

Diseño y modelado de un sistema de frenado regenerativo para un vehículo eléctrico tipo
coupé

Daniel Santiago Rondón Jiménez y Jaime Daniel Carvajal López

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniería Mecánica

Director

Jorge Luis Chacón Velasco

D. Procesos Termodinámicos Aplicados a MCIA

Codirector

William Pinto Hernández

D. Se Ingeniería Mecánica

Fabian Horacio Díaz Palencia

Mag. Ingeniería Mecánica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2023

Dedicatoria

Quiero dedicar este trabajo en primer lugar a mi familia, que no solamente estuvieron acompañándome durante el proceso en este trabajo de grado, sino durante toda mi carrera, dándome apoyo moral y económico para cumplir este sueño. Esto es gracias a ellos que día a día se esfuerzan para darnos lo mejor a cada uno de sus hijos. MUCHAS GRACIAS.

En segundo lugar, agradezco a mi pareja, que durante el desarrollo de esta investigación estuvo dándome el apoyo suficiente para poder culminar este proyecto, generando ese deseo de superación y eliminando la procrastinación que sufrí durante el mismo. Parte de ese apoyo se ve reflejado aquí.

Por último, quiero agradecer a mis amigos, que durante esta estancia siempre estuvieron presentes y que, por mi condición de foráneo durante la vida universitaria, se convirtieron en mi familia, con los que compartí algunas de las mejores experiencias de mi vida.

Daniel Santiago Rondón Jiménez

Dedicatoria

Quiero aprovechar este breve espacio para agradecer a cada una de las personas que me han ayudado y apoyado a lo largo de esta etapa universitaria.

En primer lugar, quiero agradecer a mi familia, mis padres, hermanos y abuelos. Ellos me dieron la motivación, el apoyo, los medios para seguir adelante y superar cualquier obstáculo. Mis amigos más cercanos, quienes en los momentos más difíciles me dieron el ánimo necesario para continuar. A todas aquellas personas que en el último año han llegado a mi vida de los cuales me han hecho adquirir nuevos conocimientos y valores los cuales me han hecho crecer como persona.

A todos ellos infinitas gracias por su total apoyo.

Jaime Daniel Carvajal López

Agradecimientos

A la Universidad Industrial de Santander, nuestra alma mater, por la calidad de educación recibida durante estos años de carrera, los cuales han logrado formarnos como grandes profesionales y personas, dándonos los conocimientos necesarios para enfrentarnos al mercado laboral y el día de mañana ser profesionales en esta linda área, la Ingeniería Mecánica.

A los ingenieros William Pinto Hernández y Jorge Luis Chacón Velasco, por permitirnos ser parte de este proyecto y que con su experiencia y sabiduría nos guiaron a través de este dándonos las bases para desarrollarlo a través de este largo camino.

Tabla de contenido

	Pág.
1. Planteamiento del problema.....	17
2. Objetivos.....	19
2.1 Objetivo General.....	19
2.2 Objetivos Específicos.....	19
3. Justificación	20
4. Marco teórico.....	20
4.1 Estado del arte.....	21
4.1.1 Control de deslizamiento de un pequeño vehículo eléctrico con dos motores en las ruedas: modelo de simulación de ABS y control regenerativo de freno.....	21
4.1.2 Estudio de la estrategia de control de frenado regenerativo para un vehículo eléctrico bajo condiciones de frenado típicas	23
4.1.3 Sistema de frenado regenerativo de un vehículo eléctrico impulsado por un motor DC sin escobillas.....	25
4.2 Referentes teóricos.....	26
4.2.1 Freno regenerativo	26
4.2.1.1 Motor Eléctrico.....	27
4.2.1.2 Acumulador.....	27
4.2.1.3 Alternador de tensión variable	28
4.2.1.4 Transformador.....	28
4.2.1.5 Funcionamiento del sistema de regeneración de energía inteligente	28

4.2.2	Sistema antibloqueo (ABS).....	29
4.2.2.1	Componentes del ABS.....	29
4.2.3	Sistema de control.....	30
4.2.3.1	Tipos de sistemas de control.....	31
4.2.4	Controlador PID.....	31
4.2.5	Regen on demand.....	32
4.2.6	e-Pedal.....	32
5.	Diseño metodológico	32
5.1	Selección de alternativas.....	33
5.1.1	Selección del sistema de frenado regenerativo	33
5.1.2	Selección del sistema de control	36
6.	Diseño del sistema de frenado regenerativo para vehículo.....	36
6.1	Pérdidas de energía del vehículo.....	37
6.1.1	Pérdidas por fricción aerodinámica (F_a)	38
6.1.2	Pérdidas por fricción rodante (F_r).....	39
6.1.3	Pérdidas por fuerza motriz cuesta arriba (F_g).....	40
6.1.4	Pérdidas por fuerza de inercia (F_m).....	41
6.2	Comportamiento de la energía y la potencia durante los procesos de aceleración y frenado	42
6.3	Cálculo de la energía y potencia consumida por un vehículo en un ciclo de conducción	43
7.	Selección de componentes para el sistema de frenado regenerativo	46
7.1	Selección del motor.....	46

7.2	Selección de la transmisión.....	48
7.3	Selección del inversor	49
7.4	Selección de la batería	51
8.	Selección de componentes para el sistema de frenado hidráulico	52
8.1	Selección del Servofreno (Brake Booster).....	52
8.2	Cilindro maestro.....	53
8.3	Rotor o Disco de freno.....	55
8.4	Pinza de freno o cáliper.....	56
8.5	Pastillas de freno.....	57
9.	Modelado en SolidWorks	60
10.	Sistema de control del frenado.....	62
10.1	Sistema de control del frenado regenerativo.....	62
10.1.1	Control de corriente y velocidad.....	64
10.1.1.1	Operación de máquina eléctrica como motor o frenado	66
10.1.2	Control de freno regenerativo	68
10.1.3	Simulación del sistema de control en Simulink de Matlab.....	68
10.2	Sistema de control del frenado hidráulico con ABS	69
10.2.1	Análisis del modelo físico empleado al frenar un vehículo	69
10.2.1.1	Análisis físico para el vehículo.....	69
10.2.1.2	Análisis físico para la rueda.....	70
10.2.2	Modelo de frenado hidráulico con ABS	71
10.2.2.1	Estimación del deslizamiento(slip) y el coeficiente de fricción	73
10.2.3	Simulación del sistema de control en Simulink de Matlab.....	77

11.	Análisis de resultados	80
11.1	Análisis de resultados del diseño de frenado regenerativo	80
11.2	Análisis de resultados del modelado en SolidWorks	83
11.3	Análisis de resultados del sistema de control para el frenado regenerativo	83
11.4	Análisis de resultados del sistema de control para el frenado hidráulico con ABS	85
11.4.1	Análisis de la distancia recorrida al frenar el vehículo	85
11.4.2	Análisis de la velocidad del vehículo y la velocidad angular de la rueda.....	86
11.4.3	Análisis del torque aplicado en la frenada	89
12.	Conclusiones	91
13.	Recomendaciones	92
14.	Referencias Bibliográficas	93

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 Distribución ideal de la fuerza de frenado.....	22
Figura 2 Modelo de control de sistema de frenado regenerativo.....	24
Figura 3 Estructura del sistema de control.....	25
Figura 4 Esquema de funcionamiento del sistema de regeneración de energía inteligente	28
Figura 5 Controlador PID básico	31
Figura 6 Boceto inicial de los componentes del sistema de frenado	36
Figura 7 Representación esquemática de las fuerzas que actúan sobre un vehículo en movimiento	37
Figura 8 Coeficiente de rozamiento de los neumáticos en función de la presión y la variación de velocidad del vehículo.	40
Figura 9 Gráfica Velocidad vs. Tiempo del ciclo de conducción.....	45
Figura 10 Potencia consumida en el recorrido del ciclo de conducción.....	46
Figura 11 Motor HPD 128E.....	47
Figura 12 E-Transmission.....	48
Figura 13 Inversor CM 200 DXI	49
Figura 14 Datos técnicos del inversor CM200DXI	50
Figura 15 Batería HDE-30.....	51
Figura 16 Servofreno	52
Figura 17 Características técnicas servofreno TRW PSA 112	53
Figura 18 Cilindro principal de freno	54

Figura 19	Características técnicas del cilindro maestro TRW PMK109	54
Figura 20	Disco de freno.....	55
Figura 21	Ficha técnica del freno de disco TRW DF4036	55
Figura 22	Pinza de freno o Cáliper	56
Figura 23	Ficha técnica de la pinza de freno TRW BHN312E.....	57
Figura 24	Pastilla de freno TRW	57
Figura 25	Ficha técnica de las pastillas TRW COTEC GDB1354	58
Figura 26	Modelado en SolidWorks del sistema de frenado hidráulico	60
Figura 27	Modelado en SolidWorks del sistema de frenado hidráulico y regenerativo	61
Figura 28	Planos en SolidWorks del sistema de frenado hidráulico y regenerativo	61
Figura 29	Esquema planta motriz de un vehículo.....	63
Figura 30	Modelo conceptual del circuito eléctrico para el frenado regenerativo	64
Figura 31	Esquema de control de torque para un motor con conmutador de onda completa.....	65
Figura 32	Diagrama de compuertas asociadas por fase	65
Figura 33	Conexiones de fase respecto a las salidas de señales sensores Hall para torque positivo	66
Figura 34	Compuertas del conversor de potencia activas respecto a las conexiones de fase	67
Figura 35	Pantalla general del sistema de control implementado para el frenado regenerativo..	69
Figura 36	Diagrama de cuerpo libre para el vehículo.....	70
Figura 37	Diagrama de cuerpo libre para la rueda del vehículo	71
Figura 38	Bloque de frenado hidráulico	72
Figura 39	Sistema de frenos antibloqueo.....	72
Figura 40	Zona estable para el coeficiente de fricción	74

Figura 41	Coefficiente de fricción para diferentes condiciones de carretera	75
Figura 42	Pantalla general del sistema de control implementado para el ABS	77
Figura 43	Subsistema del vehículo en la simulación	78
Figura 44	Subsistema de frenado hidráulico en la simulación	79
Figura 45	Subsistema estimación del deslizamiento	79
Figura 46	Subsistema estimación del μ	80
Figura 47	Histograma de cantidad de energía recuperada por frenado	81
Figura 48	Histograma de cantidad de potencia recuperada por frenado	82
Figura 49	Perfil de torque como señal de entrada.....	83
Figura 50	Estado de carga de la batería	84

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 Matriz de calidad con los requerimientos y especificaciones técnicas	33
Tabla 2 Evaluación y selección de alternativas	34
Tabla 3 Parámetros de diseño	35
Tabla 4 Características del motor HPD 128E	47
Tabla 5 Características técnicas de la transmisión.....	49
Tabla 6 Características técnicas de la batería	52
Tabla 7 Valor de los parámetros de fricción carretera-neumático.....	76

Lista de Apéndices

	pág.
Apéndice A. Código de Matlab Diseño de frenado regenerativo a partir del ciclo de conducción	96
Apéndice B. Modelado en 3D SolidWorks.....	96
Apéndice C. Modelo Simulink sistema de frenado regenerativo	96
Apéndice D. Código de Matlab sistema de frenado hidráulico ABS	96
Apéndice E. Modelo Simulink sistema de frenado hidráulico con ABS	96

Lista de símbolos

m_v Masa del vehículo.	$F_{m,w}$ Fuerza en las ruedas.
a Aceleración del vehículo.	$m_{r,w}$ Masa equivalente de las ruedas.
g Gravedad equivalente.	w_w Velocidad angular de las ruedas.
r_w Radio de las llantas del vehículo.	w_e Velocidad angular del motor.
α Ángulo de la inclinación de la vía.	θ_w Inercia de las llantas.
v Velocidad a la que se desplaza el vehículo.	$T_{m,e}$ Torque en el motor.
F_g Fuerza de gravedad.	θ_e Inercia del motor.
F_t Fuerza de tracción.	γ Radio de la transmisión.
F_a Fuerza aerodinámica.	$m_{r,e}$ Masa equivalente del eje del motor.
F_r Fuerza de fricción.	m_r Masa equivalente total.
F_m Fuerza de inercia.	P Potencia instantánea.
ρ_a Densidad del aire ambiente.	μ Coeficiente de fricción.
A_f Área frontal.	λ Deslizamiento.
C_d Coeficiente de arrastre aerodinámico.	C_1 Punto más alto en la curva de fricción
C_r Coeficiente de fricción por rodadura.	C_2 Forma de la curva.
$T_{m,w}$ Torque en las ruedas.	C_3 Diferencia entre el punto más alto y el punto de valor obtenido

Resumen

Título: Diseño y modelado de un sistema de frenado regenerativo para un vehículo eléctrico tipo coupé*

Autores: Daniel Santiago Rondón Jiménez y Jaime Daniel Carvajal López**

Palabras Clave: Frenado regenerativo, vehículo eléctrico, movilidad sostenible, ABS.

Descripción:

En este proyecto de investigación se llevó a cabo el diseño de un sistema de frenado regenerativo para vehículo eléctrico tipo coupé, en donde su objetivo principal es recuperar energía que es disipada en fricción en los sistemas de frenado convencionales.

El proyecto se distribuyó en diseño y simulación del sistema de frenado regenerativo, diseño y simulación del sistema de frenado hidráulico con ABS y modelado del conjunto. Para el primer subsistema mencionado de acuerdo con la literatura y la normativa requerida para el diseño se seleccionaron los componentes a utilizar para el sistema de frenado, en donde, por medio de Simulink de Matlab se aproxima el comportamiento deseado, utilizando ciclos de conducción de vehículos en ciudad obteniendo la cantidad de potencia y energía que puede recuperar y porcentaje de energía recuperada en la batería para un ciclo corto. Para el segundo subsistema diseña el sistema de frenado hidráulico con ABS en donde se simula mediante Simulink de Matlab obteniendo la distancia mínima de frenado, velocidad del vehículo y la rueda y el torque en el frenado. Por último, se genera el modelado de la distribución propuesta de los dispositivos utilizados en el freno para el vehículo coupé empleando SolidWorks.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director D. Sc. Jorge Luis Chacón Velasco Codirectores D. Sc. William Pinto Hernández. Mag. Fabian Horacio Díaz Palencia M.

Abstract

Title: Design and modeling of a regenerative braking system for a coupe-type electric vehicle*

Author(s): Daniel Santiago Rondón Jiménez y Jaime Daniel Carvajal López**

Key Words: Regenerative braking, electric vehicle, sustainable mobility, ABS.

Description:

In this research project, the design of a regenerative braking system for an electric coupe-type vehicle was carried out, where its main objective is to recover energy that is dissipated in friction in conventional braking systems.

The project was divided into design and simulation of the regenerative braking system, design and simulation of the hydraulic braking system with ABS and modeling of the whole system. For the first subsystem mentioned, according to the literature and the regulations required for the design, the components to be used for the braking system were selected, where, by means of Simulink of Matlab, the desired behavior is approximated, using driving cycles of vehicles in the city, obtaining the amount of power and energy that can be recovered and the percentage of energy recovered in the battery for a short cycle. For the second subsystem, the hydraulic braking system with ABS is designed and simulated using Simulink in Matlab, obtaining the minimum braking distance, vehicle and wheel speed and braking torque. Finally, the modeling of the proposed distribution of the devices used in the braking system for the coupe vehicle is generated using SolidWorks.

* Bachelor Thesis

** School of Physicomechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Director D. Sc. Jorge Luis Chacón Velasco Codirectores D. Sc. William Pinto Hernández. Fabian Horacio Díaz Palencia

1. Planteamiento del problema

Los fabricantes de vehículos a nivel mundial se están enfocando en la reducción de pérdidas de energía, ya que la industria automotriz se está mudando a los vehículos híbridos o eléctricos, entonces, con el fin de prolongar la autonomía del vehículo y disminuir el consumo; desde hace varios años se están implementando los sistemas de frenado regenerativo.

El crecimiento acelerado de vehículos en la parte urbana de la ciudad de Bucaramanga ha contribuido al crecimiento inminente en la generación de emisiones de CO₂, este gas contribuye en gran manera al cambio climático, es por esto por lo que el objetivo de los futuros nuevos ingenieros es buscar una mejora significativa a los sistemas ya existentes en cuanto a eficiencia energética. Entonces, surge la necesidad de implementar vehículos amigables con el medio ambiente y de bajo costo para la población de la capital del departamento de Santander.

Lo anterior, se da a raíz del evidente agotamiento de los combustibles fósiles y la concientización de nuestra sociedad en el tema ambiental, que ha llevado a estudiar y plantear nuevas tecnologías renovables para la generación de energía, hoy día existe una tendencia que con el paso de los días crece hacia la búsqueda de nuevos sistemas que sean más eficientes energéticamente.

El objetivo del presente proyecto es diseñar y modelar un sistema de frenado regenerativo para un vehículo eléctrico tipo coupé utilizado en la ciudad de Bucaramanga, buscando ser ecológico y de bajo costo. Este trabajo de investigación permitirá contar con información valiosa para futuras exploraciones en esta área, la cual será de gran utilidad tanto teórica como práctica; permitiendo profundizar en el diseño del sistema de frenos regenerativos; siendo este un elemento fundamental en el desarrollo de autos eléctricos, ya que la optimización energética es

uno de los parámetros de estudio más importantes en dichos vehículos, teniendo en cuenta las condiciones de seguridad para sus ocupantes.

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Diseñar un sistema de freno regenerativo eléctrico-hidráulico con el fin de almacenar energía durante el frenado, para ser aprovechada en la aceleración de un vehículo tipo coupé, cumpliendo con los requerimientos de seguridad necesarios, enfocado a dar cumplimiento con la misión de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander, permitiendo fortalecer la investigación para contribuir y dar respuestas a las necesidades sociales.

2.2 Objetivos Específicos

Desarrollar un modelo conceptual del circuito eléctrico e hidráulico de frenado regenerativo que permita mostrar y comprender el funcionamiento del sistema.

Diseñar el modelo planteado de frenado regenerativo para un vehículo eléctrico tipo coupé evaluando la viabilidad para la implementación en la ciudad de Bucaramanga, cumpliendo con una movilidad amigable con el medio ambiente y de bajo costo.

Generar el modelado mediante el software CAD SolidWorks del sistema de frenado regenerativo.

Desarrollar un sistema de control para el circuito de frenado tomando como base un sistema PID simulado por Simulink de Matlab.

3. Justificación

El desarrollo del modelo, simulación y control de un freno regenerativo contribuye a la optimización y reutilización de la energía que normalmente se desecha en fricción y calor en los vehículos impulsados por un motor a combustión. Las anteriores características, hacen que el presente proyecto contribuya con los objetivos planteados para la optimización y eficiencia energética, además, de ayudar a la reducción de gases efecto invernadero al ser implementado en el vehículo eléctrico; siendo un gran aporte ambiental, ya que, en la actualidad, se busca hacer una transición energética para progresivamente dejar de utilizar los combustibles de origen fósil.

En este sentido, este proyecto vincula varias áreas de conocimiento, como lo son la hidráulica, la ingeniería de control y la física aplicada, que, en conjunto con la ingeniería mecánica, permiten generar un diseño eficiente y económico.

El proyecto tendrá un importante impacto social en la población de la ciudad de Bucaramanga y futuros ingenieros UIS, ya que, aportará los recursos necesarios para un proyecto de implementación de vehículo eléctrico, dando un transporte limpio, de bajo costo y cómodo para el usuario.

4. Marco teórico

A continuación, se presentan antecedentes teóricos con el fin de contextualizar el problema planteado, para dar una mejor comprensión, entendimiento y analizar los alcances en el estudio de los sistemas de frenos regenerativos utilizados en el mercado y generados en proyectos de grado anteriores, dividiéndolo en estado del arte y antecedentes teóricos.

4.1 Estado del arte

Se presentarán diferentes trabajos de investigación en lo que refiere a los sistemas de frenos regenerativos a nivel internacional y nacional; con el fin de analizar sus alcances y las posibles soluciones al problema presentado concluida esta investigación.

