

**EVALUACIÓN DE DOS METODOS DE CONTROL EN MOTORES BRUSHLESS
MEDIANTE SIMULACIÓN Y EXPERIMENTACIÓN**

**JHONNIER ANDRÉS JARAMILLO ZAPATA
LEONARDO MORALES CARDONA**

**INSTITUCIÓN UNIVERSIARIA PASCUAL BRAVO
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA ELÉCTRICA
MEDELLÍN
2023**

**EVALUACIÓN DE DOS METODOS DE CONTROL EN MOTORES BRUSHLESS
MEDIANTE SIMULACIÓN Y EXPERIMENTACIÓN**

**JHONNIER ANDRÉS JARAMILLO ZAPATA
LEONARDO MORALES CARDONA**

Trabajo de grado para optar al título de ingeniero electricista

Asesor

**Sergio Andrés Estrada Mesa
Magister en Gestión Energética Industrial**

**INSTITUCIÓN UNIVERSIARIA PASCUAL BRAVO
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA ELÉCTRICA
MEDELLÍN
2023**

Contenido

1.	Planteamiento del problema	2
1.1	Descripción	2
1.2	Formulación	2
2.	Justificación	3
3.	Objetivos.....	4
3.1	Objetivo general.....	4
3.2	Objetivos específicos	4
4.	Referentes teóricos	4
4.1	Motor brushless.....	4
4.2	Inversor didáctico.....	6
4.2.1.	Circuito de control	7
4.2.2.	Etapas de potencia.....	7
4.2.3.	Protecciones de seguridad.	7
4.2.4.	Visualización de parámetros.....	7
4.2.5.	Conexiones y puertos.....	7
4.3	Controlador del motor.....	8
4.3.1.	Conmutación.....	8
4.3.2.	Regulación de velocidad.....	8
4.3.3.	Control de dirección.	9
4.3.4.	Protección y monitoreo.....	9
4.4	Software de simulación.....	9
4.4.1.	MATLAB/simulink.	9
4.4.2.	ANSYS Maxwell.....	9
4.4.3.	PLECS.	9
4.4.4.	LTspice.	10
5.	Metodología.....	10
5.1	Tipo de proyecto	10

5.2	Método	11
5.2.1.	Revisión exhaustiva de la literatura:.....	11
5.2.2.	Recopilación de información:.....	11
5.2.3.	Modelado del sistema:	11
5.2.4.	Simulaciones en lazo abierto y lazo cerrado:	13
5.2.5.	Optimización de parámetros	13
5.2.7.	Simulación del sistema completo	14
6.	Resultados.....	15
	Validación de los métodos de control.....	29
	Resultados obtenidos de las pruebas realizadas a los motores con control de lazo cerrado..	29
	Resultados obtenidos de las pruebas realizadas a los motores con control de lazo abierto ..	31
7.	Conclusiones.....	32
8.	Recomendaciones	33
9.	Referencias bibliográficas	35

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Motor Brushless	5
Figura 2. Inversor didáctico.....	6
Figura 3. Circuito de un motor DC.....	17
Figura 4. Circuito de un motor brushless.	20
Figura 5. Modelo matemático de un motor DC.....	22
Figura 6 Modelo matemático de un motor DC en lazo abierto.	23
Figura 7. Gráfica del modelo matemático del motor Brushless.	24
Figura 8. Modelo matemático de un motor DC en lazo cerrado.	25
Figura 9. Modelo de un motor DC Con inversor.....	25
Figura 10. Curva de velocidad angular de un motor DC con inversor.	26
Figura 11. Ajustes y optimización en los parámetros.....	27
figura 12. Corriente en el estator y fuerza electromotriz ea	28
Figura 13. Comportamiento de la velocidad de arranque del motor brushless con control de lazo cerrado.	30
Figura 14. Comportamiento de la velocidad de arranque del motor brushless con control de lazo abierto.	31

Lista de tablas

Pág.

Tabla 1. Comparación de los dos métodos de control.16

Resumen

El método propuesto implicó la implementación de un modelo matemático detallado para describir el comportamiento de motores brushless, considerando variables como velocidad, corriente y posición del rotor. Este modelo se programa y ejecuta a través de software de simulación, además, se construye una estructura física que incluye componentes como el motor brushless, un inversor didáctico y sensores de velocidad y posición, permitiendo la simulación del funcionamiento real del motor y la recopilación de datos experimentales para su análisis y comparación con los resultados de la simulación.

El proyecto se divide en dos partes principales: la implementación de un método de control de lazo abierto en el inversor de la estructura física y la implementación de un método de control de lazo cerrado basado en el modelo matemático del motor brushless.

La simulación desempeña un papel crucial en la evaluación de estos métodos, destacando la utilidad de las herramientas de simulación en la investigación y desarrollo de sistemas de control. La caracterización detallada del motor mediante modelos matemáticos específicos es fundamental para el diseño de sistemas de control eficaces.

Se observa que el control de lazo cerrado demuestra una mayor capacidad de ajuste y estabilidad en comparación con el control de lazo abierto, donde la inercia del motor juega un papel importante en la estabilización de la velocidad, y la creación de modelos matemáticos precisos, junto con la consideración de constantes resulta esencial para comprender en profundidad el comportamiento de los motores brushless, especialmente en motores de baja potencia, donde se concluye que este enfoque integral que combina modelización matemática detallada y simulación, permite una evaluación exhaustiva de los métodos de control y contribuye al conocimiento y desarrollo de motores brushless en sistemas de baja potencia.

Abstract

The proposed method involved the implementation of a detailed mathematical model to describe the behavior of brushless motors, considering variables such as speed, current, and rotor position. This model is programmed and executed through simulation software. Additionally, a physical structure is built, including components such as the brushless motor, a didactic inverter, and speed and position sensors, allowing for the simulation of the actual motor operation and the collection of experimental data for analysis and comparison with simulation results.

The project is divided into two main parts: the implementation of an open-loop control method in the inverter of the physical structure and the implementation of a closed-loop control method based on the mathematical model of the brushless motor. Simulation plays a crucial role in evaluating these methods, highlighting the utility of simulation tools in research and development of control systems. The detailed characterization of the motor through specific mathematical models is essential for designing effective control systems.

It is observed that closed-loop control demonstrates greater adjustment capability and stability compared to open-loop control, where motor inertia plays an important role in speed stabilization. The creation of precise mathematical models, along with consideration of constants, is essential for a deep understanding of the behavior of brushless motors, especially in low-power motors. It is concluded that this comprehensive approach, combining detailed mathematical modeling and simulation, allows for a thorough evaluation of control methods and contributes to the knowledge and development of brushless motors in low-power systems.

Glosario

Campo magnético: El campo magnético en un motor es la región donde se genera una fuerza magnética que hace que las partes móviles del motor giren, convirtiendo la energía eléctrica en energía mecánica.

Corriente eléctrica: La corriente eléctrica es el flujo de cargas eléctricas (generalmente electrones) a través de un conductor que transporta energía eléctrica.

Controlador: Un controlador es un dispositivo o software que regula o administra otros dispositivos o sistemas, generalmente para automatizar tareas o funciones específicas.

Eficiencia energética: La eficiencia energética se refiere a la capacidad de utilizar la menor cantidad de energía para obtener un resultado deseado, reduciendo el desperdicio y los costos asociados.

Energía cinética: La energía cinética es la energía asociada al movimiento de un objeto.

Estató: El estató es la parte fija de un motor eléctrico o generador que contiene el campo magnético estacionario.

Fuerza motriz: La fuerza motriz se refiere a la energía o fuerza que impulsa un objeto o proceso para que se mueva o funcione.

Frecuencia eléctrica: La frecuencia eléctrica es la cantidad de oscilaciones o ciclos que una corriente alterna completa por segundo, medida en hercios (Hz).

Fricción: La fricción es una fuerza de resistencia que se opone al movimiento relativo entre dos objetos en contacto, causada por la interacción entre sus superficies.

Histéresis: La histéresis es la propiedad de algunos materiales que muestra una resistencia al cambio, lo que significa que su respuesta a una fuerza o estímulo no sigue la misma ruta al aplicar o retirar la fuerza, lo que genera un retardo o retraso en la respuesta. Se utiliza comúnmente en el contexto de la física de materiales y dispositivos electromagnéticos.

Inductancia: La inductancia es una propiedad eléctrica que mide la capacidad de una bobina o un componente eléctrico para oponerse a cambios en la corriente eléctrica que fluye a través de ella.

Inversor didáctico: Un inversor didáctico es un dispositivo utilizado con fines educativos o de entrenamiento que permite a las personas aprender y practicar el funcionamiento de inversores de corriente continua (DC) a corriente alterna (AC) de una manera segura y controlada. Estos dispositivos son comunes en la enseñanza de electrónica y electricidad.

Lazo abierto: Un lazo abierto es un sistema de control en el cual la salida no se retroalimenta para ajustar la entrada, lo que significa que no hay corrección automática. La entrada se configura de manera predeterminada y no se modifica en función de la salida, lo que lo hace menos preciso y menos adaptable a las variaciones en las condiciones del proceso.

Lazo cerrado: Un lazo cerrado es un sistema de control en el cual la salida se retroalimenta para ajustar la entrada, lo que significa que se utiliza la información de la salida para controlar y mantener el proceso o sistema en un estado deseado. Esto permite una mayor precisión y capacidad de adaptación a las variaciones en las condiciones del proceso.

Motor brushless: Un motor brushless es un tipo de motor eléctrico que no utiliza escobillas para la conmutación, en lugar de ello emplea un control electrónico para invertir la dirección de la corriente y cambiar la polaridad magnética en el rotor. Estos motores son conocidos por su eficiencia y durabilidad, y se utilizan en una variedad de aplicaciones, como en vehículos eléctricos y herramientas eléctricas.

Potencia eléctrica: La potencia eléctrica es la tasa de transferencia de energía eléctrica en un circuito, medida en vatios (W). Representa la cantidad de trabajo que se realiza por unidad de tiempo y se calcula multiplicando la corriente eléctrica por la tensión eléctrica en el circuito.

Resistencia eléctrica: La resistencia eléctrica es la propiedad de un material o componente eléctrico que se opone al flujo de corriente eléctrica a través de él, medida en ohmios (Ω). Cuanto mayor sea la resistencia, menor será la corriente que pasa a través de un circuito.

Rotor: El rotor es la parte móvil de un motor eléctrico o generador que gira dentro del estator y es responsable de convertir la energía eléctrica en energía mecánica o viceversa.

Sensor Hall: Un sensor Hall es un dispositivo que detecta la presencia y la intensidad de un campo magnético y produce una señal eléctrica proporcional a este campo magnético. Se utiliza en una variedad de aplicaciones como la detección de posición, velocidad y rotación en motores eléctricos y sistemas de control.

Software: El software es un conjunto de programas, instrucciones y datos que se ejecutan en una computadora u otro dispositivo electrónico para realizar tareas específicas, como procesamiento de información, gestión de hardware o interacción con el usuario.

Sobre corriente: La sobre corriente es una condición en la que la corriente eléctrica en un circuito supera el valor máximo permitido, lo que puede provocar daños en el equipo o representar un riesgo para la seguridad. Se protege generalmente con dispositivos como fusibles o interruptores de circuito.

Sobretensión: La sobretensión es una condición en la que el voltaje eléctrico en un circuito supera el nivel máximo permitido, lo que puede dañar el equipo eléctrico o electrónico conectado. Se protege comúnmente utilizando dispositivos como supresores de sobretensión.

