

PAPER NAME

Un_Enfoque _para _la_Educacion_en_Ingenieria.pdf

WORD COUNT

19373

RESULTS COUNT

128

SUBMISSION DATE

30 Nov 2025, 9:58:06 pm GMT-5

REPORT DATE

30 Nov 2025, 9:59:54 pm GMT-5

RESOLVED SOURCES

0**10%**

The combined total of all matches, including overlapping sources, for each database.

Results

The results include any sources we have found in your submitted document that includes the following: identical text and slightly changed text.

- 1. docplayer.es**
<https://docplayer.es/54790920-Diseno-del-sistema-de-instrumentacion-y-control-para-una-bancada-de-transferencia-de-muestras-de-cr>  1% Henry-alberto-salamanca-g
- 2. docplayer.es**
<https://docplayer.es/54790920-Diseno-del-sistema-de-instrumentacion-y-control-para-una-bancada-de-transferencia-de-muestras-de-cr>  <1% Henry-alberto-salamanca-g
- 3. edoc.pub**
<https://edoc.pub/control-digital-teoria-y-practica-2ed-luis-eduardo-garcia-jaimes-pdf-free.html>  <1%
- 4. docplayer.es**
<https://docplayer.es/54790920-Diseno-del-sistema-de-instrumentacion-y-control-para-una-bancada-de-transferencia-de-muestras-de-cr>  <1% Henry-alberto-salamanca-g
- 5. docplayer.es**
<https://docplayer.es/54790920-Diseno-del-sistema-de-instrumentacion-y-control-para-una-bancada-de-transferencia-de-muestras-de-cr>  <1% Henry-alberto-salamanca-g
- 6. www.coursehero.com**
<https://www.coursehero.com/file/91130112/Laboratorio-05pdf/>  <1%
- 7. s41793816e9018bf6.jimcontent.com**
<https://s41793816e9018bf6.jimcontent.com/download/version/1549900083/module/6735161818/name/SISTEMAS%20DE%20CONTROL>  <1%
- 8. www.buenastareas.com**
<https://www.buenastareas.com/ensayos/Abba/5399578.html>  <1%
- 9. espacio.digital.upel.edu.ve**
<http://espacio.digital.upel.edu.ve/index.php/TD/article/download/2175/2064/6725>  <1%
- 10. s41793816e9018bf6.jimcontent.com**
<https://s41793816e9018bf6.jimcontent.com/download/version/1549900083/module/6735161818/name/SISTEMAS%20DE%20CONTROL>  <1%
- 11. es.wikipedia.org**
https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_de_control  <1%

12. repositorio.umsa.bo

<https://repositorio.umsa.bo/bitstream/handle/123456789/31531/PG-8388.pdf?isAllowed=y&sequence=1>

<1%

13. docplayer.es

<https://docplayer.es/54790920-Diseno-del-sistema-de-instrumentacion-y-control-para-una-bancada-de-transferencia-de-muestras-de-cr>

<1%

henry-alberto-salamanca-g

14. docplayer.es

<https://docplayer.es/54790920-Diseno-del-sistema-de-instrumentacion-y-control-para-una-bancada-de-transferencia-de-muestras-de-cr>

<1%

henry-alberto-salamanca-g

15. docplayer.es

<https://docplayer.es/54790920-Diseno-del-sistema-de-instrumentacion-y-control-para-una-bancada-de-transferencia-de-muestras-de-cr>

<1%

henry-alberto-salamanca-g

16. www.coursehero.com

<https://www.coursehero.com/file/202508185/12-Sistemas-de-controlpt/>

<1%

17. www.slideshare.net

<https://www.slideshare.net/jorgemunozv/accionamiento-electrico-parte-i>

<1%

18. bib.minjusticia.gov.co

<http://bib.minjusticia.gov.co/jurisprudencia/CorteConstitucional/2000/Tutela/T-114-00.htm>

<1%

19. es.strephonsays.com

<https://es.strephonsays.com/encoder-and-vs-decoder-13572>

<1%

20. www.coursehero.com

<https://www.coursehero.com/file/226993109/Practica-4pdf/>

<1%

21. www.coursehero.com

<https://www.coursehero.com/file/59145654/42144pdf/>

<1%

22. repositorio.espe.edu.ec

<http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/4627/1/T-ESPEL-0810.pdf>

<1%

23. repositorio.ug.edu.ec

<http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/63986/1/B-CINT-PTG-N.%20841%20Alvarado%20Tutiven%20Jamileth%20Roc%c3%ado%20Fajardo%20Pi%20>

<1%

620%20Fajardo%20Pi%20

24. docplayer.es

<https://docplayer.es/54790920-Diseno-del-sistema-de-instrumentacion-y-control-para-una-bancada-de-transferencia-de-muestras-de-cr>

<1%

henry-alberto-salamanca-g

25. docplayer.es

<https://docplayer.es/54790920-Diseno-del-sistema-de-instrumentacion-y-control-para-una-bancada-de-transferencia-de-muestras-de-cr>

<1%

henry-alberto-salamanca-g

26. docplayer.es

<https://docplayer.es/54790920-Diseno-del-sistema-de-instrumentacion-y-control-para-una-bancada-de-transferencia-de-muestras-de-cr>

<1%

henry-alberto-salamanca-g

27. docplayer.es

<https://docplayer.es/54790920-Diseno-del-sistema-de-instrumentacion-y-control-para-una-bancada-de-transferencia-de-muestras-de-cr>

<1%

henry-alberto-salamanca-g

28. docplayer.es

<https://docplayer.es/54790920-Diseno-del-sistema-de-instrumentacion-y-control-para-una-bancada-de-transferencia-de-muestras-de-cr>

<1%

henry-alberto-salamanca-g

29. edoc.pub

<https://edoc.pub/control-digital-teoria-y-practica-2ed-luis-eduardo-garcia-jaimes-pdf-free.html>

<1%

30. edoc.pub

<https://edoc.pub/control-digital-teoria-y-practica-2ed-luis-eduardo-garcia-jaimes-pdf-free.html>

<1%

31. hdl.handle.net

<https://hdl.handle.net/20.500.12759/1935>

<1%

32. repositorioinstitucional.buap.mx

<https://repositorioinstitucional.buap.mx/bitstream/handle/20.500.12371/5079/848219TL.pdf?isAllowed=y&sequence=1>

<1%

33. www.scribd.com

<https://www.scribd.com/doc/307439975/Electronica-de-Potencia-Convertidores-y-Aplicaciones-de-Diseno-3ra-Edition-Ned-Mohan-pdf>

<1%

34. www.researchgate.net

https://www.researchgate.net/publication/339015117_Control_de_un_motor_de_corriente_continua_de_900_hp

<1%

35. patents.google.com

<https://patents.google.com/patent/ES2321031T3/es>

<1%

36. worldwidescience.org

<https://worldwidescience.org/topicpages/e/extrínscico+utilizando+laser.html>

<1%

37. bib.minjusticia.gov.co

<http://bib.minjusticia.gov.co/jurisprudencia/CorteConstitucional/2000/Tutela/T-114-00.htm>

<1%

38. sedici.unlp.edu.ar

<http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/63019>

<1%

39. documents.mx

<http://documents.mx/documents/control-digital-de-proceso.html>

<1%

40. nchp.epf.fr

http://nchp.epf.fr/article.php3?id_article=179

<1%

41. 1library.co

<https://1library.co/document/oz1voevz-diseno-implementacion-controlador-movimiento-servo-sistema.html>

<1%

42. burjcdigital.urjc.es

<https://burjcdigital.urjc.es/bitstream/handle/10115/37718/2023-24-ETSII-A-2028-2028036-i.casas.2018-MEMORIA.pdf?isAllowed=y&sec>

<1%

43. www.lincolninst.edu

<https://www.lincolninst.edu/about-lincoln-institute/departments-programs/program-latin-america-caribbean>

<1%

44. www.keb.at

<http://www.keb.at/es/productos/tecnologia-servo.html>

<1%

45. bibdigital.epn.edu.ec

<https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/23234/1/CD%2012647.pdf>

<1%

46. repositoryusco.co

<https://repositoryusco.co/bitstream/123456789/921/1/TH%20IE%2000173.pdf>

<1%

47. www.cigre.org.mx

<http://www.cigre.org.mx/uploads/media/36-01.PDF>

<1%

48. docplayer.es

<https://docplayer.es/54790920-Diseno-del-sistema-de-instrumentacion-y-control-para-una-bancada-de-transferencia-de-muestras-de-cr>

<1%

henry-alberto-salamanca-g

49. docplayer.es

<https://docplayer.es/54790920-Diseno-del-sistema-de-instrumentacion-y-control-para-una-bancada-de-transferencia-de-muestras-de-cr>

<1%

henry-alberto-salamanca-g

50. www.coursehero.com

<https://www.coursehero.com/es/file/209292164/Proyecto-Integrador-EQ3docx/>

<1%

51. www.coursehero.com

<https://www.coursehero.com/es/file/196380590/scribfulcom-sistemas-hidraulicospdf/>

<1%

52. www.coursehero.com

<https://www.coursehero.com/file/44908772/Formato-Conceptualizaci%C3%B3npdf/>

<1%

53. www.coursehero.com

<https://www.coursehero.com/es/file/203681763/TRABAJO-DE-INVESTIGACI%C3%93N-DE-GOYOpdf/>

<1%

54. edoc.pub

<https://edoc.pub/control-digital-teoria-y-practica-2ed-luis-eduardo-garcia-jaimes-pdf-free.html>

<1%

55. edoc.pub

<https://edoc.pub/control-digital-teoria-y-practica-2ed-luis-eduardo-garcia-jaimes-pdf-free.html>

<1%

56. edoc.pub

<https://edoc.pub/control-digital-teoria-y-practica-2ed-luis-eduardo-garcia-jaimes-pdf-free.html>

<1%

57. edoc.pub

<https://edoc.pub/control-digital-teoria-y-practica-2ed-luis-eduardo-garcia-jaimes-pdf-free.html>

<1%

58. hdl.handle.net

<https://hdl.handle.net/20.500.12867/2790>

<1%

59. hdl.handle.net

<http://hdl.handle.net/10016/26973>

<1%

60. hdl.handle.net

<http://hdl.handle.net/10251/174861>

<1%

61. www.slideshare.net

<https://www.slideshare.net/jessyag9/matlab-48125391>

<1%

62. www.slideshare.net

<https://www.slideshare.net/delialopez1/estadistica-terminado>

<1%

63. repositorioinstitucional.buap.mx

<https://repositorioinstitucional.buap.mx/bitstream/handle/20.500.12371/5079/848219TL.pdf?isAllowed=y&sequence=1>

<1%

64. www.scribd.com

<https://www.scribd.com/doc/279521452/Analisis-de-Circuitos-en-Ingenieria-8va-edicion-espanol>

<1%

65. scielo.sld.cu

<http://scielo.sld.cu/pdf/rcta/v28n4/2071-0054-rcta-28-04-e04.pdf>

<1%

66. scielo.sld.cu

<http://scielo.sld.cu/pdf/rcta/v28n4/2071-0054-rcta-28-04-e04.pdf>

<1%

67. scielo.sld.cu

<http://scielo.sld.cu/pdf/eac/v39n3/1815-5928-eac-39-03-31.pdf>

<1%

68. www.researchgate.net

https://www.researchgate.net/publication/339015117_Control_de_un_motor_de_corriente_continua_de_900_hp

<1%

69. www.researchgate.net

https://www.researchgate.net/publication/270589487_Diseno_e_implementacion_de_un_controlador_difuso_que_interviene_la_inyeccion_de_combustible_en_un_vehiculo

<1%

70. idoc.pub

<https://idoc.pub/documents/ogata-sistemas-de-control-en-tiempo-discreto-katsuhiko-ogata2-mwl18z99114j>

<1%

71. idoc.pub

<https://idoc.pub/documents/ogata-sistemas-de-control-en-tiempo-discreto-katsuhiko-ogata2-mwl18z99114j>

<1%

72. repositorio.utc.edu.ec

<https://repositorio.utc.edu.ec/server/api/core/bitstreams/b9c45d18-f2ef-4976-9b30-bc9fdf62d2a6/content>

<1%

73. docero.tips

<https://docero.tips/doc/guia-cuaderno-de-trabajo-ingles-vi-2019-kp2jz7q45x>

<1%

74. issuu.com

https://issuu.com/verbascripta/docs/actas_cinaic_2015-405-821

<1%

75. ebuah.uah.es

https://ebuah.uah.es/dspace/bitstream/handle/10017/62631/TFM_Perez_Rios_2024.pdf?isAllowed=y&sequence=1

<1%

76.

www.tdx.cat:10803/130014

<1%

77. es.slideshare.net

<https://es.slideshare.net/Proyectos2013/proyecto-medio-ambiente-28915214>

<1%

78. fr.slideshare.net

<https://fr.slideshare.net/davinson1/unidad-4-control2-25142028>

<1%

79. repository.usta.edu.co

<https://repository.usta.edu.co/handle/11634/400>

<1%

80. rinacional.tecnm.mx

https://rinacional.tecnm.mx/bitstream/TecNM/3166/1/G11071246_donacion_tesis_bib.pdf

<1%

81. rusiahoy.com

http://rusiahoy.com/cultura/2013/01/20/nueva_ley_de_educacion_preservando_el_status_quo_24063.html

<1%

82. upc.aws.openrepository.com

<https://upc.aws.openrepository.com/handle/10757/659908?locale-attribute=es>

<1%

83. doczz.es

<https://doczz.es/doc/132413/revista-polit%C3%A9cnica-19---polit%C3%A9cnico-colombiano-jaim...>

<1%

84. prezi.com

<https://prezi.com/kc3gsqmrgd3j/ingenieria-de-control/>

<1%

85. www.mineco.gob.gt

https://www.mineco.gob.gt/sites/default/files/informacion%20publica/pep_bid_2094_informe_enero_2017.pdf

<1%

86. docplayer.es

<https://docplayer.es/54790920-Disen%C3%B3-del-sistema-de-instrumentaci%C3%B3n-y-control-para-una-bancada-de-transferencia-de-muestras-de-cr...>

<1%

henry-alberto-salamanca-g...

87. www.coursehero.com

<https://www.coursehero.com/file/49310113/lab3modeldocx/>

<1%

88. www.coursehero.com

<https://www.coursehero.com/file/42268184/Pr%C3%A1ctica-2pdf/>

<1%

89. www.coursehero.com

<https://www.coursehero.com/es/file/206412868/TAREA-PROCESOS/>

<1%

90. www.coursehero.com

<https://www.coursehero.com/file/242243465/Actividad-2-Organizaci%C3%B3n-y-funcionamiento-de-la-Junta-Local-de-Conciliaci%C3%B3n.pdf>

<1%

91. www.coursehero.com

<https://www.coursehero.com/file/62127041/Labo-7-Control-Proporcional-Integraldocxpdf/>

<1%

92. www.coursehero.com

<https://www.coursehero.com/file/155095070/Factores-nacionalespdf/>

<1%

93. www.coursehero.com

<https://www.coursehero.com/es/file/220352830/PROYECTO-FINAL-CONTABILIDAD-GENERAL-pdf/>

<1%

94. www.coursehero.com

<https://www.coursehero.com/file/198642238/CID-CID-ERICKSON-JHOAN-La-Comunicacion-y-La-Tecnologiapdf/>

<1%

95. edoc.pub

<https://edoc.pub/control-digital-teoria-y-practica-2ed-luis-eduardo-garcia-jaimes-pdf-free.html>

<1%

96. hdl.handle.net

<https://hdl.handle.net/20.500.12867/2790>

<1%

97. hdl.handle.net

<http://hdl.handle.net/10784/4478>

<1%

98. hdl.handle.net

<http://hdl.handle.net/10016/21590>

<1%

99. www.slideshare.net

http://www.slideshare.net/ptah_enki/sistemas-de-control

<1%

100. repositorioinstitucional.buap.mx

<https://repositorioinstitucional.buap.mx/bitstream/handle/20.500.12371/5079/848219TL.pdf?isAllowed=y&sequence=1>

<1%

101. www.scribd.com

<https://www.scribd.com/doc/37267444/Tutorial-Control-PI>

<1%

102. patents.google.com

<https://patents.google.com/patent/ES2289206T3/en>

<1%

103. worldwidescience.org

<https://worldwidescience.org/topicpages/e/extrínscico+utilizando+laser.html>

<1%

104. es.scribd.com

<https://es.scribd.com/document/406061152/memorias-amdm2018-2-pdf>

<1%

105. es.scribd.com

<https://es.scribd.com/document/396762740/Fuego-Sobre-Armas-y-Municiones>

<1%

106. repositorio.unal.edu.co

<https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/77856/1.015.433.187.2020.pdf?isAllowed=y&sequence=1>

<1%

107. repositorio.uta.edu.ec

<https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/36923/1/852%20MKT.pdf>

<1%

108. sedici.unlp.edu.ar

<http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/63019>

<1%

109. biblioteca.usac.edu.gt

http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/02/02_5594.pdf

<1%

110. repositorio.ucundinamarca.edu.co

<https://repositorio.ucundinamarca.edu.co/bitstream/handle/20.500.12558/2381/DISE%c3%91O%20DE%20UN%20SOFTWARE%20DE>

<1%

%20COMPUTACIONAL...

