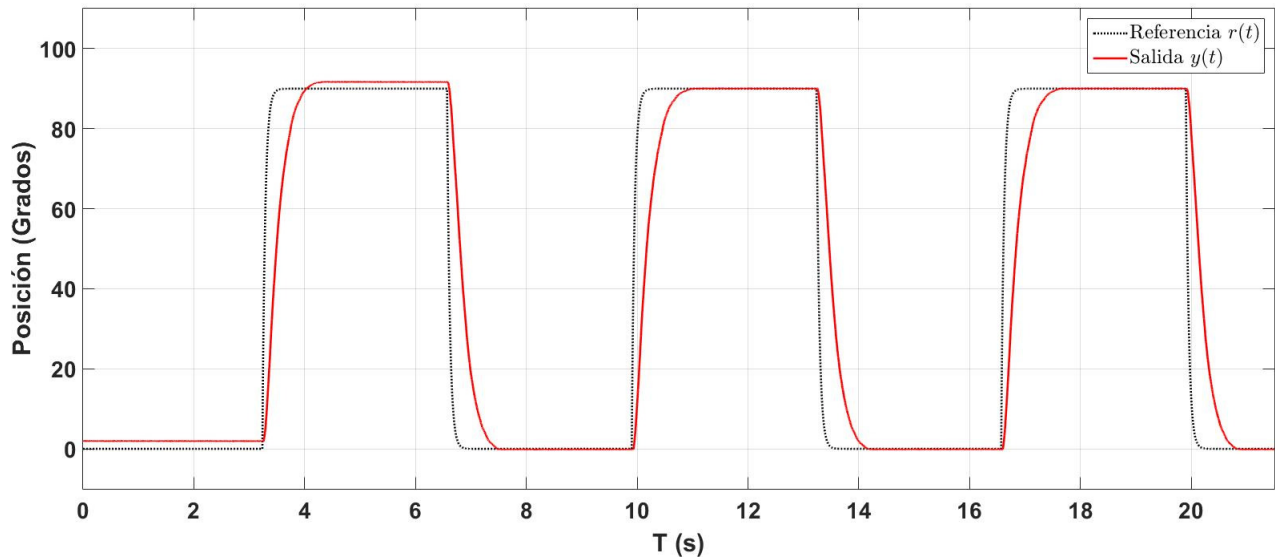


Figura 5.6: Señal de Referencia R1 y salida del servosistema en lazo cerrado usando el algoritmo PIRT.

## CAPÍTULO 5. IDENTIFICACIÓN PARAMÉTRICA Y TEORÍA DE CONTROL: ALGORITMOS BÁSICOS

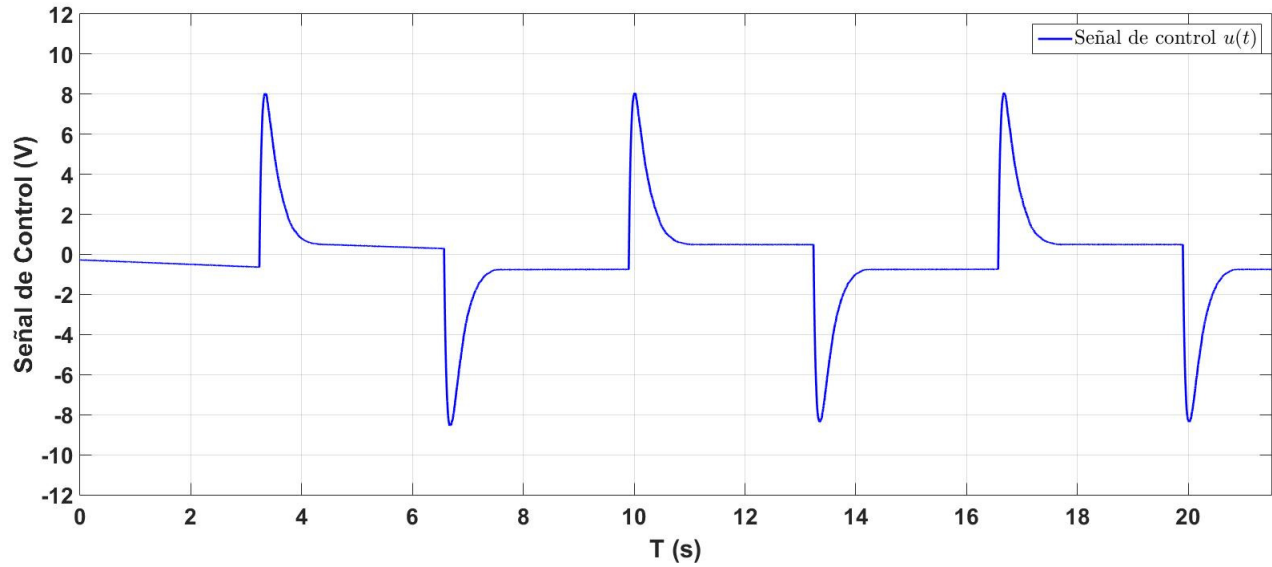


Figura 5.7: Señal de control usando la Referencia R1 y el algoritmo PIRT.

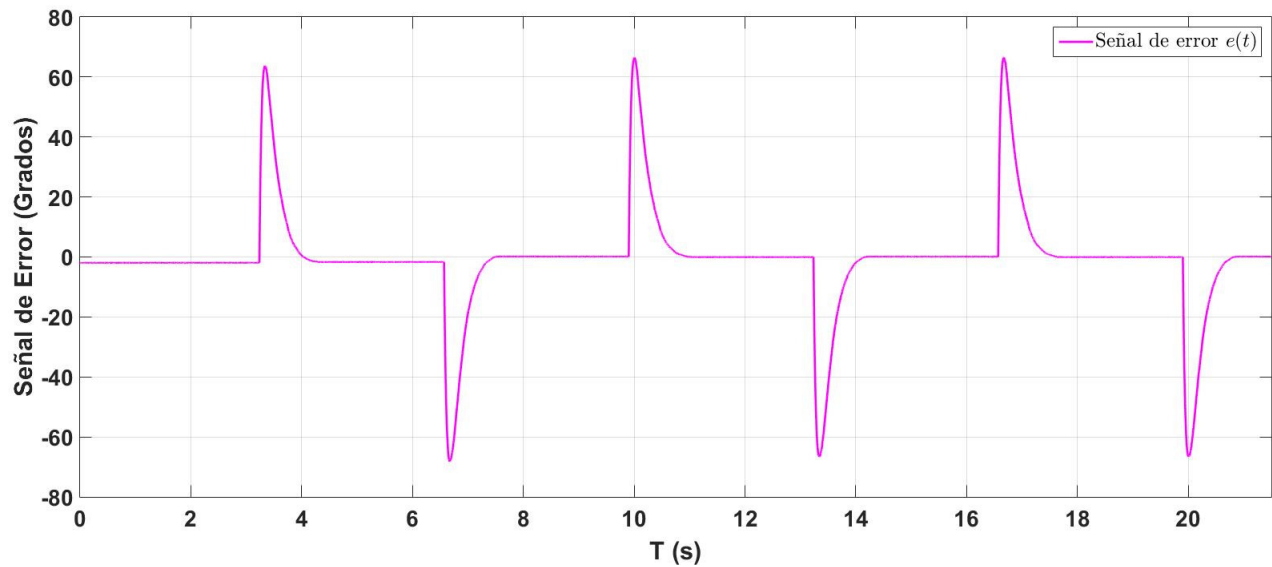


Figura 5.8: Señal de error de posición usando la Referencia R1 y el algoritmo PIRT.

# CAPÍTULO 5. IDENTIFICACIÓN PARAMÉTRICA Y TEORÍA DE CONTROL: ALGORITMOS BÁSICOS

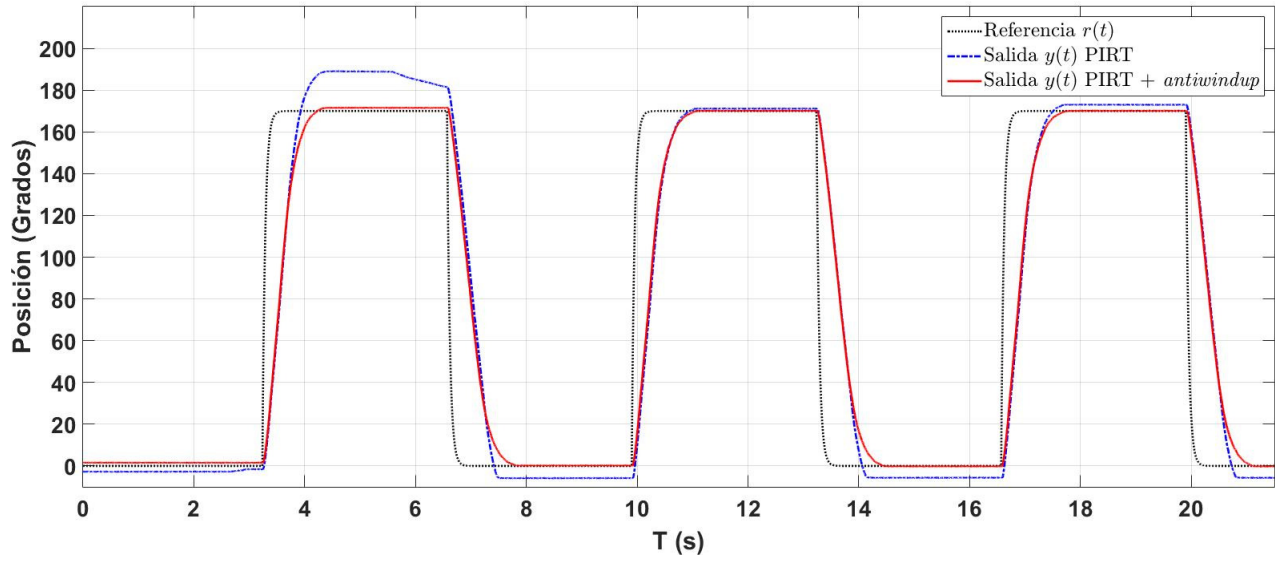


Figura 5.9: Señal de Referencia R2 y salida del servosistema en lazo cerrado usando los algoritmos PIRT y PIRT + *antiwindup*.

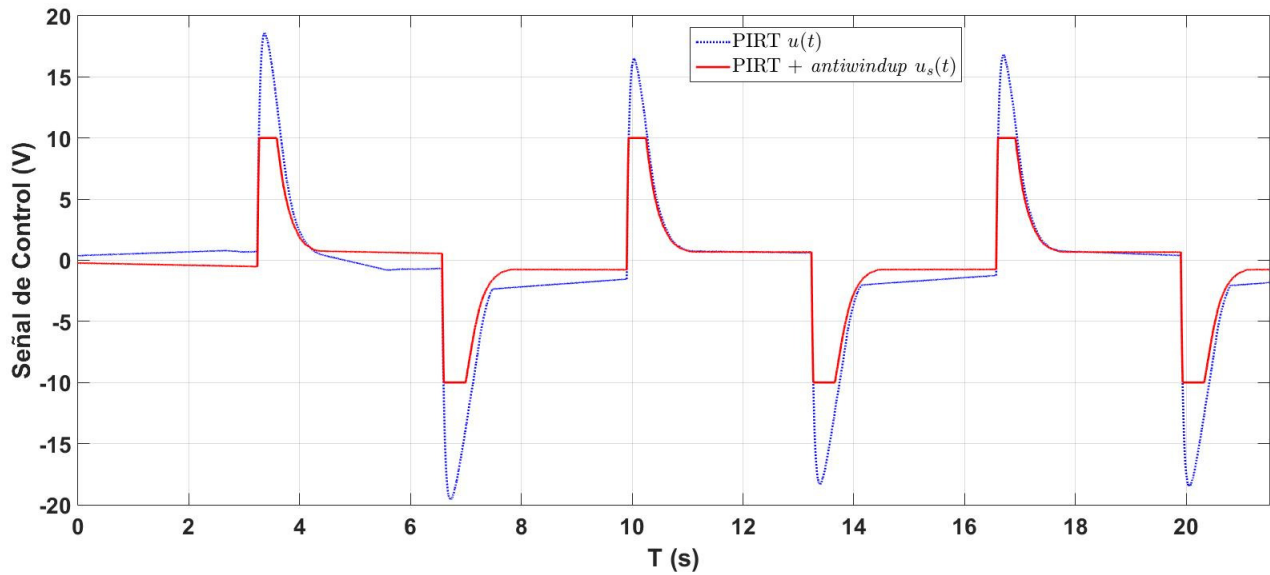


Figura 5.10: Señal de control usando la Referencia R2 y los algoritmos PIRT y PIRT + *antiwindup*.

## CAPÍTULO 5. IDENTIFICACIÓN PARAMÉTRICA Y TEORÍA DE CONTROL: ALGORITMOS BÁSICOS

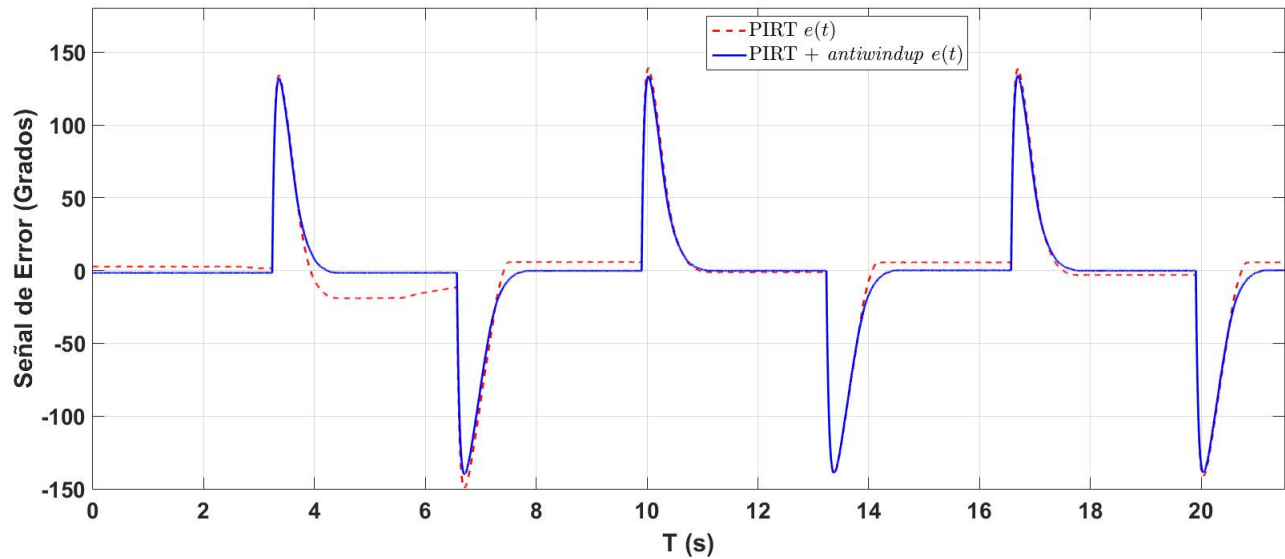


Figura 5.11: Señal de error de posición usando la Referencia R2 y los algoritmos PIRT y PIRT + *antiwindup*.

### 5.3.2.2. Implementación del algoritmo de control PIRT + *antiwindup* usando la PEE-V2

En este caso se emplearon las siguientes referencias:

- R1: Señal de onda cuadrada filtrada que varía de  $25^\circ$  a  $115^\circ$ .
- R2: Señal de onda cuadrada filtrada que varía de  $25^\circ$  a  $325^\circ$

El filtro (5.9) se emplea para procesar la señal de onda cuadrada. Se realizaron tres experimentos usando el algoritmo PIRT con y sin *antiwindup*. Las ganancias utilizadas se encuentran en la Tabla 5.2 y se obtuvieron por prueba y error.

Las figuras 5.12, 5.13 y 5.14 presentan respectivamente la posición deseada, la respuesta del servosistema en lazo cerrado, la señal de control y de error de posición usando la referencia R1 correspondiente. En la Fig. 5.12 se observa que la respuesta

## CAPÍTULO 5. IDENTIFICACIÓN PARAMÉTRICA Y TEORÍA DE CONTROL: ALGORITMOS BÁSICOS

Controlador	Referencia	$K_p$	$K_d$	$K_i$	$K_{aw}$
PIRT	R1	1.5	0.05	0.18	0
PIRT	R2	1.5	0.05	0.18	0
PIRT+ <i>anti-windup</i>	R2	1.5	0.05	0.18	0.23

Cuadro 5.2: Ganancias de los controladores PIRT y PIRT + *anti-windup*. Experimentos en la plataforma PEE-V2

del servosistema llega a la referencia R1 sin sobretiros y con un error en estado estacionario menor a un pulso de codificador óptico. La señal de control  $u(t)$  mostrada en la Fig. 5.13 no alcanza los límites máximos de la señal *PWM* de  $\pm 50$  por lo que no se tienen problemas de *windup*. Notar que la señal de control tiene un ruido apreciable, este comportamiento se debe a las discontinuidades que aparecen en las mediciones obtenidas con el codificador óptico y su posterior amplificación en el filtro pasa altas (5.3) empleado para estimar la velocidad angular.

La referencia R2 es cercana al límite de la lectura permitida por el *software*. Las Figuras 5.15, 5.16 y 5.17 corresponden a esta referencia, la respuesta del servosistema en lazo cerrado, la señal de control y de error de posición usando los algoritmos de control PIRT y PIRT con *antiwindup*, respectivamente.

La Fig. 5.15 muestra la respuesta del servosistema  $y(t)$  a la referencia R2 usando los controladores PIRT y PIRT + *antiwindup* y se observa que con el controlador PIRT existe un error en estado estacionario el cual disminuye cuando se aplica un controlador PIRT con el mecanismo de *antiwindup* usando las mismas ganancias. La señal de control  $u(t)$ , mostrada en la Fig. 5.16, para el controlador PIRT sobrepasa de los límites mencionados anteriormente causando el efecto de *windup*, además de que se observa en la señal ruido notable. Notar que en la misma figura cuando se utiliza el

## CAPÍTULO 5. IDENTIFICACIÓN PARAMÉTRICA Y TEORÍA DE CONTROL: ALGORITMOS BÁSICOS

PIRT + *antiwindup* se limita adecuadamente la señal de control al rango de  $\pm 50$ .

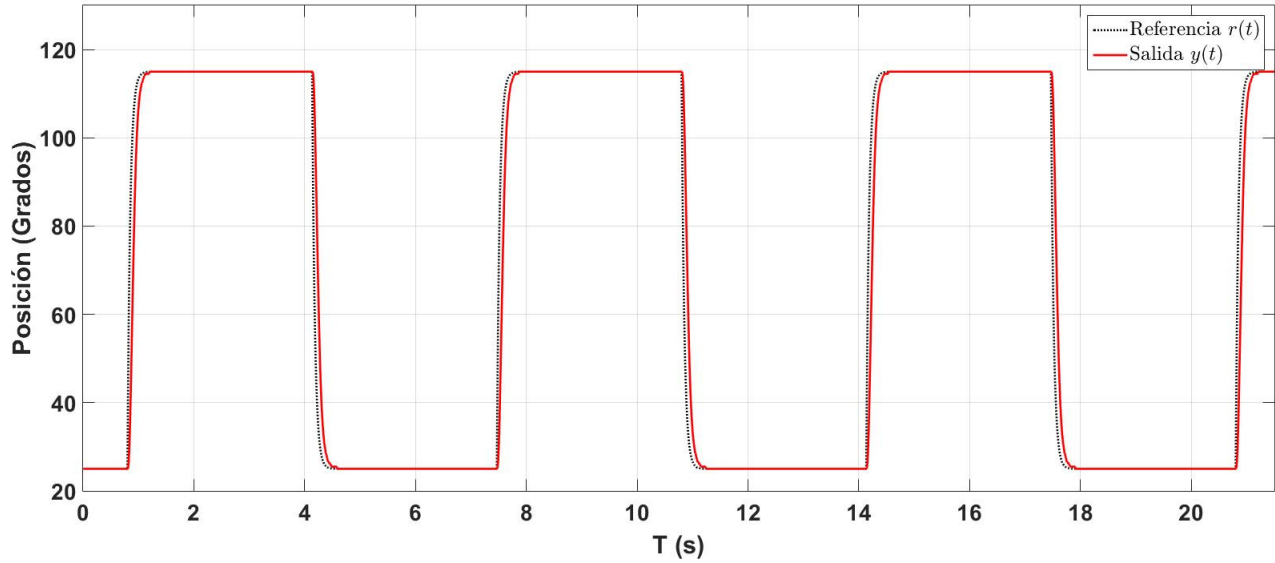


Figura 5.12: Señal de Referencia R1 y salida del servosistema en lazo cerrado usando el algoritmo PIRT.

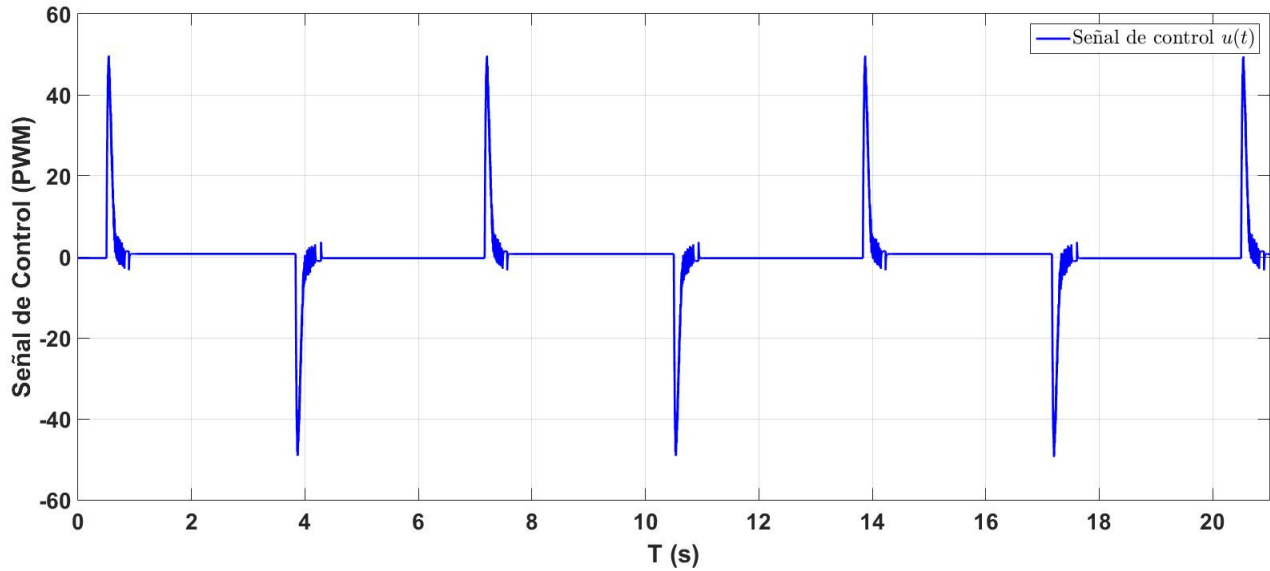


Figura 5.13: Señal de control usando la Referencia R1 y el algoritmo PIRT.

# CAPÍTULO 5. IDENTIFICACIÓN PARAMÉTRICA Y TEORÍA DE CONTROL: ALGORITMOS BÁSICOS

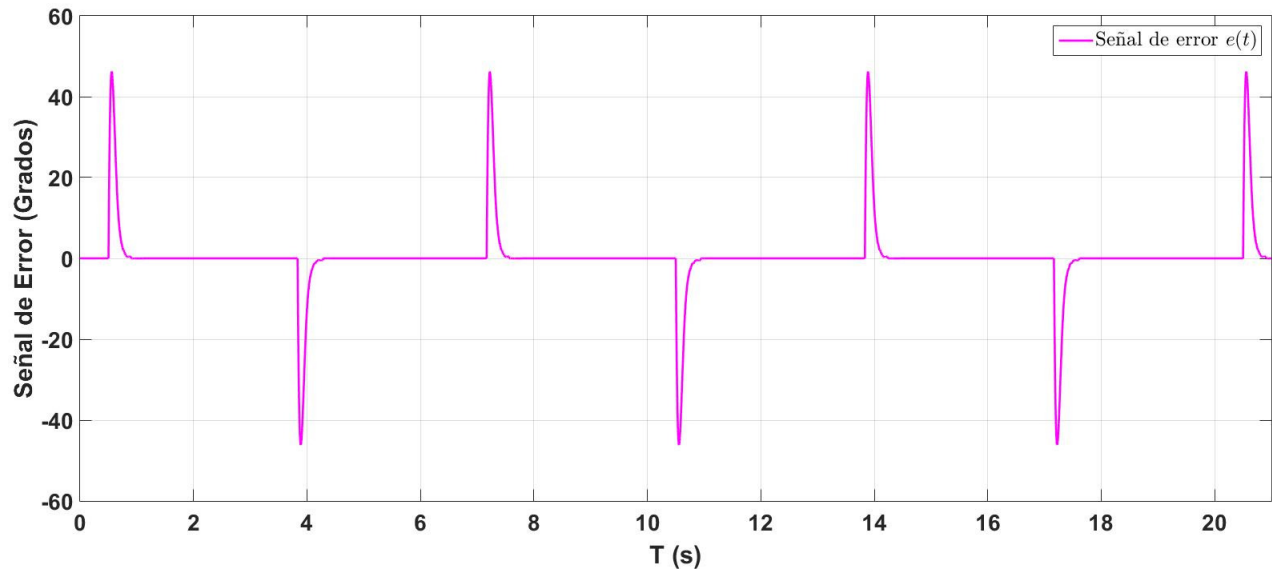


Figura 5.14: Señal de error de posición usando la referencia R1 y el algoritmo PIRT.