Torque: El torque es una fuerza rotacional que tiende a hacer girar un objeto alrededor de un eje. Se mide en newton-metros (Nm) y es una medida de la capacidad de un objeto para rotar o cambiar su velocidad de rotación cuando se aplica una fuerza.

Voltaje: El voltaje es la diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos en un circuito eléctrico y se mide en voltios (V). Representa la fuerza o presión que impulsa la corriente eléctrica a través de un conductor y determina la cantidad de energía por unidad de carga.

Introducción

En el campo de la ingeniería eléctrica, la selección del método de control adecuado para motores brushless es de vital importancia para garantizar un rendimiento óptimo y una eficiencia energética maximizada. Dos enfoques comunes de control son el control de lazo abierto y el control de lazo cerrado, sin embargo, determinar cuál de estos métodos es más efectivo en términos de desempeño, estabilidad y eficiencia energética para motores brushless de potencia menor a 1 kW sigue siendo un desafío.

En este estudio, se llevó a cabo una evaluación comparativa de los dos métodos de control: el control de lazo abierto y el control de lazo cerrado, empleando un inversor didáctico y la simulación del modelo matemático del motor brushless.

El inversor didáctico es una herramienta práctica que permite implementar y probar diferentes estrategias de control en tiempo real, por otro lado, la simulación del modelo matemático ofrece la posibilidad de estudiar y comparar virtualmente el desempeño de los motores brushless.

El objetivo principal de esta investigación es proporcionar una base sólida para la selección del método de control más efectivo en términos de desempeño, estabilidad y eficiencia energética para motores brushless de baja potencia. Los resultados obtenidos serán de gran relevancia para los diseñadores y los ingenieros involucrados en la selección y optimización de motores brushless en diversas aplicaciones.

En las secciones siguientes, se describirá en detalle el marco experimental utilizado, incluyendo el inversor didáctico y el modelo matemático utilizado para la simulación, y además, se presentarán y analizarán los resultados obtenidos seguidos de una discusión sobre las implicaciones y conclusiones de este estudio comparativo.

1. Planteamiento del problema

1.1 Descripción

La falta de un mecanismo para comparar los dos métodos de control en términos de desempeño, estabilidad y eficiencia energética para motores brushless de potencia menor a 1 kW plantea un desafío significativo en el campo de la ingeniería eléctrica. Esta problemática se centra en la necesidad de contar con una herramienta o proceso que permita evaluar y determinar cuál de los dos métodos de control disponibles es más efectivo en términos de rendimiento, estabilidad y eficiencia energética para motores brushless de baja potencia.

Los motores brushless son ampliamente utilizados debido a sus ventajas en cuanto a eficiencia y durabilidad en comparación con los motores de corriente continua con escobillas, sin embargo, la elección del método de control adecuado es fundamental para aprovechar al máximo estas ventajas y garantizar un funcionamiento óptimo del motor.

Existen diferentes métodos de control que se pueden aplicar a los motores brushless, como el control de velocidad y el control de torque, cada uno de estos métodos tiene sus propias características y consideraciones particulares, y su selección puede influir en el rendimiento general del motor.

1.2 Formulación

¿Cuáles son las principales limitaciones y desafíos asociados con cada método de control en términos de desempeño, estabilidad y eficiencia energética en motores brushless menores a 1 kW?

2. Justificación

Evaluar el rendimiento del motor en función del método de control utilizado.

Determinar cuál método de control es más adecuado para motores brushless de potencia menor a 1 kW en términos de rendimiento y eficiencia energética.

Proporcionar recomendaciones para la selección del método de control más adecuado para motores brushless de potencia menor a 1 kW en diferentes aplicaciones.

Este proyecto es importante, ya que con él, se pretende evaluar la eficiencia energética y rendimiento de los motores brushless mediante los dos métodos de control (lazo abierto y lazo cerrado), creando una unidad didáctica donde los estudiantes y profesores puedan realizar diferentes pruebas en los laboratorios de máquinas

El proyecto contribuye al avance del conocimiento técnico en el campo de la ingeniería eléctrica, específicamente en el área de control de motores brushless, proporcionando información valiosa sobre los métodos de control y su aplicabilidad en motores de baja potencia, además, puede servir como base para futuras investigaciones y desarrollo académico en el tema.

El proyecto beneficia a la comunidad estudiantil, profesores y visitantes del área de conocimiento de la ingeniería eléctrica, electromecánica, mecánica, desarrollo de software entre otros, ya que los motores brushless se utilizan en una amplia gama de aplicaciones que impactan a la sociedad en general, desde electrodomésticos hasta vehículos eléctricos.

Al mejorar su eficiencia y rendimiento, se contribuye a la reducción del consumo de energía y las emisiones de gases contaminantes, promoviendo un desarrollo más sostenible y respetuoso con el medio ambiente.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Evaluar dos métodos de control de lazo abierto y lazo cerrado para motores brushless de potencia menor a 1 KW utilizando un inversor didáctico y la simulación de modelo matemático.

3.2 Objetivos específicos

Caracterizar la operación del motor mediante un modelo matemático que sea útil para realizar el diseño del sistema de control de lazo abierto y lazo cerrado.

Implementar un método de control de lazo abierto y lazo cerrado para establecer los parámetros, variables y funcionamiento del motor brushless.

Validar el estudio mediante comparación de los resultados de la implementación del método de control.

4. Referentes teóricos

4.1 Motor brushless

Los motores brushless están compuestos por una parte móvil que es el rotor, que es donde se encuentran los imanes permanentes y una parte fija, denominada estator o carcasa, sobre la cual van dispuestos los bobinados de hilo conductor. La imagen refleja una sección de uno de estos motores en donde puede verse la disposición de los bobinados y los imanes permanentes (Bueno, 2013).

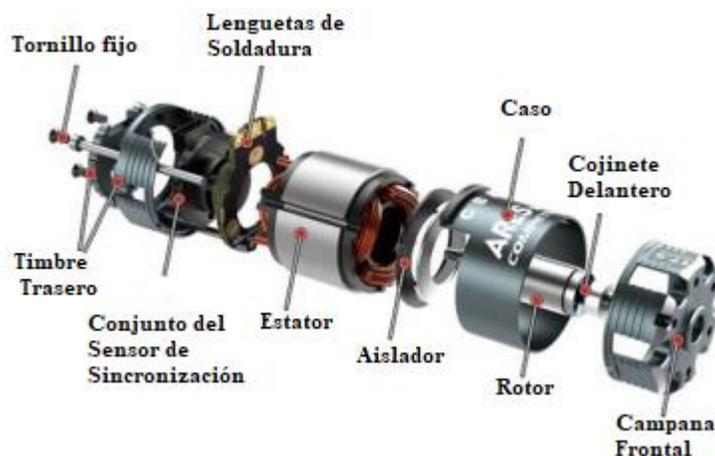


Figura 1. Motor Brushless

Fuente (Suñén, 2016).

El motor sin escobillas BLDC representa el resultado más reciente de la evolución en los motores eléctricos. Desde los descubrimientos pioneros de Oersted en 1807 hasta los avances en la conmutación de estado sólido en la década de 1960, la tecnología ha progresado enormemente. Los principios electromagnéticos establecidos por Faraday y Arago allanaron el camino para las primeras máquinas eléctricas prácticas, como los dínamos de Gramme en la década de 1870 (Jimbo, 2015).

Siemens y Leonard contribuyeron significativamente al desarrollo de motores de corriente continua, este último introduciendo el control de tensión con reóstatos a fines del siglo XIX. Sin embargo, fue en la década de 1960 cuando el uso de controladores de estado sólido revolucionó la industria al eliminar la necesidad de un conmutador físico (Jimbo, 2015).

La aparición de motores sin escobillas marcó un hito en la historia de la tecnología eléctrica, permitiendo una mayor eficiencia y durabilidad. Los trabajos de Wilson y Trickey en 1962 allanaron el camino para esta innovación que encontró aplicaciones en una variedad de campos, desde la informática hasta la automoción (Jimbo, 2015).

Hoy en día, estos motores continúan siendo esenciales en numerosas aplicaciones gracias a su fiabilidad y bajo mantenimiento. Además, con el desarrollo de nuevos materiales en la década de 1980, la introducción de imanes permanentes mejoró aún más su rendimiento, rivalizando con los motores de corriente continua con escobillas en eficiencia energética. (Jimbo, 2015).

4.2 Inversor didáctico

Un inversor didáctico es un dispositivo diseñado específicamente para la enseñanza y el aprendizaje de los conceptos relacionados con la conversión de corriente continua (DC) en corriente alterna (AC). También se le conoce como inversor educativo o inversor de laboratorio.

Para el óptimo aprendizaje de las técnicas modernas de control de motores brushless en los programas de Ingeniería Eléctrica, es crucial contar con herramientas didácticas efectivas y prácticas que permitan a los estudiantes comprender los fenómenos que ocurren en estos motores en situaciones reales. Con esta finalidad, se ha diseñado e implementado un controlador didáctico basado en un inversor de potencia para motores brushless, que facilita de manera sencilla la programación de diversas estrategias de modulación. Este controlador didáctico se fundamenta principalmente en un inversor de potencia tipo puente trifásico y la utilización de lenguajes de programación para la etapa de control (Díaz, Cote, & Pardo, 2013).

Estos dispositivos suelen contar con una serie de características que los hacen adecuados para el aprendizaje, como:

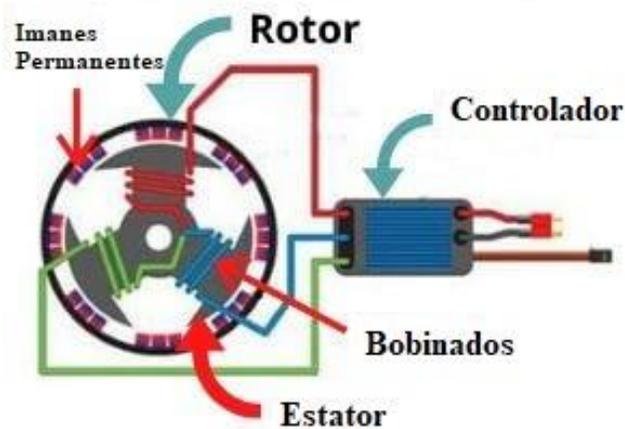


Figura 2. Inversor didáctico.
Fuente (Eltra-Trade, 2020).

4.2.1. Circuito de control. El inversor debe tener un circuito de control integrado que permita ajustar la velocidad y dirección del motor. Puede tener una interfaz de usuario, como un panel de control o una conexión a un ordenador, que permita al estudiante configurar los parámetros del motor (Becerra, 2011); (Mubeen, 2012).

4.2.2. Etapa de potencia. Esta etapa es responsable de suministrar la corriente adecuada a las bobinas del estator del motor brushless. El inversor debe poder generar la secuencia de conmutación correcta para las bobinas y proporcionar la cantidad de corriente requerida para producir el movimiento deseado (Becerra, 2011); (Mubeen, 2012).

4.2.3. Protecciones de seguridad. Es importante que el inversor didáctico cuente con protecciones de seguridad para evitar daños al motor y a los componentes del inversor. Estas protecciones pueden incluir protección contra sobre corriente, sobretensión y temperatura excesiva (Becerra, 2011); (Mubeen, 2012).