4.1.1 Control de deslizamiento de un pequeño vehículo eléctrico con dos motores en las ruedas: modelo de simulación de ABS y control regenerativo de freno

Bin (2016), propuso un modelo de frenado combinado entre un sistema hidráulico ABS y un sistema regenerativo, esto debido a que, los autos en la mayoría de países en una temporada del año estarán sometidos a bajas temperaturas y carreteras con nieve, entonces, al no existir un sistema ABS, el conductor al pisar el pedal del freno generará que el auto derrape y se pierda el control del vehículo, aunque la anterior condición expuesta es extrema, el sistema ABS también sirve para mejorar la distancia de frenado de un vehículo y hace que el conductor no pierda el control de la dirección en frenadas bruscas. Pero a la vez, es necesario implementar la regeneración de energía con el fin de convertir parte de la energía cinética del frenado, en energía utilizable que se almacena en las baterías del automóvil para dar una mayor autonomía al vehículo.

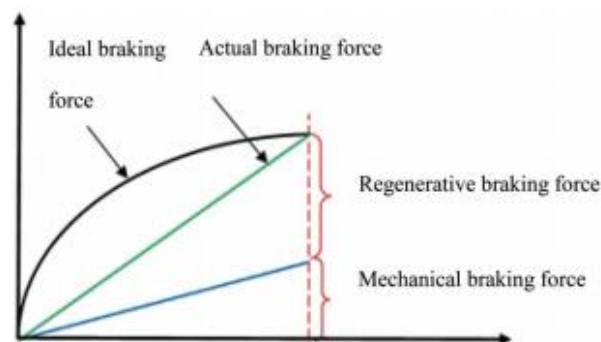
Para llevar a cabo la implementación de dicho proyecto, se utilizó un pequeño vehículo eléctrico de aproximadamente 360 kg, que inicialmente cuenta con freno mecánico, entonces, mediante pruebas tanto en condiciones normales como condiciones extremas, notaron que, en las ruedas delanteras, cuando la relación de deslizamiento aumenta rápidamente hacia 1, la fuerza de frenado y la generación de fuerza lateral desaparecen, entonces el vehículo tiende a derrapar, es por esto que se propone un sistema de frenado ABS para brindar una fuerza de frenado elevada y

suficiente sin perder la estabilidad y control direccional en el momento en que se frena. Como se menciona anteriormente, el eje delantero es en donde más se presenta bloqueo de las ruedas y por ende derrape, entonces, se instala en el vehículo válvulas de entrada y salida para cada una de las ruedas y solo un conjunto para la parte trasera.

Para el sistema de frenado regenerativo, se adiciona al vehículo un motor que funciona como generador cuando el vehículo frena, para el sistema de control, al igual que para el ABS, se tiene en cuenta la relación de deslizamiento, solo que, para que el sistema se accione el valor debe estar por encima de 0,2.

Figura 1

Distribución ideal de la fuerza de frenado



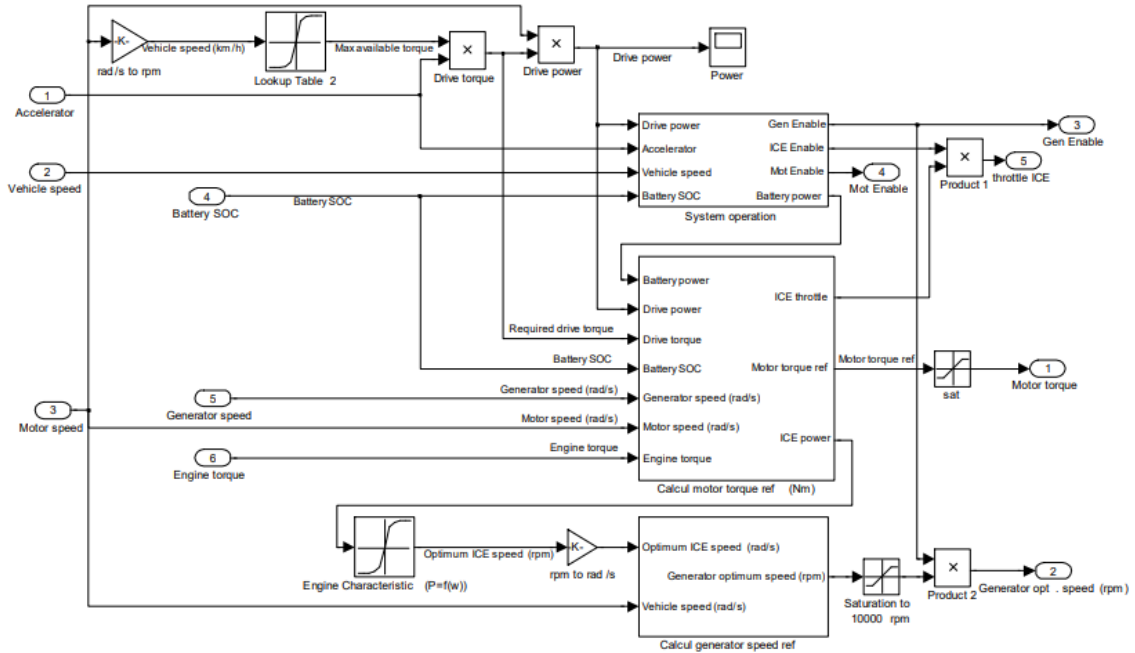
Nota. Se puede observar la distribución para un frenado entre el frenado regenerativo y el frenado por fricción. Tomado de: *Skid control of a small electric vehicle with two in-wheel motors: simulation model of ABS and regenerative brake control*, *International Journal of Crashworthines*. (p. 400), por Heerwan M. (2016)

En la figura anterior, se puede observar el funcionamiento de cada uno de los sistemas de frenado, resaltando que la mayor cantidad de energía en el frenado se puede reutilizar; además, es de resaltar en este proyecto que, teniendo en cuenta las variables que influyen en el sistema, dedujeron las ecuaciones para calcular el par de frenado y la fuerza de frenado regenerativa, ecuaciones que servirán para el desarrollo de este proyecto.

En conclusión, en esta investigación se construyó el modelo de simulación de ABS y control regenerativo de frenos para evitar el derrape en condiciones extremas como carreteras frías, además utilizaron el motor de la parte regenerativa ubicado en el eje trasero del vehículo como actuador del ABS para controlar la fuerza de frenado regenerativa. Este estudio enriquece el panorama, ya que muestra el desarrollo de un sistema híbrido de frenado, desarrollado mediante análisis matemático y simulación que será de gran utilidad para el desarrollo del presente proyecto.

4.1.2 Estudio de la estrategia de control de frenado regenerativo para un vehículo eléctrico bajo condiciones de frenado típicas

Yuantao Sun (2018), realizó un estudio en la estrategia de control de frenos regenerativos para vehículos eléctricos híbridos bajo condiciones típicas de frenado, en el cual se describe el óptimo funcionamiento de un sistema paralelo de frenado en vehículos híbridos. Este tipo de frenado describe que para su funcionamiento se utiliza un controlador PID para una recuperación prolongada de energía de frenado.

Figura 2*Modelo de control de sistema de frenado regenerativo*

Nota. Tomado de *Estudio en la estrategia de control de frenado regenerativo para un vehículo eléctrico bajo condiciones de frenado típicas.* Por Sun, Y. (2018).

El autor muestra una explicación detallada de la estrategia de control de frenado, mediante el uso del software Matlab, en el cual se muestran los diferentes componentes del vehículo y su funcionamiento utilizando métodos convencionales, así como el sistema paralelo de frenado. Por lo tanto, los resultados mencionados por el autor muestran cómo se recicla completamente la energía almacenada, así como un óptimo funcionamiento de los componentes del vehículo eléctrico híbrido.

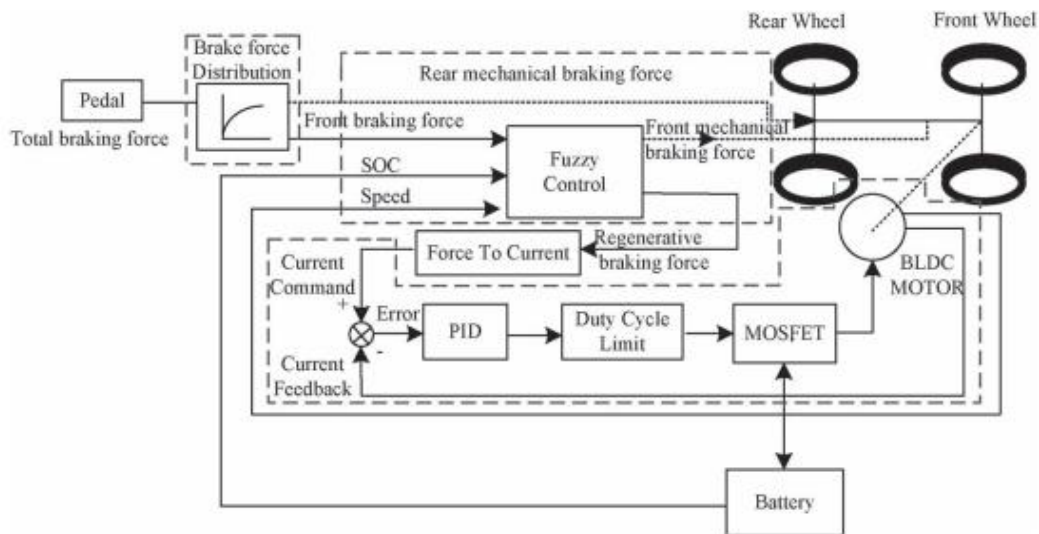
Este trabajo servirá como modelo de implementación inicial para el sistema de control PID del sistema de frenado regenerativo a utilizar en el producto final.

4.1.3 Sistema de frenado regenerativo de un vehículo eléctrico impulsado por un motor DC sin escobillas

Nian (2014), realizó un trabajo de investigación en el cual se describe el diseño de un sistema de frenos regenerativo eficiente con la peculiaridad de ser implementado en un motor sin escobillas DC. Este motor es monitoreado mediante control PID y control de lógica Fussy los cuales permiten controlar el esfuerzo de torsión de los frenos en tiempo real, lo cual lo hace mejor solución ante otras alternativas. Esta solución presenta mejor desempeño respecto a eficiencia.

Figura 3

Estructura del sistema de control



Nota. Tomado de *Sistema de frenado regenerativo de un vehículo eléctrico impulsado por un motor DC sin escobillas*. Por Nian, X. (2014).

Para ello se toman ciertos criterios de evaluación tales como: la fuerza de frenado, el estado de carga de la batería y la corriente de voltaje, los cuales son analizados por medio del

software Matlab y Simulink realizando una simulación la cual permita tomar una decisión en cuanto a la eficiencia del sistema.

Los resultados de la simulación dan a entender que el control PID, así como el control de lógica Fussy permiten realizar de manera satisfactoria el frenado regenerativo, además de prologar la distancia de manejo del vehículo eléctrico, todo esto bajo la condición de asegurar la calidad de frenado.

Este trabajo investigativo nos permite tomar una decisión más precisa en cuanto a la selección del tipo de control óptimo para la realización del sistema de freno regenerativo.

4.2 Referentes teóricos

En esta sección del documento, se presentan los conceptos y definiciones necesarias que servirán de referencia para una mejor comprensión del tema, la problemática y todo lo relacionado con los sistemas de frenos regenerativos de un vehículo.

4.2.1 Freno regenerativo

El freno regenerativo transforma parte de la energía que se pierde en forma de calor en energía eléctrica y la almacena en el vehículo para su aprovechamiento (Domínguez E., 2018).

La regeneración de energía inteligente consiste en un sistema de frenado regenerativo que emplea un condensador como acumulador. De este modo, el sistema es capaz de reducir aproximadamente un 10% el consumo de combustible debido a la recuperación de energía cinética en aceleraciones y frenadas. (Domínguez P., 2018).

Los componentes de un sistema de frenado regenerativo son los siguientes, a continuación, se presentarán sus definiciones junto con sus funciones en un vehículo eléctrico.

4.2.1.1 Motor Eléctrico

Este tipo de motor convierte la energía eléctrica en movimiento, además actúa como generador de electricidad, en aceleración como en las etapas de desaceleración. La mayoría de los fabricantes usan motores de inducción o de imanes permanentes. (Murias, 2020)

Las partes de un motor eléctrico son:

- Batería
- Motor y Freno regenerativo
- Reductor de velocidad y diferencial
- Sistema regulador
- Rectificador
- Transformador
- Controlador

Los tipos de motores eléctricos son:

- Motor asíncrono o de inducción
- Motor síncrono de imanes permanentes
- Motor de reluctancia conmutativa o variable
- Motor sin escobillas de imanes permanentes

4.2.1.2 Acumulador

El acumulador también llamado condensador, este es un dispositivo de doble capa eléctrica y baja resistencia que almacena temporalmente grandes cantidades de electricidad que se pueden usar rápidamente. (Domínguez P., 2018).

4.2.1.3 Alternador de tensión variable

El alternador se encarga de convertir la energía cinética en electricidad y permite generar electricidad eficientemente de acuerdo con las condiciones del vehículo eléctrico, el cual va de 12 a 25 V. (Domínguez P., 2018).

4.2.1.4 Transformador

El transformador también es llamado convertidor, se encarga de transformar la electricidad almacenada a una tensión utilizable para los dispositivos electrónicos del vehículo. (Domínguez P., 2018).

4.2.1.5 Funcionamiento del sistema de regeneración de energía inteligente

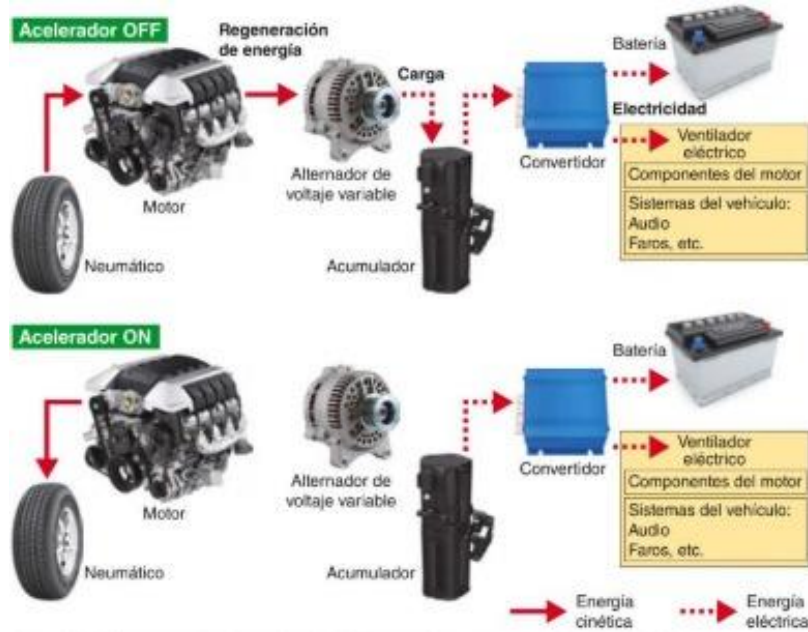
Al ser pisado el pedal del freno, la energía cinética que se genera se convierte en energía eléctrica a través del generador. Dicha energía se almacena en el acumulador o batería recargable. En el momento en el que el conductor suelta el acelerador y el vehículo empieza a desacelerar, el sistema empieza a recuperar energía cinética. (Domínguez P., 2018).

Esto sucede ya que el alternador de tensión genera un voltaje de 25 V para que su eficiencia sea la máxima, antes de enviarla al acumulador de doble capa eléctrica, donde se almacena. Por otro lado, el transformador baja la tensión de 25 a 12 V hace que se distribuya hacia los diferentes componentes del vehículo o dicha energía también puede ser utilizada para cargar la batería si es necesario. (Domínguez P., 2018).

Resumiendo, el proceso del sistema de regeneración inteligente entra en acción cada vez que el vehículo desacelera reduciendo el gasto de energía consumida generando electricidad.

Figura 4

Esquema de funcionamiento del sistema de regeneración de energía inteligente



Nota. Tomado de *Sistemas de transmisión y frenado*. Por Domínguez E. (2018)

4.2.2 Sistema antibloqueo (ABS)

El ABS evita el bloqueo de las ruedas en caso de un frenado demasiado fuerte. Debido a esto, el vehículo permanece en un estado estable y dirigible incluso en el caso de frenado a fondo sobre una calzada lisa. Por otro lado, un frenado con las ruedas bloqueadas implica un recorrido de frenado más largo. (Bosch, 1996)

4.2.2.1 Componentes del ABS

- **Sensor del número de revoluciones:** El sensor inductivo del número de revoluciones comunica la velocidad de la rueda al dispositivo de mando. (Bosch, 1996)
- **Dispositivo de mando:** El dispositivo de mando, representado en el esquema de bloques, es una instalación de 4 canales que recibe, filtra y amplifica las señales de los sensores del número de revoluciones y determina así el resbalamiento de frenado y la aceleración de las diferentes ruedas. (Bosch, 1996)

- **Conexión de entrada:** La conmutación de entrada consta de un filtro paso bajo y de un amplificador para la supresión de interferencias y la amplificación de todas las señales del sensor de número de vueltas. (Bosch, 1996)
- **Conexiones de salida:** Las dos conexiones de salida actúan como reguladores de corriente para los canales 1 + 2 + 3 + 4 y reciben, desde los dos circuitos grandes, las ordenes de posicionamiento para la excitación de las válvulas electromagnéticas. (Bosch, 1996)
- **Paso final:** El paso final regula, influenciado por los reguladores de corriente en las dos conexiones de salida, las corrientes necesarias en su caso para la excitación de las válvulas electromagnéticas. (Bosch, 1996)
- **Estabilizador de tensión:** Este bloque de funciones sirve para la estabilización de la tensión de alimentación y la supervisión de esta tensión con respecto a límites admitidos de tolerancias; contiene además un reconocimiento de tensión insuficiente y una desconexión en el caso de una tensión de a bordo demasiado baja, una memoria de fallos y un conmutador para la luz de indicación de seguridad. (Bosch, 1996)
- **Dispositivos de mando con procesadores:** Este dispositivo de mando posee dos microprocesadores, en vez de dos grandes circuitos, para efectuar el procesamiento previo de las señales, llevar a cabo la realización del programa y encargarse de la auto vigilancia del ABS. (Bosch, 1996)

4.2.3 *Sistema de control*

Los sistemas de control se encargan de dirigir y regular el comportamiento de un sistema con el fin de obtener una respuesta deseada. Existen dos tipos, sistema de control de lazo abierto, donde el controlador determina la señal de entrada al proceso sobre la base de la señal de

referencia únicamente y sistema de control de lazo cerrado, donde el controlador determina la señal de entrada al proceso usando también la medición de la salida (Visioli, 2006).