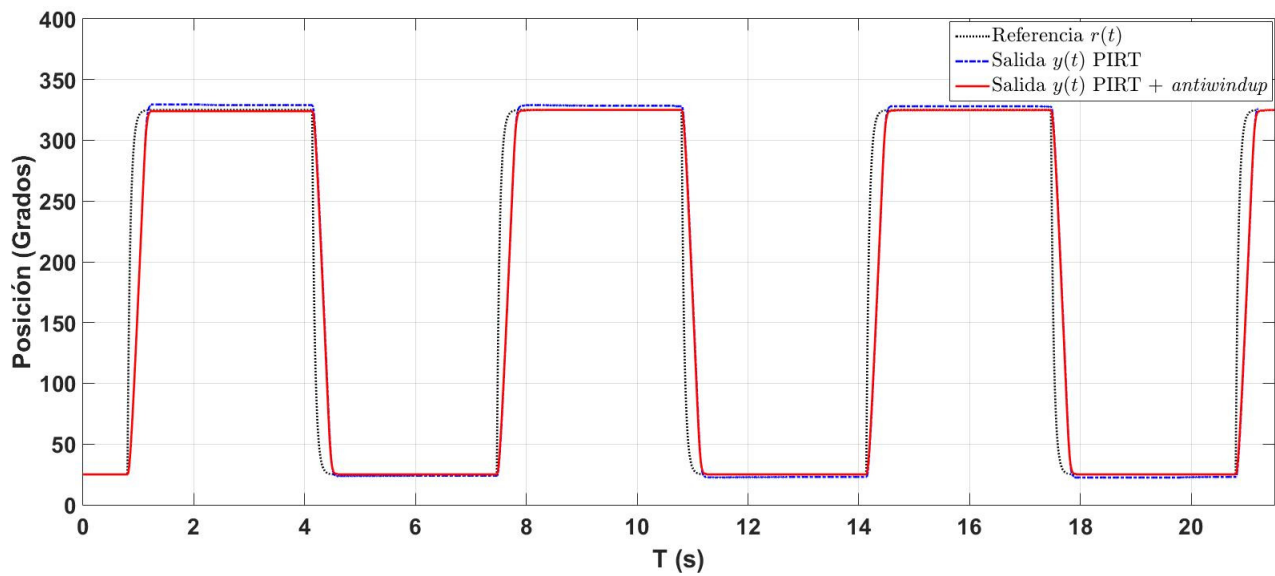


Figura 5.15: Señal de Referencia R2 y salida del servosistema en lazo cerrado usando los algoritmos de PIRT y PIRT + *antiwindup*



# CAPÍTULO 5. IDENTIFICACIÓN PARAMÉTRICA Y TEORÍA DE CONTROL: ALGORITMOS BÁSICOS

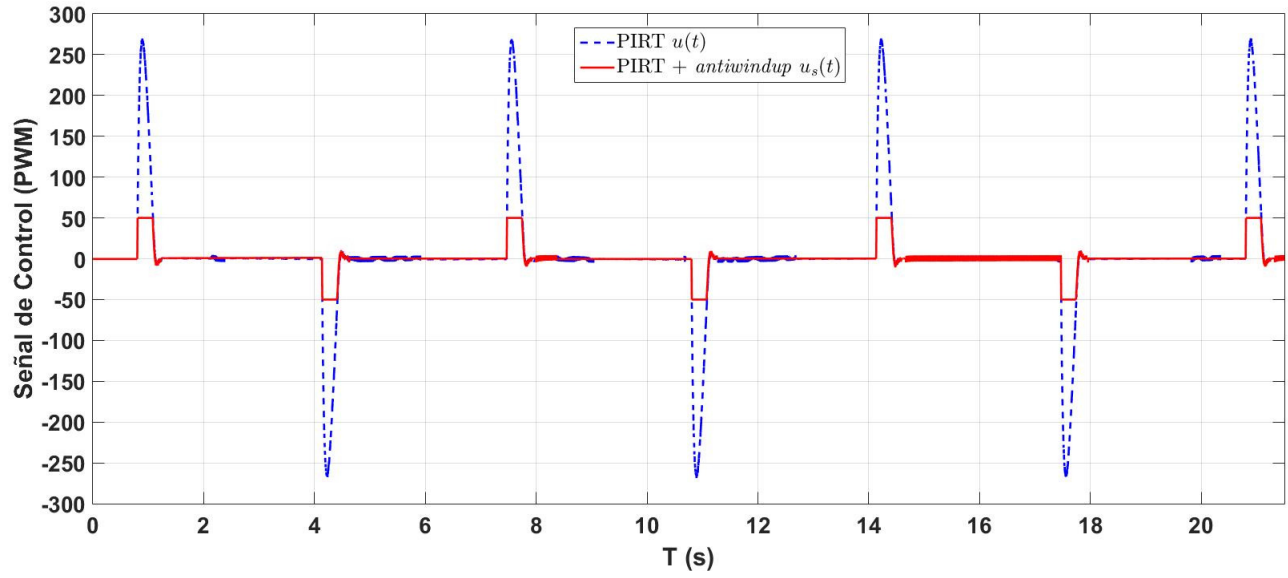


Figura 5.16: Señal de control usando la Referencia R2 y los algoritmos PIRT y PIRT + *antiwindup*

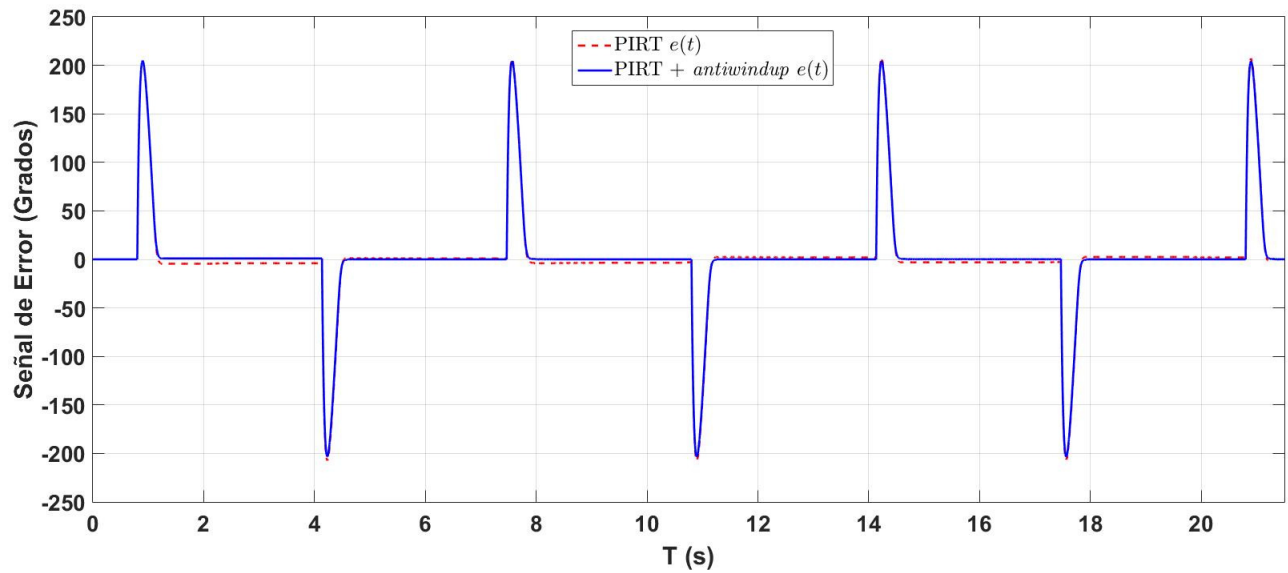


Figura 5.17: Señal de error de posición usando la Referencia R2 y los algoritmos PIRT y PIRT + *antiwindup*

## 5.4. Identificación paramétrica: Algoritmo de Mínimos Cuadrados

### 5.4.1. Teoría

Para la identificación paramétrica usando el algoritmo de Mínimos Cuadrados [61], se utiliza el modelo lineal de segundo orden mostrado en (5.1), donde  $a$  y  $b$  son constantes positivas. Este modelo no es exponencialmente estable por la existencia de un polo en el origen, por lo anterior la identificación paramétrica se realiza en lazo cerrado usando un controlador Proporcional con Realimentación Taquimétrica (P+RT) mostrado a continuación

$$u(t) = K_p e(t) - K_d \dot{y}_e \quad (5.10)$$

Este algoritmo es una modificación al controlador PIRT mencionado anteriormente, éste será usado para estabilizar al servomotor para obtener las mediciones de  $u$  y  $y$  que se usarán para la estimación de parámetros.

Aplicando la transformada de Laplace al modelo (5.1) se tiene

$$s^2 Y(s) + asY(s) = bU(s) \quad (5.11)$$

donde  $Y(s) = \mathcal{L}\{y\}$ ,  $U(s) = \mathcal{L}\{u\}$  y  $\mathcal{L}\{\bullet\}$  corresponde a la transformada de Laplace.

Para aplicar el método de Mínimos Cuadrados usando la ecuación 5.11 para construir un vector regresor, se necesitan mediciones de velocidad  $\dot{y}$  y de la aceleración  $\ddot{y}$

## CAPÍTULO 5. IDENTIFICACIÓN PARAMÉTRICA Y TEORÍA DE CONTROL: ALGORITMOS BÁSICOS

las cuales no están disponibles. Las únicas señales que se pueden medir actualmente son la posición  $y$  y la señal de control  $u$ . Este problema se resuelve usando filtros de estado [62] para obtener un regresor que sea función de señales medibles.

Se define el siguiente filtro

$$F(s) = \frac{f_2}{s^2 + f_1s + f_2} \quad (5.12)$$

siendo  $f_1$  y  $f_2$  constantes positivas. Se multiplican ambos miembros de la ecuación (5.11) por la ecuación (5.12) para obtener

$$F(s)s^2Y(s) + aF(s)sY(s) = bF(s)U(s) \quad (5.13)$$

Las siguientes definiciones

$$Y_f(s) = F(s)Y(s) \quad (5.14)$$

$$sY_f(s) = F(s)sY(s) \quad (5.15)$$

$$s^2Y_f(s) = F(s)s^2Y(s) \quad (5.16)$$

$$U_f(s) = F(s)U(s) \quad (5.17)$$

permiten escribir la ecuación (5.13) como

$$s^2Y_f(s) + asY_f(s) = bU_f(s) \quad (5.18)$$

Finalmente, considerando condiciones iniciales cero en el filtro (5.12) permite es-

CAPÍTULO 5. IDENTIFICACIÓN PARAMÉTRICA Y TEORÍA DE CONTROL:  
ALGORITMOS BÁSICOS

cribir la ecuación (5.18) en dominio del tiempo como sigue

$$\ddot{y}_f + a\dot{y}_f = bu_f \quad (5.19)$$

donde  $\ddot{y}_f = \mathcal{L}^{-\infty} \{s^2 Y_f(s)\}$ ,  $\dot{y}_f = \mathcal{L}^{-\infty} \{s Y_f(s)\}$  y  $u_f = \mathcal{L}^{-\infty} \{U(s)\}$  son las versiones filtradas de la aceleración  $\ddot{y}$ , la velocidad  $\dot{y}$  y la señal de control  $u$  respectivamente.

Los filtros que permiten obtener estas variables se describen como

$$\begin{aligned} y &\rightarrow \frac{f_2 s}{s^2 + f_1 s + f_2} \rightarrow \dot{y}_f \\ y &\rightarrow \frac{f_2 s^2}{s^2 + f_1 s + f_2} \rightarrow \ddot{y}_f \\ u &\rightarrow \frac{f_2}{s^2 + f_1 s + f_2} \rightarrow u_f \end{aligned} \quad (5.20)$$

que están basados en (5.12), (5.15), (5.16) y (5.17). Cabe recalcar que sólo es necesaria la medición de la posición  $y$  y la señal de entrada  $u$  para obtener  $\ddot{y}_f$ ,  $\dot{y}_f$  y  $u_f$ .

Para aplicar el método de Mínimos Cuadrados, la ecuación (5.19) se reescribe como

$$z(t) = \phi(t)^T \theta \quad (5.21)$$

$$z(t) = \ddot{y}_f \quad (5.22)$$

$$\phi(t) = [-\dot{y}_f, u_f]^T \quad (5.23)$$

$$\theta = [a, b]^T \quad (5.24)$$

La ecuación (5.21) es también válida para  $t = T, 2T, \dots, (K-1)T, KT, \dots$  donde  $T$  corresponde al periodo de muestreo empleado para la adquisición de datos.

## CAPÍTULO 5. IDENTIFICACIÓN PARAMÉTRICA Y TEORÍA DE CONTROL: ALGORITMOS BÁSICOS

Lo anterior permite reescribir (5.21) como

$$z(K) = \phi(K)^T \theta \quad (5.25)$$

Para realizar la estimación de parámetros se usa una señal de referencia de amplio espectro, en este caso, se utiliza una señal de ruido blanco filtrada.

Posteriormente, los valores  $\phi(K)$  y  $z(K)$  son adquiridos en tiempo real periódicamente para formar los términos siguientes

$$A = \begin{bmatrix} \phi(1)^T \\ \phi(2)^T \\ \vdots \\ \phi(K-1)^T \\ \phi(K)^T \end{bmatrix}; Z = \begin{bmatrix} z(1) \\ z(2) \\ \vdots \\ z(K-1) \\ z(K) \end{bmatrix} \quad (5.26)$$

Así, el estimado  $\hat{\theta}$  de  $\theta$  está dado por [63] [64].

$$\hat{\theta} = (A^T A)^{-1} A^T Z \quad (5.27)$$

Para implementar el algoritmo de Mínimos Cuadrados se usa el diagrama de bloques mostrado en la Fig. 5.18.

En Matlab, el cálculo de los estimados se realiza empleando el comando "\" de manera que  $\hat{\theta} = A \backslash Z$ .

CAPÍTULO 5. IDENTIFICACIÓN PARAMÉTRICA Y TEORÍA DE CONTROL:  
ALGORITMOS BÁSICOS

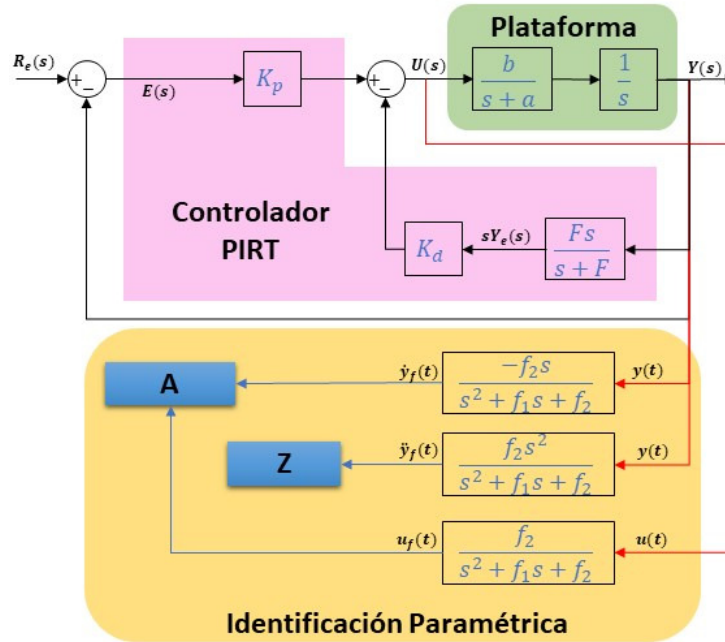


Figura 5.18: Diagrama de bloques del controlador P+RT y el algoritmo de identificación paramétrica

## 5.4.2. Resultados Experimentales

### 5.4.2.1. Implementación usando la PEE-V1

Los filtros usados para el algoritmo de mínimos cuadrados fuera de línea están dados en (5.20) con  $f_1 = 40$  y  $f_2 = 400$ . La señal de excitación es de ruido blanco filtrado usando la siguiente filtro

$$F_e = \frac{4}{s + 4} \quad (5.28)$$

Las ganancias del controlador P+RT para estabilizar al servosistema son  $K_p = 15$  y  $K_d = 0.03$ . Se realizan 3 experimentos con las mismas ganancias para comparar y promediar los resultados, los valores están en la Tabla 5.3. La Fig. 5.19 muestra la señal de excitación de ruido blanco filtrada  $r_e(t)$  y la salida del servosistema  $y(t)$  y la Fig. 5.20 presenta la señal de control  $u(t)$  del experimento 1. Se observa que la señal

## CAPÍTULO 5. IDENTIFICACIÓN PARAMÉTRICA Y TEORÍA DE CONTROL: ALGORITMOS BÁSICOS

Experimento	Valor $\hat{a}$	Valor $\hat{b}$
1	41.1155	38.3837
2	38.4389	36.1272
3	41.2966	38.6202
Valor promedio	40.2836	37.7104

Cuadro 5.3: Experimentos de Identificación Paramétrica

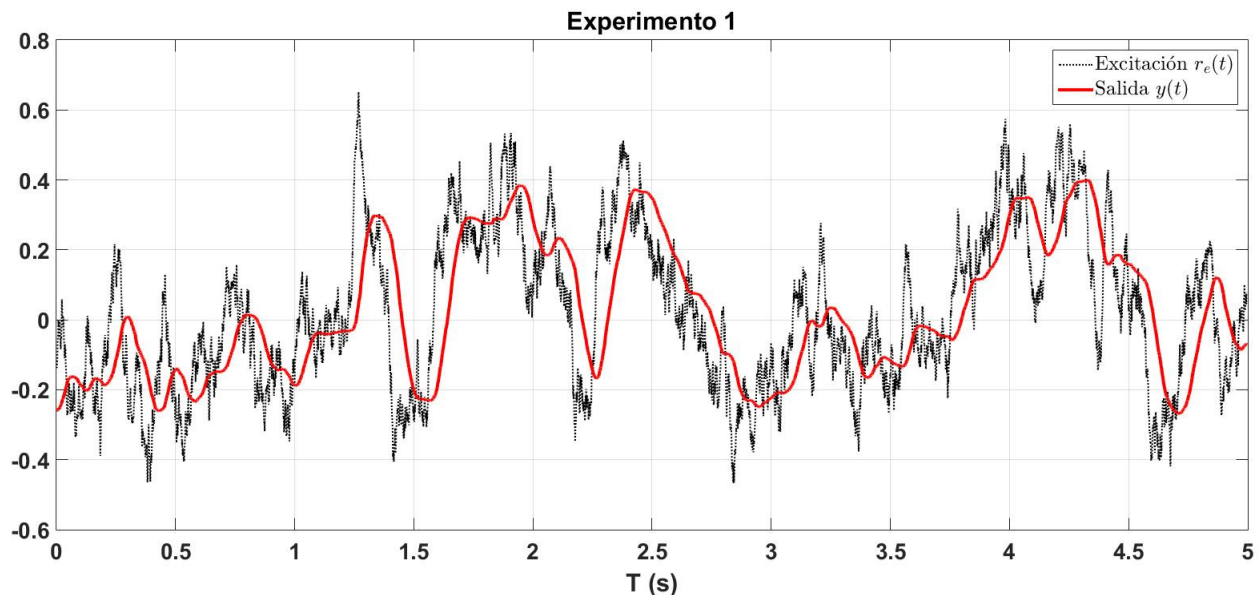


Figura 5.19: Señal de referencia y salida usando el algoritmo de mínimo cuadrado

de control se mantiene dentro de los límites de voltaje máximo del amplificador de potencia.

### 5.4.2.2. Implementación usando la PEE-V2

Como se menciona en la teoría de identificación paramétrica descrita en 5.4.1 usando el algoritmo de Mínimos Cuadrados, los filtros (5.20) permiten obtener estimados de las variables de aceleración  $\ddot{y}$ , velocidad  $\dot{y}$  y la señal de control  $u$  que son empleados en el vector regresor (5.23). Los valores de  $f_1$ ,  $f_2$ , la señal de excitación y el filtro para procesarla son los mismos que en los experimentos empleando la PEE-V1. Las ganan-

## CAPÍTULO 5. IDENTIFICACIÓN PARAMÉTRICA Y TEORÍA DE CONTROL: ALGORITMOS BÁSICOS

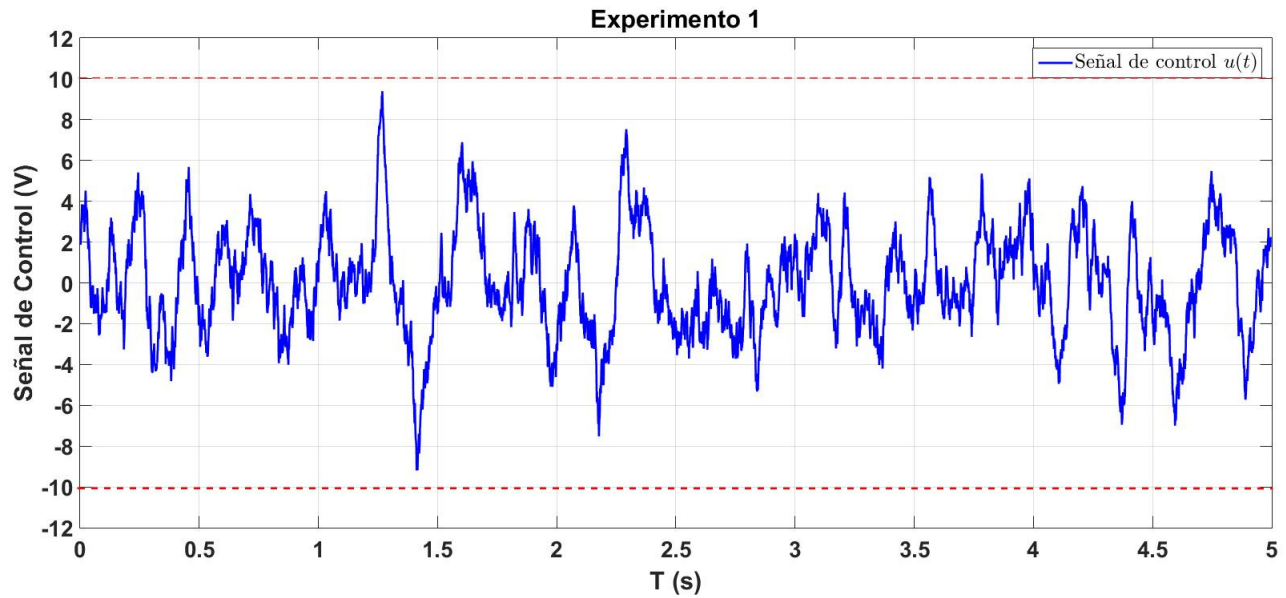


Figura 5.20: Señal de referencia y salida usando el algoritmo de minimo cuadrado

Experimento	Valor $\hat{a}$	Valor $\hat{b}$
1	5.4888	177.0297
2	6.2275	175.8027
3	5.1476	163.3672
Valor promedio	5.6213	172.0665

Cuadro 5.4: Experimentos de Identificación Paramétrica

cias para el controlador P+RT son  $K_p = 1.5$  y  $K_d = 0.05$ . Los resultados de los tres experimentos realizados con estas ganancias están en la Tabla 5.4. Las Figuras 5.21 y 5.22, corresponden a la señal de excitación de ruido blanco  $r_e(t)$ , la señal de salida del servosistema  $y(t)$  y la señal de control  $u(t)$  respectivamente. Se observa que la señal de salida sigue el movimiento de la señal de excitación y que la señal de control se mantiene en los límites máximo de la señal *PWM* del amplificador.



# CAPÍTULO 5. IDENTIFICACIÓN PARAMÉTRICA Y TEORÍA DE CONTROL: ALGORITMOS BÁSICOS

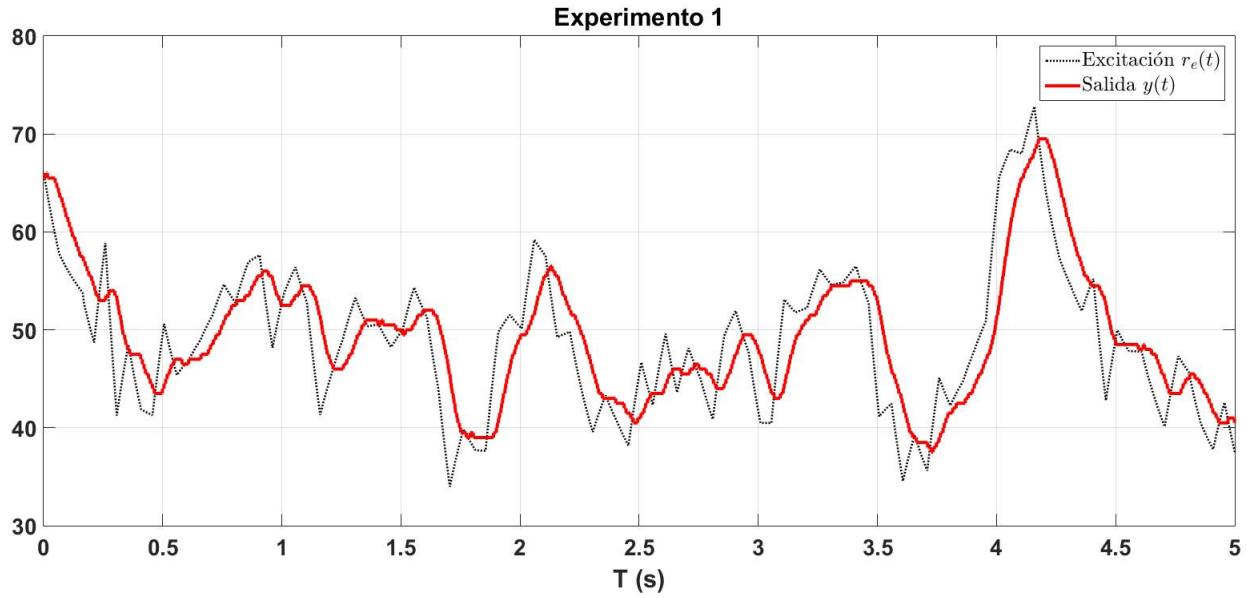


Figura 5.21: Señal de referencia y salida usando el algoritmo de Mínimos Cuadrados



Figura 5.22: Señal de control usando el algoritmo de Mínimos Cuadrados

## 5.5. Observador de estados

### 5.5.1. Teoría

Como se ha explicado anteriormente, el servosistema no cuenta con un sensor de medición de la velocidad angular, por lo que se usa un estimado de esta variable usando un filtro pasa altas. Otra forma de obtener un estimado de esta variable es utilizando un observador de estados. La idea de este algoritmo se basa en generar una copia del sistema al cual se desean estimar los estados mas un término de corrección que corresponde al error de observación [65].