4.2.4. Visualización de parámetros. Algunos inversores didácticos también pueden incluir una pantalla o indicadores que muestren información relevante sobre el motor, como la velocidad, corriente y voltaje (Becerra, 2011); (Mubeen, 2012).

4.2.5. Conexiones y puertos. El inversor debe tener los puertos y conexiones necesarios para conectar el motor brushless, la fuente de alimentación y otros dispositivos auxiliares como sensores o interfaces de comunicación (Mubeen, 2012); (Becerra, 2011).

A principios de la década de 1970, se logró un avance significativo en el desarrollo de los motores brushless. Estos motores utilizaban imanes permanentes y bobinas en el estator para generar movimiento eliminando así las escobillas y los conmutadores de los motores tradicionales de corriente continua (DC) (Jimbo, 2015).

Durante la década de 1980, hubo importantes avances en la tecnología de controladores de motor brushless. Se desarrollaron técnicas de control más sofisticadas, como el control vectorial o el control por realimentación de corriente que permitían un mejor rendimiento y control de los motores brushless (Jimbo, 2015).

En la década de 1990, los motores brushless y sus controladores comenzaron a utilizarse ampliamente en aplicaciones industriales y comerciales. Estos motores demostraron ser más eficientes, confiables y duraderos en comparación con los motores tradicionales, lo que los hizo ideales para aplicaciones que requerían alta precisión y rendimiento (Jimbo, 2015).

A medida que los motores brushless se volvieron más comunes en la industria, también aumentó la demanda de inversores didácticos para el estudio y la comprensión de estos motores. Los inversores didácticos se convirtieron en herramientas importantes en entornos educativos y de formación técnica para aprender sobre los principios de funcionamiento y control de los motores brushless (Jimbo, 2015).

4.3 Controlador del motor

Es un dispositivo o sistema que se encarga de controlar el funcionamiento de un motor brushless. Este tipo de controlador es específico para motores brushless y se utiliza para regular la velocidad, dirección, torque y otras características operativas del motor.

El motor brushless es un tipo de motor eléctrico que utiliza imanes permanentes en el rotor y bobinas en el estator para generar movimiento. El controlador de motor brushless se encarga de suministrar la secuencia de energía adecuada a las bobinas del estator para controlar la velocidad y dirección del motor (Mubeen, 2012); (Becerra, 2011).

El controlador de motor brushless realiza varias funciones para asegurar un funcionamiento eficiente y controlado del motor, como:

4.3.1. Conmutación. El controlador determina la secuencia de conmutación de las bobinas del estator para generar un campo magnético rotatorio que impulsa el rotor. Esto se logra mediante el control de los transistores o interruptores de potencia que suministran energía a las bobinas (Mubeen, 2012); (Becerra, 2011).

4.3.2. Regulación de velocidad. El controlador ajusta la frecuencia y el voltaje de la energía suministrada al motor para controlar su velocidad. Puede utilizar técnicas de control como la modulación por ancho de pulso (PWM) para regular la cantidad de energía aplicada al motor (Mubeen, 2012); (Becerra, 2011).

4.3.3. Control de dirección. El controlador también permite cambiar la dirección de giro del motor brushless invirtiendo la secuencia de conmutación de las bobinas (Mubeen, 2012); (Becerra, 2011).

4.3.4. Protección y monitoreo. El controlador puede incluir circuitos de protección para evitar sobrecorriente, sobretensión, sobrecalentamiento u otras condiciones anormales que puedan dañar el motor. También puede proporcionar funciones de monitoreo y retroalimentación, como la medición de la velocidad o la detección de fallas (Mubeen, 2012); (Becerra, 2011).

4.4 Software de simulación

Existen varios softwares de simulación que se pueden utilizar para simular el comportamiento de un motor brushless (motor sin escobillas) y su control. Estos softwares permiten modelar y analizar el rendimiento del motor, así como evaluar diferentes estrategias de control. Algunos del software de simulación populares para motores brushless son:

4.4.1. MATLAB/simulink. MATLAB es un entorno de programación y Simulink es una herramienta de simulación basada en bloques gráficos. Ambos ofrecen un conjunto de herramientas y librerías para simular y modelar sistemas eléctricos incluyendo motores brushless. Puedes utilizar Simulink para crear modelos del motor brushless y desarrollar algoritmos de control.

4.4.2. ANSYS Maxwell. Es un software de simulación electromagnética que permite analizar y optimizar el comportamiento electromagnético de motores brushless. Proporciona herramientas para modelar la geometría del motor, calcular campos magnéticos, estimar pérdidas, analizar el rendimiento y simular diferentes condiciones de operación.

4.4.3. PLECS. es una herramienta de simulación de sistemas de potencia en tiempo real que incluye módulos específicos para modelar y simular motores brushless. PLECS permite simular y

evaluar diferentes estrategias de control, así como analizar el comportamiento transitorio y estable del motor.

4.4.4. LTspice. Es un software de simulación de circuitos electrónicos ampliamente utilizado. Aunque no está específicamente diseñado para motores brushless, se puede utilizar para simular y analizar circuitos de control asociados con motores brushless, como los inversores y los sistemas de control.

5. Metodología

5.1 Tipo de proyecto

El proyecto descrito se clasifica principalmente como una investigación experimental, dado que implica una revisión exhaustiva de la literatura existente sobre los métodos de control de lazo abierto y cerrado aplicados a motores brushless. Esta revisión requiere recopilar información y conocimientos previos, analizar investigaciones anteriores y comprender los fundamentos teóricos y conceptuales subyacentes a estos métodos de control. Antes de llevar a cabo los experimentos, es crucial formular hipótesis o suposiciones basadas en la revisión bibliográfica. Estas hipótesis pueden abordar aspectos como el rendimiento, la eficiencia y la estabilidad de los motores brushless bajo diferentes métodos de control.

En el proyecto se realizaron experimentos para comparar los métodos de control de lazo abierto y cerrado utilizando un inversor didáctico y la simulación del modelo matemático. Se diseñaron y llevaron a cabo pruebas controladas para recopilar datos y evaluar el rendimiento de los motores brushless bajo cada método. Durante los experimentos, se registraron datos relevantes como la eficiencia energética, la precisión en el seguimiento de consignas de velocidad y la estabilidad del motor brushless. Estos datos fueron analizados y evaluados estadísticamente para obtener conclusiones significativas.

Basándonos en los resultados obtenidos, se lograron extraer conclusiones detalladas sobre las ventajas y desventajas de los métodos de control de lazo abierto y cerrado aplicados a motores

brushless de baja potencia. Estas conclusiones representan una valiosa contribución al cuerpo de conocimiento existente en el ámbito de los sistemas de control de motores brushless y ofrecen una sólida base para futuras investigaciones en este campo.

5.2 Método

5.2.1. Revisión exhaustiva de la literatura:

Se llevó a cabo una revisión exhaustiva de la literatura técnica y científica existente sobre los métodos de control en motores brushless, centrándonos específicamente en el método de control en lazo abierto y el método de control en lazo cerrado. Esta revisión nos proporcionó información detallada sobre los principios de funcionamiento, ventajas, limitaciones y aplicaciones relevantes de cada método, estableciendo así una base sólida para nuestra comparación.

La revisión de la literatura ayuda a comprender el estado actual del conocimiento en el campo, identificar brechas en la investigación y establecer una base sólida para el estudio comparativo.

5.2.2. Recopilación de información:

Después de la revisión de la literatura, se recopila y organiza la información relevante sobre los métodos de control en estudio. Esto incluye definiciones claras de los términos, descripciones de los principios de funcionamiento y ejemplos de aplicaciones prácticas.

La información recopilada proporciona la base teórica necesaria para comprender los dos métodos de control y sus características distintivas.

5.2.3. Modelado del sistema:

El primer paso en nuestro estudio implica la creación de un modelo eléctrico simplificado para la armadura de un motor de corriente continua (DC). Este modelo considera tres componentes principales en serie: una resistencia constante (R), una inductancia constante (L) que representa la inductancia de la bobina de la armadura, y una fuente de alimentación (v) que simboliza la

tensión generada en la armadura del motor. La ecuación resultante de este modelo se deriva mediante el análisis de la malla del circuito, lo que nos permite comprender cómo la tensión aplicada, la resistencia y la inductancia afectan la corriente que circula a través de la armadura del motor DC en función del tiempo.

El siguiente paso implica el desarrollo del modelo mecánico del motor de corriente continua. Este modelo aborda la generación de la Fuerza contra Electromotriz ($E_a(t)$) y las pérdidas asociadas con el funcionamiento del motor. Además, introducimos ecuaciones que describen el torque del motor ($T_m(t)$), el coeficiente de fricción (B), el momento de inercia total (J), la velocidad angular ($\omega(t)$), y la aceleración angular ($d\omega(t)/dt$). Utilizamos la constante K_a para relacionar la tensión inducida en la armadura con la velocidad angular del eje del motor, estableciendo así una conexión esencial entre las señales eléctricas y mecánicas del sistema.

Continuamos nuestro análisis explorando la relación electromecánica del motor de corriente continua (DC). Esta relación describe cómo el torque mecánico ($T_m(t)$), es decir, la fuerza de giro producida por el motor, está directamente relacionado con la corriente eléctrica ($i(t)$) que fluye a través de él. Presentamos la ecuación que expresa esta relación ($T_m(t) = K_m i(t)$), donde K_m representa la constante de torque que define cuánto torque se produce en respuesta a la corriente eléctrica aplicada.

Avanzamos hacia el estudio del motor brushless (BLDC) y las diferencias significativas con el motor de corriente continua convencional. En este modelo incorporamos fases adicionales que impactan en la resistencia y la inductancia, lo que afecta las características eléctricas y mecánicas del sistema. Presentamos la constante de tiempo mecánica (τ_m) y su relación con la inercia del rotor, la resistencia de los devanados, la constante de retroceso electromotriz (K_e) y la constante de par motor (K_t), destacando cómo estas variables influyen en el comportamiento del motor BLDC.

Finalmente, desarrollamos una función de transferencia que describe todos los parámetros, tanto eléctricos como mecánicos, del motor brushless DC (BLDC). Esta función incorpora la constante K_e , las constantes de tiempo mecánica y eléctrica (τ_m y τ_e), y la variable compleja 's', proporcionando una representación matemática completa del comportamiento del motor BLDC en un sistema físico.

5.2.4. Simulaciones en lazo abierto y lazo cerrado:

Para llevar a cabo nuestro estudio sobre los métodos de control en motores brushless, nos apoyamos en el uso del software MATLAB/SIMULINK online versión R2023b académico para implementar los modelos matemáticos en simulaciones prácticas. Este software nos permite implementar los modelos matemáticos desarrollados previamente y realizar simulaciones detalladas para cada método de control que deseamos evaluar.

Utilizando este software de simulación, implementamos los modelos matemáticos que hemos desarrollado para representar el comportamiento de los motores brushless bajo diferentes condiciones de operación. Estos modelos incluyen ecuaciones diferenciales y parámetros relevantes que describen la dinámica del sistema.

Antes de ejecutar las simulaciones, configuramos cuidadosamente los parámetros de entrada y las condiciones de funcionamiento que son relevantes para nuestro estudio. Esto incluye variables como voltaje de alimentación, carga mecánica, temperatura ambiente y otros factores que pueden afectar el rendimiento del motor brushless.

Una vez configurados los modelos y las condiciones, procedemos a ejecutar las simulaciones para cada método de control que estamos comparando. Durante estas simulaciones, el software calcula y registra datos numéricos que representan el desempeño del motor brushless en términos de velocidad, torque, corriente y otras variables relevantes.