111. rte.espol.edu.ec

<http://rte.espol.edu.ec/index.php/tecnologica/article/download/704/490>

<1%

112. www.ab.com

<http://www.ab.com/plclogic/clogix/es/clogixsw.html>

<1%

113. www.icimaf.cu

<http://www.icimaf.cu/producto/?id=5>

<1%

114. bdigital.unal.edu.co

<http://bdigital.unal.edu.co/19215/2/>

<1%

115. fido.palermo.edu

https://fido.palermo.edu/servicios_dyc/publicacionesdc/archivos/831_libro.pdf

<1%

116. repositori.tecnocampus.cat	<1%
117. repositorio.uns.edu.pe	<1%
118. www.ifpri.org	<1%
119. www.coursehero.com	<1%
120. www.coursehero.com	<1% GONZ
121. www.coursehero.com	<1%
122. www.coursehero.com	<1%
123. hdl.handle.net	<1%
124. spanish.longdom.org	<1%
125. www.fig.net	<1%
126. www.coursehero.com	<1%
127. repositorio.unal.edu.co	<1%
128. repositorio.uta.edu.ec	<1%

Scanned Text

Implementación de Sistemas Dinámicos mediante Simulación HIL con la Tarjeta LaunchPad C2000: Un Enfoque para la Educación en Ingeniería Laura Sofia Polania Mendez 20211197481 Cesar Diego Vargas Motta 20202191503 Trabajo De Grado Para Optar por el Título De Ingeniero Electrónico Director: Dr. Fernand Diaz Franco Línea de propuesta: Simulación Universidad Surcolombiana Facultad de Ingeniería, Programa de Ingeniería Electrónica Neiva, Colombia 2025 1 CONTENIDO 1. Planteamiento del Problema, Objetivos y Fundamentos Teóricos..... 3 1.1

Introducción.....	3 1.2
Antecedentes.....	3 1.3 Formulación ⁽⁹³⁾ del problema y justific ⁽⁹⁴⁾ ación
general.....	6 1.4 Objetivos..... ⁽⁷¹⁾
.....	6 1.4.1 Objetivo
Sistemas d ⁽⁷¹⁾ e control.....	6 1.4.2 Objetivos específicos
control.....	6 1.5 Fundamentación Teórica.....
1.5.1.3 Estrateg ⁽⁴⁸⁾ as de control: Controladores PI y PID.....	7 1.5.1.1 Tipos ⁽⁷¹⁾ as de sistema.....
.....	7 1.5.1.2 Clasificación ⁽⁴⁸⁾ de los sistemas de control según su implementación
1.5.4 MATLAB/Simulink y Diseño Basado en Modelos (Model-Based Design).....	9 1.5.2 Simulación HIL
Dinámicos.....	9 1.5.3 Plataforma LaunchPad C2000 F28379D
Implementación en Sistemas Dinámicos.....	11 2. Metodología de la Plataforma HIL para Sistemas
2.2.2 CASO 2: Posición de un Motor DC con Control.....	13 2.1 Fase General: Desarrollo de la plataforma HIL.....
Control.....	13 2.2 Fase Específica: Implementación en Sistemas Dinámicos.....
.....	17 2.2.1 CASO 1: Posición de un Motor DC en Lazo Cerrado sin Control.....
.....	25 2.2.3 CASO 3: Velocidad de un Motor DC con
.....	29 2.2.4. CASO 4: Sistema de Control de Presión en la Transferencia de Crudo
HIL, Resultados, Conclusiones y Trabajos Futuros	35 3 Evaluación del Sistema
3.1.1 Diseño de la experiencia educativa	47 3.1 Evaluación del Sistema HIL en un Entorno Educativo.....
.....	47 3.1.1 Estructura de la guía de laboratorio
.....	47 3.1.3 Metodología de aplicación.....
3.2 Resultados gene ⁽⁸⁵⁾ rales del proyecto.....	49 3.1.5 Análisis y disc ⁽⁸⁵⁾ usión de resultados..... ⁽⁸⁵⁾
Conclusiones.....	50
Recomendaciones.....	51 3.3
futuros.....	52 3.5 Trabajos

52 2.1. Planteamiento del Problema, Objetivos y Fundamentos Teóricos El Capítulo 1 presenta el contexto general del proyecto, abordando el planteamiento del problema, los objetivos y los fundamentos teóricos necesarios para comprender la propuesta de diseño. En esta sección se describen las motivaciones académicas y técnicas que justifican el trabajo, así como los conceptos base relacionados con la verificación de sistemas electrónicos, las metodologías de simulación y el enfoque Hardware-in-the-Loop (HIL). Este capítulo establece las bases sobre las cuales se desarrolla la metodología y las soluciones implementadas en el p ⁽³¹⁾royecto. 1.1 Introducción La formación en ingeniería electrónica requiere estrategias didácticas que conecten sólidamente los conceptos teóricos con experiencias prácticas reales. Una parte esencial de este vínculo es la verificación de sistemas electrónicos y de control mediante metodologías como la simulación por software, las pruebas en lazo cerrado, las pruebas HIL y la validación en tiempo real. Estas metodologías surgieron a partir de la necesidad de asegurar que los sistemas embebidos operen según lo requerido antes de su despliegue en aplicaciones críticas, permitiendo identificar fallos en etapas tempranas y reducir riesgos, costos y tiempos de desarrollo[1] En este sentido, la simulación HIL emerge como una metodología efectiva para promover un aprendizaje activo, ya que permite la integración de modelos virtuales con hardware físico en tiempo real, posibilitando escenarios seguros, repetibles y controlados que reflejen condiciones reales de operación [2]. El concepto HIL ha evolucionado desde simulaciones offline o en ordenador hacia plataformas en tiempo real capaces de emular plantas completas con alta fidelidad, gracias a avances como procesadores deterministas, FPGAs, interfaces rápidas de E/S y buses de comunicación industrial [3][4] Mediante entornos HIL, los estudiantes tienen la oportunidad de observar y analizar el comportamiento dinámico de sistemas bajo diferentes condiciones ⁽⁸⁷⁾de diseño y control. Las reacciones inmediatas a ⁽⁸⁵⁾ntre estrategias de control y los ajustes de parámetros propician una retroalimentación constante, que refuerza no solo la comprensión de los principios fundamentales, sino también habilidades críticas como el pensamiento analítico, la resolución de problemas, la toma de decisiones y la adaptación ante perturbaciones inesperadas [5] Ad ⁽⁹⁰⁾emá ⁽⁹⁰⁾, es posible realizar esta simulación en tiempo real, es decir, con el hardware y el modelo interactuando simultáneamente sin latencia significativa, lo que acerca mucho más el laboratorio al entorno profesional[6] Incorporar HIL en la educación contribuye a acortar la brecha entre el laboratorio teórico y el entorno profesional, brindando una experiencia cercana a la ingeniería real. Permite experimentar sin los riesgos, costos o limitaciones logísticas que suele implicar trabajar con plantas reales completas, al mismo tiempo que se cultiva una cultura de validación práctica del conocimiento [7] 1.2 Antecedentes En las últimas décadas, el avance de la educación en ingeniería ha impulsado el desarrollo de nuevas metodologías que integran teoría y práctica mediante herramientas de simulación y experimentación controlada. En este contexto, la técnica HIL se ha consolidado como una metodología eficaz para la enseñanza y validación de sistemas 3 dinámicos, al permitir la interacción directa entre modelos virtuales y hardware físico en tiempo real. Según MathWorks, los entornos HIL posibilitan ejecutar modelos simulados en plataformas de procesamiento rápido que interactúan con controladores reales, facilitando la validación de estrategias de control antes de su implementación en la planta física [3] La simulación HIL tiene su origen en los años noventa, cuando las industrias automotriz y aeroespacial empezaron a usarla para probar unidades de control electrónico sin depender de sistemas físicos, lo que les permitió reducir costos y minimizar riesgos. Con el tiempo, y gracias a que los microcontroladores y las plataformas de simulación se volvieron más accesibles, esta metodología logró abrirse paso hasta el ámbito educativo. [8] fue uno de los pioneros en incorporar la simulación HIL en los cursos de control. Su trabajo partía de un desafío constante en la enseñanza: conectar la teoría con el diseño práctico. Aunque los laboratorios son esenciales, montar modelos a escala que imiten la complejidad industrial suele ser costoso, complejo y a veces hasta peligroso para los estudiantes. Frente a este problema, la simulación HIL se presentó como una alternativa innovadora y económica. Esta técnica crea un entorno donde un controlador industrial real se conecta a un modelo de simulación que se ejecuta en tiempo real. El controlador envía sus señales a la simulación, y esta responde con las señales del proceso, haciendo que el hardware se comporte de manera casi idéntica a un sistema real. Esta aproximación permite a los estudiantes verificar y experimentar de manera completa con los algoritmos de control, lo que, como demostró en[8], no solo incrementa su comprensión de conceptos complejos, sino que también mejora su capacidad para diseñar y analizar sistemas en lazo cerrado. Posteriormente, [9]documentaron diversas experiencias educativas en las que incorporaron la simulación HIL como recurso de apoyo en sus cursos. En estas experiencias, observaron que la integración de HIL no solo aumentaba la motivación de los estudiantes, sino que también fortalecía su comprensión de conceptos clave como la estabilidad y la respuesta dinámica de los sistemas. Este enfoque HIL se ha consolidado como una solución intermedia y pragmática frente a los desafíos logísticos y presupuestarios que suelen presentar los laboratorios de control tradicionales. Si bien la simulación puramente digital es más económica, su uso exclusivo suele llevar a que los estudiantes desarrollen "simulaciones de controladores" en lugar de controladores funcionales, lo que les resta la experiencia crucial de interactuar directamente con el hardware y el software de implementación. Por otro lado, depender de un único equipo físico para grupos numerosos suele ser ineficiente, ya que los estudiantes deben turnarse y esperar largos tiempos para probar sus diseños, ralentizando el proceso de aprendizaje [9]. En el ámbito más específico del uso de microcontroladores para HIL, el uso de tarjetas LaunchPad pertenecientes a la familia C2000 de Texas Instruments ha sido adoptado en conjuntos de desarrollo y kits que facilitan la interfaz entre los controladores reales y los modelos simulados. Por ejemplo, el "Launchpad Development Kit" permite probar algoritmos de control en la plataforma LaunchPad (incluyendo la placa F28379D) en un entorno de simulación HIL con herramientas como Simulink [10]. Un ejemplo aplicado en control electrónico es el uso de HIL en el control de convertidores tipo buck. En la documentación de Matlab/Simulink se describe un ejemplo donde la planta (convertidor) es emulada por hardware (o FPGA) en tiempo real, permitiendo que el 4 controlador real conectado funcione como si estuviese controlando la planta física. Este tipo de ejemplos ilustra la viabilidad técnica de desplegar controladores reales con modelos simulados en bucle cerrado [11]. En cuanto a plataformas educativas de bajo costo que incorporan la filosofía de "simulación + hardware real", un ejemplo notable es PHELP (Pixel Heating Experiment Learning Platform). Se trata de una plataforma de control de temperatura de uniformidad que funciona como un sistema MIMO de alto orden (16x16), utilizando un array de 16 módulos Peltier como elementos de calentamiento y enfriamiento. La realimentación se realiza mediante una cámara térmica infrarroja de bajo costo, que proporciona una visión completa de la distribución de temperatura en la superficie. El sistema de control se implementa en Matlab/Simulink configurado en una arquitectura HIL, donde una placa Arduino actúa como interfaz en tiempo real para aplicar las acciones de control a cada módulo Peltier. Lo más destacable de PHELP es que, con un coste total de aproximadamente 727 USD, demuestra que es posible construir entornos HIL asequibles sin sacrificar capacidades pedagógicas avanzadas. La plataforma no solo permite experimentar con controladores clásicos como PI, sino que también está diseñada para implementar estrategias avanzadas de control robusto, óptimo y no lineal. Además, su arquitectura abierta y el uso de una cámara térmica como sensor principal la convierten en un banco de pruebas ideal para introducir conceptos de Industria 4.0, como inteligencia artificial industrial y gemelos digitales, permitiendo a los estudiantes enfrentarse a problemas de control complejos y realistas que hasta ahora estaban reservados a entornos industriales con equipos de mucho mayor costo [12]. También, frameworks para HIL educativos se han diseñado con carácter genérico y flexible. Por ejemplo, Abdalla, Hammad y Yousef [13], propusieron un "framework para simulación en tiempo real hardware-in-the-loop para diseño de control", utilizando kits de bajo costo y ambiente MATLAB para que estudiantes experimenten con efectos reales como retardos, saturaciones y ruido, probando diferentes control ⁽⁸³⁾adores sobre d ⁽⁸³⁾istintas plantas. A nivel de ⁽⁸³⁾ problemas prácticos y riesgos, la comparación entre métodos más tradicionales como Software-in-the-Loop (SIL) y Model-in-the-Loop (MIL) frente a HIL es relevante: mientras SIL y MIL permiten simulaciones puramente virtuales, no todas las interacciones (ruidos, latencias físicas, errores de A/D, saturaciones ⁽¹⁰⁴⁾ del hardware real) pueden evaluarse adecuadamente sin un lazo real. HIL permite detectar fallos y discrepancias que no emergen en simulaciones puras [14]. A nivel industrial y académico, la tarjeta LaunchPad C2000 F28379D de Texas Instruments ha sido identificada como una herramienta idónea para aplicaciones HIL gracias a su arquitectura de doble núcleo (CPU1 y CPU2), que permite distribuir la carga de cómputo entre la planta simulada y el controlador, logrando una

comunicación eficiente y estable en tiempo. Esta capacidad resulta especialmente relevante para la enseñanza de control en lazo cerrado, donde la sincronización y la respuesta temporal son fundamentales para la comprensión del comportamiento del sistema [15]. Finalmente, es importante resaltar que, aunque existen múltiples experiencias documentadas sobre la aplicación de entornos HIL en la enseñanza de ingeniería, aún se observa una brecha en la implementación de plataformas educativas basadas específicamente en microcontroladores de arquitectura dual como la LaunchPad C2000 F28379D. Por ello, el presente proyecto busca aportar una solución innovadora que permita emular sistemas dinámicos como motores DC y sistemas de presión mediante la integración de modelado, simulación y control en tiempo real. De esta manera, se promueve un aprendizaje más profundo y experimental, fortaleciendo las competencias técnicas de los futuros ingenieros electrónicos.

1.3 Formulación del problema y justificación La educación en ingeniería enfrenta el desafío de formar profesionales capaces de aplicar la teoría a problemas reales en un entorno tecnológico cada vez más complejo[16]. No obstante, muchas instituciones presentan limitaciones en infraestructura y recursos de laboratorio, lo que restringe la posibilidad de realizar prácticas experimentales en tiempo real, y en particular, esta situación se evidencia en el programa de Ingeniería Electrónica de la Universidad Surcolombiana, donde las restricciones presupuestales y la falta de equipos especializados dificultan la implementación de entornos que integren hardware y simulación en tiempo real. Esta brecha

entre teoría y práctica afecta la adquisición de competencias técnicas y la comprensión de los sistemas dinámicos. Estudios recientes muestran que las técnicas de simulación en tiempo real y plataformas digitales pueden compensar esas limitaciones, facilitando un aprendizaje interactivo incluso cuando los laboratorios físicos son escasos o costosos [17]. Ante esta situación, la metodología HIL se presenta como una herramienta eficaz para fortalecer la enseñanza en ingeniería. HIL permite conectar modelos simulados con hardware físico, ofreciendo un entorno seguro y flexible donde los estudiantes pueden diseñar, probar y validar sistemas de control sin necesidad de equipos complejos. Su aplicación fomenta el aprendizaje activo y la comprensión práctica de los fenómenos dinámicos [8][3] Además, el desarrollo de plataformas de bajo costo, como las ofrecidas por Texas Instruments, ha facilitado la incorporación de entornos HIL en el ámbito educativo. Estas soluciones promueven la experimentación en tiempo real y acercan la práctica profesional al aula, favoreciendo la formación de ingenieros con mayores competencias técnicas y analíticas [18][19] De esta forma, surge la necesidad de analizar cómo la implementación de un entorno HIL puede contribuir a mejorar los procesos de enseñanza y aprendizaje en ingeniería. 1.4 Objetivos 1.4.1 Objetivo general Desarrollar una plataforma de simulación HIL para sistemas dinámicos, basada en la tarjeta LaunchPad C2000 de Texas Instruments, con el propósito de ofrecer a los estudiantes de ingeniería electrónica un entorno práctico y accesible que mejore su capacidad para analizar, diseñar y probar la dinámica de dichos sistemas. 1.4.2 Objetivos específicos • Identificar una metodología adecuada para el modelamiento de sistemas dinámicos con fines de simulación en tiempo real utilizando la tarjeta LaunchPad C2000. • Implementar el modelo de simulación en una plataforma HIL empleando la tarjeta 6 LaunchPad C2000 para ejecutar modelos de plantas y controladores en tiempo real. • Validar que los modelos dinámicos se ejecuten en tiempo real. • Evaluar el uso del sistema HIL en un entorno educativo, analizando su efectividad en la enseñanza de simulación de sistemas dinámicos. 1.5 Fundamentación Teórica La fundamentación teórica constituye el soporte conceptual sobre el cual se estructura el presente proyecto. En ella se abordan los principios y herramientas que permiten comprender el funcionamiento de los sistemas de control y su relación con la simulación en tiempo real. Asimismo, se presentan los fundamentos de la técnica HIL, la descripción de la plataforma LaunchPad C2000 empleada para la implementación y el uso del entorno

