

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

SEDE VIÑA DEL MAR – JOSÉ MIGUEL CARRERA

**SIMULACIÓN Y CONTROL DE UN SISTEMA DE VELOCIDAD DE UN
MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA**

Trabajo de Titulación para optar al
Título Profesional de INGENIERO DE
EJECUCIÓN EN CONTROL E
INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL

Alumno:

Sergio Vargas Torres

Profesor Guía:

Mag. Guelis Montenegro Zamora

2024

RESUMEN

KEYWORDS: SIMULACIÓN, MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA, LAZO ABIERTO, LAZO CERRADO, PID.

Este proyecto de titulación se enfoca en el análisis y diseño de estrategias de control para regular la velocidad de motores de corriente continua (CC). Se explorarán los fundamentos teóricos y las aplicaciones prácticas del control de sistemas en el ámbito de la Ingeniería en Control e Instrumentación Industrial.

El trabajo comienza estableciendo los antecedentes generales, destacando la Universidad Técnica Federico Santa María (UTFSM) como el entorno académico donde se desarrolla el proyecto. Se introduce la asignatura de Control de Procesos como punto de partida, para la comprensión de los principios de funcionamiento de los sistemas y su relevancia en la industria.

Además, se abordarán los principios de funcionamiento de los sistemas y sus aplicaciones en el control industrial, resaltando la importancia de comprender los sistemas y su comportamiento dinámico para la toma de decisiones en la ingeniería.

La simulación de control de procesos se presenta como una herramienta esencial en el análisis y diseño de sistemas de control. A su vez, se explora cómo la simulación permite evaluar la respuesta dinámica de los sistemas, analizar cargas y perturbaciones, así como diseñar y optimizar controladores. Por su parte, la implementación de controladores PID se convierte en un componente central del proyecto.

La interfaz gráfica en LabVIEW se presenta como una herramienta versátil para interactuar con sistemas de control y visualizar resultados en tiempo real. Se muestra cómo esta plataforma facilita la experimentación y el análisis de sistemas en un entorno virtual.

Finalmente, se presentan los resultados de la puesta en marcha de la simulación.

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES GENERALES.....	2
 ANTECEDENTES GENERALES	3
1.1 UTFSM	3
1.1.1 Ingeniería en Control e Instrumentación Industrial	3
1.1.2 Asignatura de Control de Procesos	4
1.2 EL MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA	4
1.2.1 Principios de funcionamiento.....	5
1.2.2 Usos y aplicaciones en control industrial	6
1.3 SIMULACIÓN DE CONTROL DE PROCESOS	8
1.3.1 Ventajas de la simulación	9
1.3.1.1 Análisis detallados	10
1.3.1.2 Seguridad y control	10
1.3.1.3 Tiempos de desarrollo más cortos	10
1.3.1.4 Flexibilidad.....	11
1.3.1.5 Costos reducidos	11
1.3.2 Aplicaciones de la simulación en un motor de CC.....	11
1.3.2.1 Evaluación de la respuesta dinámica.....	12
1.3.2.2 Análisis de cargas y perturbaciones	12
1.3.2.3 Diseño y optimización de controladores	13
1.3.3 Software utilizado: LabVIEW	14
1.4 TIPOS DE SISTEMAS	15
1.4.1 Sistema lineal.....	16
1.4.2 Sistema no lineal	16
1.5 SISTEMAS DE CONTROL DE VELOCIDAD.....	17
1.5.1 Control de velocidad en lazo abierto.....	18
1.5.2 Control de velocidad en lazo cerrado	18
1.6 OBJETIVOS	18
1.6.1 Objetivo general	19
1.6.2 Objetivos específicos	19
CAPÍTULO 2: DESARROLLO DEL PROYECTO	20
2. DESARROLLO DEL PROYECTO.....	21
2.1 MODELADO DEL SISTEMA Y ESQUEMAS DE CONTROL.....	21
2.1.1 Modelo matemático del motor de CC	21
2.1.2 Lazo abierto	24
2.1.3 Lazo cerrado con controlador PID	27
2.2 ESTRATEGIAS DE CONTROL.....	29
2.2.1 Controlador PID	29

2.2.1.1	Acción proporcional (P)	30
2.2.1.2	Acción integral (I)	31
2.2.1.3	Acción derivativa (D)	31
2.2.1.4	Acción proporcional-integral (PI).....	32
2.2.1.5	Acción proporcional-derivativa (PD)	32
2.2.1.6	Acción proporcional-integral-derivativa (PID)	33
2.2.2	Método de sintonización del controlador PID.....	33
2.2.2.1	Método de sintonización de Ziegler-Nichols en lazo abierto o curva de reacción	33
2.3	INTERFAZ GRÁFICA EN LABVIEW.....	35
2.3.1	Interfaz HMI.....	35
2.3.2	Diagrama de bloques.....	36

CAPÍTULO 3:

**RESULTADOS DE LA PUESTA EN MARCHA DE LA
SIMULACIÓN**

38

3.	RESULTADOS DE LA PUESTA EN MARCHA DE LA SIMULACIÓN	39
3.1	PARÁMETROS DE PRUEBA Y SIMULACIÓN.....	39
3.2	ANÁLISIS EN LAZO ABIERTO	40
3.2.1	Determinación de Sistema lineal o no lineal	40
3.2.1.1	Respuesta en lazo abierto a 1 [V]	41
3.2.1.2	Respuesta en lazo abierto a 4 [V]	42
3.2.1.3	Respuesta en lazo abierto a 8 [V]	43
3.2.1.4	Respuesta en lazo abierto a 12 [V]	44
3.2.1.5	Comprobación de linealidad.....	45
3.2.2	Función de transferencia.....	46
3.2.3	Cálculo de parámetros método de curva de reacción.....	47
3.2.3.1	Respuesta en lazo abierto a 1[V] usando Simulink.....	47
3.2.4	Parámetros de sintonización del controlador PID método de curva de reacción	48
3.2.4.1	Controlador P	49
3.2.4.2	Controlador PI	50
3.2.4.3	Controlador PID	51
3.3	ANÁLISIS DE PERTURBACIONES	53
3.3.1	Análisis de la respuesta ante cambios en la referencia sin carga	53
3.3.1.1	Controlador PID con aumento en la referencia de 50 RPM	53
3.3.1.2	Controlador PID con aumento en la referencia de 10 RPM	55
3.3.2	Análisis de la respuesta ante cambios en la carga.....	57
3.3.2.1	Controlador PID con setpoint en 10 RPM sometido a carga externa	57
3.3.2.2	Controlador PID con setpoint en 60 RPM sometido a carga externa	59

CONCLUSIONES.....	60
--------------------------	-----------

BIBLIOGRAFÍA.....	61
--------------------------	-----------

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1- 1. Motor pequeño de corriente continua.....	6
Figura 1- 2. Sistema de transporte que utiliza motor de cc conocido como trolebús.	7
Figura 1- 3. Ejemplo de un kit de desarrollo de softwares de simulación en labview.....	9
Figura 2-1. Circuito general de un motor de corriente continua.	21
Figura 2-2. Esquemmatización de la función de transferencia en lazo abierto.....	25
Figura 2-3. Diagrama de bloques del sistema dinámico del motor de cc en lazo abierto.	26
Figura 2-4. Esquemmatización del control de motor en lazo cerrado.....	28
Figura 2-5. Diagrama de bloques del sistema dinámico del motor de cc en lazo cerrado con controlador pid.	29
Figura 2-6. Respuesta al escalón de la planta en lazo abierto método z-n.....	34
Figura 2-7. Interfaz hmi del proyecto	36
Figura 2-8. Diagrama de bloques en lazo abierto.	36
Figura 2-9. Diagrama de bloques en lazo cerrado.	37
Figura 3-1. Respuesta en lazo abierto a 1 [v] con 18,61 rpm alcanzadas utilizando labview.	41
Figura 3-2. Respuesta en lazo abierto a 4 [v] con 74,46 rpm alcanzadas utilizando labview.	42
Figura 3-3. Respuesta en lazo abierto a 8 [v] con 148,92 rpm alcanzadas utilizando labview.	43
Figura 3-4. Respuesta en lazo abierto a 12 [v] con 223,37 rpm alcanzadas utilizando labview.	44
Figura 3-5. Respuesta a 12 [v] de la función de transferencia en lazo abierto utilizando simulink.	47

Figura 3-6. Análisis de tiempos t_1 y t_2 sobre gráfica en lazo abierto en simulink.....	48
Figura 3-7. Respuesta del sistema utilizando controlador p con setpoint en 100 rpm.....	49
Figura 3-8. Respuesta del sistema utilizando controlador pi con setpoint en 100 rpm....	51
Figura 3-9. Respuesta del sistema utilizando controlador pid con setpoint en 100 rpm..	52
Figura 3-10. Primer análisis del sistema a cambios en la referencia utilizando controlador pid.....	54
Figura 3-11. Segundo análisis del sistema a cambios en la referencia utilizando controlador pid.	55
Figura 3-12. Segundo análisis del sistema a cambios en la referencia utilizando controlador pid encontrado.	56
Figura 3-13. Respuesta del sistema ante cambios en la carga a una velocidad de 10 rpm	58
Figura 3-14. Respuesta del sistema ante cambios en la carga a una velocidad de 60 rpm	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2 - 1. Diagrama de bloques equivalentes a ecuaciones del motor de cc.	26
Tabla 2 - 2. Parámetros requeridos para graficar la respuesta dinámica de g(s).....	27
Tabla 2 - 3.. Diagrama de bloques equivalentes a ecuaciones del controlador pid.	28
Tabla 2 - 4. Parámetros de ajuste (método curva de reacción)	35
Tabla 3 - 1. Parámetros del motor.....	39
Tabla 3 - 2. Continuación parámetros del motor	40
Tabla 3 - 3. Parámetros controlador p.....	49
Tabla 3 - 4. Parámetros controlador pi.....	50

Tabla 3 - 5. Parámetros controlador pid.....52

Tabla 3-6. Parámetros controlador pid para análisis de perturbaciones 53

INTRODUCCIÓN

El presente documento aborda un estudio en el campo del control de sistemas, con un enfoque particular en el control de velocidad de motores de corriente continua (CC). A medida que se avanza en esta exploración, se hará referencia a aspectos fundamentales relacionados con los antecedentes generales, los principios de funcionamiento y las aplicaciones en el control industrial. Además, se visualizará la importancia de la simulación en el análisis de procesos y cómo esta herramienta puede ser aprovechada para evaluar la respuesta dinámica, analizar cargas y perturbaciones, así como diseñar y optimizar controladores.

Dentro de este contexto, también se abordan los conceptos de sistema lineal y sistemas de control de velocidad en lazo abierto y lazo cerrado. A lo largo de este recorrido, se exponen los objetivos de este proyecto, delineando las metas generales y específicas que se buscan alcanzar.

El desarrollo de este proyecto involucra la modelación de sistemas y esquemas de control, incluyendo el análisis de un modelo matemático para un motor de corriente continua y la implementación de un controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo). Este controlador se descompone en sus componentes fundamentales, como la acción proporcional (P), la acción integral (I) y la acción derivativa (D), comprendiendo cómo cada una contribuye al comportamiento del sistema.

Además, se explora el proceso de sintonización de controladores PID utilizando el método de Ziegler-Nichols. Para llevar a cabo esta exploración, se emplea una interfaz gráfica implementada en LabVIEW, que permite interactuar con el sistema y visualizar su respuesta en tiempo real.

Finalmente, se presentan los resultados de la puesta en marcha de la simulación, incluyendo análisis en lazo abierto y en lazo cerrado. Se evalúa la naturaleza del sistema, se calculan parámetros clave del controlador PID y se analiza la respuesta ante perturbaciones y cambios en la carga. A través de este estudio, se espera obtener una mayor comprensión de los sistemas de control y sus aplicaciones en el ámbito industrial.

CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES GENERALES

ANTECEDENTES GENERALES

En este primer capítulo se da a conocer el lugar en donde tuvo desarrollo el proyecto, se entrega información sobre el objeto de estudio que es el motor de corriente continua, sus usos y aplicaciones. Se entregan antecedentes sobre las metodologías, herramientas y equipos de trabajo para llevar a cabo el proyecto. Así como también se fijan los objetivos del mismo.

1.1 UTFSM

La Universidad Técnica Federico Santa María es una institución académica que posee como misión principal, crear y difundir nuevo conocimiento, y formar integralmente profesionales idóneos en el ámbito científico-tecnológico, para liderar el desarrollo del país y la humanidad.

Es una comunidad universitaria de excelencia, que se vitaliza con la diversidad e independencia de los procesos de descubrimiento y aprendizaje, y que, de acuerdo con la voluntad testamentaria de don Federico Santa María Carrera, pone especial énfasis en la integración de aquellos que, reuniendo las condiciones exigidas por el quehacer académico, no poseen suficientes medios materiales.

Este proyecto ha sido desarrollado en el interior de la sede José Miguel Carrera ubicada en Viña del Mar, sede que está enfocada a carreras técnicas profesionales e ingenierías de base tecnológica y de ejecución, en donde los laboratorios se encuentran a disposición de los estudiantes, contando con un alto equipamiento tecnológico, que incluso a veces no logra ser suficiente el tiempo académico en ellos, y que no es posible conocer en profundidad cada espacio de desarrollo que busca simular lo que sería un ambiente y/o espacio laboral ideal.

1.1.1 Ingeniería en Control e Instrumentación Industrial

Dentro de la UTFSM, se encuentra la carrera de Ingeniería de Ejecución en Control e Instrumentación Industrial. Este programa de estudios se centra en formar profesionales capacitados para diseñar, implementar y optimizar sistemas de control y automatización en diversos sectores industriales.

Los estudiantes de Ingeniería de Ejecución en Control e Instrumentación Industrial adquieren conocimientos en áreas como instrumentación, electrónica, automatización, programación, control de procesos y gestión de proyectos. A través de una combinación de cursos teóricos y prácticos, los estudiantes desarrollan habilidades para analizar y resolver problemas relacionados con el control y la instrumentación en la industria.

1.1.2 Asignatura de Control de Procesos

Dentro del plan de estudios de Ingeniería de Ejecución en Control e Instrumentación Industrial, se encuentra la asignatura de Control de Procesos. Esta asignatura tiene como objetivo principal brindar a los estudiantes los fundamentos teóricos y prácticos necesarios para comprender y aplicar técnicas de control en sistemas de procesos industriales.

Durante el curso de Control de Procesos, los estudiantes aprenden sobre los conceptos básicos de control, como la retroalimentación, la estabilidad, la respuesta temporal y la respuesta en frecuencia. Se estudian diferentes tipos de controladores, incluyendo el controlador proporcional, integral, derivativo (PID), así como técnicas de sintonización de controladores.

Además, los estudiantes se familiarizan con el modelado matemático de sistemas de procesos, la implementación de controladores en software de simulación y la práctica de ajuste y optimización de controladores. A través de proyectos y prácticas de laboratorio, los estudiantes aplican los conocimientos adquiridos para diseñar y analizar estrategias de control en sistemas de procesos reales o simulados.

La asignatura de Control de Procesos en la carrera de Ingeniería en Control e Instrumentación Industrial de la UTFSM proporciona a los estudiantes las herramientas y competencias necesarias para enfrentar los desafíos de la automatización y el control en la industria, preparándolos para una exitosa carrera profesional en el campo del control de procesos.

1.2 **EL MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA**

En este apartado se abarca un poco más sobre el objeto de estudio que es el motor de corriente continua (CC), cuál es su principio de funcionamiento desde la teoría de control y cuáles son sus principales usos y aplicaciones en el campo de la industria.

1.2.1 Principios de funcionamiento

Un motor de corriente continua (CC) es una máquina eléctrica rotativa que convierte la energía eléctrica en energía mecánica.¹ En primer lugar se puede establecer que su funcionamiento se basa en el principio de interacción entre un campo magnético creado por un imán o una bobina de campo, y la corriente eléctrica que fluye a través de un conjunto de bobinas llamado armadura. Es por ello que las leyes de Faraday, Ampere, y Lorentz en el contexto del motor de CC desempeñan un papel fundamental en la comprensión de su funcionamiento.

Por su lado, la Ley de Faraday establece que el cambio en el flujo magnético a través de una superficie de circuito cerrado induce una fuerza electromotriz (FEM) en dicho circuito. Esta fuerza electromotriz es proporcional al ritmo de cambio del flujo magnético y se induce en respuesta a dicho cambio², en otras palabras esta ley describe la relación entre el magnetismo y la electricidad, mostrando cómo un campo magnético en movimiento puede generar una corriente eléctrica.

A su vez, la Ley de Ampere establece que la circulación de un campo magnético alrededor de una trayectoria cerrada es proporcional a la corriente total que atraviesa dicha trayectoria³, esto implica entonces que la corriente que fluye a través de las bobinas del rotor del motor de CC crea un campo magnético que interactúa con el campo magnético del estator.

Finalmente, la Ley de Lorentz, también conocida como la Fuerza de Lorentz, establece que una partícula cargada experimentará una fuerza debido a la interacción entre su carga eléctrica y un campo magnético externo. La magnitud y dirección de la fuerza están determinadas por la carga de la partícula, su velocidad relativa al campo magnético y la dirección del campo magnético⁴, esto quiere decir que la Fuerza de Lorentz que ha sido generada por la interacción entre la corriente eléctrica y el campo magnético es quien impulsa el movimiento de rotación del motor. En donde la dirección de dicha fuerza estará dada por la regla de la mano derecha, que establece que si se extienden los dedos de la mano derecha en dirección de la velocidad de la partícula y se cierran en dirección del campo magnético, el pulgar apuntará en la dirección de la fuerza resultante.

En resumen, son estas teorías al ser relacionadas entre sí bajo el objeto de estudio del motor de CC (véase Figura 1-1) las que permiten comprender como se genera la corriente eléctrica, el campo magnético y las fuerzas que impulsan su funcionamiento y

¹Chapman, S. J. (2017). Electric Machinery Fundamentals. McGraw-Hill Education.

²Chapman, S. J. (2017). Electric Machinery Fundamentals. McGraw-Hill Education.

³Dorf, R. C., & Svoboda, J. A. (2017). Introduction to Electric Circuits. John Wiley & Sons.

⁴Griffiths, D. J. (2017). Introduction to Electrodynamics. Cambridge University Press

que es a su vez complementario a entender cómo un motor de CC convierte la energía eléctrica en energía mecánica.



Fuente: <https://hubot.cl/wp-content/uploads/2022/12/093-1.webp>

Figura 1- 1. Motor pequeño de corriente continua.

