

Diseño y simulación de un sistema de freno regenerativo para una motocicleta eléctrica utilitaria
monoplaza de tres ruedas con tracción trasera

Laura Valentina Carvajal Aparicio y Juan Felipe Madiedo Rebolledo

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniería Mecánica

Director

William Pinto Hernández

D. Sc Ingeniería Mecánica

Codirector

José Jorge Carreño Zagarra

D. Sc Ingeniero Electrónico

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2022

Dedicatoria

A Dios, por guiar mis pasos.

A mi madre, Irma, principal destinataria de este logro, quien con su vida inspiró mi carrera y en la distancia nunca soltó mi mano, fortaleció mi espíritu para afrontar la vida y sacar lo mejor de mí.

A mi familia, especialmente a Hannah Sofía, que me impulsa a diario con su amor; a mis tíos, abuelos y sus cercanos, en quienes encontré apoyo y confianza; a la familia espiritual: amigos y mentores, todos cercanos a mi corazón, gracias por acompañarme, fortalecerme y quererme.

A Juan Felipe Madiedo Rebolledo, por ayudarme a fortalecer la fe en mis capacidades. Mi gratitud sincera.

Y a mi perrita Coco, por su amor incondicional.

Laura Valentina Carvajal Aparicio

Dedicatoria

A Dios, por su presencia y amor infinito.

A mis padres, Adriana y Mauricio por brindarme su amor, apoyo, confianza y total fe en mis capacidades para cumplir con este proyecto, por los consejos, valores y principios que me han inculcado. Junto a ellos celebro mis triunfos como si fueran de ellos.

A mis hermanos Sofí y Carlitos por creer en mí, por su cariño y apoyo incondicional, siempre serán un orgullo para mí.

A mi abuela Laly por su apoyo incondicional en mi vida. Gracias por llevarme en tus oraciones porque estoy seguro de que siempre lo haces, por ser mi inspiración con su amor, confianza y voluntad.

A mis tíos Claudia y Jorge por el amor, la confianza y cada ayuda que me brindaron durante toda mi carrera universitaria, gracias a ellos pude cumplir esta meta y enseñarme lo que significa la familia.

A mi compañera y amiga Laura por formar parte de este proyecto y brindarme su apoyo, gracias a ella logramos llevar este proyecto de la mejor manera posible.

Al grupo 12 que siempre estuvieron motivándome con sus palabras y brindando su apoyo.

A toda mi familia y amigos que hicieron más ameno este ciclo de mi vida.

Juan Felipe Madiedo Rebolledo

Agradecimientos

A William Pinto Hernández, nuestro director de tesis, por la orientación oportuna y fundamental que nos dio durante todo el proyecto, y por su tiempo e interés.

A José Jorge Carreño, codirector del proyecto, por los valiosos aportes que hizo al mismo y por el ánimo positivo que nos imprimió.

A la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander, sus directivos, profesores y personal administrativo, nuestro sincero reconocimiento por la formación académica e integral que nos impartieron, y por cimentar nuestras expectativas profesionales y de servicio.

Laura Valentina Carvajal Aparicio

Juan Felipe Madiedo Rebolledo

Contenido

	Pág.
1. Planteamiento del problema.....	13
2. Objetivos	18
2.1 Objetivo General.....	18
2.2 Objetivos Específicos.....	18
3. Justificación	19
4. Marco Teórico.....	19
4.1 Antecedentes	20
4.1.1 Diseño e implementación de freno regenerativo para motor de corriente continua sin escobillas con imanes permanentes para moto eléctrica (Vargas, 2019).....	20
4.1.2 Sistema de recuperación de energía cinética para una moto eléctrica basada en motor brushless (Aguilera y Aponte, 2015)	21
4.1.3 Diseño e implementación de un sistema de freno regenerativo y transmisión eléctrica en una motocicleta convencional para la carrera de ingeniería automotriz (Chiriboga y Velasco, 2017)	22
4.1.4 Regenerative intelligent brake control for electric motorcycles (Cabrera, 2017).....	23
4.2 Referentes	24
4.2.1 Motores eléctricos	24
4.2.1.1 Motores de corriente continua (DC).	24
4.2.1.2 Motores de corriente alterna (AC).	25

4.2.2	Generador.....	26
4.2.3	Electrónica de potencia	26
4.2.4	Tipos de baterías	27
4.2.4.1	Baterías plomo-ácido.....	28
4.2.4.2	Baterías de níquel-cadmio.....	28
4.2.4.3	Baterías de níquel-hidruro metálico.....	29
4.2.4.4	Baterías de litio.....	29
4.2.4.5	Baterías de polímero de litio.....	29
4.2.5	Sistemas de control	30
4.2.6	Sistema de frenado.....	31
4.2.6.1	Frenos de disco.....	33
4.2.6.2	Freno de tambor.....	34
4.2.7	Sistema de freno regenerativo.....	35
5.	Dinámica de una motocicleta.....	36
5.1	Modelo del motor BLDC	39
6.	Diseño Metodológico.....	42
6.1	Análisis y selección de alternativas para el sistema de frenado regenerativo.....	42
6.1.1	Alternativa Uno.....	42
6.1.2	Alternativa Dos	43
6.1.3	Alternativa Tres	44
6.1.4	Selección del sistema general de trabajo	45
6.2	Planteamiento del algoritmo de frenado regenerativo	48
6.3	Distribución de fuerza de frenado.....	49

6.4 Sistema de control para un motor BLDC.....	54
6.4.1 Modo de tracción para un motor BLDC	57
6.4.2 Modo de REGENERACIÓN para un motor BLDC	58
7. Análisis de Resultados	59
8. Conclusiones	66
9. Recomendaciones	67
Referencias Bibliográficas	68
Apéndices.....	72

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Motor de corriente directa (esquema básico)	24
Figura 2. Motor de corriente alterna (Jaula de ardilla)	26
Figura 3. Sistema de control de lazo abierto y cerrado	31
Figura 4. Sistema de frenado por fricción.....	32
Figura 5. Freno de disco.....	33
Figura 6. Freno de tambor.....	34
Figura 7. Esquema freno regenerativo	36
Figura 8. Esquema básico de la motocicleta.....	37
Figura 9. Esquema motor BLDC	40
Figura 10. Esquema de la alternativa uno	43
Figura 11. Esquema de la alternativa dos	44
Figura 12. Esquema de la alternativa tres	45
Figura 13. Distribución de la fuerza de frenado	51
Figura 14. Diagrama del algoritmo del sistema de frenado y control.....	53
Figura 15. Motor eléctrico sin escobillas de corriente continua	54
Figura 16. Circuito equivalente del motor BLDC: Puente H.....	55
Figura 17. Circuito equivalente y secuencias de señales	56
Figura 18. (a) Circuito equivalente, (b) Estado de los interruptores, formas de onda de las corrientes de entrada y de fase.	58

Figura 19. (a) Circuito equivalente, (b) Estado de los interruptores, comportamiento de las corrientes de entrada y de fase. 59

Figura 20. Recorrido planteado y seguimiento del motor..... 60

Figura 21. Perfil de la distribución del frenado 62

Figura 22. Perfil de potencia del sistema 64

Figura 23. Estado de carga del sistema SoC 65

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Emisiones de los principales GEI en el 2019	16
Tabla 2. Descripción de los parámetros usados en el modelo dinámico	39
Tabla 3. Descripción de los parámetros usados en el modelo del motor BLDC	41
Tabla 4. Valoración y rango para la calificación	46
Tabla 5. Análisis de alternativas	46
Tabla 6. Ponderación de las alternativas	47
Tabla 7. Condiciones de trabajo para el proyecto	61

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. Modelo simulink sistema de frenado regenerativo	72
Apéndice B. Código del matlab function.....	73

Resumen

Título: Diseño y simulación de un sistema de freno regenerativo para una motocicleta eléctrica utilitaria monoplaza de tres ruedas con tracción trasera*

Autores: Laura Valentina Carvajal Aparicio y Juan Felipe Madiedo Rebolledo**

Palabras Claves: Freno regenerativo, movilidad sostenible, motocicleta eléctrica.

Descripción:

En este proyecto de investigación se llevó a cabo el diseño y simulación de un sistema de frenado regenerativo para un vehículo eléctrico utilitario monoplaza de tres ruedas con tracción trasera. Con este diseño se plantea recuperar gran parte de la energía que usualmente se disipa durante el periodo de frenado. Distribuyendo de la mejor manera las fuerzas mecánicas y la fuerza eléctrica que estén presentes en cada una de las ruedas, de tal manera que el motor sea aquel que, en la etapa de desaceleración, actúe como un generador y así recuperar la energía.

Durante el desarrollo de este proyecto se usaron como base las respectivas normas que rigen los sistemas de frenado que se enfocan en la seguridad y confort del usuario, además de los sistemas de control utilizados en la etapa de regeneración de acuerdo con la configuración planteada en el sistema.

Para la simulación, se empleó el programa Matlab/SimuLink, con el fin de dar una aproximación al comportamiento de la etapa de frenado de un vehículo con respecto a una situación real planteada. Obteniendo el valor de las fuerzas involucradas, potencia consumida y dando como resultado, unas estimaciones de la cantidad de energía que logra recuperarse y almacenarse.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director D. Sc. William Pinto Hernández. Codirector D. Sc. José Jorge Carreño Zagarra.

Abstract

Title: Design and simulation of a regenerative braking system for a single-seat, three-wheel, rear-wheel drive, electric utility motorcycle*

Authors: Laura Valentina Carvajal Aparicio y Juan Felipe Madiedo Rebolledo**

Key Words: Regenerative braking, sustainable mobility, electric motorcycle.

Description:

In this research project, the design and simulation of a regenerative braking system for a single-seat, three-wheel, rear-wheel drive electric utility vehicle was conducted. This design aims to recover much of the energy that is usually dissipated during the braking period. By distributing in the best way, the mechanical forces and the electrical force that are present in each of the wheels, in such a way that the motor is the one that, in the deceleration stage, acts as a generator and thus recovers the energy.

During the development of this project, the respective standards governing braking systems that focus on user safety and comfort were used as a basis, in addition to the control systems used in the regeneration stage according to the configuration proposed in the system.

For the simulation, the Matlab/SimuLink program was used, to give an approximation of the behavior of the braking stage of a vehicle with respect to a real situation. Obtaining the value of the forces involved, power consumed and giving as a result, some estimates of the amount of energy that manages to be recovered and stored.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director D. Sc. William Pinto Hernández. Codirector D. Sc. José Jorge Carreño Zagarra.

1. Planteamiento del problema

A lo largo de las últimas décadas, el cambio climático ha tomado un crecimiento exponencial y determinante, dado que, este desafío se encuentra asociado a un número infinito de consecuencias negativas para toda la humanidad. De acuerdo con la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2021), el impacto del fenómeno mencionado anteriormente se ve reflejado mediante los indicadores del sistema climático, entre los que se encuentran: las concentraciones de gases de efecto invernadero, el incremento del nivel del mar, el aumento de la temperatura y la presencia de catástrofes naturales como tormentas, ciclones e incendios. Adicionalmente, según la OMM (2021), el 2020 fue uno de los tres años más cálidos de los que se tiene registro, a pesar de la presencia del fenómeno de enfriamiento de La Niña. La temperatura media mundial tomó un valor aproximado de 1,2 °C superior a los niveles preindustriales (1850-1900).

Así mismo, el 16° boletín de la OMM (2020) sobre los Gases de efecto invernadero (GEI), ilustra los datos obtenidos por la Vigilancia de la Atmósfera Global (VAG) de los tres principales gases contaminantes en 2019, donde se destaca el aumento en la concentración del CO₂, CH₄ y N₂O con respecto al año anterior.

A continuación, se presenta la tabla 1, donde se evidencia la tendencia del promedio mundial de los gases con mayor concentración en la atmósfera. Adicionalmente, se muestra la evolución a lo largo del tiempo de los elementos presentes en la superficie atmosférica tales como: CO₂, CH₄, N₂O y su variación actual. Cada uno de los datos se exponen mediante fracciones molares de aire seco, con un nivel de incertidumbre de 68%.

Tabla 1.*Emisiones de los principales GEI en el 2019*

Descripción	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Abundancia media mundial en 2019	410,5 ± 0,2 ppm	1 877 ± 2 ppmm	332,0 ± 0,1 ppmm
Abundancia en 2019 con relación a 1750	148%	260%	123%
Aumento en valor absoluto entre 2018 y 2019	2,6 ppm	8 ppmm	0,9 ppmm
Aumento en valor relativo entre 2018 y 2019	0,64%	0,43%	0,27%
Aumento anual medio en valor absoluto en los últimos 10 años	2,37 ppm año ⁻¹	7,3 ppmm año ⁻¹	0,96 ppmm año ⁻¹

Nota: Adaptado de 16° Boletín de la OMM (2020).

Así mismo, el Sistema de Información Ambiental de Colombia (SIAC, 2017) resalta la importancia que posee La Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMNUCC), puesto que, su objetivo es contribuir a la reducción significativa de las emisiones de GEI, provenientes de las diferentes actividades humanas, para disminuir el grupo de consecuencias negativas del cambio climático en su totalidad. Por consiguiente, Colombia hace parte de la CMNUCC y tiene la responsabilidad de notificar los avances y actividades que ayuden con esta iniciativa, englobando a su vez, la emisión periódica de los inventarios GEI.

En el Segundo Informe Bienal de Actualización de Colombia a la CMNUCC, se reporta que el sector energía, en la categoría transporte, es el causante del 12% de las emisiones de GEI, siendo los vehículos terrestres los que más aportan dentro de esta división, con una participación del 92% en el promedio histórico entre 1990 y 2014 (MinAmbiente, 2018).

Con base en las estadísticas e informes que manifiestan el impacto sobre el medioambiente, surge la necesidad de reducir las emisiones de GEI iniciando con el sector transporte, haciendo énfasis en las motos, que representan el 59% de la totalidad de vehículos en Colombia (MinTransporte, 2021). De acuerdo con lo mencionado anteriormente, es necesario promover la

implementación de vehículos eléctricos con las capacidades adecuadas para el transporte de usuarios.

Por consiguiente, para dar cumplimiento con las condiciones de trabajo requeridas, es de suma importancia realizar el diseño de los mecanismos y componentes de los vehículos eléctricos. Uno de ellos es el sistema frenado, que se encarga de disipar la energía almacenada del trabajo inducido por el motor, la cual se desperdicia sin poder ser aprovechada. Por lo tanto, se expone la posibilidad de utilizar dicha energía proporcionando un sistema de freno regenerativo, con la finalidad de aprovechar y almacenar la mayor cantidad energética posible en las baterías del medio de transporte.

Pregunta problema

¿Qué requerimientos se necesitan para el diseño de un sistema de freno regenerativo de una motocicleta eléctrica, de tres ruedas con tracción trasera, que maneje una carga y velocidad máxima de 350-400 kg y 85-90 km/h respectivamente, con la finalidad de reducir el impacto ambiental mediante la implementación de energías renovables en la industria automotriz?