MATLAB/Simulink bajo el enfoque de Diseño Basado en Modelos. Estos conceptos proporcionan el marco necesario para orientar al lector y facilitar la comprensión de las decisiones metodológicas y técnicas desarrolladas en los capítulos siguientes. 1.5.1 Sistemas de control Los sistemas de control constituyen la base del funcionamiento de numerosos procesos físicos, eléctricos y mecánicos presentes en la industria y la ingeniería moderna. Su propósito es regular el comportamiento de una o varias variables de interés (como posición, velocidad, temperatura o presión) para mantenerlas dentro de un rango deseado, a pesar de perturbaciones externas o cambios en las condiciones de operación. Desde una perspectiva analítica, un sistema de control puede describirse mediante modelos matemáticos dinámicos que representan la relación entre sus entradas, salidas y estados internos. Estos modelos permiten estudiar la estabilidad, la transitividad y la respuesta temporal del sistema frente a diferentes estímulos, proporcionando una herramienta fundamental para el diseño y análisis de estrategias de control. El diseño de sistemas de control implica seleccionar configuraciones y parámetros que garanticen el desempeño requerido, como tiempo de respuesta, error en estado estacionario o robustez ante perturbaciones. En la ingeniería contemporánea, este proceso se apoya en la simulación computacional y en la experimentación práctica, que permiten validar el comportamiento del sistema antes de su implementación real [20]. 1.5.1.1 Tipos de sistemas de control Los sistemas de control pueden clasificarse, de manera general, en dos categorías principales: sistemas de lazo abierto y sistemas de lazo cerrado, según exista o no retroalimentación de la variable controlada hacia el controlador [21]. a. Sistemas de control de lazo abierto En los sistemas de lazo abierto, la señal de salida no influye en la acción de control, ya que el sistema no recibe información sobre la variable controlada. Por tanto, la respuesta del sistema depende únicamente de las condiciones iniciales y del modelo predefinido de funcionamiento. Este tipo de sistemas se emplea en procesos donde las condiciones son predecibles o donde los errores son aceptables. Un ejemplo representativo es el sistema de control de un semáforo, en el cual las luces cambian según un temporizador establecido, sin considerar el volumen real de tráfico. Debido a la ausencia de retroalimentación, los sistemas de lazo abierto suelen encontrarse en dispositivos simples o en aplicaciones donde la precisión no es crítica. 7 b. Sistemas de control de lazo cerrado Los sistemas de control de lazo cerrado incorporan un mecanismo de retroalimentación (feedback), mediante el cual la salida del sistema es monitoreada y comparada con la referencia o valor deseado. La diferencia entre ambos valores genera una señal de error que se utiliza para ajustar la acción de control, permitiendo que el sistema corrija desviaciones y mantenga el comportamiento deseado. Este enfoque es característico de los sistemas automáticos modernos, donde se requiere precisión y estabilidad. Un ejemplo común es el control de temperatura en un aire acondicionado: los sensores registran la temperatura ambiental y el sistema activa o desactiva el compresor en función del valor programado, garantizando una regulación constante. Gracias a esta capacidad de corrección, los sistemas de lazo cerrado son ampliamente utilizados en aplicaciones industriales, robóticas y de control de procesos. 1.5.1.2 Clasificación de los sistemas de control según su implementación Además de su configuración de lazo, los sistemas de control pueden clasificarse de acuerdo con la naturaleza de las señales y los dispositivos empleados en su implementación. Entre las principales categorías se destacan[21]: a. Control analógico Se basa en el uso de señales continuas y componentes electrónicos como resistencias, transistores, amplificadores y condensadores. Es ideal para procesos que requieren alta resolución y respuesta suave, como el control de temperatura, presión o nivel de flujo. Este tipo de control fue predominante antes del auge de los sistemas digitales y aún se utiliza en aplicaciones donde la dinámica del proceso exige continuidad en las señales. b. Control digital o discreto En este tipo de sistemas, las señales se representan de forma discreta en el tiempo y son procesadas por dispositivos digitales como microcontroladores, microprocesadores o sistemas embebidos. Utilizan algoritmos de control implementados mediante software, lo que permite una mayor flexibilidad, ajuste y precisión en los procesos industriales. Este enfoque es ampliamente utilizado en el desarrollo de sistemas modernos y en entornos educativos mediante herramientas como Matlab/Simulink.

c. Control híbrido Combina elementos de control analógico y digital, integrando las ventajas de ambos. Se utiliza en aplicaciones donde se requiere una alta velocidad de respuesta (propia del control analógico) junto con la capacidad de programación, monitoreo y adaptación que ofrecen los sistemas digitales. Este tipo de control es común en sistemas industriales complejos y en entornos donde se exige coordinación entre múltiples dispositivos d. Control por computadora En este enfoque, el control de los procesos se ejecuta mediante computadoras programadas que gestionan la adquisición de datos, el procesamiento de señales y la generación de acciones de control. Estas computadoras se comunican con sensores y actuadores a través de interfaces electrónicas, permitiendo la supervisión, el registro histórico y el ajuste dinámico de parámetros. Este tipo de control es característico de los sistemas modernos de automatización y control distribuido (DCS) o supervisión y adquisición de datos (SCADA). 1.5.1.3 Estrategias de control: Controladores PI y PID En el desarrollo de este proyecto se opta por la utilización de controladores en lazo cerrado del tipo PI (Proporcional-Integral) y PID (Proporcional-Integral-Derivativo), los cuales constituyen herramientas ampliamente empleadas en el ámbito del control automático debido a su eficacia para regular variables dinámicas. El controlador PI combina la acción proporcional y la integral, permitiendo corregir el error actual y acumulado en el tiempo, lo que ayuda a eliminar el error en régimen permanente. Por otro lado, el controlador PID agrega la acción derivativa, que predice el comportamiento futuro del error mediante su tasa de cambio, lo que permite mejorar la respuesta transitoria y reducir la oscilación.[22] La elección entre PI y PID depende de las características de la planta a controlar. Por ejemplo, en procesos con dinámica lenta o donde el cambio de la variable es predecible, un controlador PI puede ofrecer un desempeño adecuado y simplificado. En cambio, cuando se requiere una respuesta rápida, precisión elevada y existen perturbaciones o cambios bruscos, el uso de un PID se vuelve ventajoso gracias a la componente derivativa [23]. 1.5.2 Simulación HIL La simulación HIL es una técnica que combina modelos matemáticos de sistemas dinámicos con componentes físicos reales, permitiendo evaluar en tiempo real el desempeño de controladores antes de su implementación final. En un entorno HIL, la planta física se reemplaza por un modelo ejecutado en hardware especializado, mientras que el controlador se implementa con dispositivos reales, como microcontroladores o DSP.[24] De esta manera, el sistema ofrece un entorno seguro, flexible y reproducible para el análisis y validación de estrategias de control. Entre sus principales ventajas destacan la reducción de costos y tiempos de desarrollo, la posibilidad de reproducir condiciones extremas o peligrosas sin riesgos, y la validación temprana de algoritmos de control. Desde el punto de vista técnico, MATLAB y Simulink permiten llevar a cabo la simulación HIL mediante la generación automática de código en tiempo real. Esto se logra a través de herramientas como Simulink Coder y Embedded Coder, que convierten los modelos gráficos (.slx o .mdl) en código C/C++ optimizado para ejecución determinista. Dicho código se transfiere y ejecuta en plataformas de hardware dedicadas como el LaunchPad C2000, dSPACE o Speedgoat [10][4][25] Para garantizar una simulación en tiempo real estable, es necesario configurar adecuadamente ciertos parámetros del modelo. Entre los más importantes se encuentra el solver, que define cómo se integran las ecuaciones diferenciales del sistema. En simulaciones HIL se utilizan solvers de tipo fijo (fixed-step) con tiempos de muestreo pequeños y constantes, lo que permite mantener la sincronización entre el hardware de simulación y el controlador real [26]. En el ámbito educativo, la simulación HIL ha demostrado ser una herramienta pedagógica efectiva, pues permite a los estudiantes observar el comportamiento dinámico de sistemas reales en tiempo real, sin necesidad de equipamiento costoso. La implementación de HIL en cursos de control mejora la comprensión conceptual y fomenta la experimentación práctica, al conectar el aprendizaje teórico con escenarios simulados de operación real [8]. De este modo, la aplicación de HIL con Matlab/Simulink y plataformas como la LaunchPad C2000 fortalece la enseñanza de control digital al permitir que los estudiantes interactúen directamente con modelos en tiempo real, observando cómo las decisiones de diseño y las configuraciones del modelo afectan el desempeño global del sistema[11]. 1.5.3 Plataforma LaunchPad C2000 F28379D La LaunchPad C2000 F28379D de Texas Instruments es una plataforma construida sobre el microcontrolador TMS320F28379D de la familia Delfino™ C2000™, orientada a control en tiempo real con doble núcleo C28x y coprocesadores CLA. Esta arquitectura permite segmentar la ejecución entre control, adquisición y simulación, reduciendo retardos y garantizando determinismo temporal, una condición esencial en una estructura HIL. Aunque el dispositivo integra múltiples periféricos avanzados, en el contexto de este trabajo el foco práctico se centra en la interacción directa del procesador con el sistema físico mediante módulos de conversión analógico-digital y digital-analógico cuyos componentes y distribución general pueden apreciarse en la Fig. 1 [27]. La figura presenta una vista general de la tarjeta LAUNCHXL-F28379D, donde se destacan los principales conectores y periféricos utilizados en esta implementación. En la imagen se identifican los puertos BoosterPack, las entradas diferenciales para el ADC, los conectores para señales SMA opcionales, los puertos de alimentación, los puertos de interfaz CAN, los pines asociados al microcontrolador TMS320F28379D y los indicadores de usuario. Esta distribución permite visualizar de manera integral los elementos de hardware que intervienen directamente en la adquisición y generación de señales dentro del entorno HIL. Figura 1. LAUNCHXL-F28379D descripción general de la tarjeta [28] Los bloques clave utilizados en esta implementación corresponden a los convertidores digital-analógico (DAC) y a los convertidores analógico-digital (ADC). Para la

generación de las señales de control y referencia se emplearon el DAC-A (salida en pin 30) y el DAC-B (salida en pin 70), los cuales permiten entregar una señal analógica directamente desde el controlador hacia la etapa de planta o etapa emulada. De forma complementaria, para la adquisición de variables se emplearon entradas ADC ubicadas en los pines 24 y 25, capturando la salida real del sistema de forma continua y sin intermediarios. Esta combinación DAC → planta → ADC cierra el bucle físico de realimentación dentro del entorno HIL. La disponibilidad de estos periféricos integrados evita depender de hardware adicional externo para conversión, acelera la iteración experimental y mantiene el ciclo de muestreo 10 bajo y estable, lo que permite probar controladores en tiempo real sin penalizar latencia. En consecuencia, la LaunchPad F28379D no solo actúa como procesador del control, sino también como interfaz de entrada-salida analógica de alta velocidad, facilitando que el comportamiento del sistema bajo estudio se observe y se valide como si se tratara de una planta real a escala de laboratorio[29][28][15]. En adelante, la LaunchPad C2000 F28379D será referida simplemente como tarjeta de desarrollo. 1.5.4 MATLAB/Simulink y Diseño Basado en Modelos (Model-Based Design) El Diseño Basado en Modelos (Model-Based Design, MBD) es una metodología de desarrollo utilizada ampliamente en ingeniería de control y sistemas embebidos, que centra el proceso de diseño, simulación y validación en un modelo matemático del sistema. Este enfoque permite representar el comportamiento dinámico de un proceso de manera gráfica y jerárquica, facilitando el análisis, la simulación y la generación automática de código ejecutable, tal y como se aprecia en la fig. 2. [30]. La figura ilustra el flujo general del MBD, iniciando por la definición de requisitos y continuando con el modelado, la simulación en escritorio, el prototipado rápido y la generación de código, para luego avanzar hacia validaciones más avanzadas como SIL, la simulación PIL y finalmente la HIL. Este diagrama resume cómo la metodología permite una transición progresiva desde el diseño conceptual hasta la validación física manteniendo consistencia entre etapas. Figura 2. Diseño Basado en Modelos para HIL[31] A diferencia de los métodos tradicionales, donde la programación y la simulación se realizan de forma independiente, el MBD integra todas las etapas del ciclo de diseño —modelado, simulación, verificación y despliegue— dentro de un mismo entorno. Esto permite reducir errores de implementación, mejorar la trazabilidad entre las fases del proyecto y disminuir los tiempos de desarrollo, ya que el mismo modelo puede ser validado virtualmente antes de su implementación física [32]. Las herramientas Matlab y Simulink, desarrolladas por MathWorks, constituyen la base de esta metodología. Matlab proporciona un entorno numérico y de programación para el análisis de datos y el diseño de algoritmos, mientras que Simulink ofrece una interfaz gráfica basada en diagramas de bloques que permite la simulación en tiempo continuo y discreto [33]. A través de funciones como Simulink Coder, Embedded Coder y Simulink Real-Time, es posible generar automáticamente código C o C++ a partir de modelos de Simulink y transferirlo a plataformas de hardware para su ejecución determinista. Simulink Coder permite convertir diagramas de bloques en código ejecutable y validarlos mediante simulaciones en tiempo real; Embedded Coder optimiza ese código para microcontroladores y procesadores digitales de señal, incorporando configuraciones específicas de hardware; y Simulink Real-Time facilita la ejecución de los modelos en plataformas dedicadas, como Speedgoat o LaunchPad C2000, manteniendo comunicación directa con el entorno físico. Estas herramientas conforman el núcleo del enfoque MBD, ya que permiten automatizar la transición entre el diseño virtual y la validación experimental, reduciendo errores de programación y tiempos de desarrollo [10][34][35].

2. Metodología de la Plataforma HIL para Sistemas Dinámicos

Este capítulo se centra en la descripción de la metodología empleada para el desarrollo de la plataforma HIL, abarcando tanto la estructura general como la aplicación específica en los cuatro casos de estudio. En cada uno de ellos se detallan las etapas de modelamiento, discretización, diseño de control y validación experimental, con el fin de demostrar la adaptabilidad y funcionalidad del entorno propuesto. La metodología propuesta para el desarrollo de este trabajo de grado se estructura en dos fases principales: una fase general de diseño y validación de la plataforma HIL y una fase específica de implementación de modelos dinámicos. Esta estructura permite que la plataforma sea flexible y adaptable a diferentes tipos de sistemas dinámicos a estudiar.

2.1 Fase General: Desarrollo de la plataforma HIL

Con el objetivo de diseñar una plataforma flexible y reutilizable para la enseñanza de sistemas dinámicos en ingeniería electrónica, se formuló una metodología organizada en fases secuenciales. La Fig. 3 esquematiza el flujo completo de trabajo asociado al desarrollo de la plataforma HIL, permitiendo visualizar la ruta metodológica que se sigue para integrar de manera efectiva el modelo matemático con el hardware de control en tiempo real. Modelamiento del sistema dinámico. Validación del modelo. Selección del período de muestreo. Discretización del sistema dinámico. Diseño del controlador discreto. Implementación del sistema HIL en la tarjeta LaunchPad C2000. Figura 3. Ruta metodológica para el desarrollo e implementación de la plataforma HIL.

a. Modelamiento del sistema dinámico

El modelamiento del sistema dinámico consiste en representar matemáticamente el comportamiento de un proceso físico con el fin de analizar su respuesta y diseñar estrategias de control acordes a su dinámica. Este proceso parte de la formulación de las ecuaciones diferenciales que describen la relación entre las variables de entrada, salida y estado del sistema, permitiendo obtener una descripción precisa de su comportamiento en el dominio del tiempo o la frecuencia. Existe diversidad de representación, entre las cuales se encuentran la función de transferencia y la representación en espacio de estados, ambos derivados de las ecuaciones diferenciales que describen la dinámica del sistema. Sin embargo, en este trabajo se optó por emplear las ecuaciones diferenciales como punto de partida, desarrollando el modelamiento mediante una función de transferencia, ya que permiten establecer de forma directa las relaciones matemáticas entre las variables del modelo, facilitando la comprensión y simulación de su comportamiento en entornos computacionales como Matlab/Simulink [36][20].

b. Validación del modelo

Para la validación del modelo se verifica que la respuesta dinámica obtenida del sistema sea coherente y adecuada frente al comportamiento teórico esperado. Para este ejercicio, se propone el uso de herramientas como Simscape [37] como mecanismo de validación complementaria, permitiendo comparar el comportamiento del modelo analítico con una simulación física basada en componentes. Esta comparación tiene como propósito comprobar que la planta modelada presenta una respuesta coherente y consistente con la dinámica obtenida en el paso anterior, lo que respalda la validez del modelo matemático empleado en el desarrollo del proyecto.

c. Selección del Período de Muestreo

El período de muestreo T es un parámetro crucial en el diseño de sistemas digitales, el cual debe seleccionarse considerando varios factores:

- Capacidad de procesamiento: A menor período, se requiere un procesador más rápido y costoso.
- Precisión numérica: Un período muy pequeño puede generar problemas de precisión y redondeo, especialmente si se emplean procesadores de punto fijo.
- Conservación de información: Un período de muestreo demasiado grande respecto a la dinámica del sistema puede ocasionar pérdida significativa de información de la señal.
- Respuesta ante perturbaciones: Dado que entre dos mediciones el proceso opera en lazo abierto, Teorema de Muestreo de Shannon. De acuerdo con el teorema de Shannon [38], para que una señal $x(k)$ pueda ser reconstruida perfectamente a partir de su versión muestreada $x^*(k)$, la frecuencia de muestreo wk ($ckkk wk = 2\pi$) debe ser al menos el doble de la máxima frecuencia S presente en $x(k)$, es decir: $wk \geq 2wc$, si se cumple esta condición, la señal original puede ser reconstruida sin pérdida de información.

d. Discretización

Criterios para determinar el período de muestreo [39]

E importante tener presente que en lazo cerrado los procesos son normalmente más rápidos que en lazo abierto; por lo tanto, se recomienda estimar el período de muestreo a partir de las características del sistema continuo en lazo cerrado. Para estimar el período de muestreo se puede aplicar uno de los siguientes criterios:

- Criterio 1: Si wc es el ancho de banda del sistema en lazo cerrado, la frecuencia de muestreo se puede estimar dentro del intervalo: $8wc \leq wk \leq 12wc$.
- Criterio 2: El período de muestreo se puede evaluar a partir de la constante de tiempo equivalente del sistema en lazo cerrado tomando como base el criterio: $0.2(\tau_{cp} + \theta') \leq P \leq 0.6(\tau_{cp} + \theta')$.
- Criterio 3: Si kP es el tiempo de establecimiento del sistema en lazo cerrado el período de muestreo puede seleccionarse dentro del intervalo: $0.05kP \leq P \leq 0.15kS$.
- Criterio 4: Finalmente, se sugiere que el período de muestreo esté dentro del intervalo dado por: $0.0625Pp \leq P \leq 0.125Pp$.

