

# Técnicas de control para el motor de corriente continua: Una revisión sistemática de literatura



José Jácome<sup>1</sup>, Tatyana Saltos<sup>2</sup>, Daniel Jaramillo<sup>2</sup>, Mathew García<sup>2</sup>, Edison Guaichico<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Técnica del Norte. Facultad de Ciencias Aplicadas y Económicas. Ibarra, Ecuador

<sup>2</sup>Universidad Técnica del Norte. Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas. Ibarra, Ecuador

*jgjacome@utn.edu.ec, tksaltos@utn.edu.ec, edjaramillo@utn.edu.ec, mfgarciag@utn.edu.ec, egguaichicop@utn.edu.ec*

## RESUMEN

La ingeniería de control se especializa en desarrollar procesos de alta calidad mediante el modelamiento matemático de diversos sistemas y el diseño de control que permite regular el comportamiento de un sistema utilizando condiciones deseadas. Las técnicas de control que se utilizan para el motor de corriente continua son de mucha utilidad al momento de llevar a cabo una estabilización de la velocidad o el par, algunas de ellas pertenecen a técnicas de control inteligente (lógica difusa y redes neuronales), pero la mayoría se centra en las técnicas de control clásicas (PI, PID) logrando resultados satisfactorios. Las técnicas de modelamiento matemático facilitan la representación de las ecuaciones diferenciales, dependiendo del tipo del motor DC se han utilizado diferentes técnicas (transformada de Laplace, espacio de estados). El software y hardware tienen una fuerte relación con lo que se refiere a las simulaciones y experimentaciones que se usan para validar el funcionamiento de un sistema complejo como lo es el motor CC. En este trabajo se presenta una revisión sistemática de literatura sobre técnicas de control, técnicas de modelamiento matemático, software y hardware que se aplican en un motor de corriente continua, para ello se analizó y resumió 75 artículos científicos de los últimos 4 años provenientes de cinco bases bibliográficas (IEEE Xplore, Digital Library, ScienceDirect, SpringerLink, ResearchGate, Preprints). Los documentos responden a tres preguntas de investigación planteadas en este estudio. Por medio de los resultados obtenidos se identificaron grandes ventajas y desventajas de las técnicas de control y modelamiento matemático, con respecto al software y hardware se demostró su gran utilidad para la realización de sistemas automatizados.

**Keywords:** técnicas de control, modelamiento matemático, motor de corriente continua, software, hardware, SLR

## Introducción

En la actualidad, la ingeniería de control se ha destacado por sus grandes avances en las áreas de la informática y matemática, incursionando en sistemas automatizados que aportan grandes beneficios en el estilo de vida del ser humano, uno de aquellos sistemas es el motor de corriente continua que transforma la energía eléctrica en energía mecánica [1]; además, tiene diversas aplicaciones, como por ejemplo se utiliza de una manera muy eficiente en máquinas textiles, ventiladores, grúas [2], producción industrial y agrícola, transporte aeroespacial [3], etc. Es importante recalcar que existen otras variaciones del motor de corriente continua que son mejores en distintos aspectos, tal es el caso del motor de corriente continua sin escobillas (BLDCM) que ofrece una ventaja de alta eficiencia a largo periodo, bajo nivel de ruido, mejor velocidad-torque [4], tiene un control de diseño simple, baja potencia de alcance y requiere un funcionamiento sin mantenimiento [5], también tiene varias aplicaciones en la automatización industrial y en la ingeniería de fabricación [6].

El motor de corriente continua es un sistema complejo que contiene variedad no lineales, como la resistencia de armadura [7], que para controlar los problemas como el mencionado anteriormente, se han llevado a cabo múltiples estudios que demuestran que con la aplicación de controladores clásicos, controladores inteligentes y muchos otros tipos más se puede realizar una estabilización adecuada de lo que se requiera controlar, como por ejemplo la velocidad, que es uno de los factores más importantes al momento del modelado del motor DC.

El principal propósito de esta investigación es llevar a cabo una revisión sistemática de literatura (SLR) para adquirir información reciente de trabajos efectuados sobre técnicas de control para el motor de corriente directa, incluyendo sus técnicas matemáticas y las herramientas utilizadas para la simulación o experimentación que fueron usadas para la comprobación del funcionamiento del controlador. Los trabajos anteriormente mencionados utilizan diversas técnicas que en su mayoría son de tipo clásico e inteligente. Por lo tanto, es preciso identificar nuevos desafíos y tendencias en el desarrollo de sistemas que sean de amplia utilidad y al mismo tiempo, brinden eficiencia y exactitud. Las preguntas de



investigación que se plantearon en este trabajo fueron las siguientes:

- ¿Qué técnicas de control se emplearon para el motor de corriente continua?
- ¿Qué técnicas de modelado matemático se implementaron para las ecuaciones diferenciales del motor DC?
- ¿Qué software y hardware se usaron para simulaciones y/o experimentaciones del motor DC?

En la siguiente sección, se explica la metodología empleada para la elaboración de la revisión sistemática de literatura (SLR).

## Metodología

El proceso de revisión se presenta en la Figura 1, el mismo que consta de cuatro pasos: (i) Preguntas de Investigación, (ii) búsqueda de documentos, (iii) selección de artículos, (iv) extracción de datos relevantes. A continuación, se describe cada una de las fases.

### Preguntas de Investigación

Se plantearon tres preguntas de investigación (PI), Tabla 1, que son referentes en el proceso de revisión sobre el tema de estudio, el cual aborda las técnicas de control para el motor de corriente continua junto con sus técnicas matemáticas y los instrumentos para la demostración del controlador. Se consideraron cinco bases de datos científicas que son: IEEE Xplore, Digital Library, ScienceDirect, SpringerLink, ResearchGate y Preprints.

**Tabla 1: Preguntas de investigación (PI)**

Número	Preguntas de investigación	Motivación
PI1	¿Qué técnicas de control se emplearon para un motor de corriente continua?	Identificar las técnicas de control empleadas en el motor de corriente continua.
PI2	¿Qué técnicas de modelado matemático se implementaron para obtener las ecuaciones diferenciales de un motor de corriente continua?	Conocer las técnicas matemáticas para formular las ecuaciones diferenciales del motor DC.
PI3	¿Qué software y hardware se usaron para simulaciones y/o experimentaciones de un motor DC?	Reconocer las herramientas usadas para la experimentación o simulación de cada uno de los estudios referentes al motor de corriente continua.

### Búsqueda de documentos

Para la búsqueda de los documentos se utilizó como cadena de búsqueda principal: ("direct current motor controller" OR "DC motor controller") AND ("DC motor PID controller" OR "direct current motor PID controller"). Además, se utilizaron otras variantes de las cadenas de búsqueda con el objetivo de obtener mejores resultados. La Tabla 2 presenta las cadenas de búsqueda en cada base de datos y las combinaciones utilizadas, considerando que cada base de datos tiene un criterio de búsqueda diferente. Un total de 80 documentos fueron encontrados, de los cuales 40 pertenecen a IEEE Xplore, 8 a SpringerLink, 9 a ScienceDirect, 22 a ResearchGate y 1 a Preprints.

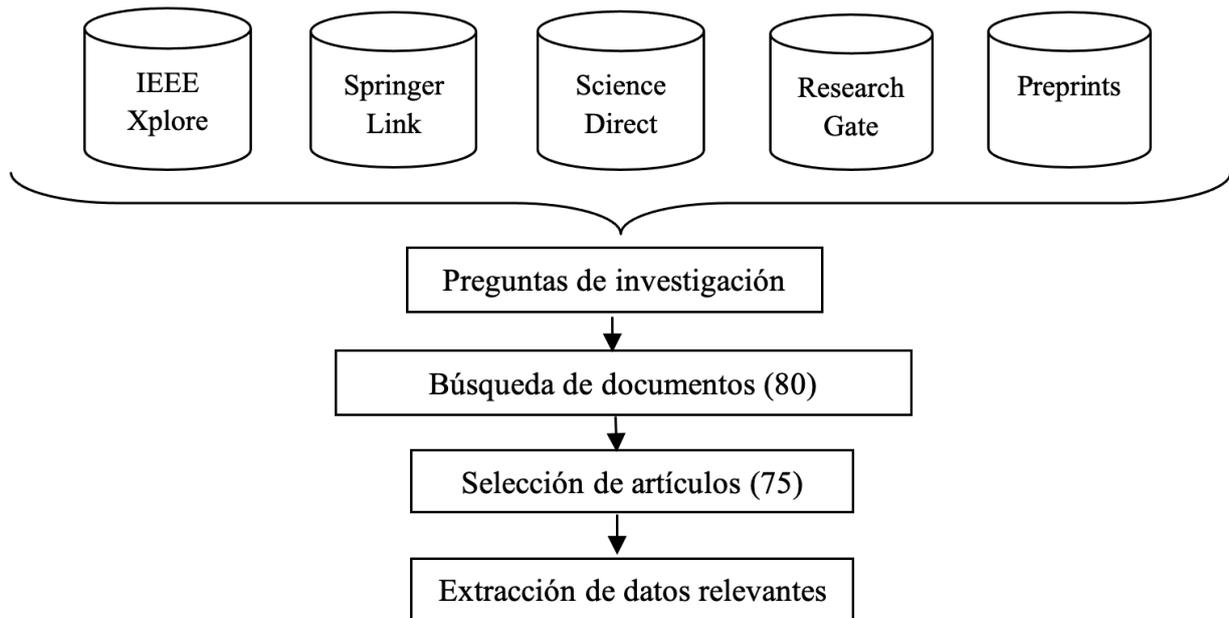


Figura 1. Diagrama del protocolo utilizado en la SLR

Tabla 2: Cadenas de búsqueda utilizadas en las bases de datos científicas

Criterio	IEEE Xplore	SpringerLink	ScienceDirect	ResearchGate	Preprints
Cadena de búsqueda	((("direct current motor controller" OR "DC motor controller") AND ("DC motor speed control")))	((("direct current motor PID controller" OR "DC motor PID controller) AND ("direct current motor controller" OR "DC motor controller")))	((("direct current motor PI controller" OR "DC motor PI controller) AND ("direct current motor controller" OR "DC motor controller")))	((("direct current motor Fuzzy Logic controller" OR "DC motor fuzzy logic controller) AND ("direct current motor controller" OR "DC motor controller")))	DC motor Artificial Neural Network controller
Total	40	8	9	22	1

### Selección de artículos

Para la selección de artículos se consideraron tres fases. En la primera se llevó a cabo utilizando criterios de inclusión y exclusión. Los criterios de inclusión considerados por los autores fueron: (i) artículos científicos, (ii) conferencias, (iii) estudios centrados en el control de diferentes tipos de motores DC. Todos los trabajos son relacionados con el área de ingeniería de control, publicados durante los últimos 4 años (2015-2019) en idioma inglés. Los criterios de exclusión considerados por los autores fueron: (i) trabajos duplicados, (ii) investigaciones basadas en otros campos de conocimiento, entre otros.

En la segunda fase se tomó en cuenta, que los documentos estén en categoría Q1, Q2 o con un SJR mayor a 0.6. Adicionalmente, en los artículos se puso mayor interés en el título, resumen y palabras clave.

Por último, en una tercera fase se revisó la introducción y las conclusiones de las publicaciones, con el fin de verificar si tienen relación con las preguntas de investigación. El número total de documentos recuperados después de la ejecución de las tres fases se presentan en la Tabla 3.

**Tabla 3: Selección de artículos para la SLR**

Base de datos	Fase I	Fase II	Fase III
IEEE Xplore	40	39	39
ScienceDirect	9	9	7
ResearchGate	22	21	20
SpringerLink	8	8	8
Preprints	1	1	1
<b>Total</b>	<b>80</b>	<b>78</b>	<b>75</b>

El detalle de los 75 artículos científicos finalmente seleccionados se presenta en la Tabla 4.