4.2.3.1 Tipos de sistemas de control

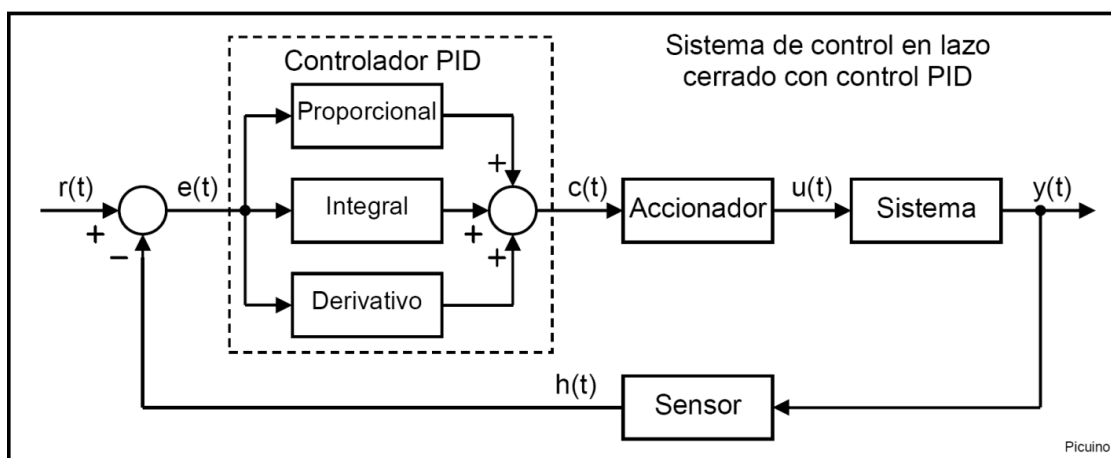
- **Sistema de control de lazo abierto:** Utiliza un regulador o actuador de control para obtener la respuesta de movimiento deseada, este tipo de sistemas no obtienen retroalimentación. (Teyssier, 2019)
- **Sistema de control de lazo cerrado:** Utiliza una medida de la salida real y la compara con la señal de movimiento esperada, a la lectura de la salida que obtiene se le conoce como retroalimentación. (Teyssier, 2019)

4.2.4 Controlador PID

Un controlador o regulador PID es un dispositivo que permite controlar un sistema en lazo cerrado para que alcance el estado de salida deseado. El controlador PID está compuesto de tres elementos que proporcionan una acción proporcional, integral y derivativa. Estas tres acciones son las que dan el nombre al controlador PID. (Pardo, 2013)

Figura 5

Controlador PID básico



Nota. Tomado de: Picuino, (2013). Controlador PID. Obtenido de:

<https://www.picuino.com/es/arduprog/control-pid.html>

4.2.5 *Regen on demand*

Es un derivado del freno regenerativo. De otra forma, llamado manejo de un solo pedal, controlado por 4 niveles de frenado en el volante, le permite al conductor detener el vehículo sin necesidad de usar el pedal de freno. Cuando entra en funcionamiento el sistema Regen on Demand se aplica la máxima fuerza de frenado regenerativo posible (García, 2019).

Es importante aclarar, que no reemplaza del todo al sistema de frenos mecánico o hidráulico.

4.2.6 *e-Pedal*

Este sistema permite al conductor arrancar, acelerar, desacelerar y frenar completamente utilizando únicamente el pedal del acelerador, al levantar el pie de él se activa el sistema de frenado y el vehículo disminuye la velocidad. En los recorridos urbanos, el e-Pedal reduce la necesidad de cambiar el pie derecho constantemente de un pedal al otro lo que hace que la conducción sea más cómoda (García, 2019).

Es importante aclarar, que esta tecnología tampoco reemplaza del todo al sistema de frenos mecánico o hidráulico.

5. Diseño metodológico

Debido a que el objetivo del proyecto es generar un diseño y sistema de control de un freno regenerativo, se procede a trabajar sobre un diseño de investigación explorativa. Esta investigación se hará utilizando la estrategia de consulta técnica, diseño del freno regenerativo,

diseño del controlador y simulación en los softwares SolidWorks y Simulink de Matlab, con el fin de implementarlo en un auto eléctrico que le sirva a la población de la ciudad de Bucaramanga para movilizarse a bajo costo cuidando el medio ambiente.

5.1 Selección de alternativas

Esta sección estará dividida en la selección tanto del diseño del freno regenerativo mediante una matriz QFD que evaluará las características de cada alternativa, como de la selección del sistema de control utilizado.

5.1.1 Selección del sistema de frenado regenerativo

Para la selección del sistema de frenado se listarán los requerimientos del sistema de frenado y las especificaciones técnicas, en donde, a través de una priorización y evaluación de parámetros se busca conocer las principales características para tener en cuenta.

Tabla 1

Matriz de calidad con los requerimientos y especificaciones técnicas

REQUERIMIENTOS	PRIORIDAD	ESPECIFICACIONES					
		PESO		RESISTENCIA AL DESGASTE		DISEÑO ESTRUCTURAL	
		Dato	Ponderado	Dato	Ponderado	Dato	Ponderado
Seguridad	9	1	9	10	90	10	90
Eficiencia	10	3	30	10	100	9	90
Costo dispositivo	6	8	48	1	6	10	60
Costo por combustible	3	10	30	0	0	0	0
Comodidad y adaptación	8	0	0	0	0	10	80
Facilidad de mantenimiento	6	1	6	7	42	6	36

TOTAL	123	238	356
ORDEN DE IMPORTANCIA	3	2	1

Al analizar la prioridad de cada uno de los requerimientos y las especificaciones, se obtuvo que el diseño estructural es el parámetro más importante.

En la siguiente tabla, se comparan las dos principales tecnologías de frenado regenerativo, de esta, se escogerá cuál es el sistema que se desarrollará en el presente proyecto.

Tabla 2

Evaluación y selección de alternativas

	PRIORIDAD	TECNOLOGÍA REGEN-ON DEMAND + ABS		TECNOLOGÍA E- PEDAL + ABS	
		Dato	Ponderado	Dato	Ponderado
Peso	17,2%	10	1,72	9	1,54
Resistencia al desgaste	33,2%	8	2,66	10	3,32
Diseño estructural	49,7%	5	2,48	10	4,97
TOTAL			6,85		9,83

De la matriz QFD, se establece que la mejor opción es el sistema de freno regenerativo E-Pedal + ABS, ya que cumple con altos requerimientos en seguridad, adaptación, efectividad y costo; se descarta la tecnología On demand por su adaptación, ya que los controles de frenado están en el volante del vehículo, no es común, por lo tanto, es menos atractivo a los consumidores.

Entonces, en el presente proyecto, se diseñará un sistema de frenado regenerativo E-Pedal + ABS partiendo de un vehículo tipo coupé con las siguientes especificaciones:

Tabla 3*Parámetros de diseño*

Batalla: 2500 [mm]

Vía delantera: 1564 [mm]

Vía trasera: 1543 [mm]

Peso aproximado: 1800 [kg]

Tamaño rin: 17 [in]

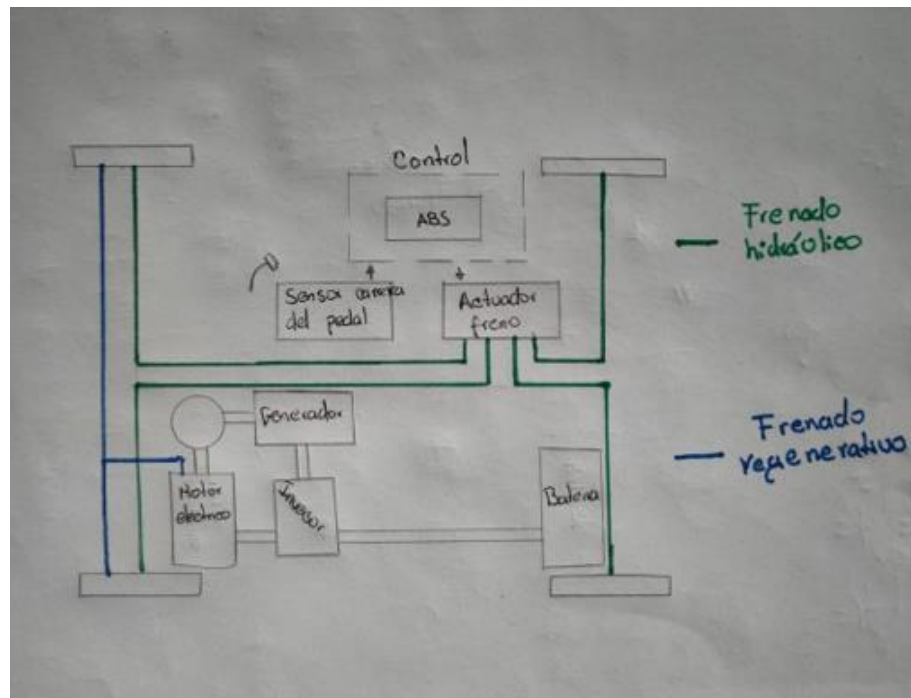
Velocidad máxima: 100 [km/h]

Es importante aclarar que este proyecto se está desarrollando de la mano con otros proyectos que están enfocados en líneas como diseño de carrocería y diseño de suspensión, por lo tanto, debe tener las mismas o similares características para la futura construcción del vehículo.

Por último, se presentará un boceto inicial de la ubicación de los componentes para el sistema de frenado del vehículo.

Figura 6

Boceto inicial de los componentes del sistema de frenado



5.1.2 Selección del sistema de control

Para el sistema de control, se proyecta partir del sistema PID propuesto en el trabajo de investigación “Estudio en la estrategia de control de frenado regenerativo para un vehículo eléctrico bajo condiciones normales”, presentado en la Figura 2.

6. Diseño del sistema de frenado regenerativo para vehículo

Para el proceso de diseño, es necesario identificar las diferentes formas de energía que puede experimentar un vehículo en movimiento, por lo que se recurre al libro *Vehicle Propulsion Systems de Guzzella & Sciarretta tercera edición*, en donde se hace un análisis detallado de cada

una de las fuerzas que pueden intervenir al trasladarse un automóvil. A continuación, se seguirá parte de la metodología de diseño propuesta en dicho libro.

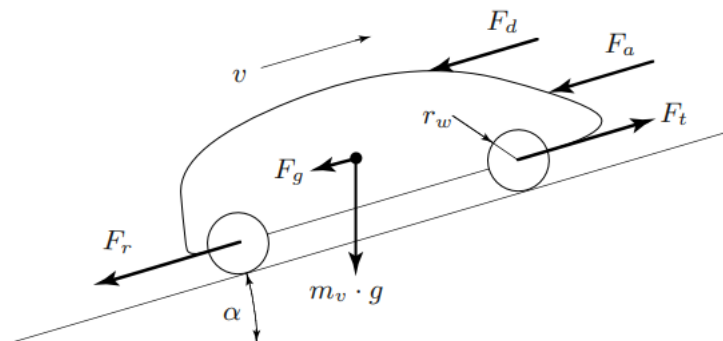
6.1 Pérdidas de energía del vehículo

La energía producida por el motor del vehículo, en este caso eléctrico, se almacena de diferentes formas en el mismo; en forma de energía cinética al acelerarlo, en forma de energía potencial dependiendo la altitud que alcance y el resto se distribuye en pérdidas de acuerdo con Guzzella & Sciarretta (2013), estas son: pérdidas por fricción aerodinámica, por fricción de rodadura y por energía disipada en los frenos.

A continuación, se presenta una figura en donde se proponen las fuerzas que actúan sobre el vehículo.

Figura 7

Representación esquemática de las fuerzas que actúan sobre un vehículo en movimiento



Nota. Tomado de *Vehicle Proporsion Systems tercera edición* (p. 14), por Guzzella & Sciarretta (2013)

En donde m_v es la masa del vehículo, g es la gravedad equivalente a $9,81 \text{ m/s}^2$, r_w es el radio de las llantas del vehículo, α es el ángulo de la inclinación de la vía, v la velocidad a la que

se desplaza el vehículo dando también la dirección hacia donde se desplaza, F_g es la fuerza de gravedad, F_t la fuerza de tracción, F_a la fuerza aerodinámica y F_r la fuerza de fricción.

Guzzella & Sciarretta (2013) proponen la siguiente ecuación, que describe la dinámica longitudinal del vehículo:

$$m_v \frac{d}{dt} v(t) = F_t(t) - (F_a(t) + F_r(t) + F_g(t) + F_d(t)) \quad (1)$$

Esta ecuación se plantea de acuerdo con el diagrama de cuerpo libre de la figura anterior, pero esta expresada en términos generales, entonces a continuación el autor nos propone un desglose de cada uno de los términos:

6.1.1 Pérdidas por fricción aerodinámica (F_a)

Esta fricción es causada por el aire circundante que actúa sobre la superficie del vehículo; en donde la diferencia de presión entre la parte delantera y trasera es la causa de las pérdidas. Para un automóvil de pasajeros estándar Guzzella & Sciarretta (2013) mencionan que la carrocería genera aproximadamente el 65% de la resistencia aerodinámica, 20% canales de las ruedas, 10% los retrovisores, antenas, huecos de ventanillas, etc. Y un 5% la ventilación del motor.

Para modelar la ecuación que describe este tipo de pérdida, por lo general, la fuerza de resistencia aerodinámica aproxima al vehículo a una carrocería prismática con zona frontal A_f y la fuerza causada por la presión de estancamiento se multiplica por el coeficiente aerodinámico de arrastre $C_d(v, \dots)$ que modela las condiciones reales del flujo, según Guzzella & Sciarretta (2013).

$$F_a(v) = \frac{1}{2} \rho_a A_f C_d(v, \dots) v^2 \quad (2)$$

En esta ecuación v es la velocidad del vehículo y ρ_a la densidad del aire ambiente. $C_d(v, \dots)$ debe estimarse utilizando programas CFD o túneles experimentales. Aunque para la estimación de la energía mecánica requerida en un ciclo de ensayo se puede suponer constante.

6.1.2 Pérdidas por fricción rodante (F_r)

La fuerza de fricción por rodadura se modela como:

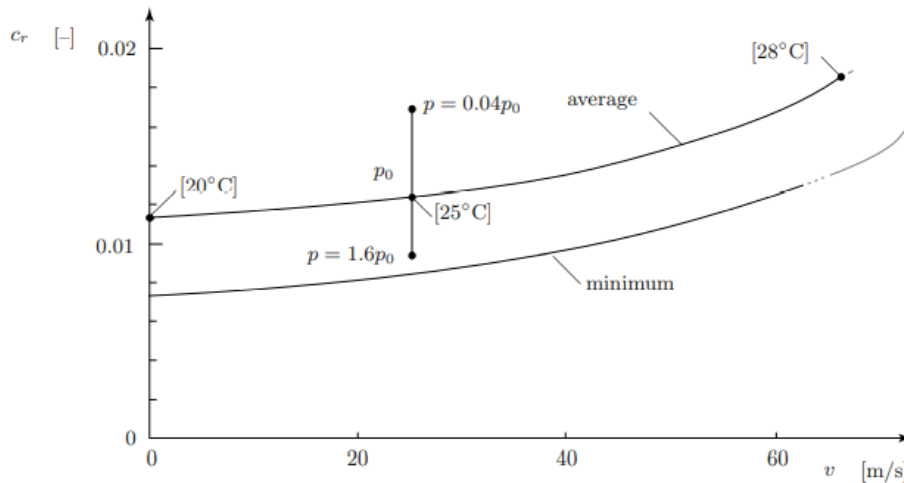
$$F_r(v, p, \dots) = C_r(v, p, \dots) m_v g \cos(\alpha) \quad \text{para } v > 0 \quad (3)$$

En donde m_v es la masa del vehículo, g la aceleración gravitacional, $\cos(\alpha)$ modela las condiciones de una carretera con una pendiente α (aunque su influencia es mínima) y C_r el coeficiente de fricción por rodadura.

El coeficiente de fricción por rodadura depende de variables como la velocidad del vehículo, la presión de los neumáticos y las condiciones de la superficie. Según Guzzella & Sciarretta (2013), la influencia de la presión de las llantas se puede aproximar a $\frac{1}{\sqrt{p}}$, en cuanto a la superficie una carretera mojada aumenta el factor en un 20% e incluso el doble si se conduce en arena, la velocidad del vehículo produce variaciones mínimas a bajas velocidades, pero a altas velocidades su influencia aumenta.

Figura 8

Coeficiente de rozamiento de los neumáticos en función de la presión y la variación de velocidad del vehículo.



Nota. Tomado de *Vehicle Propulsion Systems tercera edición* (p. 16), por Guzzella & Sciarretta (2013)

En la gráfica, se puede verificar la variación entre 0,009 y 0,018 del coeficiente de rozamiento teniendo en cuenta las variaciones entre la velocidad, la temperatura y la presión, entonces lo que se hará es manejar un valor promedio de temperatura de 25°C , dando un coeficiente aproximado de 0.4146.

6.1.3 Pérdidas por fuerza motriz cuesta arriba (F_g)

Este tipo de fuerza al circular por una carretera con una pendiente positiva influye considerablemente en el comportamiento del vehículo, por lo que se utilizaría la siguiente ecuación extraída de Guzzella & Sciarretta (2013) para modelarla:

$$F_g(\alpha) = m_v g \text{sen}(\alpha) \quad (4)$$

Cuando la inclinación es pequeña, se puede aproximar a:

$$F_g(\alpha) \approx m_v g \alpha \quad (5)$$

Teniendo en cuenta que el ángulo de inclinación debe estar en radianes.

6.1.4 Pérdidas por fuerza de inercia (F_m)

Para la fuerza de inercia Guzzella & Sciarretta (2013) considera la inercia ficticia de las partes móviles del vehículo y de su masa, por lo que para este tipo de fuerza se considerará el motor con la transmisión y la inercia de las ruedas del vehículo.

Para esto se inicia formulando la ecuación del par de inercia total de las ruedas:

$$T_{m,w}(t) = \theta_w \frac{d}{dt} w_w(t) \quad (6)$$

Obtenido el par de torsión se sabe que este genera una fuerza de inercia adicional dada por $F_{m,w} = \frac{T_{m,w}}{r_w}$, reemplazando la ecuación del torque se obtiene:

$$F_{m,w}(t) = \frac{\theta_w}{r_w^2} \frac{d}{dt} w_w(t) \quad (7)$$

Entonces, las ruedas aportan a la inercia del vehículo:

$$m_{r,w} = \frac{1}{r_w^2} \theta_w \quad (8)$$

Para la inercia del motor el análisis será el mismo, entonces se define el par de inercia total:

$$T_{m,e}(t) = \theta_e \frac{d}{dt} w_e(t) = \theta_e \frac{d}{dt} (\gamma w_w(t)) = \theta_e \frac{\gamma}{r_w} \frac{d}{dt} v(t) \quad (9)$$

Este par de torsión genera la siguiente fuerza:

$$F_{m,e}(t) = \theta_e \frac{\gamma^2}{r_w^2} \frac{d}{dt} v(t) \quad (10)$$

Entonces, la masa que aporta el motor a la inercia del vehículo está dada por:

$$m_{r,e} = \frac{\gamma^2}{r_w^2} \theta_e \quad (11)$$

Luego de la deducción desarrollada por Guzzella & Sciarretta (2013) se puede decir que la masa equivalente de las partes giratorias se aproxima a:

$$m_r = m_{r,w} + m_{r,e} = \frac{1}{r_w^2} \theta_w + \frac{\gamma^2}{r_w^2} \theta_e \quad (12)$$

Dicha masa debe ser agregada a la masa del vehículo de la ecuación generada para la Figura 7. En donde r_w es el radio de la rueda, γ es el radio de la transmisión, θ_w es la inercia de las llantas que incluye todas las partes giratorias presentes desde las ruedas hasta la caja de cambios, suponiendo que la velocidad de estas es la misma y θ_e es la inercia del motor que incluye todas las partes móviles desde este hasta la caja de cambios.