(4) En donde Pp es el período de oscilación del sistema en condiciones de estabilidad crítica.

d. Discretización

del sistema dinámico Una vez establecido el tiempo de muestreo adecuado, se procede a discretizar la planta dinámica en el dominio Z, con el propósito de preparar los modelos para su implementación en tiempo real sobre el hardware de control. En el proceso de discretización, el objetivo es transformar las ecuaciones diferenciales continuas del sistema en expresiones en diferencias finitas, que puedan ser evaluadas en intervalos de tiempo discretos. Existen diferentes métodos de aproximación que permiten realizar esta conversión, cada uno con propiedades específicas en términos de estabilidad y precisión numérica [40]. Entre los métodos más empleados se encuentran:

- Forward Euler: calcula la derivada utilizando el valor presente de la señal, siendo un método explícito y sencillo, aunque su estabilidad se ve afectada con tiempos de muestreo grandes [41].
- Backward Euler: emplea el valor futuro estimado de la señal, lo que mejora significativamente la estabilidad, especialmente en sistemas rígidos o con dinámica rápida [42].
- Tustin o bilineal: realiza una transformación más precisa entre el dominio continuo y discreto, conservando mejor la respuesta en frecuencia y ofreciendo un equilibrio entre precisión y estabilidad [43]. La selección del método adecuado depende del tipo de sistema modelado y de los requerimientos del controlador digital. En herramientas como Matlab/Simulink, esta conversión puede efectuarse mediante la función c2d(), la cual permite especificar el método de discretización y el tiempo de muestreo a utilizar. En este trabajo, se seleccionó el método Tustin (bilineal), ya que ofrece una adecuada combinación entre estabilidad y precisión al preservar de forma más fiel la respuesta en frecuencia del sistema continuo en su representación discreta [43].
- e. Diseño del controlador discreto: Se diseña el controlador digital que permite el adecuado control de las variables de interés del sistema dinámico. Para este propósito, se utiliza el entorno Matlab/Simulink, el cual ofrece herramientas que facilitan tanto el diseño manual como la sintonización automática en el dominio discreto. En la práctica, el diseño de controladores puede abordarse mediante métodos manuales, como la asignación de polos o el análisis de la respuesta en frecuencia, donde el diseñador determina los parámetros del controlador a partir del modelo continuo del sistema. Posteriormente, estos parámetros pueden ajustarse o transferirse al dominio discreto empleando herramientas como PID Tuner [44], la cual permite convertir el controlador continuo en uno digital, configurando automáticamente su comportamiento de acuerdo con el período de muestreo definido.
- f. Implementación del sistema HIL en la tarjeta LaunchPad C2000: Una vez discretizados tanto el controlador PID como el modelo dinámico de la planta, se procede a su implementación en tiempo real utilizando la tarjeta de desarrollo. Para ello, se aprovecha la arquitectura de doble núcleo del dispositivo, asignando funciones específicas a cada uno de ellos como se presenta en la fig. 4:

 - Núcleo 1 (Control o set point): se encarga de ejecutar el controlador digital o set point, recibiendo la señal de la planta y generando la correspondiente señal de control.
 - Núcleo 2 (Planta): se dedica a simular de manera discreta la planta bajo estudio, procesando la señal de control recibida y generando como salida la señal deseada. De esta forma, se establece un lazo de control cerrado dentro de la misma tarjeta por medio de conexiones físicas usando diferentes periféricos de la tarjeta, lo que posibilita la ejecución en tiempo real de la simulación HIL. Finalmente, la señal de salida es analizada con el objetivo de validar tanto la dinámica del sistema como el desempeño del controlador.

16 ADC Pin 24 DAC_A Pin 30 Core 1: Control o set point Core 2: Planta DAC_B Pin 70 ADC Pin 25 Figura 4. Representación gráfica de la implementación del sistema HIL en la tarjeta LaunchPad C2000. Esta metodología se aplicará de manera sistemática a cada sistema dinámico estudiado, conforme a la descripción que se presenta a continuación.

2.2 Fase Específica: Implementación en Sistemas Dinámicos

A continuación, se presentan los casos de estudio desarrollados en esta fase, los cuales ilustran la aplicación práctica del entorno HIL en distintos sistemas dinámicos.

2.2.1 CASO 1: Posición de un Motor DC en Lazo Cerrado sin Control

Como primer caso de estudio, se considera el análisis del comportamiento en lazo cerrado de un motor de corriente continua (DC), donde el lazo se cierra directamente mediante realimentación unitaria, sin la implementación de un controlador.

a. Modelamiento del sistema dinámico

El motor de corriente directa se modela considerando dos dominios acoplados: el eléctrico y el mecánico como se observa en la fig. 5. En la parte eléctrica, el circuito de armadura se representa como una resistencia R en serie con una inductancia L , alimentadas por una tensión externa $U(t)$. La corriente $i(t)$ que circula por este circuito genera un campo magnético que interactúa con el campo del estator, produciendo un par electromagnético. En la parte mecánica, el par desarrollado por el motor $P(t)$ se aplica a la carga, caracterizada por un momento de inercia total J y un coeficiente de fricción viscosa B . La dinámica rotacional resultante determina la velocidad angular $\omega(t)$ y, por integración, la posición angular $\theta(t)$ del eje del motor. La interacción entre ambos dominios se da a través de:

 - La fuerza contraelectromotriz $-B\dot{\theta}(t)$, proporcional a la velocidad angular.
 - La fuerza impulsora $P(t)$, proporcional al par desarrollado por el motor.

El par motor $P(k)$, proporcional a la corriente de armadura. 17 Figura 5. Esquema electromecánico de un motor de corriente directa Sección eléctrica Se realiza malla en el componente eléctrico $A(k) \cdot ck$ $k(k) = P \cdot i(k) - ca(k)$ (5) Donde $ca(k)$ es una tensión generada que resulta cuando los conductores de la armadura se mueven a través del flujo de campo establecido por la corriente de campo ic Sección Mecánica El modelo mecánico está dado por: $A c \theta c \theta ck = Pl(k) - A ck$ (6) La relación electromecánica entre los dominios eléctrico y mecánico se define por las siguientes expresiones $ca(k) = Aa \cdot \omega(k) = Aa c \theta ck p$ (7) $Pl(p) = Km \cdot i(p)$ (8) Se aplica la transformada de Laplace a las ecuaciones que describen el funcionamiento del motor DC, transformando las ecuaciones diferenciales en el dominio del tiempo a ecuaciones algebraicas en el dominio de Laplace. $A c \theta c \theta pp = k(k) - P \cdot i(k) - ca(k) Ak \cdot i(k) = k(k) - P \cdot i(k) - ca(k) A c \theta cp = Pl(k) - A cp c \theta Ak2 \cdot \theta(k) = Pl(k) - Ak \cdot \theta(k)$ $ca(k) = Aa \cdot \omega(k) = Aa c \theta ck p$ (8) Se sustituye la ecuación 11 y 12 en la ecuación 9 $Pl(k) Pl(k) Ak Al = k(k) - P Al - Aa \cdot \theta(k)$ (9) (10) (11) (12) (13) De la ecuación 10 se obtiene $Pk(k); Pl(k) = \theta(k) Aa c \theta ck p + 2 + Ak$ (14) Reorganiza (15) Una vez obtenido el modelo matemático, se procede a reemplazar los valores numéricos de los parámetros del motor en la función de transferencia de posición. Como resultado de esta sustitución, se obtiene la función de transferencia continua que representa la dinámica de la posición angular del motor de corriente directa (DC). A continuación, se presentan los parámetros utilizados en el desarrollo del modelo, los cuales fueron obtenidos a partir de la medición experimental realizada sobre un motor DC real. $P = 15.6 \text{ PckkkcZck ckk kkkk} (\Omega)$ $A = 1.2c - 3 \text{ AkckckZckZck ckk kkkk}$ ($A = 0.00013238 \text{ AkckckZck ckk kkkk}$) ($k(k) * k2$) $A = 0.00033333 \text{ Akccicckcc ck ckkcik kikckkZck (A * k * k) Al = 0.267783701 AkkkkZkkcc ck kZk ckk kkkk}$ ($A * k / A$) $Aa = 0.267783701; AkkkkZkkcc ck ckkcik Zck ckkkZck ckk kkkk$ ($V * k / kZc$) ($\theta(k) 0.2678 k(k) 1.589c - 0.0843 + 0.00020699k + 0.076911 = 16$) b. Validación del modelo Con el propósito de verificar la fidelidad del modelo matemático, se diseñó un esquema de simulación paralelo en Matlab/Simulink. La fig. 6 muestra la arquitectura empleada para esta validación, en la cual se compara la función de transferencia teórica con un modelo físico implementado en Simscape. Ambos subsistemas son sometidos de manera simultánea mediante una señal de entrada tipo escalón, lo que permite evaluar la coherencia entre la respuesta analítica y la respuesta obtenida a partir de la simulación basada en componentes físicos bajo condiciones idénticas. Entrada escala función de transferencia del sistema Implementación del modelo en Simscape Respuesta de comportamiento dinámico Figura 6. Implementación del modelo mediante función de transferencia y Simscape en lazo abierto. 19 A continuación, se presenta en la fig. 7 la comparación entre la respuesta del modelo de posición obtenido mediante la función de transferencia y la respuesta del modelo físico implementado en Simscape, junto con el error relativo porcentual entre ambas señales. Para cuantificar la diferencia, se exportaron desde Simulink las dos respuestas la correspondiente al modelo analítico y la del modelo físico y se procesaron en un script de Matlab para calcular el error relativo utilizando la expresión: $Apcl (\%) = |xPikkcZkc - xAP| / xAP * 100$ (17) donde: • xAP es la respuesta del sistema obtenida mediante la función de transferencia, • $xPikkcZkc$ es la respuesta del modelo físico desarrollado en Simscape, • $Apcl (\%)$ representa el error relativo expresado en porcentaje. El análisis realizado muestra un error relativo constante de 0.0036%, lo cual evidencia una alta correspondencia entre ambos modelos. Este valor indica que las diferencias entre las respuestas son prácticamente despreciables, validando la fidelidad del modelo implementado en Simscape respecto al modelo teórico. En la gráfica combinada se observa visualmente la coincidencia entre ambas respuestas y la baja magnitud del error, confirmando la consistencia y precisión del modelo desarrollado. Figura 7. Comparación entre los modelos (función de transferencia vs. Simscape) y error relativo porcentual mediante Matlab/Simulink. Una vez validado el modelo, se procede a implementar la planta en lazo cerrado. La Figura 8 presenta la respuesta del sistema ante una entrada tipo escalón de amplitud 2π . Este valor se estableció como referencia del sistema, ya que representa un desplazamiento angular 20 equivalente a 360 grados, es decir, 2π radianes, que corresponde al rango máximo de giro considerado en la implementación. Figura 8. Respuesta de la planta de posición en lazo cerrado, simulada en Matlab/Simulink con entrada tipo escalón de amplitud 2π . Selección adecuada del periodo de muestreo Se implementaron los cuatro criterios descritos en la sección "Selección del periodo de muestreo" dentro de la metodología general, con el propósito de determinar un tiempo de muestreo apropiado que garantizara un buen desempeño del sistema y una representación precisa de su dinámica en el dominio discreto. Para ello, se aplicaron los criterios establecidos que relacionan el periodo de muestreo con la frecuencia de corte del sistema wc y el tiempo de establecimiento kp , los cuales se obtuvieron a partir del análisis del diagrama de Bode del modelo continuo en lazo cerrado. Mediante un script desarrollado en Matlab, se determinó $wc = 3.51 kZc/k$ y $kp = 1.12 k$. En la Fig. 10 se presenta el diagrama de flujo del procedimiento implementado en Matlab, en el cual se describe las etapas seguidas para la obtención de los parámetros wc y kp . Figura 9. Diagrama de flujo para la determinación de wc y ts a partir del análisis de Bode. 21 Finalmente, aplicando los criterios definidos y considerando los valores obtenidos de wc y kp , se seleccionó un tiempo de muestreo de 0.01 segundos, el cual representa un intervalo adecuado entre todos los criterios evaluados. d. Discretización del sistema dinámico Con el fin de implementar el sistema en un entorno digital, es necesario expresar el modelo continuo de la planta en su forma discreta. Para este propósito se emplea la función $c2d$ de MATLAB, especificando un tiempo de muestreo de $Ts = 0.01$ s y utilizando el método de Tustin (transformación bilineal), el cual permite una aproximación estable y adecuada para sistemas de control. La fig. 10 muestra el procedimiento que se realiza para la discretización del sistema mediante Matlab. Inicio Definir tiempo de muestreo (Ts) Aplicar función $c2d$ (G, Ts, 'tustin') para obtener la función de transferencia Calcular la función de transferencia en lazo cerrado: $G1_z = feedback(G_z, 1)$ Mostrar resultados de G_z y $G1_z$ en MATLAB Fin Figura 10. Diagrama de flujo del proceso de discretización del sistema dinámico mediante el método de Tustin. El resultado obtenido para la función de transferencia discreta en lazo cerrado es: $A1(x) = 1.011x^3 + 0.3165x^2 - 0.9449x - 0.2928 0.01126x^3 + 0.03378x^2 + 0.03378x + 0.01126$ (18) f. Implementación del Sistema HIL en la Tarjeta LaunchPad C2000 - Configuración para Posición sin Control Para la implementación, la arquitectura del sistema se dividió entre los dos núcleos del microcontrolador F28379D de la tarjeta de desarrollo, según la distribución mostrada en la Fig. 4. Núcleo 0 o 1 (Set point): La fig. 11 muestra la implementación del Núcleo 1, en el cual se realiza la generación y el acondicionamiento de la señal de referencia utilizada en el lazo cerrado de posición. Para ajustar esta referencia a la resolución del convertidor digital-análogo (DAC), se aplica un escalamiento mediante la relación $4095/2\pi$. Este factor permite convertir el valor continuo en una señal digital compatible con el rango del DAC, la 22 cual es enviada finalmente a través del pin 30 de la tarjeta de desarrollo, correspondiente a la salida del Núcleo 1. La señal simulada resultante es limitada mediante un bloque de saturación para mantenerla dentro del rango establecido para el DAC y luego enviada como señal analógica hacia el Núcleo 2. El lazo cerrado de posición se completa mediante la conexión entre el pin 24 (ADC del Núcleo 1) y el pin 70 del Núcleo 2, lo que permite que la señal procesada retorne al Núcleo 1 en forma analógica para su conversión digital y comparación con la referencia, estableciendo así la realimentación del sistema de posición sin control. Error calculation Set Point Escalamiento para el DAC Saturación Conversor DAC (salida analógica) Step time: 0 Initial value: 0 Final value: 2π Sample time: ts Escalamiento para el ADC Pin 30 Conversor A DC (entrada analógica) Pin 24 Figura 11. Diagrama de configuración del Núcleo 1 para el sistema de posición en lazo cerrado Núcleo 2 (Planta discretizada): La Fig. 12 presenta la implementación del Núcleo 2, donde se implementa la planta del sistema a partir de la función de transferencia discreta del motor de corriente continua. Este núcleo recibe, a través del pin ADC 25, que funciona como la entrada analógica del sistema, la señal proveniente del DAC del Núcleo 1, correspondiente al valor de referencia previamente escalado. Una vez digitalizada, dicha señal se ajusta mediante el factor $2\pi/4095$, convirtiendo el rango discreto del ADC al rango angular adecuado para el modelo digital. Con esta señal de entrada, la planta discreta simula el comportamiento dinámico del motor, generando como resultado la posición angular del sistema. Posteriormente, la salida del modelo se escala mediante el factor 3413, con el fin de acondicionar la señal para que su 2π amplitud máxima corresponda a 3413 unidades digitales, equivalentes a 2.5 V en la salida del DAC-B. Este valor fue implementado de manera uniforme para todos los casos presentados en este trabajo. Finalmente, la señal pasa por un bloque de saturación, encargado de limitar su amplitud dentro del rango permitido por el convertidor digital-análogo, antes de ser enviada a través del pin 70 (DAC-B) hacia el Núcleo 1, completando el lazo de posición del sistema. θ θ 23 Entrada Escalamiento de analógica (ADC) Entrada Planta (z) θ Señal recibida desde el DAC del Núcleo 1 Pin 25 θ Salida analógica Escalamiento de (DAC) Saturación salida Envío de la señal simulada hacia el Núcleo 1 Pin 70 Figura 12. Diagrama de configuración del Núcleo 2 para el sistema de posición en lazo cerrado Una vez configurados los dos núcleos, se ejecuta el sistema HIL, realizando las conexiones previas en la tarjeta de desarrollo que se indican en la fig. 4. Con el sistema en marcha, se obtiene la señal esperada, la cual sigue la dinámica de la planta, fig. 8. Los datos fueron registrados con un osciloscopio digital RIGOL MSO1074 [45], exportados en formato CSV y posteriormente filtrados en MATLAB con el propósito de atenuar el ruido de medición inherente al proceso de adquisición, garantizando una representación más adecuada de la señal. En este proceso se empleó un filtro de media móvil implementado mediante la función $movmean()$ [46], utilizando una ventana de 15 muestras. Este filtro FIR no recursivo permite suavizar las mediciones reduciendo fluctuaciones de alta frecuencia sin alterar la dinámica real del sistema. La misma configuración del filtro, misma técnica y mismo tamaño de ventana, se aplicó en todos los casos experimentales de este trabajo de grado. La Fig. 13 muestra de manera conjunta la respuesta del sistema de posición en lazo cerrado, presentando tanto la señal sin filtrar como la señal filtrada, permitiendo apreciar el efecto del proceso de filtrado sobre el comportamiento dinámico registrado. Figura 13. Señal experimental del sistema de posición en lazo cerrado: comparación entre la señal sin filtrar y la señal filtrada. 24 Durante la prueba, la salida alcanzó un valor máximo de 2.5 V, correspondiente al límite establecido para la posición máxima de 2π radianes, comprobando así el correcto escalamiento y acondicionamiento de la señal en la implementación. 2.2.2 CASO 2: Posición de un Motor DC con Control Partiendo de las bases establecidas en el Caso 1 (posición sin control), este segundo caso de estudio se centra en el diseño e implementación de un sistema de lazo cerrado para el control de posición del mismo motor DC. Dado que las etapas iniciales de modelamiento y validación son comunes a ambos casos, se aprovecharon directamente los resultados previamente obtenidos. En consecuencia, la metodología para este caso retoma el proceso a partir de la etapa de discretización, incorporando los siguientes pasos específicos para el diseño del controlador: e. Diseño del controlador discreto: Para el modelo de posición del motor DC, el controlador digital se diseñó mediante la herramienta PID Tuner de Matlab/Simulink, la cual permite ajustar el controlador en el dominio discreto a partir del periodo de muestreo definido para el sistema. Con esta herramienta se calibraron de manera automática los parámetros de ganancia proporcional (Kp), integral (Ki) y derivativa (Kd). Una vez determinados los valores óptimos, el controlador se exportó al entorno de simulación para validar su desempeño en lazo cerrado junto con el modelo discreto de la planta. Finalmente, en la Tabla 1 se presentan los valores obtenidos para el controlador discreto del motor DC de posición. Tabla 1. Parámetros de sintonización del controlador PID discreto para el sistema de posición Parámetros del controlador discreto PID para el sistema de posición Parámetro Símbolo Valor obtenido Ganancia proporcional Kp 1.8004 Ganancia integral Ki 2.0321 Ganancia derivativa Kd 0.0291 Coeficiente del filtro derivativo N 49.7413 La función de transferencia del controlador se obtuvo en Matlab a partir del cálculo explícito de los componentes proporcional, integral y derivativo, incluyendo el filtro aplicado a la acción derivativa. Este proceso se desarrolló utilizando funciones de transferencia en el dominio discreto. La Figura 14 ilustra el procedimiento seguido en Matlab para la obtención de la función de transferencia del controlador. 25 Inicio Definir los parámetros del controlador PID Asignar los coeficientes: P, A, A y A . Calcular el término proporcional: $Ap = P$ Calcular el término integral Definir $Ai = zI - Ss1$, que representa la acción integradora discreta. Calcular el término derivativo con filtro $Ac = Dz \cdot N(1+zN-1)s$. Sumar los tres términos del controlador Obtener el controlador PID completo en tiempo discreto: $Apic = Ap + Ai + Ac$. Mostrar la función de transferencia resultante Imprimir o visualizar $Apic$ como la función de transferencia PID discreto. Fin Figura 14. Diagrama de flujo del proceso de discretización del controlador PID $PAA(Z) = Z^2 - 1.503Z - 0.5026 3.247Z^2 - 5.579Z + 2.342$ (19) Una vez obtenidos los modelos discretos de la planta y del controlador, se procede a la implementación del sistema en lazo cerrado en Matlab/Simulink, con el objetivo de verificar su comportamiento frente a perturbaciones externas y evaluar la capacidad del control para recuperar el seguimiento a la referencia establecida. En este caso de estudio, la perturbación se injectó de forma aditiva justo después del controlador, como se muestra en la Fig. 15. Específicamente, la señal de Perturbación se generó en Simulink mediante un bloque tipo escalón, configurado para representar un torque mecánico externo no deseado que actúa sobre el eje y provoca una desviación