Después de completar las simulaciones, realizamos un análisis detallado de los resultados obtenidos. Evaluamos el desempeño del motor brushless bajo cada método de control en términos de su eficiencia energética, estabilidad operativa y capacidad para generar torque de manera efectiva.

Para respaldar nuestros hallazgos y análisis, presentamos el modelo matemático del motor brushless en Simulink. Este modelo incluye bloques esenciales como constantes, sumadores, multiplicadores e integradores que representan la ecuación diferencial del sistema. Además, mostramos gráficas que ilustran el comportamiento del motor en lazo abierto y lazo cerrado según nuestro modelo matemático.

5.2.5. Optimización de parámetros

Utilizando el software SIMULINK que nos ayuda en la simulación de motores brushless, implementamos y evaluamos varios métodos de control. Configuramos los parámetros de entrada y las condiciones de funcionamiento relevantes para cada método y ejecutamos simulaciones comparativas para analizar su desempeño en términos de estabilidad, respuesta dinámica y eficiencia energética.

Basándonos en los resultados de las simulaciones, realizamos un análisis detallado de cada método de control. Identificamos áreas de mejora y realizamos ajustes en los parámetros, como valores de ganancia, estrategias de control u otros factores claves.

El proceso de optimización de parámetros es iterativo. A través de pruebas sucesivas y ajustes finos, buscamos encontrar la configuración óptima para cada método de control. El objetivo es maximizar el rendimiento y la eficiencia del sistema, teniendo en cuenta los criterios de evaluación previamente definidos.

Una vez completada la optimización, evaluamos la configuración óptima obtenida para cada método de control. Realizamos comparaciones adicionales para confirmar su eficacia y tomar decisiones fundamentadas sobre la implementación práctica de estos métodos en aplicaciones reales.

A partir de nuestro análisis y optimización de parámetros, extraemos conclusiones sobre la eficacia y aplicabilidad de cada método de control en motores brushless. También proporcionamos recomendaciones prácticas para la implementación de estrategias de control optimizadas considerando las ventajas y limitaciones de cada enfoque.

Este enfoque metodológico nos permite no solo evaluar y comparar métodos de control, sino también optimizar su rendimiento y eficiencia para aplicaciones específicas en motores brushless contribuyendo así al desarrollo y avance en el campo de la ingeniería electromecánica.

5.2.7. Simulación del sistema completo

El estudio se centra en un motor trifásico de 1 kW, 500 V CC y 3000 rpm, alimentado por un inversor de voltaje de seis pasos. El inversor, un puente MOSFET de la biblioteca Specialized Power Systems, se controla mediante un regulador de velocidad que ajusta el voltaje del bus de CC. Las señales de las puertas del inversor se generan decodificando las señales de efecto Hall del motor. La salida trifásica del inversor se aplica a los devanados del estator del bloque PMSM.

Se simula un par de carga que inicia en 0 y aumenta gradualmente hasta su valor nominal de 3 Nm en $t = 0,1$ s.

Se implementan dos bucles de control en el sistema. El bucle interior sincroniza las señales de las puertas del inversor con las fuerzas electromotrices generadas por el motor. El bucle exterior, conocido como control retroalimentado o Feedback, es esencial para cerrar el lazo de control y guiar al controlador principal (que puede ser un Control Proporcional (Control P), Controlador PI, Control PID, entre otros) en función del comportamiento actual de la variable controlada. Esta estructura de control se basa en comparar la información de la variable controlada con la referencia deseada, aplicando las medidas necesarias para cumplir con las estrategias de producción y control del sistema.

Utilizamos un software especializado en simulación de sistemas electromecánicos para implementar el modelo del motor trifásico con inversor de voltaje y los bucles de control. Configuramos los parámetros relevantes y ejecutamos las simulaciones para evaluar el desempeño del sistema en términos de estabilidad, respuesta dinámica y eficiencia energética.

Realizamos un análisis detallado de los resultados obtenidos de las simulaciones, centrándonos en el comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones de carga y estrategias de control. Evaluamos la efectividad del control retroalimentado y su impacto en el rendimiento del motor trifásico con inversor de voltaje.

6. Resultados

Después de una revisión exhaustiva de la literatura técnica y científica existente sobre los dos métodos de control que deseamos comparar, reunimos información sobre los principios de funcionamiento, ventajas, limitaciones y aplicaciones relevantes. Esta investigación nos ayudó a comprender mejor los métodos y a establecer una base sólida para la comparación.

Método de control lazo abierto	Método de control lazo cerrado
Parámetros	
Un sistema en lazo abierto es aquél que la señal de salida del proceso no es comparada con la señal de referencia. (Castaño, 2013)	Un sistema en lazo cerrado toma la salida del proceso y la compara con la señal de referencia para conocer en todo momento la evolución de la variable. (Castaño, 2013)

Los sistemas de control de lazo abierto no utilizan una señal de retroalimentación y, por lo tanto, no son tan precisos ni estables. (Castaño, 2013)	Los sistemas de control de lazo cerrado utilizan una señal de retroalimentación para comparar el resultado deseado, esto permite una mayor precisión y estabilidad. (Castaño, 2013)
En un sistema de lazo abierto el controlador es colocado en serie con el proceso, con el objetivo de poder manipularlo y sobre todo, intentar llevarlo a la zona de operación deseada, pero sin medir el estado actual de las variables del proceso. (Castaño, 2013)	En un sistema en lazo cerrado se puede colocar un medidor y transmisor que realimenta el sistema hacia el controlador y mantiene de esa forma la información de cada una de las variables en su lugar deseado. (potencia, corriente, voltaje, velocidad). (Castaño, 2013)
Bajo torque	Mayor torque
Potencia	Potencia
Corriente	Corriente
Torque de salida	Torque de salida
Velocidad final	Velocidad final

Tabla 1. Comparación de los dos métodos de control.

Fuente (Castaño, 2013).

El modelo eléctrico de la armadura de un motor de corriente continua (DC) se simplifica al considerar tres componentes principales en serie: una resistencia constante (R), una inductancia constante (L) que representa la inductancia de la bobina de la armadura y una fuente de alimentación (v) que representa la tensión generada en la armadura del motor (Castaño G. S., 2013).

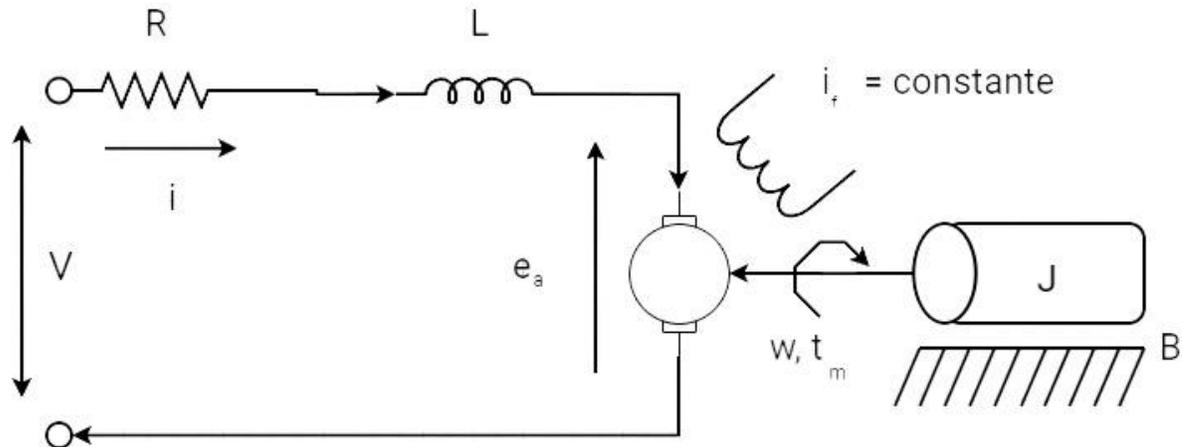


Figura 3. Circuito de un motor DC.
Fuente. Diseño propio

La primera ecuación en este modelo se deriva mediante el análisis de la malla del circuito, lo que significa que examinamos cómo se comportan estas tres partes en serie cuando la corriente fluye a través de ellas en un circuito cerrado. Esta ecuación nos permite comprender y describir cómo la tensión aplicada, la resistencia y la inductancia afectan la corriente que circula a través de la armadura del motor DC en función del tiempo (Castaño G. S., 2013).

Donde:

$$v(t) = R_i(t) + L \frac{di(t)}{dt} + E_a(t)$$

$$L \frac{di(t)}{dt} = v(t) - R_i(t) - E_a(t) \quad (1)$$

En un motor de corriente continua (CC), se genera una tensión llamada Fuerza contra electromotriz ($E_a(t)$) cuando los conductores de la armadura se mueven a través del campo magnético establecido por la corriente del campo (i_f).

Esta tensión se crea como resultado de la interacción entre los conductores en movimiento y el campo magnético (Castaño G. S., 2013).

Cuando el motor gira y realiza trabajo mecánico, parte de la energía generada se disipa debido a la resistencia eléctrica en la bobina del rotor, la fricción interna, las pérdidas por histéresis

(efecto magnético retardado) y las pérdidas por corrientes de Foucault (corrientes inducidas en el hierro del rotor). Sin embargo, una parte de la energía generada se almacena en forma de energía cinética en la masa giratoria del rotor, lo que permite que el motor realice trabajo útil.

El modelo mecánico de esta sección se refiere a cómo estas pérdidas y la energía cinética se relacionan con la potencia mecánica producida por el motor y cómo se entrega a la carga mecánica conectada al eje del motor de CC. En resumen, el modelo describe cómo se transforma la energía eléctrica en energía mecánica y cómo se gestionan las pérdidas y el almacenamiento de energía cinética en el proceso (Castaño G. S., 2013).

$$T_m(t) = J \frac{d\omega(t)}{dt} + B\omega(t)$$

$$J \frac{d\omega(t)}{dt} = T_m(t) - B\omega(t) \quad (2)$$

$T_m(t)$ (Torque del Motor): Esto representa la fuerza de giro o torsión que produce el motor en un momento dado.

B (Coeficiente de Fricción): Es un valor que cuantifica la resistencia a la rotación causada por la fricción en el motor y la carga montada en su eje J (Momento de Inercia Total): Este valor representa la cantidad de resistencia que un objeto tiene al cambiar su velocidad angular (en este caso, el rotor del motor y la carga conectada) (Castaño G. S., 2013).

$\omega(t)$ (Velocidad Angular del Motor): La velocidad angular es la velocidad a la que el motor y la carga giran en radianes por segundo.

$d\omega(t)/dt$ (Aceleración Angular): Es la tasa de cambio de la velocidad angular, lo que indica cómo cambia la velocidad angular con respecto al tiempo.

Para relacionar estas variables, se propone una constante llamada K_a (Constante contraelectromotriz) que establece una relación proporcional entre la tensión inducida en la armadura del motor y la velocidad angular del eje del motor. En otras palabras, K_a representa cuánta tensión se genera en la armadura del motor en respuesta a la velocidad angular del motor.