1.2.2 Usos y aplicaciones en control industrial

En la industria del transporte industrial o de personas se requiere de un control preciso y eficiente del movimiento, así como la optimización de la productividad, la seguridad en el manejo de carga y la reducción del desgaste de los equipos. Es por ello que los motores de CC se utilizan ampliamente en aplicaciones de control de velocidad en sistemas de vehículos de transporte, como grúas, cintas transportadoras y transportadores de rodillos.⁵

Los motores de CC son utilizados en sistemas de control industrial para automatizar y controlar el movimiento de maquinaria (véase Figura 1-2), como robots industriales, máquinas de embalaje y equipos de manipulación de materiales.⁶ Esta capacidad de poder tener un control de la velocidad y posición altamente precisos y repetible, ha transformado este elemento en un aliado indispensable dentro de la automatización de las maquinarias. Si estos a su vez son combinados con sistemas de control avanzados como son los controladores lógicos programables (PLC) es posible entonces la ejecución de movimientos suaves y coordinados en la maquinaria,

⁵ Hughes, D. (2014). Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications (4th ed.). Newnes.

⁶ Choudhury, R. R. (2012). Industrial Automation and Robotics: An Introduction. Prentice Hall.

transformándose en un factor favorable en temas de producción y reducción de tiempos entre ciclos de funcionamiento.

La combinación de los motores de CC con sistemas de control avanzado, como son los controladores numéricos computarizados (CNC) y algoritmos de control por retroalimentación ofrecen la posibilidad de lograr movimientos suaves y precisos en ciertas máquinas de mecanizado, permitiendo monitorear y ajustar continuamente la posición, velocidad y torque de trabajo de la máquina. Por ello, los motores de CC se utilizan en aplicaciones de control de procesos industriales, como control de velocidad en bombas, compresores y ventiladores, y control de posición en válvulas y actuadores.⁷

En resumen, la versatilidad que aporta el controlar un motor de CC es tan amplia que son ampliamente utilizados aún en la industria. Ofrecer un control preciso y flexible, mejoras en la productividad, calidad y eficiencia energética de las distintas áreas de la industria en que son requeridos son prueba de ello.



Fuente: <https://hubot.cl/wp-content/uploads/2022/12/093-1.webp>

Figura 1- 2. Sistema de transporte que utiliza motor de CC conocido como trolebús.

⁷ Beater, P. D. (2018). Industrial Motor Control (8th ed.). Cengage Learning.

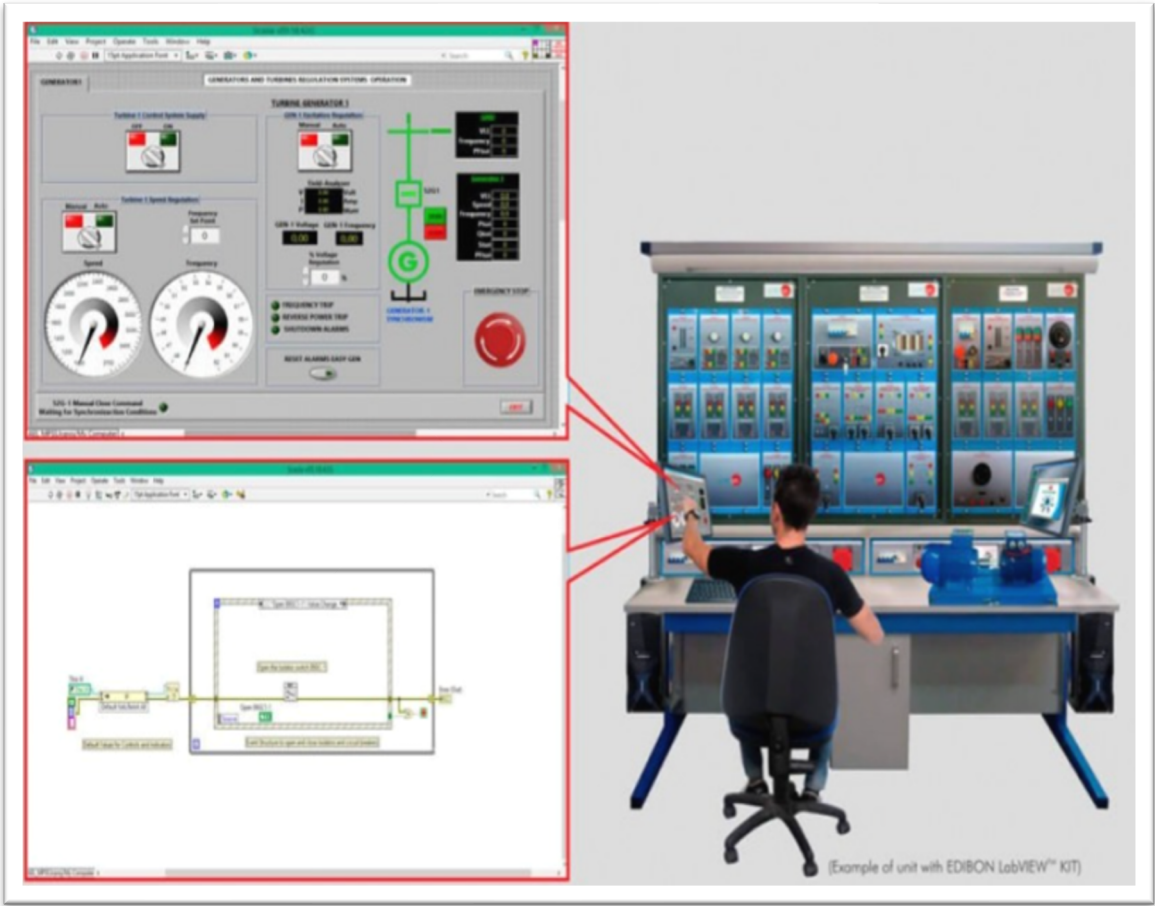
1.3 SIMULACIÓN DE CONTROL DE PROCESOS

Como antecedentes de la teoría de la simulación se podría mencionar la teoría de la dinámica de sistemas. A su vez, la teoría de la dinámica de sistemas se basó en la teoría de los servomecanismos, cuya característica fundamental es la existencia en los mismos de una realimentación de información. Se entiende por realimentación el proceso en virtud del cual, cuando se actúa sobre un determinado sistema, se obtiene continuamente información sobre los resultados de las decisiones tomadas, información que servirá para tomar las decisiones sucesivas. La teoría de los servomecanismos tiene dos características fundamentales: El estudio sistemático del concepto de realimentación y un amplio desarrollo del estudio del comportamiento dinámico de los sistemas, donde se encuentra el germen de la noción de sistema dinámico⁸.

Desde un punto de vista evolutivo y, en constante re-estructuración y mejoramiento de los procesos, se puede apreciar el uso de la simulación como una herramienta poderosa que no solo abarca áreas de industrias y tecnologías. Simular un evento es un principio básico de supervivencia para reducir los errores y someter a una prueba virtual cada uno de los posibles escenarios, es por ello que este método de análisis se tiene incluso asociado internamente en las mentes de las personas, donde cualquier evento que pueda provocar resultados no esperados será analizado y sometido a escenarios hasta irreales con tal de no fallar en el acto real de su ejecución. Es por esto que la teoría de la simulación permite imitar el comportamiento del sistema real, evolucionando como éste e incluso entregando como objeto de estudio el comportamiento del sistema respecto al tiempo.

Por ello, en esta sección se explica la importancia de la simulación de control de procesos (véase Figura 1-3) en el contexto del proyecto y el uso real que podría lograrse.

⁸Aracil, J.,1986. Estructura y comportamiento en teorías de sistemas.



Fuente: <https://www.edibon.com/es/kit-de-desarrollo-de-software-de-edibon-powered-by-ni-labview-tm>

Figura 1- 3. Ejemplo de un kit de desarrollo de softwares de simulación en LabVIEW

1.3.1 Ventajas de la simulación

Se podría afirmar que la simulación permite experimentar con un modelo del sistema para comprender mejor los procesos, con el fin de mejorar la actividad en las empresas⁹. Las ventajas de desarrollar un entorno gráfico de simulación para analizar motores de corriente continua basados en ciertos parámetros propios de cada motor facilitarían entre otras prácticas los siguientes beneficios.

⁹Harrington, H. J. y Tumay, K; 1999

1.3.1.1 Análisis detallados

Un entorno gráfico de simulación permite realizar análisis detallados del comportamiento del motor de corriente continua en diferentes condiciones de carga, velocidad y torque, lo que proporciona una comprensión profunda de su rendimiento y características¹⁰. Los análisis pueden realizarse bajo diferentes condiciones y distintos escenarios, testeando así diferentes estímulos y variables de control.

1.3.1.2 Seguridad y control

La simulación en un entorno gráfico permite evaluar y mejorar la seguridad y el control del motor de corriente continua al simular situaciones de riesgo, condiciones extremas o fallos del sistema, sin poner en peligro la integridad del equipo físico¹¹. Al realizar simulaciones en un entorno virtual no se corre el riesgo de dañar equipos, causar accidentes o afectar la operación real de la línea de proceso. Además, se tiene un mayor control sobre las variables de prueba, lo que facilita la evaluación y optimización del desempeño del motor.

1.3.1.3 Tiempos de desarrollo más cortos

Al utilizar un entorno gráfico de simulación, se puede acelerar el proceso de desarrollo del motor de corriente continua, ya que permite probar y optimizar diferentes configuraciones y parámetros de control de manera más rápida y eficiente¹². Reiteradas pruebas, posibilidad de ajuste de parámetros y sintonización del controlador sin tener que

¹⁰Suarez, L. E. "Diseño de control para un motor de corriente continua sin escobillas impulsado por un sistema de almacenamiento de energía mediante volante de inercia." IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 26, no. 4, 2011, pp. 1067-1074..

¹¹Opal, A. L., et al. "Aspectos de seguridad en la simulación de sistemas de electrónica de potencia y control de movimiento." IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 55, no. 4, 2008, pp. 1659-1667.

¹² Bhisikar, T. S., y Zade, M. R. "Simulación de un motor de corriente continua utilizando MATLAB-Simulink." International Journal of Engineering Research and Applications, vol. 2, no. 6, 2012, pp. 1986-1991.

esperar tiempos de respuesta en la línea de proceso real, se transforma en una virtud altamente aprovechable.

1.3.1.4 Flexibilidad

El entorno gráfico de simulación ofrece flexibilidad en términos de realizar cambios y ajustes en tiempo real, lo que permite una mayor experimentación y adaptabilidad en el diseño y control del motor de corriente continua¹³. Con este software de simulación se pueden realizar múltiples experimentos y pruebas en un entorno virtual sin restricciones de tiempo y espacio. Se pueden explorar diferentes configuraciones, ajustes y parámetros del motor de CC de forma más fácil y eficiente.

1.3.1.5 Costos reducidos

Al utilizar la simulación en lugar de realizar pruebas físicas, se pueden reducir los costos asociados con el prototipado, la adquisición de equipos y los posibles daños o reparaciones del motor de corriente continua¹⁴. Cuando se desea intervenir líneas de procesos reales, los costos asociados por malas ejecuciones o tiempos excesivos de no funcionamiento pueden ser factores determinantes económicamente para una empresa.

1.3.2 Aplicaciones de la simulación en un motor de CC

Entre las ventajas de tener a disposición la posibilidad de simular el comportamiento dinámico de motores de corriente continua se destacan las siguientes experimentos y análisis de datos que se pueden obtener de esto.

¹³Rashid, M. H. Manual de electrónica de potencia. Pearson, 2003.

¹⁴ Dorf, R. C., y Bishop, R. H. Sistemas de control modernos, 12a edición. Pearson, 2010.

1.3.2.1 Evaluación de la respuesta dinámica

La respuesta dinámica en un motor de corriente continua se refiere al comportamiento del motor ante cambios en la referencia de velocidad o carga¹⁵. Si el software logra simular y visualizar la respuesta del motor en términos de su entrada (voltaje de armadura) y su salida (velocidad angular o RPM) en función del tiempo. Entonces esto facilitaría el estudio de la dinámica del motor, así como su tiempo de respuesta, estabilidad y precisión de control.

- Tiempo de respuesta

Se refiere al tiempo que tarda el motor y el sistema de control en ajustarse y alcanzar una nueva condición estable después de un cambio en las condiciones de operación. Aquí se evalúa la rapidez con la que el motor responde a cambios en la referencia de velocidad o carga, y se busca minimizar el tiempo de respuesta para lograr una respuesta dinámica rápida.

- Estabilidad

La evaluación de la estabilidad se enfoca en determinar si el sistema de control es capaz de mantener a lo largo del tiempo la estabilidad y ausencia de oscilaciones innecesarias en la velocidad del motor.

- Error en estado estacionario

Es posible analizar y minimizar el error en estado estacionario, es decir, la diferencia entre la velocidad de referencia y la velocidad real del motor una vez que ha alcanzado la condición estable.

1.3.2.2 Análisis de cargas y perturbaciones

La simulación permite estudiar el comportamiento del motor de corriente continua frente a distintas cargas y perturbaciones. Esto incluye la capacidad del motor para mantener una velocidad estable bajo variaciones de carga, así como la respuesta frente a

¹⁵ Ogata, K. (2010). Ingeniería de control moderna. Pearson.

perturbaciones externas¹⁶. De ser posible simular y eventualmente evaluar cómo responde el sistema de control y el motor en términos de su capacidad para mantener la velocidad deseada y compensar las variaciones externas al ser sometido a los efectos de diferentes cargas y perturbaciones en el motor, entonces es posible estudiar también:

- Comportamiento ante cargas variables

Se puede simular distintos tipos de cargas y observar como el motor responde a estas en lazo abierto y cerrado. Así como también si el controlador ajusta la corriente de armadura para mantener la velocidad constante.

- Perturbaciones externas

Es posible simular perturbaciones externas, como cambios bruscos en la carga, fluctuaciones en el suministro de voltaje o fuerzas externas que afecten al motor logrando así someter a evaluación la capacidad del sistema de control para rechazar o compensar estas perturbaciones y lograr mantener la velocidad estable.

- Análisis de estabilidad

Es posible simular perturbaciones que varíen de forma muy rápida y con ello evaluar si el sistema de control implementado es capaz de modificar la corriente de armadura con igual rapidez para mantener la velocidad estable, evitando oscilaciones e inestabilidad.

1.3.2.3 Diseño y optimización de controladores

La simulación es una herramienta fundamental en el diseño y optimización de controladores para motores de corriente continua. Permite probar diferentes estrategias de control, ajustar parámetros y evaluar su desempeño antes de implementarlos en la práctica¹⁷.

La capacidad de graficar la respuesta de un sistema dinámico en lazo abierto es extremadamente útil en el diseño y optimización de controladores en lazo cerrado. Al ser capaz de simular y graficar la respuesta del sistema en ausencia de retroalimentación se puede conocer los efectos de los diferentes componentes y parámetros del sistema, como

¹⁶ Dorf, R. C., y Bishop, R. H. Sistemas de control modernos, 12a edición. Pearson, 2010

¹⁷ Ogata, K. (2010). Ingeniería de control moderna. Prentice Hall

las constantes de tiempo, las ganancias y las no linealidades. Esto proporciona información valiosa para seleccionar y ajustar adecuadamente los parámetros del controlador y evaluar así métodos de sintonización como:

- Método de respuesta al escalón

Aquí se aplica un escalón de referencia al sistema de lazo abierto y se observa la respuesta del sistema obteniendo parámetros como tiempo de subida y error en estado estable. Con estos parámetros se puede ajustar las ganancias del controlador.

- Método de ajuste heurístico

Una ventaja de la simulación es la posibilidad de realizar ajustes manuales basados en las experiencias y conocimiento práctico y testarlo de manera virtual sin necesidad de estropear componentes físicos.

1.3.3 Software utilizado: LabVIEW

Mediante LabVIEW, es posible simular y analizar el comportamiento dinámico de un motor de CC en diferentes condiciones de carga y perturbaciones. Se pueden evaluar aspectos como la respuesta dinámica, la estabilidad, la precisión del control y la eficiencia del motor. También ofrece la posibilidad de visualizar gráficamente los resultados de la simulación, lo que facilita el análisis y la interpretación de los datos. Y cuenta con una interfaz gráfica de programación que facilita la creación de modelos de simulación de motores de CC, permitiendo al usuario ingresar los parámetros del motor, como voltaje, resistencia e inductancia de armadura, constante de torque, entre otros¹⁸. El potencial específico e intrínseco de este software provee de una amplia versatilidad para su utilización, desde áreas de control industrial hasta la investigación científica. Entre sus características más relevantes a utilizar en el proyecto se encuentran las siguientes:

- Entorno de programación básico

Utiliza un enfoque de programación gráfico basado en un diagrama de bloques, lo que facilita la visualización y comprensión del flujo del programa. Esto permite a los profesionales del área diseñar y simular sistemas de control de manera más intuitiva y eficiente.

¹⁸ Fancher, P. (2010). LabVIEW para circuitos eléctricos, máquinas, accionamientos y laboratorios. CRC Press.

- Amplia biblioteca de funciones y bloques

LabVIEW cuenta con una amplia biblioteca de funciones y bloques predefinidos específicos para el control y la simulación de sistemas, incluyendo motores de CC. Estos bloques se pueden soltar y arrastrar al diagrama de bloques, lo que acelera el proceso de desarrollo y evita tener que programar todo desde cero.

- Integración de hardware

LabVIEW ofrece una sólida integración con una amplia gama de hardware, lo que permite la comunicación directa con los controladores y sensores del motor de CC. Esto facilita la adquisición de datos en tiempo real y el control del sistema durante la simulación.

- Módulos y herramientas especializadas

LabVIEW ofrece módulos y herramientas especializadas para el diseño y simulación de sistemas de control, como el módulo de simulación, diseño y control de sistemas (control desing and simulation module) estas herramientas proporcionan características adicionales y funcionalidades avanzadas que permiten un análisis más detallado y preciso del comportamiento del motor de CC.

- Interfaz de usuario personalizable

LabVIEW permite personalizar la interfaz de usuario con lo que facilita la visualización de datos en tiempo real, gráfico de respuestas y resultados de simulaciones. Esto proporciona una representación visual clara y fácil de entender de los resultados, lo que ayuda en el análisis y toma de decisiones.

1.4 TIPOS DE SISTEMAS

En el contexto del control de sistemas de motores se encuentran presentes dos categorías fundamentales: sistemas lineales y no lineales. La importancia de identificar la linealidad de un sistema es esencial para el diseño y control adecuado del mismo. Esto proporciona una guía para determinar las técnicas de control y el enfoque de diseño que es más adecuado abordar.