**Tabla 4: Artículos seleccionados para la SLR**

Código	Título	Base de datos bibliográfica	Año	País
A1	Peak-to-Peak Filtering for Networked Nonlinear DC Motor Systems with Quantization	IEEE	2018	USA
A2	Adaptative Control of DC Motor Servo System with Application to Vehicle Active Steering	IEEE	2019	USA
A3	A DC/DC Buck-Boost Converter-Inverter-DC Motor System: Sensorless Passivity-Based Control	IEEE	2018	USA
A4	Brushless DC motor-driven grid-interfaced solar water pumping system	IEEE	2018	Reino Unido
A5	Maximum Output Torque Control in Improved Flux Path Homopolar Brushless DC Motor With Axillary Field by Using Optimal Control of Turn-ON and Turn-OFF Angles in Variable Speed Applications	IEEE	2018	USA
A6	An adaptive control study for the DC motor using meta-heuristic algorithms	Springer	2017	Alemania
A7	Adaptive Robust Triple-Step Control for Compensating Cogging Torque and Model Uncertainty in a DC Motor	IEEE	2018	USA
A8	Anti-oscillation and chaos control of the fractional-order brushless DC motor system via adaptive echo state networks	Springer	2018	Reino Unido

A9	Adaptively Estimating Rotation Speed From DC Motor Current Ripple for Order Tracking and Fault Diagnosis	IEEE	2018	USA
A10	Kriging-Assisted Robust Black-Box Simulation Optimization in Direct Speed Control of DC Motor Under Uncertainty	IEEE	2018	USA
A11	UAV Power Component—DC Brushless Motor Design With Merging Adjacent-Disturbances and Integrated-Dispatching Pigeon-Inspired Optimization	IEEE	2018	USA
A12	Numerical and Experimental Investigation of an Improved Flux Path Brushless DC Machine for Variable Speed Applications	IEEE	2018	USA
A13	Design Optimization and Performance Comparison of Two Linear Motor Topologies With PM-Less Tracks	IEEE	2018	USA
A14	Online Stator Resistance Tracking for Reluctance and Interior Permanent Magnet Synchronous Motors	IEEE	2017	USA
A15	Transient Thermal Modeling and Analysis of Railway Traction Motors	IEEE	2019	USA
A16	Observer-Based Adaptive SMC for Nonlinear Uncertain Singular Semi-Markov Jump Systems With Applications to DC Motor	IEEE	2018	USA
A17	Adaptive dynamical tracking control under uncertainty of shunt DC motors	ScienceDirect	2018	Holanda
A18	A Commutation Torque Ripple Suppression Strategy for Brushless DC Motor Based on Diode-Assisted Buck-Boost Inverter	IEEE	2018	USA
A19	Modelling and experimental research of fault-tolerant dual-channel brushless DC motor	IEEE	2018	Reino Unido
A20	Adaptive Neural Networks Control Using Barrier Lyapunov Functions for DC Motor System with Time-Varying State Constraints	ResearchGate	2018	Egipto
A21	A Robust Differential Flatness-Based Tracking Control for the "MIMO DC/DC Boost Converter-Inverter-DC Motor" System: Experimental Results	IEEE	2019	USA
A22	Commutator fault detection of brushed DC motor using thermal assessment	ResearchGate	2019	Reino Unido
A23	DC motor parameter identification using equation error method	Springer	2018	USA
A24	Analytical model for armature reaction of outer rotor brushless permanent magnet DC motor Design of Speed-Controller for Brushless DC-Motor Based on Grey Predictor-PID Controller	IEEE	2018	Reino Unido



A25	Design of Speed-Controller for Brushless DC-Motor Based on Grey Predictor-PID Controller	ResearchGate	2018	USA
A26	Parameter Identification and Self-Commissioning in AC Motor Drives: a Technology Status Review	IEEE	2018	USA
A27	Embedded two level direct adaptive fuzzy controller for DC motor speed control	ScienceDirect	2015	Egipto
A28	Maximum Power Point Tracking for Brushless DC Motor-Driven Photovoltaic Pumping Systems Using a Hybrid ANFIS-FLOWER Pollination Optimization Algorithm	Preprints	2018	USA
A29	A Trajectory Tracking Control for a Boost Converter-Inverter-DC Motor Combination	IEEE	2018	USA
A30	Brushless DC motor tracking control using self-tuning fuzzy PID control and model reference adaptive control	ScienceDirect	2018	Egipto
A31	A Simple Voltage Modulator Scheme for Torque Ripple Minimization in a Permanent Magnet Brushless DC Motor	IEEE	2019	USA
A32	An adaptive sliding mode observer over wide speed range for sensorless control of a brushless DC motor	ScienceDirect	2018	USA
A33	Loss model based efficiency optimized control of brushless DC motor drive	ScienceDirect	2019	USA
A34	Torque Ripple Minimization Control Technique of High-Speed Single-Phase Brushless DC Motor for Electric Turbocharger	IEEE	2018	USA
A35	A Direct Redundancy approach to Fault Tolerant Control of BLDC Motor with a damaged Hall-effect Sensor	IEEE	2019	USA
A36	High-Stability Position-Sensorless Control Method for Brushless DC Motors at Low Speeds	IEEE	2018	USA
A37	Improved Finite Control-Set Model-Based Direct Power Control of BLDC Motor with Reduced Torque Ripple	IEEE	2018	USA
A38	Direct instantaneous torque control of Brushless DC motor using firefly Algorithm based fractional order PID controller	ScienceDirect	2018	Arabia Saudita
A39	Optimal PID controller of a brushless DC motor using genetic algorithm	ResearchGate	2019	Indonesia
A40	The Use of a Statistical Filter and Metaheuristics to Model and Control the DC Motor of the Mobile Robot Used on NXP Cup	ResearchGate	2018	Pakistán
A41	Agent-based consensus on speed in the network-coupled DC motor	Springer	2018	Alemania

A42	Robust Predictive Speed Regulation of Converter-Driven DC Motors Via A Discrete-Time Reduced-Order GPIO	IEEE	2018	USA
A43	A Novel Control Algorithm for DC Motors supplied by PVs Using Fuzzy Cognitive Network	IEEE	2018	USA
A44	Direct Active and Reactive Power Control of Three-Phase Inverter for AC Motor Drives With Small DC-Link Capacitors Fed by Single-Phase Diode Rectifier	IEEE	2019	USA
A45	Torque Control of a DC Motor With a State Space Estimator and Kalman Filter for Vehicle Traction	IEEE	2018	USA
A46	SPEED CONTROL OF DIRECT CURRENT MOTOR USING MECHANICAL CHARACTERISTICS	ResearchGate	2019	China
A47	Control of separately excited DC motor with series multi-cells chopper using PI - Petri nets controller	ResearchGate	2018	Alemania
A48	Fractional-order PID control of a chopper-fed DC motor drive using a novel firefly algorithm with dynamic control mechanism	ResearchGate	2017	Alemania
A49	Analysis of grey wolf optimizer based fractional order PID controller in speed control of DC motor	Springer	2018	Alemania
A50	Optimal Tuning of Fractional Order PID Controller for DC Motor Speed Control via Chaotic Atom Search Optimization Algorithm	IEEE	2019	USA
A51	Demonstrative fractional order – PID controller based DC motor drive on digital platform	Science-Direct	2017	USA
A52	Robust flat filtering control of a nonlinear manipulator-DC motor system	ResearchGate	2017	USA
A53	Design and Dynamic Study of a 6 kW External Rotor Permanent Magnet Brushless DC Motor for Electric Drivetrains	IEEE	2015	USA
A54	A new fuzzy logic estimator for reduction of commutation current pulsation in brushless DC motor drives with three-phase excitation	Springer	2017	Alemania
A55	Line Voltage Difference Integral Method of Commutation Error Adjustment for Sensorless Brushless DC Motor	IEEE	2018	USA
A56	Advanced Diagnosis of Rotor Faults and Eccentricity in Induction Motors Based on Internal Flux Measurement	IEEE	2018	USA
A57	Design and Comparative Study of Photovoltaic Maximum Power Point Tracking Converter With DC Motor Speed Control	IEEE	2018	USA
A58	Tracking Control for a DC Microgrid Feeding Uncertain Loads in More Electric Aircraft: Adaptive Backstepping Approach	IEEE	2018	USA



A59	An Efficient Position Tracking Smoothing Algorithm for Sensorless Operation of Brushless DC Motor Drives	ResearchGate	2018	Egipto
A60	Improved Stabilization of Nonlinear DC Microgrids: Cubature Kalman Filter Approach	IEEE	2018	USA
A61	Simulation Study for Controlling Direct Current Motor Position Utilising Fuzzy Logic Controller	ResearchGate	2018	Malasia
A62	Brushless DC Motor Speed Control Using Single Input Fuzzy PI Controller	ResearchGate	2018	Indonesia
A63	Performance Study of Enhanced Non-Linear PID Control Applied on Brushless DC Motor	ResearchGate	2018	Indonesia
A64	The Control of Brushless DC Motor for Electric Vehicle by Using Chaotic Synchronization Method	ResearchGate	2018	Rumanía
A65	Brushless DC Motor Speed Controller for Electric Motorbike	ResearchGate	2018	Indonesia
A66	Speed Control of BLDC Motor in Electro-Hydraulic Power Steering System Based on Fuzzy-PI Controller	ResearchGate	2018	USA
A67	The neural network-based control system of direct current motor driver".	ResearchGate	2019	Indonesia
A68	GA-ANFIS PID compensated model reference adaptive control for BLDC motor	ResearchGate	2019	Indonesia
A69	Quantitative Feedback Theory based Robust Controller Design for Speed Control of DC Moto		2018	Singapur
A70	Adaptive controller with RBF neural network for induction motor drive	ResearchGate	2018	USA
A71	Use of Electrooculography (EOG) and Facial Expressions as Part of the Brain-Computer Interface (BCI) for Controlling an Electric DC Motor".		2018	Singapur
A72	PI Controller of Speed Regulation of Brushless DC Motor Based on Particle Swarm Optimization Algorithm with Improved Inertia Weights	ResearchGate	2019	Egipto
A73	Torque Control in Brushless DC Motor Using Intelligent Linear Quadratic Regulator Controller		2018	Singapur
A74	Speed Control of a Separately Excited DC Motor Using New Proposed Fuzzy Neural Algorithm Based on FOPID Controller		2019	Corea del Sur
A75	Optimal Synchronizing Speed Control of Multiple DC Motors	ResearchGate	2018	Singapur

### Extracción de datos relevantes

Los 75 artículos seleccionados (Tabla 4) se registraron en una matriz, para responder de una manera ordenada las preguntas de investigación y también se realizó un resumen de 150 palabras de cada uno con la información más importante.

En caso de artículos que presentaron técnicas de control o de modelamiento matemático con más de un método se clasificó en un solo grupo, de igual manera se hizo con el software y hardware.

## Resultados

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en cada una de las tres preguntas de investigación planteadas en este trabajo (Tabla 1):

### PI 1 ¿Qué técnicas de control se emplearon para un motor de corriente continua?

En total 68 artículos presentaron técnicas de control para el motor de corriente continua (91%). Algunos de los estudios describieron una o más métodos, los cuales se resumen a continuación:

**PID (Proporcional, integral y derivativo):** En [8], se presentó un sistema de bombeo solar de agua que empleó un motor de corriente continua sin escobillas, el controlador utilizado para la compensación del bucle fue un PID.

En el trabajo de [9], se empleó un controlador PID para regular el voltaje del terminal de la bobina de campo CC de un motor de corriente continua sin escobillas homopolar con trayectoria de flujo mejorada (IFP-HBLDC).

En [10], se aplicó un método conocido como seguimiento OT en el cual múltiplos de la frecuencia de rotación en lugar de las frecuencias absolutas son analizadas para diagnóstico de fallas, este mostró aplicaciones potenciales bajo las condiciones de variación de velocidad y la falta de codificador en el locomotor.

El fin de la investigación [11] fue proponer un control de corriente de campo que reguló el voltaje de salida en el valor deseado de un motor CC sin escobillas de imán permanente.

En [12], se implementó un conmutador que detectó fallas, cabe destacar que se utilizó el análisis de firma térmica de cepillado en motores de corriente continua lo cual es inusual.

Adicionalmente, un controlador PID puede ser empleado para llevar a cabo investigaciones sobre la identificación de motores, por ejemplo en [13] se utilizó transitorios medidos experimentalmente para un motor que arrancó mediante un controlador PID. La identificación se basó en utilizar la ecuación de error que fue elegida por su capacidad de trabajar con dos datos ruidosos.

En el trabajo [14] se presentó un modelo analítico para calcular el campo magnético de reacción de la armadura del rotor externo permanente de un motor DC magnético sin escobillas (PMBLDCM) en el sistema de coordenadas estacionarias del estator (SSCS) y el sistema de coordenadas de rotación del rotor (RRCS).

Se diseñó un controlador de velocidad para el motor DC sin escobillas (motor BLDC) basado en el controlador Gray-PID, de esta manera al arrancar el motor o un cambio repentino de la velocidad se puede realizar con tiempos de subida y de reposo cortos, sin sobrepasar y sin error de estado estacionario, el controlador propuesto, también, tiene una gran capacidad de restringir la fluctuación de velocidad causada por la perturbación de carga [15].