Las ecuaciones anteriores permiten describir cómo el motor de corriente continua genera torque (fuerza de giro), cómo se ve afectado por la fricción y el momento de inercia de la carga, cómo cambia su velocidad angular en función del tiempo. La relación K_a proporciona una

conexión importante entre la tensión aplicada al motor y su velocidad angular, lo que es esencial para comprender cómo el motor responde a las señales eléctricas y mecánicas. En resumen, estas relaciones son fundamentales para modelar el comportamiento del motor de corriente continua en un sistema físico (Castaño G. S., 2013).

$$E_a(t) = K_a \omega(t) \quad (3)$$

La relación electromecánica propuesta establece que el torque mecánico (es decir, la fuerza de giro) producido por el motor de corriente continua (DC) es directamente proporcional a la corriente eléctrica que fluye a través del motor. En otras palabras, a medida que aumenta la corriente eléctrica que circula por el motor, el torque mecánico que genera también aumenta y esta relación está determinada por una constante llamada K_m , que se denomina la "Constante de Torque" y se mide en newton-metros por amperio (Nm/A). Esta constante K_m es una característica clave del motor y define cuánto torque se produce en respuesta a la corriente eléctrica que se aplica al motor (Castaño G. S., 2013).

$$T_m(t) = K_m i(t) \quad (4)$$

Al diseñar un sistema de control para un motor Brushless, es importante considerar que el modelo matemático de este tipo de motor no es muy diferente al del motor DC convencional. La principal diferencia radica en que en el motor Brushless se incorporan fases adicionales, las cuales tienen un impacto significativo en la resistencia y la inductancia del modelo (Delgado & Bolaños, 2013). Ver figura 4.

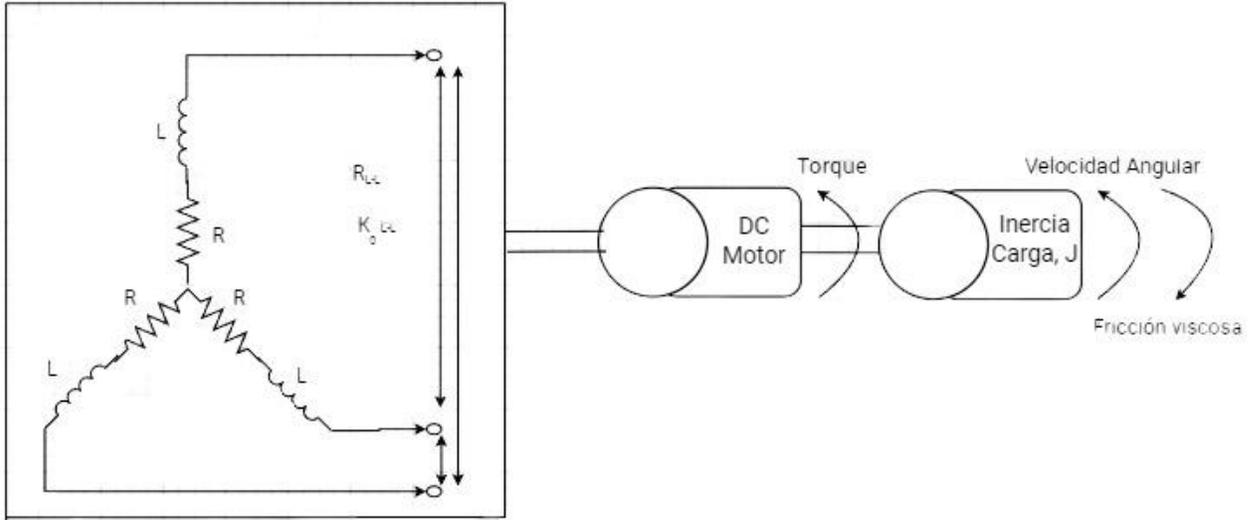


Figura 4. Circuito de un motor brushless.
Fuente. Diseño propio

Las discrepancias tienen un impacto principal en las características eléctricas y mecánicas del sistema, las cuales son de gran relevancia para la representación matemática del motor. En cuanto a la constante de tiempo mecánica del sistema, debemos considerar lo siguiente:

$$\tau_m = \sum \frac{RJ}{K_e K_t} = \frac{J \sum R}{K_e K_t} \quad (5)$$

Donde "J" representa la inercia del rotor, "R" corresponde a la resistencia de los devanados, "K_e" es la constante de retroceso electromotriz y "K_t" es la constante de par motor. (Delgado & Bolaños, 2013)

En lo que respecta a la constante eléctrica,

$$\tau_e = \sum \frac{L}{R} = \frac{L}{\sum R} \quad (6)$$

Donde "L" se refiere a la inductancia de las fases y "R" a su resistencia correspondiente.

Sin embargo, al contar con una configuración trifásica simétrica, las constantes mecánicas y eléctricas se establecen de la siguiente manera:

$$\tau_m = \frac{J(3R)}{K_e K_t} \quad \tau_e = \frac{L}{3R} \quad (7)$$

Teniendo en cuenta los efectos causados por las fases, podemos observar que:

$$\tau_m = \frac{3 R_0 J}{(K_{e(L-L)}/\sqrt{3})K_t} \quad (8)$$

Por lo siguiente,

$$\tau_m = \frac{3 R_0 J}{K_e K_t} \quad (9)$$

Donde,

$$K_e = (K_{e(L-L)}/\sqrt{3}) \quad (10)$$

Existe una relación correspondiente entre la constante de voltaje Back EMF y la constante de torque, que es la siguiente:

$$K_e = K_t \times 0.0605 \quad (11)$$

Considerando todo lo mencionado anteriormente, podemos expresar la función de transferencia que describe todos los parámetros, tanto eléctricos como mecánicos, del motor Brushless DC de la siguiente manera:

$$G(S) = \frac{\frac{1}{k_e}}{\tau_m \tau_e S^2 + \tau_m S + 1} \quad (12)$$

Utilizar un software de simulación de motores brushless para implementar los modelos desarrollados y llevar a cabo simulaciones comparativas. Configurar los parámetros de entrada y las condiciones de funcionamiento relevantes y ejecutar las simulaciones para obtener resultados numéricos. Analizar los resultados en términos de desempeño, estabilidad y eficiencia energética, utilizando los criterios de evaluación definidos previamente.

A continuación, presentaremos el modelo matemático de un motor DC desarrollado en Simulink, seguido de la simulación en lazo abierto y con sus respectivas gráficas (Vasquez & Aquino, 2017).

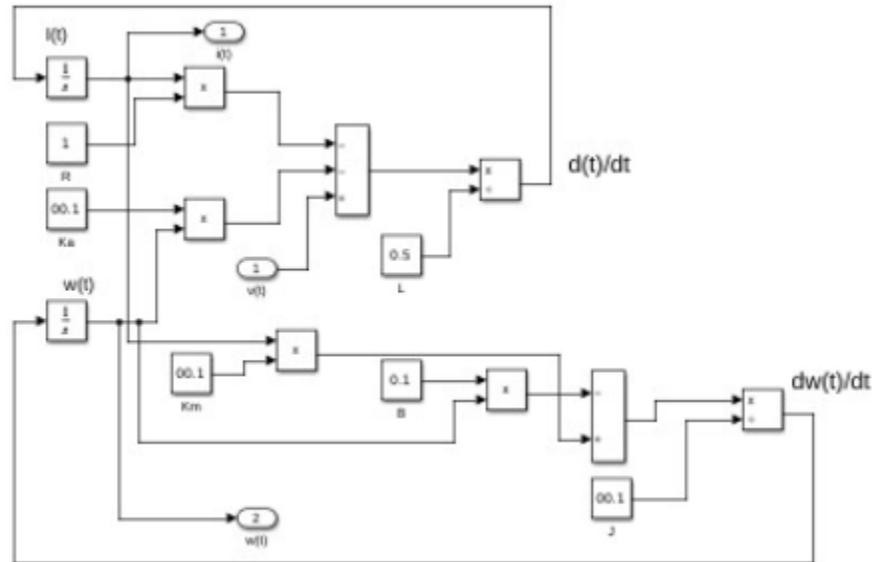


Figura 5. Modelo matemático de un motor DC.

Fuente (Vasquez & Aquino, 2017).

Dentro del marco del modelo matemático en SIMULINK, se configuran diversos bloques esenciales para la representación efectiva de nuestra ecuación diferencial. Estos bloques incluyen constantes, sumadores, divisores, multiplicadores y un integrador, cada uno desempeñando un papel crucial en la articulación del sistema. (Vasquez & Aquino, 2017)

En el desarrollo del modelo matemático se han incorporado seis constantes, las cuales han sido detalladas previamente de manera individual. Además, se han integrado dos ecuaciones diferenciales identificadas como ecuación 1 y ecuación 2, desempeñando un papel central en la descripción del comportamiento del sistema (ver figura 5).

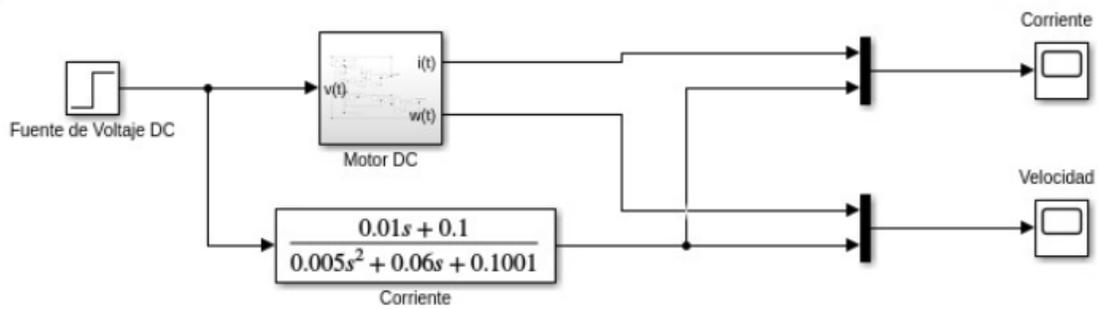


Figura 6 Modelo matemático de un motor DC en lazo abierto.

Fuente (Vasquez & Aquino, 2017).

Una fase fundamental del análisis consistió en comparar las funciones de transferencia asociadas a la velocidad y corriente de armadura. Estas comparaciones se llevaron a cabo dentro del contexto de las ecuaciones diferenciales formuladas, proporcionando así una evaluación integral del rendimiento del sistema. (Vasquez & Aquino, 2017).

El enfoque meticuloso en la configuración de bloques y la implementación cuidadosa de constantes y ecuaciones diferenciales en el modelo matemático de SIMULINK han permitido una representación precisa y detallada del comportamiento del sistema, facilitando así la comparación y análisis de las funciones de transferencia clave (Vasquez & Aquino, 2017). Ver figura 6.