Mientras que los sistemas lineales cumplen con características importantísimas como lo es que su comportamiento sea predecible, su modelado matemático pueda ser descrito mediante ecuaciones diferenciales lineales y hacer uso de técnicas matemáticas como la transformada de Laplace, para obtener modelos en el dominio de la frecuencia o

hacer uso de técnicas de control ya establecidas como el controlador PID. Los sistemas no lineales requieren de técnicas de control más avanzadas y que consideran estas no linealidades, en el caso real de motores de CC, algunas de ellas son producto de las saturaciones por flujo magnético generado por el motor a alcanzar máximos, los cambios de resistencia en el devanado del motor producto de las variaciones de temperaturas a las que trabajan sus componentes o incluso producto de voltajes de alimentación no lineales debido a fluctuaciones de la fuente generadora o distorsiones por armónicos.

Además, se debe considerar el principio de homogeneidad el cual es un concepto importante en el análisis y diseño de sistemas, especialmente en el ámbito de la teoría de control y la ingeniería de sistemas. Este principio se relaciona con la propiedad de escalar o multiplicar las entradas de un sistema por un factor constante y cómo eso afecta a las salidas o respuestas del sistema. Permite entender cómo las magnitudes de las entradas se relacionan con las magnitudes de las salidas concluyendo que cuando un sistema es homogéneo, es más fácil predecir cómo cambiará la salida en respuesta a cambios en la entrada.

1.4.1 Sistema lineal

En estricto rigor, un sistema se considera lineal cuando cumple con el principio de superposición, el cual establece que la respuesta de un sistema a una combinación lineal de diferentes entradas, es igual a la suma de las respuestas individuales correspondiente a cada entrada considerada por separado.

Confirmar este principio de superposición es de gran utilidad en el análisis y diseño de controladores, ya que permite simplificar la tarea de estudio de sistemas complejos. Al descomponer una señal de entrada en componentes más simples y analizar su influencia por separado es posible comprender y predecir cómo cada componente afecta la respuesta total del sistema. La teoría de función de transferencia y el uso de herramientas matemáticas como la transformada de Laplace son fundamentales en el análisis de sistemas lineales.

1.4.2 Sistema no lineal

Cuando un sistema muestra comportamientos no lineales, significa que la relación entre entradas y salidas no es proporcional. En estos casos, el principio de homogeneidad

no se cumple, y las respuestas pueden ser más complejas y no proporcionales a las entradas. Estos sistemas presentan comportamientos más complejos y de alto grado de estudio. Se han establecido ya no linealidades comunes en motores de CC, como lo son las variaciones por rozamiento entre las piezas móviles del motor y las estáticas. La distorsión del flujo magnético producto de fluctuaciones en el flujo de la corriente. No linealidades eléctricas producto del aumento de temperatura en los componentes y consecuencia de ello en sus condiciones de trabajo. E incluso en cambios bruscos en las cargas acopladas o torque requerido.

1.5 SISTEMAS DE CONTROL DE VELOCIDAD

Los sistemas de control de velocidad son componentes esenciales en aplicaciones industriales, de automatización y de robótica, donde el rendimiento y la precisión son fundamentales. Estos sistemas permiten regular y mantener la velocidad de un motor de corriente continua de manera precisa y consistente en el tiempo, asegurando así un funcionamiento óptimo de los procesos y dispositivos que dependen de dicho motor.

En su forma más básica un sistema de control de velocidad monitorea constantemente la velocidad actual del motor y compara esta medición con una velocidad de referencia o consigna establecida por el usuario. A través de un controlador, se ajusta la señal de control enviada al motor para que la velocidad se acerque lo más posible a la velocidad deseada, de referencia o setpoint, este ajuste con realimentación de la velocidad se considera como un sistema en lazo cerrado. Si el sistema de velocidad se controla en lazo abierto, la señal de control no tendrá en consideración el error entre el setpoint y la variable de proceso, por lo que su control será directamente proporcional al voltaje inducido en el motor y en un rango entre 0 [RPM] para un voltaje de actuación igual a 0 [V] y de las máximas RPM (que dependen de las características físicas del motor, como voltaje de armadura, resistencia de armadura, entre otros, obtenidos para cada motor a través de ensayos de laboratorio o en las especificaciones técnicas otorgadas por el fabricante) al aplicar el máximo voltaje de operación admitido por el motor.

En entornos industriales el control de velocidad es fundamental para regular la velocidad de las máquinas y optimizar la producción. En sistemas de automatización el control de velocidad permite sincronizar y coordinar los movimientos de diferentes componentes del sistema. En la robótica el control de velocidad es esencial para garantizar movimientos más suaves de los actuadores, como en el caso de los brazos robóticos capaces de realizar tareas complejas con exactitud.

Un efectivo sistema de control de velocidad contribuye en aspectos pocos considerados antiguamente como es la eficiencia energética, esto debido a que, al evitar velocidades excesivas o fluctuaciones innecesarias, se logra a su vez minimizar daños o desgastes prematuros del motor.

Para lograr un control de velocidad efectivo, se utilizan diversos componentes y técnicas, como lo son los controladores PID (Proporcional – Integral – Derivativo), algunos algoritmos de control avanzado y retroalimentación a través de sensores para medir la velocidad actual del motor. Estos sistemas también pueden incluir mecanismos de protección, como límites de velocidad máxima o mínima de funcionamiento, sistema de identificación de fallas, entre otros.

1.5.1 Control de velocidad en lazo abierto

En este tipo de sistema, la velocidad del motor se controla mediante la aplicación de un voltaje o corriente de referencia directamente al motor. No hay retroalimentación de la velocidad real del motor, por lo que no se realiza ningún ajuste en función de las condiciones de operación. Este enfoque es simple pero generalmente no proporciona un control preciso de la velocidad y no compensa las perturbaciones externas.

1.5.2 Control de velocidad en lazo cerrado

En este tipo de sistema, se utiliza un sensor de retroalimentación para medir la velocidad real del motor y se compara con la velocidad de referencia deseada. El controlador compara la señal de retroalimentación con la señal de referencia y genera una señal de control para ajustar el voltaje o la corriente suministrada al motor. El control en lazo cerrado permite ajustar y mantener la velocidad del motor en la referencia deseada, incluso en presencia de perturbaciones o cambios en las condiciones de carga.

1.6 **OBJETIVOS**

En este apartado se mencionan los objetivos a los que pretende hacer alcance el desarrollo de este proyecto.

1.6.1 Objetivo general

- Simular y controlar un sistema de velocidad para un motor de corriente continua utilizando el software LabVIEW.

1.6.2 Objetivos específicos

- Desarrollar el modelo matemático que represente la dinámica del motor de CC en función de sus parámetros físicos y eléctricos.
- Modelar las ecuaciones matemáticas que rigen el sistema a través del lenguaje de programación aceptado por el software LabVIEW.
- Desarrollar una interfaz gráfica en LabVIEW que permita visualizar e interactuar en tiempo real con los datos de entrada y salida del sistema, así como ajustar los parámetros del modelo matemático del motor de CC.
- Realizar pruebas de simulación en LabVIEW para evaluar el desempeño del sistema de control de velocidad, analizando y optimizando los parámetros del controlador PID para obtener una respuesta rápida, estable y precisa.

CAPÍTULO 2: DESARROLLO DEL PROYECTO

2. DESARROLLO DEL PROYECTO

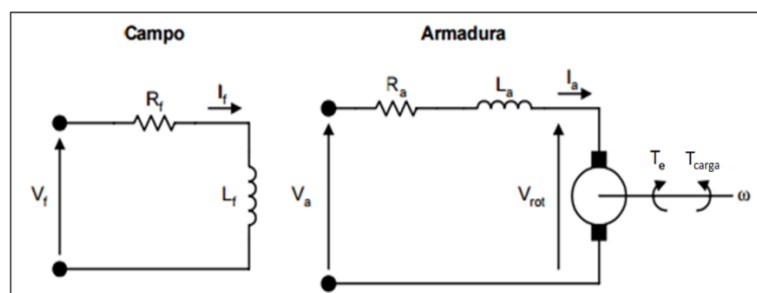
En este capítulo se llevan a cabo los cálculos necesarios para modelar el sistema, se confeccionan los diagramas, se programa el software y se plantea, la metodología de sintonización para llevar a cabo el desarrollo del proyecto.

2.1 MODELADO DEL SISTEMA Y ESQUEMAS DE CONTROL

Para llevar a cabo la simulación será necesario establecer el objeto de estudio sobre el cual se basarán las ecuaciones que lo modelan. Este desarrollo matemático permitirá conocer los parámetros necesarios o requeridos por el modelo para entregar una respuesta y así posteriormente establecer los esquemas de control que se analizarán en el desarrollo de los resultados de la simulación.

2.1.1 Modelo matemático del motor de CC

Como se mencionó anteriormente en los antecedentes generales, un motor de CC está formado por un circuito de campo (inductor) y un circuito de armadura (inducido). Un modelo ya conocido del circuito general de un motor es el que se aprecia en la figura 2-1.



Fuente: <http://imseingenieria.blogspot.com/2019/02/aspectos-generales-de-los-generadores.html>

Figura 2-1. Circuito general de un motor de corriente continua.

Se determinó que una de las posibles configuraciones, y la utilizada en este proyecto, de controlar la velocidad del motor de CC es permanecer alimentando de forma

constante el circuito de campo y comenzar a variar la tensión de armadura, para controlar la velocidad del motor de CC (véase Figura 2-1). Los dos tipos de motores en los que se pueden considerar que la corriente de campo es fija, es en los motores de imanes permanente y motores con excitación independiente, el resto de tipos de configuraciones de motores de CC se deja planteado como desafío para estudiarlos.

Con lo anterior, se establece entonces que la corriente circulante por el circuito de campo (I_f) es un valor constante, simplificando así el modelado y los cálculos matemáticos.

Para poder transcribir las ecuaciones matemáticas al lenguaje de programación utilizado por LabVIEW, es necesario entonces obtener estas ecuaciones diferenciales que modelan la dinámica del motor de CC, las cuales serán ingresadas como diagramas de bloque en el software. Es por ello que también se hace uso de la transformada de Laplace para obtener las funciones de transferencias que derivan de estas ecuaciones diferenciales.

Se obtienen las ecuaciones matemáticas que modelan la parte eléctrica del sistema haciendo uso de leyes de Kirchhoff sobre los circuitos de la figura 2-1 y el resto de ecuaciones haciendo uso de las leyes de la dinámica.

Las ecuaciones que modelan la parte eléctrica del sistema están dadas por:

$$V_f = I_f R_f + L_f \frac{I_f}{dt} \quad (1)$$

Donde:

- V_f es el voltaje de campo
- I_f es la corriente de campo
- R_f es la resistencia de campo
- L_f es la inductancia de campo

$$V_a = I_a R_a + L_a \frac{I_a}{dt} + V_{rot} \quad (2)$$

Donde:

- V_a es el voltaje de armadura
- I_a es la corriente de armadura
- R_a es la resistencia de armadura
- L_a es la inductancia de armadura
- V_{rot} es el voltaje en el devanado del rotor

Las ecuaciones que modelan la parte mecánica del sistema están dadas por:

$$T_e - T_{\text{carga}} = J \frac{d\omega}{dt} \quad (3)$$

Donde:

- T_e es el torque eléctrico
- T_{carga} es el torque de carga
- ω es la velocidad angular del eje del rotor
- J es el momento de inercia total

Las ecuaciones que modelan la parte electromecánica del sistema están dadas por:

$$V_{\text{rot}} = k_v \omega \quad (4)$$

Donde:

- V_{rot} es el voltaje en el devanado del rotor
- $k_v \left[\frac{Vs}{\text{rad}} \right]$ es la constante de voltaje
- ω es la velocidad angular del eje del rotor

$$T_e = k_T I_a \quad (5)$$

Donde:

- T_e es el torque eléctrico
- $k_T \left[\frac{\text{Nm}}{\text{A}} \right]$ es la constante de torque o par de torque del motor
- I_a es la corriente de armadura

Las ecuaciones anteriores modelan el sistema dinámico del motor de CC en el dominio del tiempo. Para poder implementar el modelo del motor utilizando funciones de transferencia se aplica la transformada de Laplace a cada una de las ecuaciones obteniendo las mismas ecuaciones, pero en el dominio de la frecuencia, esto permitirá representar el comportamiento dinámico y estacionario del sistema al relacionar la respuesta de salida (velocidad angular) con la entrada del sistema (voltaje de armadura).

$$V_f = I_f R_f + L_f \frac{dI_f}{dt} \quad (1)$$

$$V_f(s) = I_f(s) R_f + s L_f I_f(s) \quad (6)$$

$$V_a = I_a R_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + V_{rot} \quad (2)$$

$$V_a(s) = I_a(s)R_a + sL_a I_a(s) + V_{rot}(s) \quad (7)$$

$$T_e - T_{carga} = J \frac{d\omega}{dt} \quad (3)$$

$$T_e(s) - T_{carga}(s) = sJ\omega(s) \quad (8)$$

$$V_{rot} = k_v \omega \quad (4)$$

$$V_{rot}(s) = k_v \omega(s) \quad (9)$$

$$T_e = k_T I_a \quad (5)$$

$$T_e(s) = k_T I_a(s) \quad (10)$$

2.1.2 Lazo abierto

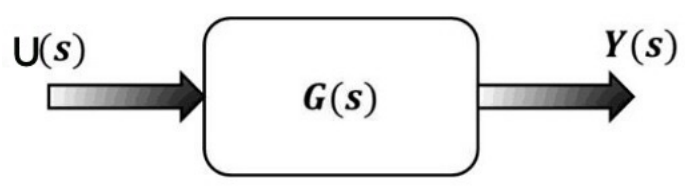
El control de velocidad de un motor de corriente continua (CC) en lazo abierto implica controlar la velocidad del motor sin utilizar retroalimentación de la velocidad real. En lugar de eso, se aplica un voltaje o una señal de control predefinida al motor, sin tener en cuenta la respuesta real del motor.

Sin embargo, el control en lazo abierto tiene algunas limitaciones importantes: no tiene en cuenta las variaciones en la carga del motor, la fricción, las perturbaciones externas o las condiciones cambiantes del entorno. Esto puede resultar en una falta de precisión y estabilidad en la velocidad del motor. Además, si las condiciones del motor cambian, como el desgaste de las escobillas o el envejecimiento de los componentes, la relación empírica utilizada puede volverse menos precisa.

La función de transferencia, descrita por la ecuación 11 y 12, y representada en la figura 2-2, consiste en la relación matemática en el dominio de Laplace, que asocia la variable de salida de un sistema con la variable de entrada al mismo¹⁹.

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} \tag{11}$$

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_0s^m + b_1s^{m-1} + \cdots + b_{m-1}s + b_m}{a_0s^n + a_1s^{n-1} + \cdots + a_{n-1}s + a_n} \tag{12}$$



Fuente: <https://sinadrives.com/wp-content/uploads/2021/06/g2-EN-1-400x320.jpg>

Figura 2-2. Esquematización de la Función de Transferencia en Lazo Abierto.

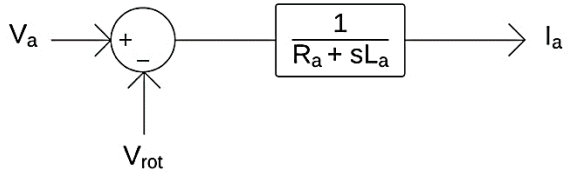
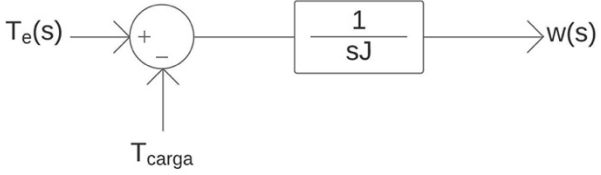
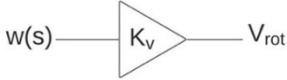
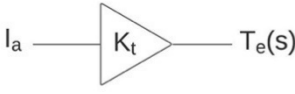
En toda función de transferencia, las raíces del numerador determinan los “ceros” del sistema, mientras que las raíces del denominador definen los “polos” del sistema, los cuales describen a su vez el orden del sistema, y en función del orden, es el tipo de respuesta que se va a presentar.

El esquema de la figura 2-2 representa la relación que existe entre la velocidad angular (o RPM si se realiza una conversión) respecto al voltaje aplicado en la armadura del motor si lo relacionamos con el proyecto de investigación. Donde $G(s)$ es la función de transferencia que modela el sistema dinámico del motor. Para obtenerlo se relacionarán las ecuaciones que modelan el sistema dinámico del motor de CC en el dominio de Laplace con su equivalente en diagramas de bloques.

La tabla 2-1 organiza lo anterior mencionado.

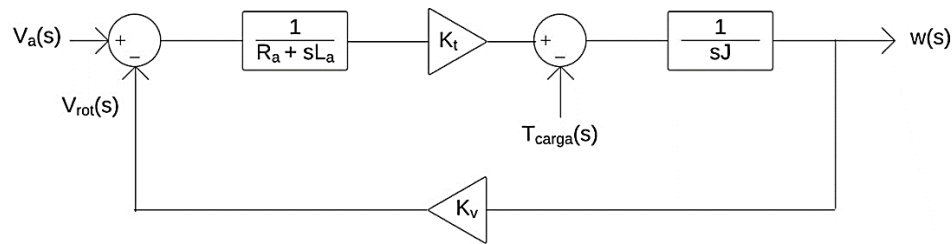
¹⁹ Ogata, K. (2010). Ingeniería de control moderna. Pearson.

Tabla 2 - 1. Diagrama de bloques equivalentes a ecuaciones del motor de CC.

ECUACIÓN	DIAGRAMA EQUIVALENTE
$V_a(s) - V_{rot}(s) = I_a(s)R_a + sL_aI_a(s)$	
$T_e(s) - T_{carga}(s) = sJ\omega(s)$	
$V_{rot}(s) = k_v\omega(s)$	
$T_e(s) = k_tI_a(s)$	

Fuente: elaboración propia basado en el teorema de bloques

Relacionando entonces las variables de las ecuaciones anteriores para representar la salida respecto de la entrada del sistema y obtener así la velocidad en función del voltaje de armadura se obtiene el siguiente diagrama de bloques (véase Figura 2-3).



Fuente: elaboración propia

Figura 2-3. Diagrama de bloques del sistema dinámico del motor de CC en lazo abierto.