En [16] se llevó a cabo una revisión actualizada de los parámetros y métodos de identificación para motores de corriente alterna que fueron controlados a través de un PID.

En el estudio de [17], se utilizó dos tipos de controles que se aplicaron en el motor DC de alto rendimiento que fueron un control PID difuso y un control adaptativo de referencia (MRAC), el objetivo del algoritmo de control fue forzar la velocidad del rotor a seguir la velocidad de referencia deseada con buena precisión todo el tiempo.

Un controlador PID de orden fraccional (FOPID) basado en el Firefly algorithm (FA) para motor DC sin escobillas (BLDC) fue propuesto para lograr un control efectivo del par y la velocidad [18].

En [19], se implementó un controlador de diseño óptimo del control de velocidad del motor DC sin escobillas dependiendo en el algoritmo genético (GA), los autores introdujeron una energía renovable como fuente de células fotovoltaicas para alimentar el BLDC, de esta manera les resultó más fácil crear el controlador.

Un controlador PID de orden fraccional (FOPID) basado en el algoritmo discreto de luciérnaga (DFA) es propuesto para mejorar el rendimiento de un helicóptero alimentado directamente al accionamiento del motor de corriente continua actual [20].

En [21], se abordó el análisis comparativo y de robustez de un controlador PID de orden fraccional (FOPID) basado en la optimización del lobo gris (GWO) para el control de velocidad del motor de CC.

Se incluyó el algoritmo de optimización de búsqueda atómica (ASO) y una nueva versión caótica del mismo (ChASO) para determinar los parámetros óptimos de un controlador PID de orden fraccional [22].

En la investigación de [23], se realizó digitalmente un controlador PID de orden fraccional (FOPID) para control de motor de CC, cabe destacar que se implementó el PSO que es un método para optimizar funciones numéricas difíciles, análogo al comportamiento social de bancos de peces, bandadas de pájaros, etc.

Se estudiaron los parámetros electromagnéticos y paramétricos para el diseño y análisis de rendimiento de un out-runner en la rueda de un motor eléctrico BLDC (corriente continua sin escobillas) diseñado específicamente para aplicaciones automotrices [24].

El propósito de la investigación [25] fue exponer un modelo analítico de flujo de espacio de aire de un motor en buen estado, proponiendo una nueva técnica para detección temprana de fallas en la barra del rotor y excentricidad mixta entre ellos mediante un controlador PID.

En [26], se diseñaron tres métodos de control para buscar los mejores puntos de poder del panel fotovoltaico del motor de CC. El primer método fue perturbar. El segundo método fue un controlador PID, las ganancias del controlador se obtuvieron mediante el uso de prueba y proceso de error. El tercer método fue un controlador PID derivado basado en algoritmo de búsqueda de bacterias.

Un controlador PID no lineal mejorado (NPID) fue propuesto en [27] para seguir un perfil de velocidad preseleccionado del sistema de accionamiento del motor DC sin escobillas (BLDC), este controlador constó de dos partes, la primera fue una ganancia no lineal limitada por sector mientras que la segunda parte fue un controlador PID de ganancia fija lineal.

Se diseñó un controlador PID para mantener la velocidad del motor CC en su estado óptimo, asegurando así una mayor duración de la batería (hasta la próxima carga), además sirvió para rastrear las variaciones de referencias de velocidad [28].

En el estudio [29] se implementó un modelo de control adaptativo de referencia (MRAC) para motores BLDC junto con un controlador PID sintonizado por GA-ANFIS. Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) es una combinación de una red neuronal artificial y un sistema de inferencia difusa y GA se refiere al algoritmo genético que fue el más adecuado para el sistema.

La electroencefalografía (EEG) y electrooculografía (EOG) fueron expuestas en [30] para implementar un controlador PID para el motor DC, el sistema fue construido con el uso del bioactivo, sensores montados en la cabeza que fueron activados por la señal de los ojos en movimiento y expresiones faciales.

En [31], emplearon un controlador PID para que múltiples motores DC pudieran trabajar juntos de manera sincronizada. Uno de los motores de CC se consideró como motor líder y rastreó su trayectoria de velocidad deseada. El otro motor de CC se controló a través de un óptimo líder basado en seguidor. Si el líder se ralentizaba o aceleraba por alguna razón, el seguidor motor DC sincronizaba su velocidad de acuerdo con el líder sin tener algún conocimiento sobre la trayectoria deseada.

**PI (Proporcional e integral):** En [32], plantearon como objetivo controlar el motor mediante el seguimiento de velocidad de la variable que se desea. Un ESO es un tipo de observador que puede estimar la dinámica interna y las perturbaciones extras, se usó esencialmente para estimar la incertidumbre del modelo. Un controlador PI analógico se utilizó para controlar la corriente del inductor.

Un método de inyección para estimación de líneas y seguimiento de la resistencia del estator que se basó en que el patrón convencional fundamentado en la perturbación de voltaje y la medición de corriente se invierte fue utilizado para que desde el inyectado la señal no actúe como perturbación para el controlador actual que se compone de dos controladores PI independientes [33].

En [34], se presentó un enfoque práctico para modelar y analizar los efectos térmicos transitorios en tractos eléctricos refrigerados por aire con motores de iones.

En la investigación de [35], se suprimió efectivamente la ondulación de par de conmutación en el rango de velocidad completa mediante vectores de conmutación unificados durante el periodo de conmutación. Un PI se utilizó para controlar la velocidad y corriente del motor BLDC.

Un estudio para resolver la ondulación de torque fue realizado en [36], el cual fue un esquema donde el controlador aplicó un voltaje apropiado en los terminales del motor DC. Un control PI controló la velocidad y corriente del sistema.

Se empleó un circuito de control de velocidad externo para el motor de corriente continua sin escobillas que utilizó un controlador proporcional integral que produjo la referencia del torque [37].



En [38], se usó un controlador PI para implementar una compensación del circuito cerrado. El método de control sin sensor de posición para BLDC a baja velocidad fue presentado en este trabajo.

En [39], se estableció un motor DC conectado que se maneja mediante el uso de una comprensión difusa y modulación de la señal de controlador central, un compensador difuso usa señal de error como salida y un controlador PI como entrada produciendo así unas señales de modulación que modulan la salida.

En el estudio de [40], se utilizó unos controladores de redes proporcionales-integrales (PI) que sirvieron para controlar la velocidad del motor DC excitado y Petri que aseguraron la regulación de corriente del inducido y mantuvieron el voltaje del condensador del convertidor de celdas múltiples.

En [41], propusieron un controlador PI difuso de entrada única (SIFPIC) en el que una nueva variable llamada distancia fue propuesta como la entrada del controlador y además se empleó para controlar la velocidad del motor DC sin escobillas (BLDC).

En el trabajo de [42], se presentó un sistema de control de velocidad del motor de corriente continua sin escobillas (BLDC) de cuatro fases para el sistema EHPS basado en un controlador PI que se diseñó de acuerdo con diferentes rangos de velocidad y un controlador difuso de dos dimensiones fue diseñado para ajustar las ganancias de PI.

Los parámetros del controlador PI del motor BLDC se optimizaron por PSO (optimización por enjambre de partículas) algoritmo con cinco estrategias de ajuste de peso de inercia (peso de inercia descendente lineal, inercia diferencial lineal descendente, el peso de inercia decreciente incremental, peso de inercia descendente no lineal con umbral y descendente no lineal peso de inercia con factor de control) [43].

**Control de lógica difusa (FLC):** En [7], se implementó un modelo difuso TS (Takagi Sugeno) que se usó para aproximar el motor CC no lineal, este modelo es cuantificado mediante cuantificadores estáticos.

Unos controladores definidos en la etapa de línea (PID y de lógica difusa) fueron alimentados por el error de retroalimentación debido a la variabilidad del sistema del motor DC por medio de la incertidumbre [44].

En el estudio de [45], se llevó a cabo un controlador de lógica difusa adaptativo para el control preciso de la velocidad de un motor de corriente continua. El controlador se estimó a partir de dos niveles, donde el nivel inferior utilizó un control difuso Mamdani y el nivel superior un modelo inverso basado en un método Takagi, en el que su salida se utilizó para adaptar los parámetros del controlador difuso en el nivel inferior.

La utilización del algoritmo difuso permite ajustar la capa límite de acuerdo con la velocidad variable de un motor DC sin escobillas (BLDCM), se consideró un estado estable de fluctuaciones a alta velocidad y un error estacionario a alta velocidad [46].

En [47], establecieron un motor DC que funcionó con un generador fotovoltaico, mientras este motor se alimentaba con corriente adecuada, se logró controlarlo a través de un convertidor DC controlado por una red cognitiva difusa (FCN), en paralelo con la energía del dispositivo (batería) para que la energía fotovoltaica sea siempre totalmente explotable.

En la investigación de [48], se realizó un estudio sobre un motor DC sin escobillas con excitación trifásica, para ello presentaron un estimador de lógica difusa (FLE) cuya función fue simplemente regular la conmutación del ángulo de acción con precisión para mantener la misma rotación actual.

Un motor de CC sin escobillas (BLDCM) sin sensor sufre la señal de conmutación inexacta. Para lograr una conmutación precisa, en [49] presentaron un nuevo método de compensación de error de conmutación para BLDCM sin sensor que se complementó con un controlador de lógica difusa.

En [50], utilizaron un controlador de lógica difusa (FLC) para llevar a cabo el control de la posición de un motor de corriente continua (CC).

**Control por medio de redes neuronales:** El problema de control de seguimiento de la derivación de motores de corriente continua que funcionan bajo incertidumbre en los parámetros del sistema fue solucionado en [2]. Unas redes neuronales artificiales y un error de seguimiento dinámico se emplearon para la síntesis del control adaptativo.

En [3], se llevó a cabo un método de control de seguimiento adaptativo para sistemas de motor CC con estado variable en el tiempo que se basó en unas redes neuronales y una técnica de retroceso fue estructurada para garantizar que todas las señales del sistema de circuito cerrado estuviesen limitadas.

Se empleó una bomba fotovoltaica dirigida por BLDC con convertidor Luo. Para el trabajo propuesto se consideró un modelo de célula fotovoltaica de dos diodos y un controlador híbrido que mezcló un controlador de red neuronal artificial y de lógica difusa [5].

En [51], se efectuó un sistema para el motor DC que consta de dos redes neuronales: una primera red neuronal se utiliza para estimar la velocidad del motor de corriente continua y una segunda red neuronal de controlador, que se utiliza para generar una señal de control para controlar la planta (el convertidor).

En el trabajo de [52], se utilizó una red neuronal de la función de base radial que se empleó para compensar la no linealidad que proviene de las ecuaciones de estado no lineales del motor de inducción.

El objetivo principal de la investigación [53] fue controlar la velocidad de un motor CC excitado por separado (SEDM) con un nuevo controlador neuronal difuso (FN). El diagrama de control propuesto resolvió el problema de la configuración de parámetros del controlador (FN), más efectivamente con el uso de un algoritmo de optimización de enjambre de partículas (PSO).

**Filtro de Kalman:** En [54], estimaron los parámetros de un motor de corriente continua a través de un filtro de Kalman mediante el uso de un algoritmo genético.

En [55], se usó un filtro de Kalman que actuó estimando el estado del sistema diseñado con un paso de predicción en el motor CC, también filtró la medida ruidosa de la salida, se consideró que el ruido es ortogonal a la señal.

En la investigación de [56], emplearon un filtro Kalman de cubicación de grado (CKF) que estuvo desarrollado para un motor DC MG. El propósito del control fue encontrar el valor de la función de posición del interruptor que estabilizó la salida en la tensión del convertidor hacia su valor deseado.

La posición y la velocidad del rotor de un motor BLDC sin sensores se estimaron a partir del voltaje y la corriente de entrada utilizando un filtro Kalman extendido [57].

En [58], utilizaron un filtro de Kalman de cubicación (CFK) que es robusto contra la incertidumbre del sistema ruidoso y tiene un tiempo de cálculo bajo para el orden superior DC MG, con una gran cantidad de fuentes, de esta manera se logró la estabilización de micro redes DC no lineales (MG).

**Control backstepping:** Una técnica de retroceso o de backstepping se utilizó para generar la ley de control y la ley adaptativa de un servosistema de un motor de corriente continua [59].

En [6], abordaron un esquema anti-oscilación y control del caos para un sistema de motor CC sin escobillas de orden fraccional caracterizado por una dinámica desconocida, variación de parámetros, estados inconmensurables y oscilación caótica. Se introdujo un filtro de orden fraccional para abordar el problema de backstepping.