6.2 Comportamiento de la energía y la potencia durante los procesos de aceleración y frenado

Es necesario realizar una sumatoria de fuerzas direccionales del vehículo como lo describe Salcedo (2015), obteniendo así la aceleración generada sobre el vehículo debido al comportamiento de las fuerzas sobre este mismo:

$$m_v \frac{dv}{dt}(t) = F_t(t) - [F_g(t) + F_a(t) + F_r(t)] \quad (13)$$

Y despejando la fuerza de torsión obtenemos:

$$F_t(t) = m_v a(t) + F_g(t) + F_a(t) + F_r(t) \quad (14)$$

Para calcular la energía transferida en intervalos de tiempo dt , primero se utiliza la ecuación de potencia instantánea, la cual es:

$$P(t) = F_t(t) * v(t) \quad (15)$$

La potencia $P(t)$ también puede representarse como $\frac{dE}{dt}(t)$ y despejando dE se obtiene:

$$dE(t) = [m_v a(t) + F_g(t) + F_a(t) + F_r(t)] * v(t) dt \quad (16)$$

La ecuación será usada para aceleración y desaceleración respectivamente teniendo como única diferencia la representación de variable $a(t)$ debido a que para la aceleración se encontrará una demanda o adquisición de energía según Salcedo (2015), en el caso de la desaceleración se estará utilizando o disipando esta misma.

$$E = \int [m_v a(t) + F_g(t) + F_a(t) + F_r(t)] \cdot v(t) dt \quad (17)$$

6.3 Cálculo de la energía y potencia consumida por un vehículo en un ciclo de conducción

Para el diseño del sistema de frenado regenerativo es necesario analizar un ciclo de conducción de un vehículo en las condiciones esperadas durante su vida útil, para esto se buscó un ciclo de conducción desarrollado si no en la ciudad de Bucaramanga, en ciudades de Colombia; existen registros en la primera mencionada, pero, al analizar dicho ciclo, este no es consistente y es poco fiable para el presente diseño León (2019), ya que muestra una velocidad máxima de 30 km/h, velocidad que para un vehículo en condiciones normales es reducida, se analizan otros ciclos de conducción en el país y no se encuentran concluyentes o no fue posible conseguir la información Hurtado (2014), por lo que se encuentra un ciclo desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos **, en una ciudad con similitudes a las

1. ** Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (1995) Dynamometer Drive Schedules.
<https://www.epa.gov/vehicle-and-fuel-emissions-testing/dynamometer-drive-schedules>

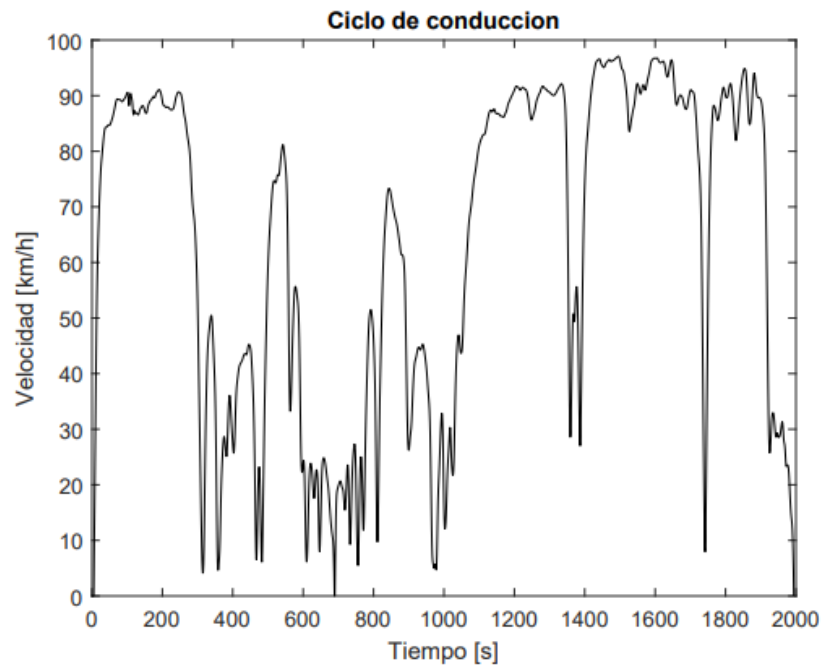
condiciones deseadas.

En dicho ciclo, se presentan los datos de velocidad y aceleración obtenidos durante 1995 segundos, durante una mañana y una tarde en un trayecto de conducción normal, obteniendo una velocidad máxima aproximada de 97 km/h.

Basados en el ciclo de conducción y sabiendo que la velocidad máxima del vehículo a diseñar es 100 km/h, lo que se hará es generar los valores de energía y potencia en el frenado del vehículo en dicho ciclo y mediante un histograma visualizar los valores que más se repiten en el frenado del vehículo; esto con el fin de diseñar en base a los valores máximos y comunes de los parámetros mencionados anteriormente. Utilizando la teoría de fuerzas de frenado expuesta anteriormente, se desarrolló un programa generado en Matlab Apéndice A), a continuación, se presenta el gráfico del ciclo de conducción de tiempo vs. velocidad.

Figura 9

Gráfica Velocidad vs. Tiempo del ciclo de conducción

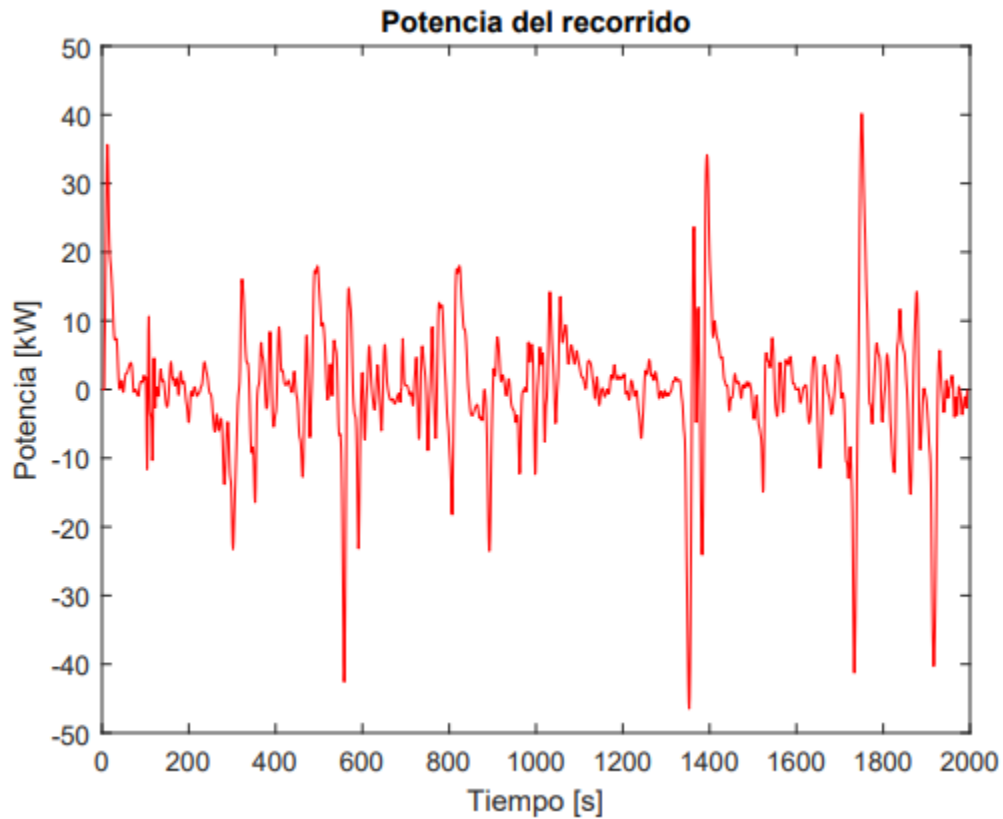


En la figura del ciclo de conducción se observa las velocidades desarrolladas por el vehículo, en donde, se pueden observar descensos repentinos de velocidad, estas son las frenadas hechas por el vehículo, para desarrollar los histogramas, se hace un análisis de los descensos repentinos, encontrando que cuando la desaceleración del vehículo es menor a -1 m/s^2 , se genera un frenado, siendo la menor de $-4,09 \text{ m/s}^2$ el ciclo.

Además, se genera una gráfica de potencia consumida por el vehículo en el ciclo, esto con el fin de generar un punto de partida de la potencia máxima con la que se seleccionaran los componentes del sistema de frenado regenerativo.

Figura 10

Potencia consumida en el recorrido del ciclo de conducción



7. Selección de componentes para el sistema de frenado regenerativo

Teniendo en cuenta los parámetros de diseño encontrados en la fase anterior, se seleccionan los componentes para el sistema de frenado, siendo el más importante la potencia máxima de 60,403 kW y la mínima de 68,403 kW, datos tomados de la Figura 10.

A continuación, se seleccionan los mecanismos, teniendo en cuenta la facilidad de instalación, el reducido tamaño y el costo de los componentes.

7.1 Selección del motor

Se seleccionó el motor de la marca Swindon Powertrain, ya que cuenta con múltiples partes de sujeción, es uno de los más pequeños y con mejor relación de potencia en el mercado, además, es una marca confiable y muy utilizada en Europa para la conversión de cualquier vehículo de motor a combustión eléctrico. La referencia del motor es HPD 128E.

Figura 11

Motor HPD 128E



Nota. Tomada de Swindon Powertrain. <https://swindonpowertrain.com/products/hpd-l/>

A continuación, se presenta la ficha técnica del motor suministrada por el fabricante.

Tabla 4

Características del motor HPD 128E

Características técnicas	HPD 128 E
Tipo de motor	IPM
Potencia nominal máxima	128 kW (@10,300 rpm)
Potencia nominal continua	80 kW
Par motor máx.	136 Nm
Eficiencia máx. del motor	97%
Velocidad máxima del motor de eficiencia	8000 rpm

Características técnicas	HPD 128 E
Velocidad máx. del motor	10.500 rpm
Transmisión	Velocidad única, engranajes helicoidales
Capacidad de aceite	0,75 l
Opciones de relación de transmisión	11.508 o 6.332
Par de salida nominal máx.	1565 Nm o 861 Nm
Velocidad de salida nominal máx.	912 rpm o 1658 rpm
Inercia general en la salida	1,05 kg.m ² o 0,35 kg.m ²
Dimensiones	441 x 384 x 228 mm
Masa	49.9 kg (seco)

Nota. Tomada de Swindon Powertrain. <https://swindonpowertrain.com/products/hpd-l/>

7.2 Selección de la transmisión

Las transmisiones eléctricas son de una sola velocidad, por facilidad de acople al motor, al igual que los demás componentes, se seleccionó de la marca Swindon Powertrain. La referencia del producto es E-Transmission.

Figura 12

E-Transmission



Nota. Tomada de Swindon Powertrain. <https://swindonpowertrain.com/products/e-transmission/>

A continuación, se presenta la ficha técnica del producto suministrada por el fabricante.

Tabla 5*Características técnicas de la transmisión*

Características técnicas	Transmisión electrónica
Tipo de transmisión	Velocidad única
Par de entrada máx. (Nm)	204
Velocidad máx. del motor (rpm)	10,500
Tipo de engranaje	Engranajes helicoidales
Tipo diferencial	Estándar/Abierto
Tipo de lubricación	Salpicar
Capacidad de aceite (L)	0.75
Ángulo de instalación (grados)	15.0 Máx.
Opciones de relación de transmisión	11.508 o 6.332
Par de salida nominal máx. (Nm)	2348 o 1292
Velocidad de salida nominal máx. (rpm)	912 o 1658
Dimensiones (mm)	250 x 384 x 228
Masa	17,9 kg

Nota. Tomada de Swindon Powertrain. <https://swindonpowertrain.com/products/e-transmission/>

7.3 Selección del inversor

Inversor de la marca Swindon Powertrain, de referencia CM 200DXI, con propulsión integrada y un rango de funcionamiento de 50 – 480 VCC y una potencia máxima de 225 kW, cumpliendo con los parámetros de diseño establecidos.

Figura 13

Inversor CM 200 DXI



Nota. Tomada de Swindon Powertrain.

https://webshop.swindonpowertrain.com/index.php?route=product/product&path=115_121&product_id=349

A continuación, se presenta la ficha técnica del producto suministrada por el fabricante.

Figura 14

Datos técnicos del inversor CM200DXI

CM200	DX	DZ	Units
DC Voltage – operating	50-480	200-840	VDC
DC Overvoltage Trip	500	860	VDC
Maximum DC Voltage – non-operating	500	900	VDC
Motor Current Continuous	300	200	A
Motor Current Peak *	740	400	Arms
Output Power Peak (elect) *	225	225	kW
DC Bus Capacitance	650	225	μF
Size and Volume	330 x 188 x 97 / 3.9		mm / L
Weight	6.75		kg
Active Discharge via motor winding to <50V	< 1		sec
Passive Discharge (internal resistor) to <50V	< 120		sec
Vehicle System Power	9 .. 32 (12V & 24V systems)		VDC
Inverter PWM Frequency	12 (6 .. 16 variable)		kHz
Operating Temperature Range – coolant water	- 40 .. +80, (derate to zero 80 .. 100)		°C
Coolant Flow Rate	12 (3 GPM min)		LPM
Coolant Pressure Drop (60°C coolant / 12 LPM)	0.3 (30kPa / 4.3psi)		bar
Maximum Coolant Pressure (absolute)	3 (300kPa / 45psia)		bar
Operating Shock (ISO 16750-3, Test 4.2.2.2)	500 (50g), pending		m/s ²
Operating Vibration (ISO 16750-3, 4.1.2.4 Test IV)	27.8 (3grms), pending		m/s ²
EMC compatibility	IEC61000 / CISPR-25 pending		
Compatible Conductor Sizes	16, 25, 35, 50		mm ²

Nota. Tomada de Swindon Powertrain.

https://webshop.swindonpowertrain.com/index.php?route=product/product&path=115_121&product_id=349

7.4 Selección de la batería

Figura 15

Batería HDE-30



Nota. Tomada de Swindon Powertrain. <https://swindonpowertrain.com/products/hpd-l/>

La batería es el componente más importante del vehículo eléctrico, por lo que se seleccionó una batería confiable, con una capacidad de almacenamiento media respecto a las del mercado, a un bajo costo, con tamaño y masa mínima; como los demás componentes de la marca Swindon Powertrain, es una batería diseñada para el tren de propulsión seleccionado, optimizando el funcionamiento de los componentes. Su referencia es Batería universal HED-30 y su autonomía aproximada es de 220 km de recorrido.

A continuación, se presenta la ficha técnica del producto suministrada por el fabricante.

Tabla 6*Características técnicas de la batería*

Características técnicas	HED-30
Capacidad energética total	30 kWh
Capacidad de energía utilizable	28 kWh
Corriente de descarga continua	174 A
Corriente de descarga máxium*	870 A
Potencia máxima de salida	153 kW
Voltaje máximo	209 V
Tensión nominal	176 V
Voltaje mínimo	132 V
Dimensiones	1002 x 422 x 389 mm
Masa	190 kg

Nota. Tomada de Swindon Powertrain. <https://swindonpowertrain.com/products/hpd-l/>

8. Selección de componentes para el sistema de frenado hidráulico

Los componentes del sistema hidráulico se seleccionan ajustándolos a las características del vehículo a diseñar, ya que, por ser un sistema antiguo y con poca innovación, no generó algún tipo de diseño.

A continuación, se selecciona cada una de las partes que lo conforman.

8.1 Selección del Servofreno (Brake Booster)

Figura 16

Servofreno



Nota. Tomado de TRW. <https://www.trwaftermarket.com/es/turismo/hidraulica-de-freno/servofrenos/>

El servofreno debe tener un diseño eficaz y resistente el cual permita accionar el pedal con facilidad, proporcionando una gran potencia al realizar el frenado y a un bajo costo, por lo tanto, la marca TRW cumple con estas características. La referencia del servofreno elegido es TRW PSA112.

A continuación, se presenta la ficha técnica del producto suministrada por el fabricante.

Figura 17

Características técnicas servofreno TRW PSA 112

Diámetro [in]:	11
Restricción de fabricante:	TRW
Vehículo con dirección a la izquierda / derecha:	para dirección izquierda/derecha
TRW:	Servofrenos
Número de artículo:	PSA112
Nuestro precio:	139,44 €
Número de referencia del fabricante:	PSA112
Fabricante de piezas:	TRW
Números de EAN:	3322937925742
Estado	Nuevo

Nota. Tomado de TRW. <https://www.autodoc.es/trw/2210948-freno/servofrenos/>

8.2 Cilindro maestro

Figura 18*Cilindro principal de freno*

Nota. Tomado de TRW. <https://www.trwaftermarket.com/es/turismo/hidraulica-de-freno/cilindro-principal-de-freno/>

En la selección de un servofreno se debe tener en cuenta un cuerpo ligero pero resistente, en su preferencia diseñado con aluminio, debido a que brinda más resistencia y no tendrá compuestos químicos como el cromo hexavalente, lo que garantiza su compromiso con el medio ambiente y mejor aprovechamiento de su vida útil. La marca TRW proporciona todas estas características en su catálogo de cilindros maestros, en este caso con referencia TRW PMK109.

A continuación, se presenta la ficha técnica del producto suministrado por el fabricante.

Figura 19*Características técnicas del cilindro maestro TRW PMK109*

Diámetro 1 [mm]:	23,8
Restricción de fabricante:	TRW
TRW:	Cilindro principal de freno
Número de artículo:	PMK109
Nuestro precio:	227,92 €
Número de referencia del fabricante:	PMK109
Fabricante de piezas:	TRW
Números de EAN:	3322937056255

Nota. Tomado de TRW. <https://www.autodoc.es/trw/2209068>

8.3 Rotor o Disco de freno

Figura 20

Disco de freno





Nota. Tomado de TRW. <https://www.trwaftermarket.com/es/turismo/sistemas-de-freno-de-disco/discos-de-freno/>

Se seleccionan discos pintados que cuentan con capa protectora para evitar la corrosión. Los discos TRW tienen un contenido de carbono elevado con el fin de adquirir un mejor comportamiento térmico, gran estabilidad y un alto rendimiento. La referencia del disco de freno seleccionado es TRW DF4036.

A continuación, se presenta la ficha técnica del producto suministrada por el fabricante

Figura 21

Ficha técnica del freno de disco TRW DF4036

Lado de montaje:	 Eje delantero
Diámetro [mm]:	258
Tipo de disco de frenos:	ventilado
Diámetro de centrado [mm]:	63,4
Número de orificios:	4
corona de agujeros - Ø [mm]:	108
Espesor de disco de frenos [mm]:	22
Superficie:	barnizado
Espesor mínimo [mm]:	20
Altura [mm]:	43,4
Medida de rosca:	13,6
Color:	 negro
Homologación:	E1 90R 02 C0176/529
TRW:	Disco de freno
Número de artículo:	DF4036
Nuestro precio:	25,32 €
Número de referencia del fabricante:	DF4036
Fabricante de piezas:	TRW

Nota. Tomado de TRW. <https://www.autodoc.es/trw/2189269>

8.4 Pinza de freno o cáliper

Figura 22

Pinza de freno o Cáliper



Nota. Tomado de <https://www.trwaftermarket.com/es/turismo/sistemas-de-freno-de-disco/calipers-de-freno/>

Las pinzas de freno de TRW tienen la misma calidad que los equipos de marcas originales, por lo cual, se garantiza un rendimiento óptimo y confiable, así como un menor costo en comparación a otras marcas; son amigables con el medio ambiente brindando una garantía de 100000 km de uso. La pinza de freno seleccionada es TRW BHN312E.

A continuación, se presenta la ficha técnica del producto suministrada por el fabricante.

Figura 23

Ficha técnica de la pinza de freno TRW BHN312E

Tipo de pinza de freno:	Montura de puño, Pinza con freno estacionamiento integrado
Material:	Hierro fundido
Restricción de fabricante:	TRW
Pieza de intercambio	
Referencia artículo par:	BHN311E
observar datos técnicos	
Diámetro del pistón [mm]:	34
TRW:	Pinza de freno
Número de artículo:	BHN312E
Nuestro precio:	56,74 €
Número de referencia del fabricante:	BHN312E
Fabricante de piezas:	TRW
Números de EAN:	3322937367320
Estado	Reacondicionado

Nota. Tomado de <https://www.autodoc.es/trw/2183905>

8.5 Pastillas de freno

Figura 24

Pastilla de freno TRW



Nota. Tomado de <https://www.trwaftermarket.com/es/turismo/sistemas-de-freno-de-disco/pastillas-de-freno/>

Pastillas de freno TRW con revestimiento de silicato avanzado COTEC. Material que genera mejor contacto entre el disco y la pastilla, permitiendo detener el vehículo hasta siete metros antes que otras pastillas del mercado. La referencia de estas pastillas de freno son TRW COTEC GDB1354.

A continuación, se presenta la ficha técnica del producto suministrada por el fabricante.