En la figura 2-3 se representa entonces el diagrama de bloques que modela el motor de CC, también denominada planta o $G(s)$, que tiene como entrada el voltaje de armadura y salida la velocidad angular.

Para poder graficar el funcionamiento de la planta en lazo abierto se necesita entonces conocer los parámetros que la modelan. Estos datos corresponden a los de la tabla 2-2.

Tabla 2 - 2. Parámetros requeridos para graficar la respuesta dinámica de $G(s)$

PARÁMETROS	NOMENCLATURA
Voltaje de armadura	$V_a(s)$
Resistencia de armadura	R_a
Inductancia de armadura	L_a
Constante de torque	k_t
Constante de voltaje	k_v
Momento de inercia	J

Fuente: elaboración propia.

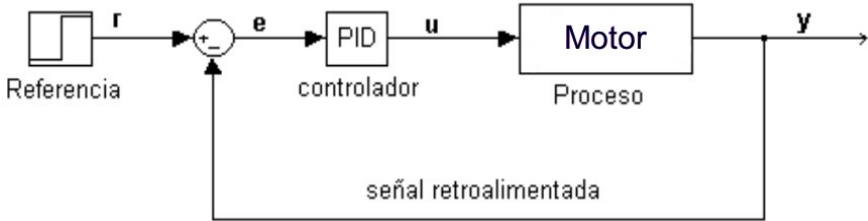
Si se considera el $T_{carga}(s) = 0$ entonces es posible reducir el bloque del sistema a una única función de transferencia que modela la planta completa.

2.1.3 Lazo cerrado con controlador PID

El control de velocidad de un motor de corriente continua (CC) en lazo cerrado implica utilizar retroalimentación para mantener la velocidad del motor en un valor deseado. En este tipo de control, se mide la velocidad real del motor mediante un sensor de velocidad y se compara con una referencia de velocidad establecida.

En el caso de la simulación, la velocidad que alcanza el motor en lazo abierto es una respuesta que deriva de las características propias del motor y de sus variables de operación. Por lo tanto, el modelo matemático en lazo cerrado estará siempre realimentando la señal de velocidad que se obtiene a través de los parámetros ingresados o establecidos ya en la configuración y el cual es comparado con la variable de referencia o setpoint para así establecer la magnitud del error. Este error es el que es compensado con el controlador PID y el cual busca entregar la respuesta necesaria al modificar el voltaje de armadura que permitirá corregir y mantener estable la velocidad del sistema ante eventuales cambios en la carga o perturbaciones.

En la figura 2-4 se detalla la configuración en lazo cerrado para controlar la planta que modela el motor de CC. Esta referencia señala que el controlador se encuentra conectado en serie con la planta del sistema.



Fuente: <https://www.automatas.org/hardware/images/Image25.gif>

Figura 2-4. Esquematzación del control de motor en lazo cerrado.

Es posible modelar el controlador PID como un diagrama de bloques al conocer su función de transferencia que lo modela. Esta función se detalla en la tabla 2-3 que se expone a continuación.

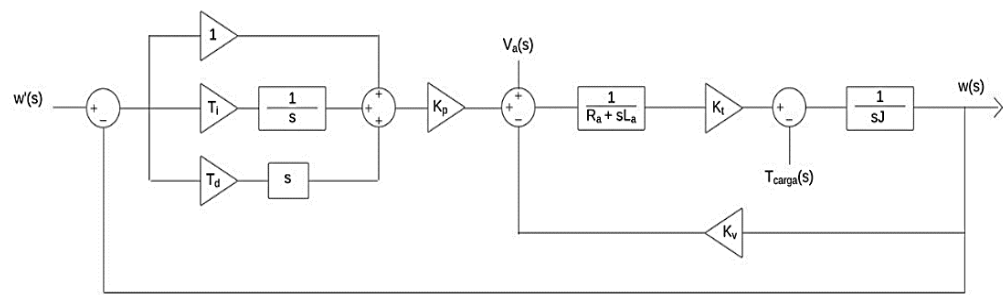
Tabla 2 - 3.. Diagrama de bloques equivalentes a ecuaciones del controlador PID.

ECUACIÓN	DIAGRAMA EQUIVALENTE
$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s)$	

Fuente: elaboración propia.

En base a todo lo anterior se puede elaborar entonces el diagrama de bloques que representa la respuesta dinámica del motor de CC en lazo cerrado con controlador PID. Este modelo se consigue al considerar una entrada de referencia (para la velocidad del

motor), el bloque PID y el diagrama ya establecido para la planta $G(s)$. Este diagrama se aprecia en la figura 2-5.



Fuente: elaboración propia.

Figura 2-5. Diagrama de bloques del sistema dinámico del motor de CC en lazo cerrado con controlador PID.

2.2 ESTRATEGIAS DE CONTROL

Como se mencionó anteriormente respecto a las estrategias y formas de controlar el sistema de velocidad de un motor de CC, se encuentran métodos como el control en lazo abierto, en donde la velocidad del motor se controla aplicando un voltaje de alimentación constante sin tener en cuenta la retroalimentación de la velocidad real. Se puede utilizar un sensor de retroalimentación (encoder) para medir la velocidad real del motor y se compara con la referencia de velocidad. La diferencia entre la velocidad deseada y la velocidad real se utiliza para generar una señal de control que ajusta el voltaje o la corriente aplicada al motor. Otras de las estrategias y la que se utilizará en este proyecto, es la de controlar el sistema de velocidad a través de un controlador PID, el cual será necesario sintonizarlo considerando los parámetros del motor, para analizar su respuesta dinámica, y haciendo uso de algunos de los métodos existentes para calibrarlo.

2.2.1 Controlador PID

Un controlador PID es un dispositivo utilizado en sistemas de control que ajusta la salida del sistema en función de la diferencia entre una referencia deseada y una retroalimentación real. El controlador PID utiliza información de la retroalimentación para generar una señal de control que modifica el comportamiento del sistema y lo dirige hacia el estado deseado. El controlador toma en cuenta la diferencia de error, la historia del error

y la tasa de cambio del error para ajustar la salida de manera apropiada. El controlador PID es ampliamente utilizado debido a su capacidad para adaptarse a diferentes sistemas y su flexibilidad en el ajuste de parámetros.

A continuación, se describen algunas de las características que poseen cada tipo de acción en el controlador PID y como influyen estas en el diseño de control.

2.2.1.1 Acción proporcional (P)

En el control proporcional la salida del controlador es directamente proporcional a su entrada; la entrada es la señal de error (e), la cual es una función del tiempo. De esta manera:

$$u(t) = K_p e(t)$$

Donde K_p es una constante llamada ganancia proporcional.

La salida del controlador depende sólo de la magnitud del error en el instante en el que se considera. La función de transferencia para el controlador es, por lo tanto:

$$C_p(s) = K_p$$

El controlador es, en efecto, solo un amplificador con una ganancia constante. En cierto tiempo, un error grande produce una salida grande del controlador. La ganancia constante, sin embargo, tiende a existir sólo sobre cierto rango de errores que se conoce como banda proporcional. Es común expresar la salida del controlador como un porcentaje de la posible salida total de éste. De este modo, un 100% de cambio en la salida del controlador, corresponde a un cambio en el error desde un extremo a otro de la banda proporcional, así:

$$K_p = \frac{100}{\text{Banda proporcional}}$$

Debido a que la salida es proporcional a la entrada, si la entrada al controlador es un error en la forma de un escalón, entonces la salida también será un escalón y es exactamente una versión a escala de la entrada. Esto será realizado por el controlador siempre y cuando opere dentro de su banda proporcional.

Un controlador proporcional puede controlar cualquier planta estable, pero posee desempeño limitado y error en régimen permanente (off-set).

2.2.1.2 Acción integral (I)

Con un control integral, la salida es proporcional a la integral de la señal de error (e) en el tiempo, es decir:

$$u(t) = \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau$$

Donde $\frac{1}{T_i}$, es la denominada ganancia integral.

Este término tiene unidades de 1/s. La integral entre 0 y t representa el área bajo la gráfica del error entre 0 y t. Así, debido a que después de que el error comienza, el área se incrementa en una razón regular y la salida del controlador se debe incrementar una razón regular. Esto implica entonces que la salida en cualquier tiempo es proporcional a la acumulación de los efectos de los errores pasados.

Aplicando la transformada de Laplace a la ecuación anterior se obtiene la siguiente función de transferencia para el controlador integral:

$$C_i(s) = \frac{1}{T_i s}$$

La ventaja de un controlador integral es que permite agregar un término s en el denominador incrementando el tipo de sistema en uno, por lo que en caso de haber error en estado estacionario, este desaparecerá. Una desventaja de este controlador es que tiende a reducir la estabilidad relativa del sistema.

2.2.1.3 Acción derivativa (D)

Con un control derivativo, la salida del controlador es proporcional a la razón de cambio con el tiempo del error (e), es decir:

$$u(t) = T_d \frac{de(t)}{dt}$$

Donde T_d es la ganancia derivativa y tiene unidades de s. Tan pronto aparezca una señal de error en el controlador este inmediatamente puede generar una salida muy grande, esto debido a que este controlador es proporcional a la razón de cambio del error y no a su valor. De este modo puede generar una acción correctiva grande antes de que se presente un error grande en realidad. Sin embargo, si el error es constante, entonces no

hay acción derivativa, aún si el error es grande. Así, el control derivativo, es insensible a señales de error constante o que varían con lentitud, es por esto que no es recomendable su uso solo y debe ser combinado con otras técnicas de control.

Al tomar la transformada de Laplace a la ecuación anterior se obtiene la siguiente función de transferencia:

$$C_d(s) = T_d s$$

2.2.1.4 Acción proporcional-integral (PI)

En un controlador PI, se combinan dos componentes fundamentales: la acción proporcional y la acción integral. Y está representado por la siguiente ecuación:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau$$

Al combinar la acción proporcional y la acción integral, el controlador PI puede lograr un buen rendimiento en términos de precisión y estabilidad. La acción proporcional permite una rápida respuesta inicial, mientras que la acción integral corrige los errores persistentes a largo plazo.

Al tomar la transformada de Laplace a la ecuación anterior, se obtiene la siguiente función de transferencia:

$$C_{PI}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right)$$

2.2.1.5 Acción proporcional-derivativa (PD)

En un controlador PD, se combinan dos componentes principales: la acción proporcional y la acción derivativa. Y está representado por la siguiente ecuación.

$$u(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt}$$

La combinación de la acción proporcional y la acción derivativa en el controlador PD permite una respuesta más rápida y precisa ante cambios en el sistema controlado. La acción proporcional actúa de forma inmediata para corregir el error actual, mientras que

la acción derivativa proporciona una respuesta anticipada para mitigar posibles errores futuros.

Al tomar la transformada de Laplace a la ecuación anterior, se obtiene la siguiente función de transferencia:

$$C_{PD}(s) = K_p(1 + T_d s)$$

2.2.1.6 Acción proporcional-integral-derivativa (PID)

El control proporcional integral derivativo permite unir las tres ventajas de cada una de las tres acciones de control individuales. La salida de este controlador está dada por:

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

Al tomar la transformada de Laplace a la ecuación anterior, se obtiene la siguiente función de transferencia:

$$C_{PID}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

2.2.2 Método de sintonización del controlador PID

El controlador PID puede diseñarse a través de métodos propuestos analizando su comportamiento dinámico en lazo abierto o en lazo cerrado. Así como también en base al método de control que se quiera aplicar sobre el sistema. En este proyecto se

2.2.2.1 Método de sintonización de Ziegler-Nichols en lazo abierto o curva de reacción

Muchas plantas pueden ser descritas satisfactoriamente por el modelo:

$$G_0(s) = \frac{K_0}{v_0 s + 1} e^{-s\tau_0} \quad \text{donde } v_0 > 0, K_0 \text{ es ganancia del proceso, } \tau_0 \text{ es tiempo muerto y } v_0 \text{ es constante de tiempo.}$$

Una versión cuantitativa lineal del modelo puede ser obtenida mediante un experimento a lazo abierto, utilizando el siguiente procedimiento.

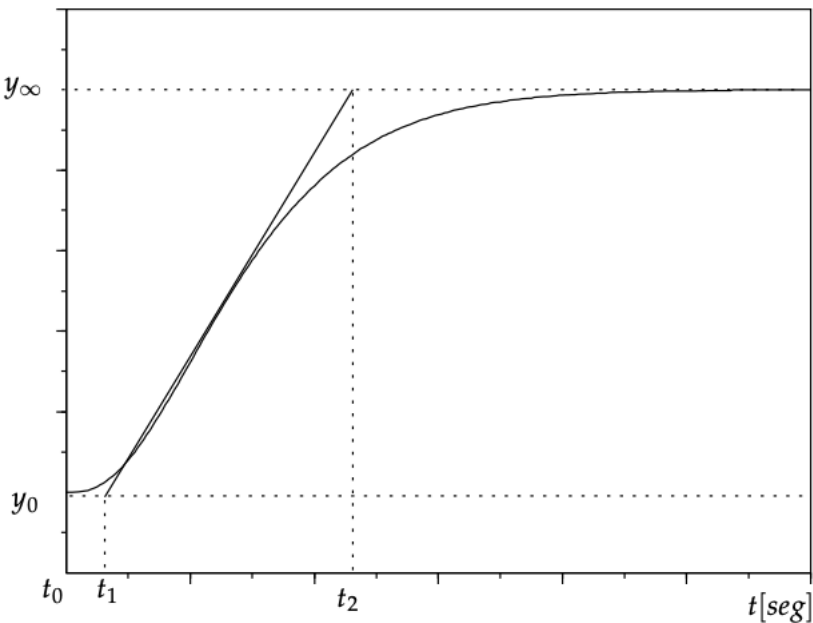
- 1. Con la planta a lazo abierto, llevar a la planta a un punto de operación normal. Digamos que la salida de la planta se estabiliza en $y(t) = y_o$ para una entrada constante $u(t) = u_o$.
- 2. En el instante inicial t_o , aplicar un cambio en la entrada escalón, desde u a u_∞ (esto debería ser en un 10% a 20% del rango completo).
- 3. Registrar la salida hasta que se estabilice en el nuevo punto de operación. Supongamos que la curva que se obtiene es la que se muestra en la Figura 2-6. Esta curva se llama curva de reacción del proceso.²⁰

Calcular los parámetros del modelo de la siguiente forma:

$$K_0 = \frac{y_\infty - y_o}{u_\infty - u_o}$$

$$\tau_0 = t_1 - t_0$$

$$v_0 = t_2 - t_1$$



Fuente: <https://i0.wp.com/dademuch.com/wp-content/uploads/2021/06/image-13.png?resize=604%2C506&ssl=1>

Figura 2-6. Respuesta al escalón de la planta en lazo abierto método Z-N.

El modelo obtenido puede ser utilizado para varios métodos de ajuste de controladores PID. Uno de estos también fue propuesto por Ziegler y Nichols. El objetivo

²⁰ Virginia Mazzone, 2002. Controladores PID, control automático 1.

de diseño es alcanzar un amortiguamiento tal que exista una relación de 4:1 para el primer y segundo pico de la respuesta a una referencia escalón. Los parámetros sugeridos por Z-N son los que se muestran en la tabla 2-4.

Tabla 2 - 4. Parámetros de ajuste (método curva de reacción)

	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{v_0}{K_0 \tau_0}$		
PI	$\frac{0.9 v_0}{K_0 \tau_0}$	$3 \tau_0$	
PID	$\frac{1.2 v_0}{K_0 \tau_0}$	$2 \tau_0$	$0.5 \tau_0$

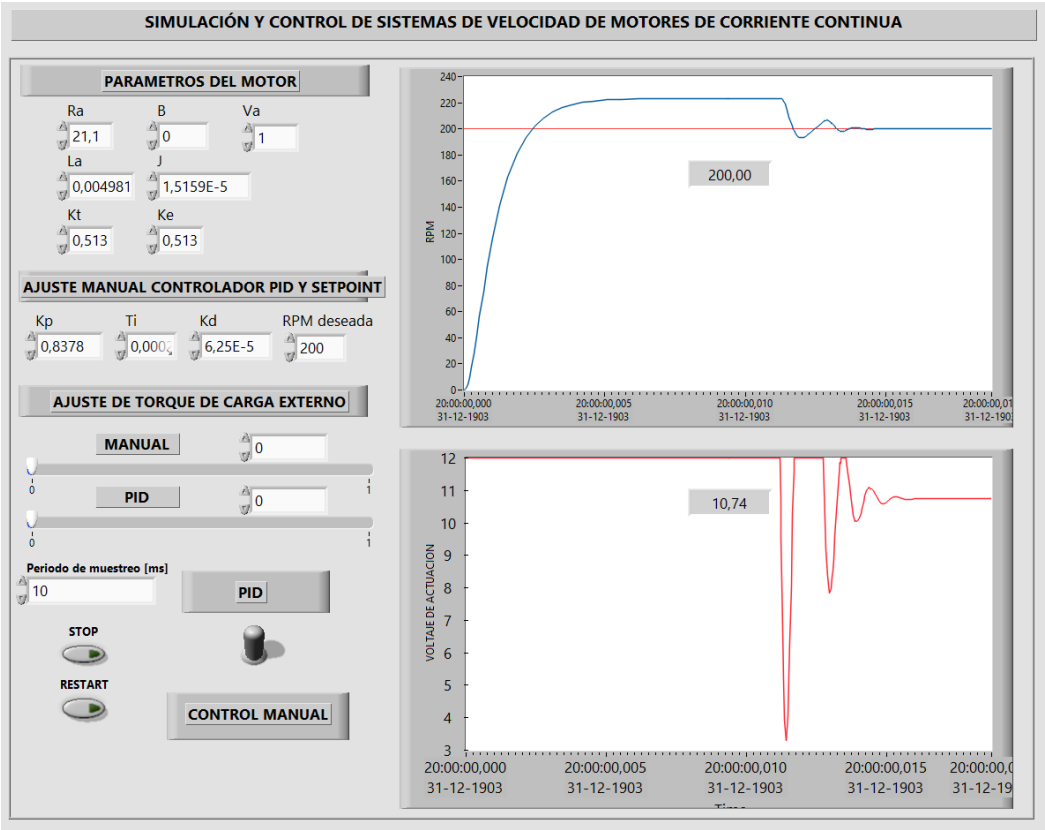
Fuente: Ingeniería de Control Moderno 3ra. Ed. Katsuhiko Ogata

2.3 INTERFAZ GRÁFICA EN LABVIEW

LabVIEW es un entorno muy versátil y poderoso, por lo que hay muchas más funcionalidades y características avanzadas que se pueden utilizar para crear interfaces gráficas más complejas y personalizadas. En este apartado se presenta el esqueleto del proyecto ejecutado en el software, su interfaz de usuario y su interfaz de programación.