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Diseñar y simular un sistema de freno regenerativo para una motocicleta eléctrica de tres ruedas con tracción trasera, con el propósito de reducir el impacto ambiental mediante la implementación de energías renovables en la industria automotriz, dando respuesta a las necesidades de movilidad sostenible enmarcadas en la política institucional de desarrollo científico y tecnológico.

2.2 Objetivos Específicos

Diseñar la configuración para el sistema de frenado regenerativo de una motocicleta eléctrica que cumpla con los siguientes requerimientos:

- Carga viva máxima: 250-300 kg.
- Velocidad máxima: 85-90 km/h.

Modelar el sistema de control a través del programa MATLAB/SimuLink para ejecutar el algoritmo de frenado.

Diseñar el controlador del freno regenerativo del sistema eléctrico y carga de baterías mediante MATLAB/SimuLink.

Palabras Clave: Freno regenerativo, movilidad sostenible, motocicleta eléctrica.

3. Justificación

El diseño y simulación de un sistema de freno regenerativo para una motocicleta eléctrica de tres ruedas con tracción trasera, tiene un impacto fundamental en la Ingeniería Mecánica debido a que el planteamiento de este hace énfasis en el concepto de movilidad sostenible, proporcionando una alternativa factible, para el desplazamiento de personas sin contribuir a la formación del esmog.

Por otro lado, la implementación de un freno regenerativo implica la reutilización de la energía que es disipada, generalmente, por medio del sistema de freno convencional para llevar al vehículo a un estado estático, de esta manera, se obtiene una propuesta que logra recuperar la mayor cantidad energética posible.

De este modo, el impacto social que otorga este proyecto se consolida con la generación de una idea que logre promover el avance tecnológico en este campo de estudio, e incentive a las personas con interés en el área para seguir innovando y mejorando el estilo de vida actual.

4. Marco Teórico

Para el desarrollo idóneo de este proyecto, es imprescindible realizar una investigación exhaustiva para abarcar los parámetros necesarios, y de esta manera, consolidar la solución a emplear en el diseño del sistema de freno regenerativo de una motocicleta eléctrica, por lo tanto,

se utilizan como punto de referencia los antecedentes mencionados en el estado del arte. Además, a través de los referentes teóricos se pretende ilustrar al lector los conceptos indispensables para entender en su totalidad el desarrollo de este trabajo.

4.1 Antecedentes

4.1.1 Diseño e implementación de freno regenerativo para motor de corriente continua sin escobillas con imanes permanentes para moto eléctrica (Vargas, 2019)

El presente proyecto tuvo como objetivo fundamental disponer de un sistema de freno eléctrico que permite a la Motochi-E el almacenamiento energético de forma económica, cada vez que frene, en lugar de disipar energía.

Para el desarrollo de esto, se hizo una revisión detallada del estado del arte en electromovilidad. Posteriormente, se determinó la estructura general del vehículo con la descripción de cada bloque constructivo: sistema de acumulación, de propulsión, convertidores de potencia y estrategias de control. También, se hizo énfasis en el mecanismo de freno regenerativo para la Motochi-E y su propuesta de diseño, teniendo en cuenta software y hardware. Además, debido a la variedad de estrategias y algoritmos de control, se realizaron distintas simulaciones con el fin de detallar los componentes y circuitos insustituibles para incorporarlos al vehículo. Finalmente, se documentaron las diferentes pruebas con el objetivo de certificar su funcionamiento.

Con lo mencionado anteriormente se puede evidenciar el valor agregado que le otorga este proyecto al trabajo de investigación, debido a que ilustra la implementación de las estrategias de

control y los circuitos que las respaldan: proceso de diseño y elaboración de PCB junto con la programación de algoritmos de control.

4.1.2 Sistema de recuperación de energía cinética para una moto eléctrica basada en motor brushless (Aguilera y Aponte, 2015)

Este proyecto tuvo como objetivo principal, “Diseño e implementación de un sistema electrónico que permita realizar la recuperación y administración de energía eléctrica, que se genera por efectos cinéticos en una motocicleta propulsada por un motor Brushless de 500W.”

En primera instancia, los autores realizaron una recopilación de información sobre los referentes teóricos necesarios, con el fin de implementar el sistema regenerativo en el modelo específico del vehículo. Seguido a esto, ejecutaron una propuesta de diseño general del sistema de regeneración para recuperar la energía y utilizarla en el sistema de iluminación de la motocicleta. Posteriormente, se llevó a cabo un diseño a detalle que expone el control y etapas de tratamiento de la energía para cumplir con el objetivo principal. Además, tomaron las señales medidas desde el motor y la señal rectificadas provenientes del mismo, también detallaron los dispositivos y parámetros necesarios para el control de la energía. Finalmente, registraron los datos obtenidos y midieron la autonomía del vehículo con el sistema, anexando evidencias fotográficas de la adaptación del prototipo.

Como aporte al presente trabajo de investigación, se puede destacar la propuesta de diseño presentada por los autores, utilizando un sistema de almacenamiento que consta de 20 supercondensadores, que sirven como fuente secundaria de alimentación al sistema de iluminación

del vehículo, demostrando de esta manera, la capacidad de recuperar energía que generalmente es desperdiciada en el proceso de frenado convencional.

4.1.3 Diseño e implementación de un sistema de freno regenerativo y transmisión eléctrica en una motocicleta convencional para la carrera de ingeniería automotriz (Chiriboga y Velasco, 2017)

Este proyecto tuvo como objetivo principal, “Diseñar e implementar un sistema de frenado regenerativo y transmisión eléctrica en una motocicleta convencional para la Carrera de Ingeniería Automotriz.”

En primer lugar, se realizó una búsqueda exhaustiva de referentes y antecedentes históricos. Luego de esto, se plantearon parámetros, variables de diseño y detallaron, mediante un diagrama de bloques, el sistema general eléctrico y de frenado según la etapa en la que se encuentre el vehículo. Seguidamente, realizaron la adquisición y el acondicionamiento estructural de la motocicleta, para continuar con la selección de los componentes eléctricos, la cual se hizo mediante catálogos y el análisis del mejor dispositivo. Después, diseñaron e instalaron el circuito eléctrico en la motocicleta junto con el diseño y simulación del freno regenerativo. Finalmente, hicieron pruebas y análisis de resultados para destacar las ventajas que se obtienen a partir de lo mencionado anteriormente.

Este proyecto aporta de manera significativa conocimientos y metodologías pertinentes para llevar a cabo el diseño del freno regenerativo más adecuado, teniendo en cuenta parámetros como la autonomía y rentabilidad frente a un vehículo con características similares que cuenta con un motor de combustión interna.

4.1.4 Regenerative intelligent brake control for electric motorcycles (Cabrerá, 2017)

El artículo propone un control regenerativo inteligente optimizado para una motocicleta eléctrica, que tiene la capacidad de obtener la máxima potencia de regeneración en los procesos de frenado. Adicionalmente, se llevó a cabo el control por medio de lógica difusa que permitió la obtención de la potencia máxima, sin comprometer la integridad de la batería y el deslizamiento de la rueda trasera, de tal forma que se garantizara la recuperación energética y seguridad.

En primera instancia, se tomó como punto de partida el modelado eléctrico del motor, por lo tanto, se logró conocer el torque ejercido en la rueda motriz. Seguidamente, se determinó el modelado dinámico del vehículo y la estimación del tipo de camino en el que se encontraba la motocicleta, para hallar el deslizamiento de la rueda y el coeficiente de adherencia. Posterior a esto, se realizó el control del sistema regenerativo, considerando un controlador tipo fuzzy. Finalmente, se efectuaron las respectivas simulaciones y tratamiento de datos para concluir con el diseño, además, se desarrolló una comparación del sistema de freno convencional (fricción) con el sistema regenerativo.

Para finalizar, resulta pertinente indicar que el artículo brinda un panorama de un método inteligente capaz de controlar el sistema de frenado, teniendo en cuenta parámetros como la potencia que se está transmitiendo y la velocidad del vehículo para evitar el bloqueo de la rueda motriz. De esta manera, se proporciona la potencia máxima, la cual tiene la posibilidad de recargar las baterías sin llegar a ocasionar daños por exceso de corriente.

4.2 Referentes

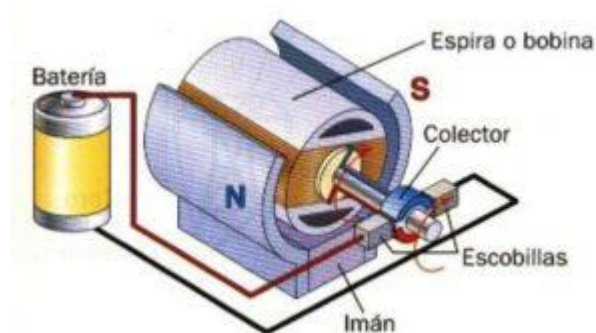
4.2.1 Motores eléctricos

Se denomina así a la máquina que tiene como finalidad transformar energía eléctrica en energía mecánica. Los motores eléctricos se clasifican en:

4.2.1.1 Motores de corriente continua (DC). Se caracterizan por requerir una fuente de corriente continua, o un dispositivo con la capacidad de convertir la corriente alterna en directa. Actualmente operan con velocidad ajustable y permiten controles de gran precisión y flexibilidad, sin embargo, su costo es elevado. (WEG, 2021)

Figura 1.

Motor de corriente directa (esquema básico)



Nota: Tomado de: Motorex (s.f.) *Cual es la diferencia entre los motores eléctricos ca y cc*

<http://www.motorex.com.pe/blog/cual-es-la-diferencia-entre-los-motores-electricos-ca-y-cc/>

La clasificación de los motores de corriente continua varía según la forma de conexión de las bobinas inductoras e inducidas entre sí:

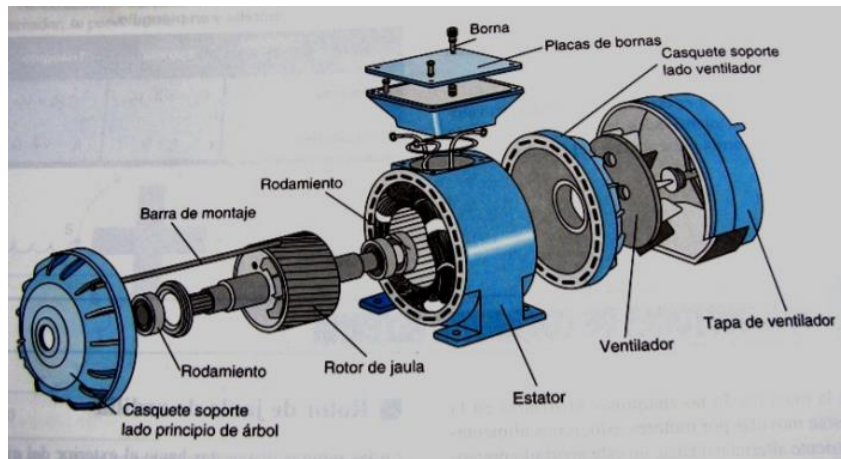
- Motor excitación en serie.
- Motor excitación independiente.
- Motor excitación compound.
- Motor excitación en paralelo o motor shunt.
- Imanes permanentes o motores sin escobillas.

4.2.1.2 Motores de corriente alterna (AC). Son motores usados con mayor frecuencia, debido a que la distribución de energía eléctrica se genera comúnmente mediante corriente alterna. Las principales categorías son:

- **Motor síncrono:** Su funcionamiento se da con velocidad fija, es decir, sin interferencia del deslizamiento; el cual se emplea con regularidad para grandes potencias (en virtud de su elevado costo para tamaños reducidos). (WEG, 2021)
- **Motor de inducción:** Debido a factores como simplicidad, bajo costo, facilidad de limpieza y transporte, se posiciona como el tipo de motor usado con mayor frecuencia a nivel industrial. Adicionalmente, cuenta con amplia versatilidad de adaptación a las cargas y altos rendimientos. Asimismo, funciona a velocidad constante, la cual tiene un leve cambio debido a la acción de la carga mecánica aplicada al eje. (WEG, 2021)

Figura 2.

Motor de corriente alterna (Jaula de ardilla)



Nota: Tomado de Plata Pintic (s.f.) *Introducción motores ca*
platea.pntic.mec.es/~jgarrigo/SAP/archivos/1eva/introduccion_motores_ca.pdf

4.2.2 Generador

Se definen como máquinas con la capacidad de transformar la energía mecánica de rotación en eléctrica. Además de esto, su funcionamiento tiene como base el fenómeno de inducción electromagnética, donde se describe la producción de corriente eléctrica con base en el movimiento de una espira dentro de un campo magnético. (CEUPE magazine)

4.2.3 Electrónica de potencia

La electrónica de potencia combina la energía, electrónica y el control. De manera que el dispositivo sea capaz de controlar la generación, transmisión y distribución de energía eléctrica por medio de los dispositivos electrónicos. Esto quiere decir que este estudio, se puede definir

como la aplicación de la electrónica de estado sólido para el control y la conversión de energía eléctrica. (Rashid, 2004)

Para el control de la potencia eléctrica, se cuentan con 6 tipos:

- Rectificador de diodos: Convierte el voltaje de CA en un voltaje fijo de CD (el voltaje de entrada puede ser monofásico o trifásico).
- Convertidores CA-CD (rectificadores controlados): Transforma el voltaje de CA en un voltaje CD, donde el valor promedio de salida se puede controlar (la entrada puede ser mono o trifásica).
- Convertidores CA-CA (Controladores de voltaje CA): Se utilizan para obtener un voltaje de salida de CA variable, a partir de una fuente de CA fija.
- Convertidores CD-CD (pulsadores de CD): Permite controlar el voltaje de salida de una fuente de CD a una salida de CD.
- Convertidores CD-CA (inversor): Se emplea para obtener un voltaje de CA con frecuencia y valor máximo deseado, a partir de una fuente de CD mediante transistores.
- Interruptores estáticos: Dado que los dispositivos de potencia pueden ser operados como contactores, la alimentación de estos interruptores puede ser de CA o CD y se conocen como interruptores estáticos.

4.2.4 Tipos de baterías

Las baterías son elementos capaces de almacenar energía eléctrica por medio de una reacción química (oxido-reducción). Con base en esto, se pueden clasificar en dos categorías: primaria, cuya carga no puede renovarse cuando se descarga, a menos que se restablezcan los

componentes químicos presentes en la batería. Y secundaria, que posee la capacidad de restaurar la composición química por medio del paso prolongado de una corriente eléctrica, en sentido inverso al cual fluye normalmente la energía. (Peña, 2011)

Para el desarrollo de este proyecto, se hará énfasis en baterías secundarias, las cuales permiten un amplio rango de capacidades de almacenamiento y voltaje de trabajo. En esta categoría, se presentan diversas composiciones químicas de acuerdo con los elementos empleados en su fabricación, entre ellas se encuentran:

4.2.4.1 Baterías plomo-ácido. Son baterías formadas por un depósito de ácido sulfúrico, y en su interior cuentan con una serie de placas de plomo colocadas de manera alterna. Son usadas comúnmente en vehículos híbridos, debido a que poseen una gran capacidad de descarga durante un corto periodo de tiempo, lo cual las hace ideales para el arranque del medio de transporte.