Figura 25

Ficha técnica de las pastillas TRW COTEC GDB1354

Lado de montaje:	Eje trasero
año construcción desde:	09/2000
Unidad de cantidad:	Juego para eje
Gama de productos	<u>COTEC</u>
Contacto avisador de desgaste:	no preparado para indicador de desgaste
Altura [mm]:	42,5
Ancho [mm]:	87,2
Espesor [mm]:	14,5
Homologación:	E2 90R 01125/006
Artículo complementario / información complementaria 2:	con tornillos pinza freno
Restricción de fabricante:	TRW
Artículo complementario/Información complementaria:	con accesorios
TRW:	<u>Juego de pastillas de freno</u>
Número de artículo:	GDB1354
Nuestro precio:	18,49 €
Número de referencia del fabricante:	GDB1354
Fabricante de piezas:	TRW
Números de EAN:	3322937242023
Estado	Nuevo

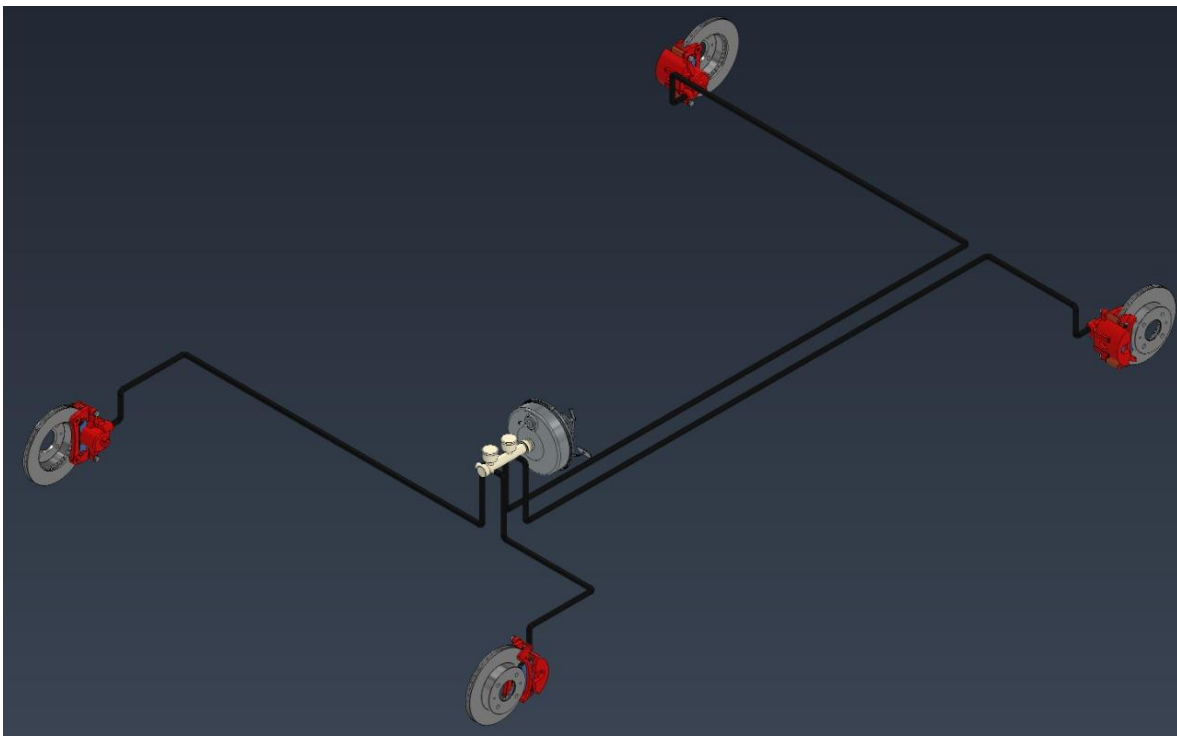
Nota. Tomado de <https://www.trwaftermarket.com/es/turismo/sistemas-de-freno-de-disco/pastillas-de-freno/>

9. Modelado en SolidWorks

Teniendo en cuenta los parámetros establecidos en el diseño inicial, especificados en Tabla 3 Parámetros de diseño como lo son la batalla, vía delantera, trasera, tamaño de rin, y con la selección de componentes mostrada anteriormente, se generó la simulación en el programa SolidWorks, obteniendo los siguientes resultados:

Figura 26

Modelado en SolidWorks del sistema de frenado hidráulico

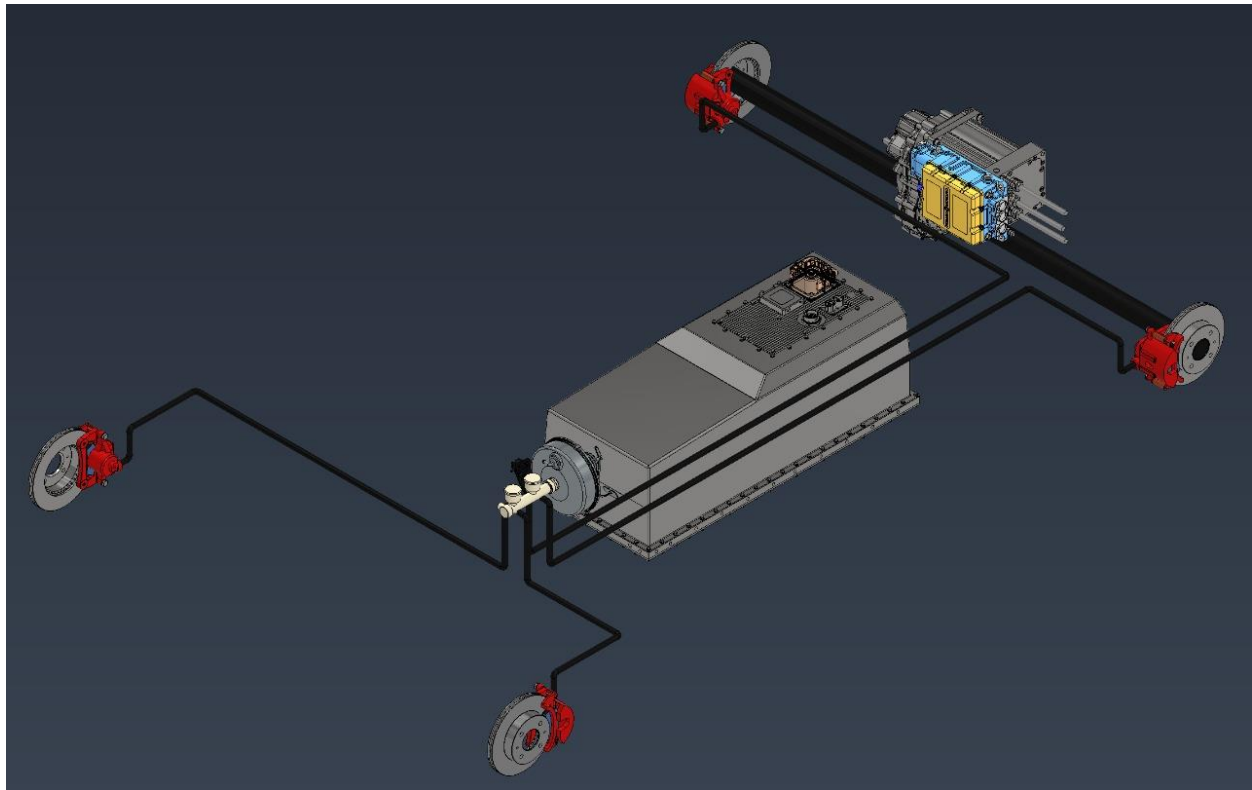


Nota. En la figura anterior se presenta el sistema de frenado hidráulico, conformado por componentes seleccionados en el apartado anterior, en donde se puede observar desde los discos

de freno y las pinzas hasta el cilindro maestro conectado al servofreno mediante una manguera hidráulica.

Figura 27

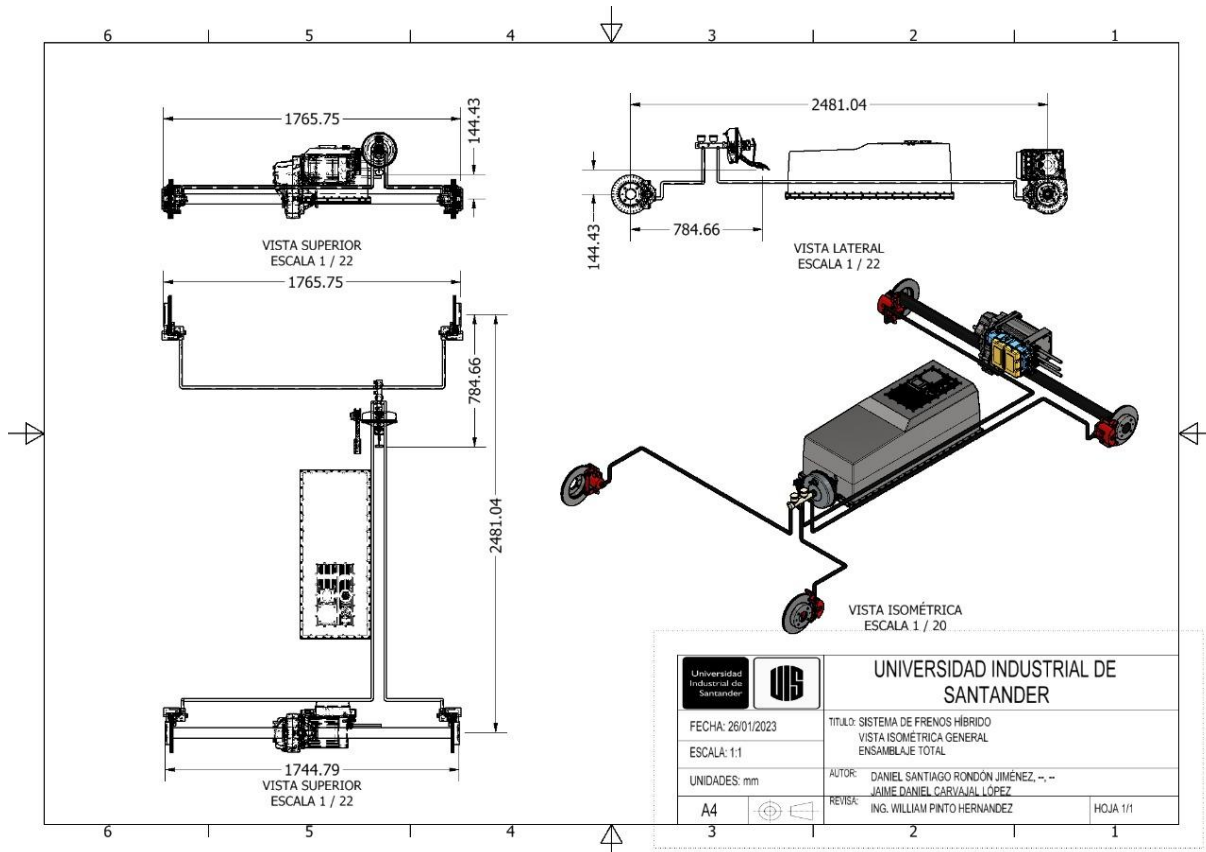
Modelado en SolidWorks del sistema de frenado hidráulico y regenerativo



Nota. Se presenta el conjunto de frenado completo, en donde para la parte regenerativa se incluye la batería del vehículo, el motor, la transmisión, el inversor y el eje trasero del vehículo, además del sistema e-pedal. Es importante aclarar que los componentes son los seleccionados durante el proceso de diseño.

Figura 28

Planos en SolidWorks del sistema de frenado hidráulico y regenerativo



Nota. En el plano se presentan las dimensiones propuestas para el vehículo, teniendo en cuenta la batalla, vía delantera y trasera mencionadas en la fase de diseño.

10. Sistema de control del frenado

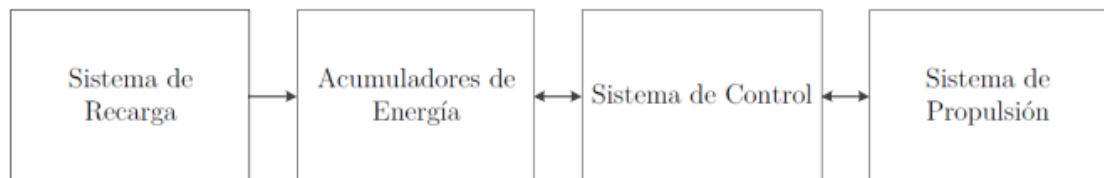
El sistema de control del frenado se dividió en dos partes, debido a que el sistema de frenado regenerativo se implementa con el sistema e-Pedal, el cual permite acelerar, desacelerar y frenar el vehículo (frenado regenerativo) con el mismo pedal, por otro lado, el sistema de control con ABS del frenado hidráulico. A continuación, se explicarán cada uno de los sistemas.

10.1 Sistema de control del frenado regenerativo

Basados en la selección de los componentes físicos del frenado regenerativo se diseña el sistema de control, para esto, se toma como base el libro *Diseño e implementación de freno regenerativo para motor de corriente continua sin escobillas con imanes permanentes para moto eléctrica de Daniel Spencer*, en donde, a pesar de tener una aplicación y dispositivos diferentes, generan un punto de inicio para desarrollar dicho sistema. A continuación, se inicia describiendo la planta motriz del vehículo, con el fin de definir los subsistemas que se deben tener en cuenta.

Figura 29

Esquema planta motriz de un vehículo



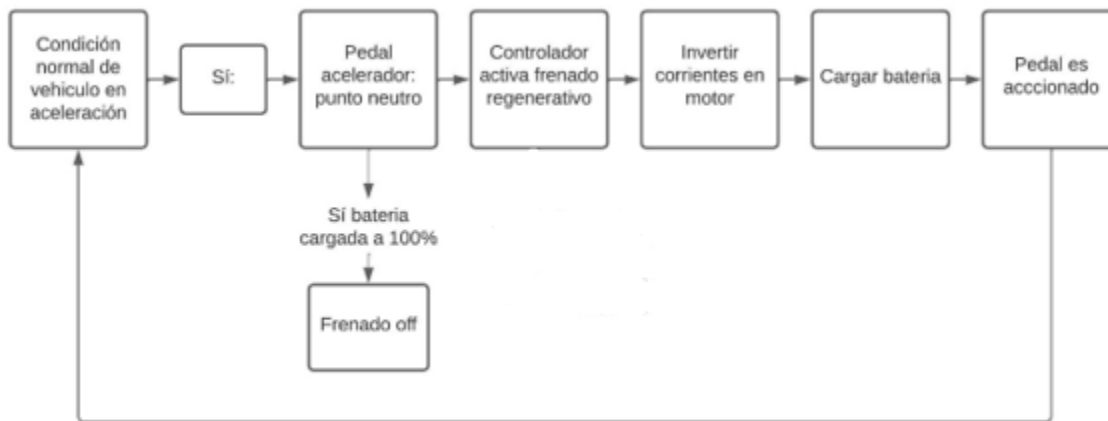
Nota. Tomado de *Diseño e implementación de freno regenerativo para motor de corriente continua sin escobillas con imanes permanentes* (p. 7) (Spencer, 2019).

En la anterior imagen, se puede visualizar los subsistemas que componen a un vehículo eléctrico y la relación que debe haber entre ellos; en donde el sistema de recarga es la manera en la que entra energía al vehículo, los acumuladores de energía son reservorios en donde se almacena tanto la energía que entra externa al vehículo por el sistema de recarga, como la energía generada por el sistema de frenado, siendo el sistema de control el puente entre este y el sistema de propulsión compuesto por el motor, que dependiendo la condición, recibe energía o la genera (Spencer, 2019).

Inicialmente, se propone un sistema de control basado en la tecnología e-Pedal, en donde, si el acelerador pasa de estar accionado a punto neutro, automáticamente el vehículo debe activar el frenado regenerativo, como se muestra en la siguiente figura.

Figura 30

Modelo conceptual del circuito eléctrico para el frenado regenerativo



Se muestran las condiciones iniciales propuestas para el frenado, condicionándolo en el momento en que la batería no esté totalmente cargada; entonces, si se activa el frenado regenerativo, este se encarga de invertir el sentido de las corrientes en el estator del motor con el fin de obtener un torque contrario, por ende, mientras que el eje del vehículo se encuentre en movimiento por inercia, generará la energía de recarga deseada.

Para que el proceso descrito anteriormente se pueda llevar a cabo, los parámetros que se deben tener en cuenta son los siguientes:

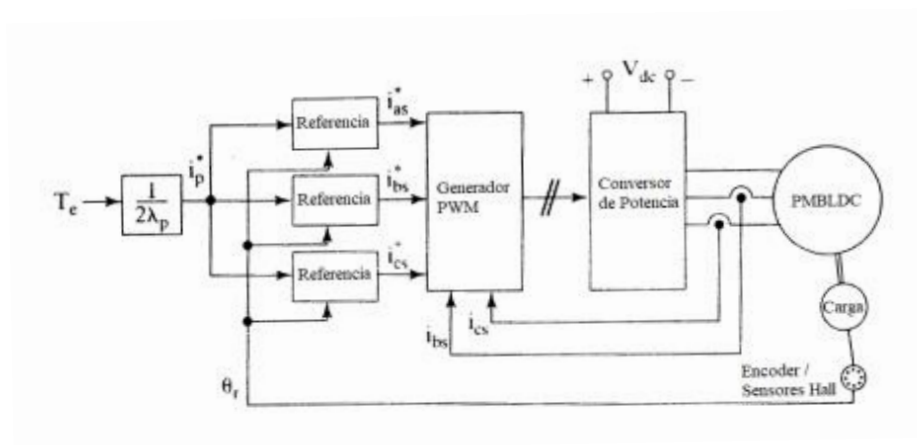
10.1.1 Control de corriente y velocidad

El control de corriente se implementa con el fin de generar la recarga de energía a la batería cuando el motor se encuentra en operación de frenado, en donde, por medio de un sensor Hall se obtiene la posición del motor y, basados en la salida del motor eléctrico; se compara la

velocidad con la de referencia; dando torques y corrientes de referencia. Para obtener la operación, el controlador debe alimentarse de 6 puntos de información repartidos uniformemente, es decir, a 60° con el objetivo de energizar las tres fases del estator (Spencer, 2019).

Figura 31

Esquema de control de torque para un motor con conmutador de onda completa



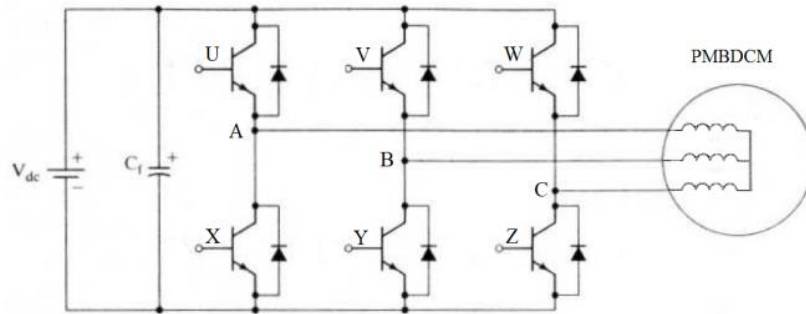
Nota. Tomado de *Diseño e implementación de freno regenerativo para motor de corriente continua sin escobillas con imanes permanentes* (p. 25) (Spencer, 2019).

Entonces, el torque ejercido por el conductor del vehículo, siendo la señal de entrada al sistema de control, genera las corrientes de referencia, que son procesadas por el generador PWM, convirtiendo las señales en analógicas y generando una carga de energía a través del convertor de potencia.

Dicho convertor de potencia de onda completa funciona con el siguiente diagrama de compuertas lógicas:

Figura 32

Diagrama de compuertas asociadas por fase



Nota. Tomado de *Diseño e implementación de freno regenerativo para motor de corriente continua sin escobillas con imanes permanentes* (p. 41) (Spencer, 2019).

Para generar el frenado, el conversor de potencia simula el funcionamiento del conmutador de un motor. En la anterior imagen, se muestra la notación de cada compuerta, en donde las fases A, B y C están conectadas al borne positivo de la batería mediante las compuertas U, V y W, de igual forma, están conectadas al borne negativo mediante las compuertas X, Y, y Z, respectivamente (Spencer, 2019).

10.1.1.1 Operación de máquina eléctrica como motor o frenado

La operación en una u otra condición la define la señal leída por el sensor Hall dependiendo la posición del rotor, entonces, el controlador debe operar las corrientes e intercalar la alimentación o descarga en la batería dependiendo la función (Spencer, 2019). A continuación, se muestra la figura de señales generadas dependiendo la lectura.