transitoria en la posición angular del sistema. Figura 15. Diagrama del sistema de control discreto en lazo cerrado en Simulink con perturbación 26 La respuesta del sistema ante la entrada escalón y la perturbación inyectada se presenta en la Fig 16. Se observa que, durante el intervalo de aplicación de la perturbación, la posición angular experimenta una desviación transitoria respecto a la referencia de 2π rad. Sin embargo, el controlador PID discreto compensa el efecto externo, permitiendo que el sistema recupere de forma estable el valor de referencia una vez finalizada la perturbación. Perturbación (0.628 rad) Figura 16. Respuesta discreta del sistema de posición

controlado, simulada en Matlab/Simulink, ante una entrada escalón de 2π y la presencia de una perturbación. f. Implementación (23) del Sistema HIL en la Tarjeta LaunchPad C2000 - Configuración para Posición con Control Núcleo 1 (Control): La fig. 17 muestra la implementación del Núcleo 1, en el cual se ejecuta el controlador PID discretizado, el cual calcula la acción de control en función del error entre la referencia de posición y la realimentación angular recibida. Para garantizar el correcto rango de operación del sistema, a la salida del PID se implementa un offset de compensación que adapta la señal al rango requerido, solucionando problemas de rango identificados previamente. La señal de control resultante es adecuadamente escalada y limitada mediante un bloque de saturación antes de ser enviada a un canal DAC de la tarjeta (pin 30). Esta señal analógica se transmite físicamente al Núcleo 2 a través de los pines de la tarjeta. Simultáneamente, el Núcleo 1 recibe una señal de realimentación del Núcleo 2 a través de un canal ADC (pin 24), la cual es igualmente escalada y procesada para completar el lazo de control. Set PID(Z) Escalamiento Conversor DAC Point para el DAC Saturación (salida analógica) Pin 30 offset Escalamiento Conversor ADC para el ADC (entrada analógica) Pin 24 Figura 17. Implementación del controlador PID - Núcleo 1 27 Núcleo 2 (Planta discretizada): La fig. 18 muestra la implementación del Núcleo 2, este núcleo implementa el modelo discreto de la planta de posición del motor DC, representado por su función de transferencia discreta. Recibe como entrada la señal de control proveniente del Núcleo 1 a través de un canal ADC (pin 25), la cual es previamente escalada y comprobada con un offset pensada para mapear correctamente el rango de operación requerido para el modelo. La dinámica de la planta es procesada, e incorpora una perturbación para análisis del sistema. Finalmente, la posición angular simulada resultante es limitada mediante un bloque de saturación y enviada a través de un canal DAC (pin 70) de vuelta al Núcleo 1, cerrando así el lazo de control de posición y completando el ciclo de realimentación entre ambos núcleos. Entrada analógica (ADC) Escalamiento de entrada Planta (z) Señal recibida desde el DAC del Núcleo 1 Pin 25 offset Perturbación Salida analógica (DAC) Saturación Escalamiento de salida Envío de la señal simulada hacia el Núcleo 1, pin 70 Figura 18. Implementación del modelo discreto - Núcleo 2 Se comprobó el correcto funcionamiento del sistema HIL con el control de posición implementado, confirmando la adecuada interacción entre los núcleos. La respuesta observada en el osciloscopio mostró un seguimiento estable hacia la posición de referencia; incluso ante la perturbación aplicada, (28) la planta respondió conforme a lo esperado, recuperando su estado de equilibrio. Los datos adquiridos mediante el osciloscopio exportados en formato CSV, fueron posteriormente procesados y filtrados en MATLAB, lo que permitió representar la respuesta temporal del sistema controlado, coherente con el comportamiento teórico previsto en la fig. 16. La Fig. 19 presenta la respuesta del sistema de posición en lazo cerrado con control, incluyendo tanto la señal experimental sin filtrar como la señal filtrada. Esta señal presenta un sobrepulso cercano a 2.8 V tras el arranque, seguido de la respuesta a la perturbación. Posteriormente, la salida continúa su proceso de asentamiento hasta estabilizarse en 2.5 V, alcanzando así el nivel final esperado para la operación del sistema. 28 Figura 19. Señal experimental del sistema de posición en lazo cerrado con control: comparación entre la señal sin filtrar y la señal filtrada. 2.2.3 CASO 3: Velocidad de un Motor DC con Control En esta sección se aborda el desarrollo del tercer caso de estudio, correspondiente al sistema de control de velocidad de un motor DC. Cabe destacar que, para este caso, se utiliza un motor DC diferente al empleado en los casos de posición, con sus respectivos parámetros físicos y eléctricos. a. Modelamiento del sistema dinámico Para el análisis y modelamiento del sistema de control de velocidad del motor de corriente directa (DC), se toma como referencia la Fig. 5, la cual muestra el esquema electromecánico del motor utilizado previamente en el modelamiento de posición. En este caso, se considera la relación entre la velocidad angular y la fuerza contraelectromotriz, expresada como: $ca(k) = Aa \cdot \omega(k) = Aa \cdot cc\theta p$ Se sigue un procedimiento análogo empleado en el modelamiento del sistema de posición, pero en este caso enfocado en la velocidad angular. A partir de las ecuaciones diferenciales que describen el comportamiento dinámico del motor, se aplica la transformada de Laplace para obtener las expresiones que representan el funcionamiento del sistema de control de velocidad del motor DC. $Ak \cdot i(k) = k(k) - P \cdot i(k) - ca(k)$ (20) $Ak \cdot \omega(k) = Pl(k) - A \cdot \omega(k)$ (21) $ca(k) = Aa \cdot \omega(k)$ (22) $Pl(k) = Al \cdot i(k)$ (23) 29 Sustituimos ecuación 22 y ecuación 23 en la ecuación 20 $Ak \cdot Al = k(k) - P \cdot Al - Aa \cdot \omega(k)$ $Pl(k) \cdot Pl(k) = (P + Ak) \cdot Pl(k)$ $Al + Aa \cdot \omega(k)$ (24) De la ecuación 21 se obtiene la velocidad angular: $\omega(k) = Ak + A \cdot Pl(k)$ (25) Ecuación 25 se sustituye en la ecuación 24 $k(k) = (P + Ak) \cdot Pl(k) \cdot Pl(k) \cdot Al + ka$

Ak + A Reorganizando: $k(k) = (P + Ak + Aa Al Ak + A) Pl(k) (P + Ak)(Ak + A) AaAl k(k) = kl(Ak + A) Pl(k)$ (26) De la ecuación 21 podemos obtener la constante de torque $Ak * \omega(k) = Pl - A * \omega(k) Pl = \omega(k)(Ak + A)$ (27) Remplazando la ecuación 26 en la ecuación 27 $k(k) = \omega(k)(Ak + A) kl (A + P) + Aa * \omega(k)$ (28) Se opera en la ecuación 28 $k(k) = \omega(k)[AAk2 + Apk + AAk + AP + AaAl]$ (29) kl Reorganizando se obtiene la función de transferencia del sistema: $\omega(k) = kl k(k) AAk2 + (AP + AA)k + AP + AaAl$ (30) Se aplica la sustitución de los parámetros en la función de transferencia de velocidad. $P = 100 A = 108c - 3 A = 93.4c - 6 A = 3.91c - 6 A_k = 0.0483 A_Z = 0.0483 PckikkckcIZ cck kkkkkk (\Omega) AkckckZkciZ cck kkkkkk (A) AkckcIZ cck kkkkk (kc * k2) Akccicicckk cck cikcioki k ckckkZ (A * k * k) AkkkkkZkkc cc kZk cck kkkkkk (75)$ $(A * k/A) Akkkkk cckcc kcc cckcxz ckkkkk Zckckckkkkkkix (V * klkZc) 30 \omega(k) 0.0483 k(k) 1.009c - 5k2 + 0.00934k + 0.002724 = (31)$ b. Validación del modelo Para la validación del modelo de velocidad del motor DC, se aplicó el mismo procedimiento descrito en la Figura 6, en el cual se contrastan las respuestas en el dominio del tiempo obtenidas mediante la función de transferencia del sistema y la implementación en Simscape ante una entrada tipo escalón. Con el propósito de cuantificar la precisión del modelo desarrollado en Simscape respecto al modelo obtenido por función de transferencia, se calculó el error relativo porcentual entre ambas señales de salida, empleando la misma expresión utilizada en la validación del modelo de posición (Ecu. 17). Para ello, las dos respuestas se exportaron desde Simulink y fueron procesadas mediante un script en Matlab. El resultado del análisis muestra un error relativo máximo del 0.0029%, lo que evidencia una alta correspondencia entre ambos modelos. En la Fig. 21 se presenta la comparación de las respuestas temporales y la evolución del error relativo porcentual. En la gráfica superior se observa una superposición casi perfecta entre la curva de la función de transferencia y la del modelo Simscape, confirmando la precisión del modelado. La gráfica inferior, por su parte, cuantifica esta coincidencia mediante el error relativo, donde se confirma visualmente que la magnitud del error se mantiene en un valor insignificante durante toda la simulación. Esto demuestra la consistencia y validez del modelo implementado. Figura 20. Comparación de la respuesta del modelo de velocidad en lazo abierto y error relativo porcentual entre la función de transferencia y el modelo Simscape. 31 A continuación, en la fig. 22, se presenta la respuesta de la planta en lazo cerrado ante una entrada tipo escalón de amplitud 9, la cual corresponde al valor de referencia establecido para el sistema. Figura 21. Respuesta de la planta de velocidad en lazo cerrado en Matlab/Simulink con entrada tipo escalón de amplitud 9 c. Selección adecuada del tiempo de muestreo Para el sistema de control de velocidad, se llevó a cabo el mismo procedimiento descrito en la sección de selección del periodo de muestreo aplicado previamente al sistema de posición. De igual manera, se evaluaron los cuatro criterios establecidos con el fin de determinar un tiempo de muestreo adecuado que garantizara un buen desempeño y una representación precisa de la dinámica discreta del sistema. La obtención de los parámetros ω_c y k_p se realizó siguiendo el mismo procedimiento mostrado en la Fig. 9, a partir del análisis del diagrama de Bode del modelo continuo en lazo cerrado. Como resultado, se obtuvo $\omega_c = 6.0409 \text{ rad/s}$ y $k_p = 0.7130$ segundos. Una vez determinados estos valores, se procedió a evaluar nuevamente los cuatro criterios de selección, a partir de los cuales se definió un tiempo de muestreo final de 0.01 segundos, considerado el más adecuado entre las opciones analizadas. d. Discretización del sistema dinámico Para la discretización del modelo de velocidad, se empleó el mismo procedimiento descrito en la Figura 10, correspondiente al proceso de discretización utilizado en el modelamiento de posición. A continuación, se presenta la función de transferencia discretizada obtenida para la planta. $0.02124Z^2 + 0.04247Z + 0.02124 A_1(x) =$

1.02122 – 0.312 – 0.6215 (32) 32 e. Diseño del controlador discreto Para el modelo de velocidad del motor DC, el controlador digital se diseñó siguiendo el mismo procedimiento aplicado en el sistema de posición, empleando la herramienta PID Tuner de Matlab/Simulink. Esta permite realizar la sintonización del controlador en el dominio discreto considerando el periodo de muestreo previamente definido. Mediante dicha herramienta se ajustaron automáticamente los parámetros de ganancia K_p, K_i y K_d. En la Tabla 2 se presentan los valores finales de los parámetros obtenidos para el controlador discreto del motor DC de velocidad. Tabla 2. Parámetros de sintonización del controlador PID discreto para el sistema de velocidad. Parámetros del controlador discreto PID para el sistema de posición Parámetro Símbolo Valor obtenido Ganancia proporcional K_p 0.9613 Ganancia integral K_i 1.3635 Ganancia derivativa K_d -0.0016 Coeficiente del filtro derivativo N 589.7114 De la misma manera, se obtuvo la función de transferencia del controlador en MATLAB mediante el cálculo explícito de los términos proporcional, integral y derivativo (con filtro), utilizando para ello funciones de transferencia en el dominio discreto, siguiendo el flujo establecido en la Figura 14. $PAA(Z) = -1.752c^{-5Z+2} + 5.683Z^{-5} - 5.602Z^2 + 3.897Z - 4.897$ (33) Una vez obtenidos los modelos discretos de la planta y del controlador para la variable de velocidad, se procede a la implementación del sistema en lazo cerrado en Matlab/Simulink, con el propósito de verificar su comportamiento ante perturbaciones y evaluar la capacidad del control para retomar el seguimiento a la referencia establecida. En este caso de estudio, la señal de Perturbación se generó en Simulink mediante un bloque tipo escalón, injectado de forma aditiva justo después del controlador, tal como se realizó en el caso de posición mostrado previamente en la Fig. 19. Esta perturbación representa un cambio repentino que provoca una desviación transitoria en la velocidad del eje, permitiendo analizar la capacidad de rechazo del controlador discreto y su efecto sobre la recuperación estable de la consigna del sistema. En la Fig. 22 se presenta la respuesta simulada del sistema de velocidad discretizado bajo control PID. En la gráfica se observa que el sistema responde de forma rápida ante la referencia. La curva presenta un sobreimpulso moderado, propio de un controlador diseñado para priorizar rapidez en la transición inicial, y se aprecia cómo el sistema reacciona frente a la perturbación aplicada. Después de este cambio, la señal desciende suavemente y converge nuevamente hacia el valor deseado, evidenciando que el controlador logra estabilizar el sistema sin generar oscilaciones sostenidas. 33 Perturbación (0.5 rad) Figura 22. Respuesta discreta del sistema de velocidad controlado, simulada en MATLAB/Simulink, ante una entrada escalón de 9 y la presencia de una perturbación. f. Implementación del Sistema HIL en la Tarjeta LaunchPad C2000 - Configuración para velocidad con Control Núcleo 1 (Control): En el Núcleo 1 se ejecuta el controlador PID discretizado, encargado de regular la velocidad del motor de corriente directa (DC). Este calcula la acción de control a partir del error entre la referencia de velocidad y la realimentación proveniente del Núcleo 2. Para mantener el rango de operación adecuado del sistema, se incorporan un offset de compensación y un bloque de saturación, encargados de ajustar y limitar la señal de salida del controlador antes de ser enviada físicamente al Núcleo 2 a través del canal DAC (pin 30). De igual forma, el Núcleo 1 recibe físicamente la señal de realimentación de velocidad mediante el canal ADC (pin 24), cerrando así el lazo de control, como se observa en la Fig. 4. La estructura implementada para este núcleo sigue el mismo esquema empleado en el sistema de posición, mostrado en la Fig. 17. Núcleo 2 (Planta discretizada): Este núcleo implementa el modelo discreto de la planta de velocidad del motor DC, representado mediante su función de transferencia digital. Recibe como entrada la señal de control generada por el Núcleo 1 a través del canal ADC (pin 25), la cual es previamente escalada y comprensionada para adaptarse al rango de entrada del modelo. La estructura implementada en este núcleo corresponde a la misma mostrada en la fig. 18, utilizada para el sistema de posición, manteniendo la coherencia en el esquema de comunicación y procesamiento entre los núcleos. La dinámica del sistema se procesa considerando la inclusión de una perturbación, con el fin de evaluar el desempeño del controlador ante variaciones externas. La señal de velocidad simulada resultante es limitada y enviada nuevamente al Núcleo 1 mediante el canal DAC (pin 70), completando el ciclo de realimentación del sistema de control de velocidad. El sistema HIL con control de velocidad fue validado experimentalmente, comprobándose su correcto funcionamiento y la comunicación efectiva entre los núcleos. En las mediciones obtenidas mediante el osciloscopio se observó una respuesta estable y coherente con la referencia de velocidad establecida, manteniendo un comportamiento controlado frente a la perturbación introducida. Las señales experimentales, capturadas con el osciloscopio y exportadas en formato CSV, se procesaron y filtraron en MATLAB para atenuar el ruido de 34 medición y facilitar el análisis de la respuesta.