Además, poseen excelente capacidad para suministrar picos de corriente altos durante la descarga, alta eficiencia y una tasa de autodescarga mensual muy baja. No obstante, tienen elevado peso por el uso de plomo, largos periodos de recarga y corta vida cíclica. (Peña, 2011)

4.2.4.2 Baterías de níquel-cadmio. Están conformadas por un cátodo de hidróxido de níquel (Ni(OH)_2), un ánodo de un compuesto de cadmio y un electrolito de hidróxido de potasio (KOH). Adicionalmente, cuando se encuentran en su estado final de carga, se produce un aumento súbito de tensión, conocido como “delta peak”, lo cual permite identificar el final de recarga.

Por otro lado, su composición permite un amplio comportamiento frente a las temperaturas (-40°C a 60°C), admiten sobrecargas y larga vida cíclica, sin embargo, su precio es alto y el cadmio

es altamente contaminante. Otro factor negativo presente en la batería es el bajo nivel que toma la tensión nominal por celda y el valor de autodescarga (10% mensual). (Peña, 2011)

4.2.4.3 Baterías de níquel-hidruro metálico. Poseen una curva de rendimiento muy similar a las baterías de NiCd y también producen delta peak. La diferencia entre ambos tipos de baterías tiene como punto de partida, la implementación de un ánodo de hidróxido de níquel y una aleación de hidruro metálico, mejorando y, eliminando a su vez, el uso del cadmio. De esta manera, se obtiene un aumento en la capacidad, disminución del peso y un efecto reducido de memoria.

Estas ventajas incluyen mayor densidad energética y energía específica, menor contaminación y mayor seguridad, no obstante, produce una mayor autodescarga, entre el 15 y 20% por mes, bajo voltaje por celda y una vida cíclica media. (Peña, 2011)

4.2.4.4 Baterías de litio. El litio es un material ligero y con un peso atómico bajo, lo que proporciona un gran potencial químico y, en consecuencia, una mayor capacidad para almacenar energía con un poco peso. Asimismo, una sola celda es capaz de proveer un mayor voltaje, 3 veces más que las baterías de níquel.

Por tal razón, estas baterías tienen alta densidad energética y energía específica, un bajo efecto de autodescarga y no necesitan mantenimiento. Sin embargo, requieren de un circuito de seguridad para regular los límites de voltaje y su precio resulta costoso. (Peña, 2011)

4.2.4.5 Baterías de polímero de litio. Se diferencian de las demás baterías de litio por emplear un polímero como electrolito, este material ofrece la capacidad de alcanzar grosores hasta

de un milímetro. Adicionalmente, estas baterías requieren de un gel especial para limitar las altas temperaturas que se pueden presentar.

Entre sus ventajas destacan su alta densidad energética, poco peso y su bajo nivel de autodescarga. A pesar de esto, requieren un circuito de seguridad, poseen limitaciones en su transporte y pueden ser peligrosas si se perforan. (Peña, 2011)

4.2.5 Sistemas de control

El concepto de sistema de control está demarcado como el conjunto de elementos que trabajan de manera conjunta para suministrar la respuesta esperada. Un sistema de control ideal debe garantizar estabilidad y, adicionalmente, ser lo suficientemente vigoroso para hacer frente a las perturbaciones y errores que se pueden presentar en los modelos. Además de esto, debe ser sumamente eficiente y sencillo de implementar. De acuerdo con lo anterior, los tipos de sistemas de control más comunes son los sistemas de control a lazo abierto y a lazo cerrado.

En el sistema de control a lazo abierto, la salida no se ve afectada por la señal de entrada, lo cual significa que en este sistema no hay realimentación. Por otra parte, en el sistema de control a lazo cerrado se indica una acción de control realimentada para reducir el error del sistema. (Carrillo, 2011)

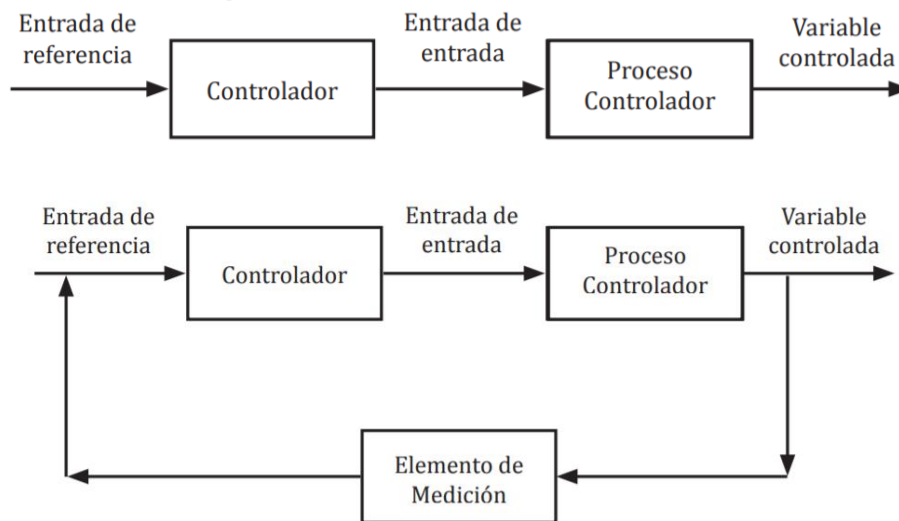
En Teoría de control, cada uno de los elementos o componentes que tengan la capacidad de responder de una forma característica frente a una excitación definida se denominan como bloques. (Roca, 2014).

Con base en el concepto anterior, es posible definir otro término fundamental en la Teoría de control, denominada Función de transferencia, la cual es un modelo matemático que representa

el comportamiento dinámico de un bloque frente a una señal de entrada. Por tal razón, entender con exactitud la relación entrada/salida permite pronosticar la respuesta del sistema y, a su vez, facilita la selección y ajuste de la acción de control necesaria para obtener el objetivo final, frente a las perturbaciones presentes en el exterior del sistema. (Hernández, 2016).

Figura 3.

Sistema de control de lazo abierto y cerrado



Nota: La figura de la parte superior representa el sistema de lazo abierto y la figura de la parte inferior el lazo cerrado. Tomado de: Fondo editorial (s.f.) *Sistema de control* http://150.185.9.18/fondo_editorial/images/PDF/CUPUL/SISTEMA%20DE%20CONTROL%20%201.pdf

4.2.6 Sistema de frenado

Para la seguridad del pasajero, es necesario que en el vehículo se encuentre incluido el sistema de frenado, con el fin de proteger la integridad del conductor y personas en el medio de

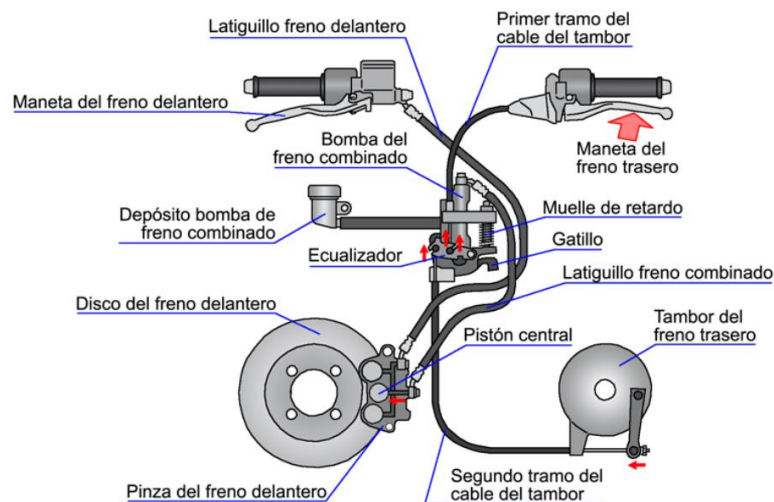
transporte, al momento de tener que disminuir su velocidad por un semáforo, tránsito o una parada de emergencia.

Por lo general, en las motocicletas se utiliza como medio de accionamiento un sistema hidráulico, el cual se acciona al momento que se presiona el pedal del freno. En ese instante un cilindro se encarga de impulsar el líquido de frenos a través de mangueras hasta donde se encuentran los frenos en las ruedas. La presión producida por el líquido generará la fuerza necesaria para poder detener el vehículo por medio de unas pastillas o materiales de fricción. Dichos elementos suelen ser piezas metálicas o cerámicas capaces de soportar altas temperaturas sin desgastarse y deteriorarse rápidamente. (Miranda, 2013)

En la figura 4 se muestran los componentes que se emplean en el sistema de frenado por fricción de una motocicleta.

Figura 4.

Sistema de frenado por fricción



Nota: Tomado de: Moto (s.f.) *Rueda alta honda sh mode* <https://www.moto125.cc/890-rueda-alta-honda-sh-mode/>

El sistema de frenado hidráulico está conformado por:

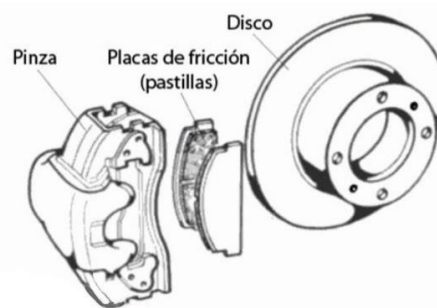
- Bomba de frenos.
- Válvula dosificadora.
- Booster.
- Mordaza Caliper (frenos de disco).
- Cilindro de rueda (freno de tambor).
- Mangueras y línea de conducción.

Se pueden presentar dos tipos de freno:

4.2.6.1 Frenos de disco. Los frenos de disco están compuestos por un disco metálico sujeto a la rueda, en cada una de las caras se encuentran pastillas planas, las cuales, al ser accionadas por la presión hidráulica ejercida desde el cilindro, presionan las pastillas por ambos lados del rotor por medio de las pinzas, de manera que generan la suficiente fricción para producir un descenso de la velocidad hasta el punto de detener el vehículo en su totalidad. (Miranda, 2013)

Figura 5.

Freno de disco



Nota: Tomado de Autonocion (s.f.) *Frenos disco tambor componente tipos funcionamiento*

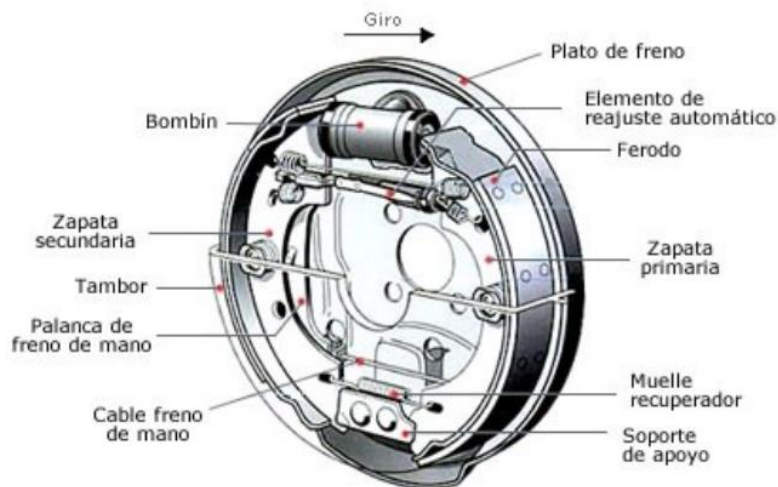
<https://www.autonocion.com/frenos-disco-tambor-componentes-tipos-funcionamiento/>

Como el calor es un factor determinante en el correcto funcionamiento de los frenos, debido que al aumentar la temperatura (hasta 260°C) se disminuye el factor de fricción, lo que produce una prolongación de la distancia y tiempo de frenado del vehículo, por lo que, para ayudar en el control de la temperatura, los discos pueden tener espacios huecos entre sus caras. (Miranda, 2013)

4.2.6.2 Freno de tambor. Este tipo de frenos constan de un tambor de acero o hierro que va sujeto a la rueda de forma que ambos elementos giran simultáneamente. En su interior se encuentran dos zapatas, provistas de forros de un material muy resistente al calor, las cuales son presionadas contra la periferia interna del tambor por acción del bombín. Lo que genera fricción entre el tambor y la zapata, frenando así la rueda y reduciendo su velocidad. (Miranda, 2013)

Figura 6.

Freno de tambor



Nota: Tomado de Autonocion (s.f.) *Frenos disco tambor componente tipos funcionamiento*

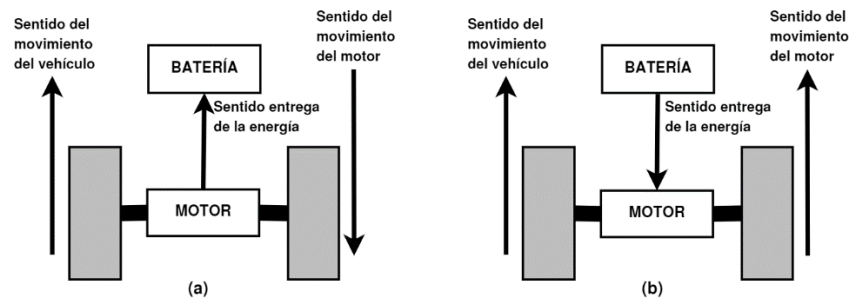
<https://www.autonocion.com/frenos-disco-tambor-componentes-tipos-funcionamiento/>

A causa del desgaste presente en la superficie exterior de la zapata contra el tambor, produce que aquella quede cada vez más separada del tambor en la posición de reposo, lo que genera un mayor recorrido muerto en la acción de frenado y por ende mayor cantidad de líquido requerido desde la bomba. Por lo tanto, se debe realizar un reglaje periódico de los frenos para aproximar las zapatas al tambor lo máximo permitido, sin que llegue a producirse el rozamiento. (Miranda, 2013)

4.2.7 Sistema de freno regenerativo

Actualmente, el concepto de freno regenerativo se ha implementado en los vehículos eléctricos, este sistema consiste en recuperar la energía cinética que permite transformar parte de esta, en energía eléctrica a partir de la etapa de frenado. La energía eléctrica mencionada anteriormente, es almacenada en bancos de baterías o condensadores.