El modelo de espacio de estados del servosistema corresponde a

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -ax_2 + bu \\ y &= x_1 \end{aligned} \tag{5.29}$$

Lo anterior se escribe de la siguiente manera

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \tag{5.30}$$

donde

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -a \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ b \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \tag{5.31}$$

## CAPÍTULO 5. IDENTIFICACIÓN PARAMÉTRICA Y TEORÍA DE CONTROL: ALGORITMOS BÁSICOS

El modelo matemático del observador de estados para el servosistema (5.31) es

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}} &= A\hat{x} + Bu + K_o(y - C\hat{x}) \\ &= (A - K_oC)\hat{x} + Bu + K_o y\end{aligned}\tag{5.32}$$

en donde  $\hat{x}$  es estimado de  $x(t)$ ,  $\hat{y} = C\hat{x}$  y el error de observación es  $y - \hat{y}$ .

Para cumplir con la condición de observabilidad necesaria para diseñar el observador [66], se requiere que la matriz de observabilidad

$$O = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \cdot \\ \cdot \\ CA^{n-1} \end{bmatrix}\tag{5.33}$$

sea de rango pleno. Para el caso del servosistema la matriz  $O$  está dada por

$$O = \begin{bmatrix} C \\ CA \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}\tag{5.34}$$

que corresponde a la matriz identidad y su determinante diferente de cero cumpliendo así la condición de observabilidad.

Para construir el observador de estados [67] se emplean los estimados  $\hat{a}$  y  $\hat{b}$  obtenidos previamente usando el algoritmo de mínimos cuadrados fuera de línea. En

## CAPÍTULO 5. IDENTIFICACIÓN PARAMÉTRICA Y TEORÍA DE CONTROL: ALGORITMOS BÁSICOS

consecuencia, el observador de estados (5.32) se escribe así

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}_1 &= \hat{x}_2 + K_{o1}(y - \hat{y}) \\ \dot{\hat{x}}_2 &= -\hat{a}\hat{x}_2 + \hat{b}u + K_{o2}(y - \hat{y}) \\ \hat{y} &= \hat{x}_1\end{aligned}\tag{5.35}$$

donde  $\epsilon = y - \hat{y}$ .

Las ganancias  $K_{o1}$  y  $K_{o2}$  del observador se obtienen usando la fórmula de Ackerman modificada para posicionamiento de polos

$$K_o = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} O^{-1} \gamma(A)\tag{5.36}$$

donde  $\gamma(A)$  es definida a partir del siguiente polinomio característico

$$\gamma(s) = (s + d_1)(s + d_2) = s^2 + \alpha_1 s + \alpha_2\tag{5.37}$$

$$\gamma(A) = (A)^2 + \alpha_1(A) + \alpha_2\tag{5.38}$$

siendo  $d_1$  y  $d_2$  los polos deseados. La fórmula de Ackerman se implementa en Matlab usando el siguiente código

$$acker(A', C', J)\tag{5.39}$$

donde  $A'$  y  $C'$  corresponden a las matrices transpuestas de  $A$  y  $C$  respectivamente.  $J$  corresponde al vector de polos deseados  $d_1$  y  $d_2$  obtenidos usando el polinomio característico (5.37).

CAPÍTULO 5. IDENTIFICACIÓN PARAMÉTRICA Y TEORÍA DE CONTROL:  
ALGORITMOS BÁSICOS

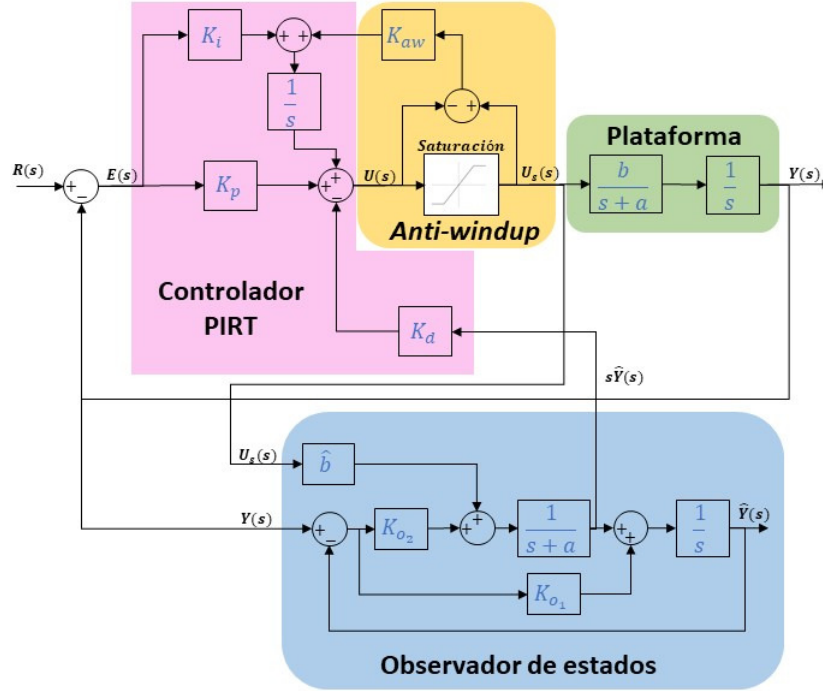


Figura 5.23: Diagrama de bloques del controlador PIRT con *Anti-windup* y el observador de estados

El siguiente algoritmo de control PIRT + *antiwindup* es alimentado por el estimado de velocidad  $\hat{x}_2$  obtenido del observador.

$$u(t) = K_p e(t) + \int_0^t (K_i e(\tau) + K_{aw} e_s) d\tau - K_d \hat{x}_2 \quad (5.40)$$

Y el diagrama de bloques del sistema de lazo cerrado se muestra en la Fig. 5.23.

## 5.5.2. Resultados Experimentales

### 5.5.2.1. Implementación del algoritmo de control PIRT + *anti-windup* + observador de estados usando la PEE-V1

Las señales de referencia  $r(t)$  son las siguientes

CAPÍTULO 5. IDENTIFICACIÓN PARAMÉTRICA Y TEORÍA DE CONTROL:  
ALGORITMOS BÁSICOS

Controlador	Referencia	$K_p$	$K_d$	$K_i$	$K_{o_1}$	$K_{o_2}$	$K_{aw}$
PIRT+Observador	R1	4	0.03	1.75	759.7	129400	0
PIRT+Observador	R2	4	0.03	1.75	759.7	129400	0
PIRT+ <i>antiwindup</i> +Observador	R2	4	0.03	1.75	759.7	129400	1.25

Cuadro 5.5: Ganancias de los controladores PIRT + Observador y PIRT + Observador + *antiwindup*. Experimentos en la plataforma PEE-V1

- R1: Señal de onda cuadrada filtrada que varía de  $0^\circ$  a  $90^\circ$ .
- R2: Señal de onda cuadrada filtrada que varía de  $0^\circ$  a  $170^\circ$ .

El filtro empleado para procesar la señal de onda cuadrada esta mostrado en la ecuación (5.9).

A continuación se presentan los experimentos usando el algoritmo PIRT + observador de estados con y sin *antiwindup*. Las ganancias usadas para estos controladores están en la Tabla 5.5. Las ganancias del observador de estados  $K_{o_1}$  y  $K_{o_2}$  fueron calculadas usando la fórmula de Ackerman considerando el siguiente polinomio característico

$$P_o = s^2 + 800s + 160000 \quad (5.41)$$

La Fig. 5.24 presenta la posición deseada y la respuesta del servosistema en lazo cerrado, mientras que las Figuras 5.25 y 5.26 presentan respectivamente las señales de control y de error de posición usando la referencia R1.

En la Fig. 5.24, se muestra un sesgo en la primera parte de la señal al igual que sucede cuando se usa el controlador PIRT sin el observador de estados, mostrado en la Fig. 5.6 .Posteriormente, se puede observar que la señal de salida  $y(t)$  no presenta sobretiros ni ruido de medición perceptible a simple vista. La señal de control  $u(t)$  en la

## CAPÍTULO 5. IDENTIFICACIÓN PARAMÉTRICA Y TEORÍA DE CONTROL: ALGORITMOS BÁSICOS

Fig. 5.7 no presenta ruido y no alcanza los límites máximos de  $\pm 10V$ . Por consiguiente, no se tienen problemas de *windup*.

Como se explicó en párrafos anteriores, la referencia R2 cubre prácticamente el rango de movimiento del servomotor de RC. Las figuras 5.27, 5.28 y 5.29 muestran la referencia R2, la respuesta del servosistema en lazo cerrado, las señales de control y de error de posición. En la Fig. 5.27 se observa el mismo comportamiento que en la Fig. 5.9, donde la respuesta  $y(t)$  tiene un error en estado estacionario visible. En este caso la señal  $u(t)$  sobrepasa los  $\pm 10V$  produciendo el efecto de *antiwindup* como se observa en la Fig. 5.28. Sin embargo, cuando se aplica el controlador con *antiwindup* la señal de control  $u(t)$  queda acotada y el error en estado estacionario disminuye.

Notar que durante la aplicación de ambos controladores las señales de salida  $y(t)$ , control  $u(t)$  y error  $e(t)$  no presentaron niveles de ruido apreciables. Cuando no existe el fenómeno de *windup* se puede observar un desempeño adecuado del servosistema, lo cual confirma que los parámetros identificados con el método de Mínimos Cuadrados son adecuados.

## CAPÍTULO 5. IDENTIFICACIÓN PARAMÉTRICA Y TEORÍA DE CONTROL: ALGORITMOS BÁSICOS

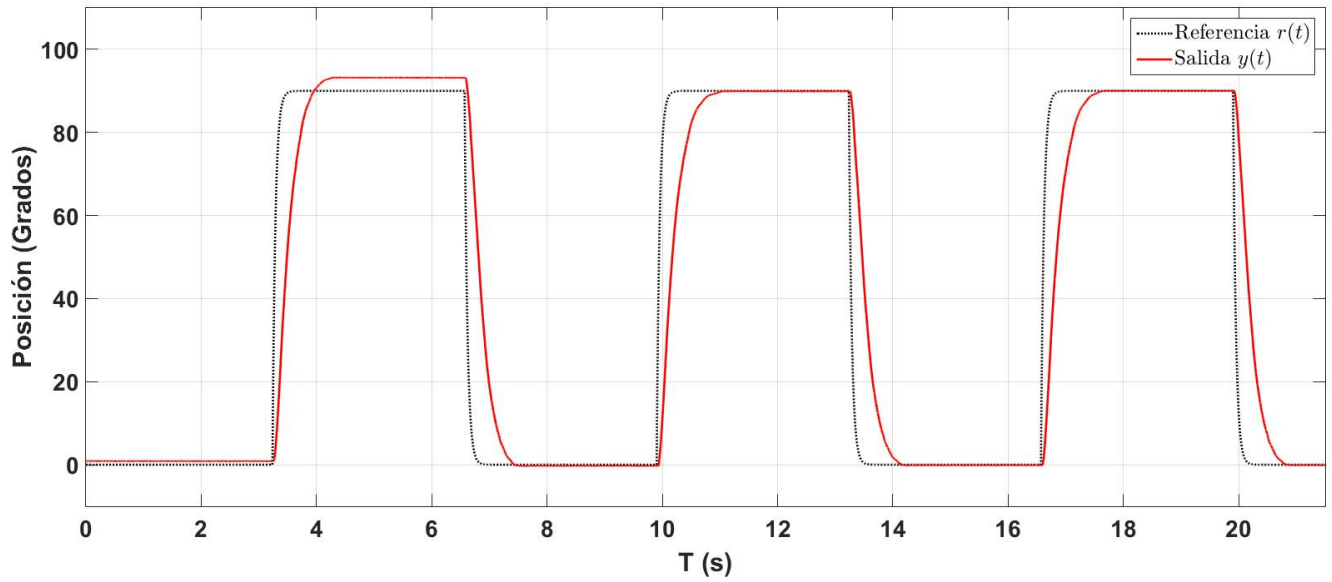


Figura 5.24: Señal de Referencia R1 y salida del servosistema en lazo cerrado usando el algoritmo PIRT + observador de estados.

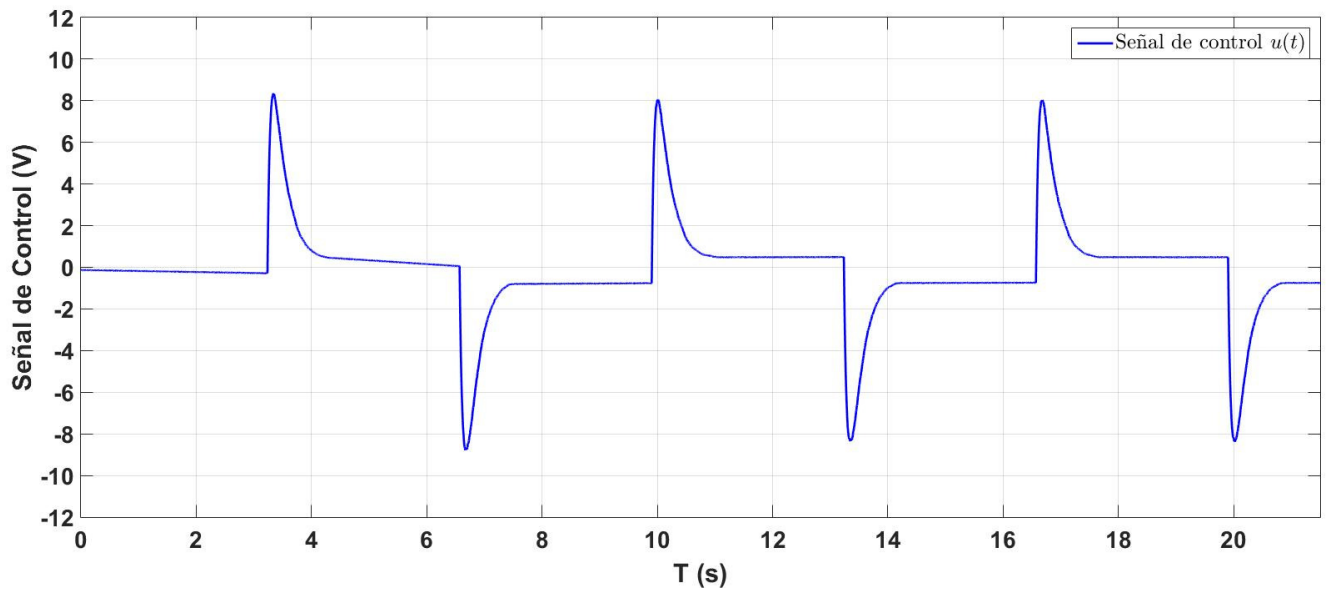


Figura 5.25: Señal de control usando la Referencia R1 y el algoritmo PIRT + observador de estados.



## CAPÍTULO 5. IDENTIFICACIÓN PARAMÉTRICA Y TEORÍA DE CONTROL: ALGORITMOS BÁSICOS

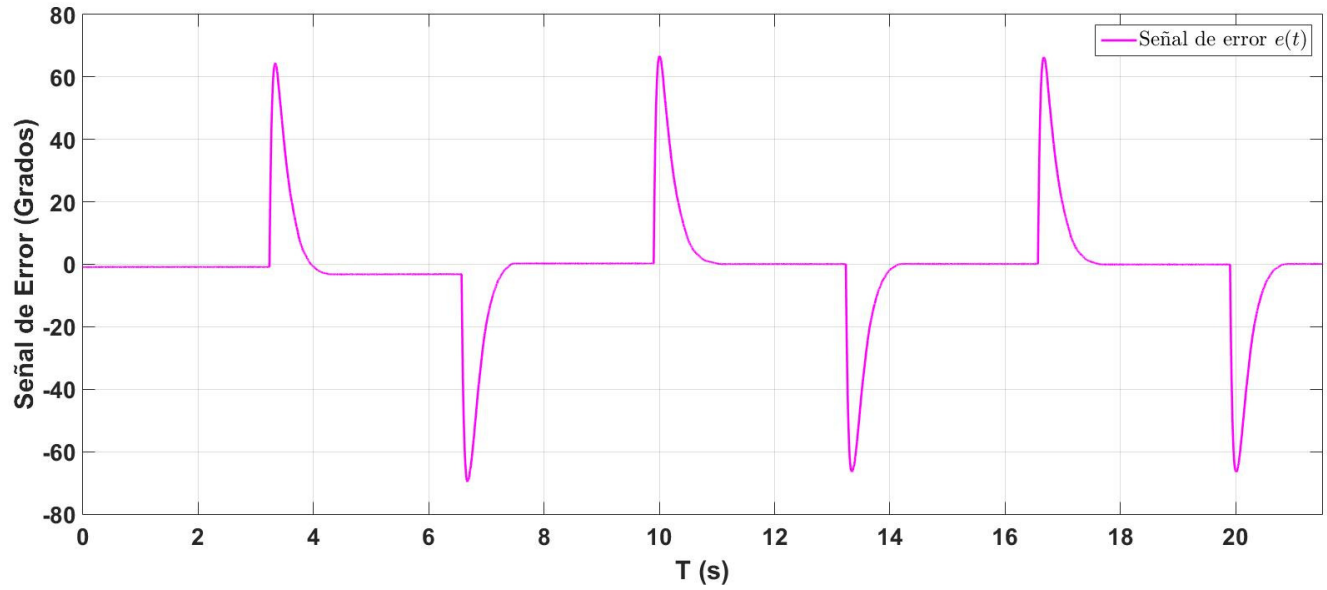


Figura 5.26: Señal de error de posición usando la Referencia R1 y el algoritmo PIRT + observador de estados.

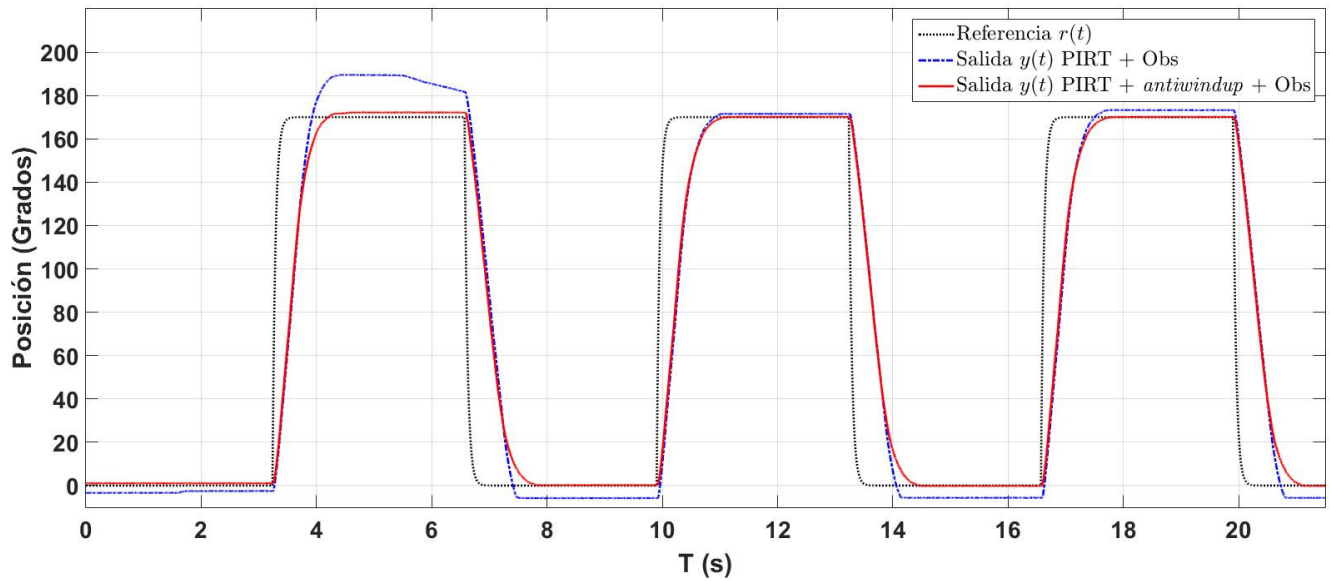


Figura 5.27: Señal de Referencia R2 y salida del servosistema en lazo cerrado usando los algoritmos PIRT + observador de estados y PIRT + observador de estados + *antiwindup*.

# CAPÍTULO 5. IDENTIFICACIÓN PARAMÉTRICA Y TEORÍA DE CONTROL: ALGORITMOS BÁSICOS

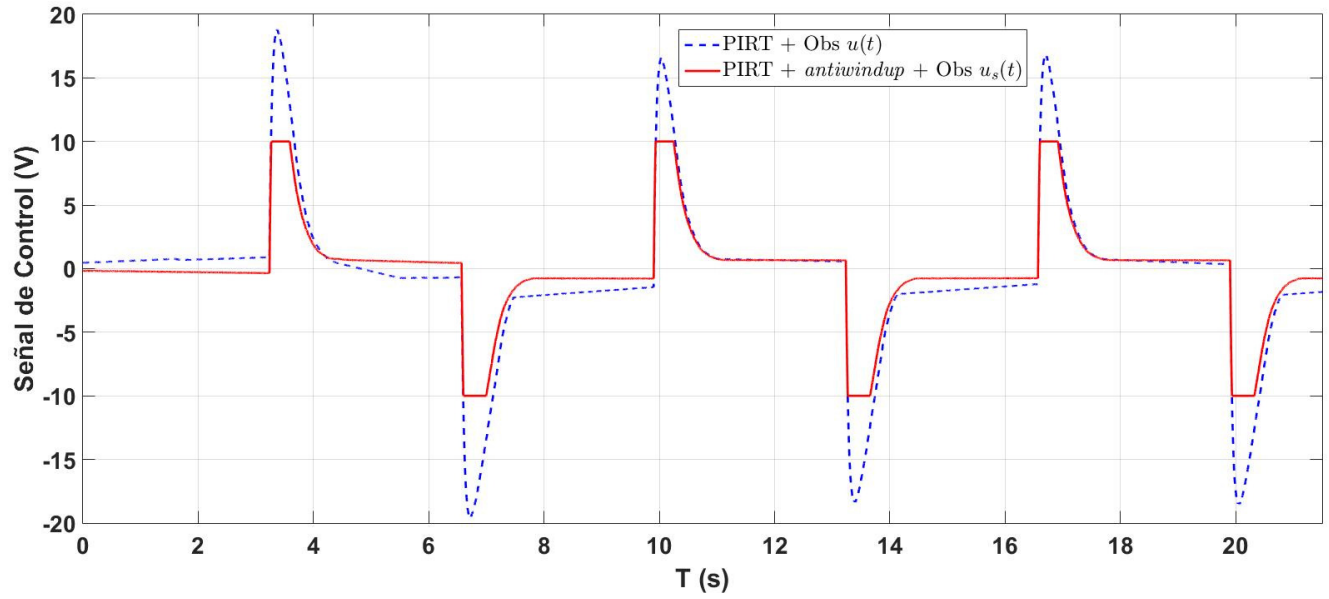


Figura 5.28: Señal de control usando la Referencia R2 y los algoritmos PIRT + observador de estados y PIRT + observador de estados + *antiwindup*.

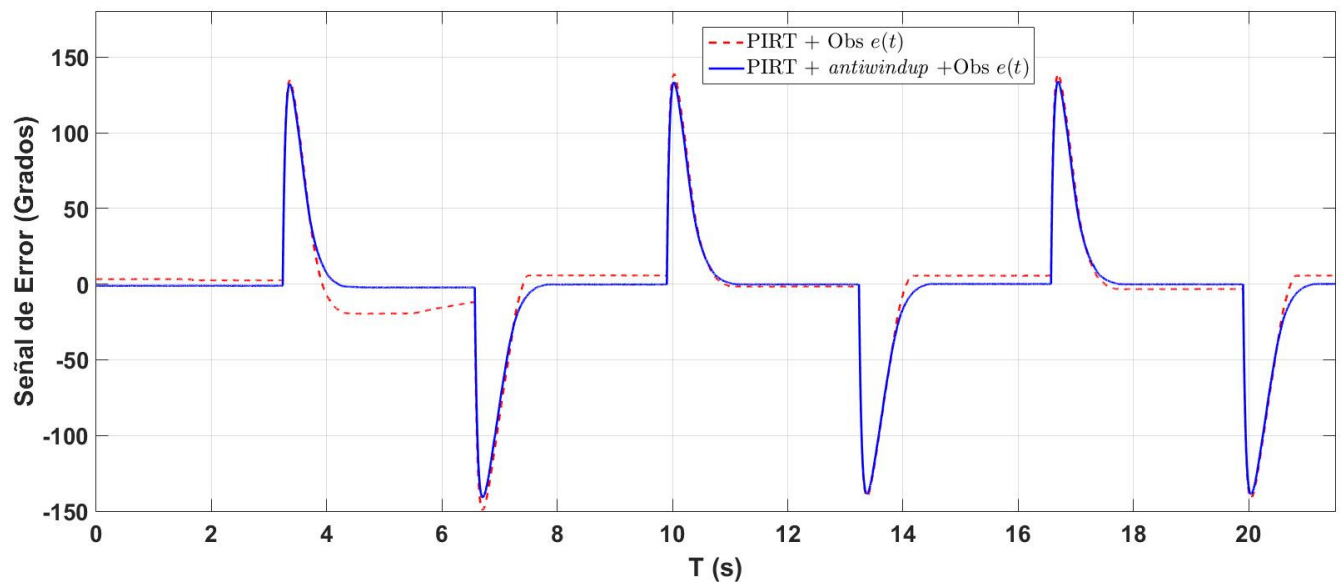


Figura 5.29: Señal de error de posición usando la Referencia R2 y los algoritmos PIRT + observador de estados y PIRT + observador de estados + *antiwindup*.