**Metaheurística:** En el estudio de [60], se mostraron seis técnicas metaheurísticas diferentes que se utilizaron para encontrar una solución a la optimización de los parámetros de un motor DC y fueron las siguientes: algoritmo Evolución Diferencia, optimización de enjambre de partículas, de murciélago, de luciérnaga, búsqueda de lobo, genético.

Para maximizar la eficiencia del sistema de energía de un motor BLDC, el algoritmo de optimización inspirado en las palomas (PIO) fue utilizado al convertir el problema del diseño de parámetros en un problema de optimización [4].

**Control de modo deslizante (SMC):** En [61], propusieron una ley basada en el control de modo deslizante (OBASMC) para el motor DC de tal manera que se pudo garantizar las respuestas estables que convergen hacia la superficie de conmutación deslizante en tiempo finito (SWSIFT).

En la investigación de [62], se proporcionó un enfoque novedoso de los problemas relacionados con el control de modelos caóticos de los motores BLDC. Un controlador de modo deslizante (SMC) se realizó en dos pasos, como superficie deslizante y como conmutación de ley de control. Un sistema PI se prefirió porque realiza bien el control del sistema caótico no lineal. Un control adaptativo puede ajustarse a los cambios del sistema dependiendo en el parámetro estimado.

**Control LQR (Regulador Lineal Cuadrático):** En [63], se llevó a cabo un control basado en la teoría de retroalimentación cuantitativa utilizando LQR que proporcionó conformación automática de bucle para los parámetros de ajuste del controlador, especialmente para la ganancia del motor DC.

En el estudio de [64], implementaron un controlador (LQR) usando un algoritmo cultural modificado artificial de enjambre de peces con cruce que se implementó para obtener los valores óptimos de las matrices del controlador LQR para una mejor salida del torque del motor DC.

**Modelo de control predictivo (MPC):** El mayor problema de regulación de velocidad predictiva de un motor CC genérico de imán permanente accionado por convertidor reductor es solucionado usando un modelo de tiempo discreto de retroalimentación de salida con algoritmos de control predictivo, además se usó el controlador GPIO (Entrada/Salida de Propósito General) para resolver una optimización del horizonte restringido [65].

**Control basado en pasividad:** En [66], se propuso un control DC Buck-Boost convertidor inversor DC que usó la dinámica de error de seguimiento exacto de retroalimentación de salida pasiva (ETEDPOF) para cambiar la dirección del flujo de corriente que ingresó al motor.

Se diseñó un control basado en pasividad para el sistema convertidor de CD/CD Boost-inversor-motor de DC que logró el manejo de velocidades angulares bidireccionales [67].

**Control tolerante a fallas (FTC):** Después de una falla de un canal en un motor DC de dos canales, se puede continuar una operación adicional de la máquina en el llamado modo de operación de canal único (SCO) [68].

La finalidad de la investigación [69] fue detectar fallas por medio de un método basado en redundancia directa utilizando seis sensores de efecto Hall en un motor BLDC que generan transiciones adicionales.

En la Tabla 5 se resume las técnicas de control aplicadas para un motor de corriente continua.

**Tabla 5: Técnicas de control para un motor de corriente continua**

Técnica de control	Artículos seleccionados	Nro. Artículos
PID	A4, A5, A9, A12, A22, A23, A24, A25, A26, A30, A38, A39, A48, A49, A50, A51, A53, A56, A57, A63, A65, A68, A71, A75	24
PI	A7, A14, A15, A18, A31, A36, A37, A41, A47, A62, A66, A72	12
Control de lógica difusa	A1, A10, A27, A32, A43, A54, A55, A61	8
Control por redes neuronales	A17, A20, A28, A67, A70, A74	6
Filtro de Kalman	A40, A45, A58, A59, A60	5
Control backstepping	A2, A8	2
Metaheurística	A6, A11	2
Control de modo deslizante	A16, A64	2
Control LQR	A69, A73	2
Modelo de control predictivo	A42	1
Control basado en pasividad	A3, A29	2
Control tolerante a fallas	A19, A35	2
Total		68



## PI2 ¿Qué técnicas de modelado matemático se implementaron para obtener las ecuaciones diferenciales de un motor de corriente continua?

En total 22 artículos llevaron a cabo el modelamiento matemático de las ecuaciones de estado de un motor de corriente continua (29%). Algunos de los artículos implementaron uno o más métodos, los cuales se resumen a continuación:

**Espacio de estados:** En [59], se utilizó la técnica de espacio de estados para desarrollar un modelo matemático adecuado que genere un pequeño torque.

La convergencia del tiempo de los algoritmos que se presentó en los controladores basados en metaheurística fue solucionada utilizando espacio de estados [60].

Un método de control de seguimiento dinámico propuesto en [2] se pudo extender a una amplia clase de sistemas dinámicos controlables en los que se admitieron la descripción de entradas y salidas.

Un motor trifásico BLDC fue controlado por la conducción de puente completo de dos fases, de esta manera el método de modelamiento que se ha propuesto para resolver el proyecto fue espacio de estados [17].

En [54], usaron espacio de estados en el motor DC debido a que es un dispositivo electromecánico, donde su modelo matemático depende de constantes de la naturaleza mecánica.

En el estudio de [65], se favoreció la regulación de velocidad de mayor precisión en la presencia de incertidumbres paramétricas y exógenas con la aplicación de espacio de estados.

Se presentó un enfoque para estimar las ecuaciones del modelo de espacio de estados de tal manera que benefició a la retroalimentación controlada que utilizó como estimador un filtro de Kalman [55].

El objetivo de la investigación [23] fue estabilizar el estudio de control digital de orden fraccional mediante espacio de estados, definición de Riemann-Liouville (RL), transformada de Laplace y función gama de Euler.

En [58] se presentó un controlador que logró resolverse numéricamente por técnicas lineales de desigualdad matricial (LMI) y pudo ser representado a través de espacio de estados.

Un motor de corriente continua se caracteriza por ondas de torsión que afectan el par producido del motor, para solucionar este problema se implementó la técnica de espacio de estados [64].

**Análisis por elementos finitos (FEM):** El torque máximo se determinó calculando los ángulos óptimos y corriente de bobina CC mediante un análisis por elementos finitos (FEM) [9].

En [68], calcularon el par de torsión por medio del análisis por elementos finitos (FEM), además, se pudo expandir a las series de Fourier.

Se investigaron los parámetros paramétricos y electromagnéticos que fueron obtenidos con el análisis por elementos finitos (FEM) [24].

**Función de Lyapunov:** Mediante el uso de la funcional Lyapunov - Krasovski, se dieron condiciones suficientes, de modo que la dinámica del modo deslizante fue estocásticamente admisible [61].

En [3], se empleó una función de barrera de Lyapunov (BLF) asimétrica variable en el tiempo para garantizar que los estados siempre pertenezcan al límite.

El resultado del SMO propuesto proporciona una estimación de la fase FEM hacia atrás que se implementa junto con una función de Lyapunov, a su vez ayudó a calcular la posición y velocidad del rotor [46].

El principal propósito de la investigación [39] fue lograr el control de sincronización de velocidad de la red conectada a múltiples motores de corriente continua que siguieron al líder usando una función de Lyapunov y el circuito chopper de CC.

Para probar la estabilidad del sistema caótico se utilizó una función cuadrática de Lyapunov [62].

**Expansión de Fourier:** El torque de engranaje es una función periódica dependiente de la posición, y se puede modelar como una expansión de Fourier [32].

En [25], demostraron que, con la ayuda de una transformación de Fourier de tiempo y una transformación de Hilbert, la gravedad de cada falla y su ubicación relativa al rotor o estator pudo establecerse con precisión.

**Transformada de Laplace:** En [20] se implementó un controlador PID de orden fraccional para la regulación de velocidad de un motor de corriente continua alimentado por chopper cuyas ecuaciones fueron modeladas por la transformada de Laplace.

En [63], tomaron una transformada de Laplace para modelar las ecuaciones y posteriormente representarlas en espacio de estados simbolizando la velocidad y el voltaje de la armadura del motor DC.

En la tabla 6 se resume las técnicas de modelado matemático para ecuaciones diferenciales del motor de corriente continua.

**Tabla 6: Técnicas de modelado matemático para obtener las ecuaciones diferenciales de un motor de corriente continua**

Técnica de modelado matemático	Artículos seleccionados	Nro. Artículos
Espacio de estados	A2, A6, A17, A30, A40, A42, A45, A51, A60, A73.	10
Análisis por elementos finitos	A5, A19, A53	3
Función de Lyapunov	A16, A20, A32, A41, A64	5
Expansión de Fourier	A7, A56	2
Transformada de Laplace	A48, A69	2
Total		22



### PI3 ¿Qué software y hardware se usaron para simulaciones y/o experimentaciones de un motor DC?

Los 75 artículos anteriormente seleccionados (Tabla 4) utilizaron software y hardware para realizar las experimentaciones que comprobaron sus estudios (es decir el 100%). Algunos de ellos aplicaron una o más herramientas que se resumen a continuación:

**Matlab:** En [7], se realizó una simulación en Matlab que poseyó una aproximación universal que ayudó a resolver las no linealidades que se presentaron, además mostraron el resultado en la matriz múltiple de Lyapunov que proporcionó una respuesta más innovadora.

Los resultados obtenidos mediante la simulación en Matlab y en un Hardware-in-the-Loop (HIL) bench verificaron la efectividad del método de control de retroceso adaptable para servosistemas de motores CC de parámetros y perturbaciones [59].

Un control de pasividad empleado en [66] fue implementado experimentalmente usando Matlab y la placa DS1104 en un prototipo construido, logrando resultados satisfactorios del seguimiento de voltaje y velocidad angular.

Se demostró en [8] una red de bombeo de agua solar interactuada con motor BLDC a través de un análisis profundo utilizando la simulación en Matlab y un prototipo de hardware conformado por un simulador fotovoltaico (marca AMETEK), rejilla monofásica, convertidor de refuerzo CC-CC, PFC convertidor de impulso, VSI trifásico (marca SEMIKRON), motor BLDC (marca Motor Power Company) y un controlador (dSPACE-1104).

En la investigación de [6], simularon en Matlab y dSpace, concluyendo que una red de estado de eco con un determinado peso pudo compensar las incertidumbres que existieron en el sistema dinámico con precisión arbitraria en un motor BLDC.

Se llevó a cabo una simulación para llegar a la conclusión de que un controlador PID estuvo directamente relacionado con la rotación y velocidad de un motor, y luego la onda de rotación pudo ser extraída para la estimación de velocidad de rotación [10].

Para la demostración de un método Kriging con un enfoque Taguchi en diseño de matriz cuadrada, se usó Matlab en [44] como programa de simulación y como hardware el Pareto Frontier.

En [4], se mejoró la eficiencia del sistema de energía UAV y por lo tanto también el rendimiento de su componente crítico en un motor BLDC.

Mediante una simulación en Matlab en conjunto con un motor sincrónico SynR e IPM se ha demostrado que el diseño no requiere ningún conocimiento de los parámetros del motor y las actuaciones son prácticamente independientes [33].

En el estudio de [61], se verificó que los sistemas singulares de salto semi-Markov (S-MJSs) tienen una relación importante en el análisis y la síntesis del modelo de un motor DC.

Por medio de una simulación en Matlab/Simulink y un convertidor back-to-back se estableció que las redes neuronales B-spline (BSSN) tuvieron características deseables importantes para sistemas físicos controlados [2].

En [68], realizaron pruebas en Matlab/Simulink y un motor sin escobillas de doble canal diseñado con imanes permanentes, indicador digital, transductor de par integrado y se basaron en el modelo matemático presentado de una máquina DCBLDC e incluyeron cálculos de características de par estático y el análisis de formas de ondas de tensiones, corrientes y par a velocidad constante.

En Matlab se pudo garantizar que las técnicas de backstepping se utilizaron para construir una adaptación de leyes de control y garantizar que la adaptación de señales de circuito esté limitada [3].

En la investigación de [15] se ejecutó una simulación en Matlab/Simulink de un control que estimó la velocidad del motor, calculó errores de velocidad estimados y actualizó los parámetros de un PID adaptativo.

Se demostró, gracias a Matlab y una placa DS1104, que el control basado en metodología de retroalimentación (ETEDPOF) resolvió la tarea de seguimiento de trayectoria bidireccional de velocidad angular en el sistema convertidor de CD/CD Boost-motor de CD [67].

Las pruebas que se aplicaron en [17] a los controles incluyeron repentinas perturbaciones y variaciones de parámetros, de esta manera se controló la velocidad de un motor BLDC.