El funcionamiento del sistema se centra en utilizar el motor para reducir la velocidad del vehículo, al aplicar fuerza al pedal del freno. En este instante, el motor eléctrico funciona en dirección inversa, lo cual disminuye la velocidad. Al momento de cambiar el sentido de giro, empieza a actuar como generador, produciendo la energía eléctrica necesaria para la recarga de los almacenadores. (Monroy et al., 2020)

Figura 7.*Esquema freno regenerativo*

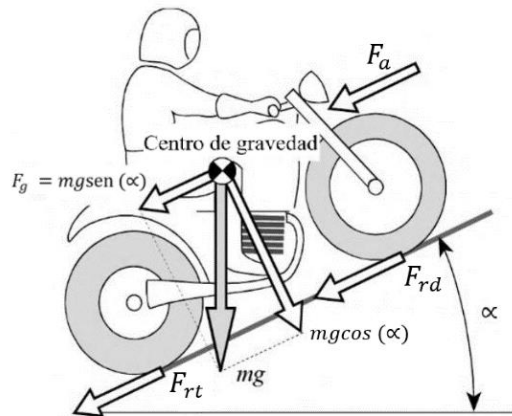
Nota: Revista U Industrial (s.f.) *Esquema freno regenerativo*

<https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/reving/article/view/16220/16101>

5. Dinámica de una motocicleta

Para determinar las magnitudes físicas que contribuyen con el desarrollo del sistema de control regenerativo, es necesario realizar un modelado con base en el análisis dinámico del vehículo de tres ruedas.

Es importante resaltar que el sistema trabaja con un grado de libertad, es decir, un movimiento longitudinal, por lo tanto, el ángulo de cabeceo no se considera.

Figura 8.*Esquema básico de la motocicleta*

Nota: Google. (s.f.) Motorcycle Dynamics

https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=rJTQxITnkgC&oi=fnd&pg=PR5&dq=Vittore+Cossalter,+%E2%80%9CMotorcycle+Dynamics%E2%80%9D&ots=D-eRGheTsE&sig=_A5s7ILN3naDmqbq1B32SZ55Dkc&redir_esc=y#v=onepage&q&f=true

Para comenzar con este análisis, se presenta un diagrama que describe la interacción de las fuerzas principales en el vehículo mientras está en movimiento. En primer lugar, se tiene la fuerza de resistencia a la rodadura, la cual se opone al giro, y a su vez, al desplazamiento del medio de transporte. Además de esta, existe otra fuerza denominada como fuerza de resistencia aerodinámica que actúa sobre el cuerpo del vehículo. Finalmente, el diagrama posee una última fuerza señalada como fuerza gravitacional la cual se posiciona justo en el centro de gravedad del objeto, y adicionalmente, se divide en dos componentes cuando el vehículo se sitúa en una pendiente. (Nian et. al, 2014)

La ecuación elemental que describe el análisis dinámico del vehículo se define de la siguiente manera:

$$m \cdot a_x(t) = F_t(t) - F_{rd}(t) - F_{rt}(t) - F_a(t) - F_g \quad (1)$$

Donde $F_t(t)$ [N] es la fuerza de tracción que impulsa al vehículo hacia adelante.

Adicionalmente, la fuerza de resistencia a la rodadura delantera F_{rd} [N] se puede determinar mediante la ecuación (2).

$$F_{rd} = C_f \cdot N_d \quad (2)$$

Donde N_d [N] es la fuerza normal delantera. Por otro lado, el coeficiente de fricción C_f depende de diversos factores tales como: la velocidad lineal del vehículo v [m/s], condiciones del suelo y presión de los neumáticos. (Nian et. al, 2014)

Además de esto, la fuerza de resistencia a la rodadura trasera $F_{rt}(t)$ [N] se calcula con la ecuación (3).

$$F_{rt}(t) = [C_f + C_2 \cdot v(t)^2] \cdot N_t \quad (3)$$

En este caso, N_t [N] se denomina como fuerza normal trasera y C_2 es un parámetro constante que toma el valor de 7×10^{-6} [s²/m²] (Di Rado et. al, 2013)

También, N_d [N] se suma con N_t [N] para dar como resultado la fuerza normal total N_{total} [N] mostrada en la ecuación (4).

$$N_{total} = N_t + N_d = m \cdot g \cdot \cos(\alpha) \quad (4)$$

Por otra parte, la fuerza de resistencia aerodinámica $F_a(t)$ [N] se define empleando la ecuación (5).

$$F_a(t) = \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot A_f \cdot C_a \cdot v(t)^2 \quad (5)$$

F_a [N] está en función de la velocidad lineal del vehículo v [m/s], de la densidad del aire ρ_a [kg/m³], del área frontal A_f [m²] y del coeficiente de arrastre C_a , que es un valor constante.

Para continuar, el comportamiento de la fuerza gravitacional F_g [N] se modela con la ecuación (6).

$$F_g = m \cdot g \cdot \text{sen}(\alpha) \quad (6)$$

Donde m es la masa [kg], g es la gravedad $\left[\frac{m}{s^2}\right]$ y α el ángulo de inclinación en [°].

Para finalizar, se presenta una tabla que describe cada uno de los términos de las ecuaciones mencionadas previamente.

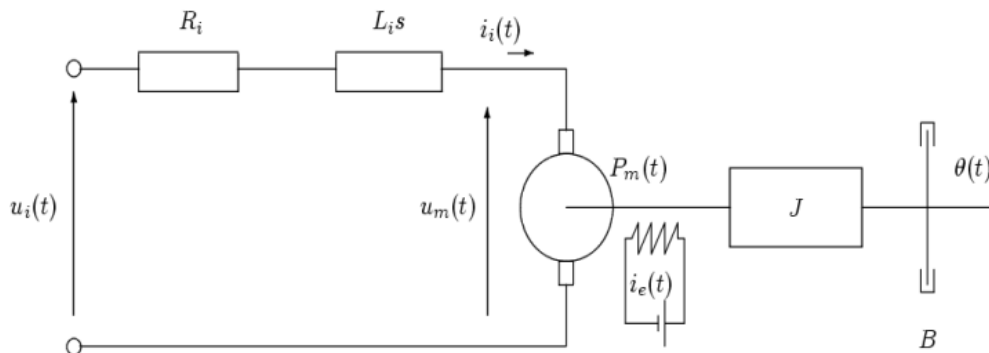
Tabla 2.

Descripción de los parámetros usados en el modelo dinámico

	Descripción		Descripción
m	Masa del vehículo	α	Ángulo de inclinación
a_x	Aceleración longitudinal	ρ_a	Densidad del aire
v	Velocidad lineal	A_f	Área frontal
C_f	Coefficiente de fricción	C_a	Coefficiente de arrastre
C_2	Parámetro constante	g	Gravedad

5.1 Modelo del motor BLDC

El esquema de un motor eléctrico sin escobillas de corriente continua (BLDC) se puede observar en la figura 9.

Figura 9.*Esquema motor BLDC*

Nota: Isa Uniovi (s.f.) Modelado motor CC

<http://isa.uniovi.es/~idiaz/ADSTel/Practicas/ModeladoMotorCC.html>

Asumiendo que las condiciones iniciales son cero y aplicando el método de la transformada de Laplace, el comportamiento del motor BLDC se modela con las ecuaciones (6), (7) y (8).

$$K_a \cdot s \cdot \theta(s) = E_b(s) \quad (6)$$

$$(L_a \cdot s + R_a) \cdot I_a(s) + E_b(s) = E_a(s) \quad (7)$$

$$(J \cdot s^2 + B \cdot s) \cdot \theta(s) = T(s) = K_m \cdot I_a(s) \quad (8)$$

Considerando $E_a(s)$ como entrada y $\omega(s)$ como salida, se obtiene la ecuación (9) que representa la función transferencia.

$$\frac{\omega(s)}{E_a(s)} = \frac{K_m}{L_a \cdot J \cdot s^2 + (L_a \cdot B + R_a \cdot J) \cdot s + R_a \cdot B + K_m \cdot K_a} \quad (9)$$

En este caso, el motor escogido de la marca MiroMAX trabaja con 48v y 10kW. Su ficha técnica contiene los diferentes datos que serán empleados para hallar las constantes de la ecuación (9). Primeramente, se realiza una división para cada voltaje sobre su respectivo valor de velocidad angular, luego de esto, se calcula un promedio entre esos valores y el resultado final es la constante

de la fuerza contraelectromotriz $K_a = 0,1125 \left[\frac{V}{rad/s} \right]$. Además de esto, $K_m = 0,0973 \left[\frac{N \cdot m}{A} \right]$ es la constante del torque-motor. En primer lugar, se divide cada torque sobre su respectiva corriente, posterior a esto, se halla el promedio entre esos datos y el valor final es K_m . Adicionalmente, los valores de la inductancia $L_a = 48 \cdot 10^{-6}$ [H] y resistencia de la armadura $R_a = 3,8 \cdot 10^{-3}$ [Ω] se escogen de acuerdo a la ficha técnica.

Por otra parte, para el coeficiente viscoso de fricción B se seleccionó un valor de 0.45 $\left[\frac{N \cdot m}{rad/s} \right]$. (Becerra Vargas et al., 2014)

Para finalizar, el momento de inercia del motor J se asumió como 3 $[kg \cdot m^2]$.

Tabla 3.

Descripción de los parámetros usados en el modelo del motor BLDC

Descripción		Descripción	
R_a	Resistencia de la armadura	B	Coficiente viscoso de fricción
K_m	Constante del torque-motor	J	Momento de inercia del motor
L_a	Inductancia de la armadura	K_a	Constante de back EMF

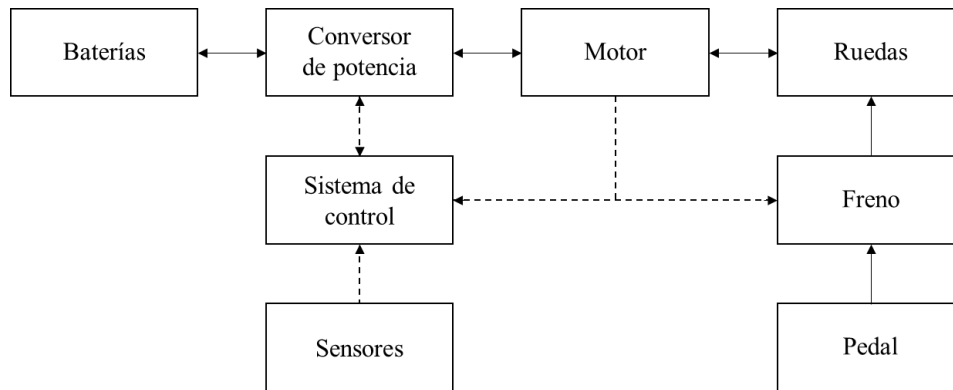
6. Diseño Metodológico

6.1 Análisis y selección de alternativas para el sistema de frenado regenerativo

Se realiza un estudio exhaustivo de las posibles alternativas de diseño para el sistema de frenado regenerativo, las cuales deben cumplir con la información plasmada en los objetivos. Con base a esto, se presentan las propuestas de acuerdo con los antecedentes mencionados previamente:

6.1.1 *Alternativa Uno*

La alternativa uno consta de un sistema de almacenamiento (batería) que suministra energía al convertidor de potencia, y de esta manera, logra alimentar al motor para impulsar las ruedas. Además, todo el sistema cuenta con un controlador, que se ve realimentado mediante la información proveniente de los sensores. Cuando se presenta la etapa de regeneración, las ruedas transferirán la energía cinética almacenada al motor (generador), para así recargar la batería nuevamente y recuperar parte de la energía.

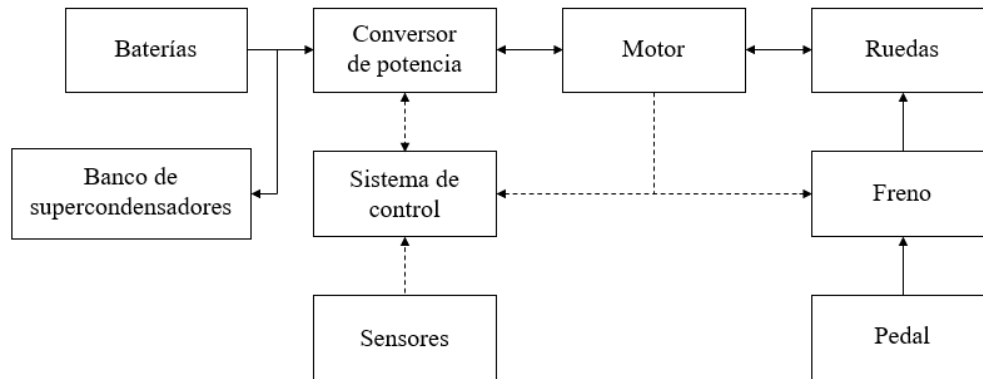
Figura 10.*Esquema de la alternativa uno*

6.1.2 Alternativa Dos

Por su parte, la alternativa dos posee el mismo principio de funcionamiento de la primera opción, debido a que la batería proporciona la energía que pasa por el convertor de potencia y el motor, para llegar finalmente a las ruedas. Sin embargo, la diferencia se aprecia principalmente en la etapa de regeneración, donde el sistema almacena la energía momentáneamente en un banco de supercondensadores, posteriormente utilizados como fuente secundaria para la aceleración del vehículo.

Figura 11.

Esquema de la alternativa dos

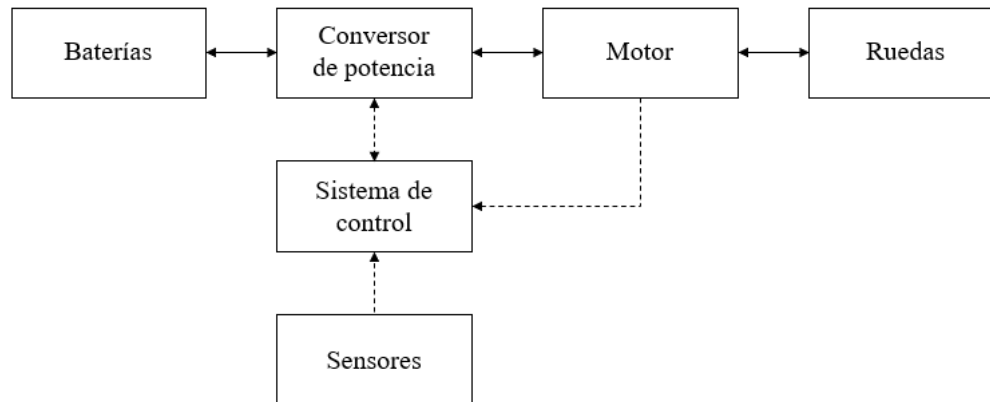


6.1.3 Alternativa Tres

Finalmente, la tercera alternativa cuenta con un sistema en serie, que transmite la energía de la batería a las ruedas y, en la etapa regenerativa, estas proveen la fuente energética necesaria para recargar nuevamente la batería. No obstante, el aspecto que caracteriza este modelo de diseño es la eliminación del sistema general de frenado por medio de fricción, de esta manera, el sistema regenerativo se encarga totalmente de la reducción de velocidad.

Figura 12.

Esquema de la alternativa tres



6.1.4 Selección del sistema general de trabajo

Luego del estudio y análisis de las tres alternativas propuestas anteriormente, se debe realizar un proceso de selección basado en las ventajas y fortalezas que consolidan los diferentes puntos clave para el usuario.

Para desarrollar esto, es sumamente importante tener en cuenta los parámetros de diseño, la información plasmada en los objetivos y los referentes teóricos. Para la evaluación de las alternativas, se debe tener presente la siguiente puntuación.