CAPÍTULO 5. IDENTIFICACIÓN PARAMÉTRICA Y TEORÍA DE CONTROL:  
ALGORITMOS BÁSICOS

Controlador	Referencia	$K_p$	$K_d$	$K_i$	$K_{o_1}$	$K_{o_2}$	$K_{aw}$
PIRT+Observador	R1	1.5	0.05	0.18	194.3	8907	0
PIRT+Observador	R2	1.5	0.05	0.18	194.3	8907	0
PIRT+ <i>antiwindup</i> +Observador	R2	1.5	0.05	0.18	194.3	8907	0.23

Cuadro 5.6: Ganancias de los controladores PIRT + Observador y PIRT + Observador + *antiwindup*. Experimentos en la plataforma PEE-V2

### 5.5.2.2. Implementación del algoritmo de control PIRT + observador de estados + *antiwindup* usando la PEE-V2

Para los experimentos se usaron las siguientes señales de referencias

- R1: Señal de onda cuadrada filtrada que varía de 25° a 115°.
- R2: Señal de onda cuadrada filtrada que varía de 25° a 325°

El filtro empleado para la señal de onda cuadrada es el mostrado en (5.9). Se realizaron tres experimentos usando el algoritmo PIRT + observador de estados con y sin *antiwindup*. Las ganancias utilizadas se encuentran en la Tabla 5.6, y las ganancias  $K_{o_1}$  y  $K_{o_2}$  correspondientes al observador de estados fueron calculadas empleando la fórmula de Ackerman considerando el siguiente polinomio característico

$$P_o = s^2 + 200s + 10000 \quad (5.42)$$

Las Fig. 5.30, 5.31 y 5.32 presentan respectivamente la posición deseada, la respuesta del servosistema en lazo cerrado, la señal de control y la señal de error de posición usando la referencia R1. La Fig. 5.30 muestra la respuesta del servosistema a la referencia R1 a la cual llega sin sobretiros, ni error en estado estacionario o rui-

## CAPÍTULO 5. IDENTIFICACIÓN PARAMÉTRICA Y TEORÍA DE CONTROL: ALGORITMOS BÁSICOS

do de medición visible, siendo éste el mismo comportamiento visto en experimentos anteriores. La señal de control  $u(t)$ , Fig. 5.31, no alcanza los límites máximos de  $\pm 50$  por lo tanto no se tiene el efecto del *windup*. Notar que el ruido que se presentó en la señal de control mostrada en la Fig. 5.13 usando un filtro pasa altas para estimar la velocidad angular del sistema, es menor al mostrado en la Fig. 5.31 al implementar el observador de estados.

Las Fig. 5.33, 5.34 y 5.35 corresponden a la referencia R2, la respuesta del servosistema en lazo cerrado, la señal de control y la señal de error en posición usando los algoritmos de control PIRT + observador de estados y PIRT + observador de estados con *antiwindup*, respectivamente.

En la Fig. 5.33 se presenta la respuesta del servosistema  $y(t)$  usando el controlador PIRT + observador de estados la cual tiene un error en estado estacionario perceptible. Este error de posición disminuye cuando se le agrega al controlador el mecanismo de *antiwindup*. En la señal de control  $u(t)$ , Fig. 5.34, se muestra que cuando se usa el controlador PIRT + observador de estados la señal de control sobrepasa los límites máximos de  $\pm 50$  por lo que se presenta el efecto de *windup*. Este se elimina cuando se limita la señal del controlador y se incluye el mecanismo de *antiwindup*.

Notar que durante la implementación del primer caso mostrado en la Tabla 5.6, las señales de salida  $y(t)$ , control  $u(t)$  y error  $e(t)$  se desempeñan de manera adecuada confirmando con esto la idoneidad de los parámetros identificados con el método de Mínimos Cuadrados.

# CAPÍTULO 5. IDENTIFICACIÓN PARAMÉTRICA Y TEORÍA DE CONTROL: ALGORITMOS BÁSICOS

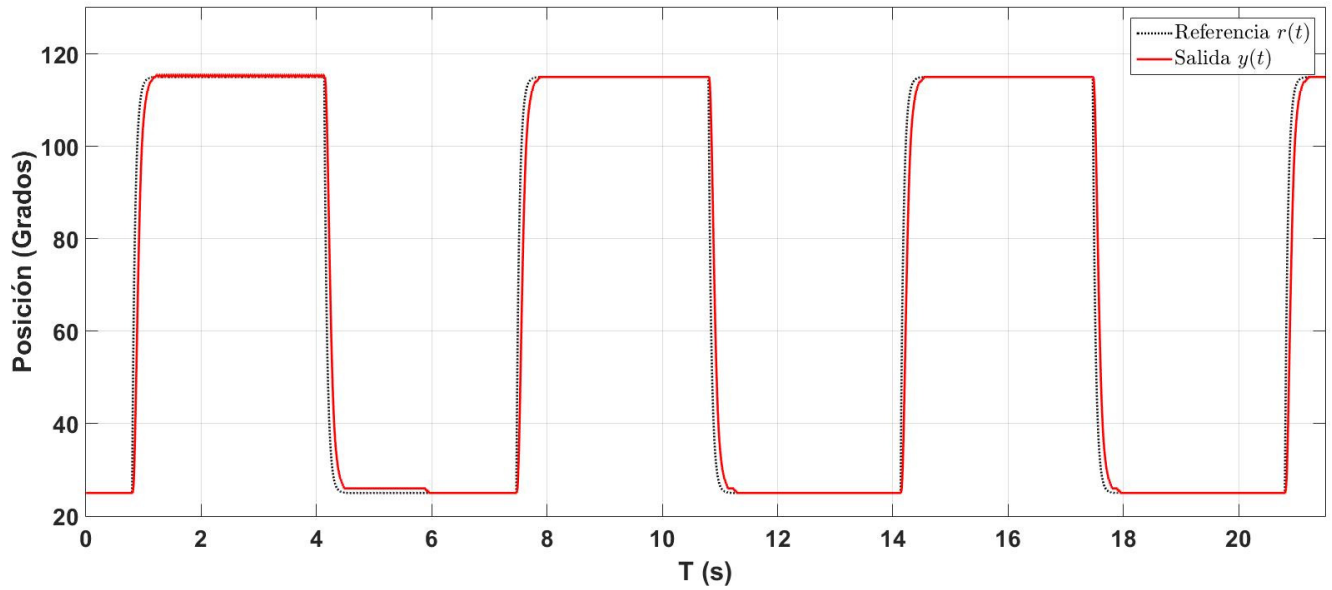


Figura 5.30: Señal de Referencia R1 y salida del servosistema en lazo cerrado usando el algoritmo PIRT + observador de estados.

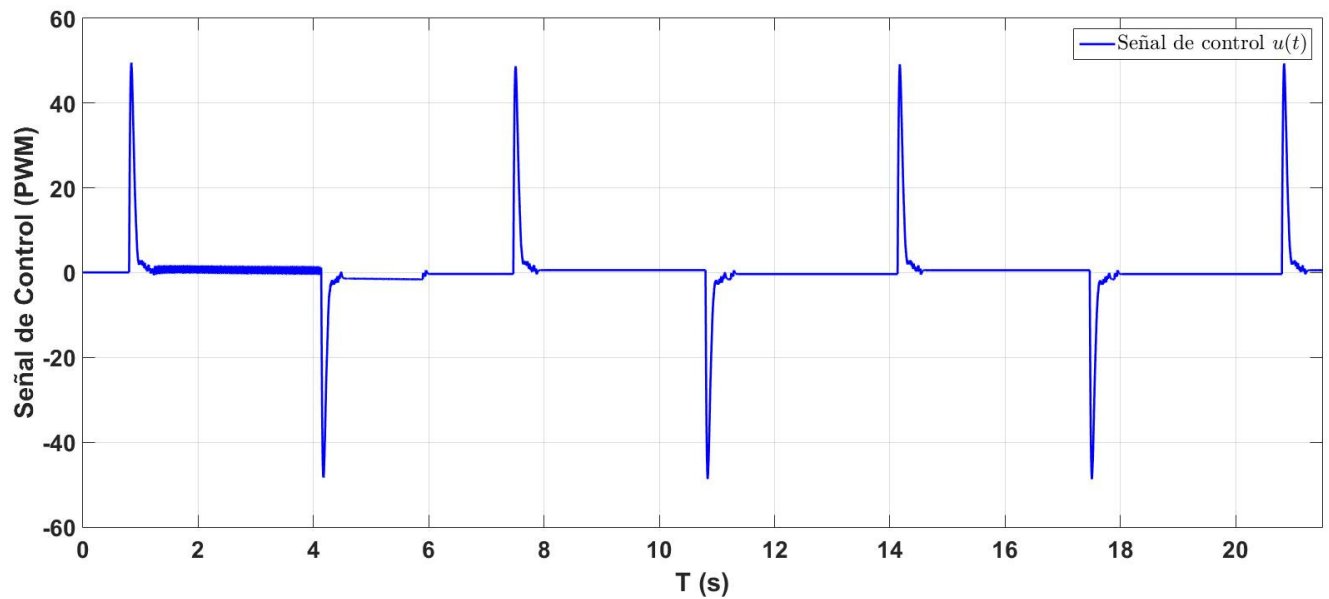


Figura 5.31: Señal de control usando la Referencia R1 y el algoritmo PIRT + observador de estados.

# CAPÍTULO 5. IDENTIFICACIÓN PARAMÉTRICA Y TEORÍA DE CONTROL: ALGORITMOS BÁSICOS

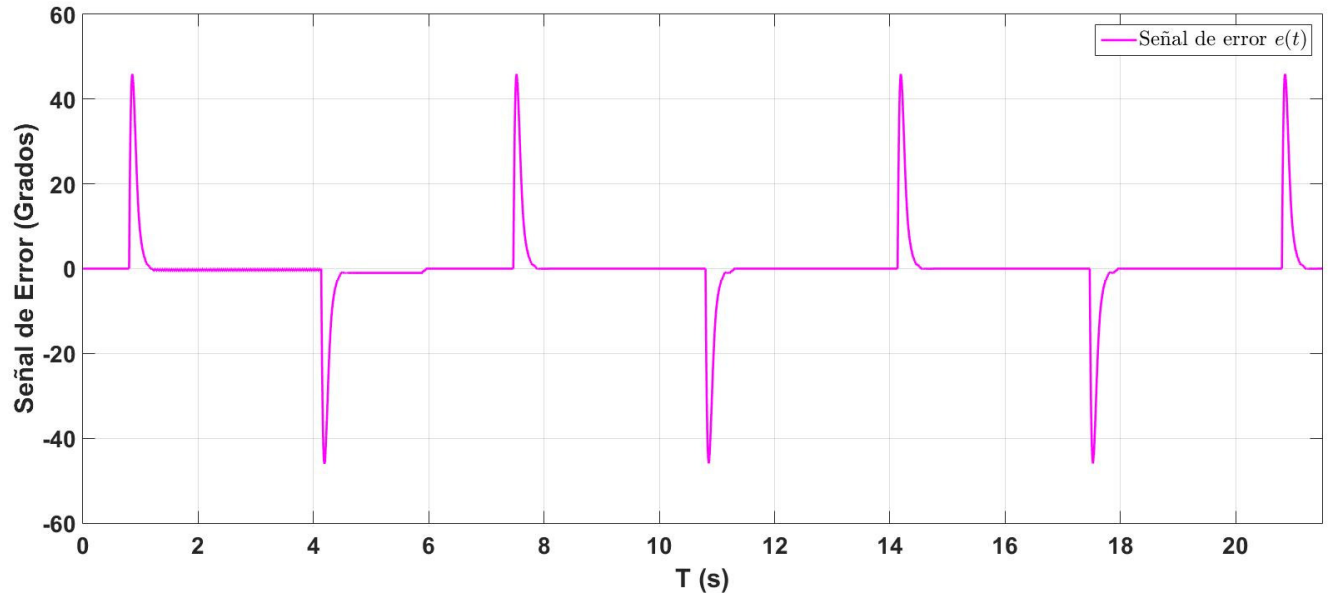


Figura 5.32: Señal de error de posición usando la Referencia R1 y el algoritmo PIRT + observador de estados.

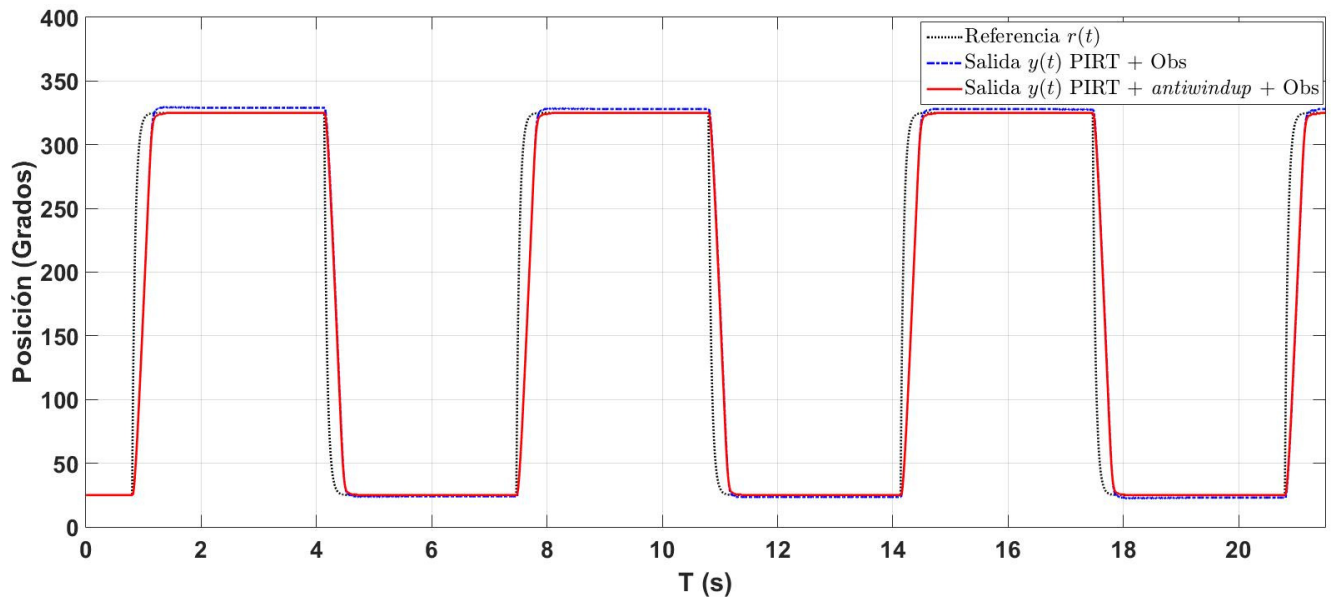


Figura 5.33: Señal de Referencia R2 y salida del servosistema en lazo cerrado usando los algoritmos PIRT + observador de estados y PIRT + observador de estados + *antiwindup*.

# CAPÍTULO 5. IDENTIFICACIÓN PARAMÉTRICA Y TEORÍA DE CONTROL: ALGORITMOS BÁSICOS

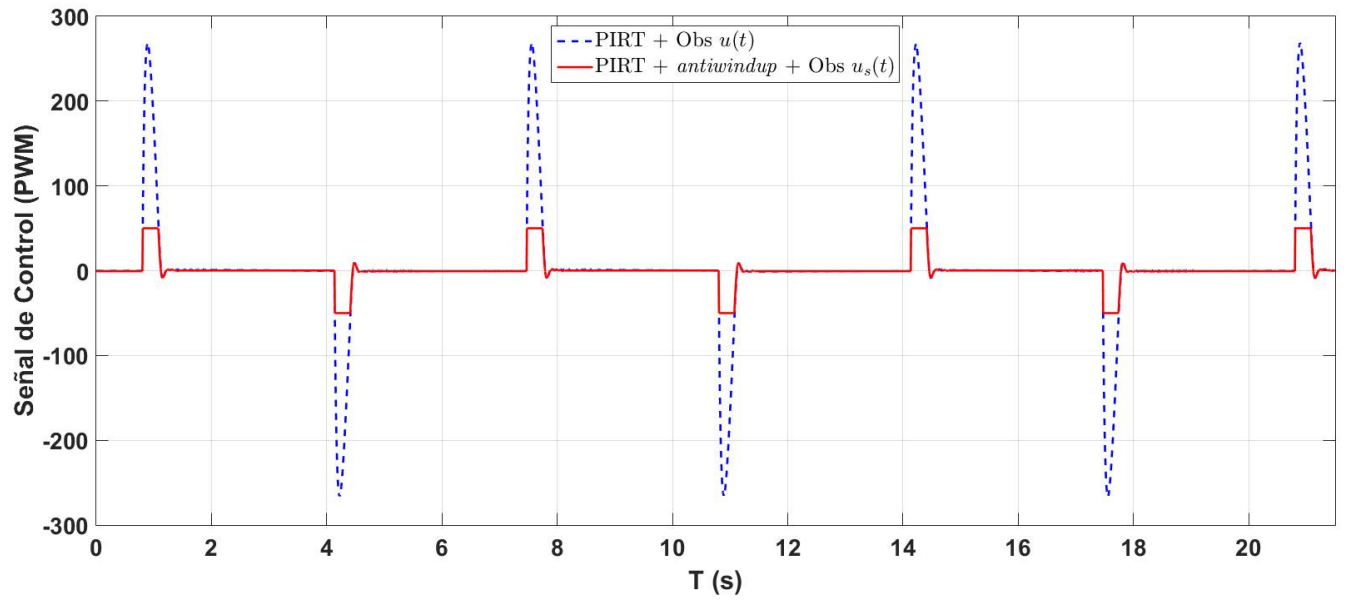


Figura 5.34: Señal de control usando la Referencia R2 y los algoritmos PIRT + observador de estados y PIRT + observador de estados + *antiwindup*.

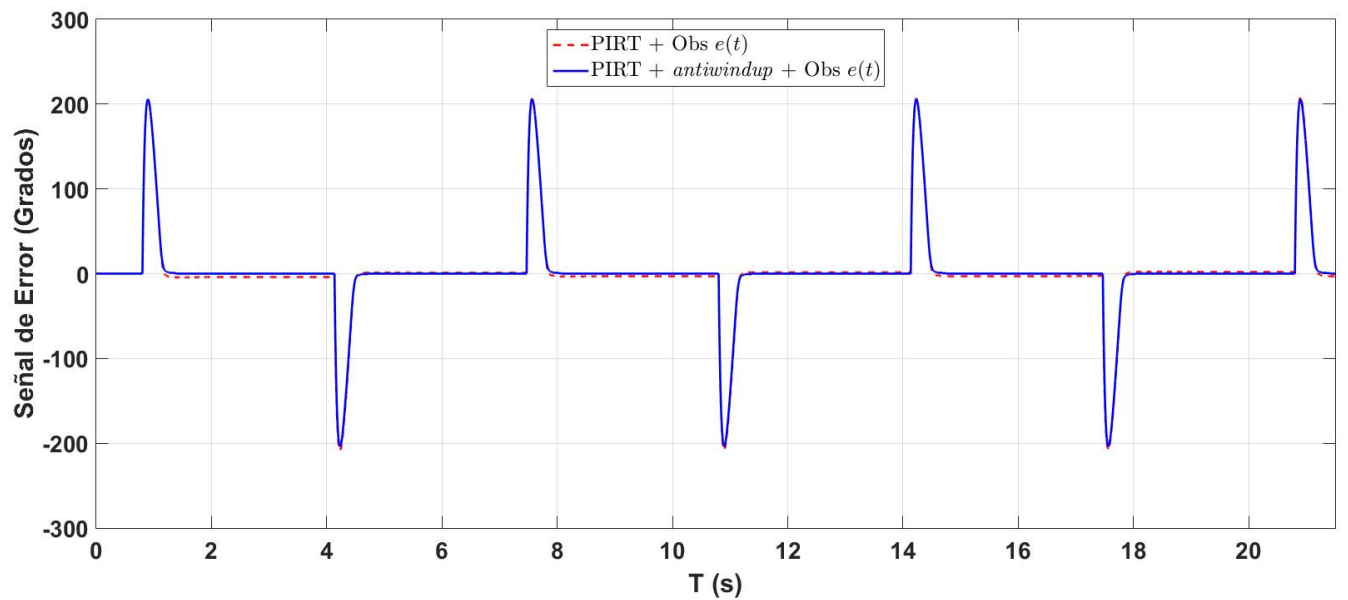


Figura 5.35: Señal de error de posición usando la Referencia R2 y los algoritmos PIRT + observador de estados y PIRT + observador de estados + *antiwindup*

## 5.6. Conclusiones

- Se observaron diferencias con respecto al funcionamiento de las plataformas debido al hecho de que las tecnologías en las cuales están basadas no son las mismas. La PEE-V1 emplea un amplificador operacional lineal y un potenciómetro, mientras que la PEE-V2 está basada en un amplificador tipo puente H modulado con una señal *PWM* y un codificador óptico.
- Se llevaron a cabo experimentos para la identificación paramétrica de los modelos de ambas plataformas empleando el método de Mínimos Cuadrados. Los parámetros identificados se emplearon posteriormente en el diseño de un observador de estados obteniéndose resultados satisfactorios. Cabe mencionar que el tema de identificación paramétrica generalmente no es tratado en las materias de Mecatrónica, Robótica y Control Automático de nivel licenciatura. Sin embargo, la implementación del algoritmo de Mínimos Cuadrados es sencilla y las plataformas pueden ser una herramienta educativa adecuada para la enseñanza de este tópico.
- Entre las diferencias encontradas se observa en las Tablas 5.3 y 5.4 que la ganancia  $b$  del servosistema es mayor en la PEE-V2. Lo anterior significa que la ganancia total en la plataforma PEE-V2 es mayor, lo que cual permite obtener errores de posicionamiento en estado estacionario menores en la plataforma PEE-V2 (Fig. 5.33) con respecto a la plataforma PEE-V1 (Fig. 5.27).
- Los experimentos también muestran que ambas plataformas sirven para im-



## CAPÍTULO 5. IDENTIFICACIÓN PARAMÉTRICA Y TEORÍA DE CONTROL: ALGORITMOS BÁSICOS

plementar algoritmos básicos como el controlador PID y el observador de estados [65], [68], que son utilizados actualmente como parte del programa académico en las carreras de Mecatrónica, Robótica y Control Automático.

# Capítulo 6

## Teoría de Control: Algoritmos avanzados

La finalidad de este capítulo es evaluar la plataforma PEE-V2 mediante la implementación de algoritmos de control avanzado para comprobar su uso como herramienta para actividades de investigación y cursos de posgrado.

A continuación se presenta la teoría de dos algoritmos, el observador de perturbaciones y el observador de Levant, su implementación y los resultados experimentales correspondientes.

## 6.1. Observador de Perturbaciones

### 6.1.1. Teoría

Las perturbaciones son alteraciones que afectan a un sistema de control permanentemente. Estas pueden ser causadas por parámetros que cambian en el tiempo, dinámicas no modeladas, ruido de medición, perturbaciones externas, entre otros. Estimar estos fenómenos y disminuir su efecto en los sistemas de control es un tema que ha sido estudiado ampliamente tanto en la literatura [69], [70] como de forma práctica [71].

Una manera de estimarlas es utilizando un observador alimentado por mediciones de entrada y salida de una planta y un modelo nominal de ésta para reconstruir la perturbación [72], [73].

Para la implementación de un observador de perturbaciones se considera la función de transferencia del servosistema presentada en (5.2), la cual se modifica de la siguiente forma

$$\frac{sY(s)}{U(s)} = P(s) = \frac{b}{s+a} \quad (6.1)$$

donde  $sY(s) = \mathcal{L}(\dot{y})$ .

Se define una función de transferencia nominal como sigue

$$\frac{sY(s)}{U(s)} = P_m(s) = \frac{b}{s} \quad (6.2)$$

En esta función de transferencia no se toman en cuenta el término  $a$  asociado a la

## CAPÍTULO 6. TEORÍA DE CONTROL: ALGORITMOS AVANZADOS

fricción viscosa, el cual se considera como parte de la incertidumbre del sistema. La expresión anterior se puede escribir de la siguiente forma para agregar los efectos de una perturbación

$$sY(s) = P_m(s) [U(s) + D(s)] \quad (6.3)$$

siendo  $D(s)$  el término donde se agrupan perturbaciones y términos no modelados incluyendo el término  $a$  asociado a la fricción viscosa así como desbalances en el amplificador de potencia.