Figura 33

Conexiones de fase respecto a las salidas de señales sensores Hall para torque positivo

Sensores Hall			Conexiones por fase		
A	B	C	A	B	C
0	0	0			
0	0	1		-1	+1
0	1	0	-1	+1	
0	1	1	-1		+1
1	0	0	+1		-1
1	0	1	+1	-1	
1	1	0		+1	-1
1	1	1			

Nota. Tomada de *Diseño e implementación de freno regenerativo para motor de corriente continua sin escobillas con imanes permanentes* (p. 41) por Spencer D.

En la figura anterior, se muestra la generación de torque positivo dependiendo el pulso que tome el sensor, en donde un **+1** indica una conexión al positivo de la batería, un **-1** indica conexión al negativo y un **0**, fase desconectada. Para un torque negativo, se intercambiará el signo de las corrientes teniendo como condición el sentido de giro del motor y el torque; si coinciden, la corriente será positiva y funcionará como motor, si es inverso la corriente será negativa, funcionando como frenado regenerativo (Spencer, 2019). Es importante acotar que, en la primera y última línea, las entradas son triples ceros o triples unos, por lo que se toma como error y no se energiza ninguna fase.

Anteriormente, en la Figura 33, se había mencionado la conexión de las compuertas lógicas, entonces en la siguiente figura se asociará con las señales dadas a las conexiones del sensor Hall.

Figura 34

Compuertas del convertor de potencia activas respecto a las conexiones de fase

Conexiones por fase			Compuertas activas					
A	B	C	U	V	W	X	Y	Z
-1	+1			1		1		
+1	-1		1				1	
-1		+1			1	1		
+1		-1	1					1
	-1	+1			1		1	
	+1	-1		1				1

Nota. Tomada de *Diseño e implementación de freno regenerativo para motor de corriente continua sin escobillas con imanes permanentes* (p. 42) por (Spencer, 2019).

10.1.2 Control de freno regenerativo

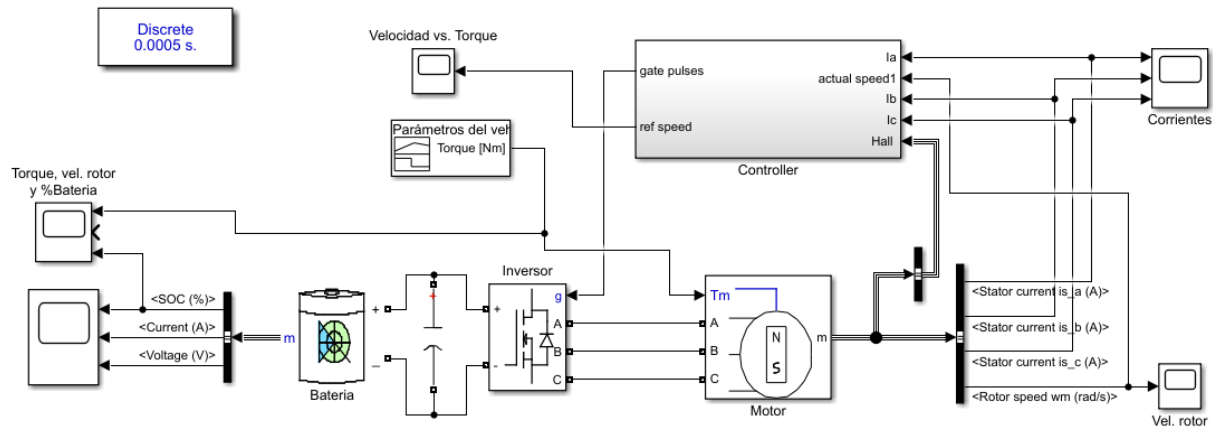
El sistema de control de frenado asocia los componentes mencionados anteriormente, ingresa una señal de torque al motor, saliendo las corrientes, señales del sensor Hall y velocidad del rotor; dependiendo la velocidad se compara con la de referencia y se genera un control con el fin de corregirla y poder generar el control de corriente, para de esta forma carga de la batería a corriente constante (Spencer, 2019).

10.1.3 Simulación del sistema de control en Simulink de Matlab

Teniendo en cuenta los dispositivos seleccionados y con el análisis anterior se genera un sistema de control en donde se involucra el motor, el inversor, un capacitor y la batería. El fin del sistema de control es modelar el funcionamiento entre motor y máquina eléctrica y verificar la carga generada en la frenada regenerativa. Entonces, a la simulación entran torque y velocidad, la función del controlador es filtrar la señal obtenida del rotor del motor mediante un controlador PID para luego generar un control de corrientes y de esta forma generar recargas a la batería. A continuación, se presenta el modelo generado.

Figura 35

Pantalla general del sistema de control implementado para el frenado regenerativo



10.2 Sistema de control del frenado hidráulico con ABS

Para el sistema de control del frenado hidráulico con ABS, inicialmente se debe analizar la parte física del vehículo y la rueda. A continuación, se explicará el análisis físico utilizado para desarrollarlo.

10.2.1 Análisis del modelo físico empleado al frenar un vehículo

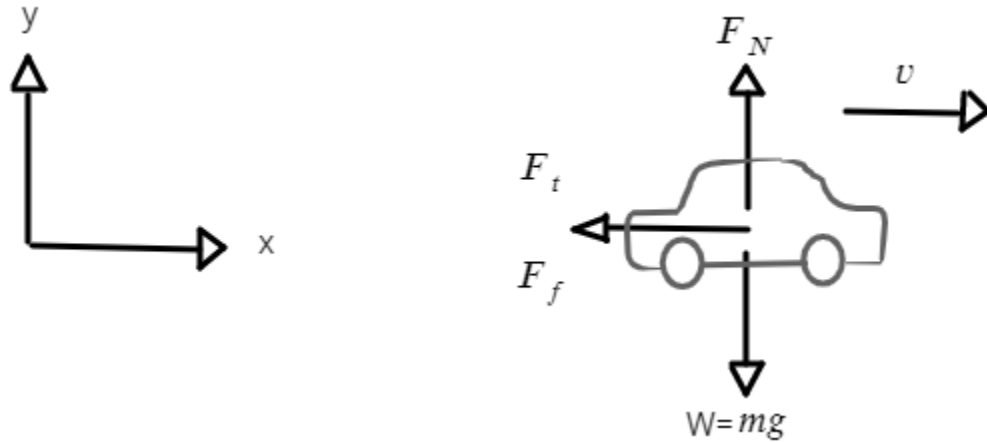
Se plantea un diagrama de cuerpo libre del vehículo en movimiento en el instante anterior a realizar el frenado, en donde se dividirá en dos, el análisis para el vehículo y el análisis para la rueda.

10.2.1.1 Análisis físico para el vehículo

Antes de plantear el modelo, se pondrá una consideración inicial, se basa en dividir el vehículo en cuatro partes iguales, es decir, la masa del vehículo se dividirá en las 4 llantas de este, modelo conocido como *Quarter Vehicle Model* Wafi (2020). Basándose en lo anterior se procede a plantear el diagrama de cuerpo libre.

Figura 36

Diagrama de cuerpo libre para el vehículo



Aplicando las leyes de Newton, se encuentra la ecuación mostrada a continuación.

$$-\mu mg - \frac{1}{4} \left(\frac{\rho}{2} * C_d * A_f * v^2 \right) = m\dot{v} \quad (18)$$

En donde μ es el coeficiente de fricción entre las superficies, m es $\frac{1}{4}$ de la masa del vehículo por la consideración expuesta anteriormente, g es la fuerza de gravedad, ρ es la densidad del aire, C_d es una constante adimensional que representa el coeficiente de arrastre del vehículo, A_f es el área frontal del vehículo, v la velocidad y \dot{v} la derivada de la velocidad.

Algunos de estos parámetros ya se habían utilizado en el diseño del sistema de frenado regenerativo, por lo que se utilizará el mismo valor de las constantes para el diseño de este modelo.

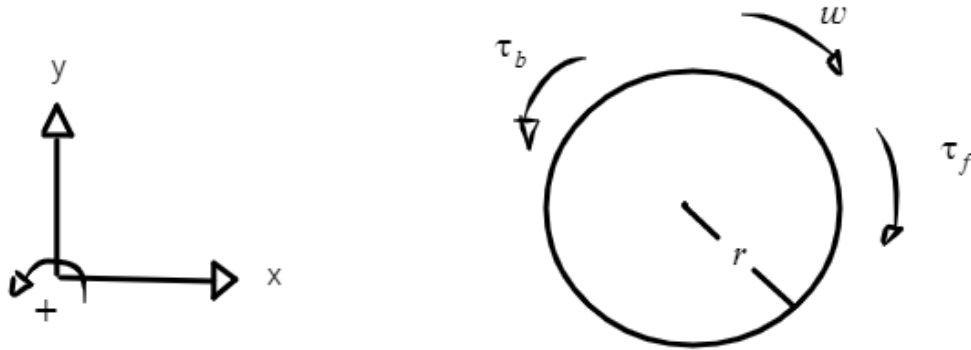
10.2.1.2 Análisis físico para la rueda

Utilizando de nuevo las leyes de Newton, se propone un diagrama de cuerpo libre para la rueda, en donde intervendrá el torque de frenado τ_b y el torque de la fuerza de fricción τ_f , que se

obtiene de la multiplicación entre la fuerza de fricción del análisis anterior y el radio de la rueda Cao (2021).

Figura 37

Diagrama de cuerpo libre para la rueda del vehículo



Del diagrama se obtiene la siguiente ecuación:

$$\tau_b - \mu mgr = J\dot{\omega} \quad (19)$$

Entonces, los términos nuevos en esta ecuación son el radio de la rueda r , el momento de inercia de la rueda J y la derivada de la velocidad angular $\dot{\omega}$.

Con las dos ecuaciones presentadas anteriormente se modelará físicamente el sistema de frenado hidráulico con ABS.

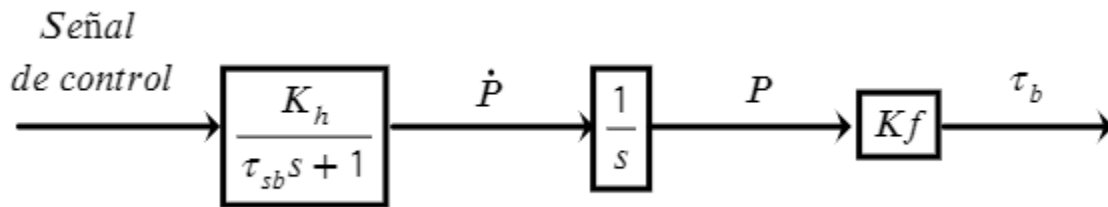
10.2.2 Modelo de frenado hidráulico con ABS

Para el sistema de frenado hidráulico, se propone el siguiente diagrama, en donde obtenida la señal de control electrónica, se presenta un modelo de transferencia de primer orden, siendo k_h la ganancia que amplifica la señal y τ_{sb} el tiempo de establecimiento que demoraría el sistema en dar una señal. Se obtienen de este bloque deltas de presión en el sistema de frenado hidráulico, representados como \dot{P} , pasando por un integrador para obtener el valor de presión P ,

para luego convertirlo en el torque, parámetro que es necesario a la salida del bloque de frenado hidráulico Kayacan et al. (2009).

Figura 38

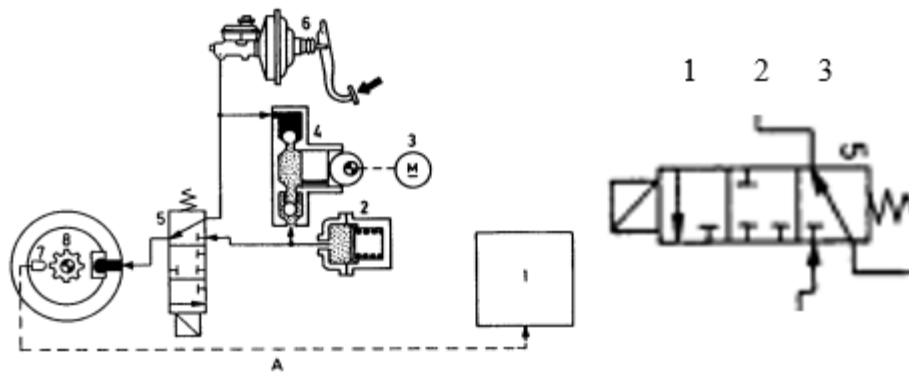
Bloque de frenado hidráulico



La señal de control mencionada anteriormente proviene de la válvula del sistema de frenado ABS, accionada mediante solenoides, entonces, como lo menciona Parera (1988), la válvula en la posición 3 genera un frenado en el disco o frenado normal, si una de las llantas sobrepasa el valor de deslizamiento permitido, entonces el sistema de control enviara una señal que hará que la válvula se situé en la posición 2, en donde mantiene la presión, impidiendo que aumente al punto de generar un bloqueo; si se detecta que ya está bloqueada la llanta, entonces pasara a la posición 3 por un lapso muy corto de tiempo, liberando parte de la presión para así desbloquear la rueda.

Figura 39

Sistema de frenos antibloqueo



Nota. Se presenta un sistema de frenado hidráulico con ABS común y un aumento de la válvula nombrando las posiciones con el fin de generar una mejor explicación. Tomado de Parera, A. (1988). Frenos ABS en los automóviles. En Autores científico-técnicos y académicos. https://www.acta.es/medios/articulos/automocion_y_transporte/009031.pdf

10.2.2.1 Estimación del deslizamiento(slip) y el coeficiente de fricción

El deslizamiento o slip es conocido como el cambio entre la velocidad angular de la rueda en el instante del frenado y la velocidad lineal del vehículo, entonces, para la estimación del deslizamiento, en la literatura se encuentra la fórmula que lo modela Wafi (2020).

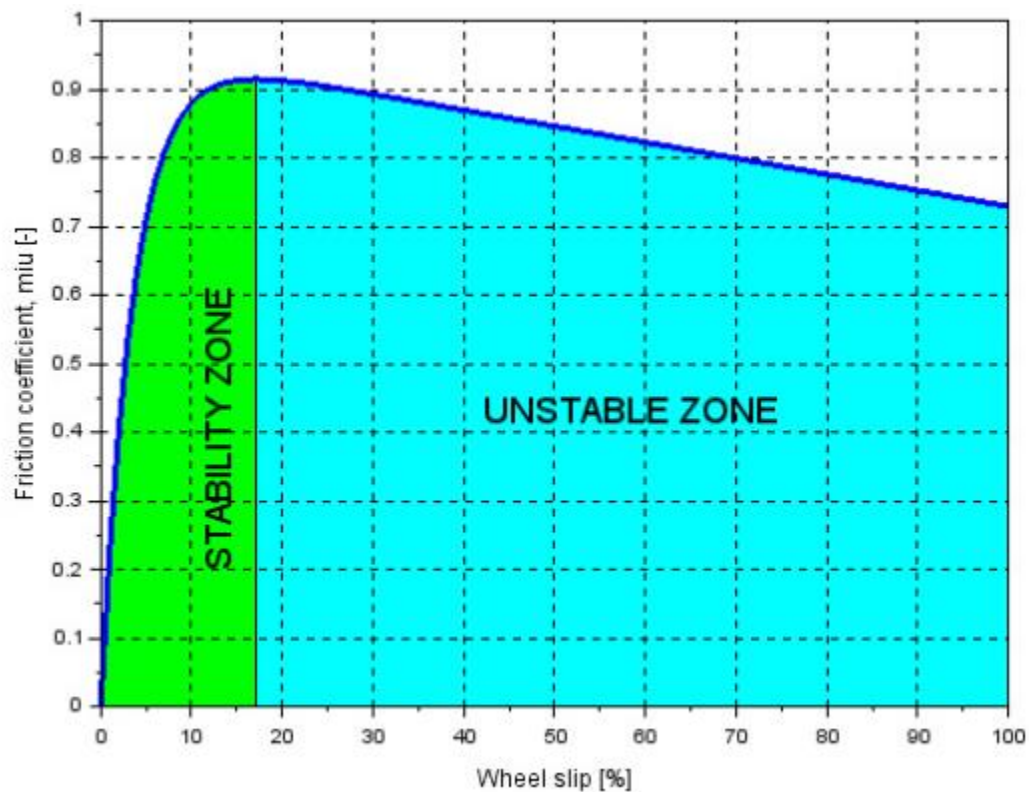
$$\lambda = 1 - \frac{w_R}{v_v} \quad (20)$$

Siendo λ el deslizamiento, w_R la velocidad angular de la rueda y v_v la velocidad del vehículo según Wafi (2020). En esta ecuación se puede deducir que cuando la velocidad angular de la rueda sea igual a la velocidad del vehículo, el deslizamiento será cero, por tanto, dicho vehículo se encuentra transitando sin accionarse el freno, caso contrario, a cuando la velocidad angular de la rueda sea cero, el deslizamiento será 1, es decir, el vehículo se encuentra frenando y está derrapando. Entonces, se necesita optimizar el rango de deslizamiento, es decir, que el valor que utilice el controlador sea el ideal para frenar el vehículo en el menor tiempo y distancia

posible. Para definir dicho valor, en la literatura se encuentran estudios en donde generan la siguiente gráfica para el valor ideal.

Figura 40

Zona estable para el coeficiente de fricción



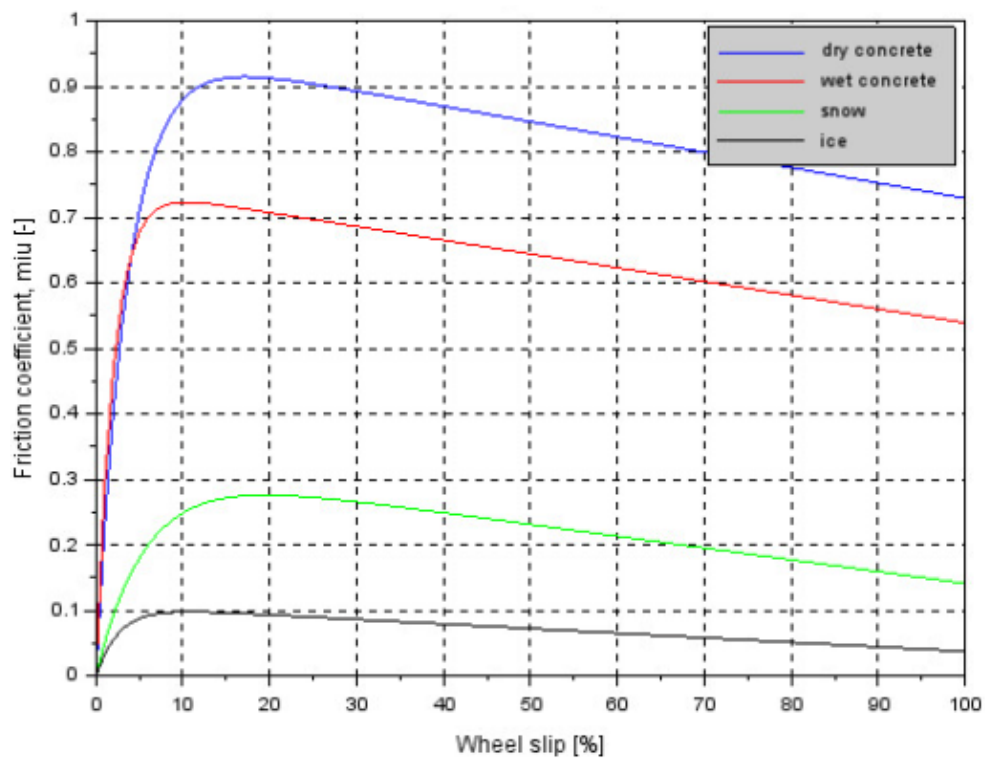
Nota. En esta gráfica se puede identificar que la zona estable se encuentra entre [0-20%] para cualquier coeficiente de fricción, por esta razón el parámetro de coeficiente de deslizamiento en el controlador no puede superar el rango establecido. Tomado de <https://x-engineer.org/anti-lock-braking-system-abs-modeling-simulation-xcos/>

En la figura anterior se presenta la gráfica para cualquier coeficiente de fricción, sin embargo, es importante saber que dependiendo la superficie, el coeficiente de fricción y el deslizamiento actúan de forma diferente, es por esto, que se presenta la siguiente gráfica, en

donde se tienen en cuenta la mayoría de las superficies por las que puede transitar el vehículo, es por esto, que en el sistema de control generado, se define un coeficiente de fricción fijo, que sea aproximadamente válido para todas las superficies, pero si se desea cambiar a una superficie crítica como la nieve o el hielo, es posible realizar el análisis ya que se le ingresan los registros para dichas superficies.