temporal del sistema. La respuesta filtrada obtenida exhibió una concordancia notable con el comportamiento dinámico teórico previsto, el cual se presenta en la Figura 22. Los resultados de estos datos previamente obtenidos del osciloscopio y seguidamente procesados se muestran fig. 23 muestra la respuesta del sistema de velocidad en lazo cerrado, presentando tanto la señal sin filtrar como la señal filtrada, permitiendo apreciar el efecto del proceso de filtrado sobre el comportamiento dinámico registrado. La respuesta experimental exhibe un sobreimpulso aproximado de 3 V tras el arranque, seguido de la desviación causada por la perturbación. Posteriormente, la salida inicia un proceso de asentamiento hasta estabilizarse en un valor final de 2.5 V. Este voltaje de salida corresponde al valor de referencia establecido de 9 rad/s, de acuerdo con la relación de escalamiento implementada en el sistema HIL, confirmando así el correcto funcionamiento del lazo de control. Figura 23. Señal experimental del sistema de velocidad en lazo cerrado con control: comparación entre la señal sin filtrar y la señal filtrada. 2.2.4. CASO 4: Sistema de Control de Presión en la Transferencia de Crudo El presente caso corresponde a un sistema dinámico de control de presión basado en una aplicación industrial del sector petrolero. A diferencia de los demás casos desarrollados en este trabajo, este sistema constituye un caso especial, ya que el modelamiento matemático y la caracterización dinámica de la planta no fueron elaborados por nosotros, sino que se adoptan del trabajo de grado desarrollado por Henry Alberto Salamanca Gallo, titulado "Diseño del sistema de instrumentación y control para una bancada de transferencia de muestras de crudo de alta presión" [47]. Este trabajo previo resulta de particular interés, dado que aborda un proceso real de la industria petrolera: la transferencia de muestras de crudo bajo condiciones de alta presión, en un entorno controlado y certificado, diseñado para preservar las propiedades fisicoquímicas del fluido y garantizar la seguridad operativa del personal. El sistema físico original se compone principalmente de una bancada hidráulica que integra dos válvulas de 35 control, un conjunto de sensores de presión y temperatura, un cilindro de almacenamiento y un circuito hidráulico de transferencia. La Figura 25 presenta el esquema general del sistema físico utilizado para el proceso de transferencia de crudo. De manera general, el proceso se desarrolla de la siguiente forma: El sistema mostrado en la Fig. 24 ilustra el proceso de transferencia, el cual inicia cuando la bomba genera la presión de entrada registrada por el manómetro 1. Esta presión actúa sobre el fluido contenido en el muestreador, permitiendo su desplazamiento a través de la válvula 1, que permanece abierta durante toda la operación. Una vez el fluido atraviesa esta válvula, ingresa al cilindro de almacenamiento, donde es depositado. Dicho cilindro incorpora un pistón móvil que separa físicamente el volumen correspondiente al crudo del volumen de agua, tal como se observa en la Figura 24, para facilitar la comprensión de su función dentro del proceso. A medida que el crudo entra al cilindro, el pistón se desplaza y transmite este movimiento al volumen de agua situado en la sección opuesta, obligando su salida a través de la válvula 2, cuya apertura regula el caudal de descarga. Bajo este principio mecánico, la transferencia de crudo se realiza manteniendo una presión interna superior a la especificada por el cliente, lo que garantiza que el proceso se lleve a cabo de manera continua y estable [47]. A continuación, se presenta la Fig. 24, la cual muestra el esquema general del sistema físico utilizado para llevar a cabo el proceso de transferencia de crudo descrito en el trabajo [47]. Dicho sistema se representa mediante un diagrama P&ID (Piping and Instrumentation Diagram), que constituye el lenguaje técnico estándar para la representación de procesos industriales, conforme a la norma ISA 5.1, la cual establece la simbología y las convenciones utilizadas en sistemas de tuberías e instrumentación [48]. Pistón Figura 24. Diagrama P&ID del sistema físico para el proceso de transferencias de crudo [47]. 36 El trabajo de Salamanca propone un modelo matemático basado en la analogía hidráulico-eléctrica, donde la presión se representa como una variable análoga al voltaje y el caudal al flujo de corriente. A partir de este enfoque, se derivan las ecuaciones diferenciales del sistema y se obtiene una función de transferencia que describe la dinámica de la presión en el cilindro de almacenamiento en función de la apertura de la válvula de control. Dicho modelo fue validado a partir de los parámetros físicos del sistema real y de simulaciones que evidencian un comportamiento de primer orden, con una respuesta estable y coherente con las condiciones operativas del proceso. En el contexto del presente trabajo, este sistema se toma como caso de estudio para implementar una plataforma HIL, con el propósito de llevar el modelo previamente validado a un entorno experimental que permita observar la dinámica del sistema en tiempo real, evaluar la respuesta frente a diferentes configuraciones de control, e introducir perturbaciones que permitan analizar la robustez del sistema ante variaciones de parámetros o condiciones anómalas. Es importante resaltar que el objetivo de este caso no es replicar el modelamiento original, sino extenderlo hacia una validación experimental mediante técnicas HIL, preservando en todo momento los créditos académicos correspondientes al autor del modelo de referencia.

a. Modelamiento del sistema dinámico Para el desarrollo de este caso de estudio, se adopta el modelo matemático del sistema de presión presentado en el trabajo de referencia. A continuación, se presenta la descripción física y definición de variables del sistema. Descripción Física y Definición de Variables El sistema físico, representado en la Fig. 24, se compone de un muestreador, un cilindro de almacenamiento y dos válvulas de control (V1 y V2). Para modelar matemáticamente la dinámica de la presión, el trabajo de referencia simplifica el sistema centrándose en el cilindro de almacenamiento y utiliza la analogía hidráulico-eléctrica. Esta analogía permite tratar el sistema de fluidos como un circuito análogo, donde:

- La Presión (P) es equivalente al Voltaje.
- El Caudal (k) es equivalente a la Corriente.
- Una Válvula que restringe el flujo actúa como una Resistencia (P).
- Un Tanque que almacena fluido actúa como un Capacitor (A).

Para una comprensión clara del modelamiento, se definen las siguientes variables clave del sistema 37 Tabla 3. Definición de variables para el modelamiento del sistema de presión representado en la figura Variable Descripción P1 Presión en la entrada del sistema, generada por la bomba. P2 Presión en el interior del cilindro de almacenamiento (variable de salida a controlar). q1 Caudal de fluido que entra al cilindro a través de la V1. q0 Caudal de fluido que sale del cilindro a través de la V2 hacia el drenaje. R1, R2 Resistencia hidráulica que oponen las V1 y V2 al flujo, respectivamente. C2 Capacidad hidráulica del cilindro de almacenamiento. Derivación de las Ecuaciones del Sistema Se plantean las cuatro ecuaciones fundamentales que rigen la dinámica del sistema. Para mayor claridad, el proceso se divide en dos partes: el comportamiento del muestreador y el comportamiento del cilindro de almacenamiento. Comportamiento del Muestreador (Primer Tanque) • El caudal k_1 que sale del muestreador y se dirige hacia la Válvula 1 está determinado por la capacidad del propio muestreador para cambiar su presión interna. Esto se modela como un capacitor hidráulico (A1): $cP1 k_1 = A1 (34)$ ck El caudal k_1 es proporcional a la velocidad con la que cambia la presión P1 en el muestreador. Si la presión P1 está aumentando rápidamente, un mayor caudal k_1 está siendo forzado a salir. Comportamiento del Cilindro de Almacenamiento (Segundo Tanque) • La caída de presión entre la salida del muestreador ($P1$) y el interior del cilindro ($P2$) es causada por la resistencia que opone la Válvula 1 (R1) al paso del caudal k_1 (Ley de Ohm para fluidos): $P1 - P2 = P1 * k_1 (35)$ • Dentro del cilindro, la diferencia entre el caudal de entrada (k_1) y el de salida (k_0) determina la tasa de cambio de la presión $P2$. Si entra más caudal del que sale, la presión aumenta. Esto se modela con la capacitancia hidráulica del cilindro (A2): $cP2 k_1 - k_0 = A2 (36)$ ck 38.

Finalmente, la presión $P2$ en el cilindro es la "fuerza" que impulsa el caudal de salida (k_0) a través de la Válvula 2 ($P2$), hacia el drenaje a presión atmosférica: $P2 = P2 * k_0 (37)$ El propósito es hallar una función de transferencia del sistema tal que permita desarrollar un modelamiento posterior y analizar el comportamiento de dicho sistema en lazo abierto y ante una entrada escalón que equivale para este caso particular al valor deseado de presión a la cual se quiere realizar la transferencia de la muestra. Se inicia expresando las ecuaciones de la planta en el dominio de Laplace. De la ecuación (29): $P1(k) = A1 * P * P1(k)$ De la ecuación (30): $P1(k) - P2(k) = P1 * P1(k)$ De la ecuación (31): $P1(k) - P0(k) = A2 * P * P2(k)$ De la ecuación (32): $P2(k) = P2 * P0(k) (38) (39) (40) (41)$ Para lograr obtener dicha función se sigue el método de diagramas de flujo en base al modelo del sistema en diagramas de bloques, teniendo en cuenta que la función de transferencia final debe estar expresada como presión de salida sobre presión de entrada. Constant Gain Gain1 1/s Gain2 Figura 25. Diagrama de bloques del modelo de la planta. Es posible migrar del diagrama de bloques que representa el modelo de la planta a un diagrama de flujo que permite un manejo más sencillo del modelo con el fin de obtener la función deseada; para ello es necesario tener en cuenta la trayectoria de flujo principal y los lazos que se evidencian en el sistema. 39 Figura 26. Diagrama de flujo equivalente. El paso por seguir consiste en hallar el valor de la trayectoria principal y los lazos del modelo descrito por el diagrama de la figura 31; para esto es importante tener en cuenta el valor de cada una de las ganancias con su respectivo signo, de esta forma: Trayectoria principal M camino desde $P1$ hasta $P2$: $A = 1 * 1 * 1 P1 A2P A = 1 P1A2P$ Y los lazos evidenciados L1 y L2 son

respectivamente: Se forma al retroalimentar la salida hacia la entrada a través de la válvula 2: $A1 = 1 P2A2P$ Corresponde a la realimentación generada a por la caída de presión en R1: $A1 = 1 P1A2P (42) (43) (44)$ Se hallan ahora los Δ general y de ganancia, para lo cual es necesario considerar las ganancias de las mallas o lazos individuales, el producto de las mallas que no se tocan y las ganancias para la trayectoria que no toque la trayectoria principal M. La Regla de Mason define: $\Delta = 1 - (A1 + A2) \Delta = 1 + 1 + 1 P2A2P P1A2P$ No hay lazos no tocantes, por tanto: $\Delta = 1 - 0 (45) (46) 40$ Y para obtener la función de transferencia de interés, el método de diagramas de flujo utilizado establece que: $P2(k) * \Delta * AP = P1(k) \Delta$ Sustituyendo ecuaciones 42, 45 y 46: $P2(k) = P1A2P * 1 1 P1(k) (P1P2A2P) P2 + (P1A2P) (P1P2A2P) P2$ Operando la ecuación 48: $P2(k) * P2 * A2 P1(k) (P1P2A2P) P + (A2P1 + A2P2) = (47) (48) (49)$ Se aplica la sustitución de los parámetros en la función de transferencia. $A1 = 0.238c - 6 A2 = 0.98c - 6 P1 = 306.0093c3 P2 = 306.0093c3 AzkZckZkciZ hickákkicZ 1 (m3/PZ) AzkZckZkciZ hickákkicZ 2 (m3/PZ) PckikkckciZ hickákkicZ 1 (PZ * k/m3) PckikkckciZ hickákkicZ 2 (PZ * k/m3) P2(k) 0.2999 P1(k) 0.08993k + 0.5998 = (50)$

Una vez realizado el modelamiento del sistema y reemplazados los parámetros obtenidos directamente del trabajo de referencia, se procede a la conformación de la función de transferencia correspondiente. A partir de esta, se lleva a cabo la simulación del comportamiento dinámico del sistema en el entorno MATLAB/Simulink, con el propósito de analizar su respuesta temporal y validar el modelo propuesto. b. Validación del modelo A continuación, en la fig. 27 se muestra la respuesta de la planta en lazo abierto ante una entrada tipo escalón. Esta simulación permite observar el comportamiento natural del sistema de presión, evidenciando su dinámica propia sin la intervención de ningún controlador. 41 Figura 27. Respuesta continua de la planta de presión en lazo abierto ante una entrada tipo escalón en Matlab/Simulink. Una vez analizada la dinámica de la planta de presión, se presenta en la Fig. 28 la respuesta del sistema en lazo cerrado ante una entrada escalón de 3500 PSI, que corresponde al valor de referencia establecido. Como se observa, la salida no alcanza dicha referencia, estabilizándose por debajo de los 1200 PSI. Este error se debe a la ausencia de un controlador que corrija la diferencia entre la salida y la referencia deseada. Figura 28. Respuesta continua de la planta de presión en lazo cerrado con entrada tipo escalón de amplitud 3500 en Matlab/Simulink. c. Selección adecuada del tiempo de muestreo Para la selección del tiempo de muestreo en el sistema de velocidad, se aplicó el mismo procedimiento utilizado en el sistema de posición, siguiendo los criterios definidos en la metodología general. A partir del procedimiento mostrado en la Fig. 9, se determinaron los valores de $w_c = 10$ y $k_p = 0.3910$, los cuales sirvieron como base para la evaluación de los cuatro criterios de selección. 42 Finalmente, se adoptó un tiempo de muestreo de 0.01 segundos, considerando un intervalo adecuado que cumple con los criterios establecidos y garantiza una representación discreta del sistema. d. Discretización del sistema dinámico Para la discretización del modelo de presión, se empleó el mismo procedimiento descrito en los anteriores casos, figura 10 a 10. A continuación, se presenta la función de transferencia discretizada. $0.001662Z + 0.001662 A1(x) = 1.002Z - 0.9917 (51)$ e. Diseño del controlador discreto En el trabajo de referencia desarrollado [47], el diseño del controlador se realizó mediante el método de asignación de polos. A partir del modelo en lazo abierto obtenido, se determinó que la estructura de control más adecuada correspondía a un controlador de tipo proporcional-integral (PI), cuyos parámetros fueron calculados como: $A_k = 6.156 * A_i = 161.232$ Estos valores fueron implementados en el entorno de Simulink mediante el bloque Discrete PI Controller, con el fin de observar el comportamiento del sistema en lazo cerrado bajo control continuo y posteriormente validar su desempeño en forma discreta. Tabla 4. Parámetros del controlador PI obtenidos por el método de asignación de polos Parámetros del controlador discreto PI para el sistema de presión Parámetro Símbolo Valor