Como resultado de las experimentaciones realizadas físicamente con puente rectificador de diodos (DBR), circuito de modulación de voltaje de enlace de CC, inversor, PMBLDCM con disposición de carga mecánica, unidad de señal de sensor Hall, controlador, autotransformador y una simulación en Matlab/Simulink se demostró que el esquema DVM disminuye la ondulación del torque [36].

En [46], realizaron simulaciones con Matlab y experimentaciones en el sistema BLDCM con otro motor de CC que sirvió como carga, un circuito de accionamiento, un inversor de fuente de voltaje, un circuito de muestreo, algunos circuitos de filtro y un microcontrolador TM320F28035. Se pudo concluir que la efectividad del esquema de control sin sensores con el novedoso SMO es superior en comparación a los convencionales con función sigmoidea.

En el estudio de [69], se empleó una simulación en Matlab, dSPACE y una estructura de hardware compuesta por MicroLabBox DS-1202 y sensores PCB, de esta forma se pudo establecer que este método, en comparación con otros que usan coeficientes de Fourier y cálculos FFT, ofreció menos complejidad, tiempo de compensación mejorado, y redujo el cálculo de costos.

La simulación y experimentaciones efectuadas en [38] dieron como resultado que el error de conmutación es inferior al 1,5% de la velocidad nominal, por lo tanto, se verificó la estabilidad y también la fiabilidad, las herramientas utilizadas fueron Matlab, Code Composer Studio y los siguientes elementos hardware: Procesador de señal digital de punto fijo (DSP), TMS320F2405 y un chip de unidad DRV8312.

En el trabajo de [37] ejecutaron una simulación en Matlab/Simulink dando como producto que la ondulación de par de un motor BLDC síncrono de imán permanente con respaldo no sinusoidal EMF no requirió orientación del rotor o armónico de EMF.

Se comparó un controlador FOPID basado en el algoritmo de la luciérnaga (FA) propuesto para el motor BLDC con un controlador FOPID basado en el algoritmo genético (GA) y se comprobó que el primero es mejor [18].

El propósito de la investigación [19] fue demostrar que un controlador GA-PID proporcionó menos tiempo de establecimiento y tiempo de subida en comparación con un controlador PID clásico.

Los datos obtenidos de la simulación tanto del modelo matemático de un motor DC así como el controlador PID mostraron que la metodología propuesta cumplió sus objetivos, de este modo se utilizó Matlab y un motor de CC utilizado en el robot móvil del NXP [54].

En [39], comprobaron que la trayectoria del líder fue una referencia para el resto de los agentes (velocidad sincronizada) y se logró maniobrando al líder.

Se utilizaron los programas Matlab/Simulink y dSPACE para verificar que el método MPC +GPIO propuesto superó a un controlador PID y otros dos enfoques de modelo de control predictivo en presencia de varios disturbios e incertidumbres [65].

En [47], se monitoreó el máximo espacio de campo y al mismo tiempo se determinó el valor correcto para la velocidad del motor DC que funcionó con un generador fotovoltaico.

El estudio llevado a cabo en [55] comparó el control de torque de un motor DC contra controladores de velocidad clásicos, también presentó un enfoque para estimar los parámetros de un motor genérico utilizando Matlab/Simulink y un motor de identificación de parámetros.

En la investigación de [40], aplicaron una simulación en Matlab/Simpower para verificar que usar la chopper multicelular en el esquema de control da como resultado el esquema de control de circuito cerrado.

En [20], se realizó un control de velocidad del motor CC, de esta manera para cada función objetivo, el algoritmo FDA superó en términos generales.

Los resultados de la simulación en Matlab revelan que GWO / FOPID con un enfoque con ITAE como una función objetivo dio menos asentamiento, tiempos de subida y sobrepaso comparable a diferencia de los enfoques existentes [21].

En la investigación de [22], se interactuó con el software Matlab en una computadora personal con un procesador Intel i7 2.50 GHz y 16 GB de RAM y los resultados del análisis mostraron que el CHASO-FOPID propuesto del sistema agregado del controlador tuvo la mejor respuesta transitoria.

Matlab y un conjunto de hardware: procesador de señal (DSP) TMS320F28377S, CPU de coma flotante de núcleo único de 32 MHz a 200 MHz, 7 analógicas de 16 bits y convertidores digitales (ADC), memoria de acceso aleatorio (RAM) de 164 Kb, 1 MB de flashgrunt y 15 canales PWM (ePWM) mejorados, fueron las herramientas utilizadas para obtener los resultados que interpretaron precisión mejorada en la respuesta de velocidad del motor de CC a través de la implementación de un controlador FO-PID [23].

El método presentado en [48] fue probado en una simulación precisa en Matlab, y se demostró que la propuesta del método es bastante capaz de reducir la conmutación de corriente y mejora de la potencia de salida del motor BLDC.

El experimento y los resultados de la simulación en Matlab/Simulink verificaron la viabilidad y efectividad del método propuesto de compensación de error de conmutación para BLDCM sin sensor [49].

En [25], presentaron resultados que han sido respaldados por simulaciones en Matlab y validadas por experimentos a escala de laboratorio mediante dispositivos de efecto Hall.

Los resultados de comparación en Matlab y experimentaciones con paneles fotovoltaico indicaron que un controlador PID con algoritmo de alimentación bacteriana produjo resultados óptimos de rendimiento [26].

En [56], se efectuaron simulaciones en Matlab/Simulink que tuvieron como objetivo encontrar una estimación de potencia espontánea de las cargas inciertas que varían con el tiempo.

El sistema de sensores sin posición completo estuvo modelado y simulado en Matlab para comprobar el mérito del algoritmo de suavizado propuesto [57].

La simulación en tiempo real realizada en Matlab verificó la simplicidad del controlador, rendimiento mejorado para el caso de información limitada y mejor robustez frente a las mediciones ruidosas en comparación con los métodos más modernos [58].

En [50], confirmaron con Matlab/Simulink que para las tres funciones de transferencia de un motor DC, los valores del tiempo de subida y el tiempo de asentamiento para el sistema usando el controlador de lógica difusa fueron menos en comparación con el sistema que no utilizó un controlador.

Se demostró a través de Matlab/Simulink que un controlador difuso de entrada única mostró un rendimiento idéntico con el FLC convencional, pero con un cálculo más rápido y un ciclo de diseño menos agitado [41].

Las simulaciones en Matlab ilustraron que el controlador NPID pudo acomodar los diferentes tipos de perturbaciones rápidamente y tuvo una respuesta más rápida en comparación con otras técnicas de control como PID o FOPID [27].

Un controlador de modo deslizante implementado en Matlab/Simulink mostró un rendimiento eficiente comparado con unos métodos PI y adaptativos en vehículos eléctricos [62].

En [28], realizaron experimentaciones con una Honda CBR 250cc, baterías de fosfato de hierro y litio, motor BLDC 48v de 5kW<sub>e1</sub> y Matlab/Simulink para demostrar que el controlador fue capaz de mantener la velocidad deseada (277 rad/s) en respuesta transitoria rápida (7.8x10<sup>-2</sup> milisegundos).

En la investigación de [51], se utilizó Matlab para comprobar que la calidad de control del sistema fue muy buena, la velocidad de respuesta siempre sigue la velocidad deseada y el tiempo de transición fue pequeño.

Los resultados de PID GA-ANFIS en Matlab/Simulink mostraron un rendimiento mejorado en términos de sobre impulsos reducidos, cambios reducidos de la carga y tiempo de asentamientos, también se ha demostrado que un controlador ha entregado mejor rendimiento para el cambio repentino de velocidad [29].



En [63], obtuvieron como resultado de la simulación de Matlab que la retroalimentación cuantitativa del controlador proporcionó el punto de ajuste ideal cuando se comparó con un controlador ordinario para la reacción en círculo abierto en espacio de tiempo y manejo de perturbaciones.

Se demostró por medio de Matlab/Simulink que el beneficio de la propuesta y el enfoque del control mediante la comparación del algoritmo con unos controladores PI convencionales fue garantizar una buena robustez y estabilidad [52].

La efectividad de un controlador PI junto con el algoritmo de optimización de enjambre de partículas (PSO) fue probada en Matlab Simulink logrando regular la velocidad del motor BLDC [43].

En [64], llevaron a cabo una simulación en Matlab para obtener mejor tiempo de subida, un asentamiento más rápido y sobre impulso reducido en un controlador basado en LQR. Por lo tanto, resultó mejor par producido en la salida del sistema.

En una simulación con MATLAB 2017b, se utilizaron 250 series de datos: 175 series de datos, equivalentes al 70% para entrenar la red neuronal diseñada, y aproximadamente 75 series, equivalentes al 30% [53].

En [31], se verificó por medio de Matlab/Simulink que el diseño del sistema de control fue en realidad el proceso de elección en la retroalimentación que ganó a aquellas que cumplen con las especificaciones de diseño en un proceso cerrado en sistema de control de bucle.

Las pruebas experimentales del sistema de motor de circuito cerrado MIMO DC/DC Boost convertidor-inversor-DC fueron ejecutadas en Matlab/Simulink y una placa DS1104 de dSPACE, además, cabe destacar que se realizaron con una variación abrupta de iones en algunos parámetros del sistema [1].

En el trabajo de [70] se verificó que la aplicación de los algoritmos de minimización de pérdidas (LMA) mejoró la eficiencia del motor DC sin escobillas sin influencia considerable sobre el rendimiento del sistema de control. Las herramientas para llevar a cabo la simulación fueron las siguientes: Code Composer Studio, Matlab/Simulink, Rotor externo de 200 W con trapezoidal EMF posterior, máquina de 250 W DC, placa de control digital basada en DSP, placa TMS320F28335, HCPL 316J y placa de inversor basada en IGBT.

**Software R:** Mediante software R y Microsoft Visual C++ en una PC con 3.2 GHz Procesador i5-6500 se ha realizado una simulación que mostró que AC-PSO y AC-DE son las estrategias adaptativas más prometedoras [60].

En [12], se demostró que todos los componentes de un motor CC con fallas de conmutador fueron más altos que el motor CC en buen estado.

**Simulink a C:** Para realizar el control de movimiento de velocidad variable de alta precisión de motores CC, en [32] presentaron un modelo simplificado para el torque de fricción, para ello se llevó a cabo una simulación con Simulink a C y un sistema de control dSPACE 1401.

**MagNet Paquete CAD:** En [11], utilizaron el programa MagNet Paquete CAD y un motor sin escobillas CC de imán permanente para simular una bobina de campo CC con el fin de proporcionar un voltaje terminal regular.

**STAR-CCM+:** En [34], se comprobó un controlador PI usando experimentos en un motor de tracción eléctrica equipado con temperatura en los sensores en las partes críticas del motor y un programa llamado STAR-CCM+.

**GNU Octave:** En el estudio de [13], aplicaron una simulación con GNU Octave y un transistor SW MOSFET IRFZ44N, así, concluyeron que el error relativo del promedio total fue el más bajo para esa serie de motores y fue de dos a seis veces más alto para los otros.

**SCS y RRCS:** Se utilizó SSCS, RRCS y una armadura de rotor exterior PMBLDCM para verificar el patrón de efecto ranurado en la reacción de la armadura tanto del rotor externo como del estator interno fueron analizados respectivamente [14].

**HF "Wedm program and control system":** En [16] se destacaron los esquemas de identificación fuera de línea que satisfizo el requisito de autocuestionamiento por medio de HF "Wedm program and control system".

**AutoDesk FLIC:** Se empleó una plataforma de código abierto libre llamado AutoDesk FLIC junto con un Arduino DUE para controlar la velocidad de un motor de corriente continua dando a conocer que la eficiencia de un motor eléctrico aumentó 77,54%, que es 24,49% más alto que la técnica de control convencional [45].

**ANSYS Ansoft EM-Simplorer:** A través del software ANSYS Ansoft EM-Simplorer y un motor BLDC de corredera se implementan los parámetros obtenidos como resultado del proceso de diseño del estimador de lógica difusa [24].

**Visual Studio:** En [30], intentaron ingresar un punto rojo virtual en el cuadrado verde usando solo movimiento de los ojos y parpadeando para probar el control de un motor de corriente continua eléctrica basado en electrooculografía (EOG) en Visual Studio con auriculares Emotiv EPOC.

**LTspice:** Las experimentaciones y simulaciones presentadas en [71] y realizadas con un BLDC monofásico de alta velocidad, un motor de puente complejo, DSP C2000 F28335 y un acelerómetro dieron a conocer que la eficiencia de un motor aumentó 77,54%, que es 24,49% más alto que la técnica de control convencional.