Idealmente, se puede estimar la perturbación  $D(s)$  a partir de (6.3) de la siguiente manera

$$D(s) = \frac{s^2Y(s)}{b} - U(s) \quad (6.4)$$

Un problema observado en el esquema anterior para estimar  $D(s)$  es que el término inverso de la función de transferencia  $P_m(s)$  es no propia. Debido a lo anterior sería necesaria la medición de la aceleración angular  $s^2Y(s)$  que no está disponible a través de mediciones. Para evitar este problema, la estimación de la perturbación se realiza agregando el siguiente filtro estable estrictamente propio

$$\hat{D}(s) = \left[ \frac{s^2Y(s)}{b} - U(s) \right] F(s) \quad (6.5)$$

El término  $\hat{D}(s)$  es un estimado de la perturbación  $D(s)$  y el filtro  $F(s)$  tiene como finalidad convertir la función de transferencia  $(P_m(s))^{-1}F(s)$  a una función propia. El filtro  $F(s)$  se define como

$$F(s) = \frac{\beta}{s + \beta} \quad (6.6)$$

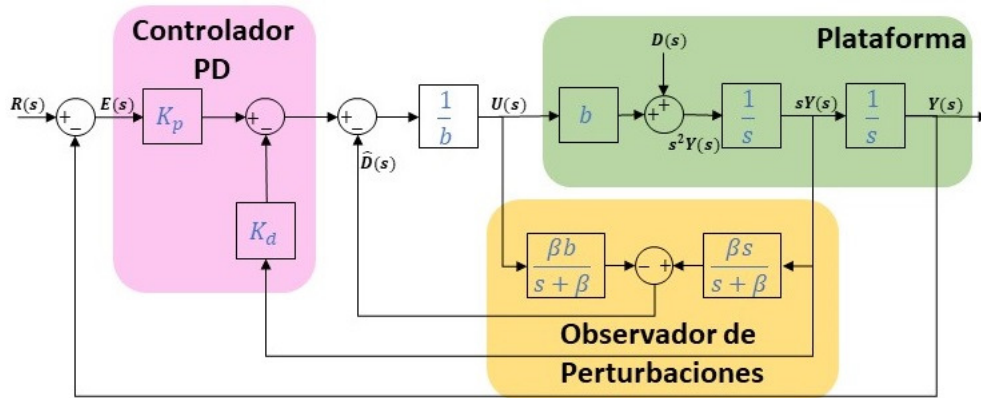


Figura 6.1: Diagrama de bloques del controlador PD+OP y el modelo nominal de la Plataforma Educativa Experimental considerando que la velocidad angular está disponible.

siendo  $\beta$  un real positivo que corresponde a la frecuencia de corte. Sustituyendo (6.6) en (6.5) se tiene que

$$\hat{D}(s) = sY(s) \frac{s\beta}{s + \beta} - bU(s) \frac{\beta}{s + \beta} \quad (6.7)$$

La ley de control Proporcional con Realimentación Taquimétrica (P+RT) y con el observador de perturbaciones mostrado en (6.7), se observa en la Fig. 6.1 y queda definida de la siguiente manera

$$U(s) = \frac{1}{b} \left[ K_p E(s) - K_d s Y(s) - \hat{D}(s) \right] \quad (6.8)$$

donde  $U(s) = \mathcal{L} \{u\}$ ,  $Y(s) = \mathcal{L} \{y\}$  y  $E(s) = \mathcal{L} \{e\}$ . Esta ley de control emplea mediciones de la velocidad angular.

El error de posición se define como  $E(s) = R(s) - Y(s)$ , siendo  $R(s)$  la posición angular deseada. El término  $K_p E(s) - K_d s Y(s)$  corresponde a la ley de control P+RT, siendo  $K_p$  y  $K_d$  las ganancias proporcional y derivativa respectivamente. Notar que el estimado  $\hat{D}(s)$  se inyecta con signo contrario al de la perturbación real  $D(s)$  para

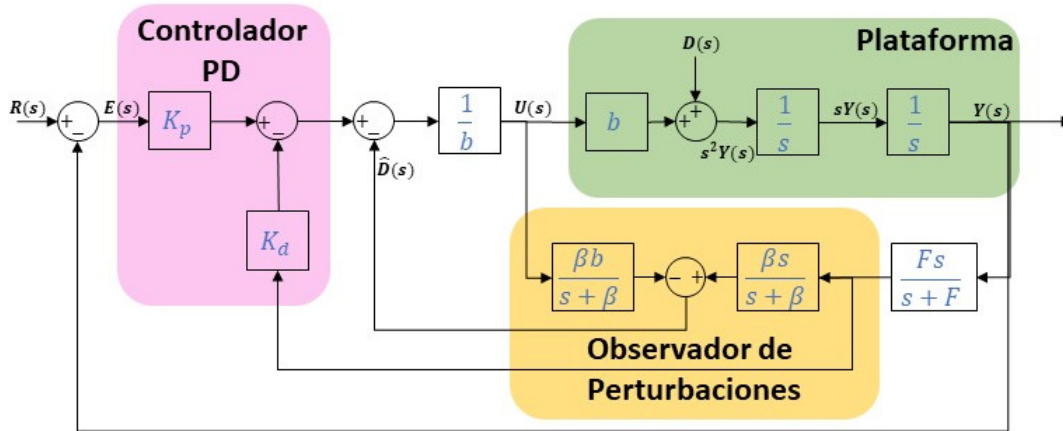


Figura 6.2: Diagrama de bloques del controlador PD+OP y el modelo nominal de la Plataforma Educativa Experimental considerando que la velocidad angular se estima usando un filtro con  $F = 160$ .

compensar los efectos de esta última.

## 6.1.2. Resultados Experimentales

### 6.1.2.1. Implementación del algoritmo de control P+RT con observador de perturbaciones (OP) usando la PEE-V2

Para la implementación del algoritmo de control P+RT+OP se usa una señal de referencia de onda cuadrada filtrada que varía de  $25^\circ$  a  $115^\circ$ . El filtro empleado para la señal de referencia es (5.9).

Las ganancias utilizadas en el controlador P+RT fueron  $K_p = 320$ ,  $K_d = 30$  y el parámetro  $b$  utilizado es el mostrado en la Tabla 5.4. Para los experimentos se emplean diferentes valores de  $\beta$ . Los siguientes índices sirven para medir el desempeño en lazo cerrado: Integral del Error Cuadrático (IEC), la Integral del Valor Absoluto de la Señal de Control (IC) y la Integral del Valor Absoluto de la Variación de la Señal de Control

## CAPÍTULO 6. TEORÍA DE CONTROL: ALGORITMOS AVANZADOS

$\beta$	$K_p$	$K_d$	$IEC$	$IC$	$IVC$
0	320	30	708.15	16.36	5501
0.21	320	30	718.11	14.77	5658
0.5	320	30	724.35	27.67	11297

Cuadro 6.1: Ganacias e índices de desempeño del controlador P+RT+OP.

(IVC). Los valores de estos se encuentran en la Tabla 6.1.

$$IEC = \int_{T_1}^{T_2} e^2 dt$$

$$IC = \int_{T_1}^{T_2} |u(t)| dt \quad (6.9)$$

$$IVC = \int_{T_1}^{T_2} \left| \frac{d[u(t)]}{dt} \right| dt$$

La Fig. 6.3 presenta la señal de referencia y la salida del servosistema. Las señales de control y la señal de error se observan en las Fig. 6.4 y 6.5 respectivamente. La Fig. 6.3 muestra la señal de salida del servosistema usando diferentes valores de  $\beta$  siendo  $\beta = 0.21$  la que no presenta un sobretiro ni un error en estado estacionario notable. Notar que cuando  $\beta = 0$ , la respuesta tiene un error en estado estacionario constante que no sobrepasa la señal de referencia, pero cuando  $\beta = 0.5$  se sobrepasa la señal de referencia y se mantiene un error en estado estacionario visible. El comportamiento de la señal de error se aprecia con mayor detalle en la Fig. 6.5.

En la Fig. 6.4 se muestran las señales de control usando diferentes valores de  $\beta$ . La diferencia más notable en las señales de control es con  $\beta = 0.21$  y  $\beta = 0.5$ , y esto

## CAPÍTULO 6. TEORÍA DE CONTROL: ALGORITMOS AVANZADOS

es visible en los valores que se encuentran en la Tabla 6.1 para los índices IC y IVC. Conforme se aumenta el valor de  $\beta$ , el índice IVC que está relacionado con el nivel de oscilaciones de la señal de control se incrementa. Notar que en la Tabla 6.1 el valor del índice IC más pequeño es con  $\beta = 0.21$  y con  $\beta = 0.5$  el valor es casi el correspondiente a  $\beta = 0.21$ .

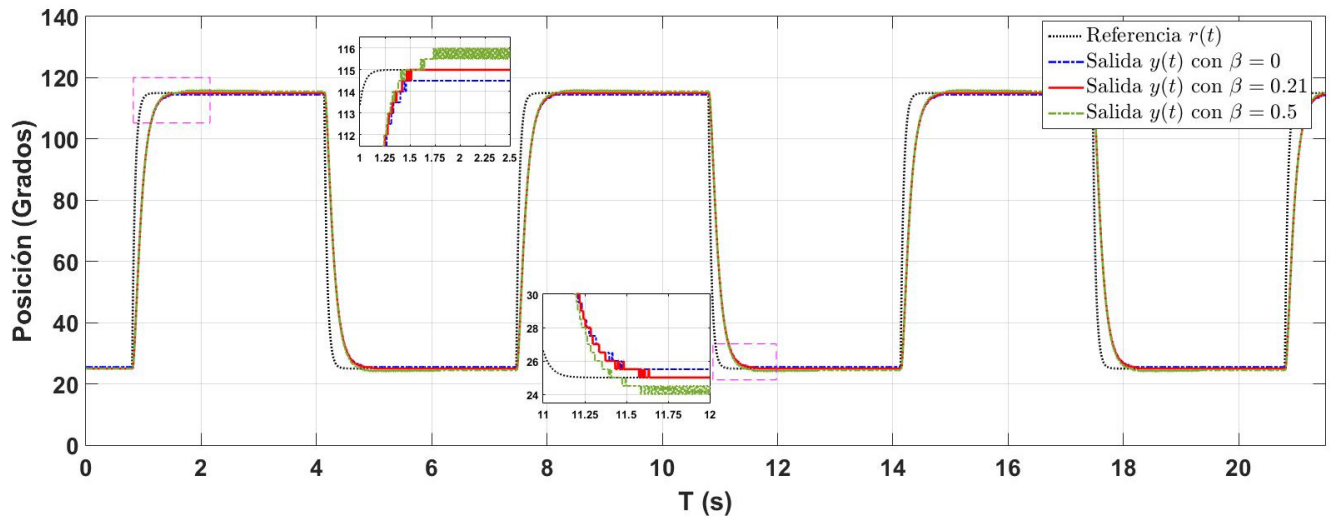


Figura 6.3: Posición vs Referencia usando el controlador P+RT+OP.



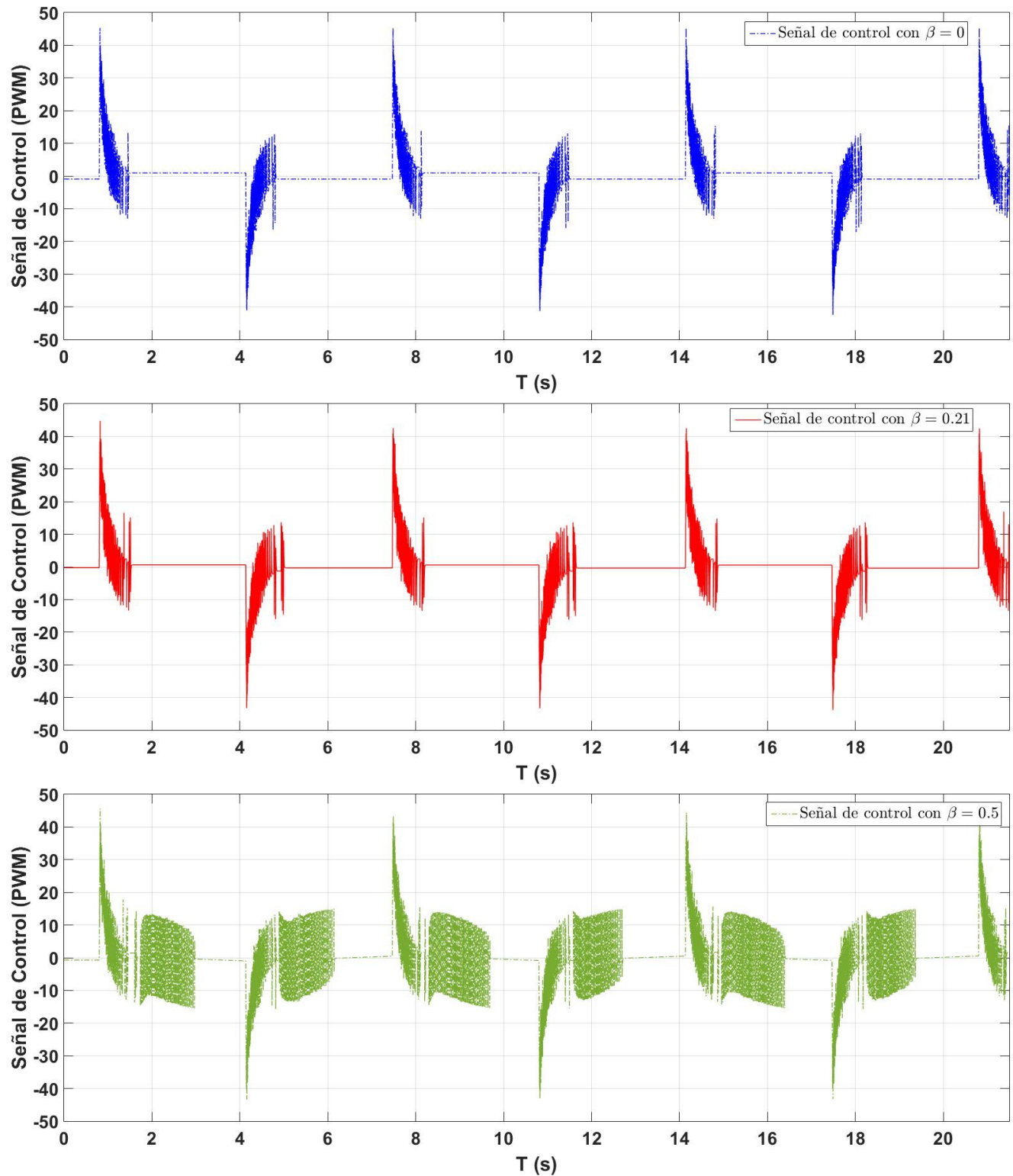


Figura 6.4: Señales de control usando el controlador P+RT+OP con  $\beta = 0, 0.21, 0.5$ .

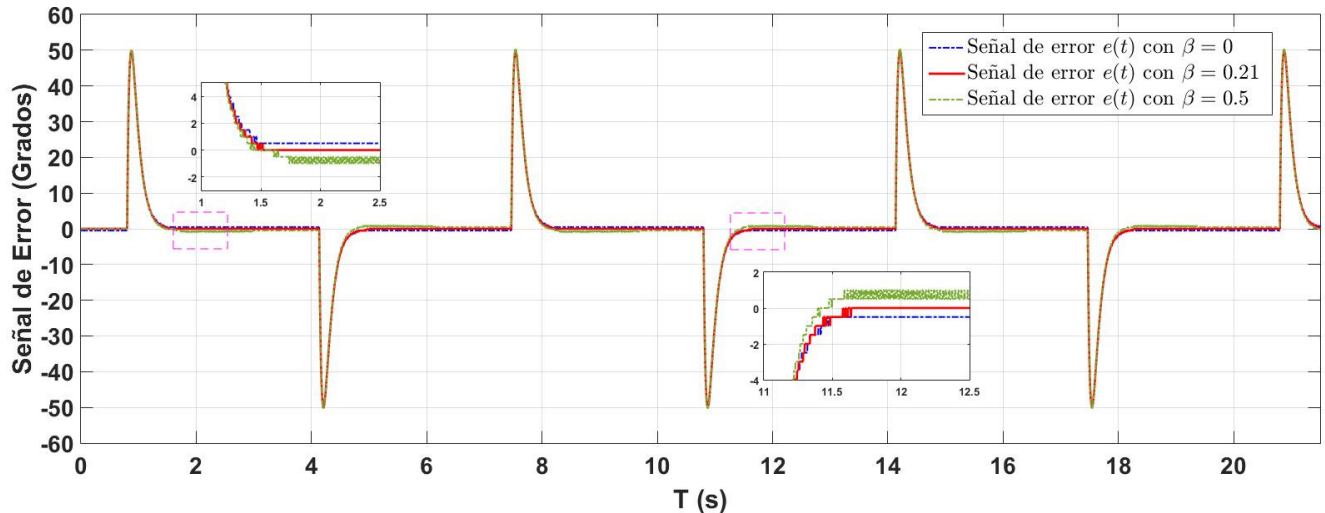


Figura 6.5: Señal de control usando el controlador P+RT+OP.

## 6.2. Diferenciador de Levant

### 6.2.1. Teoría

Como se mencionó en 5.5, el servosistema no cuenta con un sensor de medición de la velocidad angular. En la práctica estas mediciones no se encuentran disponibles por lo que se han estudiado varias formas para estimar la velocidad angular, una de ellas es usando un filtro pasa bajas como el mostrado en 5.3, otra alternativa es el empleo de observadores de estado como el presentado en 5.40, el cual es lineal.

Un problema que presenta el observador de estados es que, en presencia de perturbaciones, éste es incapaz de forzar el error de estimación a cero y consecuentemente los estados estimados no convergerán a los estados reales. Una alternativa al observador de estados lineales son los diferenciadores de modos deslizantes. Estos utilizan

## CAPÍTULO 6. TEORÍA DE CONTROL: ALGORITMOS AVANZADOS

funciones no lineales del error de observación para que el error de estimación converga a cero en tiempo finito. Cuando se conoce la magnitud de las perturbaciones, los estados del diferenciador convergerán a los estados reales. [74]

El diferenciador deslizantes mas común es el de segundo orden, pero en la práctica éstos presentan problemas debido a que la estimación de la velocidad no es suave y presenta castaño. Para suavizar la estimación de la velocidad se utilizan observadores basados en modos deslizantes de alto orden.

Sea una señal de entrada  $f(t) : [0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$  una función definida que está compuesta por un ruido acotado  $\eta$  medible en sentido de Lebesgue y una señal desconocida  $f_0(t)$ , cuya  $k$ -ésima derivada tiene una constante de Lipchitz conocida  $L > 0$ . Para encontrar estimaciones robustas de  $\dot{f}_0(t), \ddot{f}_0(t), \dots, f_0^{(k)}(t)$  se utiliza el siguiente diferenciador [75].

$$\begin{aligned}
 \dot{z}_0 &= v_0, v_0 = -\lambda_k L^{1/(k+1)} |z_0 - f(t)|^{k/(k+1)} \text{sign}(z_0 - f(t)) + z_1 \\
 \dot{z}_1 &= v_1, v_1 = -\lambda_{k-1} L^{1/k} |z_1 - v_0|^{(k-1)/k} \text{sign}(z_1 - v_0) + z_2 \\
 &\vdots \\
 \dot{z}_{k-1} &= v_{k-1}, v_{k-1} = -\lambda_1 L^{1/2} |z_{k-1} - v_{k-2}|^{1/2} \text{sign}(z_{k-1} - v_{k-2}) + z_k \\
 \dot{z}_k &= -\lambda_0 L \text{sign}(z_k - v_{k-1})
 \end{aligned} \tag{6.10}$$

Si los parámetros  $\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_k > 0$  se escogen adecuadamente, las siguientes igualdades se cumplen cuando no existe ruido de entrada

$$z_0 = f_0(t), \dots, z_i = v_{i-1} = f_0^{(i-1)}(t), i = 1, 2, \dots, i \tag{6.11}$$

## CAPÍTULO 6. TEORÍA DE CONTROL: ALGORITMOS AVANZADOS

El diferenciador mostrado en (6.10) tiene una estructura recursiva. Para su implementación se substituye el valor de  $v_0$  de la primera línea de la ecuación (6.10) dentro de la segunda línea, y así sucesivamente para obtener la siguiente forma no recursiva del diferenciador

$$\begin{aligned}
 \dot{z}_0 &= -\tilde{\lambda}_k L^{1/(k+1)} |z_0 - f(t)|^{k/(k+1)} \mathbf{sign}(z_0 - f(t)) + z_1 \\
 \dot{z}_1 &= -\tilde{\lambda}_{k-1} L^{2/(k+1)} |z_0 - f(t)|^{(k-1)/(k+1)} \mathbf{sign}(z_0 - f(t)) + z_2 \\
 &\vdots \\
 \dot{z}_{k-1} &= -\tilde{\lambda}_1 L^{k/(k+1)} |z_0 - f(t)|^{1/(k+1)} \mathbf{sign}(z_0 - f(t)) + z_k \\
 \dot{z}_k &= -\tilde{\lambda}_0 L \mathbf{sign}(z_0 - f(t))
 \end{aligned} \tag{6.12}$$

Usando el cambio de variable  $x_k = z_{k+1}$  es posible reescribir el diferenciador de Levant para el servosistema (5.31) de la manera siguiente

$$\dot{\hat{x}}_1 = \hat{x}_2 - \tilde{\lambda}_2 L |\hat{x}_1 - y|^{2/3} \mathbf{sign}(\hat{x}_1 - y) \tag{6.13}$$

$$\dot{\hat{x}}_2 = \hat{x}_3 - \tilde{\lambda}_1 L |\hat{x}_1 - y|^{1/3} \mathbf{sign}(\hat{x}_1 - y) \tag{6.14}$$

$$\dot{\hat{x}}_3 = -\tilde{\lambda}_0 L \mathbf{sign}(\hat{x}_1 - y) \tag{6.15}$$

Siendo  $\hat{x}_1$  y  $\hat{x}_2$  los estimados de la posición y la velocidad angular respectivamente,  $y$  la salida del servosistema y  $\hat{x}_1 - y$  es el error de estimación. El controlador PI+RT alimentado por estos estimados se escribe de la siguiente manera

$$u(t) = K_p \hat{e}(t) + K_i \int_0^t \hat{e}(\tau) d\tau - K_d \hat{x}_2 \tag{6.16}$$

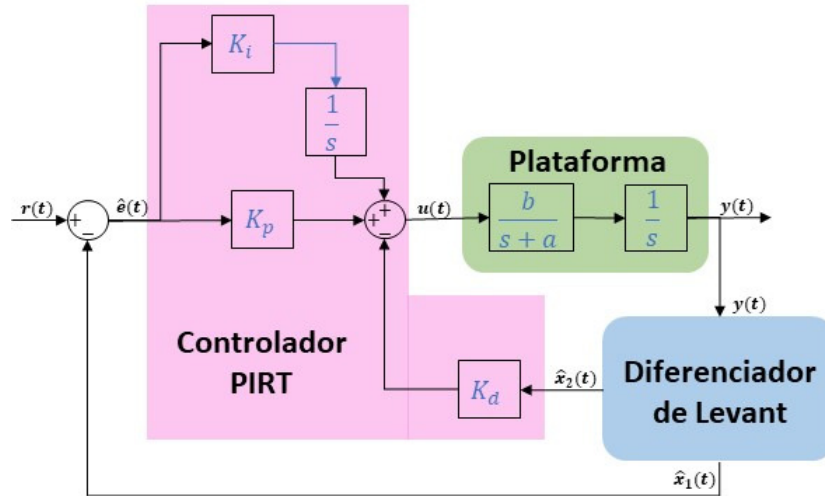


Figura 6.6: Diagrama de bloques del controlador PIRT+Diferenciador de Levant.

donde  $\hat{e}(t) = r - \hat{x}_1$ .

## 6.2.2. Resultados Experimentales

### 6.2.2.1. PEE-V2

Para la implementación del algoritmo de control Proporcional Integral con Realimentación Taquimétrica más el Diferenciador de Levant (PIRT+DL) se emplea una señal de referencia de onda cuadrada filtrada que varía de  $25^\circ$  a  $115^\circ$ . El filtro empleado para la señal de referencia es (5.9).

Las ganancias del observador de Levant se calcularon con base en la referencia [76] con  $L = 85,000,000$  y  $K_0 = 1.1L, K_1 = 2.12L^{\frac{2}{3}}$  y  $K_2 = 2L^{\frac{1}{3}}$ .

Los valores de las ganancias del controlador PIRT+DL y los índices de desempeño mostrados en 6.9 se encuentran en la Tabla 6.2. Para los experimentos se usan dos frecuencias de muestreo, una de  $1Khz$  y otra de  $5Khz$ .

En la Fig. 6.7 se observan las gráficas de la referencia y la posición angular del

## CAPÍTULO 6. TEORÍA DE CONTROL: ALGORITMOS AVANZADOS

Muestreo	$K_p$	$K_i$	$K_d$	$K_2$	$K_1$	$K_0$	$IEC$	$IC$	$IVC$
1 Khz	0.5	0.07	0.01	879.4	409,840	$93.5 \times 10^6$	494.70	12.63	10,350
5 Khz	0.5	0.07	0.01	879.4	409,840	$93.5 \times 10^6$	283.08	3.37	4,521

Cuadro 6.2: Ganancias e índices de desempeño del controlador PIRT+DL.

servosistema. Las Figuras 6.8 y 6.9 corresponden a las señales de control y señales de error de posición.

Se observa en la Fig. 6.7 que la respuesta del servosistema para ambas frecuencias de muestreo es prácticamente la misma con la diferencia de un pequeño sobretiro en la respuesta del servosistema correspondiente a la frecuencia de muestreo de  $1Khz$ . Lo anterior también se observa en la Fig. 6.9 que corresponde a las señales de error en posición.