Obtenido Ganancia proporcional $K_p = 6.156$ Ganancia integral $K_i = 161.232$ Adicionalmente tomando como base dichos parámetros, como en los casos anteriores, también se procedió a realizar la discretización del controlador empleando las herramientas de MATLAB siguiendo el flujo establecido en la Figura 16. $PA(Z) = 6.156Z - 5.995 Z - 1 (52)$ Una vez obtenidos los modelos discretos de la planta de presión y del controlador discreto, se procedió a la implementación del sistema en lazo cerrado en Matlab/Simulink,

con el propósito de evaluar su comportamiento frente a perturbaciones externas y verificar la capacidad del control para restablecer la presión de referencia definida para el proceso de transferencia. Siguiendo el mismo enfoque aplicado en los casos de posición y velocidad, la perturbación se inyectó de forma aditiva después del controlador, como se observa en la Fig. 15. Teniendo en cuenta que para este caso se utilizó un control PI. Esta perturbación se generó específicamente mediante un bloque tipo escalón, configurado para representar una variación abrupta y sostenida de carga hidráulica o par resistente equivalente sobre la línea de proceso, la cual provoca una desviación transitoria en la presión de salida del sistema y permite analizar de forma clara la capacidad de rechazo a perturbaciones del lazo discreto implementado. La respuesta del sistema ante la referencia de presión y la perturbación escalón aplicada se presenta en la Fig. 29. Se aprecia que, durante el intervalo en el que actúa la perturbación, la presión de salida experimenta una desviación transitoria respecto a la referencia, lo cual emula el efecto de un aumento repentino de carga hidráulica en el circuito. A pesar de esta alteración, el controlador discreto regula la señal de control para compensar el error generado, permitiendo que el sistema recupere progresivamente el seguimiento y que la presión retorne de manera estable al valor de referencia. Perturbación (2500 PSI) Figura 29. Respuesta discreta del sistema de velocidad controlado, simulada en Matlab/Simulink, ante una entrada escalón de 3500 y la presencia de una perturbación. f. Implementación del sistema HIL en la tarjeta LaunchPad C2000 – Configuración para velocidad con Control Núcleo 1 (Control): La Fig. 30 muestra la implementación del Núcleo 1, en el cual se desarrolla el controlador PI discretizado, encargado de regular la presión del sistema a partir del error calculado entre la referencia y la señal de realimentación proveniente del Núcleo 2. La salida del controlador se ajusta mediante un bloque de compensación (offset) y se limita a través de una saturación para garantizar que la señal se mantenga dentro del rango operativo del sistema. Posteriormente, esta señal es enviada por el canal DAC (pin 30) hacia el Núcleo 2, mientras que el Núcleo 1 recibe la realimentación del proceso mediante un canal ADC (pin 24), cerrando así el lazo de control de presión. 44 Set P(Z) Escalamiento Conversor DAC Point para el DAC Saturación (salida analógica) Pin 30 offset Escalamiento Conversor ADC para el ADC (entrada analógica) Pin 24 Figura 30. Implementación del controlador PI - Núcleo 1 Núcleo 2 (Planta discretizada): en este núcleo se ejecuta el modelo discreto de la planta de presión, representado por su correspondiente función de transferencia digital. Recibe la señal de control proveniente del Núcleo 1 a través del canal ADC (pin 25), la cual se escala y compensa para adaptarse al rango de entrada del modelo. El sistema simula la dinámica de la presión, incorporando una perturbación con el fin de analizar la respuesta del control ante variaciones externas. Finalmente, la presión simulada es limitada mediante un bloque de saturación y enviada al canal DAC (pin 70), retornando al Núcleo 1 para completar el ciclo de realimentación del sistema. La estructura implementada en este núcleo para el sistema de presión es la misma presentada en la Fig. 18, lo que permite conservar la coherencia en el esquema de comunicación y procesamiento entre los diferentes núcleos. El sistema HIL implementado para el control de presión fue verificado experimentalmente, evidenciando un desempeño estable y una adecuada sincronización entre los núcleos. Durante las pruebas realizadas, las señales capturadas en el osciloscopio reflejaron una respuesta consistente con la referencia establecida, conservando la estabilidad del sistema aun ante la perturbación aplicada. Posteriormente, los datos obtenidos del osciloscopio fueron exportados en formato CSV y procesados en Matlab, donde se aplicaron técnicas de filtrado y visualización que permitieron analizar con mayor precisión la evolución temporal de la señal. Los resultados coincidieron con el comportamiento dinámico teórico de la planta previsto en la Fig. 29, confirmando la correcta implementación del esquema de control. La Fig. 31 presenta la respuesta del sistema de posición en lazo cerrado bajo control, mostrando tanto la señal experimental sin filtrar como la señal filtrada. En la gráfica se observa un sobreimpulso cercano a 3 V durante el arranque, seguido de la respuesta frente a la perturbación aplicada. Posteriormente, la salida inicia su proceso de asentamiento hasta estabilizarse en 2.5 V, alcanzando el nivel final esperado para la operación del sistema. 45 Figura 31. Respuesta experimental sin filtrar del sistema de presión con control implementado en configuración HIL. 46 3 Evaluación del Sistema HIL, Resultados, Conclusiones y Trabajos Futuros Este capítulo presenta la evaluación de la plataforma desarrollada y el análisis de los resultados obtenidos en las implementaciones realizadas. A partir de estos hallazgos, se plantean las conclusiones, recomendaciones y lineamientos para trabajos futuros del proyecto. 3.1 Evaluación del Sistema HIL en un Entorno Educativo Esta fase del proyecto tuvo como propósito validar el uso educativo del entorno HIL desarrollado, evaluando su efectividad como herramienta de apoyo en los procesos de enseñanza y aprendizaje de ingeniería electrónica. Para ello, se implementó una experiencia práctica en el curso Sistemas Dinámicos del programa de Ingeniería Electrónica de la Universidad Surcolombiana, con el fin de analizar la forma en que los estudiantes comprenden y aplican los conceptos teóricos de modelamiento y simulación al interactuar con un sistema real en tiempo real. La validación se realizó a través de una guía de laboratorio diseñada específicamente para este propósito, basada en el Caso 1: Posición de un motor DC en lazo cerrado sin control. Este caso fue seleccionado por ser el más adecuado para estudiantes que aún no han cursado asignaturas de control, ya que permite comprender el comportamiento dinámico de un sistema físico sin la necesidad de implementar algoritmos de control. 3.1.1 Diseño de la experiencia educativa Para evaluar el potencial educativo del entorno HIL, se diseñó una experiencia de laboratorio estructurada y guiada, cuyo propósito fue integrar los conceptos teóricos del curso Sistemas Dinámicos con una práctica experimental de simulación en tiempo real. La experiencia se desarrolló con la tarjeta de desarrollo y el entorno Matlab/Simulink, permitiendo a los estudiantes interactuar directamente con un sistema físico simulado. La práctica se organizó en torno al Caso 1: Posición de un motor DC en lazo cerrado sin control, utilizando el modelo matemático previamente obtenido en el desarrollo del proyecto. A través de esta experiencia, los estudiantes pudieron visualizar el comportamiento dinámico del motor y analizar su respuesta temporal ante una entrada tipo escalón. 3.1.1 Estructura de la guía de laboratorio La guía se organizó en cuatro secciones fundamentales que guiaron el proceso de aprendizaje, cuyo desarrollo se muestra en la Fig. 32. Introducción al entorno HIL y contexto teórico Modelamiento del motor de posición DC Implementación del entorno HIL Análisis y validación de resultados Figura 32. Diagrama general de la guía de aprendizaje. 47 1. Introducción al entorno HIL y contexto teórico: En esta parte se explicó el principio del HIL y su importancia en la simulación de sistemas dinámicos. Los estudiantes comprendieron cómo el entorno HIL permite conectar el modelo matemático de un sistema con un hardware en tiempo real, observando efectos prácticos como retardos y limitaciones del equipo. 2. Modelamiento del motor de posición DC: Los estudiantes implementaron la función de transferencia del motor de corriente directa en Simulink, utilizando los parámetros asignados para cada grupo. Posteriormente, construyeron un modelo equivalente en Simscape, con el fin de comparar ambas respuestas y verificar que el modelo matemático describiera adecuadamente la dinámica del sistema. 3. Implementación del entorno HIL: En esta etapa, se configuró la tarjeta LaunchPad C2000 F28379D en dos núcleos. • El Núcleo 1 ejecutó el modelo del setpoint y el lazo de retroalimentación. • El Núcleo 2 ejecutó el modelo de la planta (función de transferencia). La conexión física entre ambos núcleos se realizó conforme a la configuración mostrada en la Fig. 4, la cual detalla el intercambio de señales entre los convertidores DAC y ADC de cada núcleo. Una vez cargados ambos modelos, los estudiantes visualizaron la salida del sistema en el osciloscopio, comparándola con la simulación offline obtenida en Simulink. 4. Análisis y validación de resultados: Los participantes observaron la respuesta al escalón del sistema, identificando su comportamiento característico. Luego, compararon las respuestas obtenidas por ambos modelos (Simulink y Simscape) y las señales registradas en el entorno HIL, comprobando la coherencia entre la simulación matemática off-line y la implementación en tiempo real. 3.1.3 Metodología de aplicación La experiencia se aplicó en dos secciones de laboratorio, con un total de 26 estudiantes, organizados en 13 parejas de trabajo. A cada grupo se le asignaron parámetros distintos del motor, lo que permitió comparar diferentes respuestas dinámicas y analizar la influencia de las variables físicas sobre el desempeño del sistema. Durante esta fase, se explicó la relación entre el voltaje obtenido en la salida, la señal de entrada y la posición angular del sistema, permitiendo a los estudiantes comprender de forma experimental cómo se produce la dinámica del motor en tiempo real. Además, se llevó a cabo todo el procedimiento de implementación HIL junto con los estudiantes, observando las señales resultantes en el osciloscopio y comparando su comportamiento con el modelo offline. Finalmente, cada pareja completó un formulario de evaluación, diseñado para recopilar sus percepciones sobre la claridad de la guía, el nivel de comprensión de los conceptos, la utilidad del entorno HIL y su aporte al aprendizaje práctico de los sistemas dinámicos. 48 3.1.4 Resultados de la aplicación educativa Para evaluar la efectividad del entorno HIL, se aplicó un cuestionario a los 26 estudiantes que participaron en la práctica "Implementación y Evaluación de un Entorno HIL en un Sistema Dinámico de Posición". De este grupo, 22 respondieron la encuesta, la cual se incluye en los anexos. El instrumento permitió evaluar el nivel de comprensión conceptual de los estudiantes, la utilidad percibida del entorno HIL, la relación entre teoría y práctica, y la valoración general de la experiencia. Las respuestas se calificaron en una escala de 1 a 5, donde 1 representa un nivel muy bajo y 5 un nivel muy alto de acuerdo o comprensión. A continuación, la Tabla 5 presenta un resumen de los resultados más significativos obtenidos en la evaluación. Tabla 5. Resumen de resultados de la aplicación educativa Resumen de resultados de la aplicación educativa Aspecto evaluado Resultado Interpretación Comprensión del concepto de HIL y su relevancia en la simulación 91% de los estudiantes manifestó un nivel alto o excelente de comprensión del concepto; 9% reportó comprensión moderada. La práctica permitió asimilar el propósito del HIL como herramienta que vincula la simulación con el hardware en tiempo real, fortaleciendo la comprensión conceptual. Análisis comparativo y experimentación (Simulink vs entorno HIL) 95,5% alcanzó niveles 4 o 5 en la comparación de respuestas; 4,5% presentó dificultades leves en la interpretación de señales. Se evidenció una alta capacidad para relacionar los resultados de simulación con los del entorno físico, lo que favorece la comprensión del comportamiento dinámico real. Visualización de fenómenos reales (retardos, ruido, limitaciones del hardware) 86,4% estuvo de acuerdo o totalmente de acuerdo en percibir estos fenómenos; 13,6% no los identificó con claridad. La mayoría logró visualizar los efectos reales presentes en el hardware, aunque algunos estudiantes no los apreciaron completamente. Integración teoría-hardware 90,9% valoró positivamente la conexión entre el modelado teórico y el hardware real; 9,1% manifestó comprensión intermedia. El entorno HIL fue percibido por los estudiantes como una herramienta formativa valiosa para el ámbito académico, con alta aplicabilidad en cursos avanzados del programa de Ingeniería Electrónica. Motivación y aprendizaje práctico 100% expresó mayor motivación al observar señales en tiempo real; 90,9% valoró positivamente el uso de la tarjeta LaunchPad C2000; 9,1% consideró necesario más tiempo de experimentación. La experiencia fue altamente motivadora, y la observación directa de la señal en el osciloscopio generó una percepción tangible del aprendizaje práctico. Retroalimentación cualitativa (respuestas abiertas) 100% de los comentarios fueron positivos, destacando la conexión teoría-práctica, la accesibilidad y la experimentación directa. Los estudiantes resaltaron la utilidad pedagógica del entorno HIL como medio para comprender fenómenos reales de forma segura y accesible. Dificultades reportadas 81,8% no reportó inconvenientes; 18,2% señaló dificultades menores relacionadas con la configuración del entorno o el uso de herramientas. Las complicaciones fueron principalmente técnicas y atribuibles a la familiarización inicial con MATLAB/Simulink y la tarjeta LaunchPad. 49 A partir de los resultados resumidos en la Tabla 5, se puede realizar un análisis más detallado de los principales hallazgos observados en cada uno de los aspectos evaluados. En general, los datos reflejan una percepción positiva del entorno HIL como herramienta formativa. • La gran mayoría compridió la naturaleza y la relevancia del HIL para vincular modelos y hardware en tiempo real (91% con niveles altos). Esto indica que la práctica cumple su objetivo pedagógico básico: acercar el concepto HIL a los estudiantes. • La capacidad para comparar la respuesta simulada en Simulink con la respuesta registrada en el entorno HIL fue especialmente alta (95,5% en los niveles superiores), lo que sugiere que el laboratorio favorece el aprendizaje experiencial y la validación práctica de modelos. • La visualización de fenómenos reales (retardos, ruido y limitaciones del hardware) fue percibida como valiosa por la mayoría (86,4%), aunque una minoría (13,6%) no percibió estos efectos de forma nítida, cuestión que puede depender de la configuración experimental o del tiempo dedicado a la observación. • La integración teoría-hardware y la preparación profesional fueron altamente valoradas (90,9% de acuerdo), lo que posiciona al HIL como herramienta formativa pertinente para cursos del programa más avanzados. • En cuanto a motivación y experiencia práctica, la observación en tiempo real fue un factor motivador universalmente valorado, y la tarjeta LaunchPad recibió una valoración positiva mayoritaria (90,9%); no obstante, algunos estudiantes (9,1%) solicitaron más tiempo de experimentación. • Los comentarios cualitativos fueron unánimemente positivos (100%): destacaron la conexión teoría-práctica, la accesibilidad de la plataforma y el carácter motivador del aprendizaje tangible. La mayoría (81,8%) no reportó dificultades; el 18,2% reportó dificultades menores relacionadas con la configuración inicial del entorno HIL o la familiaridad con las herramientas. 3.1.5 Análisis y discusión de resultados Los resultados obtenidos en la evaluación educativa