**Experimentaciones físicas:** Se presentaron los principios de funcionamiento electromagnético, análisis de comportamiento y una técnica de búsqueda usando análisis FEM para evaluar los parámetros de control óptimos del motor IFP-HBLDC gracias a una experimentación con Texas Instrumentos TMS320F2812 procesador de señal digital (DSP) [9].

En el estudio [35] se implementó una experimentación con un inversor, sensor, unidad de control, freno de histéresis y magtrol DSP6001A, agilent N5767A mostrando que un voltaje de suministro más bajo que la tensión nominal del motor se pudo utilizar para conducir el BLDCM en el método propuesto.

Se demostró que el ANFIS-FPA tiene un seguimiento de potencia superior, velocidad de convergencia rápida y respuesta precisa del sistema mediante el uso de un controlador dSPACE, sensores de corriente y hardware de bombeo FV empleado por convertidor Luo impulsado por BLDC [5].

Fuente de alimentación, bomba, motor BLCD, depurador, sistema de adquisición CAN fueron las herramientas utilizadas en [42] para verificar que un controlador difuso propuesto pudo sintonizar las ganancias del controlador PI, y por lo tanto, se obtuvo un buen rendimiento dinámico.

En [72], los autores presentaron una simulación en un motor de inducción lineal con el fin de maximizar la fuerza de empuje.

Se establecieron dos pruebas en un rectificador de diodo monofásico para examinar la propuesta, un control de potencia activa afectó la eficiencia del sistema y el control de potencia reactiva se controló al lado de la red [73].

Un control de voltaje de la armadura demostró en [74] que fue el mejor método de control de velocidad de motores de corriente continua.

En [75] se presentó una trayectoria de referencia de salida robusta lineal con un controlador de seguimiento, tratado aquí como un controlador de filtro plano (FFC), para sistemas no lineales diferencialmente planos, el modelo fue demostrado por Pololu DC Gear motor 37Dx73L mm, con codificador de cuadratura integrado y microcontrolador STM32.

En la tabla 7 se presenta el software y hardware para simulaciones y/o experimentaciones de un motor DC.

**Tabla 7: Software y hardware para simulaciones y/o experimentaciones de un motor DC**

Software	Artículos seleccionados	Nro. Artículos
Matlab	A1, A2, A3, A4, A8, A9, A10, A11, A14, A16, A17, A19, A20, A21, A25, A29, A30, A31, A32, A33, A35, A36, A37, A38, A39, A40, A41, A42, A43, A45, A47, A48, A49, A50, A51, A54, A55, A56, A57, A58, A59, A60, A61, A62, A63, A64, A65, A67, A68, A69, A70, A72, A73, A74, A75	55
Software R	A6, A22	1
Simulink a C	A7	1
Magnet paquete CAD	A12	1
STAR-CCM+	A15	1
GNU Octave	A23	1
SCS y RRCS	A24	1
HF "Wedm program and control system"	A26	1
AutoDesk FLIC	A27	1
ANSYS Ansoft EM-Simplorer	A53	1
Visual Studio	A71	1
LTspice	A34	1
Experimentaciones físicas	A5, A13, A18, A28, A44, A46, A52, A66	8
Total		75

## Discusión

Los estudios analizados en la revisión sistemática de literatura tienen relación con la ingeniería de control y mejoran el nivel de funcionamiento de los motores de corriente continua que se utilizan en diferentes situaciones de la vida cotidiana, como por ejemplo, en medios de transporte. En cada artículo, dependiendo de la problemática, se requiere de la elección de las técnicas de control más eficientes.

La técnica de control PID es una de las más utilizadas en la actualidad, mientras que la de Modelo de control predictivo ha sido la menos usada, tal como se muestra en la Figura 2, la cual ejemplifica la Tabla 5.

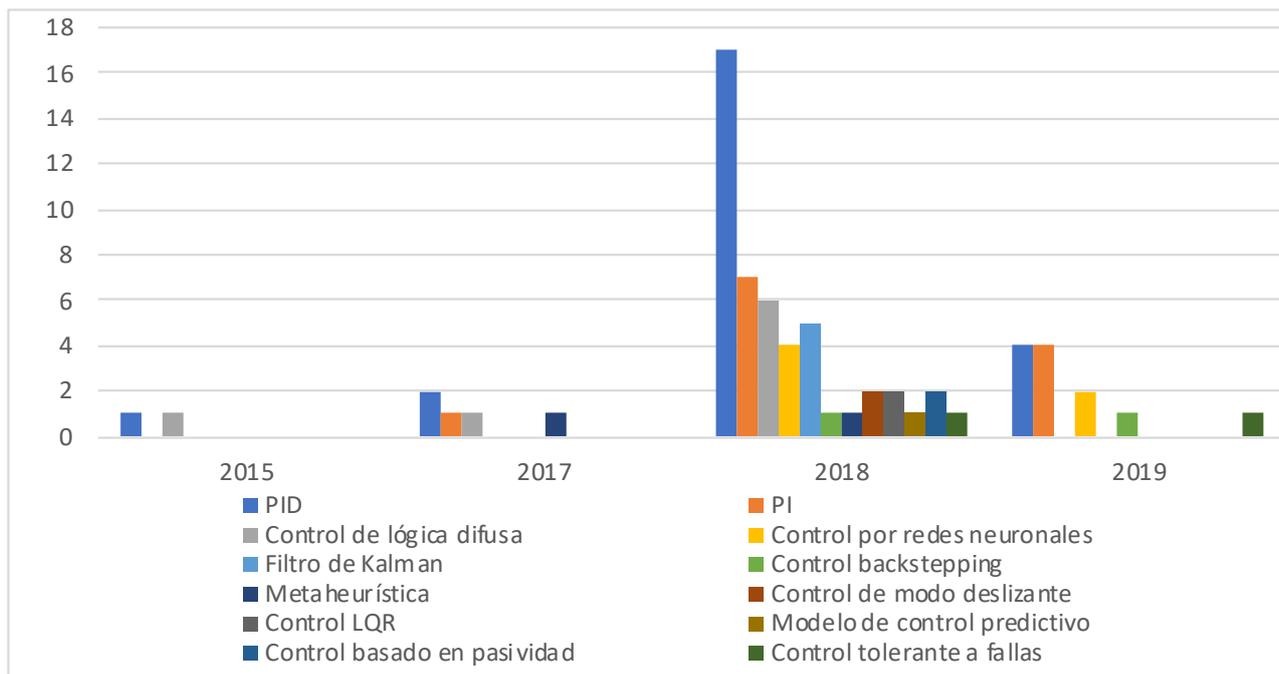


Figura 2. Técnicas de control para un motor de corriente continua

Respecto a las técnicas de modelamiento matemático como la función de Lyapunov y el espacio de estados, han sido de mucha utilidad para formar las ecuaciones diferenciales y crear respuestas ante las no linealidades que se presentan en sistemas complejos que son muy difíciles de controlar.

La técnica de Espacio de estados es la que ha tenido mayor tendencia en los artículos revisados, la misma que posee un grupo de entradas y salidas, además facilita la representación de las ecuaciones diferenciales por medio de matrices. En la Figura 3 se observa un resumen de las técnicas de modelado matemático.

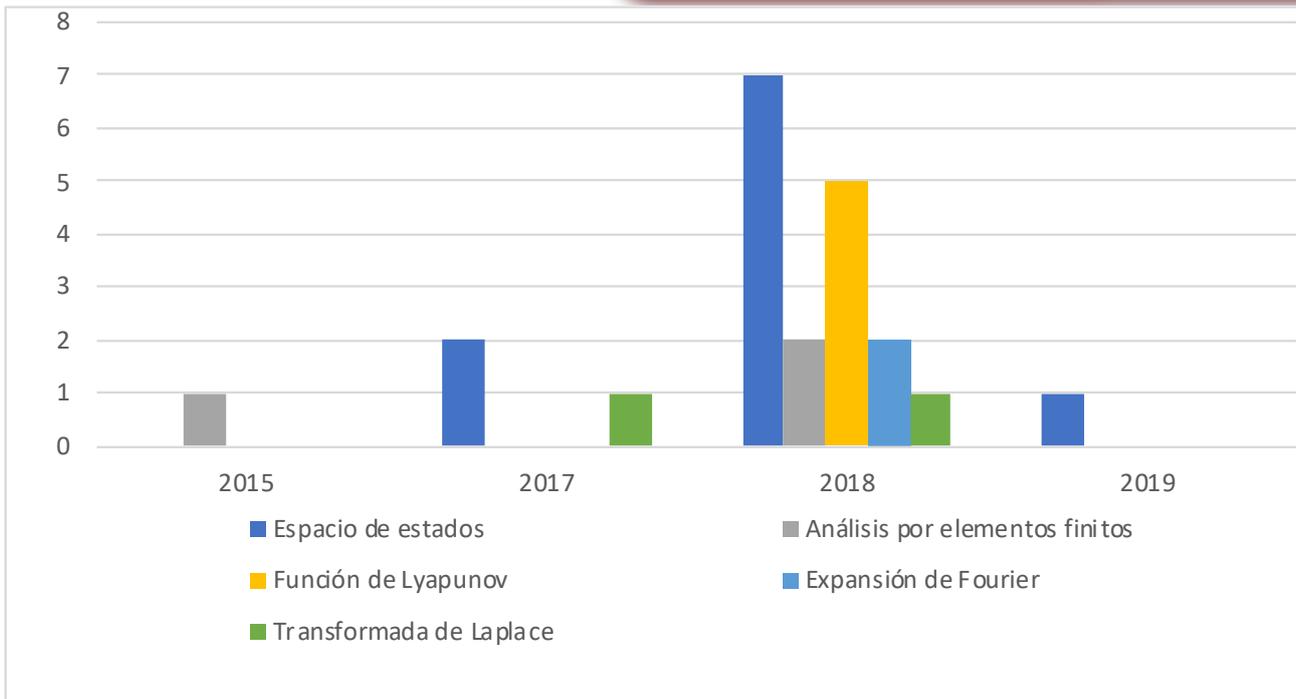
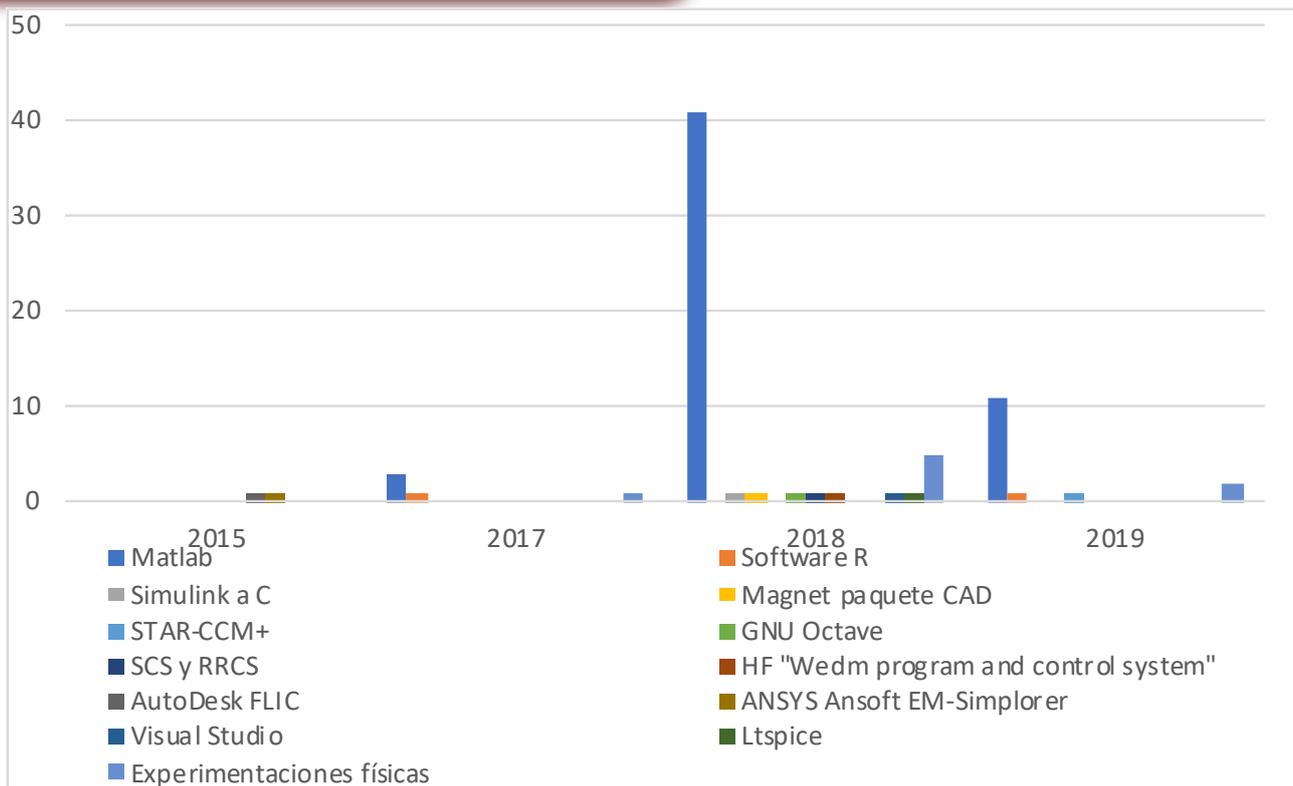


Figura 3. Técnicas de modelado matemático para obtener las ecuaciones diferenciales de un motor de corriente continua

El software y hardware son las herramientas imprescindibles para llevar a cabo experimentaciones o simulaciones que demuestren lo que se ha presentado en cada artículo.