En la Fig. 6.8 se observa a simple vista que la señal de control correspondiente a la frecuencia de muestreo de  $1Khz$  la cual tiene oscilaciones y castaño que disminuyen considerablemente cuando la señal de control se produce con una frecuencia de muestreo de  $5Khz$ . Lo anterior se refleja en los índices  $IC$  e  $IVC$  mostrados en la Tabla 6.2, éstos son más grandes cuando se utiliza la frecuencia de muestro de  $1Khz$  con respecto a los valores obtenidos con la frecuencia de muestro de  $5Khz$ . La estimación de la velocidad  $\hat{x}_2(t)$  mostrada en la Fig. 6.10 y generada con el diferenciador de Levant (6.13), presenta el mismo comportamiento de castaño que tiene la señal de control  $u(t)$  cuando la frecuencia de muestreo es de  $1Khz$  y su disminución cuando la frecuencia de muestreo es de  $5Khz$ .

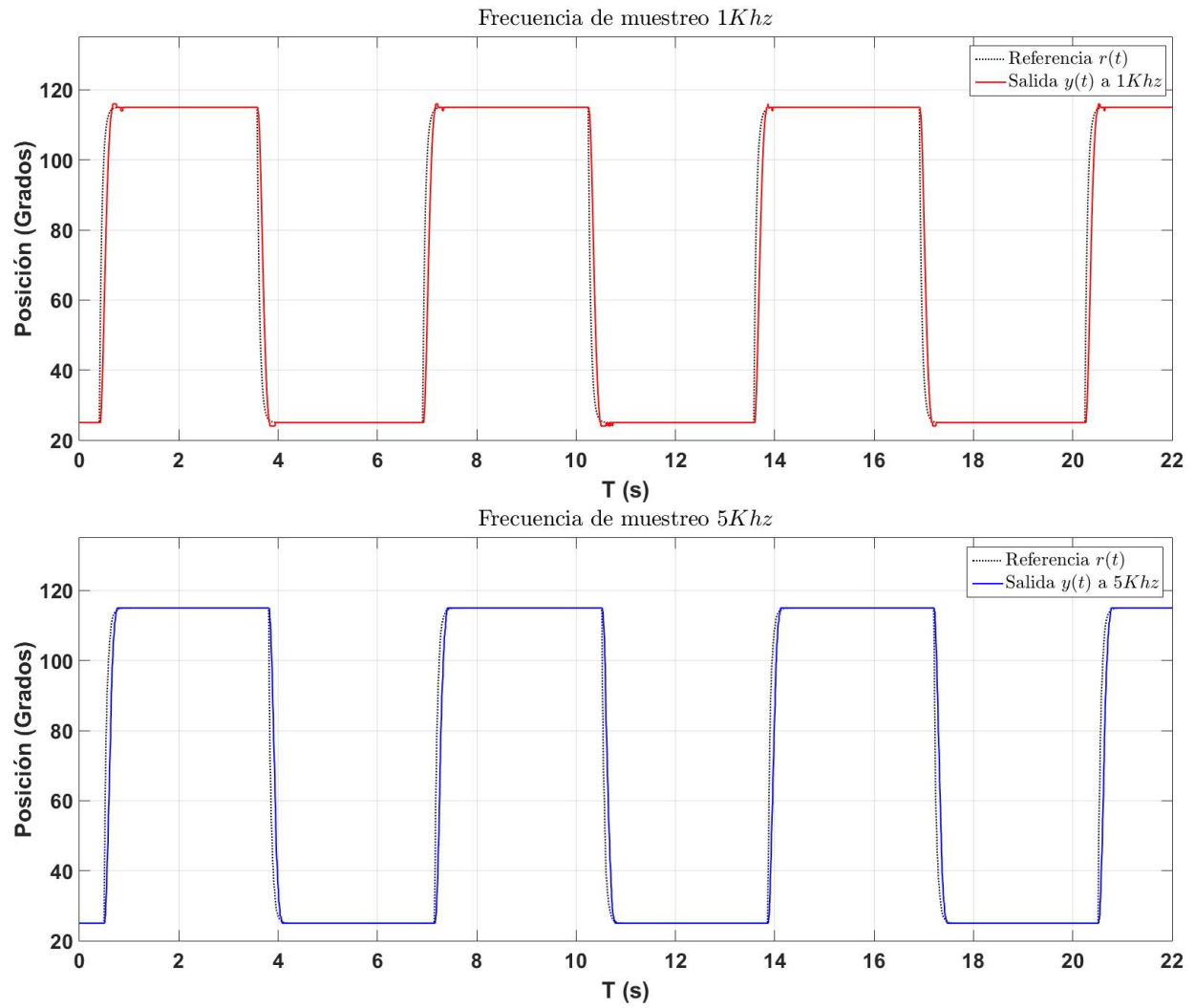


Figura 6.7: Posición vs Referencia usando el controlador PIRT+DL.

## CAPÍTULO 6. TEORÍA DE CONTROL: ALGORITMOS AVANZADOS

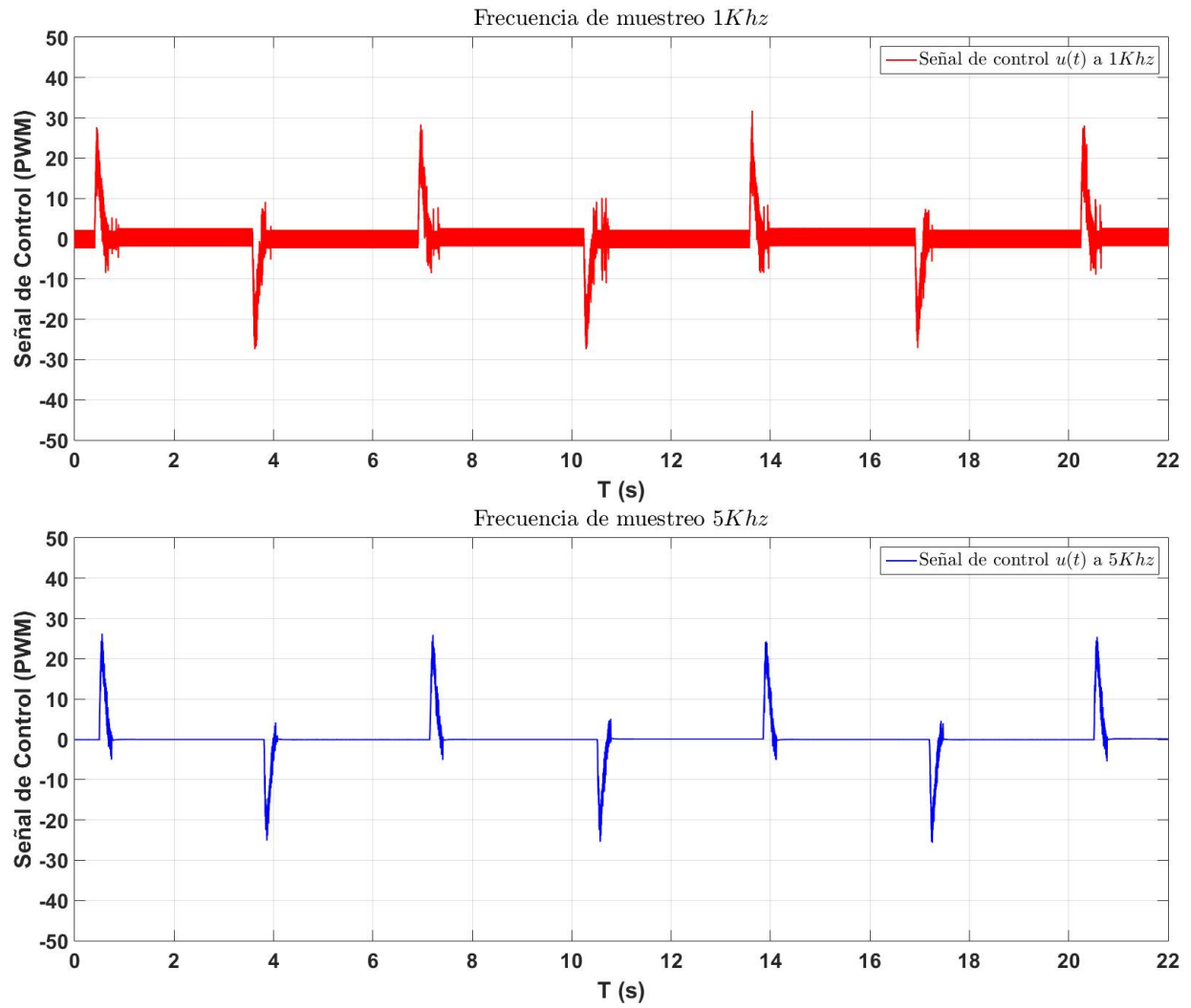


Figura 6.8: Señal de control usando el controlador PIRT+DL.



## CAPÍTULO 6. TEORÍA DE CONTROL: ALGORITMOS AVANZADOS

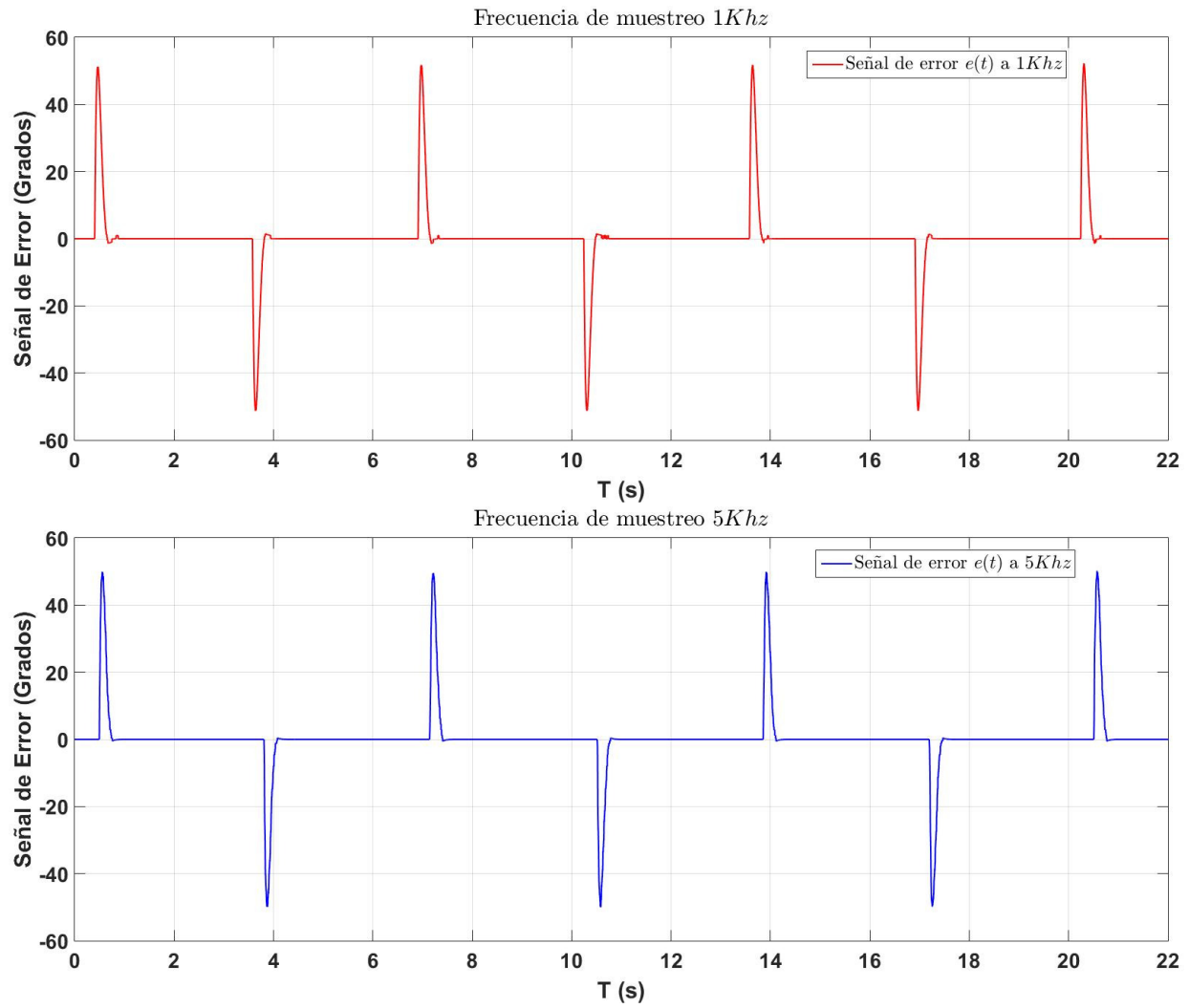


Figura 6.9: Señal de error de posición usando el controlador PIRT+DL.

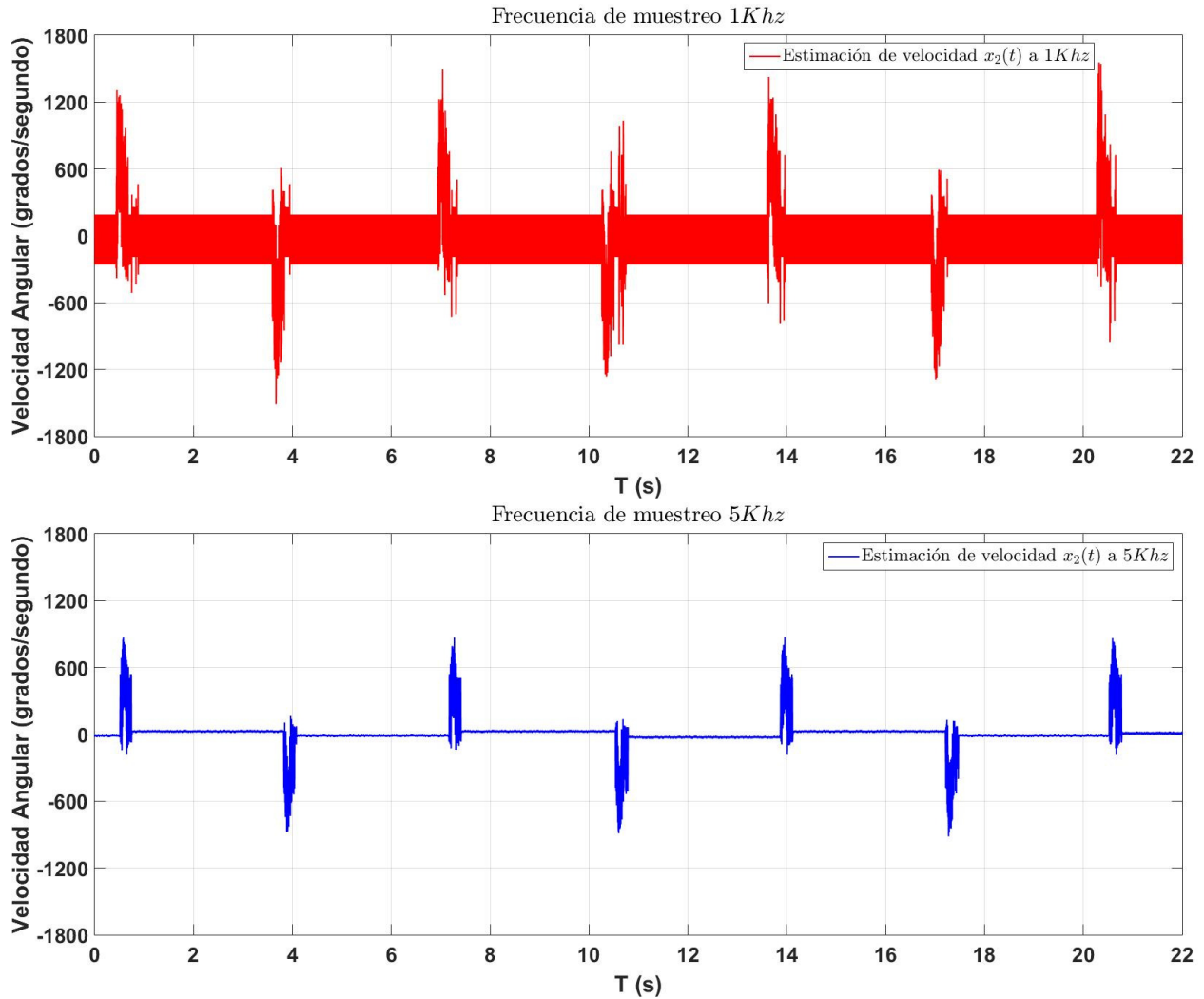


Figura 6.10: Estimación de la velocidad usando el diferenciador de Levant.

### 6.3. Conclusiones

- El empleo de la plataforma PEE-V2 permitió varios experimentos con el observador de perturbaciones modificando la frecuencia de corte  $\beta$  del observador. Un valor de  $\beta$  elevado produce una señal de control con muchas oscilaciones y una respuesta con sobretiro. Sin embargo, se observó que cuando se emplea un valor

## CAPÍTULO 6. TEORÍA DE CONTROL: ALGORITMOS AVANZADOS

de  $\beta$  adecuado se obtiene una respuesta sin sobretiros. Las oscilaciones observadas en la señal de control mostrada en la Fig. 6.4 se deben a que para la estimación de la velocidad se empleó un filtro pasa altas de primer orden, el cual generalmente no produce buenos estimados cuando se alimenta con mediciones de un codificador óptico.

- En la implementación del diferenciador de Levant la plataforma mostró que se pueden utilizar frecuencias de muestreo muy por arriba de la frecuencia de  $1Khz$  comúnmente usada en plataformas de experimentación comerciales. Los niveles de oscilación observados en la señal de control, Fig. 6.8, y la estimación de velocidad, Fig. 6.10, disminuyen considerablemente cuando se incrementa la frecuencia de muestreo.
- Los experimentos con la PEE-V2 muestran que esta última sirve para implementar algoritmos avanzados lineales como el observador de perturbaciones o no lineales como el diferenciador de Levant lo cual es de utilidad para la enseñanza de algoritmos avanzados en cursos de posgrado.

## **Capítulo 7**

# **Práctica de Laboratorio empleando la plataforma educativa PEE-V2**

El propósito de este capítulo es aplicar la teoría presentada en el Capítulo 2 para el diseño de una exposición y su correspondiente práctica de laboratorio, ambas basadas en la metodología de educación como transacción o descubrimiento y mediante el empleo de la plataforma educativa PEE-V2. Además, se propone el uso de los niveles cognitivos basados en la Taxonomía de Bloom [21] como guía para la creación de los objetivos de la exposición y de la práctica de laboratorio. Como ejemplo, se presenta una exposición y una práctica de laboratorio sobre el algoritmo PIRT descrito en el Capítulo 5.

## **7.1. Diseño de una exposición y de su práctica de laboratorio**

Recapitulando lo presentado en el Capítulo 2, los objetivos educativos definen los conocimientos y habilidades que un estudiante obtendría al terminar una actividad, y como se mencionó en el Capítulo 2, los objetivos se pueden definir a través de los niveles cognitivos de la Taxonomía de Bloom. Estos niveles son

- Recordar
- Comprender
- Aplicar
- Analizar
- Evaluar
- Crear

Cabe recalcar que estos niveles son secuenciales, es decir, no se puede pasar directamente al nivel Evaluar sin antes abordar los niveles de Recordar, Comprender, Aplicar y Analizar.

Tomando en cuenta lo anterior, los primeros niveles cognitivos por los que el estudiante debe de pasar son los niveles de Recordar y Comprender. Como se muestra en la Fig. 7.1, para estos dos primeros niveles los estudiantes deberán asistir a una exposición donde se definan los conceptos y la base teórica de lo que será aplicado

## CAPÍTULO 7. PRÁCTICA DE LABORATORIO EMPLEANDO LA PLATAFORMA EDUCATIVA PEE-V2



Figura 7.1: Clasificación de los niveles cognitivos definidos por Bloom

posteriormente en la práctica de laboratorio. Esta exposición debe responder a las preguntas que se presentan en la Fig. 7.2, haciendo hincapié en lo que deberá recordar y comprender el estudiante. En la misma figura se encuentran las preguntas equivalentes para el profesor o la persona que diseñe la exposición. En esta última se recomienda usar los diferentes métodos de enseñanza mostrados en el Capítulo 2, por ejemplo para un método de aprendizaje pasivo se pueden usar diapositivas, y alguna actividad en grupo o discusión para un método de aprendizaje activo.

La metodología educativa en la que se basa este trabajo es la educación como transacción donde el estudiante puede interactuar con las plataformas educativas para crear conocimiento y el profesor se vuelve un facilitador. Lo anterior se aplica directamente a los siguientes niveles cognitivos: Aplicar, Analizar y Evaluar, en éstos niveles se basan los objetivos de una práctica de laboratorio la cual usa como herramienta principal la plataforma PEE-V2. Las preguntas correspondientes a estos niveles se muestran en la Fig. 7.2, tanto para el estudiante como para el profesor. El nivel cognitivo de Aplicar se cumplirá al implementarse un algoritmo en la plataforma, el

## CAPÍTULO 7. PRÁCTICA DE LABORATORIO EMPLEANDO LA PLATAFORMA EDUCATIVA PEE-V2

	Profesor	Estudiante	
<b>Nivel Cognitivo</b>	<b>Recordar</b>	1. ¿Qué debe recordar el estudiante?	1. ¿Qué debo recordar?
	<b>Comprender</b>	2. ¿Qué debe comprender el estudiante?	2. ¿Qué debo comprender?
	<b>Aplicar</b>	3. ¿Dónde y cómo aplicará el estudiante el conocimiento?	3. ¿Dónde y cómo aplicaré el conocimiento?
	<b>Analizar</b>	4. ¿Qué tiene que analizar?	4. ¿Qué debo analizar?
	<b>Evaluar</b>	5. ¿Qué conocimiento se evaluará del estudiante?	5. ¿Qué conocimiento me evaluarán?
	<b>Crear</b>	6. ¿Dónde tendrá la posibilidad el estudiante de crear algo nuevo a partir del conocimiento aprendido?	6. ¿Dónde tendré la posibilidad de crear algo nuevo a partir del conocimiento aprendido?

Figura 7.2: Clasificación de preguntas basadas en el nivel cognitivo

nivel de Analizar lo realizará el estudiante durante su interacción con la plataforma, mientras que el papel del profesor será apoyar al estudiante cuando tenga dudas específicas. Para el nivel de Evaluar, el estudiante pondrá a prueba el algoritmo bajo las condiciones requeridas en la prácticas y responderá preguntas después de analizar y evaluar los resultados obtenidos.

El último nivel cognitivo es el de Crear, en éste se busca que el alumno cree algo nuevo a partir del conocimiento que adquirió durante la práctica. La pregunta correspondiente a este nivel se encuentra en la Fig. 7.2. Se sugiere al profesor establecer un proyecto al final del curso donde se le dé oportunidad al estudiante de modificar un algoritmo existente o de proponer una aplicación nueva del algoritmo.

Tomando en cuenta lo presentado en los párrafos anteriores, un diseño tentativo de una práctica de laboratorio se describe a continuación:

## CAPÍTULO 7. PRÁCTICA DE LABORATORIO EMPLEANDO LA PLATAFORMA EDUCATIVA PEE-V2

- Preliminares: Toda actividad que se necesite realizar antes de la práctica de laboratorio se encuentra aquí. Esta sección incluye la exposición y el autoestudio por parte del estudiante, los niveles cognitivos que se manejan son el de Recordar y el de Comprender. La exposición incluye los aspectos teóricos y antecedentes necesarios para llevar a cabo la práctica. También se incluye el conocimiento que necesita el estudiante para el funcionamiento básico de la plataforma PEE-V2 (ver Anexo A).
- Objetivos: Los objetivos de la práctica de laboratorio se diseñan a partir de los niveles cognitivos de Aplicar, de Analizar y de Evaluar.
- Práctica: Se presentan sugerencias de cuánto tiempo debe durar la práctica de laboratorio, la información que se le debe proporcionar al estudiante para realizarla, y lo que se debe evitar con el fin de que el profesor sea un facilitador y de esta manera seguir la metodología de educación como transacción. En esta sección será la plataforma PEE-V2 la herramienta con la cual el estudiante debe interactuar.
- Preguntas: Una vez que el estudiante termine de manera satisfactoria la práctica de laboratorio, se presentan una serie de preguntas sugeridas para evaluar y desafiar al estudiante a analizar y reflexionar sobre los resultados obtenidos.



### **7.1.1. Práctica de Laboratorio: PIRT**

Tomando como base el diseño de una práctica descrito anteriormente, se presenta una propuesta de práctica de laboratorio enfocada en el algoritmo de control Proporcional Integral con Realimentación Taquimétrica (PIRT).

#### **7.1.1.1. Preliminares**

Al final de la exposición presentada antes de la práctica de laboratorio, el estudiante deberá:

- Recordar la fórmula del controlador PID
- Comprender las acciones proporcional, integral y derivativa.
- Comprender el uso de la realimentación taquimétrica dentro de la acción derivativa.
- Recordar y comprender las diferentes estructuras del controlador PID incluyendo el controlador PIRT como caso particular.
- Recordar y comprender el funcionamiento básico de la plataforma PEE-V2.

Se recomienda usar un método de aprendizaje pasivo para los conceptos teóricos de la exposición combinado con un método de aprendizaje activo haciendo que los estudiantes discutan estos conceptos de manera colectiva. Los estudiantes deberán tener conocimiento previo del programa Matlab/Simulink.