Tabla 4.*Valoración y rango para la calificación*

Valoración	Rango
Regular	0-1
Aceptable	1-2
Bueno	2-3
Muy bueno	3-4

Nota: Los valores fueron seleccionados de acuerdo con el criterio de los autores.

Los parámetros analizados para ejecutar este proceso de selección son: volumen, complejidad, economía, seguridad y autonomía. Los cuales fueron evaluados según los puntajes mencionados anteriormente y se muestran en la tabla cuatro.

Tabla 5.*Análisis de alternativas*

Parámetros	Alternativa 1	Puntaje	Alternativa 2	Puntaje	Alternativa 3	Puntaje
Volumen	El sistema de control y de frenado convencional ocupan un espacio reducido en el vehículo.	4	Al poseer un banco de supercondensadores, se requiere un mayor espacio.	2	Precisa un menor espacio debido a que cuenta únicamente con el sistema de control.	4
Complejidad	Requiere un sistema de control capaz de regenerar las baterías y el freno convencional.	3,5	Requiere un sistema de control que determine el paso de la energía a los supercondensadores, junto con el freno convencional.	3	Requiere únicamente el sistema de control para la regeneración del sistema.	4
Economía	Bajo costo de fabricación.	3	Costo moderado a causa del banco de condensadores.	2	Bajo costo de fabricación.	3,5
Seguridad	Alto grado de seguridad debido al sistema de frenado regenerativo y el frenado convencional.	4	Mejora la seguridad del usuario, al contar con un frenado regenerativo y un freno convencional auxiliar.	4	Reducción ligera de seguridad por la presencia única del sistema regenerativo.	2,5
Autonomía	El tiempo de vida útil del vehículo aumenta cuando se almacena en la batería un porcentaje de energía recuperado.	4	La cantidad de energía se ve limitada por la recuperación realizada en el banco de supercondensadores.	3,5	Al momento de almacenar un porcentaje de energía en la batería, el periodo de vida útil se extiende.	4
Puntaje total		18,5		14,5		18

Nota: Los valores y descripciones de las diferentes alternativas fueron asignados por los autores

A continuación, se ilustra una tabla donde se presentan los parámetros con su respectivo nivel, que indica la importancia que tienen estos frente a las necesidades del usuario y del mismo modo, el valor de ponderación según los puntajes establecidos en la tabla 5, con el fin de seleccionar la alternativa más idónea para el proyecto.

Tabla 6.

Ponderación de las alternativas

Parámetros	Ponderación	Alternativa 1		Alternativa 2		Alternativa 3	
		Puntaje	Ponderado	Puntaje	Ponderado	Puntaje	Ponderado
Volumen	20%	4	0,8	2	0,4	4	0,8
Complejidad	10%	3,5	0,35	3	0,3	4	0,4
Economía	15%	3	0,45	2	0,3	3,5	0,53
Seguridad	30%	4	1,2	4	1,2	2,5	0,75
Autonomía	25%	4	1	3,5	0,88	4	1
Puntaje total	100%	18,5	3,8	14,5	3,08	18	3,48

Nota: Los valores porcentuales se determinaron bajo el criterio de los autores según la importancia de los parámetros en su diseño.

Finalmente, de acuerdo con el puntaje ponderado total, se escoge la alternativa número uno como propuesta de diseño para el sistema de freno regenerativo en un vehículo eléctrico.

Es importante resaltar que la alternativa de diseño se escogió bajo uno de los criterios principales; disponer de tres ruedas. De esta manera, se garantiza mayor estabilidad, comodidad y seguridad para los usuarios. Adicionalmente, otra ventaja que posee esta motocicleta es la capacidad que tiene para frenar, puesto que, las tres ruedas facilitan la posibilidad para detener el vehículo en menos tiempo y distancia.

6.2 Planteamiento del algoritmo de frenado regenerativo

En primer lugar, para determinar el torque máximo que puede regenerar el motor, se emplea su curva característica que se describe mediante la ecuación (10).

$$T_{mm} = \begin{cases} T_b \frac{RPM_m \leq RPM_b}{RPM_m} \\ \frac{Pot_b}{9550 \cdot RPM_m} \frac{RPM_m > RPM_b}{RPM_m} \end{cases} \quad (10)$$

Donde T_{mm} [$N \cdot m$] se define como el torque de frenado máximo del motor y T_b [$N \cdot m$] como el torque base de este. Por otra parte, RPM_m es la velocidad angular del motor y RPM_b es la velocidad angular base del motor, además Pot_b [kW] es la potencia base de este.

Sin embargo, es complejo que un motor genere electricidad y entregue energía para el sistema de almacenamiento, puesto que, a baja velocidad angular no se genera suficiente fuerza motriz eléctrica. Por lo tanto, se debe establecer un factor de ponderación K_v para solventar la problemática anterior, del mismo modo, se considera otro factor K_{SOC} que tiene como propósito; proteger la batería de una sobrecarga que afecta la vida útil de la batería en cuestión. (Guo et. al, 2014)

En síntesis, el torque de frenado regenerativo disponible T_{disp} se modela con la ecuación (11).

$$T_{disp} = T_{mm} \cdot K_v \cdot K_{SOC} \cdot K_{ME} \quad (11)$$

Finalmente, es necesario considerar un parámetro K_{ME} que se denomina como, factor de peso del estado del motor eléctrico. Por lo tanto, las ecuaciones (12), (13) y (14) se emplean para determinar todos los factores previamente.

$$K_v = \begin{cases} 0, & 0 \text{ km/h} \leq V < 10 \text{ km/h} \\ \frac{1}{20} \cdot V - \frac{1}{2}, & 10 \text{ km/h} \leq V < 30 \text{ km/h} \\ 1, & 30 \text{ km/h} \leq V \leq V_{max} \end{cases} \quad (12)$$

$$K_{SOC} = \begin{cases} 1, & SOC \leq 0.8 \\ -\frac{20}{3} \cdot SOC + \frac{19}{3}, & 0.8 < SOC < 0.95 \\ 0, & SOC \geq 0.95 \end{cases} \quad (13)$$

$$K_{ME} = \begin{cases} 0, & S = \text{peligro} \\ \frac{1}{3}, & S = \text{falla o defecto} \\ \frac{2}{3}, & S = \text{estado de alerta} \\ 1, & S = \text{normal} \end{cases} \quad (14)$$

Por otra parte, con la ecuación (15) se determina la fuerza que se debe aplicar en las ruedas para que el vehículo desacelere correctamente.

$$F_f = m \cdot a_x(t) - F_{ra}(t) - F_{rt}(t) - F_a(t) - F_g \quad (15)$$

Donde F_f [N] es la fuerza de frenado requerida.

6.3 Distribución de fuerza de frenado

En los vehículos eléctricos (VE) con tracción trasera, la fuerza de frenado de las ruedas de atrás está compuesta por; la fuerza de frenado regenerativa y la fuerza por fricción de las llantas traseras. Por consiguiente, esta distribución hace referencia a la totalidad de las fuerzas en cada rueda, la fricción de los neumáticos y la disposición de la fuerza de frenado regenerativo en las llantas. (Nian et.al, 2014)

Al frenar el vehículo, si el eje delantero y trasero se bloquean, y se arrastran de forma simultánea, la relación entre las fuerzas de frenado de las ruedas se denomina; curva de distribución ideal de fuerza de frenado, la cual garantiza que las llantas se bloqueen al mismo tiempo en

cualquier superficie con su respectivo coeficiente de adherencia, y que las condiciones de fijación al suelo se usen de la mejor manera. (Li et.al, 2020)

Por lo tanto, la fuerza de frenado de los ejes delantero y trasero cumplen con la ecuación (16).

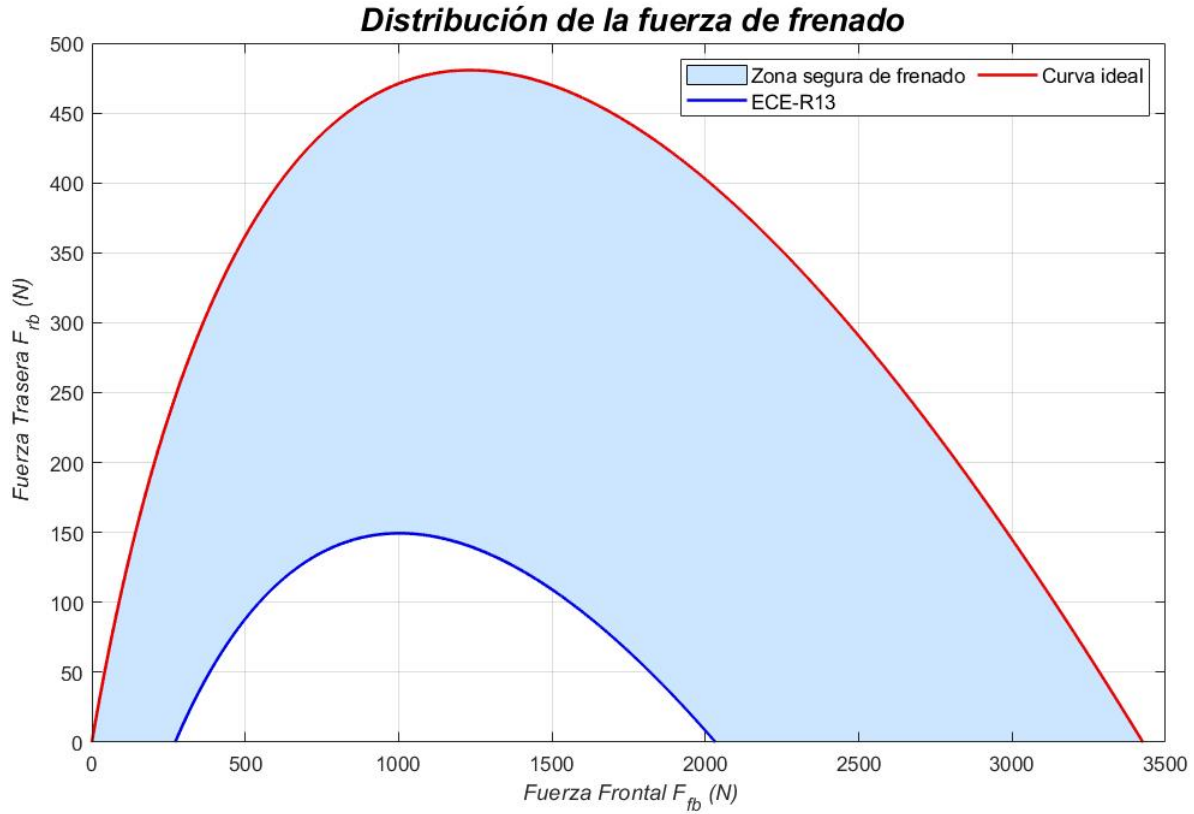
$$F_{ft} = \frac{1}{2} \left[\frac{m_v \cdot g}{h_g} \sqrt{b^2 + \frac{4 \cdot h_g \cdot L}{m_v \cdot g} F_{fd}} - \left(\frac{m_v \cdot g \cdot b}{h_g} + 2 \cdot F_{fd} \right) \right] \quad (16)$$

Donde F_{fd} [N] y F_{ft} [N] son las fuerzas de frenado delantera y trasera respectivamente, h_g [m] es la altura del centroide del VE, b [m] es el centroide del VE a la línea central del eje trasero y L [m] es la distancia entre los ejes delantero y trasero del VE.

Además de esto, según la regulación establecida por la normativa ECE-R13, la distribución de la fuerza de frenado mínima se determina empleando la ecuación (17). (Li et.al, 2020)

$$\frac{(F_{fd} + F_{ft})^2 \cdot h_g}{m \cdot g \cdot L} + \frac{b + 0.07 \cdot h_g}{L} \cdot (F_{fd} + F_{ft}) - 0.85 \cdot F_{fd} + 0.07 \cdot \frac{m \cdot g \cdot b}{L} = 0 \quad (17)$$

La figura 13 ilustra el comportamiento de la fuerza de frenado en el tren trasero, en función de la fuerza requerida para el tren delantero de acuerdo con las ecuaciones (16) y (17).

Figura 13.*Distribución de la fuerza de frenado*

Por otra parte, cuando se maneja un sistema de tracción trasera surge la necesidad de aprovechar la mayor cantidad energética posible en esa zona, por esta razón, la mejor configuración que se puede emplear y que mantiene la seguridad del conductor dentro de los rangos establecidos, es la distribución del freno que sigue el perfil de la curva ideal de frenado.

De acuerdo con la posición del pedal de freno brindada por el usuario, se va a enviar una señal de la fuerza requerida (F_f) para frenar el vehículo, la cual se ve representada con la ecuación (18).

$$F_f = F_{fd} + F_{ft} \quad (18)$$

Donde cada una de las fuerzas están en $[N]$. Adicionalmente, enlazando las ecuaciones (16) y (18) se calcula la fuerza mecánica requerida para el tren delantero. Posteriormente, para hallar la distribución del tren trasero, se debe medir la fuerza regenerativa que actúa en el frenado, para esto se determina el valor mínimo entre la fuerza neta del tren trasero y la regeneración máxima:

$$F_{reg} = \min \left(\frac{T_{disp} \cdot i_t}{R}, F_{ft} \right) \quad (19)$$

Si el valor mínimo es F_{ft} , se empleará únicamente el sistema eléctrico (regeneración), de lo contrario, se utilizarán los sistemas eléctricos y mecánicos de frenado para el tren trasero.

Así mismo, la energía que recuperaría el sistema durante el periodo de frenado se determina con la ecuación (20).

$$E_{reg} = \eta_t \int F_{reg} \cdot v(t) dt \quad (20)$$

Donde la eficiencia total del sistema (η_t) se define mediante la expresión (21).

$$\eta_t = \eta_b \cdot \eta_m \cdot \eta_i \quad (21)$$

Siendo η_b la eficiencia de la batería, η_m la eficiencia del motor y η_i la eficiencia del sistema de transmisión de potencia.