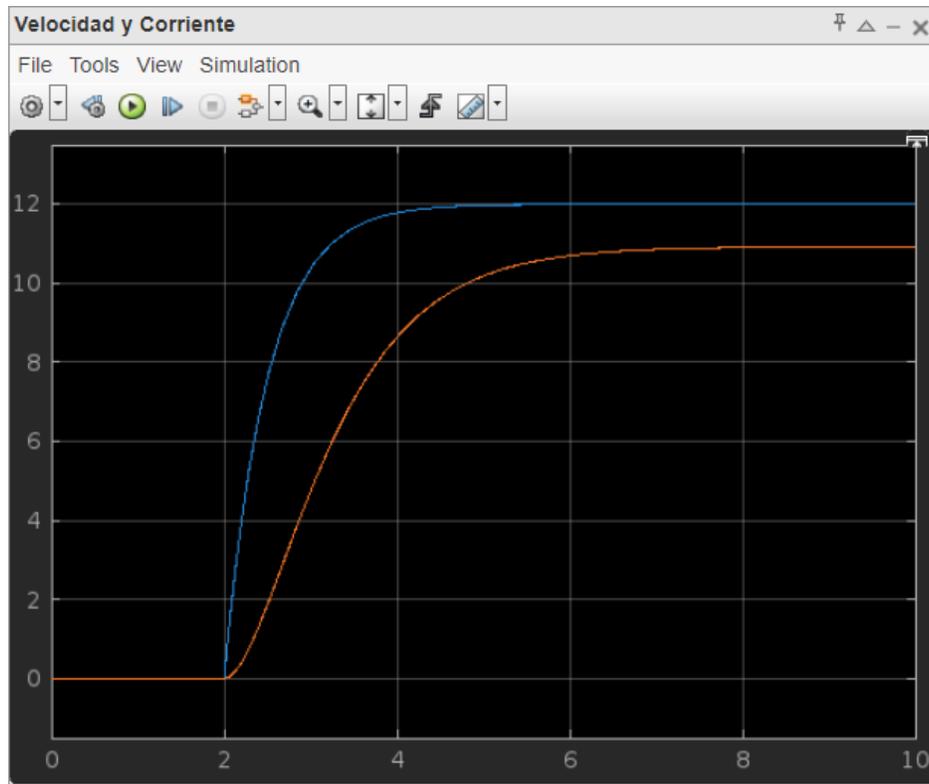


Figura 7. Gráfica del modelo matemático del motor Brushless.

Fuente (Vasquez & Aquino, 2017).

Como se puede observar en la gráfica de la figura 7, las curvas de corriente y velocidad dadas por la función de transferencia, están sobrepuestas en las mismas variables de la ecuación diferencial del motor DC. Este análisis nos da a entender que el control en lazo abierto no afecta ninguna de las variables (Vasquez & Aquino, 2017).

Ahora, presentaremos el modelo matemático de un motor DC desarrollado en Simulink, seguido de la simulación en lazo cerrado con sus respectivas gráficas.

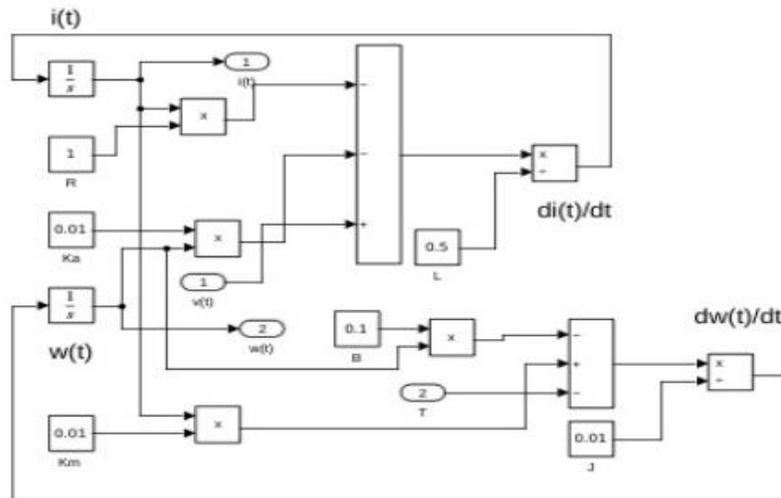


Figura 8. Modelo matemático de un motor DC en lazo cerrado.

Fuente (Vadapalli, Kella, Sekhar, Samson, & Avinash, 2015).

Al igual que en el modelo matemático del motor DC en lazo abierto, hemos implementado el mismo modelo matemático con ecuaciones diferenciales donde anexaremos la variable del torque que es indispensable para nuestra simulación en lazo cerrado (Vadapalli, Kella, Sekhar, Samson, & Avinash, 2015).

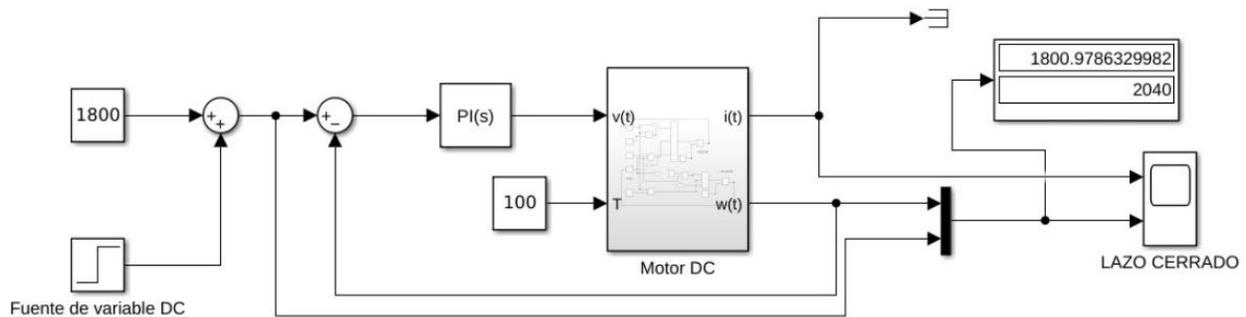


Figura 9. Modelo de un motor DC Con inversor.

Fuente (Vadapalli, Kella, Sekhar, Samson, & Avinash, 2015).

En el diseño del sistema en lazo cerrado tendremos la suma del voltaje y de la velocidad como la referencia que deseamos alcanzar, también tendremos la variable del torque y el controlador

PID que nos ayudará a encontrar la velocidad deseado sobre nuestro punto de referencia (Vadapalli, Kella, Sekhar, Samson, & Avinash, 2015).

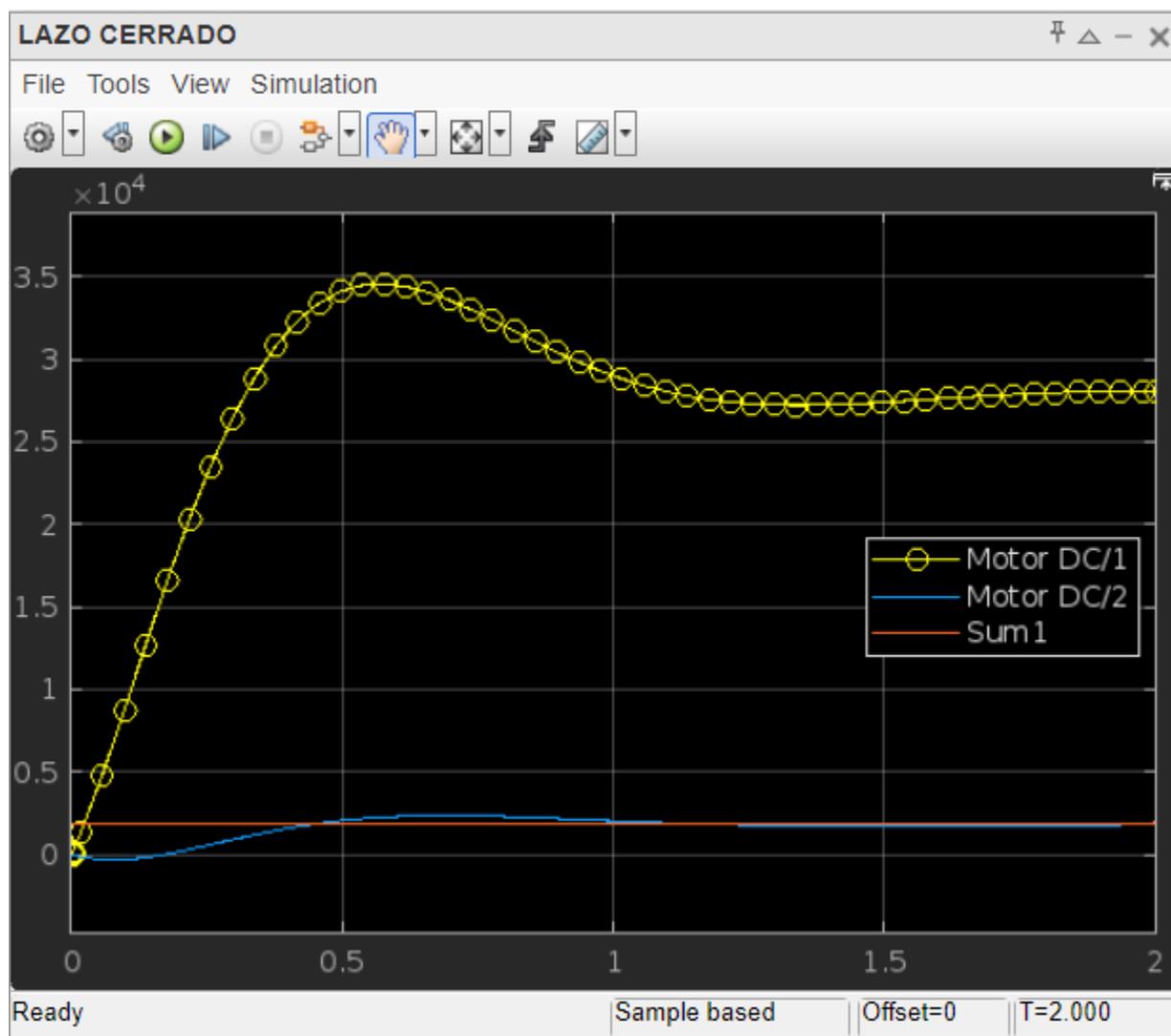


Figura 10. Curva de velocidad angular de un motor DC con inversor.

Fuente (Vadapalli, Kella, Sekhar, Samson, & Avinash, 2015).

Como se puede observar en la figura 11, nuestro punto de referencia está en color rojo y la velocidad en color azul, con el controlador PID logramos que se iguale al punto de referencia y que se estabilice al final, también podemos observar la corriente en color amarillo, vemos que tiene un pico mientras se alcanza la velocidad deseada y después también se estabiliza (Vadapalli, Kella, Sekhar, Samson, & Avinash, 2015).

En función de los resultados obtenidos en las simulaciones, realizar ajustes y optimizaciones en los parámetros de los métodos de control para mejorar su desempeño, estabilidad y eficiencia energética, esto puede implicar modificar los valores de ganancia, las estrategias de modulación, los límites de control u otros parámetros relevantes.

Para la implementación del sistema de control se debe tener en consideración que el modelo matemático de un motor Brushless no se diferencia mucho del modelo tradicional del motor DC; aquella diferencia radica en la implementación de las fases del motor. Dichas fases perjudican la resistividad e inductividad del modelado sin escobillas, especialmente afectan a las constantes eléctricas y mecánicas del sistema que son importantes para el modelado del motor (Amaguaña, Pilapanta, Laica, & Ñacato, 2023).