reflejan que el entorno HIL implementado cumple efectivamente con su propósito formativo dentro del curso Sistemas Dinámicos. La alta valoración por parte de los estudiantes demuestra que la metodología favorece la comprensión conceptual, la observación práctica y la conexión entre teoría y hardware, lo que coincide con los principios del aprendizaje experiencial en ingeniería. La percepción positiva generalizada (superior al 85% en la mayoría de los ítems) evidencia que el uso del entorno HIL potencia el aprendizaje activo al permitir la experimentación directa con sistemas reales en un entorno controlado. Por otro lado, las respuestas minoritarias que evidenciaron dificultad en la comprensión del concepto o en la interpretación de señales físicas indican que la familiarización con el entorno técnico requiere una base previa en Sistemas Dinámicos. Esto resalta la importancia de introducir actividades progresivas que fortalezcan dichos conocimientos antes de abordar los temas de control. 50 La experiencia demostró que el uso del entorno HIL no solo valida su funcionalidad técnica, sino que confirma su potencial como herramienta pedagógica accesible y efectiva para la enseñanza de sistemas dinámicos. La implementación de esta metodología contribuye significativamente a fortalecer el aprendizaje autónomo, la experimentación segura y la preparación profesional de los estudiantes frente a entornos industriales reales. 3.2 Resultados generales del proyecto Esta sección final consolida los hallazgos del proyecto, extrayendo las conclusiones derivadas tanto del desarrollo técnico como de la validación educativa. Además, se proponen recomendaciones prácticas y se delinean futuras líneas de investigación que pueden surgir a partir de este trabajo. El proyecto culminó exitosamente con la consecución de los objetivos planteados. Los resultados generales se pueden sintetizar de la siguiente manera: • Desarrollo de una Plataforma HIL Funcional y Flexible: Se desarrolló e implementó una plataforma de simulación HIL basada en la tarjeta de desarrollo. La arquitectura de doble núcleo del microcontrolador demostró ser idónea para esta aplicación, permitiendo una distribución de tareas eficiente: un núcleo se dedicó a ejecutar el controlador o la generación del set point (Núcleo 1), mientras que el otro se encargó de simular la planta dinámica en tiempo real (Núcleo 2). • Implementación Exitosa de Múltiples Casos de Estudio: Se validó la robustez y flexibilidad de la plataforma mediante la implementación de cuatro sistemas dinámicos distintos: Caso 1: Posición de un motor DC en lazo cerrado sin control. Caso 2: Posición de un motor DC con control PID. Caso 3: Velocidad de un motor DC con control PID. Caso 4: Sistema de presión de crudo con control PI, basado en un modelo de referencia. • Validación Metodológica y en Tiempo Real: Se estableció una metodología sistemática y reutilizable que incluye la selección de un tiempo de muestreo (T_s) adecuado mediante criterios técnicos y la discretización (usando el método de Tustin) para la implementación en el hardware. En todos los casos, las respuestas experimentales obtenidas del sistema HIL (monitoreadas por osciloscopio y procesadas en MATLAB) fueron coherentes con las simulaciones teóricas, validando la correcta ejecución en tiempo real. • Validación Educativa Positiva: La plataforma fue evaluada en un entorno académico real con 26 estudiantes del curso Sistemas Dinámicos. Los resultados de la evaluación (encuesta aplicada a 22 participantes) evidenciaron una alta aceptación y efectividad del entorno HIL en el proceso de aprendizaje como se observa en la tabla 5. 3.3 Conclusiones Del desarrollo y los resultados de este trabajo de grado, se desprenden las siguientes conclusiones: 51 • Se cumplió el objetivo general al desarrollar una plataforma HIL funcional que utiliza la tarjeta de desarrollo. Esta plataforma demostró ser una herramienta accesible, de bajo costo y pedagógicamente eficaz para la enseñanza de sistemas dinámicos, abordando directamente el problema de la brecha entre la teoría y la experimentación práctica en la educación en ingeniería. • La arquitectura de doble núcleo de la tarjeta de desarrollo es un recurso técnico fundamental que viabiliza la implementación de simulaciones HIL en lazo cerrado. La segregación de la planta (Núcleo 2) y el controlador (Núcleo 1) en núcleos distintos permite que ambos procesos se ejecuten en paralelo y en tiempo real sin comprometer el rendimiento computacional. • La validación educativa confirmó que la plataforma HIL transforma conceptos abstractos, como las funciones de transferencia y las respuestas dinámicas, en fenómenos físicos observables y tangibles (señales de voltaje en un osciloscopio). Esta "tangibilidad" es un factor motivacional clave y refuerza significativamente la comprensión conceptual, cumpliendo el propósito formativo del proyecto. 3.4 Recomendaciones Basado en la experiencia adquirida durante el desarrollo e implementación del proyecto, se proponen las siguientes recomendaciones orientadas a optimizar futuros trabajos y mejorar la aplicación práctica de la metodología utilizada. En primer lugar, respecto al modelamiento, se destaca la importancia de contrastar el modelo analítico, expresado mediante su función de transferencia, con un modelo físico basado en componentes utilizando herramientas como Simscape. Esta validación previa resulta un paso fundamental que permite ahorrar tiempo y asegurar que el modelo matemático a discretizar sea una representación fiel del sistema real. En cuanto a los futuros implementadores, es indispensable prestar especial atención al proceso de escalamiento de las señales entre el dominio de simulación donde las magnitudes se expresan en unidades físicas como radianes o psi y el dominio del hardware, donde las señales se representan mediante valores discretos correspondientes a los conversores ADC/DAC. El uso adecuado de las ganancias de y de los bloques de saturación resulta fundamental para evitar distorsiones en las señales y garantizar que la simulación HIL opere dentro de los rangos de voltaje físico establecidos. Por último, en lo relacionado con el diseño de la experiencia educativa, aunque la mayoría de los estudiantes (81,8%) no reportó dificultades durante la práctica, un 18,2% manifestó inconvenientes menores, principalmente asociados con la configuración del entorno de simulación o la falta de familiaridad con los procedimientos. En consecuencia, se recomienda realizar una breve sesión introductoria o proporcionar guías rápidas que describan el flujo de trabajo entre Simulink y la tarjeta de desarrollo, con el fin de reducir la curva de aprendizaje inicial y facilitar la comprensión de la herramienta. 3.5 Trabajos futuros El presente proyecto sienta una base metodológica y tecnológica que posibilita el desarrollo de múltiples líneas de expansión en el futuro. A partir de los resultados obtenidos, se plantean las siguientes direcciones de trabajo que podrían fortalecer tanto el ámbito técnico como el educativo del proyecto. 52 En primer lugar, se propone la expansión hacia sistemas más complejos, incorporando modelos dinámicos de mayor orden, no lineales o del tipo MIMO (Múltiples Entradas y Múltiples Salidas). Este enfoque permitiría evaluar la capacidad de procesamiento de la tarjeta de desarrollo bajo condiciones de simulación más exigentes, además de ampliar el conjunto de prácticas disponibles para asignaturas avanzadas de ingeniería de control, favoreciendo así la formación de competencias en el análisis y diseño de sistemas de mayor complejidad. Otra línea de desarrollo consiste en la integración con interfaces gráficas de usuario (GUI). La implementación de interfaces mediante herramientas como App Designer de Matlab permitiría una interacción más intuitiva y dinámica con la plataforma HIL. De esta manera, los estudiantes podrían modificar en tiempo real parámetros como las ganancias del controlador, los valores de referencia o la magnitud de las perturbaciones, observando de inmediato la respuesta del sistema sin necesidad de reprogramar el hardware, lo cual incrementaría la usabilidad y el valor pedagógico de la herramienta. Finalmente, se plantea la realización de un estudio educativo longitudinal que permita evaluar de forma más profunda el impacto de la plataforma en el aprendizaje. Este estudio podría desarrollarse a lo largo de varios semestres, comparando el desempeño académico de estudiantes que empleen la plataforma HIL con el de aquellos que utilicen únicamente simulación tradicional. Los resultados de dicha comparación permitirían cuantificar con mayor rigor el efecto del uso del entorno HIL en la comprensión conceptual, la retención del conocimiento y el desarrollo de habilidades prácticas en el ámbito del control de sistemas. 53 REFERENCIAS [1] "Arquitecturas de sistemas de pruebas de hardware-in-the-loop (HIL) - NI." Accessed: Nov. 02, 2025. [Online]. Available: <https://www.ni.com/es/solutions/transportation/hardware-in-the-loop/hardware-in-the-loop-hil-test-system-architectures.html> [2] F. Mihalić, M. Truntić, and A. Hren, "Hardware-in-the-Loop Simulations: A Historical Overview of Engineering Challenges," Electronics 2022, Vol. 11, Page 2462, vol. 11, no. 15, p. 2462, Aug. 2022, doi: 10.3390/ELECTRONICS11152462. [3] "What Is Hardware-in-the-Loop (HIL)? - MATLAB & Simulink." Accessed: Oct. 06, 2025. [Online]. Available: https://www.mathworks.com/discovery/hardware-in-the-loop-hil.html?utm_source [4] "What Is Hardware-in-the-Loop Simulation? | Speedgoat." Accessed: Nov. 02, 2025. [Online]. Available: https://www.speedgoat.com/solutions/testing-workflows/hardware-in-the-loop-testing/utm_source [5] M. Z. Romdlony, F. Irsyadi, M. Z. Romdlony, and F. Irsyadi, "Hardware-in-the-loop simulation of DC motor as an instructional media for control system design and testing," Journal of Mechatronics, Electrical Power, and Vehicular Technology, vol. 12, no. 2, pp. 81–86, Dec. 2021, doi: 10.14203/J.MEV.2021.V12.81-86. [6] S. Golestan, H. Golmohamadi, R. Sinha, F. Iov, and B. Bak-Jensen, "Real-Time Simulation and Hardware-in-the-Loop Testing Based on OPAL-RT ePHASORSIM: A Review of Recent Advances and a Simple Validation in EV Charging Management Systems," Energies 2024, Vol. 17, Page 4893, vol. 17, no. 19, p. 4893, Sep. 2024, doi: 10.3390/EN17194893. [7] R. F. Bastos, F. B. Silva, C. R. Aguiar, G. Fuzato, and R. Q. Machado, "Low-cost hardware-in-the-loop for real-time simulation of electric machines and electric drive," IET Electr Power Appl, vol. 14, no. 9, pp. 1679–1685, Sep. 2020, doi: 10.1049/IET-EPA.2019.0951. [8] W. Grega, "Hardware-in-the-loop simulation and its application in control education," Proceedings - Frontiers in Education Conference, vol. 2, 1999, doi: 10.1109/FIE.1999.841594. [9] A. Sala and J. Bondia, "TEACHING EXPERIENCE WITH HARDWARE-IN-THE-LOOP SIMULATION," IFAC Proceedings Volumes, vol. 39, no. 6, pp. 123–128, Jan. 2006, doi: 10.3182/20060213-ES-2905.00023. [10] "Launchpad Development Kit: Test control algorithms running on TI Launchpad Development Kits with Simulink® and Speedgoat." Accessed: Oct. 06, 2025. [Online]. Available: https://www.speedgoat.com/products/launchpad-development-kit?utm_source [11] "Closed Loop Control of Buck Converter using Hardware-In-The-Loop (HIL) Simulation - MATLAB & Simulink." Accessed: Oct. 06, 2025. [Online]. Available: https://www.mathworks.com/help/til/c2000/ug/closed-loop-hil-example.html?utm_source [12] J. Viola, C. Rodriguez, and Y. Q. Chen, "PHELP: Pixel Heating Experiment Learning Platform for Education and Research on AI-based Smart Control Engineering," 2nd International Conference on Industrial Artificial Intelligence, IAI 2020, Jul. 2020, doi: 10.1109/IAI50351.2020.9262160. [13] O. M. Abdalla, S. A. Hammad, and H. A. Yousef, "A Framework for Real Time Hardware in the loop Simulation for Control Design," Oct. 2014, Accessed: Oct. 06, 2025. [Online]. Available: <https://arxiv.org/pdf/1410.1342> [14] "Hardware-in-the-loop vs Software-in-the-loop | Key Test Methods for Engineers | Cost-effective Validation Strategies | OPAL-RT." Accessed: Oct. 06, 2025. [Online]. Available: https://www.opal-rt.com/blog/hardware-in-the-loop-vs-software-in-the-loop/?utm_source [15] "TMS320F2837xD Dual-Core Real-Time Microcontrollers," 2024, Accessed: Oct. 06, 2025. [Online]. Available: www.ti.com [16] B. Gu, "Division and integration of theory and practice," Engineering Education Review, vol. 1, no. 1, Oct. 2023, doi: 10.54844/EER.2023.0468. [17] C. Quesada, D. González, I. Alfaro, E. Cueto, A. Huerta, and F. Chinenta, "Real-time simulation techniques for augmented learning in science and engineering," Visual Computer, vol. 32, no. 11, pp. 1465–1479, Nov. 2016, doi: 10.1007/S00371-015-1134-7/METRICS. [18] O. M. Abdalla, S. A. Hammad, and H. A. Yousef, "A Framework for Real Time Hardware in the loop Simulation for Control Design," Oct. 2014, Accessed: Oct. 07, 2025. [Online]. Available: <https://arxiv.org/pdf/1410.1342> [19] J. Aravena et al., "Design and Implementation of a Low-Cost Real-Time Control Platform for Power Electronics Applications," Energies 2020, Vol. 13, Page 1527, vol. 13, no. 6, p. 1527, Mar. 2020, doi: 10.3390/EN13061527. [20] K. Ogata, "Modern Control Engineering Fifth Edition," IEEE Trans Automat Contr, vol. 17, no. 3, p. 419, 2009, Accessed: Oct. 07, 2025. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1100013> [21] "Sistemas de control | ¿Qué son y sus aplicaciones?" Accessed: Nov. 03, 2025. [Online]. Available: <https://sdindustrial.com.mx/blog/sistemas-de-control/> [22] "9.2: P, I, D, PI, PD, and PID control - Engineering LibreTexts." Accessed: Nov. 05, 2025. [Online]. Available: https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Industrial_and_Systems_Engineering/Chemical_Process_Dynamics_and_Controls_%28Woolf%29/09%3A_Proportional-Integral-Derivative_%28PID%29_Control/9.02%3A_P_I_D_PI_PD_and_PID_control?utm_source [23] "Control perfecto: propiedades del P, PI, PD y PID." Accessed: Nov. 05, 2025. [Online]. Available: <https://quimica.diaonia.com/control-perfecto-propiedades-del-p-pi-pd-y-pid/> [24] "Basics of Hardware-in-the-Loop Simulation - MATLAB & Simulink." Accessed: Oct. 07, 2025. [Online]. Available: https://www.mathworks.com/help/simscape/ug/what-is-hardware-in-the-loop-simulation.html?utm_source [25] "dSPACE Hardware-in-the-Loop Test Systems - Modular real-time systems based on SCALEXIO - Third-Party Products & Services - MATLAB & Simulink." Accessed: Nov. 05, 2025. [Online]. Available: https://la.mathworks.com/products/connections/product_detail/dspace-hil-test.html?utm_source [26] "Choose a Solver - MATLAB & Simulink." Accessed: Nov. 05, 2025. [Online]. Available: https://la.mathworks.com/help/simulink/ug/choose-a-solver.html?utm_source [27] "TMS320F2837xD Dual-Core Real-Time Microcontrollers Technical Reference Manual," 2024, Accessed: Oct. 07, 2025. [Online]. Available: www.ti.com [28] Texas Instruments, "LAUNCHXL-F28379D Overview User's Guide LAUNCHXL-F28379D Overview," Aug. 2016. [Online]. Available: www.ti.com [29] Texas Instruments, "TMS320F2837xD Dual-Core Real-Time Microcontrollers," 2024. [Online]. Available: www.ti.com [30] "Model-Based Design - MATLAB & Simulink." Accessed: Oct. 07, 2025. [Online]. Available: https://www.mathworks.com/solutions/model-based-design.html?utm_source [31] "Basics of Hardware-in-the-Loop Simulation - MATLAB & Simulink." Accessed: Oct. 19, 2025. [Online]. Available: https://la.mathworks.com/help/simscape/ug/what-is-hardware-in-the-loop-simulation.html?utm_source [32] L. Xie, X. Fan, W. Cao, and L. Wang, "High Throughput CNN Accelerator Design Based on FPGA," Proceedings - 2018 International Conference on Field-Programmable Technology, FPT 2018, pp. 277–280, Dec. 2018, doi: 10.1109/FPT.2018.00052. [33] "Simulink - Simulation and Model-Based Design - MATLAB." Accessed: Oct. 07, 2025. [Online]. Available: https://www.mathworks.com/products/simulink.html?utm_source [34] "Embedded Coder Documentation." Accessed: Nov. 05, 2025. [Online]. Available: https://www.mathworks.com/products/embedded-coder.html?utm_source

<https://la.mathworks.com/help/encoder/> [35] Inc. RIGOL Technologies, "Simulink Coder - MATLAB." Accessed: Nov. 05, 2025. [Online]. Available: <https://la.mathworks.com/products/simulink-coder.html> [36] "Simulación y diseño basado en modelos con Simulink - MATLAB." Accessed: Nov. 06, 2025. [Online]. Available: <https://la.mathworks.com/products/simulink.html> 56 [37] "Simscape - MATLAB." Accessed: Nov. 06, 2025. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/products/simscape.html> [38] "Teorema de Shannon - Mundodeteoremas.com." Accessed: Oct. 07, 2025. [Online]. Available: <https://www.mundodeteoremas.com/teorema-de-shannon/> [39] D. Sendoya, "INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DE CONTROL DIGITAL," Universidad Surcolombiana(Usco), pp. 1–21, 2020. [40] "Discretization - an overview | ScienceDirect Topics." Accessed: Nov. 06, 2025. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/discretization> [41] "1.2: Forward Euler method - Mathematics Libre Texts." Accessed: Nov. 06, 2025. [Online]. Available: [https://math.libretexts.org/Bookshelves/Differential_Equations/Numerically_Solving_Ordinary_Differential_Equations_\(Brorson\)/01%3A_Chapters/1.03%3A_Backward_Euler_method?utm_source=\[43\]](https://math.libretexts.org/Bookshelves/Differential_Equations/Numerically_Solving_Ordinary_Differential_Equations_(Brorson)/01%3A_Chapters/1.02%3A_Foward_Euler_method?utm_source=[42]) "1.3: Backward Euler method - Mathematics Libre Texts." Accessed: Nov. 06, 2025. [Online]. Available: [https://math.libretexts.org/Bookshelves/Differential_Equations/Numerically_Solving_Ordinary_Differential_Equations_\(Brorson\)/01%3A_Chapters/1.03%3A_Backward_Euler_method?utm_source=\[43\]](https://math.libretexts.org/Bookshelves/Differential_Equations/Numerically_Solving_Ordinary_Differential_Equations_(Brorson)/01%3A_Chapters/1.03%3A_Backward_Euler_method?utm_source=[43]) "Métodos de conversión entre tiempo continuo y discreto - MATLAB & Simulink." Accessed: Nov. 06, 2025. [Online]. Available: [https://la.mathworks.com/help/control/ug/continuous-discrete-conversion-methods.html?utm_source=\[44\]](https://la.mathworks.com/help/control/ug/continuous-discrete-conversion-methods.html?utm_source=[44]) "PID Tuner - Ajustar controladores PID - MATLAB." Accessed: Nov. 06, 2025. [Online]. Available: <https://la.mathworks.com/help/control/ref/pidtuner-app.html> [45] Inc. RIGOL Technologies, "RIGOL User's Guide MSO1000Z/DS1000Z Series Digital Oscilloscope," 2015. [Online]. Available: www.rigol.com [46] "movmean - Media móvil - MATLAB." Accessed: Nov. 28, 2025. [Online]. Available: <https://la.mathworks.com/help/matlab/ref/movmean.html> [47] H. Alberto, S. Gallo Universidad, and S. Tomás, "DISEÑO DEL SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL PARA UNA BANCADA DE TRANSFERENCIA DE MUESTRAS DE CRUDO DE ALTA PRESIÓN," 2015. [48] "ANSI/ISA 5.1-2024: Símbolos e identificación de instrumentación - El blog de ANSI." Accessed: Nov. 12, 2025. [Online]. Available: <https://blog.ansi.org/ansi/ansi-isa-5-1-2024-instrumentation-symbols/> 57 ANEXOS Anexo A. Repositorio de código fuente y modelos de simulación Con el objetivo de garantizar la reproducibilidad técnica, la transparencia y el acceso abierto a los resultados de esta investigación, se ha dispuesto un repositorio digital que aloja la totalidad del desarrollo del proyecto. Este repositorio contiene: • Scripts de configuración (.mlx): Archivos de inicialización con los parámetros físicos y de control para cada caso de estudio. • Modelos de simulación (.slx): Archivos fuente de Simulink con la implementación de los esquemas de control y plantas dinámicas para la arquitectura de doble núcleo (Dual-Core) del microcontrolador. • Documentación técnica: Guías y material de soporte para la ejecución de la plataforma. Enlace al repositorio: CesarVargas3/Implementaci-n-de-Sistemas-Din-micos-mediente-Simulaci-n-HIL-con-la-Tarjeta-LaunchPad-C2000: Plataforma educativa de simulación HIL en tiempo real para sistemas dinámicos (Motores DC y Presión) utilizando la tarjeta TI LaunchPad C2000 y MATLAB/Simulink. Trabajo de Grado - Ingeniería Electrónica USCO. Anexo B. Registro fotográfico de la implementación y resultados Como complemento a la validación experimental descrita en los capítulos anteriores, se encuentra disponible en el repositorio un compendio fotográfico detallado. Este material incluye: 1. Montaje físico: Fotografías de la tarjeta LaunchPad TMS320F28379D evidenciando las conexiones físicas (loopback) entre los puertos DAC y ADC necesarias para el cierre del lazo de control. 2. Resultados experimentales: Capturas de alta resolución de las señales obtenidas en el osciloscopio y en las herramientas de visualización de Simulink, permitiendo una inspección detallada del comportamiento dinámico de los sistemas de posición, velocidad y presión ante las perturbaciones aplicadas. Este registro visual se encuentra alojado dentro de la carpeta Docs del repositorio mencionado en el Anexo A, facilitando su consulta sin pérdida de calidad. 58