Por otra parte, se plantea la eficiencia de regeneración (η_{reg}) para evaluar la capacidad de recuperación energética durante el frenado de un ciclo de trabajo establecido.

$$\eta_{reg} = \frac{\eta_t \int F_{reg} \cdot v(t) dt}{\int F_f \cdot v(t) dt} \quad (22)$$

De la misma manera, para dar una aproximación del estado de carga se emplea la ecuación (23).

$$SoC_{actual} = SoC_o - \frac{\int Pot_{elec}(t) dt}{3600 \cdot CAP_{bate}} \quad (23)$$

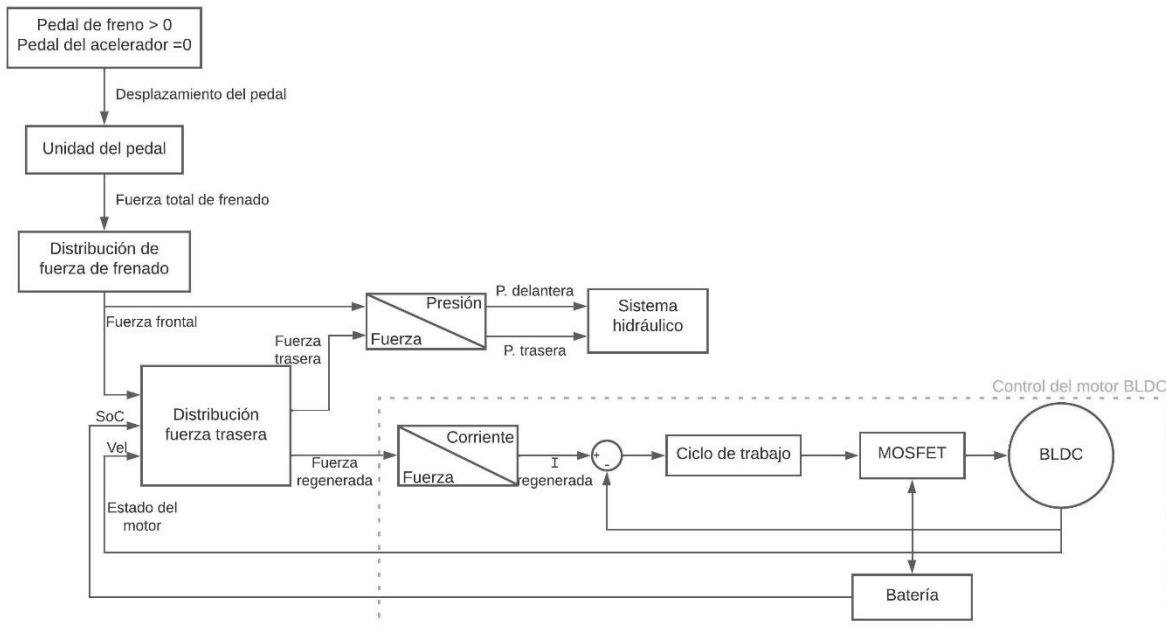
Donde SoC_o es el estado inicial de carga de la batería y CAP_{bate} [kWh] es la capacidad máxima de la batería.

Adicionalmente, la potencia eléctrica (Pot_{el}) [kW] se define como la resta entre la potencia consumida por el motor en el periodo de tracción y la potencia neta recuperada por el sistema durante el periodo de frenado. (Monroy et. al, 2020)

Para finalizar, como resultado del proceso completo del sistema regenerativo, en la figura 14 se presenta de manera conceptual el diagrama propuesto del algoritmo del sistema de frenado y control.

Figura 14.

Diagrama del algoritmo del sistema de frenado y control

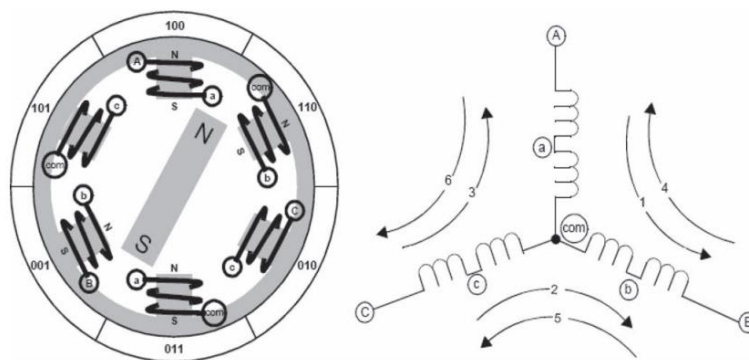


6.4 Sistema de control para un motor BLDC

Los motores eléctricos sin escobillas de corriente continua se caracterizan por su alta densidad de potencia, óptima relación torque-velocidad, alta eficiencia, amplio rango de velocidades y bajo mantenimiento, por lo tanto, se implementan con mayor frecuencia en los vehículos eléctricos. Por otra parte, la figura 15 ilustra los imanes permanentes que se encuentran en el rotor, y los devanados de la armadura que se localizan en el estator junto con su núcleo ferromagnético. (Nian et.al, 2014)

Figura 15.

Motor eléctrico sin escobillas de corriente continua



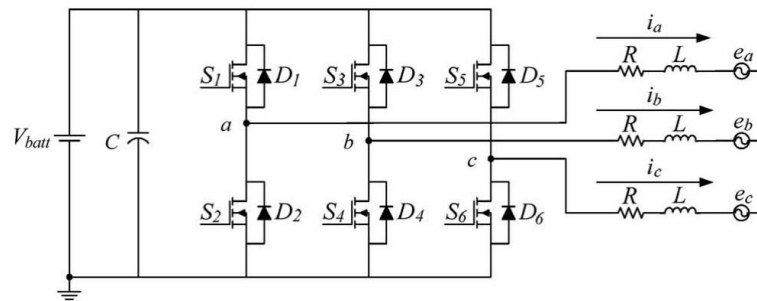
Nota: Tomado de: Xiaohong N.; Fei P.; Hang Z. (2017) *Regenerative Braking System of Electric Vehicle Driven by Brushless DC Motor* <https://doi.org/10.1109/TIE.2014.2300059>

Es importante resaltar que el movimiento del motor se inicia con los pares opuestos del devanado con respecto a los imanes, por esta razón, se emplean sensores de efecto Hall porque son los sensores más idóneos para predecir la posición del rotor. (Nian et. al, 2014)

Por otra parte, para realizar el control de un motor BLDC se requiere una electrónica relativamente compleja. El circuito mostrado en la figura 16 se usa con mayor frecuencia y se denomina como puente H, donde cada fase del motor se encuentra conectada al lado alto y bajo de los interruptores. (Yang et. al, 2014)

Figura 16.

Circuito equivalente del motor BLDC: Puente H

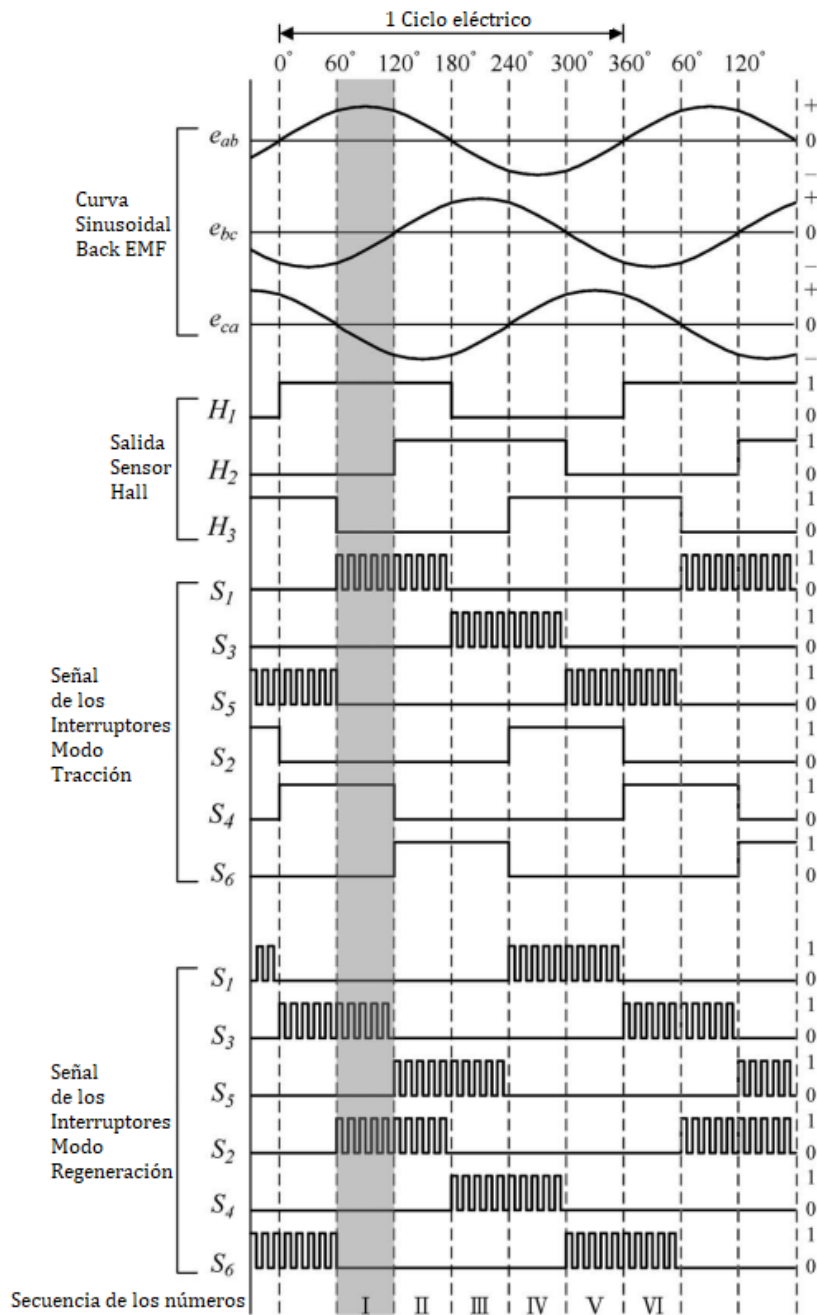


Nota: Tomado de: Ming-Ji Y.; Hong-Lin J.; Bin-Yen M.; Kuo-Kai S. (2010) *A Cost-Effective Method of Electric Brake With Energy Regeneration for Electric Vehicles*
<https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2015356>

Además de esto, R y L se definen como resistencia e inductancia de la armadura respectivamente. Por otra parte, e_a, e_b y e_c ; son las fuerzas contraelectromotrices (back EMFs) de las fases a, b y c , adicionalmente, i_a, i_b e i_c ; son las corrientes de la armadura para cada fase. Por último, S_1-S_6 son las señales de los seis interruptores para el control del motor, donde cada uno está acompañado de su diodo D_1-D_6 . (Yang et. al, 2014)

Figura 17.

Circuito equivalente y secuencias de señales



Nota: Tomado de: Ming-Ji Y.; Hong-Lin J.; Bin-Yen M.; Kuo-Kai S. (2010) *A Cost-Effective Method of Electric Brake With Energy Regeneration for Electric Vehicles*

<https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2015356>

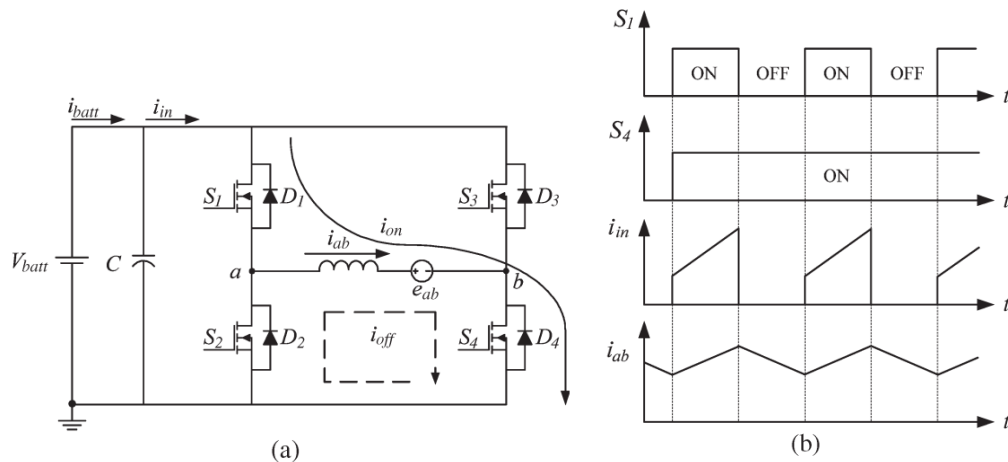
En la figura 17 se presenta la secuencia eléctrica mostrando las fuerzas contraelectromotrices, las lecturas de los tres sensores hall (H_1-H_3), el control de los interruptores en el modo de tracción y en el modo de recuperación de energía. Adicionalmente, se puede apreciar que una secuencia completa de conmutación se fundamenta en seis estados ($I - VI$). (Yang et. al, 2014)

6.4.1 Modo de tracción para un motor BLDC

Para el modo de tracción se operan los interruptores S_1 , S_3 y S_5 por medio de la modulación de ancho de pulso (PMD), por su parte, los interruptores S_2 , S_4 y S_6 trabajan en un estado alto o bajo. Primeramente, para el estado I (área sombreada de la figura 17) se identifica su comportamiento en la figura 18, donde son operados los interruptores S_1 y S_4 , además, la corriente del inductor i_{ab} se incrementaría por el bucle de corriente del devanado. Cuando el campo magnético generado por el devanado aumenta, la tensión de inducción inversa e_{ab} tiene que resistir la variación del campo de acuerdo con la ley de Lenz. Por otra parte, cuando el interruptor S_1 entra en estado *off*; la corriente fluye por el diodo volante (freewheeling) y el interruptor S_4 , esto va a producir la corriente de descarga i_{off} . Finalmente, este proceso se debe realizar para el resto de los estados ($II - VI$) donde el sistema actúa con la configuración indicada de interruptores. (Yoong et. al, 2014)

Figura 18.

(a) Circuito equivalente, (b) Estado de los interruptores, formas de onda de las corrientes de entrada y de fase.



Nota: Tomado de: Ming-Ji Y.; Hong-Lin J.; Bin-Yen M.; Kuo-Kai S. (2010) *A Cost-Effective Method of Electric Brake With Energy Regeneration for Electric Vehicles*
<https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2015356>

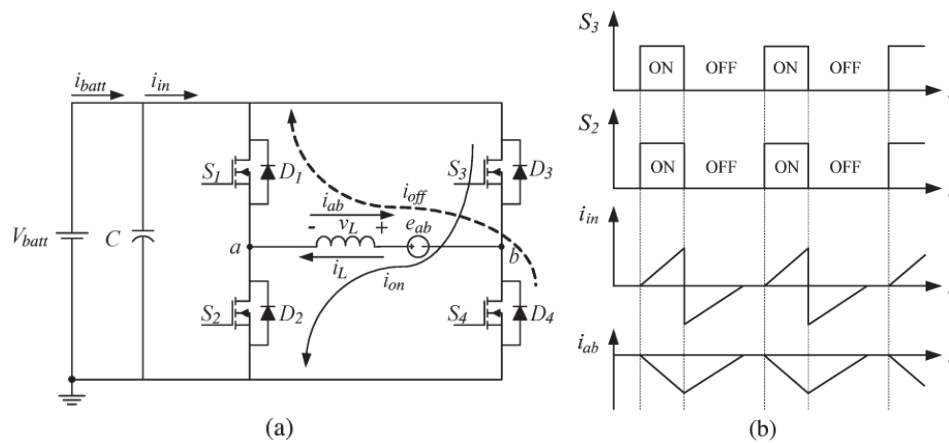
6.4.2 Modo de REGENERACIÓN para un motor BLDC

Cuando se detecta la señal de frenado, es necesario modificar la estrategia de control del motor. La figura 19 muestra que en el estado *I* trabajan los interruptores S_2 y S_3 , además, cuando ambos se encuentran en operación, el sistema cambia a modo regenerativo y convierte la back EMF (e_{ab}) en una fuente de voltaje. Durante el periodo *on* de los interruptores el devanado será energizado, de tal forma que, el voltaje de la bobina (V_L) es igual a $V_{batt} + e_{ab}$, por su parte, la corriente i_{in} es equivalente a $-i_{ab}$ o i_{on} . Por otro lado, cuando los dos interruptores se encuentran en estado *off*, la corriente i_{in} que fluye a través de los diodos freewheeling (D_1 y D_4) es igual a

i_{ab} , por lo tanto, se crea un camino de corriente i_{off} , y con este se alimenta la batería. (Yoong et. al, 2014)

Figura 19.