2.3.1 Interfaz HMI

En la figura 2-8 se presenta la interfaz HMI con la que el usuario interactúa con el proceso. En ella se observan los datos que deben ser ingresados y que a su vez son modificables. El valor para la velocidad de muestreo es uno de ellos. También se observa la gráfica que indica la velocidad del motor en tiempo real de simulación y el voltaje de actuación que se está aplicando.

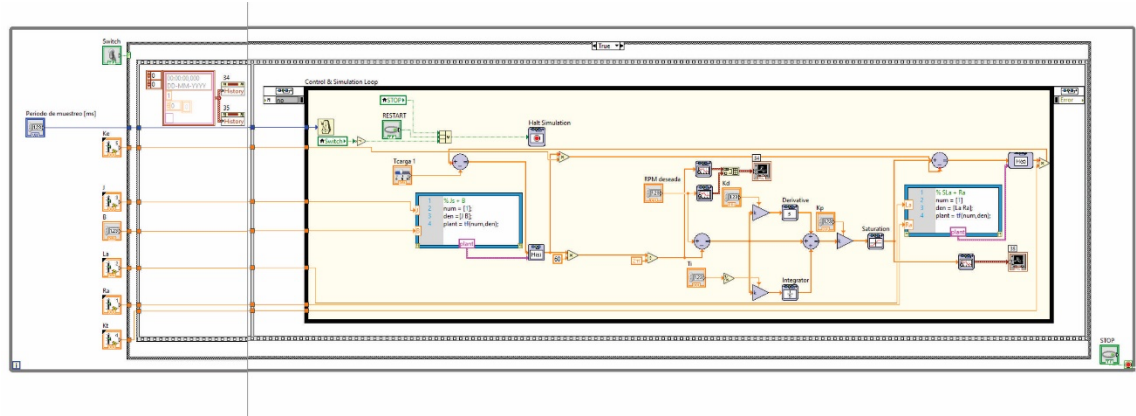


Fuente: elaboración propia

Figura 2-7. Interfaz HMI del proyecto

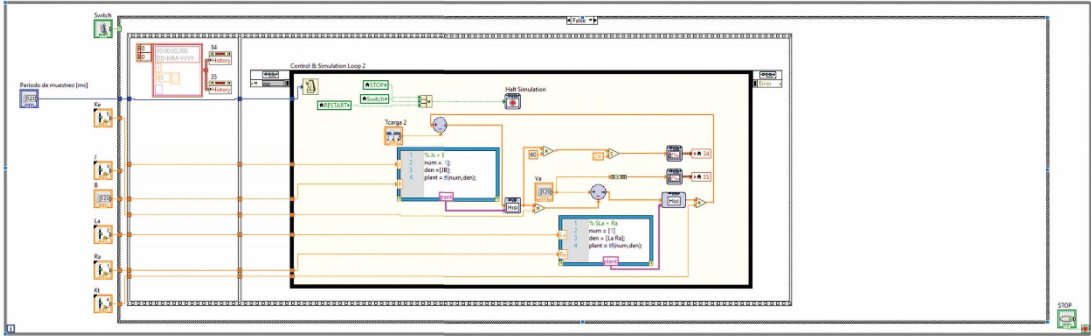
2.3.2 Diagrama de bloques

En las figuras 2-9 y 2-10 se puede observar los diagramas de bloques que permiten el funcionamiento de la simulación. Para ello se hace uso de las diferentes herramientas incorporadas, una de ellas es “Case Structure” que permite tener una pantalla independiente para cada caso que se quiera simular en paralelo. Por ello, a continuación se presentan dos diagramas de bloques. Uno cuando la configuración está en lazo abierto y otro cuando se encuentra en lazo cerrado.



Fuente: elaboración propia

Figura 2-8. Diagrama de bloques en lazo abierto.



Fuente: elaboración propia

Figura 2-9. Diagrama de bloques en lazo cerrado.

CAPÍTULO 3: RESULTADOS DE LA PUESTA EN MARCHA DE
LA SIMULACIÓN

3. RESULTADOS DE LA PUESTA EN MARCHA DE LA SIMULACIÓN

En este capítulo se realizan las primeras pruebas de simulación. Para ello se eligen datos de un motor de corriente continua con los cuales se realizará la simulación. Aquí se realizan los cálculos y se obtienen los gráficos necesarios para calcular los controladores, uno obtenido usando un método de sintonización en lazo abierto. Además, se realizan pruebas haciendo uso de la aplicación desarrollada para ver cómo se comporta el sistema ante cambios en la referencia y perturbaciones en la carga, utilizando los datos del controlador. También se hace uso del software Simulink perteneciente a MatLab para realizar comparaciones en la obtención de datos.

3.1 PARÁMETROS DE PRUEBA Y SIMULACIÓN

Para poder realizar las pruebas de simulación será necesario establecer como ejemplo los parámetros característicos de un motor. Estos parámetros son los que debería proporcionar cada fabricante. De no conocerse los parámetros del motor es posible identificarlos realizando pruebas específicas de laboratorio para cada uno de ellos. En este proyecto se eligen como referencia los siguientes datos del motor (véase Tabla 3-1) obtenidos del anexo A de la guía de parametrización de un motor DC de imán permanente, de la Universidad del Cauca.

Tabla 3 - 1. Parámetros del motor

PARÁMETROS	NOMENCLATURA	VALOR	UNIDAD
Voltaje de armadura	$V_a(s)$	24	[V]
Resistencia de armadura	R_a	21.1	[Ω]
Inductancia de armadura	L_a	0.004981	[H]

Fuente:<http://repositorio.unicauca.edu.co:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/1488/ANEXO%20A.%20Guia%20parametrizacion%20de%20un%20motor%20DC%20de%20iman%20permanente%20.pdf?sequence=2&isAllowed=0>

Tabla 3 - 2. Continuación parámetros del motor

Constante de torque	k_t	0.513	$\left[\frac{\text{Nm}}{\text{A}}\right]$
Constante de voltaje	k_v	0.513	$\left[\frac{\text{Vs}}{\text{rad}}\right]$
Momento de inercia	J	0.000015159	$[\text{kgm}^2]$

Fuente:<http://repositorio.unicauca.edu.co:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/1488/ANEXO%20A.%20Guia%20parametrizacion%20de%20un%20motor%20DC%20de%20iman%20permanente%20.pdf?sequence=2&isAllowed=>

3.2 ANÁLISIS EN LAZO ABIERTO

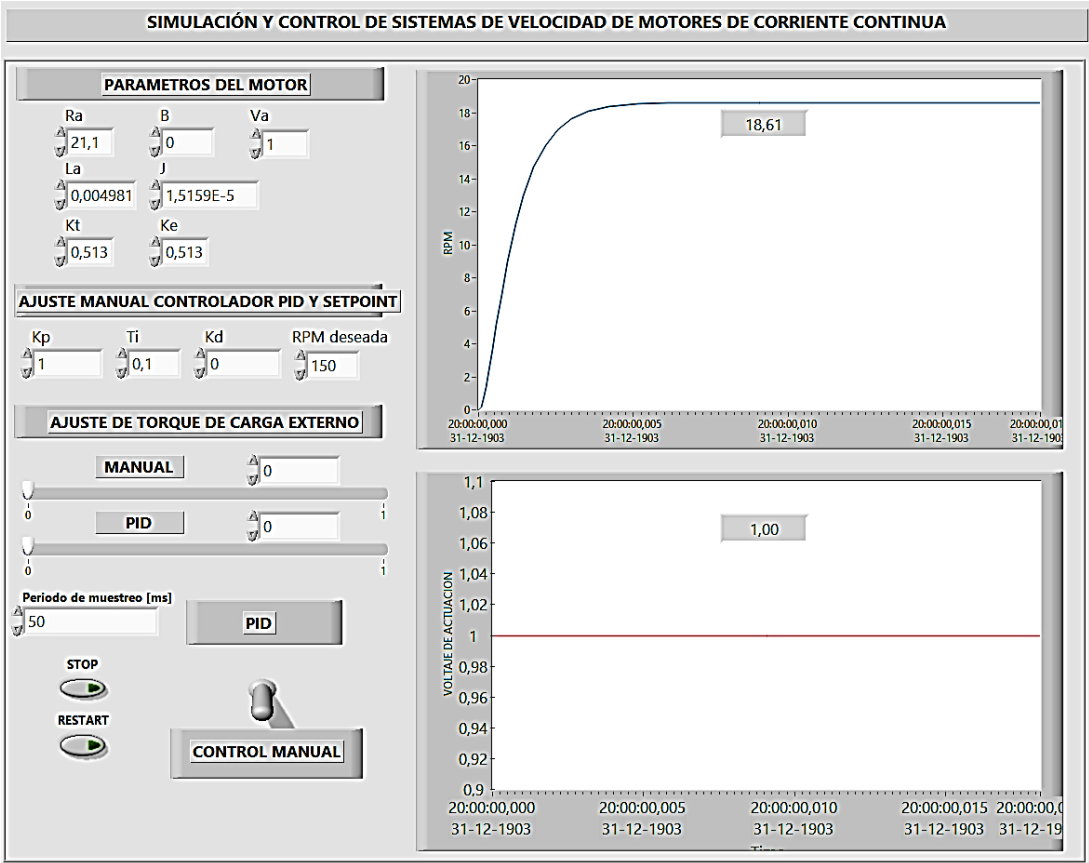
En esta sección se realizarán pruebas de control utilizando como referencia de diseño del controlador el comportamiento del sistema en lazo abierto. Para ello se hace uso del simulador diseñado en LabVIEW para ir observando las distintas respuestas del sistema al interactuar con diferentes parámetros. Estos análisis permiten evaluar posibles linealidades y hacer uso de métodos de sintonización de controladores en base a la respuesta.

3.2.1 Determinación de Sistema lineal o no lineal

Una de las condiciones para determinar si el sistema es lineal o no, es que se debe cumplir con el principio de superposición, por ello se realizan tres pruebas en lazo abierto, donde la suma de las dos respuestas debe ser igual a la respuesta de la suma de sus entradas. Y además debe cumplir el principio de homogeneidad, donde se multiplica la entrada por un escalar y comprobar si este valor es equivalente con la respuesta del sistema al ser simulado en ese mismo valor de entrada.

3.2.1.1 Respuesta en lazo abierto a 1 [V]

En la figura 3-1 se grafica la respuesta obtenida del simulador diseñado en LabVIEW utilizando 1[V] como entrada. Para ello se debe situar el switch de selección en modo de control manual, para que el simulador funcione como lazo abierto. Los datos del motor están configurados por defectos con los valores presentados en el proyecto. El ajuste manual del controlador PID y SetPoint no influyen en la simulación al estar funcionando en modo de control manual.



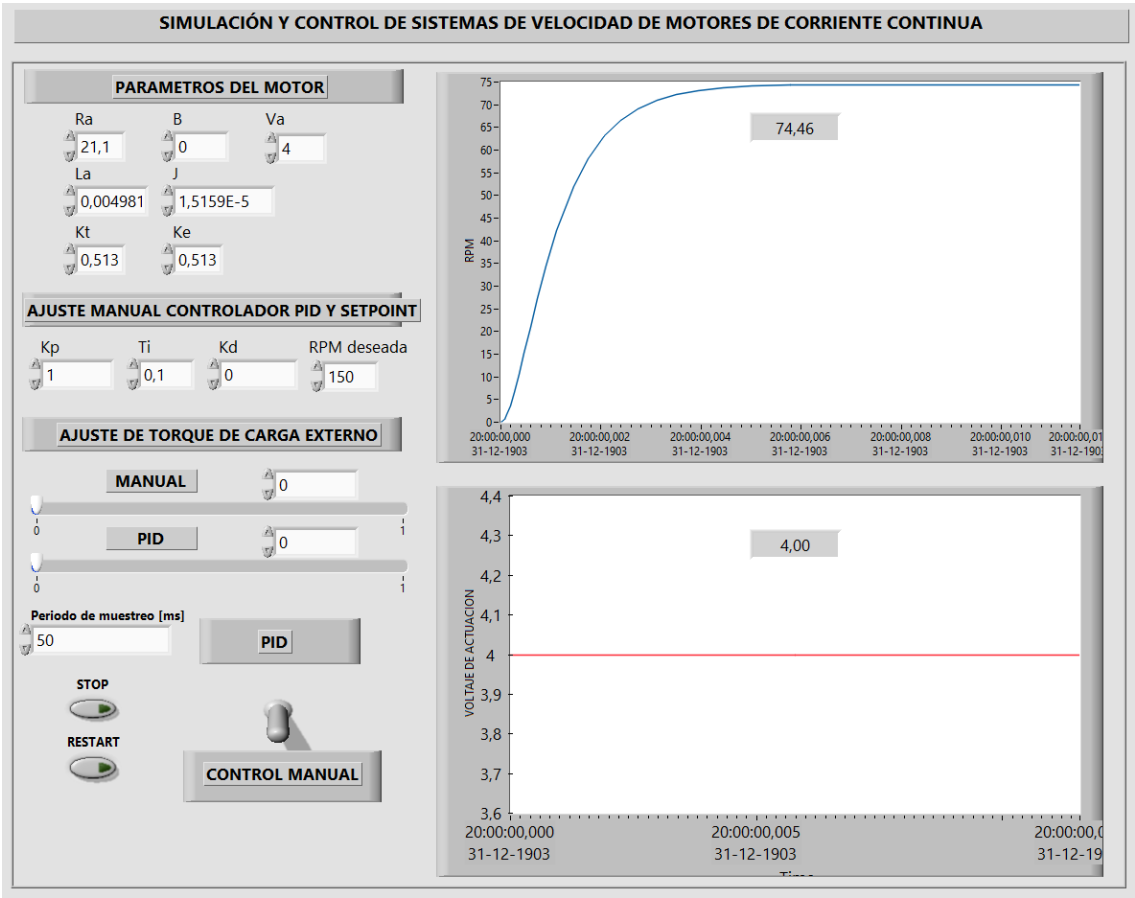
Fuente: elaboración propia.

Figura 3-1. Respuesta en lazo abierto a 1 [V] con 18,61 RPM alcanzadas utilizando LabVIEW.

Se observa de la figura anterior que la respuesta en estado estable cuando el sistema es sometido a 1[V] es de 18,61 [RPM]. Y que tarda aproximadamente 6 [ms] en alcanzar esa velocidad.

3.2.1.2 Respuesta en lazo abierto a 4 [V]

Siguiendo las instrucciones anteriores para la manipulación del simulador, en la figura 3-2 se observa la gráfica de la respuesta obtenida del simulador diseñado en LabVIEW utilizando 4[V] como actuación sobre el sistema.



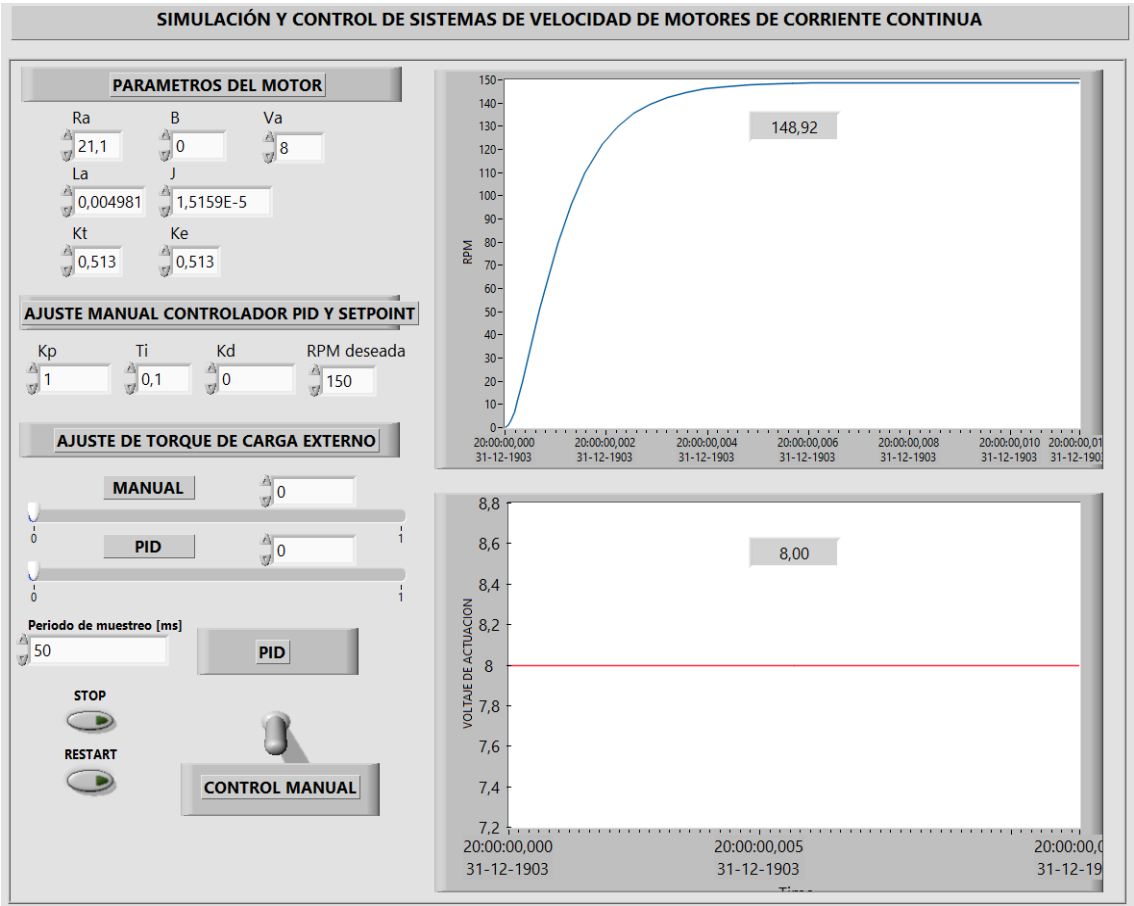
Fuente: elaboración propia.

Figura 3-2. Respuesta en lazo abierto a 4 [V] con 74,46 RPM alcanzadas utilizando LabVIEW.

Se observa de la figura anterior que la respuesta en estado estable cuando el sistema es sometido a 4[V] es de 74,46 [RPM]. Y que tarda aproximadamente 6 [ms] en alcanzar esa velocidad.