Figura 41

Coeficiente de fricción para diferentes condiciones de carretera



Nota. En esta gráfica se puede observar la variación entre las superficies, mientras que en carreteras de concreto el deslizamiento tiene un valor óptimo cercano al 18%, en condiciones como el hielo y la nieve se encuentra entre un 10% y 13%. Tomado de <https://x-engineer.org/anti-lock-braking-system-abs-modeling-simulation-xcos/>

Basándose en la teoría explicada anteriormente, se define como objetivo para el controlador un deslizamiento de la rueda del 20% para todas las superficies, es decir, la función del controlador es intentar mantener este valor variando los demás parámetros. Esto se puede simular mediante la ecuación de Burkhardt, como lo explica Wafi M. (2020), hay una serie de parámetros de los que depende el coeficiente de fricción en función del deslizamiento, en donde C_1 es el punto más alto en la curva de fricción, C_2 es la forma de la curva y C_3 es la diferencia entre el punto más alto y el punto del valor obtenido cuando $\lambda=1$.

$$\mu(\lambda) = [C_1(1 - e^{-C_2\lambda}) - C_3\lambda] \quad (21)$$

El valor de estas constantes ya está preestablecido mediante experimentos prácticos que se exponen a continuación.

Tabla 7

Valor de los parámetros de fricción carretera-neumático

Tipo de camino	C_1	C_2	C_3
Asfalto (seco)	1.2801	23.99	0.52
Asfalto (húmedo)	0.8570	33.822	0.347
Concreto (seco)	0.19	94.12	0.06
Nieve	0.1946	94.129	0.0646
Hielo	0.05	306.39	0.001

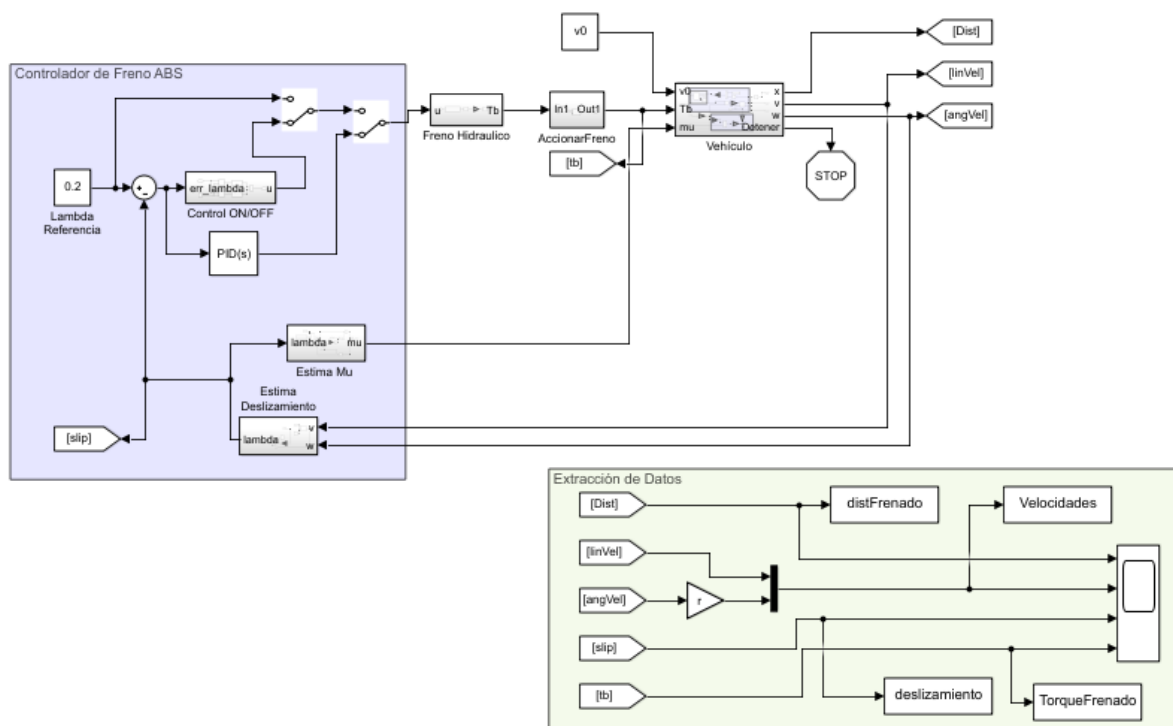
Nota. Wafi, M. (2020). Modeling and Simulation of ABS through Different Types of Controllers Using Simulink (Posgrado). Eastern Mediterranean University (p.20)

10.2.3 Simulación del sistema de control en Simulink de Matlab

El sistema de control está diseñado, como se había mencionado anteriormente, para un parámetro de deslizamiento del 20% como referencia, en donde se está conectado al controlador PID y a un control ON/OFF,

Figura 42

Pantalla general del sistema de control implementado para el ABS



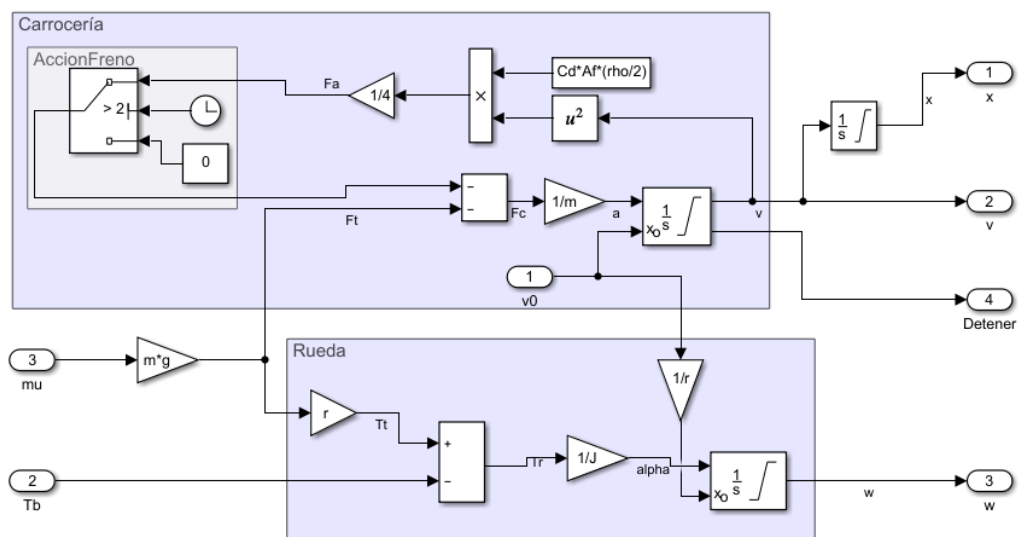
En el subsistema del vehículo que se presenta a continuación, se plasman las ecuaciones tanto de la carrocería como de la rueda deducidas del análisis físico, en donde entran las variables torque y coeficiente de fricción y se obtiene la velocidad del vehículo, la distancia de frenado y la velocidad angular de la rueda.

Uno de los integradores se delimita con el fin de hallar parámetros físicos válidos, entonces, se inicia la simulación desde un valor de velocidad inicial para el frenado y se condiciona a estar entre cero y una velocidad máxima definida en el código, para este caso 40 m/s o 140 km/h. Si los parámetros se encuentran por fuera o llegan al límite automáticamente la simulación se detiene, entonces, cuando la simulación detecte que el vehículo se frenó porque la velocidad es cero, se detendrá y arrojará los resultados.

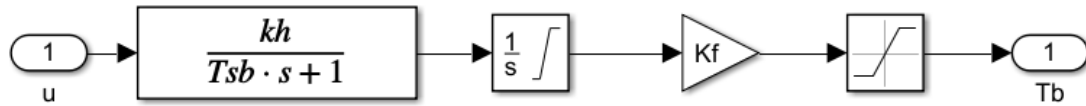
Otro punto importante del subsistema es el accionamiento del freno, este se hace pasados dos segundos de la simulación y, además, se condiciona a cuando el vehículo esté frenando, es decir, cuando el deslizamiento sea igual a cero.

Figura 43

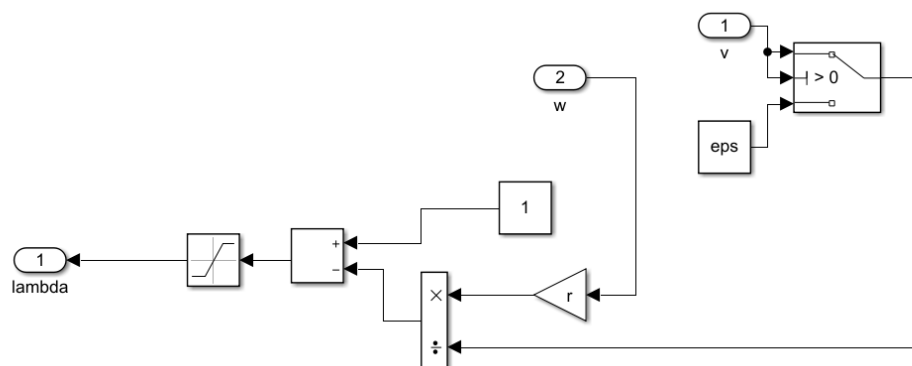
Subsistema del vehículo en la simulación



En cuanto al subsistema del freno hidráulico, se implementa como se había explicado en el apartado explicado anterior, en donde el bloque de saturación lo que hace es limitar la salida de torque entre cero y 2000 [Nm].

Figura 44*Subsistema de frenado hidráulico en la simulación*

En el subsistema estimación del deslizamiento se incluye la ecuación relacionada, en donde se tiene como dato de entrada la velocidad del vehículo, la velocidad angular de la rueda y se obtiene el deslizamiento, condicionando con el eps la división por cero que presenta la ecuación, siendo este el valor mínimo que puede tomar. Además, con el bloque saturación se condiciona entre cero y uno el valor del deslizamiento.

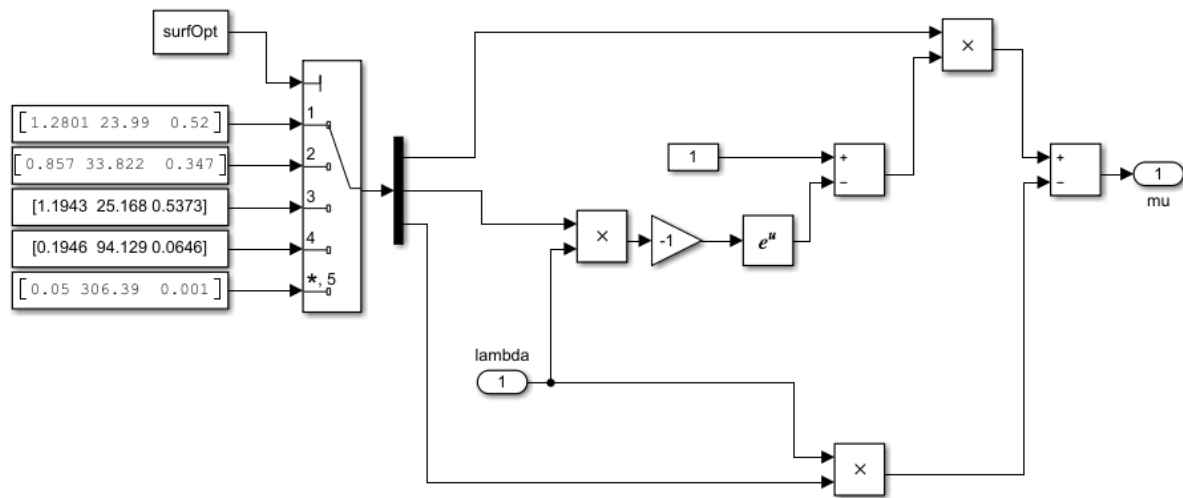
Figura 45*Subsistema estimación del deslizamiento*

En el subsistema estimación del μ , se tendrán en cuenta las constantes preestablecidas en la Tabla 7, en el código se definirá la superficie con la que se desea trabajar, como superficie

general se recomienda utilizar el asfalto húmedo, ya que es la mejor relación de máxima fricción de frenado para las superficies comunes a las que se enfrenta un vehículo.

Figura 46

Subsistema estimación del μ



Nota. Es relevante aclarar que las constantes preestablecidas son para asfalto húmedo, pero si se desea en el código se puede cambiar la superficie para obtener valores más acercados a la realidad de acuerdo a la superficie.

11. Análisis de resultados

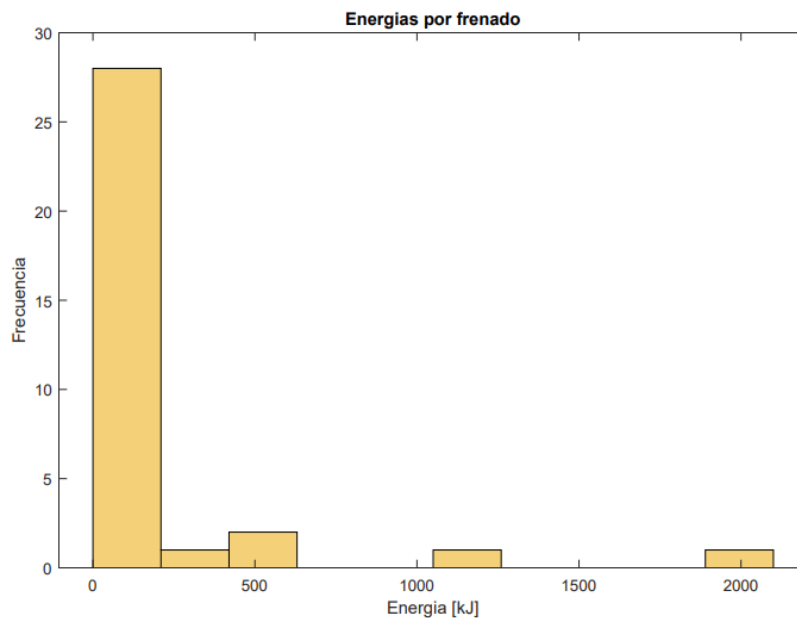
A continuación, se analizarán los resultados de los diseños y simulaciones desarrolladas en el proyecto.

11.1 Análisis de resultados del diseño de frenado regenerativo

Para obtener un diseño de frenado regenerativo es necesario generar un diseño teórico, basado en las condiciones reales que experimenta un vehículo en una ciudad, para esto se utilizó el ciclo de conducción generando un código en Matlab capaz de tomar los datos y generar una gráfica del ciclo, calculando la potencia consumida en cada instante del recorrido, pero como el interés de este proyecto se basa solamente en la frenada, entonces, se generó un filtro que de acuerdo al ciclo de conducción con una serie de condiciones detectarán cuándo el vehículo se encontraba frenando, entonces, se almacenan los datos de dichas frenadas y se grafican con el fin de obtener histogramas de la cantidad de energía y potencia recuperadas en el ciclo, basados en esta aproximación, seleccionar los componentes pertinentes para el sistema de frenado regenerativo. A continuación, se analizan los histogramas de potencia y energía generados.

Figura 47

Histograma de cantidad de energía recuperada por frenado

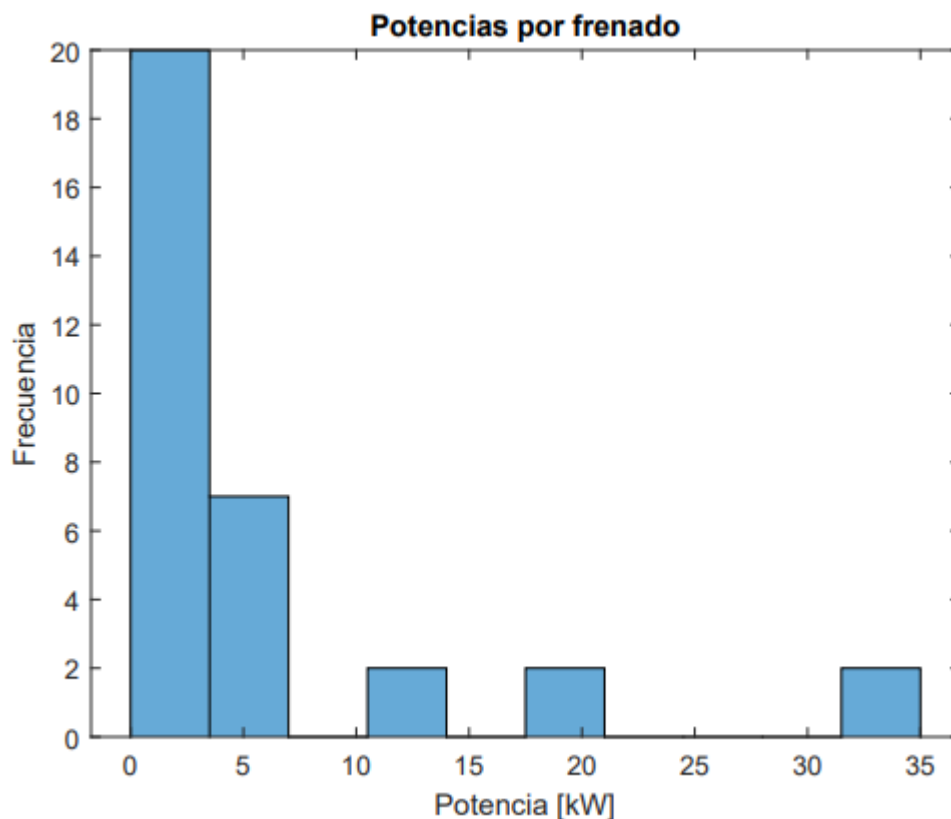


Nota. Para el ciclo de conducción seleccionado, la simulación desarrollada detecta 33 frenadas.

En el histograma se puede visualizar que el rango de la energía recuperada se encuentra entre los 180-2000 kJ, obteniendo una periodicidad mayor en la posibilidad de recuperar 180 kJ, además, este histograma ayuda a generar una idea de la máxima cantidad de energía que es necesario convierta el inversor y pueda almacenar la batería, siendo un parámetro de diseño importante. También se puede concluir que en los 33,33 minutos de recorrido la cantidad total de energía recuperada es de aproximadamente 9600 kJ.

Figura 48

Histograma de cantidad de potencia recuperada por frenado



En la anterior figura, se presentan las potencias disponibles, cantidad de trabajo que se puede recuperar en el sistema de frenado regenerativo para el ciclo de conducción utilizado, en donde oscila entre 2,5-33 kW, pero a su vez, se puede notar que los 33 kW se recuperarían en casos extremos y las cantidades más comunes no superan los 20 kW. De nuevo, este es un parámetro importante para la selección de los componentes a utilizar en el vehículo, concluyendo que la cantidad que puede recuperarse en el ciclo es de 213 kW.