El software más utilizado es Matlab, como se muestra en la Figura 4 (Tabla 7), esto se debe a sus múltiples funcionalidades y beneficios que ayudan al experimentador a obtener mejores resultados. Cabe destacar que el hardware como el Arduino y la placa DS1104 hacen posible la realización de un sistema que tenga la habilidad de presentar el software en la vida real, es decir de una manera física.



## Conclusiones

Los artículos revisados utilizan diferentes técnicas de control (PI, PID, backstepping, lógica difusa, filtro de Kalman, metaheurística, LQR, basado en pasividad, redes neuronales, modo deslizante, tolerante a fallas, modelo de control predictivo) (Tabla 5 y Figura 2) principalmente para la velocidad y el torque de un motor de corriente continua. La técnica de control PID demostró que en el año 2018 jugó un papel importante debido a las múltiples ventajas que presentó, como por ejemplo precisión en tiempos de respuesta.

El modelamiento matemático de las ecuaciones diferenciales puede complicarse dependiendo del tipo de motor de corriente continua con el cual se esté trabajando, para ello se recurre a técnicas matemáticas (Tabla 6 y Figura 3) que facilitan y simplifican algunos procesos.

El uso de software y hardware (Tabla 7 y Figura 4) es muy común en el ámbito de la ingeniería de control, debido a que estos pueden ayudar a comprobar que el motor de corriente continua ejecuta sus funciones de una manera adecuada y sin inconvenientes, de esta forma las experimentaciones y simulaciones tienen que realizarse de una manera continua hasta el momento en que el investigador encuentre un resultado que ejemplifique las condiciones planteadas inicialmente. Matlab es la plataforma que destacó sobre los otros tipos de software debido a que su entorno es sencillo y ofrece herramientas con múltiples funcionalidades. Sin embargo, las experimentaciones físicas han tenido una gran utilidad en el 2019 con microprocesadores y otros instrumentos más, así se abren las puertas a un futuro crecimiento de sistemas complejos implementados en la vida real.

## Referencias

- J. R. Garcia-Sanchez et al., "A Robust Differential Flatness-Based Tracking Control for the 'MIMO DC/DC Boost Converter-Inverter-DC Motor' System: Experimental Results," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 84497–84505, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2923701.
- F. Beltran-Carbajal, R. Tapia-Olvera, I. Lopez-Garcia, and D. Guillen, "Adaptive dynamical tracking control under uncertainty of shunt DC motors," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 164, pp. 70–78, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.epsr.2018.07.033.
- L. Ma and D. Li, "Adaptive Neural Networks Control Using Barrier Lyapunov Functions for DC Motor System with Time-Varying State Constraints," *Complexity*, vol. 2018, 2018, doi: 10.1155/2018/5082401.
- X. Xu and Y. Deng, "UAV Power Component - DC Brushless Motor Design with Merging Adjacent-Disturbances and Integrated-Dispatching Pigeon-Inspired Optimization," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 54, no. 8, Aug. 2018, doi: 10.1109/TMAG.2018.2839663.
- N. Priyadarshi, S. Padmanaban, L. Mihet-Popa, F. Blaabjerg, and F. Azam, "Maximum Power Point Tracking for Brushless DC Motor Driven Photovoltaic Pumping System Using Hybrid ANFIS-FLOWER Pollination Optimization Algorithm," *Preprints*, Mar. 2018, doi: 10.20944/PREPRINTS201803.0158.V1.
- S. Luo, S. Li, F. Tajaddodianfar, and J. Hu, "Anti-oscillation and chaos control of the fractional-order brushless DC motor system via adaptive echo state networks," *J. Franklin Inst.*, vol. 355, no. 14, pp. 6435–6453, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.jfranklin.2018.07.004.
- X. H. Chang and Y. M. Wang, "Peak-to-peak filtering for networked nonlinear DC motor systems with quantization," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 14, no. 12, pp. 5378–5388, Dec. 2018, doi: 10.1109/TII.2018.2805707.
- R. Kumar and B. Singh, "Brushless DC motor-driven grid-interfaced solar water pumping system," *IET Power Electron.*, vol. 11, no. 12, Oct. 2018, doi: 10.1049/iet-pel.2017.0812.
- H. Moradi Cheshmehbeigi and E. Karami, "Maximum output torque control in improved flux path homopolar brushless DC motor with axillary field by using optimal control of Turn-ON and Turn-OFF angles in variable speed applications," *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 6, no. 4, pp. 1722–1731, Dec. 2018, doi: 10.1109/JESTPE.2018.2850349.
- S. Lu, Y. Qin, J. Hang, B. Zhang, and Q. Wang, "Adaptively Estimating Rotation Speed from DC Motor Current Ripple for Order Tracking and Fault Diagnosis," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 68, no. 3, pp. 741–753, Mar. 2019, doi: 10.1109/TIM.2018.2852978.
- H. Moradi CheshmehBeigi, E. Karami, E. Afjei, and K. Rouzbehi, "Numerical and Experimental Investigation of an Improved Flux Path Brushless-DC Machine for Variable Speed Applications," *IEEE Trans. Transp. Electrification*, vol. 4, no. 4, pp. 877–887, Dec. 2018, doi: 10.1109/TTE.2018.2859038.

- A. A. Wahab, N. F. Abdullah, and M. A. H. Rasid, "Commutator fault detection of brushed DC motor using thermal assessment," in IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, vol. 469, no. 1, doi: 10.1088/1757-899X/469/1/012057.
- A. Petrovas, A. Pitrenas, and Z. Savickienė, "DC motor parameter identification using equation error method," *Electr. Eng.*, vol. 100, no. 2, pp. 415–423, Jun. 2018, doi: 10.1007/s00202-017-0514-6.
- C. Ma, Q. Li, H. Lu, Y. Liu, and H. Gao, "Analytical model for armature reaction of outer rotor brushless permanent magnet DC motor," *IET Electr. Power Appl.*, vol. 12, no. 5, pp. 651–657, May 2018, doi: 10.1049/iet-epa.2017.0751.
- M. Ezzaldeen, "Design of Speed-Controller for Brushless DC-Motor Based on Grey Predictor-PID Controller," *Eng. Technol. J.*, vol. 36, no. 8A, Aug. 2018, doi: 10.30684/etj.36.8a.9.
- S. A. Odhano, P. Pescetto, H. A. A. Awan, M. Hinkkanen, G. Pellegrino, and R. Bojoi, "Parameter Identification and Self-Commissioning in AC Motor Drives: A Technology Status Review," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 34, no. 4. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 3603–3614, 01-Apr-2019, doi: 10.1109/TPEL.2018.2856589.
- A. A. El-samahy and M. A. Shamseldin, "Brushless DC motor tracking control using self-tuning fuzzy PID control and model reference adaptive control," *Ain Shams Eng. J.*, vol. 9, no. 3, pp. 341–352, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.asej.2016.02.004.
- B. N. Kommula and V. R. Kota, "Direct instantaneous torque control of Brushless DC motor using firefly Algorithm based fractional order PID controller," *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, King Saud University, 2018.
- M. A. Ibrahim, A. K. Mahmood, and N. S. Sultan, "Optimal PID controller of a brushless DC motor using genetic algorithm," *Int. J. Power Electron. Drive Syst.*, vol. 10, no. 2, pp. 822–830, Jun. 2019, doi: 10.11591/ijpeds.v10.i2.822-830.
- V. Haji Haji and C. A. Monje, "Fractional-order PID control of a chopper-fed DC motor drive using a novel firefly algorithm with dynamic control mechanism," *Soft Comput.*, vol. 22, no. 18, pp. 6135–6146, Sep. 2018, doi: 10.1007/s00500-017-2677-5.
- J. Agarwal, G. Parmar, R. Gupta, and A. Sikander, "Analysis of grey wolf optimizer based fractional order PID controller in speed control of DC motor," *Microsyst. Technol.*, vol. 24, no. 12, pp. 4997–5006, Dec. 2018, doi: 10.1007/s00542-018-3920-4.
- B. Hekimoglu, "Optimal Tuning of Fractional Order PID Controller for DC Motor Speed Control via Chaotic Atom Search Optimization Algorithm," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 38100–38114, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2905961.
- S. W. Khubalkar, A. S. Junghare, M. V. Aware, A. S. Chopade, and S. Das, "Demonstrative fractional order – PID controller based DC motor drive on digital platform," *ISA Trans.*, vol. 82, pp. 79–93, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.isatra.2017.08.019.



- D. Uygun and S. Solmaz, "Design and dynamic study of a 6 kW external rotor permanent magnet Brushless DC motor for electric drivetrains," in International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, 2015, vol. 2015-September, pp. 87–92, doi: 10.1109/PowerEng.2015.7266300.
- G. Mirzaeva and K. I. Saad, "Advanced Diagnosis of Rotor Faults and Eccentricity in Induction Motors Based on Internal Flux Measurement," in IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, vol. 54, no. 3, pp. 2981–2991, doi: 10.1109/TIA.2018.2805730.
- N. S. Sultan, "Design and comparative study of photovoltaic maximum power point tracking converter with DC motor speed control," in 1st International Scientific Conference of Engineering Sciences - 3rd Scientific Conference of Engineering Science, ISCES 2018 - Proceedings, 2018, vol. 2018-January, pp. 74–79, doi: 10.1109/ISCES.2018.8340531.
- M. Shamseldin, M. Abdel Ghany, and A. G. Mohamed, "Performance Study of Enhanced Non-Linear PID Control Applied on Brushless DC Motor," *Int. J. Power Electron. Drive Syst.*, vol. 9, no. 2, p. 536, Jun. 2018, doi: 10.11591/ijpeds.v9.i2.pp536-545.
- [M. Syakir Adli, N. H. H. Mohamad Hanif, and S. F. Toha Tohara, "Brushless DC Motor Speed Controller for Electric Motorbike," *Int. J. Power Electron. Drive Syst.*, vol. 9, no. 2, p. 859, Jun. 2018, doi: 10.11591/ijpeds.v9.i2.pp859-864.
- [M. Dasari, A. S. Reddy, and M. Vijaya Kumar, "GA-ANFIS PID compensated model reference adaptive control for BLDC motor," *Int. J. Power Electron. Drive Syst.*, vol. 10, no. 1, pp. 265–276, 2019, doi: 10.11591/ijpeds.v10.i1.pp265-276.
- A. Kubacki, P. Owczarek, and T. Lindner, "Use of electrooculography (EOG) and facial expressions as part of the brain-computer interface (BCI) for controlling an electric DC motor," in *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2018, vol. 743, pp. 82–92, doi: 10.1007/978-3-319-77179-3\_8.
- H. M. Guzey, A. Dumlu, N. Guzey, and A. Alpay, "Optimal synchronizing speed control of multiple DC motors," in *Proceedings of the 2018 International Conference on Optimization and Applications, ICOA 2018*, 2018, pp. 1–5, doi: 10.1109/ICOA.2018.8370508.
- Y. Hu, W. Gu, H. Zhang, and H. Chen, "Adaptive Robust Triple-Step Control for Compensating Cogging Torque and Model Uncertainty in a DC Motor," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 01-Dec-2018.
- R. Antonello, L. Ortombina, F. Tinazzi, and M. Zigliotto, "Online stator resistance tracking for reluctance and interior permanent magnet synchronous motors," in *2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2017*, 2017, vol. 2017-January, pp. 5861–5868, doi: 10.1109/ECCE.2017.8096970.
- S. Nategh, H. Zhang, O. Wallmark, A. Boglietti, T. Nassen, and M. Bazant, "Transient Thermal Modeling and Analysis of Railway Traction Motors," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 66, no. 1, pp. 79–89, Jan. 2019, doi: 10.1109/TIE.2018.2821619.