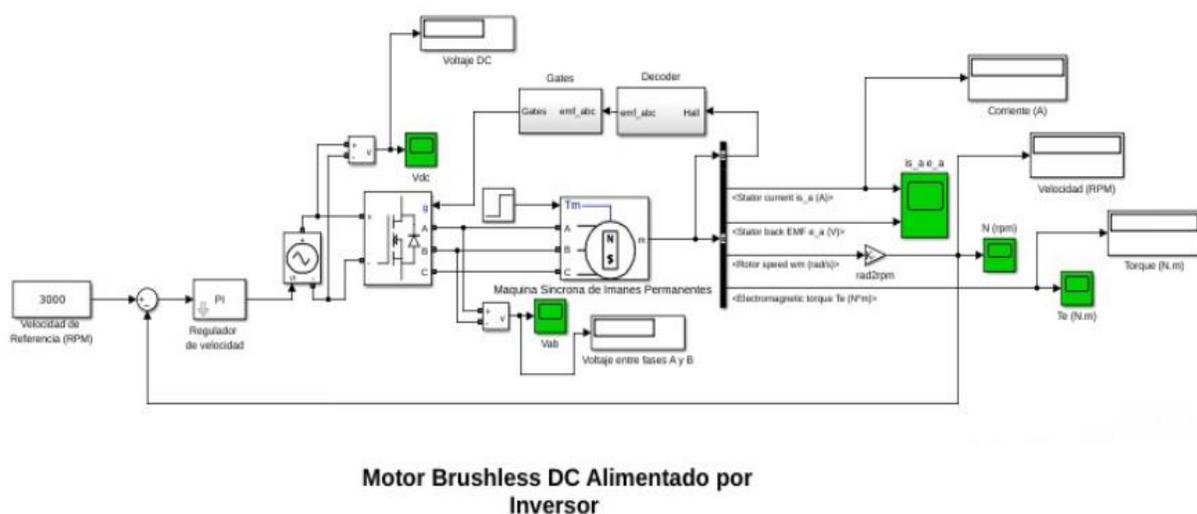


Figura 11. Ajustes y optimización en los parámetros

Fuente (Tremblay & Déssaint, 2023).

Descripción

Un motor trifásico de 1 kW, 500 V CC, 3000 rpm es alimentado por un inversor de voltaje de seis pasos, el inversor es un puente “H” a partir de MOSFET de la biblioteca Specialized Power Systems. Se utiliza un regulador de velocidad para controlar el voltaje del bus de CC. Las señales de las puertas del inversor se producen decodificando las señales de efecto Hall del motor, la

salida trifásica del inversor se aplica a los devanados del estator del bloque PMSM, el par de carga aplicado al eje de la máquina se establece primero en 0 y aumenta a su valor nominal (3 Nm) en $t = 0,1$ s.

Se utilizan dos bucles de control, el bucle interior sincroniza las señales de las puertas del inversor con las fuerzas electromotrices, el circuito exterior controla la velocidad del motor variando el voltaje del bus de CC (Tremblay & Déssaint, 2023).

El control retroalimentado, realimentado o simplemente FeedBack es la estructura con mayor importancia en el mundo del control, porque gracias a ella, podemos cerrar el lazo de control e indicarle a nuestro controlador principal que puede ser un Control Proporcional (Control P), Controlador PI, Control PID, control RST, Predictivo, entre otros, el comportamiento actual de nuestra variable controlada y con base a esa información el sistema lo compara con la referencia que desea seguir y aplica las medidas necesarias sobre el sistema para cumplir con las estrategias de producción y control del sistema (Castaño G. S., 2013).

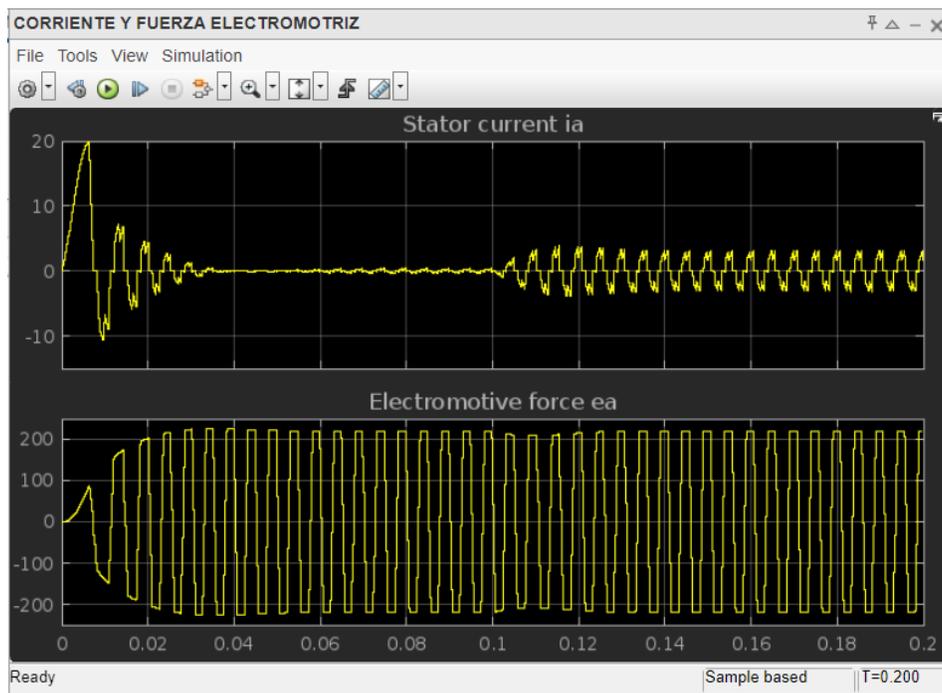


figura 12. Corriente en el estator y fuerza electromotriz ea

Fuente (Tremblay & Déssaint, 2023).

Simulación

La simulación se ha realizado con un tiempo de 0.2 segundos y un par nominal de 3 Nm, una velocidad de referencia 3000 RPM y un voltaje de 500, con este voltaje se mantiene la velocidad final con la velocidad de referencia, el torque disminuye a 2.7 Nm y la corriente alcanza los 1.9A. Si le disminuimos el voltaje estos valores pueden variar, la velocidad, la corriente y el torque disminuyen, y se presenta una variación considerable en los parámetros del sistema.

Se observa la forma de diente de sierra de las corrientes del motor. Esto se debe al bus de CC que aplica un voltaje constante durante 120 grados eléctricos a las inductancias del motor. La corriente inicial es alta y disminuye durante la aceleración hasta la velocidad nominal. Cuando se aplica el par nominal, la corriente del estator aumenta para mantener la velocidad nominal. La forma de onda en diente de sierra también se observa en la señal de par electromagnética (T_e), sin embargo, la inercia del motor evita que este ruido aparezca en la forma de onda de velocidad del motor.

Validación de los métodos de control

Empleando el banco de pruebas didáctico para realizar la validación de los dos métodos de control se obtuvieron los siguientes resultados de las pruebas realizadas.

Consideraciones: los motores empleados para la validación cuentan con características similares en función de las variables eléctricas, como; el voltaje de alimentación, corriente nominal y potencia, diferenciando el sistema de control al integrar sensores de efecto Hall en uno de ellos, mientras el motor que fue empleado para pruebas de lazo abierto se emplea el método de control por medio de la inductancia de las mismas bobinas.

Resultados obtenidos de las pruebas realizadas a los motores con control de lazo cerrado

Para realizar un análisis del comportamiento de un motor brushless con lazo cerrado (Motor con sensores) durante una prueba de arranque, consideraremos un conjunto de valores numéricos

que representan la velocidad del motor (en RPM) en función del tiempo (en segundos), como se muestra en la figura 13.

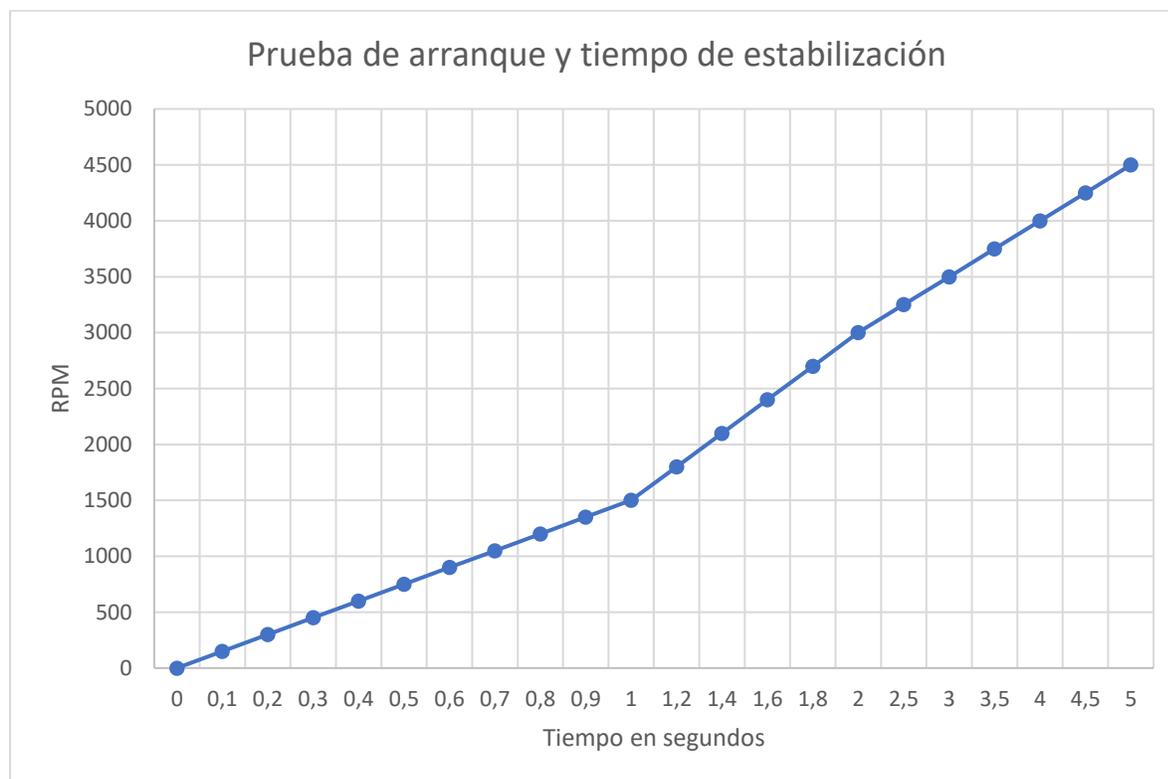


Figura 13. Comportamiento de la velocidad de arranque del motor brushless con control de lazo cerrado.

Fuente: Autor.

El comportamiento del arranque del motor brushless, se plasma en la figura 13 empleando dos ejes comparativos, presentando el tiempo transcurrido en el eje X, y las revoluciones por minuto obtenidas en el eje Y, donde se puede evidenciar lo siguiente:

Arranque Rápido: El motor alcanza los 1500 RPM en 1 segundo, mostrando una rápida aceleración inicial gracias a la información precisa de los sensores.

Estabilización de Velocidad: La velocidad sigue aumentando, alcanzando 3000 RPM en 2 segundos y finalmente estabilizándose cerca de 4500 RPM a los 5 segundos.

Resultados obtenidos de las pruebas realizadas a los motores con control de lazo abierto

Con el fin de realizar un análisis comparativo con los resultados obtenidos en las pruebas anteriores, se emplea los mismos rangos de tiempo, como se muestra en la figura 14.