3.2.1.3 Respuesta en lazo abierto a 8 [V]

Haciendo uso del simulador, se observa en la figura 3-3 la gráfica de la respuesta en lazo abierto obtenida del simulador diseñado en LabVIEW al ser sometido a un voltaje de actuación de 8[V].



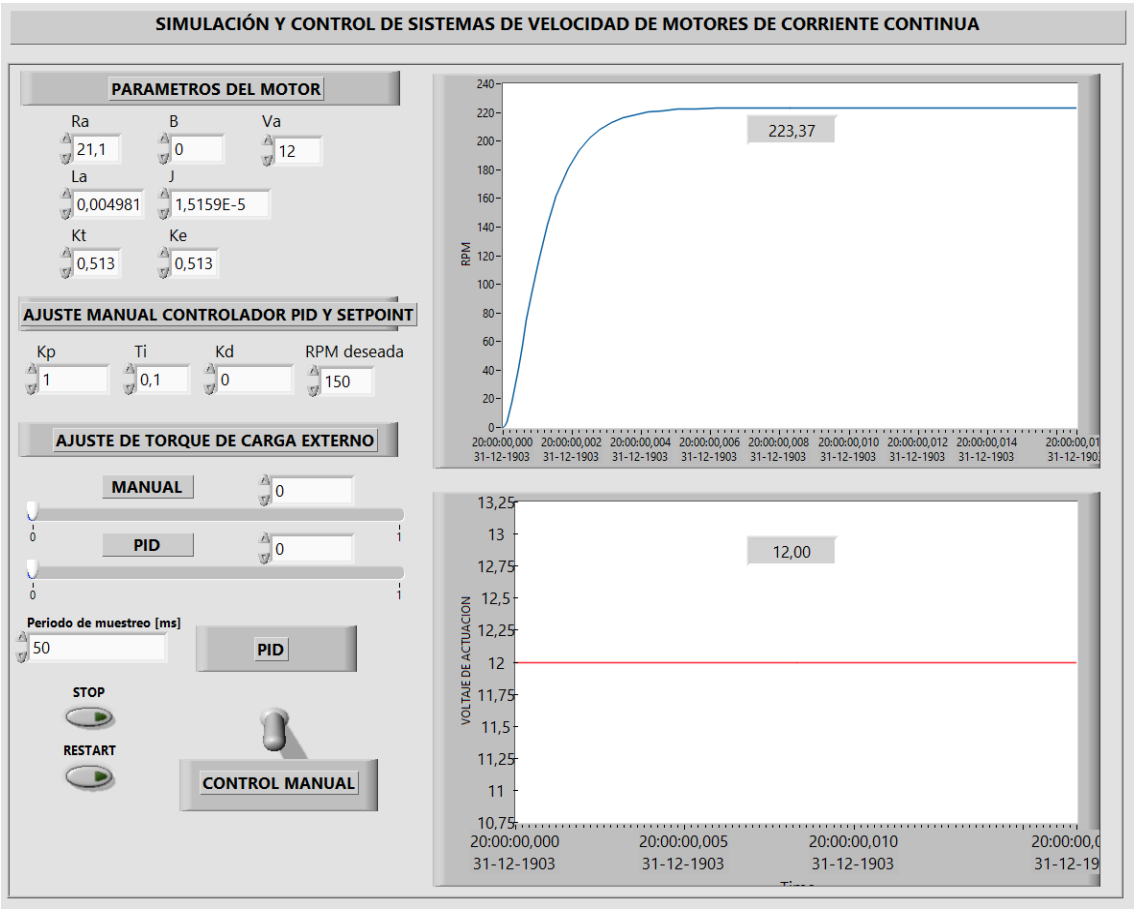
Fuente: elaboración propia.

Figura 3-3. Respuesta en lazo abierto a 8 [V] con 148,92 RPM alcanzadas utilizando LabVIEW.

Se observa de la figura anterior que la respuesta en estado estable cuando el sistema es sometido a 8[V] es de 148,92 [RPM]. Y que tarda aproximadamente 6 [ms] en alcanzar esa velocidad.

3.2.1.4 Respuesta en lazo abierto a 12 [V]

En la figura 3-4 se grafica la respuesta en lazo abierto a 12[V] obtenida del simulador diseñado en LabVIEW. En esta respuesta el motor está siendo sometido al máximo voltaje de actuación al que funciona según sus datos de fabricación.



Fuente: elaboración propia.

Figura 3-4. Respuesta en lazo abierto a 12 [V] con 223,37 RPM alcanzadas utilizando LabVIEW.

Se observa de la figura anterior que la respuesta en estado estable cuando el sistema es sometido a 12[V] es de 223,37 [RPM]. Y que tarda aproximadamente 6 [ms] en alcanzar esa velocidad.

3.2.1.5 Comprobación de linealidad

Para que se cumpla el principio de superposición la velocidad al aplicarse 12 [V] debe descomponerse como la suma de las velocidades alcanzadas a 4 [V] y 8 [V]. Esto se evidencia en los siguientes cálculos.

$$RPM(12 [V]) \approx RPM(4[V]) + RPM(8[V])$$

$$223,37 [RPM] \approx 74,46[RPM] + 148,92[V]$$

$$223,37 [RPM] \approx 223,38 [RPM]$$

Es posible concluir que si logra cumplirse el principio de superposición. Es necesario observar que la velocidad considerada para esos voltajes es cuando el sistema alcanza su estado estable. Ahora es necesario comprobar el principio de homogeneidad. Para ello se multiplica el valor de la entrada por un escalar (ej:4) y se comprueba si la respuesta es igual a la velocidad alcanzada al mismo voltaje. Lo cual se busca demostrar con los siguientes datos.

$$RPM (1 [V]) = 18,61 [RPM]$$

$$RPM (4 [V]) = 76,46 [RPM]$$

Por lo tanto,

$$RPM (4 * 1 [V]) = 4 * RPM(1[V])$$

$$RPM (4 [V]) = 4 * 18,61 [RPM]$$

$$74,46 \approx 74,44 [RPM]$$

Se puede concluir que el sistema cumple con el principio de homogeneidad.

De los resultados anteriores se puede decir que el modelo del sistema es del tipo lineal al cumplir con el principio de superposición y homogeneidad, considerando los datos como valores alcanzados en estado estable.

3.2.2 Función de transferencia

La función de transferencia del sistema dinámico que modela el motor de CC puede ser calculada si se considera que el torque de carga inicial es cero.

Para ello se debe encontrar la relación matemática que representa la salida (velocidad angular) con respecto a la entrada (voltaje de armadura). Para ello se considera las ecuaciones antes descritas y se reemplazan entre ellas.

Sustituyendo (9) y (10) en (7)

$$V_a(s) - V_{rot}(s) = I_a(s)R_a + sL_a I_a(s)$$

$$V_a(s) = \frac{T_e(s)}{k_T} R_a + sL_a \frac{T_e(s)}{k_T} + k_v \omega(s)$$

$$V_a(s) = \frac{(R_a + sL_a)T_e(s)}{k_T} + k_v \omega(s) \quad (14)$$

Sustituyendo la ecuación (8) en (14) y asumiendo $T_{carga} = 0$ se obtiene

$$V_a(s) = \frac{(R_a + sL_a)sJ\omega(s)}{k_T} + k_v \omega(s) \quad (15)$$

Despejando la salida en función de la entrada

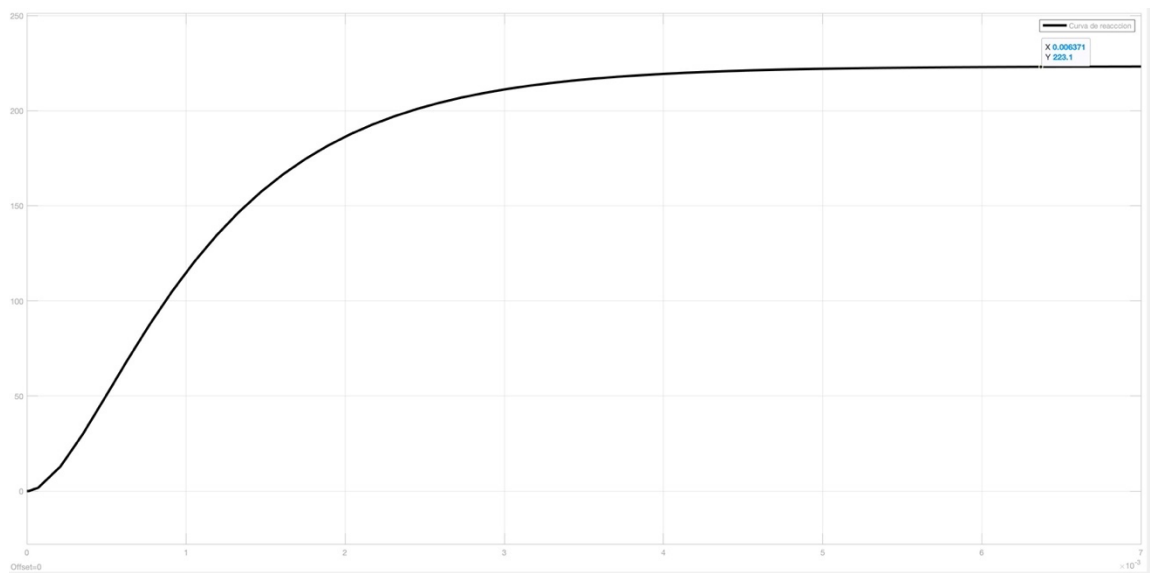
$$\frac{V_a(s)}{\omega(s)} = \left(\frac{(R_a + sL_a)sJ}{k_T} + k_v \right)$$

$$\frac{\omega(s)}{V_a(s)} = \left(\frac{k_T}{sJ(R_a + sL_a) + k_v k_T} \right)$$

$$\frac{\omega(s)}{V_a(s)} = \left(\frac{k_T}{sJ(R_a + sL_a) + k_v k_T} \right)$$

$$\frac{\omega(s)}{V_a(s)} = \frac{0.513}{0.0000000755s^2 + 0.00031985s + 0.263169} \quad (13)$$

En la figura 3-5 se observa la gráfica obtenida en la ecuación anterior utilizando el software Simulink.



Fuente: elaboración propia.

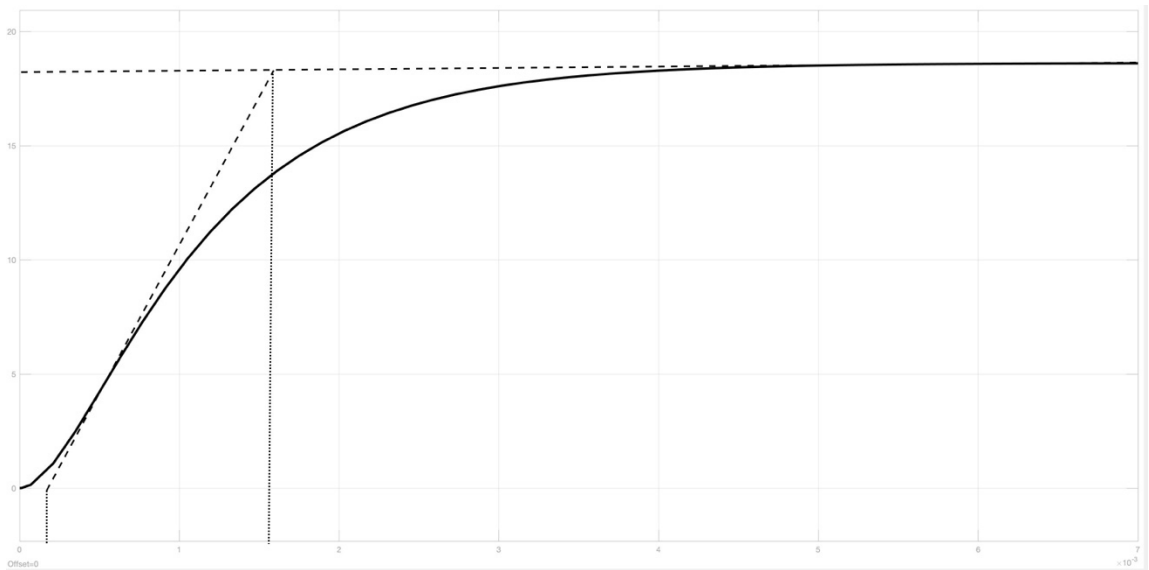
Figura 3-5. Respuesta a 12 [V] de la función de transferencia en lazo abierto utilizando Simulink.

3.2.3 Cálculo de parámetros método de curva de reacción

Para aplicar este método es necesario aplicar una entrada de escalón unitario al sistema en lazo abierto. Se hará uso del método de la recta tangente y el software Simulink para encontrar los valores que permiten ocupar las ecuaciones del método matemático. Para ello se deberá trazar la recta tangente y obtener los tiempos en que se interceptan las gráficas.

3.2.3.1 Respuesta en lazo abierto a 1[V] usando Simulink

La figura 3-6 grafica la respuesta en lazo abierto a 1[V] en Simulink y muestra como están trazadas las rectas para obtener los tiempos t1 y t2.



Fuente: elaboración propia.

Figura 3-6. Análisis de tiempos t_1 y t_2 sobre gráfica en lazo abierto en Simulink.

De la gráfica se obtienen los valores de $t_1 = 0.00015 \text{ [s]}$ y $t_2 = 0.00155 \text{ [s]}$ los cuales se utilizan para obtener los parámetros utilizados en este método:

$$K_0 = \frac{y_{\infty} - y_0}{u_{\infty} - u_0} = 18,61$$

$$\tau_0 = t_1 - t_0 = 0,00015 \text{ [s]}$$

$$v_0 = t_2 - t_1 = 0,00155 \text{ [s]}$$

Luego de obtenerlos, con estos valores se procede a diseñar los distintos controladores PID utilizando como guía la tabla antes mencionada.

3.2.4 Parámetros de sintonización del controlador PID método de curva de reacción

En esta sección se obtiene los diferentes controladores a través de las fórmulas otorgadas en el capítulo 2 que hacen mención sobre el método de Ziegler-Nichols en lazo abierto. Por ello es que se presentan los tres controladores encontrados (P, PI y PID) en tablas que disponen de mejor manera los datos.

Estos parámetros de sintonización son utilizados para graficar las primeras respuestas del comportamiento del sistema utilizando dichos controladores.

3.2.4.1 Controlador P

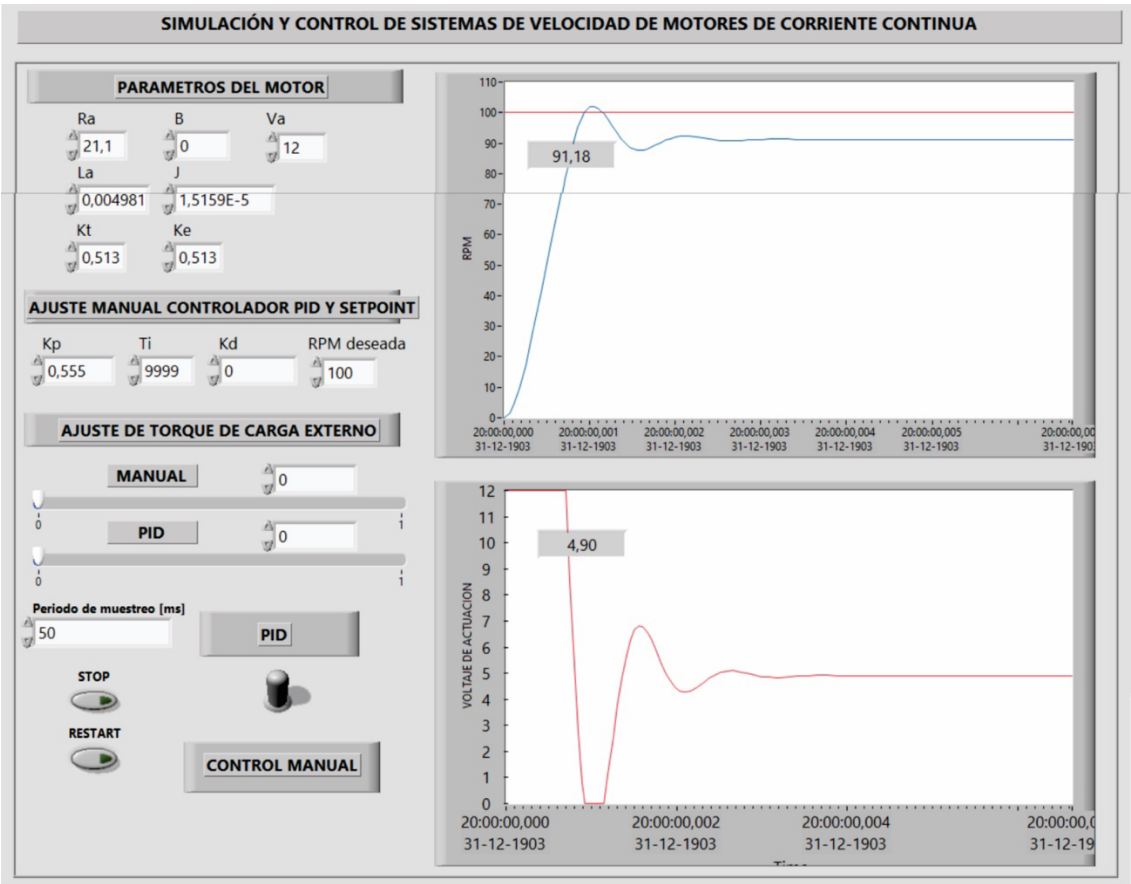
En la tabla 3-2 se aprecia los valores del controlador proporcional calculado.

Tabla 3 - 3. Parámetros controlador P.

	K_p	T_i	T_d
P	0,555		

Fuente: elaboración propia según datos.

La figura 3-7 representa la respuesta de este sistema utilizando el controlador anterior y fijando una velocidad deseada de 100 revoluciones por minuto.



Fuente: elaboración propia.

Figura 3-7. Respuesta del sistema utilizando controlador P con setpoint en 100 RPM.

Los resultados de la simulación indican que el uso del controlador proporcional (P) no logra alcanzar el valor de consigna deseado de 100 revoluciones por minuto en donde persiste un error en estado estacionario entre la salida deseada y la real. Se observa

un sobreimpulso en la respuesta que supera el setpoint establecido un 5 porciento. Este hallazgo sugiere que podrían requerirse ajustes adicionales en los parámetros del controlador para minimizar dicho error. Por otro lado, se aprecia una oscilación automática del sistema, la cual registra una reducción de aproximadamente un cuarto en la amplitud de las oscilaciones.