### 7.1.1.2. Objetivos

Para esta práctica en particular se tienen los siguientes objetivos

- Nivel cognitivo Aplicar: Implementar el algoritmo de control PIRT en la plataforma PEE-V2.
- Nivel cognitivo Analizar: Analizar el efecto que tiene el cambio de ganancias sobre la plataforma PEE-V2. Por ejemplo, observar si existen sobretiros o error en estado estacionario.
- Nivel cognitivo Evaluar: Emplear índices para evaluar el desempeño de la plataforma. Estos índices pueden ser los presentados en (6.9).
- Nivel cognitivo Evaluar: Evaluar alguna estrategia de sintonización de las ganancias del controlador PIRT.

### 7.1.1.3. Práctica

Se presentan las siguientes sugerencias para llevar a cabo la práctica.

- Duración sugerida de la práctica: 1 hora y media.
- Se recomienda que los estudiantes formen equipos de 2 personas si no se cuentan con las plataformas suficientes.
- A partir del diagrama de la Fig. 7.3, el estudiante deberá construir el diagrama de Simulink correspondiente, el cual deberá de seguir los lineamientos descritos en el Apéndice A.

## CAPÍTULO 7. PRÁCTICA DE LABORATORIO EMPLEANDO LA PLATAFORMA EDUCATIVA PEE-V2

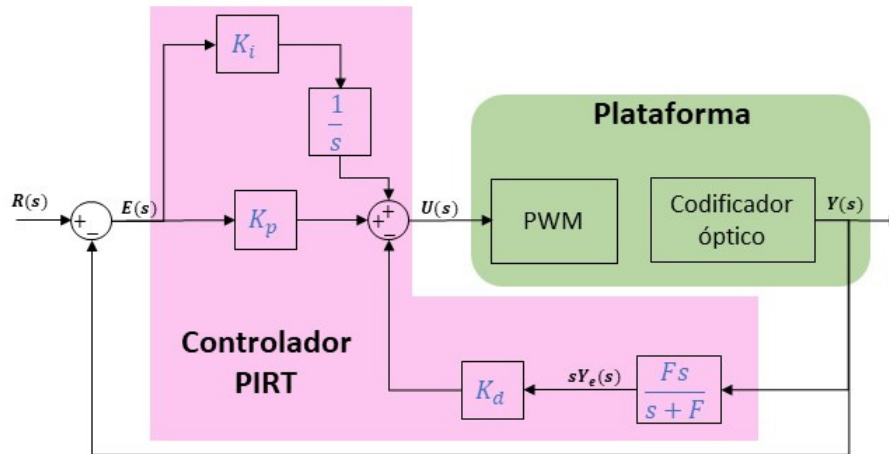


Figura 7.3: Diagrama de Simulink para el controlador PIRT

- Una vez realizado el diagrama de Simulink, el estudiante deberá modificar las ganancias del controlador hasta lograr una respuesta estable y sin sobretiros.
- Mencionar la importancia de que la sintonización del controlador esté en un rango de valores permitido. En específico, para la plataforma PEE-V2 este rango es de  $\pm 50\%$  de ancho de pulso.
- Un tópico que puede incluirse en la práctica es el empleo de un mecanismo de *antiwindup* como el descrito en el Capítulo 5. Esto permitirá que el estudiante aprecie el efecto que tiene el no respetar el rango de la señal de control, su efecto en la acción integral que genera el fenómeno de *windup* y su prevención mediante el mecanismo de *antiwindup*.

### 7.1.1.4. Preguntas

A continuación se presentan algunas preguntas sugeridas:

## CAPÍTULO 7. PRÁCTICA DE LABORATORIO EMPLEANDO LA PLATAFORMA EDUCATIVA PEE-V2

- ¿Qué sucede a la respuesta de la plataforma si la ganancia proporcional se incrementa manteniendo fija la ganancia derivativa y la ganancia integral igual a cero? ¿Qué sucede con el error en estado estacionario?
- Manteniendo constante la ganancias proporcional y haciendo la ganancia integral igual a cero, explique el efecto que causa en la respuesta de la plataforma la modificación de la ganancia derivativa.
- ¿Que pasa con la señal de control cuando la ganancia derivativa tiene valores elevados?
- Manteniendo constantes la ganancias proporcional y derivativa, observar qué sucede con el error en estado estacionario cuando se incrementa desde cero la ganancia integral.
- ¿Manteniendo constantes las ganancias derivativa e integral, cuál es el valor máximo que puede tener la ganancia proporcional sin que la señal de control sobrepase sus límites?

## **Capítulo 8**

# **Evaluación de la plataforma PEE-V2 en un entorno de enseñanza**

Este capítulo tiene como objetivo evaluar la plataforma PEE-V2 y la metodología de enseñanza presentada en este trabajo en un entorno de enseñanza con alumnos. Para esto se realizó el curso Seminario de Control en Tiempo Real para Servomotores para los estudiantes de posgrado del Departamento de Control Automático en el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional. Al final se muestran los resultados de una encuesta de opinión por parte de los estudiantes del curso.

## 8.1. Seminario de Control en Tiempo Real para Servomotores

Este seminario se llevó a cabo dentro del cuatrimestre Enero-Abril del 2020, ver Fig. 8.1. El objetivo del seminario fue implementar leyes de control en tiempo real mediante una plataforma en tiempo real, conocida en este trabajo como la plataforma educativa PEE-V2. En este curso participaron 13 estudiantes de los cuales 8 pertenecían al programa de maestría y 5 al programa de doctorado.

El Seminario tuvo una duración de dos horas a la semana durante 10 semanas. En el seminario se realizaron las siguientes exposiciones:

- Introducción al control en Tiempo Real.
- Uso de *software* y *hardware* para el control en Tiempo Real.
- Características de los sistemas en Tiempo Real.
- Presentación de la plataforma PEE-V2.
- Características de la tarjeta STM32F04.
- Instalación del *software* y *hardware* para la plataforma PEE-V2.
- Funciones básicas de la plataforma.
- Práctica: Controlador PIRT.
- Práctica: Identificación paramétrica usando el algoritmo de Mínimos Cuadrados.

CAPÍTULO 8. EVALUACIÓN DE LA PLATAFORMA PEE-V2 EN UN ENTORNO DE ENSEÑANZA



Figura 8.1: Seminario de Control en Tiempo Real para Servomecanismos

## CAPÍTULO 8. EVALUACIÓN DE LA PLATAFORMA PEE-V2 EN UN ENTORNO DE ENSEÑANZA

- Práctica: Regulador Cuadrático Lineal.

Debido a la pandemia del COVID-19 la última práctica que corresponde al Regulador Cuadrático Lineal ya no se pudo impartir. Las primeras siete exposiciones corresponden al Control en Tiempo Real y a la presentación y uso de la plataforma PEE-V2. Las tres últimas corresponden a prácticas.

Las exposiciones se hicieron mediante diapositivas como método de aprendizaje pasivo y cada una con una duración de 30 minutos. Posteriormente se tuvieron actividades de 10 minutos como aprendizaje activo para fomentar la comprensión de los temas presentados. Como ejemplos de actividades se hicieron discusiones grupales a través de preguntas realizadas al grupo, mini encuestas de opinión, lluvia de ideas y retos para saber si algún equipo terminaba primero una actividad.

Las prácticas de laboratorio se diseñaron de acuerdo al diseño mencionado en el Capítulo 7, con una exposición inicial y dejando que los estudiantes intentaran por varios minutos la implementación con apoyo mínimo por parte del profesor. Una vez que todos los estudiantes terminaban con la práctica se iniciaba una discusión sobre los resultados experimentales.

Para conocer las opiniones de los estudiantes sobre plataforma PEE-V2 y el seminario se realizó una encuesta anónima después de la práctica sobre controlador PIRT pidiéndoles información sobre su pertenencia al programa de maestría o doctorado. Las instrucciones de la encuesta fueron responder del 1 al 5 siendo 1 completamente en desacuerdo y 5 completamente de acuerdo a las frases que se muestran en la Fig. 8.2. Estas se dividieron en los siguientes enfoques:



# CAPÍTULO 8. EVALUACIÓN DE LA PLATAFORMA PEE-V2 EN UN ENTORNO DE ENSEÑANZA

## ENCUESTA

### Instrucciones

Responder del 1 al 5, siendo **1** completamente en desacuerdo y **5** completamente de acuerdo.

1. Los pasos para la instalación del software usado en la clase fueron fáciles de seguir.



2. Cuando retiré las piezas de la caja, intuitivamente pude ensamblar la plataforma educativa.



3. La implementación de los controladores en la plataforma es sencilla.



4. Me gustaría haber utilizado la plataforma durante mi carrera universitaria.



5. Me gustaría haber usado la plataforma en la materia de Teoría de Control 1 durante mi maestría.



6. Me gustaría que se aplicará aprendizaje pasivo durante el seminario.



## CAPÍTULO 8. EVALUACIÓN DE LA PLATAFORMA PEE-V2 EN UN ENTORNO DE ENSEÑANZA

7. Considero que no hubo suficiente material teórico en el seminario.



8. El Departamento de Control Automático cuenta con suficientes cursos orientados a aplicaciones.



9. Comentarios sobre la plataforma educativa.

---

---

---

---

---

10. Comentarios sobre el seminario Control en Tiempo Real para Servomecanismos.

---

---

---

---

---

Figura 8.2: Encuesta del Seminario de Control en Tiempo Real para Servomotores

## CAPÍTULO 8. EVALUACIÓN DE LA PLATAFORMA PEE-V2 EN UN ENTORNO DE ENSEÑANZA

### Encuesta: Seminario de Control en Tiempo Real

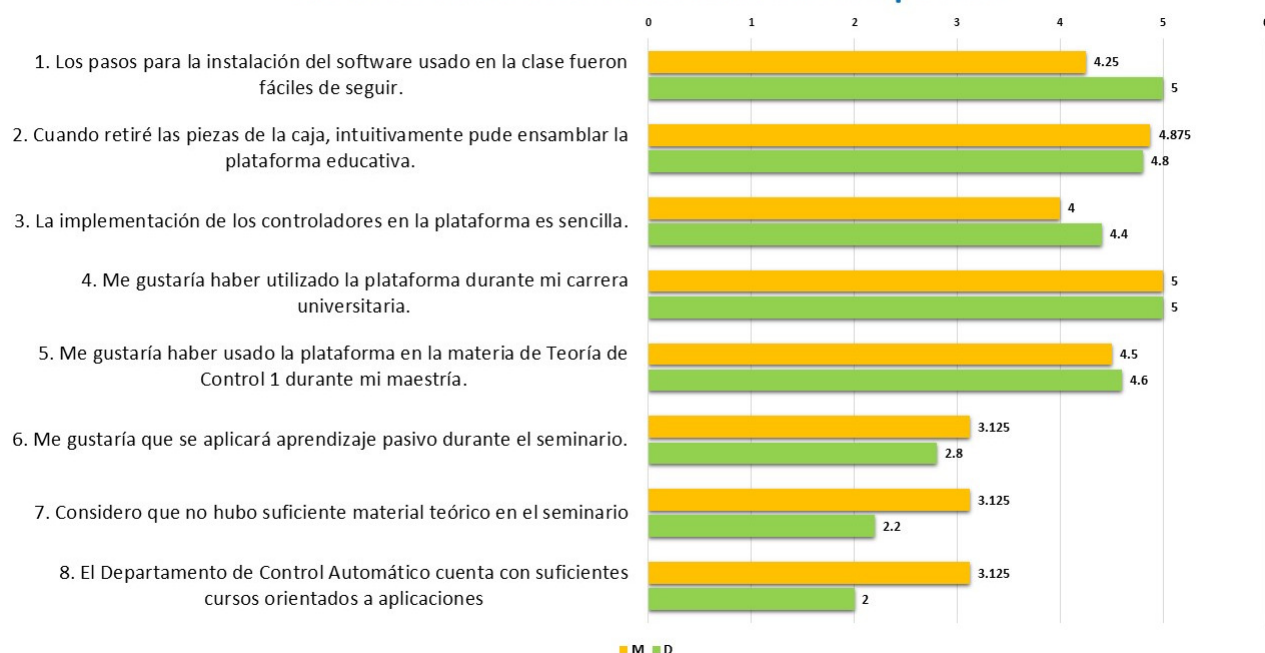


Figura 8.3: Resultados de la encuesta del Seminario de Control en Tiempo Real para Servomotores

- Frases del 1 a 5: Se enfocan en la plataforma, en cómo es recibida por los estudiantes, la facilidad de instalación del software y la implementación de algoritmos de control.
- Frases del 6 a 8: Se enfocan en el contenido del seminario y el método de aprendizaje activo usado durante el seminario.
- Frases del 9 a 10: Son frases donde se piden comentarios y críticas a la plataforma educativa PEE-V2 y al seminario de control en tiempo real.

Las respuestas de las encuestas se muestran en la Fig. 8.3. Se observa en la imagen que las respuestas de los alumnos de doctorado y maestría son similares excepto en las frases 7 y 8. La frase 7 muestra que los estudiantes de doctorado consideran que hubo suficiente material teórico en el seminario, mientras que los de maestría consideran

## CAPÍTULO 8. EVALUACIÓN DE LA PLATAFORMA PEE-V2 EN UN ENTORNO DE ENSEÑANZA

que falta más información teórica. La frase 8 muestra que los estudiantes consideran que son necesario más cursos orientados a aplicaciones, principalmente los alumnos de doctorado.

Ambos grupos de estudiantes hubieran deseado utilizar la plataforma durante su carrera universitaria y pudieron ensamblar las piezas que componen la plataforma educativa con muy poca ayuda del profesor.

Los comentarios sobre la plataforma educativa correspondientes a la frase 9 fueron los siguientes:

- Me gustó que sea fácil de usar y ver resultados.
- Considero que se podría poner un indicador en el eje del motor para poder apreciar mejor su movimiento.
- La plataforma educativa es muy intuitiva, por lo cual es muy fácil de usar.
- Me parece ideal para el aprendizaje a nivel licenciatura y estaría de lujo un manual de usuario.
- Se debe contar con un manual ilustrado, además de contar con un programa que permita introducir al usuario a los comandos más importantes a utilizar en Simulink.
- Es portátil y compatible con Windows 10.
- El hecho de manejar la plataforma con Matlab hace que se aclaren dudas sobre control.

## CAPÍTULO 8. EVALUACIÓN DE LA PLATAFORMA PEE-V2 EN UN ENTORNO DE ENSEÑANZA

- Se podrían fabricar más circuitos impresos (similares a la tarjeta H1D1A-V1 en la Fig. 4.14) para realizar más aplicaciones y usar otros tipos de comunicación.

Los comentarios sobre el seminario correspondiente a la frase 10 fueron los siguientes:

- El enfoque de aprendizaje activo-pasivo fue el mejor para captar al 100 % la atención de los asistentes.
- Deberían realizar más prácticas.
- Me agrada que te orienten en las dudas. Me agrada la parte activa y no me duermo en las explicaciones.
- Me parece que un poco más de información teórica vendría bien.
- Me gustaría realizar las mismas prácticas de la case de Teoría de Control I, para observar diferencias entre ambas plataformas.
- Buena combinación entre teoría y práctica.
- Debería haber otro curso de aplicaciones con el material del laboratorio.
- El curso tiene elementos muy modernos y eso me gustó.
- Me gusta la parte de la presentación cuando se hacen lluvia de ideas y la velocidad con la que se lleva la clase es adecuada.

Lamentablemente, el curso y encuestas posteriores no pudieron ser completadas como estaban planeadas por el término de clases presenciales debido a la pandemia COVID-19.

## CAPÍTULO 8. EVALUACIÓN DE LA PLATAFORMA PEE-V2 EN UN ENTORNO DE ENSEÑANZA

A pesar de que el seminario no pudo terminarse de la forma planeada este mostró el potencial de la plataforma educativa PEE-V2 como una herramienta adecuada para la enseñanza de Control Automático siguiendo la metodología de enseñanza por transacción.

### 8.1.1. Conclusiones

- La plataforma educativa fue bien recibida por los estudiantes, muchos comentaron lo fácil que les resultó usarla una vez que entendieron las funciones básicas de la plataforma y les resultó atractivo que fuera portátil.
- Varios alumnos entendieron mejor algunas definiciones con el uso la plataforma PEE-V2.
- Los estudiantes pudieron ensamblar la plataforma educativa con muy poca ayuda por parte del profesor, lo cual demuestra lo fácil que es de utilizar.
- La instalación del *software* necesario para utilizar la plataforma PEE-V2 debe realizarse fuera de la clase para que el estudiante no se retrase en la implementación de controladores.
- Durante el transcurso del seminario los estudiantes de maestría se atrasaban en la implementación de algunos algoritmos y el tiempo de la clase no era suficiente para resolver todas las dudas. Se recomienda extender el seminario a dos clases por semana con duración de dos horas.

# Capítulo 9

## Conclusiones y Trabajo Futuro

### 9.1. Conclusiones

El objetivo de esta tesis es el desarrollo de plataformas educativas basadas en motores de corriente directa con las siguientes características: Portabilidad, fáciles de construir y de usar, que tengan la capacidad de probar algoritmos de Control Clásico y Avanzado y de ser una herramienta en cursos de licenciatura y posgrado. Las plataformas educativas presentadas en esta tesis, la PEE-V1 y la PEE-V2, cumplen con todas las características requeridas en el objetivo.

Los amplificadores de potencia asociados a estas plataformas están basados en tecnologías diferentes. La PEE-V1 emplea un amplificador lineal mientras que la PEE-V2 funciona utilizando un amplificador basado en un puente H y controlador mediante modulación de ancho de pulso. Ambas plataformas se programan mediante Matlab/Simulink. En la plataforma PEE-V1 el algoritmo de control se ejecuta en una

## CAPÍTULO 9. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

computadora personal dotada de una tarjeta de adquisición de datos. En el caso de la plataforma PEE-V2 se utiliza una tarjeta basada en un microcontrolador que contiene convertidores analógicos/digitales y es capaz de generar trenes de pulsos controlados por ancho de pulso. El empleo del microcontrolador reduce significativamente el tamaño y el costo de la plataforma.

En esta tesis se propone la integración de estas plataformas en cursos de las carreras de Mecatrónica, Robótica y Control Automático mediante la metodología de educación como transacción propuesta por Miller, donde la educación se realiza a través de crear nuevo conocimiento utilizando material didáctico. Para lograr lo anterior se utiliza aprendizaje activo. Además, en este trabajo se propone el diseño de prácticas de laboratorio para usarse dentro de estos cursos, basado en los niveles cognitivos definidos en la taxonomía de Bloom.

En ambas plataformas se probaron los algoritmos Proporcional Integral con Realimentación Taquimétrica con y sin *antiwindup*, un Observador de Estados y se empleó el algoritmo de Identificación Paramétrica de Mínimos Cuadrados para la estimación de los parámetros de un modelo de segundo orden de las plataformas. En este caso los resultados obtenidos con ambas plataformas fueron satisfactorios y la implementación y la sintonización de los algoritmos de control fue relativamente sencilla y simple. La plataforma PEE-V2 fue probada con dos algoritmos avanzados, un algoritmo basado en rechazo activo de perturbaciones y el diferenciador de Levant. El resultado obtenido en el caso del algoritmo basado en rechazo activo de perturbaciones fue adecuado y se mostró el efecto del cambio de la frecuencia de corte del observador de perturbaciones empleado en este esquema. En el caso del diferenciador de Levant, que se



## CAPÍTULO 9. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

empleó para generar un estimado de la velocidad angular, se aprovechó la capacidad de la plataforma para manejar frecuencias de muestreo elevadas. Lo anterior permitió probar este algoritmo a  $1Khz$  y  $5Khz$  de frecuencia de muestreo mostrándose una disminución considerable en el castaño de la señal de control en el caso de  $5Khz$  de frecuencia de muestreo.

La plataforma PEE-V2 fue evaluada en el *Seminario de Control en Tiempo Real para Servomotores* impartido en el Departamento de Control Automático del CINVESTAV para estudiantes de maestría y doctorado. Lo anterior permitió evaluar tanto la plataforma PEE-V2 como las prácticas de laboratorio diseñadas empleando los niveles cognitivos de la taxonomía de Bloom. La plataforma fue bien recibida por los estudiantes gracias a su facilidad de uso y a su portabilidad.

### 9.2. Trabajo Futuro

Para el trabajo futuro a desarrollar se consideran las siguientes actividades

- Implementación del Control en Velocidad en la plataforma PEE-V2.
- Creación de otras tarjetas que se acoplen a la tarjeta STM32F4 para estudiar otros sistemas físicos, por ejemplo, sistemas térmicos basados en transistores funcionando como calefactores, o tarjetas capaces de controlar dos motores y de leer dos codificadores ópticos. Esto último permitiría el control de sistemas subactuados, por ejemplo, un péndulo de Furuta.
- Mejorar el sistema de paro de la plataforma PEE-V2.

## CAPÍTULO 9. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

- Realizar el diseño de más prácticas de laboratorio.
- Diseño de un libro basado en esta tesis
- Creación de más contenido multimedia sobre el empleo de la plataforma.
- Considerar el empleo de otro tipo de motores de CD.

# Apéndice A

## Instalación de software para el uso de la PEE-V2

La instalación del software necesario para implementar algoritmos de control en la plataforma PEE-V2 se puede dividir en los siguientes pasos

- Instalación de MATLAB 2015A: Cabe recalcar que tiene que ser esta edición de Matlab para que funcione las librerías como deberían. No confundir con MATLAB 2015ASP1.
- Instalación del programa STM32 ST-Link
- Instalación de controladores
- Instalación de la librería de Waijung
- Instalación de la librería UC3M

Para la instalación de Matlab se requiere una licencia. Todos los demás programas se

## APÉNDICE A. INSTALACIÓN DE SOFTWARE PARA EL USO DE LA PEE-V2

pueden descargar de la siguiente dirección [https://drive.google.com/drive/folders/1CS6xwHJ\\_5TX9R-BV6sJ8MD357xMAc7Nq](https://drive.google.com/drive/folders/1CS6xwHJ_5TX9R-BV6sJ8MD357xMAc7Nq) y una guía de paso a paso en la instalación se encuentra en el siguiente video <https://youtu.be/6KXBXYnrm6s>.

## **Apéndice B**

# **Modelo matemático de un servomotor y su amplificador de potencia**

Un servomecanismo es un sistema realimentado compuesto por un servomotor de CD, un tren de engranajes, un sensor de posición y una tarjeta controladora. Estos elementos y su interacción se muestran en la Fig. B.1.

## APÉNDICE B. MODELO MATEMÁTICO DE UN SERVOMOTOR Y SU AMPLIFICADOR DE POTENCIA

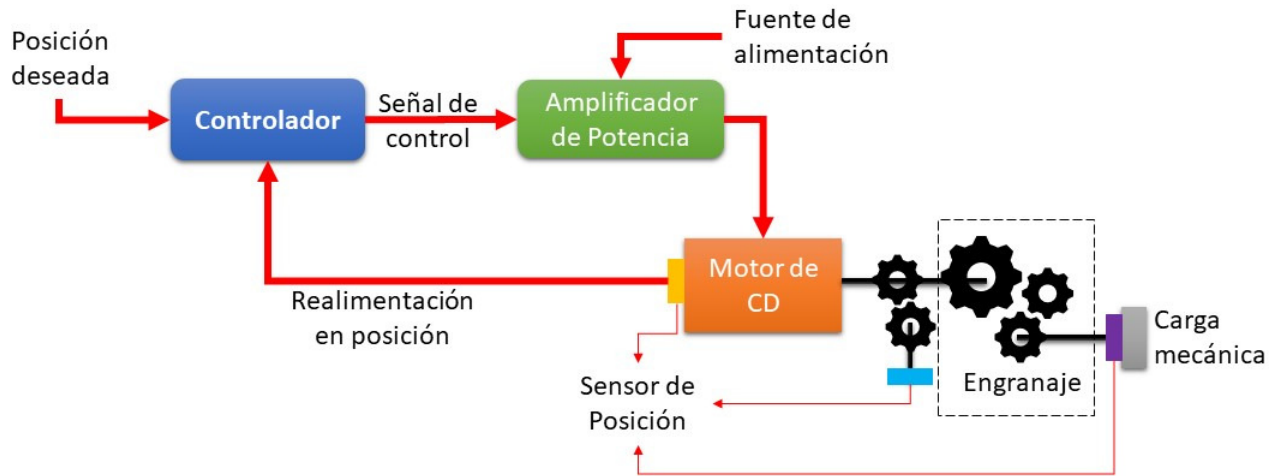


Figura B.1: Esquema básico de un servomecanismo

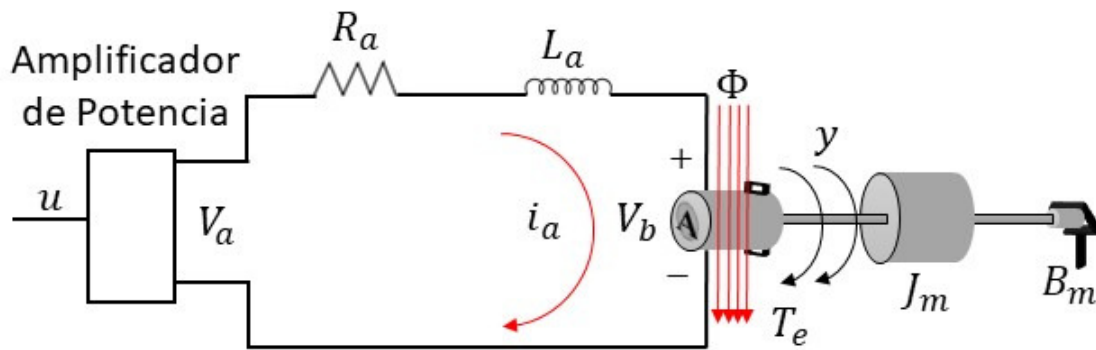


Figura B.2: Diagrama de un servomotor de CD incluyendo sus subsistemas eléctrico y mecánico

co

El sensor de posición puede medir directamente la posición angular de la armadura del servomotor o a través de un engrane, o bien mide el desplazamiento angular de la carga.