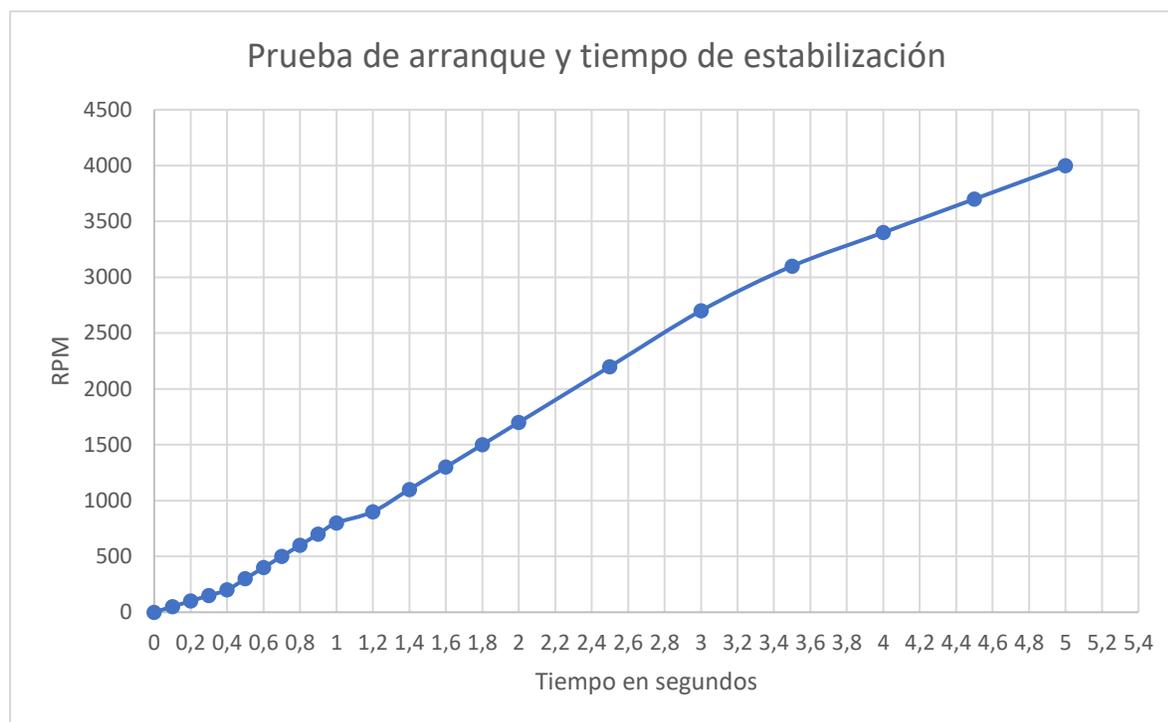


Figura 14. Comportamiento de la velocidad de arranque del motor brushless con control de lazo abierto.

Fuente: Autor.

El comportamiento del arranque del motor brushless, se plasma en la figura 13 empleando dos ejes comparativos, presentando el tiempo transcurrido en el eje X, y las revoluciones por minuto obtenidas en el eje Y, donde se puede evidenciar lo siguiente:

Arranque Lento: El motor alcanza los 1500 RPM en 1.8 segundo, mostrando una aceleración inicial más lenta debido a la estimación de la posición del rotor.

Menor Estabilización: La velocidad sigue aumentando, pero a un ritmo irregular comparado con el motor con sensores, alcanzando 1700 RPM en 2 segundos y finalmente estabilizándose cerca de 4000 RPM a los 5 segundos.

7. Conclusiones

El presente estudio ha evaluado dos métodos de control para motores brushless de baja potencia: el control de lazo abierto y el control de lazo cerrado, este análisis destaca las características esenciales para determinar cuál de los dos métodos es más adecuado según la aplicación final del motor, donde el control de lazo abierto es ideal en entornos donde se requiere una velocidad final constante y no es crucial una alta precisión en la aceleración inicial, por otro lado, el control de lazo cerrado es más adecuado cuando es necesario controlar la velocidad inicial y la tasa de cambio de velocidad, proporcionando un mayor grado de precisión y estabilidad en el desempeño del motor.

La simulación es una herramienta esencial para poner a prueba los modelos matemáticos desarrollados y evaluar el rendimiento de los motores brushless en diferentes condiciones. Permite configurar parámetros, analizar resultados y tomar decisiones informadas sobre el diseño y control de estos motores.

La simulación desempeñó un papel fundamental en la realización de este estudio, ya que permitió analizar el comportamiento del motor en condiciones controladas y reproducibles, lo que demuestra la utilidad de las herramientas de simulación en la investigación y desarrollo de sistemas de control.

La simulación reveló que el control de lazo abierto y el de lazo cerrado tienen un impacto significativo en el comportamiento del motor, donde el control de lazo cerrado demostró una mayor capacidad de ajuste y estabilidad en comparación con el control de lazo abierto.

En el caso de motores brushless trifásicos, se deben considerar las constantes mecánicas y eléctricas en un contexto simétrico, esto incluye la inercia del rotor, la resistencia y la inductancia de las fases, por tal motivo la modelización de motores trifásicos requiere un enfoque específico para describir con precisión su comportamiento.

La función de transferencia proporcionada ($G(S)$) representa la relación entre la tensión aplicada al motor y la velocidad angular en función del tiempo, esta función es fundamental para comprender la dinámica del motor y su respuesta a diferentes entradas.

La caracterización del motor mediante un modelo matemático es esencial para el diseño de sistemas de control eficaces, por tal motivo el conocimiento detallado de las características del motor brushless es fundamental para implementar y ajustar correctamente los métodos de control.

8. Recomendaciones

Para poder realizar una estructura de este tipo, es primordial conocer como leer y crear los diagramas de bloques de los sistemas de control para poder entender cuál es la mejor estrategia a utilizar en determinados procesos industriales donde se aplican los conceptos de la ingeniería del control.

Profundizar en el análisis de esta función para comprender mejor la relación entre la tensión aplicada y la velocidad angular, ya que es crucial para comprender la dinámica del motor.

Considerar realizar simulaciones en una variedad más amplia de condiciones para obtener una comprensión más completa de cómo el motor responde a diferentes entradas y situaciones.

Extender la comparación entre el control de lazo abierto y el de lazo cerrado, profundizando en cómo cada uno afecta el comportamiento del motor en diferentes situaciones y bajo distintas cargas.

Destacar la importancia de considerar la inercia del motor en el diseño de sistemas de control para garantizar una estabilización óptima de la velocidad y evitar variaciones no deseadas.

Explorar cómo los hallazgos pueden aplicarse en el diseño y desarrollo de sistemas reales, cómo podrían optimizarse los motores brushless y cómo podrían implementarse mejoras en sistemas industriales o comerciales.

9. Referencias bibliográficas

(s.f.).

Becerra, A. O. (2011). *Control de motor sin escobilla*. Recuperado el 20 de Agosto de 2023, de <https://repository.upb.edu.co/>:
https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/3277/digital_21641.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Bueno, D. (2013). *Sistemas Automatizados*. Recuperado el 14 de Agosto de 2023, de <https://1mecanizadoelarenal.files.wordpress.com/>:
<https://1mecanizadoelarenal.files.wordpress.com/2013/11/motores-brushless.pdf>

Castaño, G. S. (2013). *Control Realimentado*. Recuperado el 04 de Octubre de 2023, de controlautomaticoeducacion.com: <https://controlautomaticoeducacion.com/control-realimentado/>

Castaño, G. S. (Diciembre de 2013). *Control retroalimentado lazo abierto y lazo cerrado*. Recuperado el 05 de Septiembre de 2023, de [control automatico educación](http://controlautomaticoeducacion.com):
<https://controlautomaticoeducacion.com/control-realimentado/lazo-abierto-y-lazo-cerrado/>

Castaño, G. S. (2013). *Modelo de motor DC*. Recuperado el 05 de Septiembre de 2023, de [Control Automatico Educación](http://controlautomaticoeducacion.com): <https://controlautomaticoeducacion.com/analisis-de-sistemas/modelo-de-motor-dc/>

Charles K, A. (s.f.).

Díaz, R. J., Cote, U. J., & Pardo, G. A. (Agosto de 2013). *Inversor de Potencia PWM Didáctico*. Recuperado el 18 de Agosto de 2023, de <https://www.laccei.org>:
<https://www.laccei.org/LACCEI2013-Cancun/RefereedPapers/RP030.pdf>

Edson, B. A., Katherine, E. P., & Bryan, F. L. (2023). *CONTROL DE VELOCIDAD DE MOTORES BRUSHLESS APLICADO*. Recuperado el 02 de Octubre de 2023, de <https://editorialalema.org>:
<https://editorialalema.org/index.php/pentaciencias/article/view/483/640>

Eltra-Trade. (2020). *¿CUÁL ES LA DIFERENCIA ENTRE MOTORES DE CC CON Y SIN ESCOBILLAS?* Recuperado el 20 de Agosto de 2023, de [Eltra-Trade.com](http://eltra-trade.sk/es/whats-difference-between-brushed-and-brushless-dc-motors): <http://eltra-trade.sk/es/whats-difference-between-brushed-and-brushless-dc-motors>

- Fitzgerald, A. K. (2003). *Electric Machinery*. Mc.Graw Hill, Internationa.
- García-Peñalvo, F. J. (2019). *nteligencia Artificial. Una perspectiva desde la ficción a la realidad*.
<https://bit.ly/2Q0jap0>. doi: 10.5281/zenodo.2818903.
- Jimbo, T. J. (Febrero de 2015). *Caracterización del fundamento de un motor electrico de corriente continua sin escobillas brushless con 1000 watts de potencia*. Recuperado el 18 de Agosto de 2023, de dspace.ups.edu.ec:
<https://dSPACE.ups.edu.ec/bitstream/123456789/7891/1/UPS-CT004742.pdf>
- José, D. D., & Camilo, J. B. (2013). *CONTROL DE VELOCIDAD PARA MOTOR DC BRUSHLESS SIN SENSORES*. Recuperado el 12 de Septiembre de 2023, de repository.javeriana.edu.co:
<https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/13593/DelgadoJoseDavid2013.pdf>
- Mubeen, M. (julio de 2012). *Electric Motor Primer*. Recuperado el 20 de Agosto de 2023, de <https://ww1.microchip.com/>: https://ww1.microchip.com/downloads/en/Appnotes/Atmel-8311-AVR1607-Brushless-DC-Motor-Control-in-Sensor-Mode-using-ATxmega128A1-and-ATAVRMC323_Application-Note.pdf
- Prototipo de inversor didáctico para el laboratorio de potencia*. (2016).
- Sámano Dávila, J. G. (2023). *Instrumentalismo y la teoría electromagnética de Maxwell*.
 Obtenido de scielo: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-24062020000100007&script=sci_arttexto
- Suñén, A. D. (2016). *Banco de ensayos para regulador de motor brushless*. Recuperado el 18 de Agosto de 2023, de zaguan.unizar.es: <https://zaguan.unizar.es/record/58020/files/TAZ-TFG-2016-4817.pdf>
- Tremblay, O., & Déssaint, L.-A. (2023). *Motor CC sin escobillas alimentado por un inversor de seis pasos*. Recuperado el 02 de Octubre de 2023, de mathworks:
<https://la.mathworks.com/help/sps/ug/brushless-dc-motor-fed-by-six-step-inverter.html>
- Vadapalli, V. R., Kella, H. K., Sekhar, T., Samson, D., & Avinash, N. (Marzo de 2015). *Speed Control of D.C. MOTOR Using Chopper*. Recuperado el 12 de Septiembre de 2023, de <https://www.researchpublish.com/>:
<https://www.researchpublish.com/upload/book/Speed%20Control%20of%20D%20C%20MOTOR%20Using%20Chopper-1308.pdf>

Vasquez, E. O., & Aquino, D. E. (Febrero de 2017). *Modelo matemático del motor de corriente directa*. Recuperado el 12 de Septiembre de 2023, de www.researchgate.net:

https://www.researchgate.net/publication/313215329_Modelo_matematico_del_motor_de_corriente_directa

|

|