Un controlador proporcional ajusta la salida proporcionalmente al error entre el valor deseado (setpoint) y el valor real (respuesta del sistema). El término proporcional busca minimizar este error multiplicándolo por una ganancia de proporcionalidad (K_p). Esto queda en evidencia al comprobar matemáticamente que el error entre la velocidad deseada (100 [RPM]) y la velocidad alcanzada (91,18 [RPM]) al ser multiplicada por K_p (0,555) se obtiene como resultado el voltaje de actuación (4,9 [V]).

3.2.4.2 Controlador PI

En la tabla 3-3 se aprecia los valores del controlador proporcional-integral encontrado utilizando las fórmulas antes mencionadas.

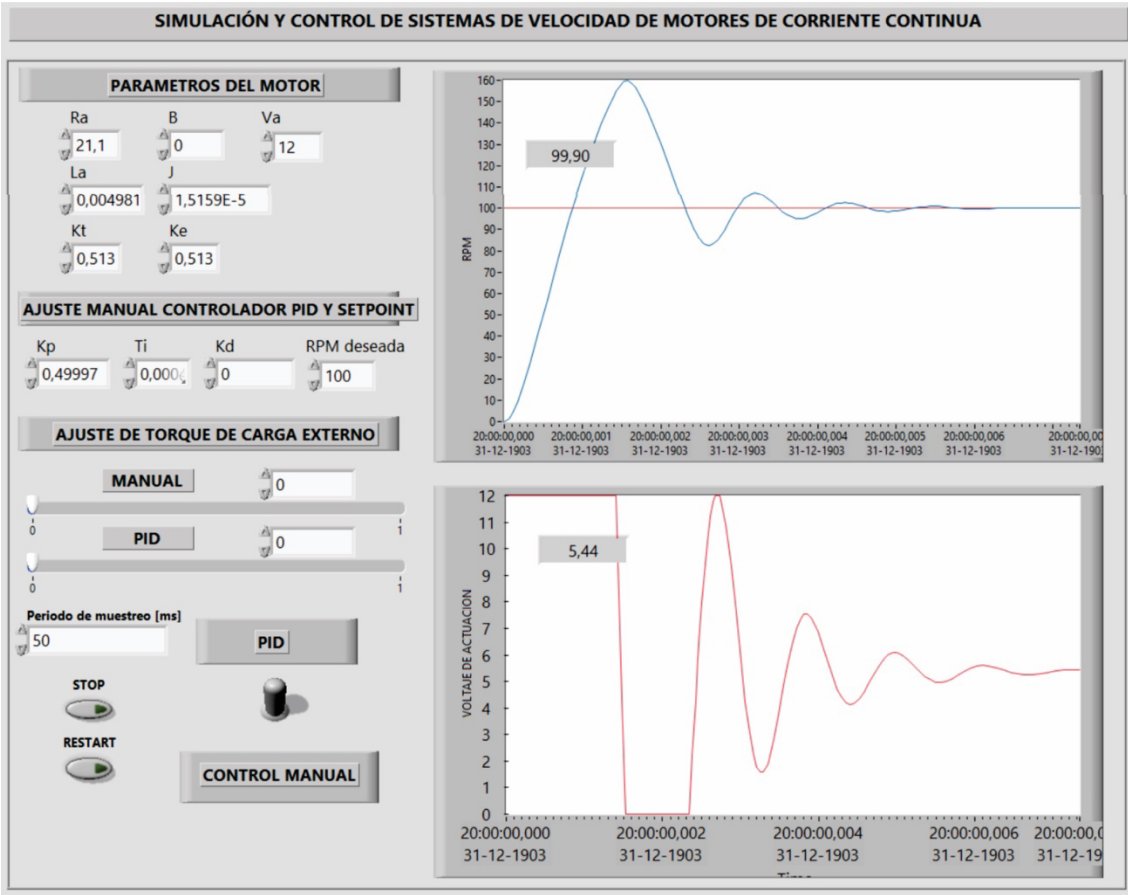
Tabla 3 - 4. Parámetros controlador PI

	K_p	T_i	T_d
PI	0,49997	0,00045	

Fuente: elaboración propia según datos.

Los efectos de incluir el factor integrativo en el diseño de un controlador son principalmente el de reducir el error en estado estacionario. A medida que exista un error entre el valor deseado y el valor real, este se ira acumulando a través del tiempo y sobre este error acumulativo es que debe actuar el factor integrativo del controlador.

La figura 3-8 representa la respuesta de este sistema utilizando el controlador PI



Fuente: elaboración propia.

Figura 3-8. Respuesta del sistema utilizando controlador PI con setpoint en 100 RPM.

Se puede observar que en la gráfica proporcionada por el controlador PI encontrado, el sistema si es capaz de llegar al valor de consigna propuesto de 100 revoluciones por minuto. La acción integral corrige el error acumulativo a través del tiempo eliminando el off-set existente en el controlador netamente proporcional.

En la respuesta del sistema se observa un sobreimpulso de un sesenta por ciento sobre el setpoint, para luego presentar oscilaciones amortiguadas a razón de un cuarto entre pico y pico. Se observa de igual forma que la actuación se satura hasta su máximo permitido de 12 [V] hasta superar el setpoint y luego comienza a oscilar el voltaje de actuación hasta encontrar el estado estacionario al ser aplicados 5,44 [V].

3.2.4.3 Controlador PID

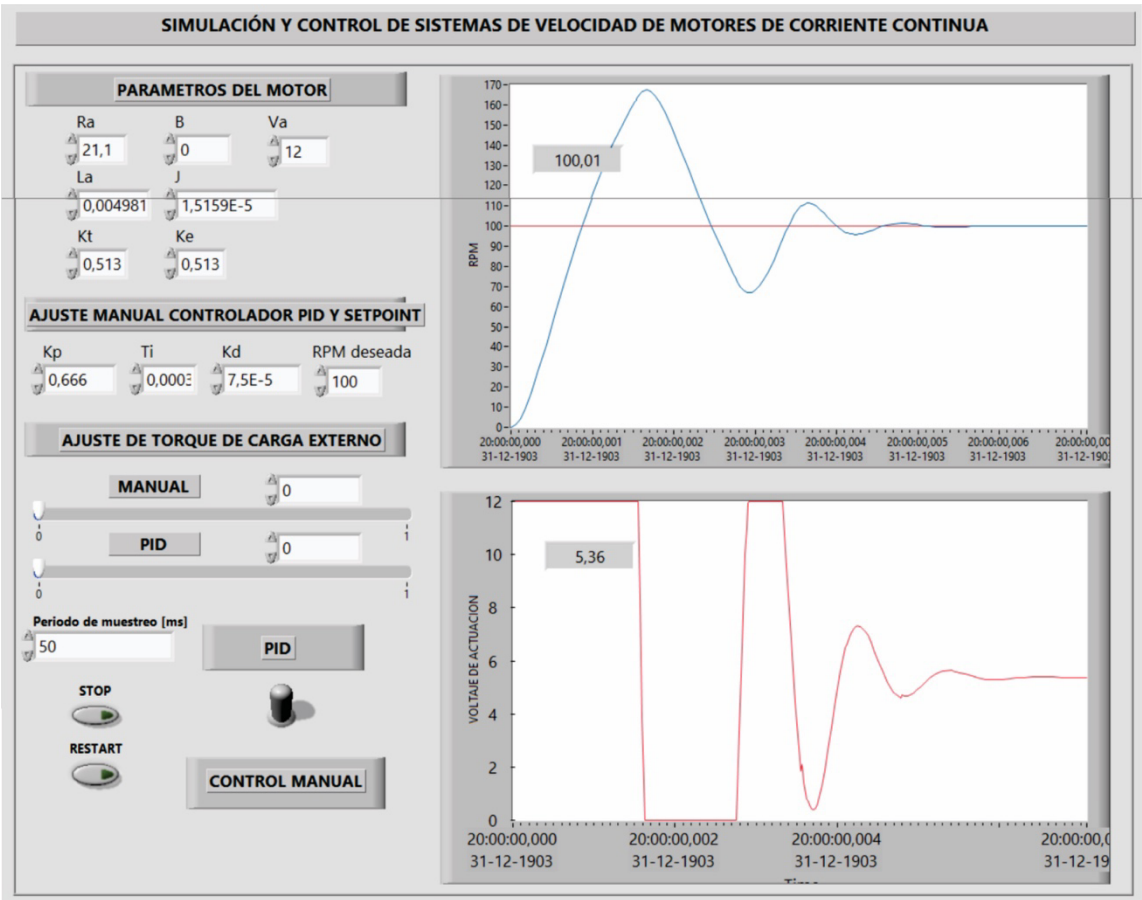
En la tabla 3-4 se aprecia los valores del controlador proporcional-integral-derivativo encontrado usando el método de Ziegler-Nichols.

Tabla 3 - 5. Parámetros controlador PID

	K_p	T_i	T_d
PID	0,666	0,0003	0,000075

Fuente: elaboración propia según datos.

La figura 3-9 representa la respuesta de este sistema utilizando el controlador PID.



Fuente: elaboración propia.

Figura 3-9. Respuesta del sistema utilizando controlador PID con setpoint en 100 RPM.

Se puede observar que en la gráfica proporcionada por el controlador PID encontrado el sistema si es capaz de llegar al valor de consigna propuesto de cien revoluciones por minuto. Podemos identificar de la gráfica que el controlador genera un sobreimpulso en su respuesta llegando a alcanzar una velocidad de casi ciento setenta revoluciones por minuto. Estas oscilaciones se reducen a razón de $\frac{1}{4}$ en su amortiguamiento y respecto a la gráfica de PI se puede destacar que esta última presenta menos oscilaciones para alcanzar su estado estacionario.

3.3 ANÁLISIS DE PERTURBACIONES

En esta sección se analizan las respuestas del sistema ante cambios en la referencia y perturbaciones en la carga. Para ello se considera el controlador PID encontrado por el método de lazo abierto para realizar las pruebas. Se debe mencionar que algunos métodos de sintonización de controladores PID son más efectivos para controlar cambios en la carga o perturbaciones, y otros más óptimos para actuar eficazmente sobre cambios en la referencia. Esta observación se busca comprobar a través de los resultados obtenidos.

En la tabla 3-5 se aprecia los valores del controlador con los que se analiza el comportamiento del sistema.

Tabla 3-6. Parámetros controlador PID para análisis de perturbaciones

	K_p	T_i	T_d
PID	0,666	0,0003	0,000075

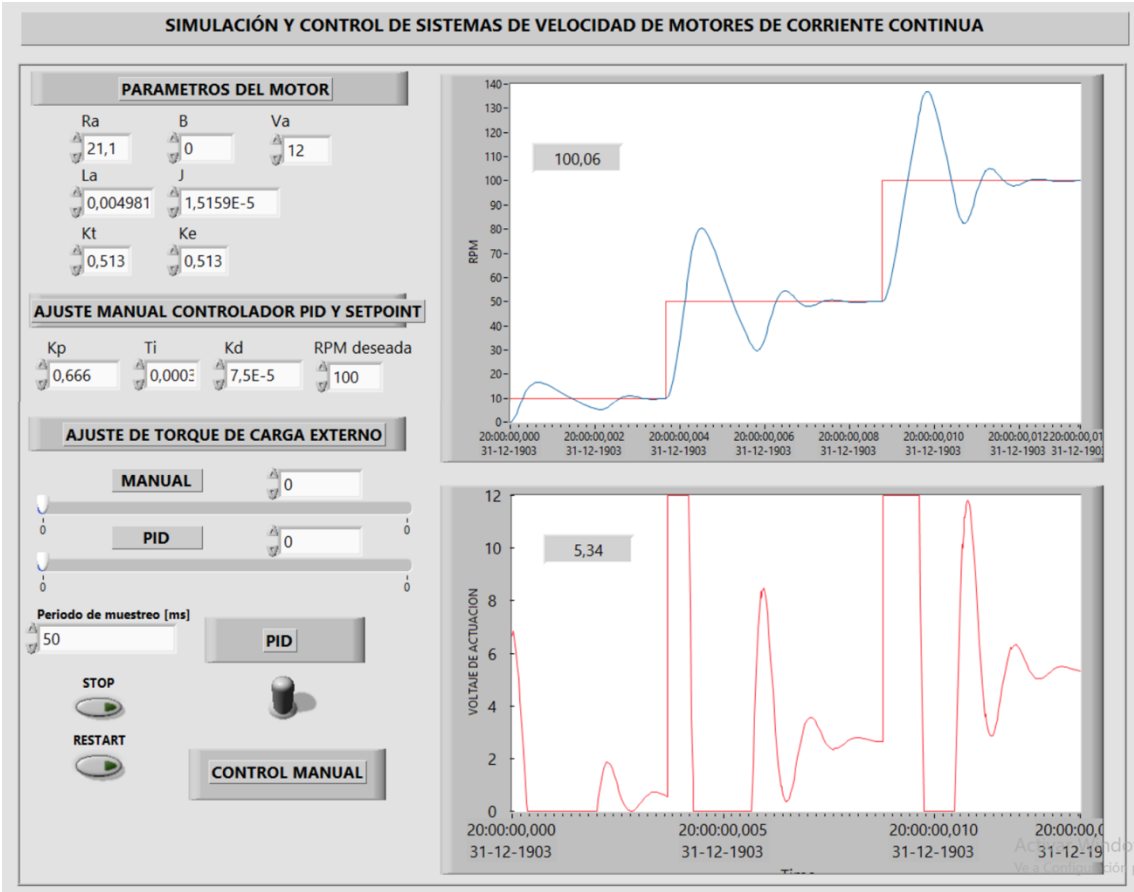
Fuente: elaboración propia según datos.

3.3.1 Análisis de la respuesta ante cambios en la referencia sin carga

En esta sección se realizan análisis más profundos de los controladores encontrados, específicamente al ir variando la consigna de referencia que se desea alcanzar en diferentes instantes de tiempo. El simulador se hace uso en modo PID, es decir que se encuentra funcionando en lazo cerrado.

3.3.1.1 Controlador PID con aumento en la referencia de 50 RPM

La figura 3-10 representa la respuesta de este sistema a diferentes cambios en la referencia o setpoint, iniciando con diez, luego cincuenta y finalmente cien revoluciones por minuto. Esta representación permite observar como el sistema se ajusta a cada nuevo setpoint, proporcionando información valiosa sobre su desempeño y capacidad de respuesta bajo distintas condiciones operativas.

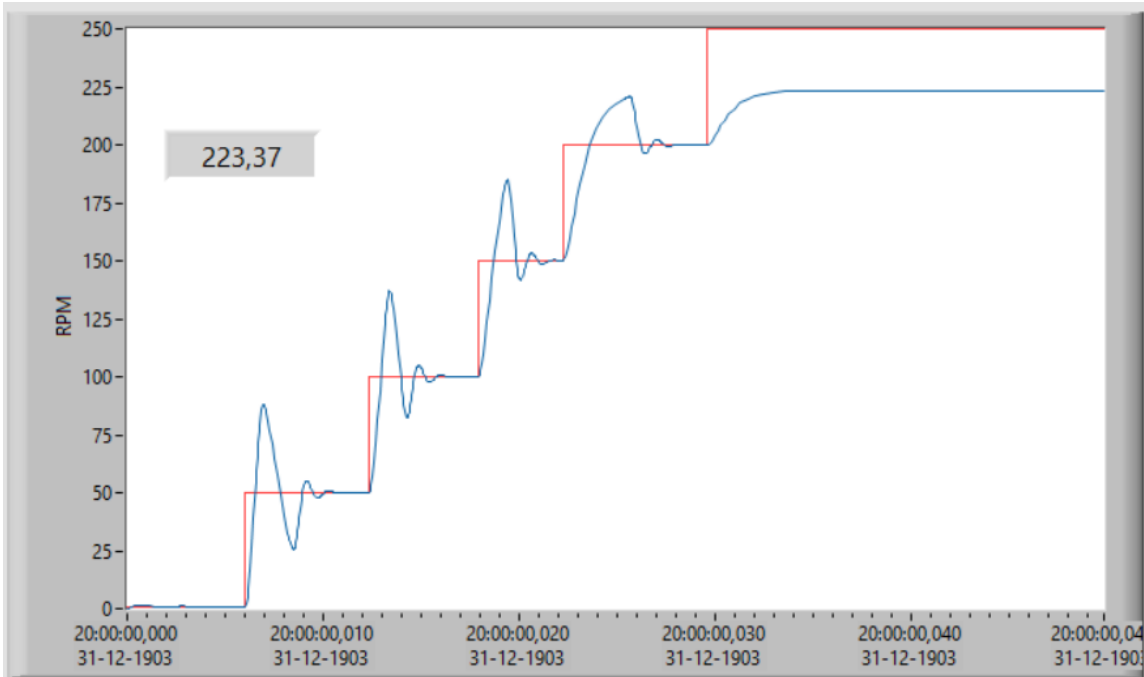


Fuente: elaboración propia.

Figura 3-10. Primer análisis del sistema a cambios en la referencia utilizando controlador PID.

Observando la respuesta del motor utilizando el controlador PID ajustado mediante el método de Ziegler-Nichols, se pueden inferir varias características a partir de los gráficos. En primer lugar, se genera un overshoot significativo, una característica común del método de sintonización utilizado, donde las oscilaciones del sistema se reducen en una razón de 1/4. Del gráfico se observa que este overshoot representa aproximadamente un 60% del valor de referencia cuando se incrementa la consigna en 50 RPM. El tiempo de asentamiento es de aproximadamente 10 ms cada vez que se introduce un nuevo valor de setpoint en el simulador. Aunque la respuesta es agresiva, con cambios bruscos, también es rápida al estabilizarse en la consigna de referencia.

De manera similar, la Figura 3-11 muestra la respuesta del sistema ante cambios en la referencia de 10, 50, 100, 150, 200 y 250 revoluciones por minuto, permitiendo un análisis más amplio. Al introducir más datos, se obtienen nuevos resultados. Entre los resultados observados, se destaca que cada overshoot, al aumentar la consigna en 50 RPM, mantiene un porcentaje de sobreimpulso constante en la respuesta, aproximadamente del 60%.