A continuación se describen los modelos del servomotor de CD y su amplificador de potencia. Todas las variables y parámetros de estos modelos se muestran en la Tabla B.1.

El servomotor de CD se modela como la unión de un subsistema eléctrico y uno

## APÉNDICE B. MODELO MATEMÁTICO DE UN SERVOMOTOR Y SU AMPLIFICADOR DE POTENCIA

Parámetro	Descripción
$R_a$	Resistencia de Armadura
$i_a$	Corriente de Armadura
$L_a$	Inductancia
$V_b$	Fuerza Contraelectromotriz
$V_a$	Voltaje de salida del amplificador de potencia
$u$	Voltaje de control
$K_b$	Constante de la fuerza contraelectromotriz
$K_a$	Ganancia del amplificador
$K$	Constante de par
$J_m$	Momento de inercia del motor
$B_m$	Coefficiente de fricción viscosa del motor
$T_e$	Par electromagnético del motor
$y$	Posición angular del eje del motor
$y_r$	Posición angular del eje de salida del tren de engranajes

Cuadro B.1: Parámetros del modelo matemático del servomotor (B.1)

mecánico. En el caso del subsistema eléctrico, el servomotor se describe como un circuito con una resistencia de armadura  $R_a$  en serie con una inductancia  $L_a$ , un voltaje de salida del amplificador de potencia  $V_a$  y el voltaje producido por la fuerza contraelectromotriz  $V_b$ , [65] como se muestra en la Fig. B.2. El flujo magnético  $\phi$  es producido mediante imanes permanentes. Este circuito tiene asociada la siguiente ecuación diferencial

$$R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + V_b = V_a \quad (\text{B.1})$$

Cuando la armadura del servomotor está rotando, se produce un voltaje proporcional al producto del flujo magnético  $\phi$  y la velocidad angular de la armadura. Al voltaje

## APÉNDICE B. MODELO MATEMÁTICO DE UN SERVOMOTOR Y SU AMPLIFICADOR DE POTENCIA

inducido se le conoce como fuerza contraelectromotriz y se describe por la siguiente ecuación

$$V_b = K_b \frac{dy}{dt} \quad (\text{B.2})$$

Sustituyendo (B.2) en (B.1) se obtiene

$$R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + K_b \frac{dy}{dt} = V_a \quad (\text{B.3})$$

Usando la segunda ley de Newton para sistemas mecánicos rotacionales se obtiene la ecuación que describe el movimiento del subsistema mecánica del servomotor, la cual está dada por

$$J_m \frac{d^2y}{dt^2} + B_m \frac{dy}{dt} = T_e \quad (\text{B.4})$$

Los términos  $J_m$  y  $B_m$  son respectivamente la inercia y el coeficiente de fricción viscosa del motor, la carga y el tren de engranajes. El par electromagnético  $T_e$  del motor se relaciona con la corriente de armadura usando la siguiente ecuación

$$T_e = K i_a \quad (\text{B.5})$$

Sustituyendo (B.5) en (B.4) se tiene la siguiente expresión

$$J_m \frac{d^2y}{dt^2} + B_m \frac{dy}{dt} = K i_a \quad (\text{B.6})$$



## APÉNDICE B. MODELO MATEMÁTICO DE UN SERVOMOTOR Y SU AMPLIFICADOR DE POTENCIA

Aplicando la transformada de Laplace a (B.3) y (B.6) y suponiendo condiciones iniciales iguales a cero se obtienen las siguientes expresiones

$$R_a I_a(s) + L_a s I_a(s) + K_b s Y(s) = V_a(s) \quad (\text{B.7})$$

$$J_m s^2 Y(s) + B_m s Y(s) = K I_a(s) \quad (\text{B.8})$$

donde  $I_a(s) = \mathcal{L}\{i_a\}$ ,  $Y(s) = \mathcal{L}\{y\}$ ,  $V_a(s) = \mathcal{L}\{V_a\}$  y  $\mathcal{L}\{\cdot\}$  es el operador de Laplace. Se despeja  $I_a(s)$  de (B.7) y (B.8)

$$I_a(s) = \frac{V_a(s) - K_b s Y(s)}{R_a + L_a s} \quad (\text{B.9})$$

$$I_a(s) = \frac{J_m s^2 Y(s) + B_m s Y(s)}{K} \quad (\text{B.10})$$

Las ecuaciones anteriores se igualan para obtener la siguiente expresión

$$\frac{V_a(s) - K_b s Y(s)}{R_a + L_a s} = \frac{J_m s^2 Y(s) + B_m s Y(s)}{K} \quad (\text{B.11})$$

A partir de (B.11) se obtiene la siguiente función de transferencia entre la posición angular del motor  $Y(s)$  y el voltaje de entrada al amplificador de potencia  $V_a$

$$\frac{Y(s)}{V_a(s)} = \frac{K}{(R_a + L_a s)(J_m s^2 + B_m s) + K_b K s} \quad (\text{B.12})$$

La relación de transmisión del tren de engranajes es tal que el eje de salida del motor de CD gira  $n$  veces por cada revolución del eje de motor, entonces se tiene que

APÉNDICE B. MODELO MATEMÁTICO DE UN SERVOMOTOR Y SU AMPLIFICADOR DE POTENCIA

$$Y_r(s) = \frac{1}{n}Y(s) \quad (\text{B.13})$$

donde  $Y_r(s) = \mathcal{L} \{y_r\}$ . Se reescribe (B.12) usando (B.13) como sigue

$$\frac{Y_r(s)}{V_a(s)} = \frac{K/n}{(R_a + L_a s)(J_m s^2 + B_m s) + K_b K s} \quad (\text{B.14})$$

La relación entre la entrada y salida del amplificador está dada por la siguiente ecuación

$$V_a(s) = K_a U(s) \quad (\text{B.15})$$

Siendo  $K_a$  la ganancia del amplificador y la variable  $U(s) = \mathcal{L} \{u\}$  una señal de entrada, el cual será la señal de control usado en los algoritmos probados en esta tesis.

Utilizando (B.15) se modifica (B.14) como sigue

$$\frac{Y_r(s)}{V_r(s)} = \frac{K_a K/n}{(R_a + L_a s)(J_m s^2 + B_m s) + K_b K s} \quad (\text{B.16})$$

Entonces, (B.16) se puede reescribir de la siguiente forma

$$\frac{Y_r(s)}{V_r(s)} = \frac{K_a K/n}{R_a(1 + \frac{L_a}{R_a} s)(J_m s^2 + B_m s) + K_b K s} \quad (\text{B.17})$$

Ya que los servomotores que se usan en las plataformas son pequeños no se considera la dinámica eléctrica de éstos. Entonces se supone que su inductancia  $L_a$  es

## APÉNDICE B. MODELO MATEMÁTICO DE UN SERVOMOTOR Y SU AMPLIFICADOR DE POTENCIA

mucho menor que su resistencia  $R_a$  y consecuentemente  $L_a/R_a$  es aproximadamente cero. Esta consideración permite escribir (B.17) de la siguiente forma

$$\frac{Y_r(s)}{V_r(s)} = \frac{\frac{K_a K}{n R_a}}{J_m s^2 + (B_m + \frac{K_b K}{R_a})s} \quad (\text{B.18})$$

Simplificando la función de transferencia (B.18) permite obtener el modelo

$$G(s) = \frac{Y_r(s)}{V_r(s)} = \frac{b}{s(s+a)} \quad (\text{B.19})$$

donde

$$a = \frac{B_m + \frac{K_b K}{R_a}}{J_m} \quad (\text{B.20})$$

$$b = \frac{K_a K}{n R_a J_m} \quad (\text{B.21})$$

El modelo (B.18) expresado mediante una ecuación diferencial es

$$\ddot{y} = -a\dot{y} + bu \quad (\text{B.22})$$

Los modelos (B.19) y (B.22) son los que se utilizan en este trabajo.

# **Apéndice C**

## **Esquemático de la plataforma**

### **PEE-V2**

En la Fig. C.1 se muestra el esquemático de conexión de la plataforma PEE-V2

# APÉNDICE C. ESQUEMÁTICO DE LA PLATAFORMA PEE-V2

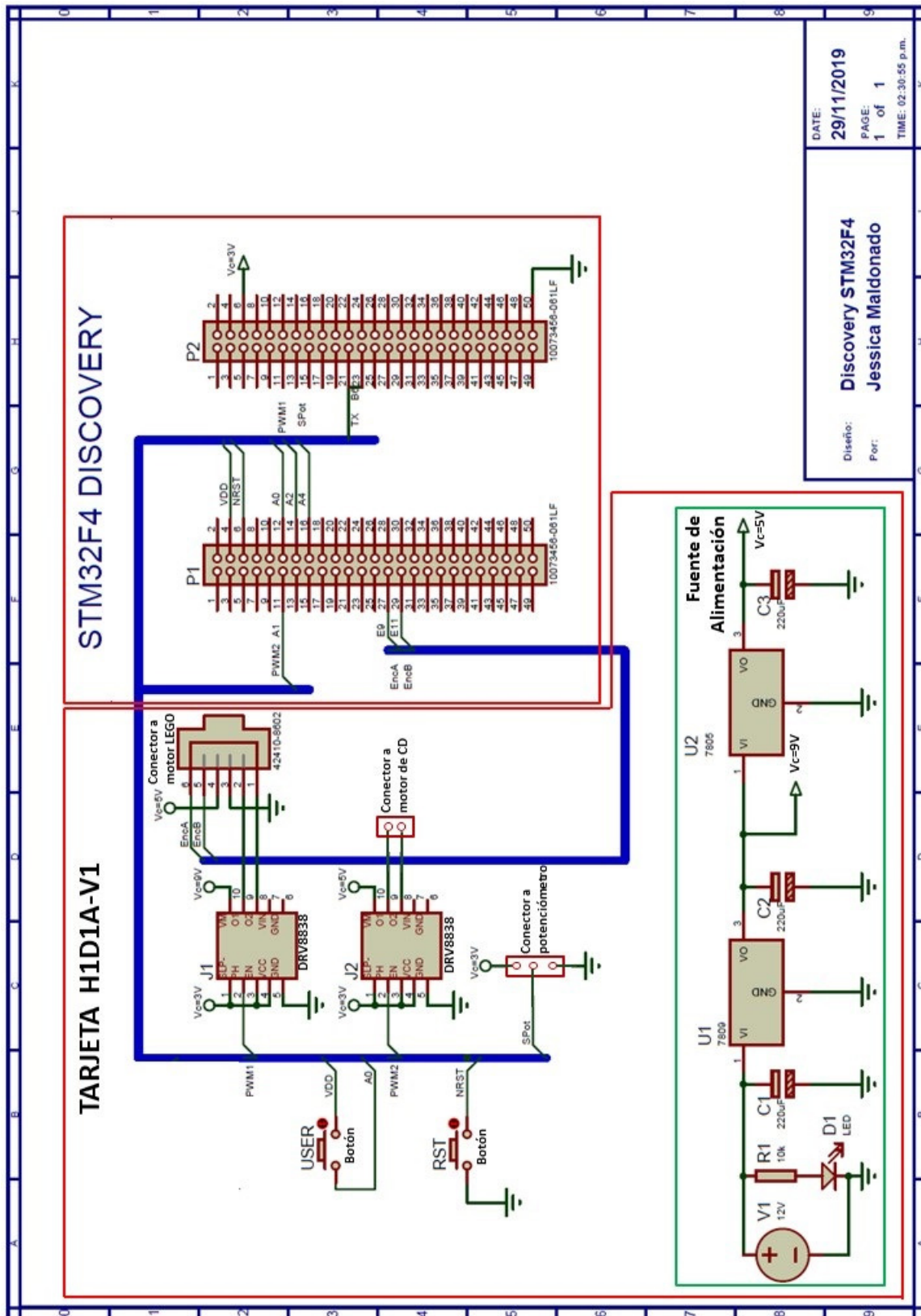


Figura C.1: Esquema de conexión para la plataforma PEE-V2

# Bibliografía

- [1] J. Olga L, “Estudio comparativo de servomotores de CD orientado a la construcción de prototipos educativos de bajo costo para la enseñanza del Control Automático,” Ph.D. dissertation, Departamento de Control Automático, CINVESTAV, Agosto 2019.
- [2] P. de las Naciones Unidas para el Desarrollo., “Informe sobre desarrollo humano 2019,” <http://report.hdr.undp.org/es/>, 2019, acceso: Agosto-2020.
- [3] O. de las Naciones Unidas para la Educación la Ciencia y la Cultura., “Revisión regional 2015 de la educación para todos,” <http://unesdoc.unesco.org/images/0023/002327/232701s.pdf>, 2015, acceso: November-2018.
- [4] E. Economista, “México cuenta con 123.5 millones de habitantes,” <https://www.economista.com.mx/politica/Mexico-cuenta-con-123.5-millones-de-habitantes-20170710-0116.html>, 2017, acceso: March-2018.
- [5] O. para la Cooperación y el Desarrollo Económicos, “Panorama de la edu-

## BIBLIOGRAFÍA

- cación: Indicadores de la ocde,” <http://www.oecd.org/education/skills-beyond-school/EAG2017CN-Mexico-Spanish.pdf>, 2017, acceso: March-2018.
- [6] E. M. P. Armendariz, “Hacia la inclusión de la equidad de género en la política de ciencia y tecnología en México,” *Investigación y Ciencia*, vol. 18, no. 46, pp. 43–56, 2010.
- [7] SEP, “¿qué es niñas stem pueden?” 2018, accessed at <https://www.gob.mx/sep/articulos/que-es-ninas-stem-pueden>.
- [8] D. O. de la Federación México, “Ley de ciencia y tecnología y ley orgánica de ciencia y tecnología: Diario oficial de la federación 06-11-2020,” 2020.
- [9] C. OCDE, CEPAL, *Perspectivas económicas de América Latina 2017: Juventud, competencias y emprendimiento*. OECD Publishing, 2016.
- [10] A. Granados, “Creció un 58% la matrícula en universidades tecnológicas y politécnicas,” 2018, acceso por <https://www.24-horas.mx/2018/01/02/crecio-58-la-matricula-en-universidades-tecnologicas-politecnicas/>.
- [11] M. Bravo, “Matrícula universitaria se duplicó en 20 años; pocos se titulan,” 2019, acceso por <https://www.publimetro.com.mx/mx/nacional/2019/08/19/matricula-universitaria-se-duplico-20-anos-se-titulan.html>.
- [12] R. Jeyasenthil, S. Choi, H. Purohit, and D. Jung, “Robust position control and disturbance rejection of an industrial plant emulator system using the feedforward-feedback control,” *Mechatronics*, vol. 57, pp. 29–38, 2019.

## BIBLIOGRAFÍA

- [13] O. M. de la Salud, “Brote de enfermedad por coronavirus (covid-19),” <https://www.who.int/es/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019>, 2020, acceso: Agosto-2020.
- [14] J. P. M. y otros, *Holistic Learning and spirituality in Education*. State University of New York Press, 2005.
- [15] R. Huang and J. M. y. o. Spector, *Reshaping learning: frontiers of learning technology in a global context*. Springer, 2012.
- [16] J. P. Miller, *The Holistic Curriculum. Second Edition*. OISE Press, 2007.
- [17] N. Michel, J. J. Cater III, and O. Varela, “Active versus passive teaching styles: An empirical study of student learning outcomes,” *Human resource development quarterly*, vol. 20, no. 4, pp. 397–418, 2009.
- [18] L. Deslauriers, L. S. McCarty, K. Miller, K. Callaghan, and G. Kestin, “Measuring actual learning versus feeling of learning in response to being actively engaged in the classroom,” *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 116, no. 39, pp. 19 251–19 257, 2019.
- [19] S. Freeman, S. L. Eddy, M. McDonough, M. K. Smith, N. Okoroafor, H. Jordt, and M. P. Wenderoth, “Active learning increases student performance in science, engineering, and mathematics,” *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 111, no. 23, pp. 8410–8415, 2014.
- [20] B. S. Bloom, “Taxonomy of educational objectives: The classification of educational goals,” *Cognitive domain*, 1956.



## BIBLIOGRAFÍA

- [21] L. W. Anderson, B. S. Bloom *et al.*, *A taxonomy for learning, teaching, and assessing: A revision of Bloom's taxonomy of educational objectives*. Longman,, 2001.
- [22] R. Heradio, L. de la Torre *et al.*, "Virtual and remote labs in education: A bibliometric analysis," *Computers and Education*, vol. 98, pp. 14–38, 2016.
- [23] F. Candelas and J. S. Moreno, "Recursos didácticos basados en internet para el apoyo a la enseñanza de materias del área de ingeniería de sistemas y automática," *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, vol. 2, pp. 93–101, 2005.
- [24] G. Goodwin, "Virtual laboratories for control system design," <http://csd.newcastle.edu.au/>, 2009, acceso: November-2018.
- [25] J. Albino, C. Lorenzo *et al.*, "Controlweb: Una herramienta para el análisis y simulación de sistemas de control en internet," *XXIV Jornadas de Automática*, 2003.
- [26] R. Pastor, J. Sanchez *et al.*, "Xml-based framework for the development of web-based laboratories focused on control systems education," *International Journal of Electrical Engineering Education*, vol. 19, pp. 445–454, 2003.
- [27] V. Petridis, S. Kazarlis *et al.*, "Aces: An interactive software platform for self-instruction and self-evaluation in automatic control systems," *IEEE Transactions on education*, vol. 46, pp. 101–110, 2003.

## BIBLIOGRAFÍA

- [28] A. Gilat, *MATLAB: An Introduction with Applications 4th Edition*. John Wiley & Sons, 2011.
- [29] P. Menghal and C.S.Kurdarihal, “Mathematical modeling & simulation of dc servomechanism using matlab/simulink and their integration into undergraduate control engineering courses,” *NCEEERE 2008*, 2008.
- [30] J. L. Guzman, S. Dormido *et al.*, “Interactivity in education: An experience in the automatic control field,” *Wiley Periodicals*, 2010.
- [31] M. Z. and Z. K., “Using scilab for building of virtual lab,” *2010 9th International Conference on Information Technology Based Higher Education and Training (ITHET)*, pp. 280–283, 2010.
- [32] T. Jeffrey, *LabVIEW for everyone : graphical programming made easy and fun*. Prentice Hall, 2006.
- [33] J. Keller, “Teaching pid and fuzzy controllers with labview,” *International Journal of Engineering Education*, vol. 16, 2000.
- [34] M. Casini, D. Prattichizzo, and A. Vicino, “The automatic control telelab: A user-friendly interface for distance learning,” *IEEE Transactions on Education*, vol. 46, pp. 252–257, 2003.
- [35] R. Pastor, C. Martín *et al.*, “Development of an xml-based lab for remote control experiments on a servo motor,” *International Journal of Electrical Engineering Education*, vol. 42, 2005.

## BIBLIOGRAFÍA

- [36] A. Leva and F. Donida, “Multifunctional remote laboratory for education in automatic control: The crautolab experience,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 55, pp. 2376–2385, 2008.
- [37] I. Santana, M. Ferre *et al.*, “Remote laboratories for education and research purposes in automatic control systems,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 9, pp. 547–556, 2013.
- [38] M. Kaluz, J. Garcia-Zubia *et al.*, “A flexible and configurable architecture for automatic control remote laboratories,” *IEEE Transactions on Learning Technologies*, vol. 8, pp. 299–310, 2015.
- [39] N. D. Jović and M. S. Matijević, “Lego web laboratory at university of kragujevac,” *2017 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)*, 2017.
- [40] J. Apkarian and K. Astrom, “A laptop servo for control education,” *IEEE control systems*, vol. 24, pp. 70–73, 2004.
- [41] D. S. Bernstein, “The quanser dc motor control trainer,” *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 3, pp. 90–93, 2005.
- [42] R. Molengraft, M. Steinbuch *et al.*, “Integrating experimentation into control courses: Hands-on experiments provide a stimulating educational environment,” *IEEE Control Systems Magazine*, 2005.
- [43] R. Beloiu, “Hands-on solutions for teaching basic introductory control system course,” *The 9th International Symposium on Advance Topics in Electrical Engineering*, 2015.

## BIBLIOGRAFÍA

- [44] R. M. Reck and R. S. Sreenivas, “Developing an affordable and portable control systems laboratory kit with a raspberry pi,” *Proceedings of the 2015 American Control Conference (ACC)*, pp. 2801–2806, 2016.
- [45] A. Soriano, L. Marin *et al.*, “Low cost platform for automatic control education based on open hardware.” *Proceedings of the 19th World Congress. The International Federation of Automatic Control*, pp. 9044–9050, 2014.
- [46] H. RCD, “Hs-485hb deluxe hd ball bearing standard servo,” <https://hitecrd.com/products/servos/sport-servos/analog-sport-servos/hs-485hb/product>, 2015, acceso: November-2018.
- [47] T. Instruments, “Lm675 power operational amplifier,” *component datasheet*) <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm675.pdf>, 2013.
- [48] I. MathWorks, *MATLAB: The Language of Technical Computing. Using MATLAB*. MathWorks, 2000, vol. 3.
- [49] Quanser, “Quanser. inovate. educate,” <https://www.quanser.com>, 2020, acceso: Agosto-2020.
- [50] STMicroelectronics, *UM1472 User manual*, 2017.
- [51] T. Instruments, *DRV883x Low-Voltage H-Bridge Driver*, 2016.
- [52] A. Hmidet and O. Hasnaoui, “Waijung blockset-stm32f4 environment for real time induction motor speed control,” in *2018 IEEE 5th International Congress on Information Science and Technology (CiSt)*. IEEE, 2018, pp. 600–605.

## BIBLIOGRAFÍA

- [53] A. F. Caballero, M. D. B. Rojas, and L. E. M. Lorente, “Sistema avanzado de prototipado rápido para control en exoesqueletos y dispositivos mecatrónicos,” *University Carlos III of Madrid*, 2014.
- [54] STMicroelectronics, “Stm32 st-link utility,” <https://www.st.com/en/development-tools/stsw-link004.html>, 2016, acceso: Agosto-2019.
- [55] A. O’dwyer, *Handbook of PI and PID controller tuning rules*. World Scientific, 2009.
- [56] R. Vilanova and A. Visioli, *PID control in the third millennium*. Springer, 2012.
- [57] A. Visioli, *Practical PID control*. Springer Science & Business Media, 2006.
- [58] K. Astrom and T. Hagglund, *PID Controllers*. Instrument Society of America, 1995.
- [59] K. H. Ang, G. Chong, and Y. Li, “Pid control system analysis, design and technology,” *IEEE Transactions on control systems technology*, pp. 559–576, 2005.
- [60] K. Astrom and T. Hagglund, *PID Controllers: Theory, Design and Tuning*. Instrument Society of America, 1995.
- [61] J. Aldrich, “Doing least squares: perspectives from gauss and yule,” *International Statistical Review / Revue Internationale de Statistique*, pp. 61–81, 1998.
- [62] S. Sastry and M. Bodson, *Adaptive control: stability, convergence and robustness*. Prentice Hall, 1989.

## BIBLIOGRAFÍA

- [63] R. Isermann and M. Münchhof, *Identification of Dynamic Systems: An Introduction with Applications*, ser. Advanced Textbooks in Control and Signal Processing Series. Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- [64] O. Nelles, *Nonlinear System Identification: From Classical Approaches to Neural Networks, Fuzzy Models, and Gaussian Processes*. Springer Nature, 2020.
- [65] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, 5th ed. Prentice Hall, 2010.
- [66] R. E. Kalman, “On the general theory of control systems,” in *Proceedings First International Conference on Automatic Control, Moscow, USSR*, 1960, pp. 481–492.
- [67] H. K. Khalil, *Nonlinear Systems*, 3rd ed. Prentice Hall, 2002.
- [68] B. C. Kuo, *Automatic control systems*. Prentice Hall PTR, 1987.
- [69] Z. Gao, “On the centrality of disturbance rejection in automatic control,” *ISA transactions*, vol. 53, no. 4, pp. 850–857, 2014.
- [70] J. Han, “From pid to active disturbance rejection control,” *IEEE transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 3, pp. 900–906, 2009.
- [71] R. Garrido and L. Luna, “Robust ultra-precision motion control of linear ultrasonic motors: A combined adrc-luenberger observer approach,” *Control Engineering Practice*, vol. 111, p. 104812, 2021.
- [72] K. Ohishi, K. Ohnishi, and K. Miyachi, “Adaptive dc servo drive control taking

## BIBLIOGRAFÍA

- force disturbance suppression into account,” *IEEE transactions on industry applications*, vol. 24, no. 1, pp. 171–176, 1988.
- [73] K. Ohnishi, M. Shibata, and T. Murakami, “Motion control for advanced mechatronics,” *IEEE/ASME transactions on mechatronics*, vol. 1, no. 1, pp. 56–67, 1996.
- [74] Y. Shtessel, C. Edwards, L. Fridman, and A. Levant, *Sliding mode control and observation*. Springer, 2014, vol. 10.
- [75] A. Levant, “Higher-order sliding modes, differentiation and output-feedback control,” *International journal of Control*, vol. 76, no. 9-10, pp. 924–941, 2003.
- [76] X. Yan, M. Primot, and F. Plestan, “Comparison of differentiation schemes for the velocity and acceleration estimations of a pneumatic system,” *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 47, no. 3, pp. 49–54, 2014.