- Y. Cao, T. Shi, X. Li, W. Chen, and C. Xia, "A Commutation Torque Ripple Suppression Strategy for Brushless DC Motor Based on Diode-Assisted Buck-Boost Inverter," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 34, no. 6, pp. 5594–5605, Jun. 2019, doi: 10.1109/TPEL.2018.2866001.
- R. Kuttappan, S. Durgaprasanth, N. Chilakapati, and S. I. Ganesan, "A Simple Voltage Modulator Scheme for Torque Ripple Minimization in a Permanent Magnet Brushless DC Motor," *IEEE Trans. Power Electron.*, pp. 1–1, Jul. 2019, doi: 10.1109/tpel.2019.2926122.
- A. G. De Castro, W. C. A. Pereira, T. E. P. De Almeida, C. M. R. De Oliveira, J. Roberto Boffino De Almeida Monteiro, and A. A. De Oliveira, "Improved Finite Control-Set Model-Based Direct Power Control of BLDC Motor with Reduced Torque Ripple," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 54, no. 5, pp. 4476–4484, Sep. 2018, doi: 10.1109/TIA.2018.2835394.
- T. Li and J. Zhou, "High-Stability Position-Sensorless Control Method for Brushless DC Motors at Low Speed," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 34, no. 5, pp. 4895–4903, May 2019, doi: 10.1109/TPEL.2018.2863735.
- S. Masroor and C. Peng, "Agent-based consensus on speed in the network-coupled DC motors," *Neural Comput. Appl.*, vol. 30, no. 5, pp. 1647–1656, Sep. 2018, doi: 10.1007/s00521-016-2773-y.
- M. L. Hamida, H. Denoun, A. Fekik, and S. Vaidyanathan, "Control of separately excited DC motor with series multi-cells chopper using PI - Petri nets controller," *Nonlinear Eng.*, vol. 8, no. 1, pp. 32–38, Jan. 2019, doi: 10.1515/nleng-2017-0174.
- N. N. Baharudin and S. M. Ayob, "Brushless DC Motor Speed Control Using Single Input Fuzzy PI Controller," *Int. J. Power Electron. Drive Syst.*, vol. 9, no. 4, p. 1952, Dec. 2018, doi: 10.11591/ijpeds.v9.i4.pp1952-1966.
- W. Dong, J. Song, S. Cheng, L. Yu, and Z. Lu, "Speed Control of BLDC Motor in Electro-Hydraulic Power Steering System Based on Fuzzy-PI Controller," in *SAE Technical Papers*, 2018, vol. 2018-April, doi: 10.4271/2018-01-0698.
- W. Xie, J. S. Wang, and H. B. Wang, "PI Controller of Speed Regulation of Brushless DC Motor Based on Particle Swarm Optimization Algorithm with Improved Inertia Weights," *Math. Probl. Eng.*, vol. 2019, 2019, doi: 10.1155/2019/2671792.
- A. Parnianifard, A. S. Azfanizam, M. K. A. Ariffin, and M. I. S. Ismail, "Kriging-Assisted Robust Black-Box Simulation Optimization in Direct Speed Control of DC Motor under Uncertainty," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 54, no. 7, Jul. 2018, doi: 10.1109/TMAG.2018.2829767.
- A. M. Zaki, M. El-Bardini, F. A. S. Soliman, and M. M. Sharaf, "Embedded two level direct adaptive fuzzy controller for DC motor speed control," *Ain Shams Eng. J.*, vol. 9, no. 1, pp. 65–75, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.asej.2015.10.003.
- M. G. Gan, M. Zhang, C. Y. Zheng, and J. Chen, "An adaptive sliding mode observer over wide speed range for sensorless control of a brushless DC motor," *Control Eng. Pract.*, vol. 77, pp. 52–62, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.conengprac.2018.05.004.

- T. L. Kottas, A. D. Karlis, and Y. S. Boutalis, "A Novel Control Algorithm for DC Motors Supplied by PVs Using Fuzzy Cognitive Networks," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 24866–24876, May 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2822051.
- E. Çelik and N. Öztürk, "A new fuzzy logic estimator for reduction of commutation current pulsation in brushless DC motor drives with three-phase excitation," *Neural Comput. Appl.*, vol. 31, pp. 1125–1134, Feb. 2019, doi: 10.1007/s00521-017-3083-8.
- X. Yao, H. Lin, and J. Zhao, "Line voltage difference integral method of commutation error adjustment for sensorless brushless DC motor," in *Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC, 2018*, vol. 2018-March, pp. 843–847, doi: 10.1109/APEC.2018.8341111.
- N. Elias and N. M. Yahya, "Simulation Study for Controlling Direct Current Motor Position Utilising Fuzzy Logic Controller," *Int. J. Automot. Mech. Eng.*, vol. 15, no. 4, pp. 5989–6000, Dec. 2018, doi: 10.15282/IJAME.15.4.2018.19.0456.
- T.-T. Nguyen, "The neural network-based control system of direct current motor driver," *Int. J. Electr. Comput. Eng.*, vol. 9, no. 2, p. 1445, Apr. 2019, doi: 10.11591/ijece.v9i2.pp1445-1452.
- E. Kılıç, H. R. Özçalık, and S. Şit, "Adaptive controller with RBF neural network for induction motor drive," *Int. J. Numer. Model. Electron. Networks, Devices Fields*, vol. 31, no. 3, p. e2280, May 2018, doi: 10.1002/jnm.2280.
- G. Farahani and K. Rahmani, "Speed Control of a Separately Excited DC Motor Using New Proposed Fuzzy Neural Algorithm Based on FOPID Controller," *J. Control. Autom. Electr. Syst.*, vol. 30, no. 5, pp. 728–740, Oct. 2019, doi: 10.1007/s40313-019-00485-8.
- A. F. Moreira, A. S. Fernandes, J. A. B. Silva, A. V. de A. Batista, and P. H. A. Miranda, "The Use of a Statistical Filter and Metaheuristics to Model and Control The DC Motor of the Mobile Robot Used on NXP Cup," *J. Mechatronics Eng.*, vol. 1, no. 1, p. 11, Apr. 2018, doi: 10.21439/jme.v1i1.16.
- A. Archela, D. G. Togninho, and L. F. De Melo, "Torque control of a DC motor with a state space estimator and kalman filter for vehicle traction," in *2018 13th IEEE International Conference on Industry Applications, INDUSCON 2018 - Proceedings, 2019*, pp. 763–769, doi: 10.1109/INDUSCON.2018.8627285.
- S. Yousefizadeh, J. D. Bendtsen, N. Vafamand, M. H. Khooban, F. Blaabjerg, and T. Dragicevic, "Tracking control for a dc microgrid feeding uncertain loads in more electric aircraft: Adaptive backstepping approach," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 66, no. 7, pp. 5644–5652, Jul. 2019, doi: 10.1109/TIE.2018.2880666.
- S. S. Alex and A. E. Daniel, "An efficient position tracking smoothing algorithm for sensorless operation of brushless DC motor drives," *Model. Simul. Eng.*, vol. 2018, 2018, doi: 10.1155/2018/4523416.
- M. A. Kardan et al., "Improved Stabilization of Nonlinear DC Microgrids: Cubature Kalman Filter Approach," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 54, no. 5, pp. 5104–5112, Sep. 2018, doi: 10.1109/TIA.2018.2848959.

- X. Wang, W. Wang, L. Li, J. Shi, and B. Xie, "Adaptive Control of DC Motor Servo System with Application to Vehicle Active Steering," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 24, no. 3, pp. 1054–1063, Jun. 2019, doi: 10.1109/TMECH.2019.2906250.
- A. Rodríguez-Molina, M. G. Villarreal-Cervantes, and M. Aldape-Pérez, "An adaptive control study for the DC motor using meta-heuristic algorithms," *Soft Comput.*, vol. 23, no. 3, pp. 889–906, Feb. 2019, doi: 10.1007/s00500-017-2797-y.
- W. Qi, G. Zong, and H. R. Karim, "Observer-based adaptive smc for nonlinear uncertain singular semi-markov jump systems with applications to DC motor," *IEEE Trans. Circuits Syst. I Regul. Pap.*, vol. 65, no. 9, pp. 2951–2960, Sep. 2018, doi: 10.1109/TCSI.2018.2797257.
- E. Köse and A. Mühürçü, "The control of Brushless DC motor for electric vehicle by using chaotic synchronization method," *Stud. Informatics Control*, vol. 27, no. 4, pp. 403–412, 2018, doi: 10.24846/v27i4y201804.
- T. Rajesh, A. Jagadeesan, R. Dhanasekar, and G. M. Tamilselvan, "Quantitative Feedback Theory based Robust Controller Design for Speed Control of DC Motor," in *Proceedings of the 3rd International Conference on Communication and Electronics Systems*, ICCES 2018, 2018, pp. 492–496, doi: 10.1109/CESYS.2018.8723905.
- T. A. Zarma, B. M. Mustapha, H. U. Suleiman, A. A. Galadima, E. C. Ashigweke, and S. Thomas, "Torque control in brushless DC motor using intelligent linear quadratic regulator controller," in *IEEE International Conference on Adaptive Science and Technology*, ICAST, 2018, vol. 2018-August, doi: 10.1109/ICASTECH.2018.8507030.
- J. Yang, H. Wu, L. Hu, and S. Li, "Robust predictive speed regulation of converter-driven DC motors via a discrete-time reduced-order GPIO," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 66, no. 10, pp. 7893–7903, Oct. 2019, doi: 10.1109/TIE.2018.2878119.
- E. Hernández-Márquez, R. Silva-Ortigoza, J. R. García-Sánchez, M. Marcelino-Aranda, and G. Saldaña-González, "A DC/DC Buck-Boost Converter-Inverter-DC Motor System: Sensorless Passivity-Based Control," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 31486–31492, Jun. 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2846614.
- R. Silva Ortigoza et al., "A Trajectory Tracking Control for a Boost Converter-Inverter-DC Motor Combination," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 16, no. 4, pp. 1008–1014, Apr. 2018, doi: 10.1109/TLA.2018.8362130.
- M. Korkosz, P. Bogusz, and J. Prokop, "Modelling and experimental research of faulttolerant dual-channel brushless DC motor," *IET Electr. Power Appl.*, vol. 12, no. 6, pp. 787–796, Jul. 2018, doi: 10.1049/iet-epa.2017.0752.
- M. Aqil and J. Hur, "A Direct Redundancy approach to Fault Tolerant Control of BLDC Motor with a damaged Hall-Effect Sensor," *IEEE Trans. Power Electron.*, pp. 1–1, May 2019, doi: 10.1109/tpel.2019.2917559.
- A. Khazaee, H. Abootorabi Zarchi, and G. Arab Markadeh, "Loss model based efficiency optimized control of brushless DC motor drive," *ISA Trans.*, vol. 86, pp. 238–248, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.isatra.2018.10.046.



- W. Lee, J. H. Kim, W. Choi, and B. Sarlioglu, "Torque ripple minimization control technique of high-speed single-phase brushless DC motor for electric turbocharger," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 67, no. 11, pp. 10357–10365, Nov. 2018, doi: 10.1109/TVT.2018.2866779.
- S. Aleksandrov, T. Overboom, and E. Lomonova, "Design optimization and performance comparison of two linear motor topologies with PM-less tracks," in 2018 IEEE International Magnetic Conference, INTERMAG 2018, 2018, doi: 10.1109/INTMAG.2018.8508565.
- B. Kwak, J. H. Um, and J. K. Seok, "Direct Active and Reactive Power Control of Three-Phase Inverter for AC Motor Drives with Small DC-Link Capacitors Fed by Single-Phase Diode Rectifier," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2019, vol. 55, no. 4, pp. 3842–3850, doi: 10.1109/TIA.2019.2915061.
- H. Frayyeh, M. Mukhlif, A. Abbood, and S. Kerean, "SPEED CONTROL OF DIRECT CURRENT MOTOR USING MECHANICAL CHARACTERISTICS 机械特性对直流电动机的速度控制," *J. SOUTHWEST JIAOTONG Univ.*, vol. 54, no. 4, pp. 1–9, 2019, doi: <https://doi.org/10.35741/issn.0258-2724.54.4.25>.
- H. Sira-Ramirez, E. W. Zurita-Bustamante, and A. Luviano-Juarez, "Robust Flat Filtering Control of a Nonlinear Manipulator-Direct Current Motor System," *J. Dyn. Syst. Meas. Control. Trans. ASME*, vol. 140, no. 2, Feb. 2018, doi: 10.1115/1.4037386.