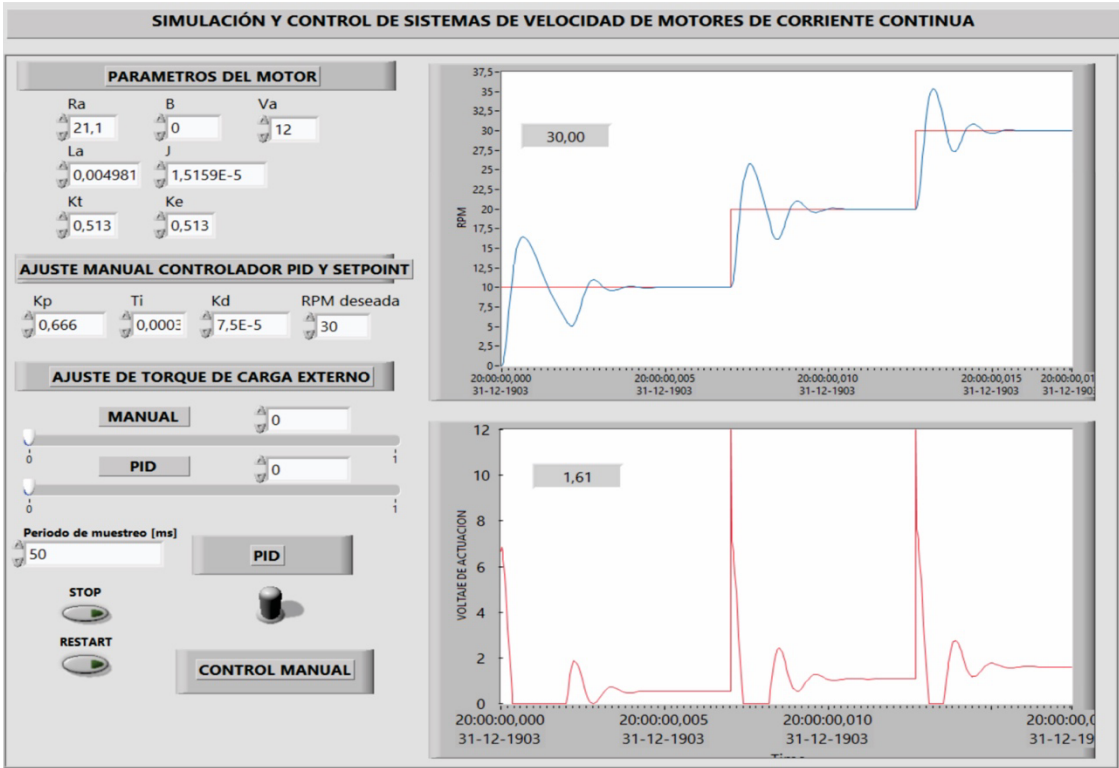
Fuente: elaboración propia.

Figura 3-11. Segundo análisis del sistema a cambios en la referencia utilizando controlador PID.

Cuando se sitúa la velocidad de referencia en doscientas revoluciones por minuto, la respuesta del sistema presenta una curva no característica, esto está dado porque internamente el software se diseñó considerando un bloque saturador de voltaje, que no permite que al motor ingresen más de doce volts, limitando así la generación del overshoot que en los casos anteriores se producía. Esta misma restricción de voltaje es la que impide que el motor DC llegue a la consigna de doscientas cincuenta revoluciones por minuto cuando se le solicita. Este motor, en su máximo funcionamiento a doce volts, alcanza un máximo de doscientas veinte y tres revoluciones por minuto, por lo que sería necesario aumentar más su voltaje de entrada si se quisiera alcanzar mayor velocidad, aunque existe la posibilidad de que el motor no lo soporte debido a sus limitaciones térmicas y mecánicas inherentes.

3.3.1.2 Controlador PID con aumento en la referencia de 10 RPM

En la figura 3-12 está representada la respuesta del sistema ante cambios en la velocidad deseada con la diferencia que se ingresan aumentos de diez revoluciones por minuto cada vez. Con esta prueba se pretende observar el comportamiento de la gráfica ante cambios en la referencia de manera más suave, por ello se hace un incremento de revoluciones más bajo que en las pruebas anteriores.



Fuente: elaboración propia.

Figura 3-12. Segundo análisis del sistema a cambios en la referencia utilizando controlador PID encontrado.

De las pruebas anteriores se deduce que los sobreimpulsos generados por la respuesta son en torno a un sesenta por ciento del valor de referencia definido. Comparando la respuesta del sistema obtenida con la anterior, se observa entonces que independiente de si el aumento de referencia es grande o no, el sobreimpulso que se genera como respuesta al cambio, es aproximadamente el mismo que si el aumento en la referencia fuese dividido en partes más pequeñas.

El controlador encontrado a través del método de sintonización de Ziegler-Nichols, es efectivo para compensar cambios en la referencia. Que sea efectivo hace mención a que corrige correctamente su comportamiento y estabiliza en la consigna establecida, pero no quiere decir que sea el mejor controlador como respuesta ante los cambios en la referencia, ya que muchas veces los sobreimpulsos u oscilaciones no son permitidas como respuestas ante estos cambios en la línea de proceso.

La evaluación gráfica del control de velocidad de un motor de corriente continua muestra claramente cómo varía la respuesta del sistema frente a diferentes consignas. En las gráficas, se puede observar cómo los sobreimpulsos se manifiestan como picos pronunciados antes de que la velocidad se estabilice en el valor deseado. Esto subraya la importancia de considerar no solo la eficacia del controlador, sino también la necesidad de minimizar tales sobreimpulsos para asegurar un comportamiento estable y predecible del sistema en todas las condiciones operativas.

3.3.2 Análisis de la respuesta ante cambios en la carga

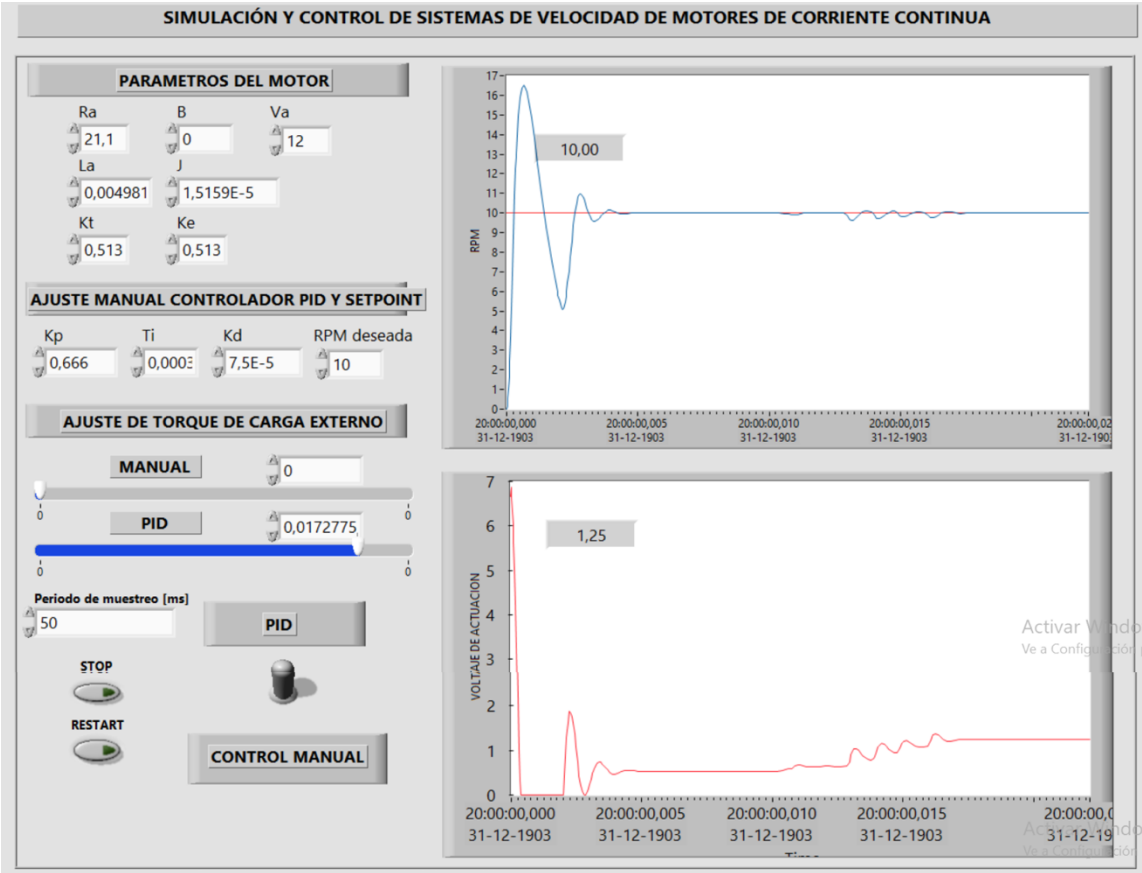
En esta sección se realizan análisis más profundos del controlador encontrado, específicamente al ir variando las diferentes cargas que debería compensar el motor para permanecer en el setpoint deseado.

3.3.2.1 Controlador PID con setpoint en 10 RPM sometido a carga externa

En la Figura 3-13 se presenta detalladamente la configuración de los parámetros del simulador y la respuesta dinámica del sistema. En primer lugar, se ajustan los valores del simulador para reflejar con precisión las condiciones operativas del motor de corriente continua.

Una vez que la planta ha alcanzado la estabilidad deseada, se procede a someter el sistema a cambios en la carga de torque externo. Esta etapa implica la aplicación de una carga adicional al motor, lo cual permite evaluar cómo el sistema responde a variaciones en las condiciones de operación. Al observar la respuesta del sistema bajo estas condiciones de carga variable, se pueden identificar las fortalezas y debilidades del controlador implementado y ajustar las estrategias de control en consecuencia. Este enfoque metódico asegura una comprensión completa del comportamiento del sistema y la efectividad de las estrategias de control aplicadas.

Para complementar este análisis, se realizan pruebas adicionales modificando la carga de manera incremental y registrando las respuestas del sistema en cada paso. Esto proporciona datos cruciales sobre la capacidad del controlador para adaptarse y mantener la estabilidad operativa en diferentes escenarios de velocidad. La interpretación detallada de estos resultados permite optimizar aún más los parámetros del controlador PID y afinar las estrategias de compensación de carga para mejorar el rendimiento global del sistema.



Fuente: elaboración propia.

Figura 3-13. Respuesta del sistema ante cambios en la carga a una velocidad de 10 RPM

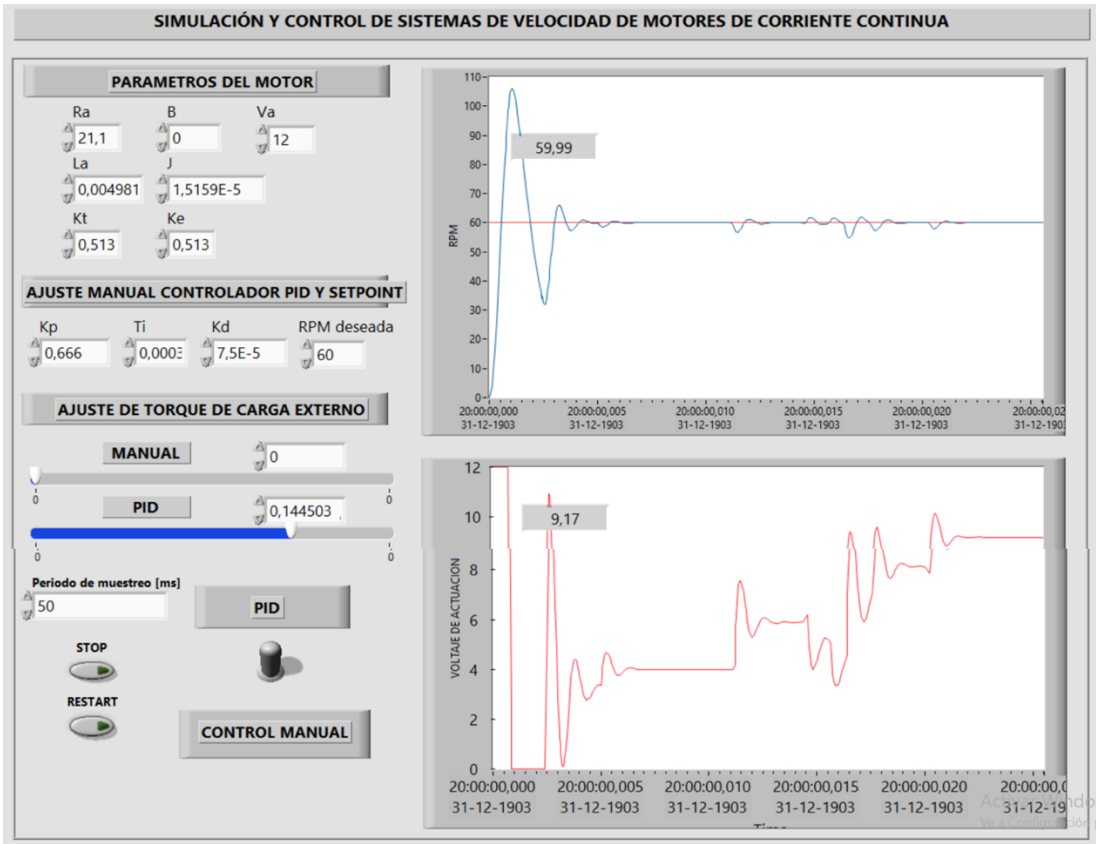
Observando la respuesta del motor al utilizar el controlador PID obtenido por el método de Zieglers-Nichols se corrobora lo visto anteriormente con este método de sintonización. Se genera un overshoot muy grande, donde las oscilaciones del sistema se reducen a razón de un cuarto en su amortiguamiento antes de lograr estabilizarse, con un tiempo de asentamiento de aproximadamente 10 [ms].

Una vez alcanzado el tiempo de establecimiento, se procede a aumentar gradualmente la carga utilizando la barra de ajuste de torque externo disponible en el simulador, incrementando los valores dentro del rango de 0 a 0.02 [N/m]. La gráfica de revoluciones por minuto en función del tiempo muestra claramente cómo el sistema responde rápidamente a las perturbaciones en la carga, con mínima afectación, demostrando un control efectivo y estable.

Este análisis detallado ilustra la capacidad del controlador PID para ajustar la velocidad del motor frente a variaciones controladas en la carga, validando su eficacia en entornos dinámicos y su habilidad para mantener un rendimiento consistente y preciso bajo condiciones cambiantes de operación.

3.3.2.2 Controlador PID con setpoint en 60 RPM sometido a carga externa

En la Figura 3-14 se muestra la configuración de los valores del simulador y la respuesta del sistema. Una vez que la planta se estabiliza en la referencia de sesenta revoluciones por minuto, se procede a aplicar cambios en la carga externa para evaluar la respuesta del sistema.



Fuente: elaboración propia.

Figura 3-14. Respuesta del sistema ante cambios en la carga a una velocidad de 60 RPM

Una vez alcanzado el tiempo de establecimiento, se procede a aumentar gradualmente la carga utilizando la barra de ajuste de torque externo disponible en el simulador, incrementando los valores dentro del rango de 0 a 0.2 [N/m]. La gráfica de revoluciones por minuto muestra cómo el sistema corrige rápidamente la velocidad ante perturbaciones en la carga, incluso con valores de torque más elevados, demostrando un control efectivo y estable.

La respuesta del sistema también se refleja en la gráfica del voltaje de actuación, donde se observa cómo el controlador ajusta el voltaje para compensar eficazmente la carga externa. Estas respuestas rápidas y precisas subrayan la capacidad del controlador PID para mantener la estabilidad y el rendimiento del motor en condiciones dinámicas, asegurando un control robusto frente a variaciones significativas en la carga.

CONCLUSIONES

El análisis exhaustivo de los principios de funcionamiento de los sistemas y sus aplicaciones industriales ha permitido una apreciación más completa y profunda de su influencia e impacto en la optimización y eficiencia de procesos industriales. La simulación en particular, ha demostrado ser una herramienta indispensable en análisis y control de procesos, proporcionando una plataforma robusta para evaluar la respuesta dinámica del sistema, analizar perturbaciones y diseñar estrategias de control efectivas.

La implementación práctica de estos conocimientos mediante la interfaz gráfica desarrollada en LabVIEW ha facilitado una experiencia interactiva en la cual los conceptos teóricos se transforman en aplicaciones concretas. Esta herramienta versátil ha permitido la visualización en tiempo real de las respuestas del sistema, proporcionando una perspectiva más integral y aplicable de los conceptos teóricos.

La evaluación de los resultados de la simulación en diversos escenarios, desde el análisis en lazo abierto hasta el análisis de perturbaciones, ha validado la eficacia de los controladores PID y la relevancia de las estrategias de sintonización estudiadas. Estos hallazgos subrayan la importancia de la simulación como una herramienta esencial en la ingeniería de control moderna.

Se concluye que el método de sintonización de Ziegler-Nichols, empleado para ajustar el controlador, muestra limitaciones en la compensación de cambios en la referencia, aunque es eficaz en la compensación de cambios en la carga. A través del uso del simulador y sus ventajas, es posible desarrollar un controlador de manera manual que compense adecuadamente los cambios en la referencia. Por lo tanto, sería interesante investigar cómo se comporta el sistema ante la aplicación de otros métodos de sintonización de controladores PID.

BIBLIOGRAFÍA

Aracil, J., 1986. Estructura y comportamiento en teorías de sistemas.

Beater, P. D. (2018). Industrial Motor Control (8th ed.). Cengage Learning.

Bhisikar, T. S., y Zade, M. R. "Simulación de un motor de corriente continua utilizando MATLAB-Simulink." International Journal of Engineering Research and Applications, vol. 2, no. 6, 2012, pp. 1986-1991.

Chapman, S. J. (2017). Electric Machinery Fundamentals. McGraw-Hill Education.

Choudhury, R. R. (2012). Industrial Automation and Robotics: An Introduction. Prentice Hall.

Dorf, R. C., & Svoboda, J. A. (2017). Introduction to Electric Circuits. John Wiley & Sons.

Fancher, P. (2010). LabVIEW para circuitos eléctricos, máquinas, accionamientos y laboratorios. CRC Press.

Griffiths, D. J. (2017). Introduction to Electrodynamics. Cambridge University Press

Harrington, H. J. y Tumay, K; 1999

Hughes, D. (2014). Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications (4th ed.). Newnes.

Ogata, K. (2010). Ingeniería de control moderna. Pearson.

Opal, A. L., et al. "Aspectos de seguridad en la simulación de sistemas de electrónica de potencia y control de movimiento." IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 55, no. 4, 2008, pp. 1659-1667.

Rashid, M. H. Manual de electrónica de potencia. Pearson, 2003.

Suarez, L. E. "Diseño de control para un motor de corriente continua sin escobillas impulsado por un sistema de almacenamiento de energía mediante volante de inercia." IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 26, no. 4, 2011, pp. 1067-1074.

Virginia Mazzone, 2002. Controladores PID, control automático 1.