(a) Circuito equivalente, (b) Estado de los interruptores, comportamiento de las corrientes de entrada y de fase.



Nota: Tomado de: Ming-Ji Y.; Hong-Lin J.; Bin-Yen M.; Kuo-Kai S. (2010) A Cost-Effective Method of Electric Brake With Energy Regeneration for Electric Vehicles Recuperado de: <https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2015356>

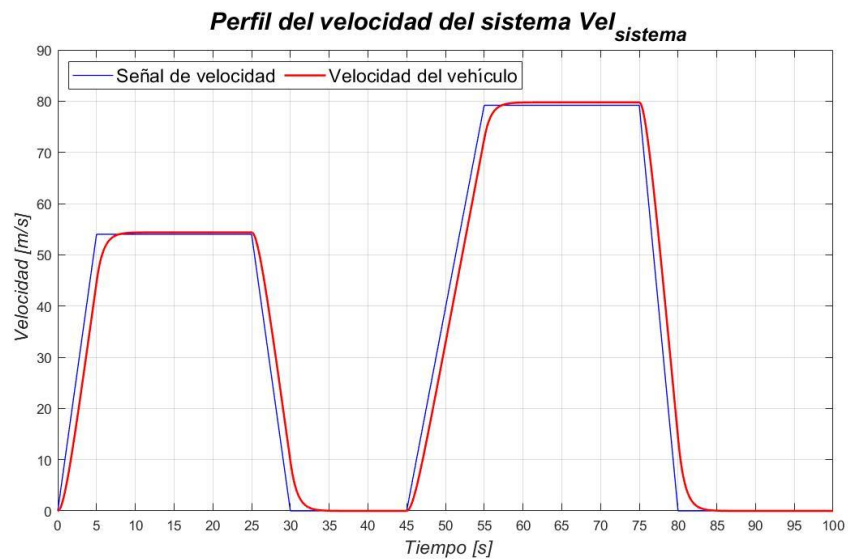
7. Análisis de Resultados

Primeramente, se propone un perfil de velocidad para representar el comportamiento del freno regenerativo, el cual consiste en acelerar el vehículo a una velocidad de 15 [m/s] durante 10 [s], posterior a esto, se desacelera hasta alcanzar el reposo y se mantiene en esta posición en 15

[s]. Después, el transporte nuevamente acelera hasta obtener una velocidad máxima de 22 [m/s] a lo largo de 20 [s], finalmente, desacelera hasta el reposo. El recorrido planteado y el seguimiento del motor se presentan en la figura 20.

Figura 20.

Recorrido planteado y seguimiento del motor



Para llevar a cabo la simulación del perfil propuesto, se asumen los valores mostrados en la tabla 7.

Tabla 7.*Condiciones de trabajo para el proyecto*

Item	Valor	Item	Valor
m	300 [kg]	α	5°
A_f	1,1 [m ²]	g	9,81 [m/s ²]
R	0,35 [m]	RPM_b	3380
b	0,61 [m]	T_b	25 [Nm]
L	1,39 [m]	Pot_b	10 [kW]
h_g	0,67 [m]	CAP_{bate}	10 [kWh]
C_a	0,35	i_t	5,83
ρ_a	1,2 [kg/m ³]	η_m	95%
C_f	0,03	η_b	95%
C_2	$7 \cdot 10^{-6}$ [m ² /s ²]	η_i	90%

Adicionalmente, se desprecia la energía consumida por los dispositivos eléctricos y electrónicos secundarios presentes en el vehículo.

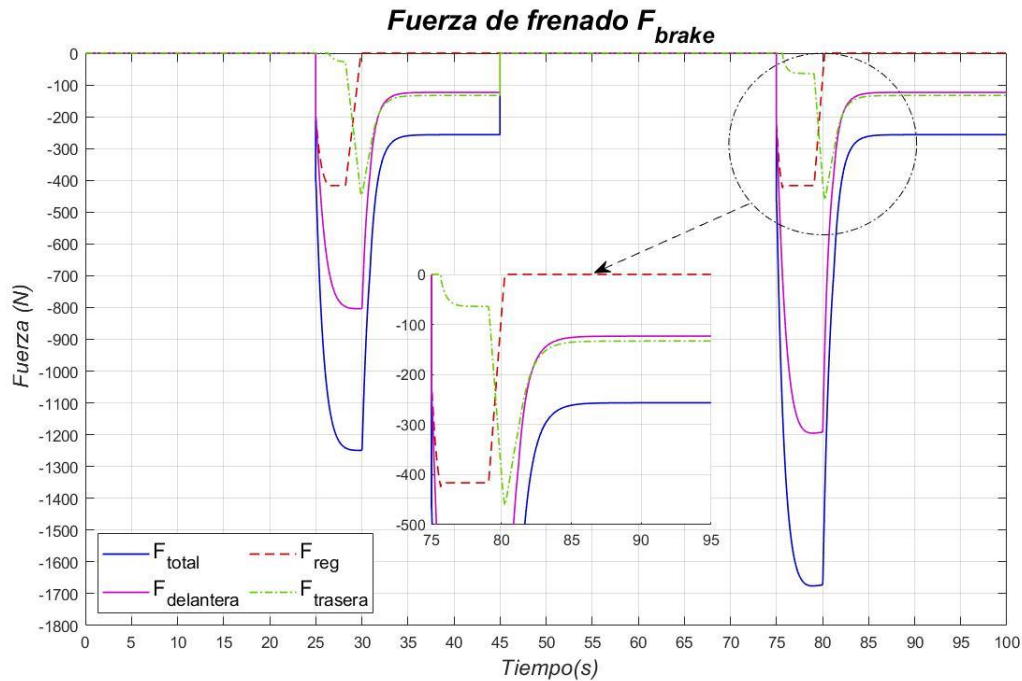
Por otra parte, se asume una distribución de peso constante del 70% para el tren trasero y 30% para el tren delantero. Además, se tendrá en cuenta un deslizamiento del 0% (rodadura pura) y una inclinación constante del 8.75%.

Posteriormente, con respecto a los valores de los factores de ponderación, se asumió un estado óptimo del motor y un estado de inicial de carga del 80% para trabajar con el 100% de estos.

Para finalizar, con base en los datos mencionados previamente, se obtiene un perfil de la distribución de frenado y se representa en la figura 21.

Figura 21.

Perfil de la distribución del frenado



Con la figura 21 es posible apreciar que en el periodo de tiempo entre los 25 y 35 [s], ocurre el proceso de frenado del vehículo hasta su estado de reposo. Además, se puede concluir que la fuerza requerida máxima es de 1240 [N], en su totalidad, donde aproximadamente 795 [N] corresponden al tren delantero, 415 [N] al motor eléctrico y 30 [N] al freno trasero.

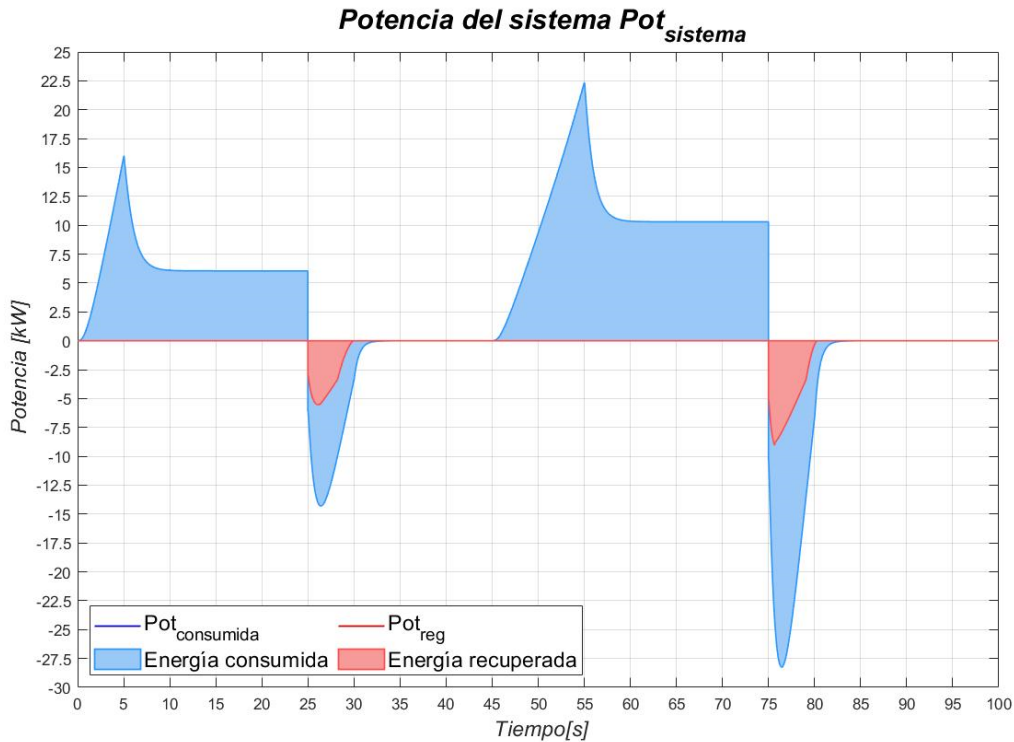
A medida que la velocidad disminuye, la fuerza regenerativa del motor se reduce por la acción de los factores de ponderación mencionados previamente, por lo tanto, el periodo entre los 35 y 45 [s] indica reposo y solo actúan las fuerzas mecánicas para detener el vehículo debido a la inclinación del camino.

En segundo lugar, el periodo 75 y 85 [s] se puede evidenciar un comportamiento similar al anterior, la diferencia radica en que la fuerza de frenado asciende a un valor aproximado de 1670

[N], distribuidos en 415 [N] por parte del motor eléctrico, 1190 [N] por el tren delantero y 65 [N] por el tren trasero. Análogamente, por efecto de la velocidad, la participación del motor eléctrico en el frenado se reduce a 0 cuando el vehículo entra en reposo y se mantienen solamente las fuerzas necesarias para sostener el mismo.

Durante el periodo de frenado la distribución de las cargas de freno se mantuvo entre un 50 y 36 % (para el tren trasero), donde el valor mayor se obtiene a bajas velocidades, y el menor cuando se requieren altas fuerzas de frenado y velocidades elevadas. Además de esto, se puede apreciar el comportamiento de la fuerza que es capaz de soportar el motor eléctrico. En el momento donde el motor supera su valor máximo de regeneración, el freno mecánico actúa como soporte para compensar la falta de fuerza requerida en el tren trasero.

Por su parte, la figura 22 muestra el perfil de potencia que maneja el circuito.

Figura 22.*Perfil de potencia del sistema*

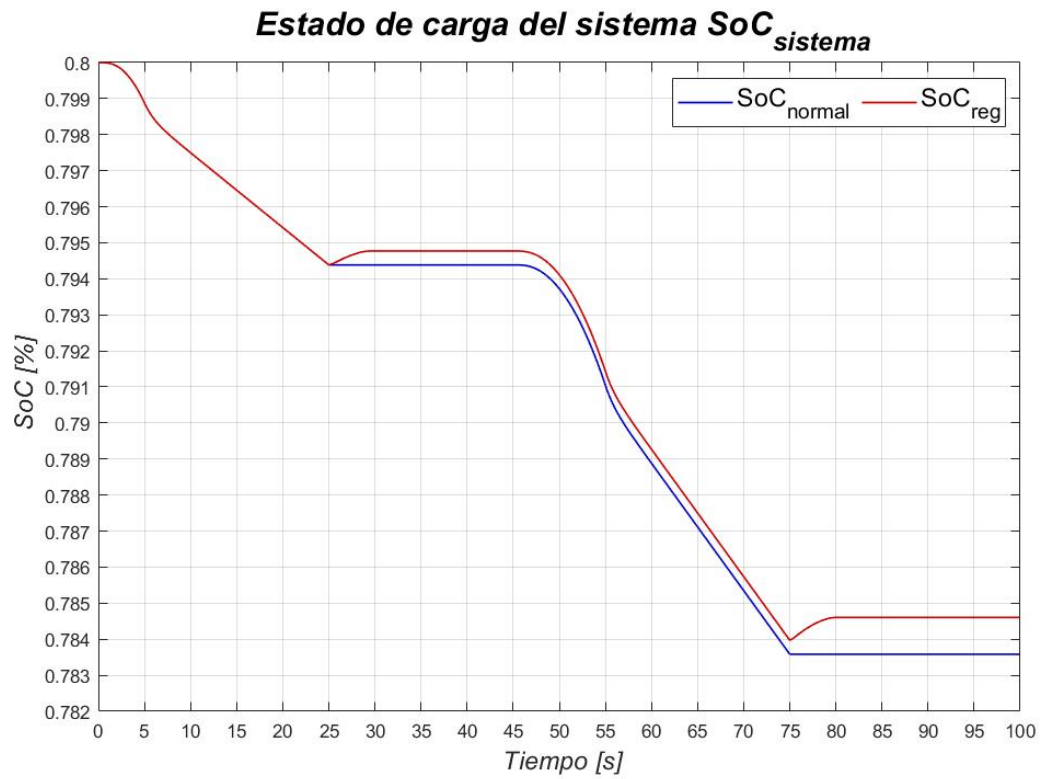
La figura 22 ilustra la potencia consumida por el sistema durante los periodos de tracción y frenado, en este último se puede visualizar la energía recuperada, la cual se denota con el área de color rosa. Para la primera etapa de frenado, esta potencia varía entre 50 y 34% de la potencia total debido a la distribución planteada para el perfil de frenado, por su parte, la distribución en la segunda etapa resulta ser entre 49 y 25 % de la potencia total.

Finalmente, se realiza el análisis de la energía regenerada. Considerando las eficiencias mencionadas anteriormente, el sistema recupera máximo 26% de la energía almacenada en el vehículo para la primera etapa del periodo de frenado, además de esto, regenera 23% de la energía

para la segunda fase, por lo tanto, para el planteamiento y los valores empleados en la simulación del sistema del vehículo, se logra recuperar la energía en la batería mostrada en la figura 23.

Figura 23.

Estado de carga del sistema SoC



8. Conclusiones

Se logró diseñar la configuración para el sistema de frenado regenerativo de una motocicleta eléctrica que regenera la mayor cantidad energética posible, y a su vez, garantiza estabilidad, seguridad y comodidad para el pasajero.

De acuerdo con los parámetros establecidos, la motocicleta posee una autonomía de 60,3 [km] y con la implementación del freno regenerativo logra recuperar un 6,22%, por lo tanto, el vehículo posee la capacidad de recorrer 3,8 [km] adicionales de recorrido.

La implementación de la estrategia de frenado permite que el sistema recupere un 26% de la energía total almacenada durante el periodo de frenado. Por lo tanto, el sistema es capaz de regenerar más energía con fuerzas graduales de frenado que con fuerzas elevadas debido a la saturación del sistema eléctrico del motor.

Cuando el perfil de la fuerza de frenado se guía aproximadamente de la distribución ideal de fuerza de frenado, se garantiza la rodadura pura y se brinda mayor seguridad al conductor, además de esto, se obtiene una distribución de fuerza en el tren trasero que permite el máximo aprovechamiento energético durante la etapa de regeneración.

Los factores de ponderación se consideran fundamentales para mantener la vida útil de la batería cuando se encuentra sobrecargada, de esta manera, se asegura que el voltaje proveniente del motor sea el adecuado para hacer el proceso de regeneración, adicionalmente, indican la capacidad de trabajo del motor de acuerdo con su estado de servicio.

9. Recomendaciones

Durante el proceso de selección y diseño del freno mecánico en el vehículo, se considera implementar el control de una válvula de presión, con el fin de distribuir de manera adecuada, las fuerzas planteadas por la distribución ideal de frenado.

Realizar el estudio del comportamiento del motor, de acuerdo con sus características propias para el control de su ciclo de trabajo y su respectiva señal por modulación de ancho de pulso (PWM).

Es fundamental realizar los cálculos y diseño de la distribución con base en los datos reales del vehículo, como lo son las características del motor, batería y tren de potencia, además, se debe tener en cuenta la geometría y las propiedades del vehículo.

Se recomienda analizar el comportamiento de la distribución de carga en el tren delantero y trasero respectivamente, para dar una mayor aproximación del sistema de control para la distribución en el frenado.

Referencias Bibliográficas

- Álvarez Brotons, X. (2004). *Control predictivo de canales de riego utilizando modelos de predicción de tipo Muskingum (primer orden) y de tipo Hayami (segundo orden)* (tesis de doctorado). <http://hdl.handle.net/2099.1/3330>
- Becerra Vargas, J. A., Moreno García, F. E., Quiroz Omaña, J. J., y Bautista Arias, D. (2014). Estimación de parámetros y modelo de caja negra de un motor CD sin escobillas. *TecnoLógicas*, 17(33), 55-64. <http://hdl.handle.net/20.500.12622/943>
- Carrillo, A. (2011). *Sistemas automáticos de control: Fundamentos Básicos de Análisis y Modelado*. Editorial UNERMB.
- Castillo Aguilar, J. J., Pérez Fernández, J., Velasco García, J. M., y Cabrera Carrillo, J. A. (2017). Regenerative intelligent brake control for electric motorcycles. *Energies*, 10(10), 1648. <https://doi.org/10.3390/en10101648>
- BLOG CEUPE magazine. *¿Qué es un generador eléctrico?*. CEUPE: Centro Europeo de Postgrado. <https://www.ceupe.com/blog/que-es-un-generador-electrico.html>
- Cossalter, V. (2006). *Motorcycle dynamics*. Lulu.
- Chiriboga Cárdenas, E. L., y Velasco Moyano, C. B. (2017). *Diseño e implementación de un sistema de freno regenerativo y transmisión eléctrica en una motocicleta convencional para la carrera de Ingeniería Automotriz* (tesis de pregrado). <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/7658>
- Di Rado, G. R., García, D. S. P., y Devincenzi, G. H. (2013). Análisis de las Fuerzas que Actúan en la Interface Neumático Carretera. Modelos de Simulación de Aceleración. *Mecánica*

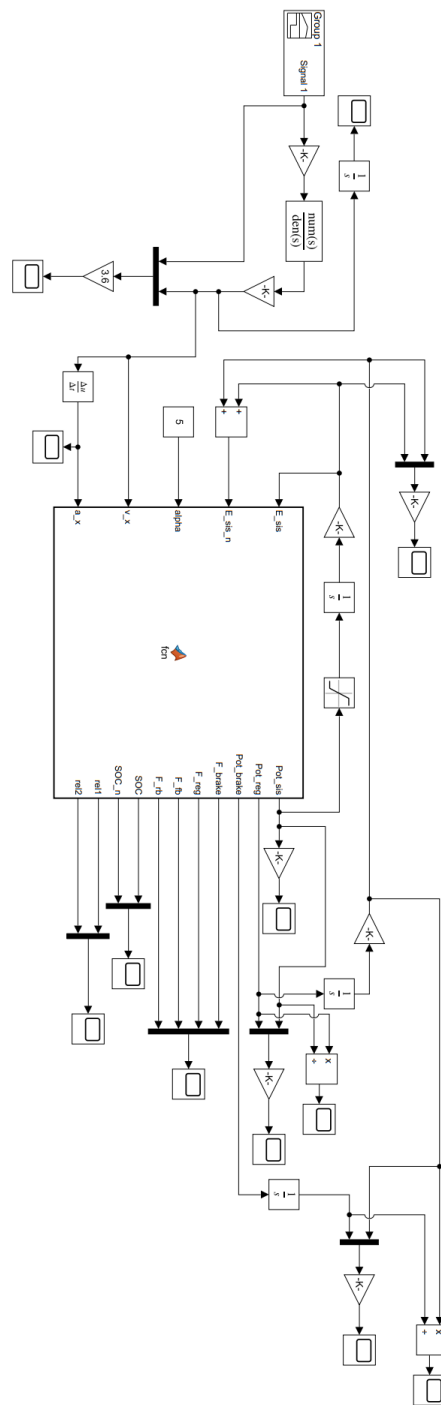
- Computacional*, 32(28), 2333-2362.
<https://amcaonline.org.ar/ojs/index.php/mc/article/view/4490>
- Enciso Aguilera, S., y Aponte Cortes, J. A (2015). *Sistema de recuperación de energía cinética para una moto eléctrica basada en motor Brushless* (tesis de pregrado).
<http://hdl.handle.net/11349/2238>
- Guo, J., Wang, J., Y Cao, B. (2009). Regenerative braking strategy for electric vehicles. 2009*IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 864-868. <https://doi.org/10.1109/IVS.2009.5164393>
- Hernández Monterrosas, J. O. (2016). *Análisis y control de un sistema de freno regenerativo* (tesis de maestría). <http://tesis.ipn.mx/handle/123456789/21725>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (2018). *Segundo Reporte Bienal de Actualización de Colombia ante la CMNUCC*.
http://www.ideam.gov.co/documents/24277/77448440/PNUD-IDEAM_2RBA.pdf/ff1af137-2149-4516-9923-6423ee4d4b54
- Li, S., Yu, B., y Feng, X. (2020). Research on braking energy recovery strategy of electric vehicle based on ECE regulation and I curve. *Science Progress*, 103(1), 0036850419877762.
<https://doi.org/10.1177/0036850419877762>
- Lv, C., Zhang, J., Li, Y., y Yuan, Y. (2014, April). Regenerative Braking Control Algorithm for an Electrified Vehicle Equipped with a By-Wire Brake System. *SAE 2014 World Congress & Exhibition SAE International* (No. 2014-01-1791). <https://doi.org/10.4271/2014-01-1791>
- Miranda Álvarez, F. M. (2013). *Peritaje del frenado en automóviles* (tesis de pregrado).
<http://dspace.uclv.edu.cu:8089/handle/123456789/2886>

- Monroy, C. C., Siachoque, C. A., Durán Tovar, I. C., y Marulanda Guerra, A. R. (2020). Comparative Study of Regenerative Braking System and Regeneration with Constant Kinetic Energy in Battery Electric Vehicles. *Ingeniería*, 25(3), 305-322. <https://doi.org/10.14483/23448393.16220>
- Nian, X., Peng, F., y Zhang, H. (2014). Regenerative braking system of electric vehicle driven by brushless DC motor. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(10), 5798-5808. <https://doi.org/10.1109/TIE.2014.2300059>
- OMM. (2020). *Boletín de la OMM sobre los gases de efecto invernadero* N°16. ISSN 2078-0796.
- OMM. (2021). *Los indicadores empeoraron y los impactos del cambio climático se agravaron en 2020.* <https://public.wmo.int/es/media/comunicados-de-prensa/los-indicadores-empeoraron-y-los-impactos-del-cambio-clim%C3%A1tico-se>
- RUNT (2021). *Parque automotor registrado en RUNT (2021)*. RUNT: Registro Único Nacional de Tránsito. https://www.runt.com.co/runt-en-cifras/parque-automotor?field_fecha_de_la_norma_value%5Bvalue%5D%5Byear%5D=2021
- Peña Ordoñez, C. (2011). *Estudio de baterías para vehículos eléctricos* (tesis de pregrado). <http://hdl.handle.net/10016/11805>
- Rashid, M. H. (2004). *Electrónica de potencia: circuitos, dispositivos y aplicaciones*. Pearson Educación.
- Roca Cusido, A. (2014). *Control automático de procesos industriales: Con prácticas de simulación y análisis por ordenador PC*. Ediciones Díaz de Santos.
- SIAC. *Gases de efecto invernadero, GEI*. SIAC: Sistema de Información Ambiental de Colombia. <http://www.siac.gov.co/web/siac/climaticogei>

- Spencer Vargas, D. O. (2019). *Diseño e implementación de freno regenerativo para motor de corriente continua sin escobillas con imanes permanentes para moto eléctrica* (tesis de pregrado). <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/173225>
- WEG (2021). Motores eléctricos Guía de especificación. <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/hf9/hcf/WEG-WMO-motores-electricos-guia-de-especificacion-50039910-brochure-spanish-web.pdf>
- Yang, M. J., Jhou, H. L., Ma, B. Y., y Shyu, K. K. (2009). A cost-effective method of electric brake with energy regeneration for electric vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56(6), 2203-2212. <https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2015356>
- Yoong, M. K., Gan, Y. H., Gan, G. D., Leong, C. K., Phuan, Z. Y., Cheah, B. K., y Chew, K. W. (2010). Studies of regenerative braking in electric vehicle. *2010 IEEE Conference on Sustainable Utilization and Development in Engineering and Technology*, 40-45. <https://doi.org/10.1109/STUDENT.2010.5686984>

Apéndices

Apéndice A. Modelo SimuLink sistema de frenado regenerativo



Apéndice B. Código del Matlab function

```
function [Pot_sis, Pot_reg, Pot_brake, F_brake, F_reg, F_fb,
F_rb, SOC, SOC_n, rel1, rel2] = fcn(E_sis, E_sis_n, alpha, v_x,
a_x)

%-----Características del sistema-----
%-----%

g=9.81;           %Gravedad en [m/s^2]
A_f=1.1;          %Área frontal del vehículo [m^2]
rho_aire=1.2;     %Densidad del aire[kg/m^3]
C_1=0.03;         %Coeficiente de rozamiento
                 %neumático/suelo
C_2=7e-6;         %Coeficiente de fuerza de tracción
C_d=0.35;         %Coeficiente de arrastre
m=300;           %Masa del vehículo[kg]
R=0.35;          %Radio efectivo de la llanta [m]

%-----Dinámica longitudinal-----
%-----%

w = m*g;
Nr = w*cos(alpha*pi/180)*0.7;
Nf = w*cos(alpha*pi/180)*0.3;
F_aero = 1/2*C_d*rho_aire*A_f*v_x^2;
F_a = m*a_x;
F_h=w*sin(alpha*pi/180);

if v_x<1
    f_xr=(C_1+C_2*v_x^2)*Nr*v_x^2;
    f_xf=C_1*Nf*v_x^2;
else
    f_xr=(C_1+C_2*v_x^2)*Nr;
    f_xf=C_1*Nf;
end

%-----Tracción y frenado-----
%-----%

if a_x>=0
    F_tracc=F_a+F_aero+f_xr+f_xf+F_h;
    F_brake=0;
```

```

    Pot_sis=F_tracc*v_x;
else
    F_brake=-1*(-F_a+F_aero+f_xr+f_xf+F_h);
    F_tracc=0;
    Pot_sis=F_brake*v_x;
end

Pot_brake=F_brake*v_x;

i_t=5.83;                %Relación de transmisión

RPM_wheel=(v_x/R)*60/(2*pi);
RPM_mot=RPM_wheel*i_t;

w_motor=RPM_mot*2*pi/60;

%-----Distribución de las fuerzas de frenado-----
%-----%

b=0.61;                %Distancia del c.g. al eje trasero [m]
a=0.78;                %Distancia del c.g. al eje delantero
[m]
h_g=0.67;              %Altura del suelo al c.g. [m]
L=a+b;                %Distancia entre ejes [m]

F_fb=(g*m*(b^2-(2*(-F_brake)*h_g+b*m*g)^2/(g^2*m^2)))/(4*L*h_g);
F_rear=F_brake-F_fb;

%-----Estado de carga de la batería-----
%-----%

CAP_bat=3.6e7;         %Capacidad de almacenamiento de la
batería
SOC_o=0.8;             %Estado de carga inicial de la batería

SOC=SOC_o-(E_sis/CAP_bat);
SOC_n=SOC_o-(E_sis_n/CAP_bat);

%-----Pesos ponderados de la regeneración-----
%-----%
if v_x>3
    if 3<=v_x && v_x<8
        w_v=v_x/5-3/5;
    else
        w_v=1;
    end
else
    w_v=0;
end

```

```
end

if SOC>0.8
    if 0.8<=SOC && SOC<0.95
        w_soc=-20/3*SOC+19/3;
    else
        w_soc=0;
    end
else
    w_soc=1;
end

w_t=w_v*w_soc;

%-----Distribución de la fuerza en el tren trasero-----
%-----%

RPM_b=3380;                %RPM base dónde el torque máximo del
motor decae                %Torque máximo constante del sistema
T_nom=25;                  [N-m]
Pot_nom=10000;            %Potencia nominal

%Torque máximo de regeneración
if a_x<0
    if RPM_mot<=RPM_b
        T_reg_max=T_nom*i_t*w_t;
    else
        T_reg_max=Pot_nom*i_t*w_t/w_motor;
    end
else
    T_reg_max=0;
end

%Distribución eléctrica e hidráulica

n=T_reg_max;
m=F_rear*R*-1;

if n>=m
    T_reg=(F_rear*R);
    F_reg=T_reg/R;
    F_rb=0;
else
    T_reg=-1*T_reg_max;
    F_reg=T_reg/R;
    F_rb=F_rear-F_reg;
end
```

```
end
```

```
Pot_reg=F_reg*v_x;
```

```
if F_brake==0
```

```
    rel1=0;
```

```
    rel2=0;
```

```
else
```

```
    rel1=F_rear/F_brake;
```

```
    rel2=F_reg/F_brake;
```

```
end
```