11.2 Análisis de resultados del modelado en SolidWorks

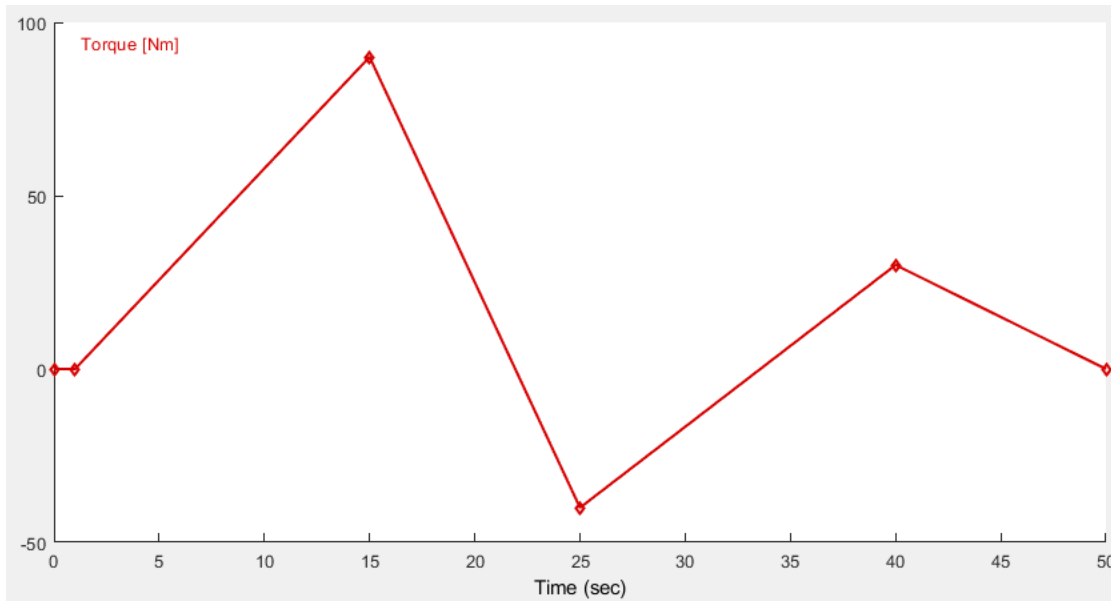
Teniendo en cuenta los parámetros de diseño, las dimensiones de los componentes, del vehículo y el costo; se seleccionan los componentes tanto para el sistema de frenado regenerativo, como para el sistema de frenado hidráulico, luego, utilizando las fichas técnicas se genera un modelado en el software SolidWorks, en donde se ubican cada uno de tal forma de conservar los espacios de un vehículo tradicional coupé. Ver Figura 26, Figura 27 y Figura 28.

11.3 Análisis de resultados del sistema de control para el frenado regenerativo

Se presentan los resultados de la simulación en donde se propone un perfil de torque para 50 segundos, en donde hasta el segundo 15 se genera un torque positivo yendo desde 0 hasta 80 [Nm], luego decrece hasta el segundo 25 llegando hasta los -40 [Nm], señal relevante ya que se estaría simulando el frenado, entonces el controlador debe regenerar energía y cargar la batería, seguido de esto crece hasta el segundo 40 llegando a los 25 [nm] y por último en el segundo 50 el torque llega a cero. El recorrido planteado se presenta en la siguiente figura.

Figura 49

Perfil de torque como señal de entrada

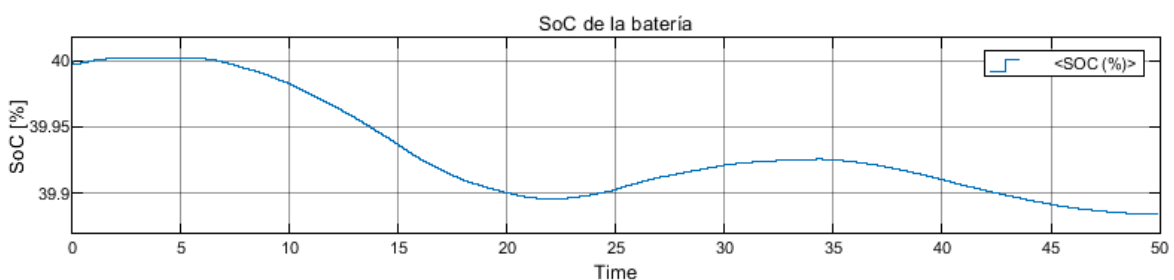


Una vez el motor utiliza el torque de entrada, genera la gráfica de la señal de velocidad, entonces, se compara esta señal con la de referencia mediante el controlador PID, para que el motor le dé seguimiento al recorrido planteado inicialmente.

Para finalizar, se obtiene la gráfica del estado de carga de la batería (SoC), en donde se pueden visualizar las ganancias de energía respecto a la velocidad, entonces, cuando la velocidad es creciente, el motor está consumiendo energía, por lo que tiende a descargarse; cuando la señal de velocidad cambia y se vuelve decreciente hasta llegar acercarse a cero, dicho sistema está regenerando energía, parámetro que es fácilmente identificable en la siguiente figura.

Figura 50

Estado de carga de la batería



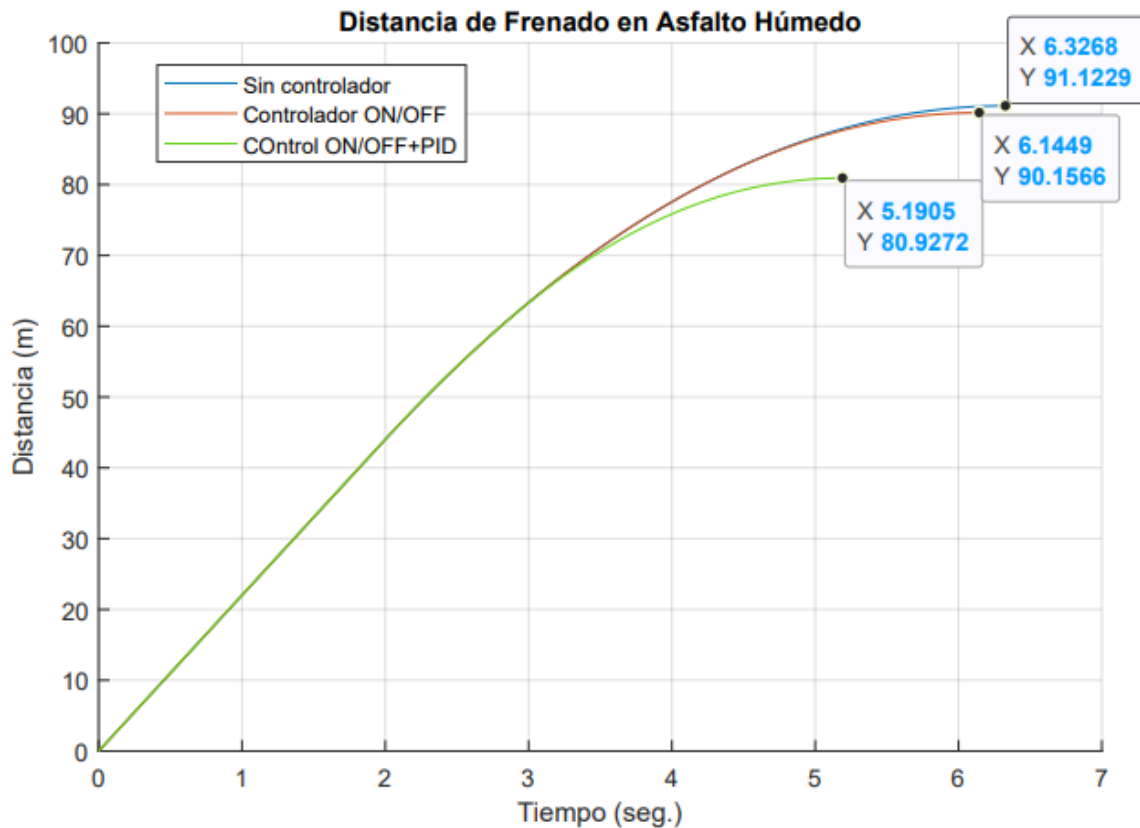
En la figura se puede notar que la simulación de 50 segundos inicia con la batería en un estado de carga del 40%, a medida que aumenta la velocidad se descarga hasta un 39.9%, entonces, en el frenado, el sistema regenera hasta un 39.25%, lo que equivale al 25% entre la energía consumida y la energía regenerada, dicho comportamiento se repite en el segundo ciclo, regenerando aproximadamente la misma cantidad de energía. Es importante aclarar que en la simulación solo se tiene en cuenta el consumo del motor y dispositivos involucrados.

11.4 Análisis de resultados del sistema de control para el frenado hidráulico con ABS

A continuación, se presentan los resultados luego de simular una “frenada en seco” de un vehículo. La simulación está diseñada con el fin de comparar los resultados de tres formas, la primera es generar el frenado sin ningún tipo de controlador, en la segunda se implementa un controlador ONN/OFF y la tercera se mezcla el controlador ONN/OFF + el control PID. Entonces, a continuación, se utilizará la superficie preestablecida, siendo concreto húmedo y se analizarán los resultados obtenidos de dicha simulación.

11.4.1 Análisis de la distancia recorrida al frenar el vehículo

El primer y más importante parámetro para evaluar del sistema de control es la distancia de frenado y el tiempo que conlleva hacerlo, ya que la aplicación requiere que se optimicen estas dos variables, a continuación, se presenta la gráfica obtenida de la simulación.

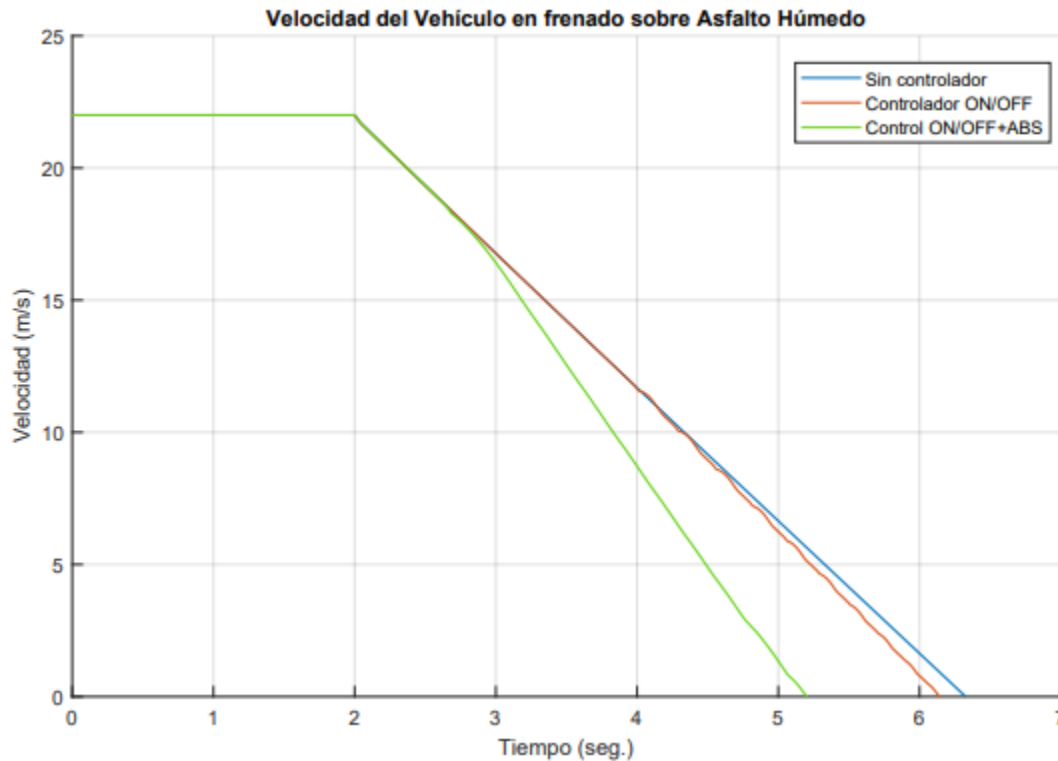


En la gráfica, se puede observar que la distancia recorrida entre el frenado de un vehículo sin ABS y uno controlado mediante el sistema ON/OFF genera una diferencia de solamente 0,9663 metros, sin embargo, al compararlo con el controlador ON/OFF+PID, su diferencia es significativa, reduciendo 10,157 metros y haciéndolo en 1,163 segundos antes, condiciones que, aunque en teoría parecen mínimas, aplicándolo a las condiciones reales puede salvar vidas y reducir el índice de accidentalidad. Es importante aclarar que el frenado se simula a partir del segundo 2, por lo que la distancia de frenado con el controlador PID+ABS es de 36,9272 metros.

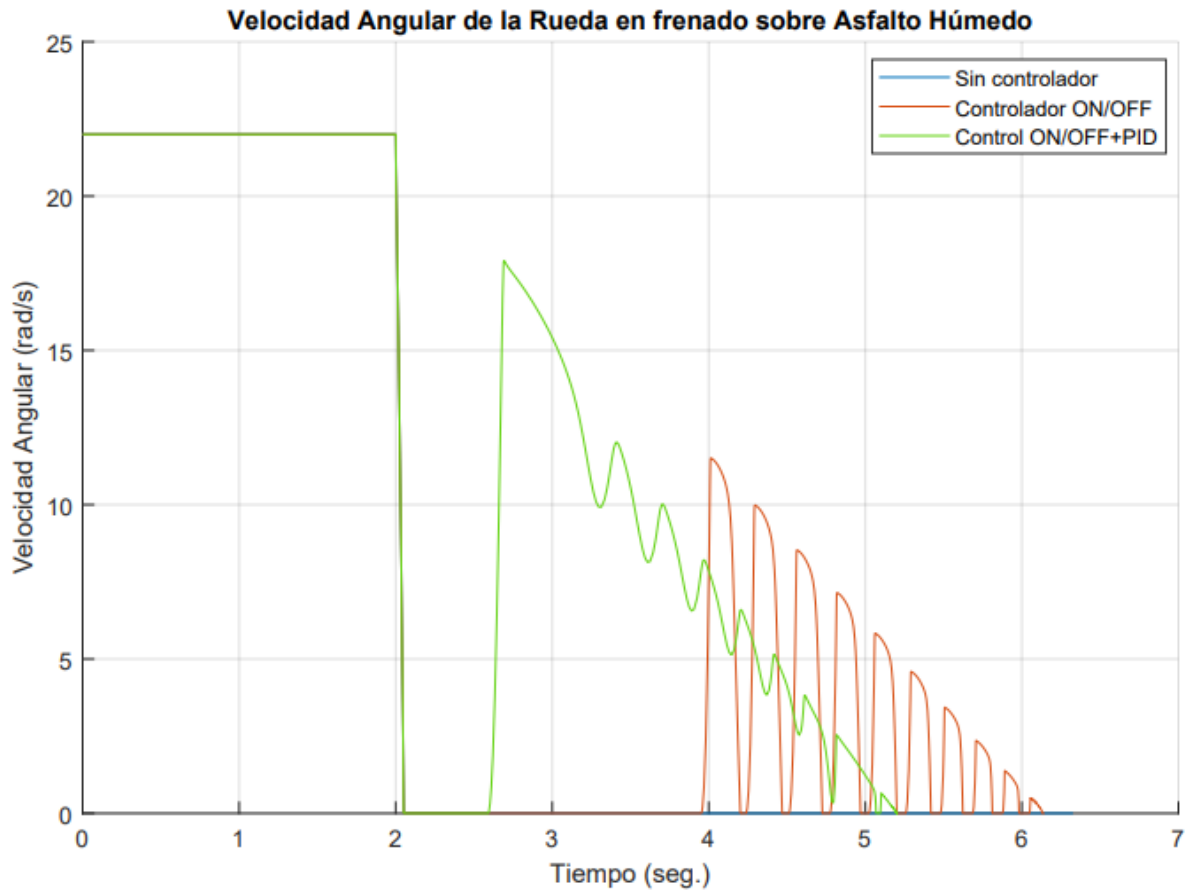
11.4.2 Análisis de la velocidad del vehículo y la velocidad angular de la rueda

En este apartado se tendrá en cuenta el decrecimiento de la velocidad del vehículo, teniendo en cuenta que sea estable, con el fin de generar una experiencia de confort y suavidad al

usuario del final, además, se tendrá en cuenta la velocidad angular de la rueda, ya que el principal objetivo del sistema ABS es evitar que la llanta derrape, es decir, que durante el frenado su velocidad angular se convierta en cero.



En la gráfica, analizando el control ON/OFF+PID se puede observar que el descenso de velocidad en el vehículo es gradual, generando un frenado controlado, uniforme y eficiente en comparación a la opción en donde solamente está funcionando el controlador ON/OFF, ya que son notables los cambios bruscos durante el mismo. Evaluando la opción de frenado sin ningún controlador, en la gráfica se puede visualizar que no tiene cambios bruscos, pero al llevarlo a condiciones reales, que un vehículo derrape, genera la pérdida del control del conductor sobre este, reduciendo la posibilidad de maniobrar con el volante y generando mayores inconvenientes al intentar detenerse de forma brusca.

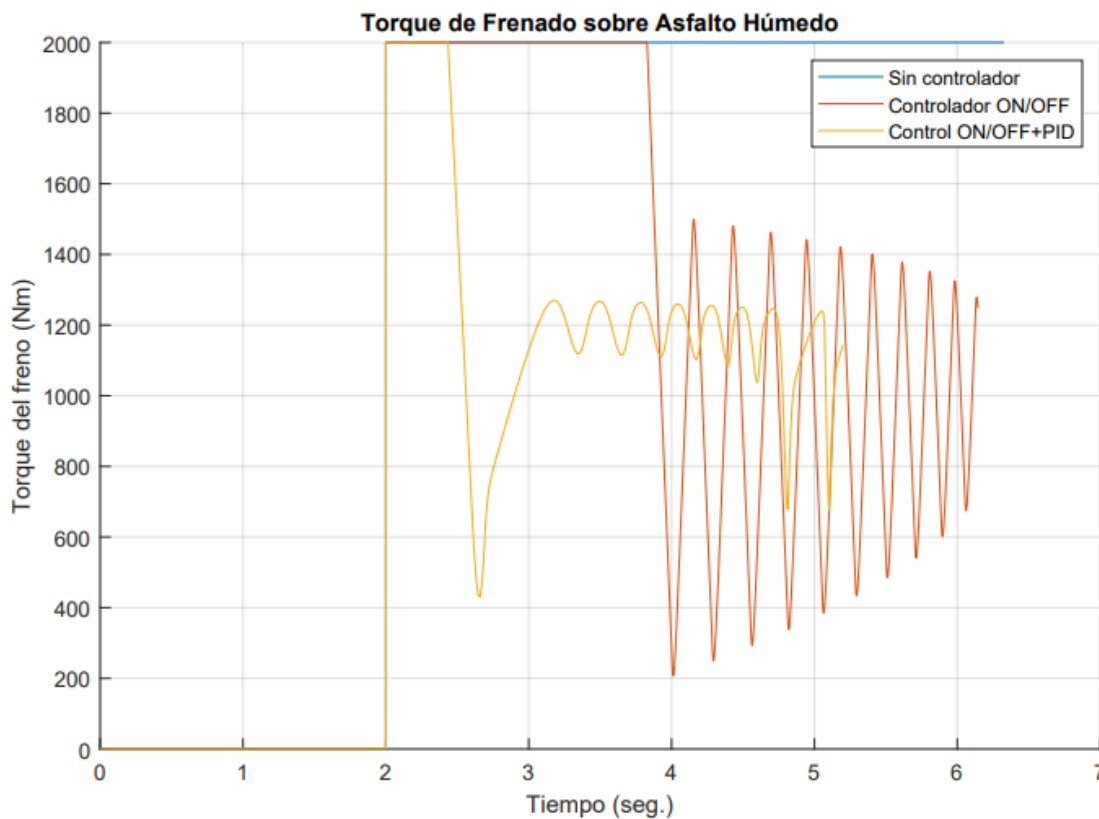


La anterior gráfica, muestra la velocidad angular de la rueda en los 3 casos, en el primero, se puede verificar que al frenar bruscamente, la llanta se bloquea, es decir, su velocidad es cero y derrapa hasta finalizar el frenado, siendo la menos eficiente, la segunda opción, muestra que a pesar de que el control ON/OFF tan pronto detecta que la llanta tiene velocidad cero, se acciona con el fin de eliminar el derrape, pero durante la frenada este proceso se repite durante 10 veces hasta el objetivo que es detener el vehículo, por esta razón es que en la gráfica mostrada anteriormente de la velocidad del vehículo se verificaban cambios bruscos, siendo un control no viable. Por último, se muestra la opción del sistema de control ON/OFF+ABS, en donde se verifica que tan pronto ocurre el primer derrape, se acciona el sistema y genera unas ondas

decrecientes, suaves en la perspectiva del conductor y lo más importante, eficientes para detener el vehículo, evitando el bloqueo y el derrape.

11.4.3 Análisis del torque aplicado en la frenada

A continuación, se presenta la gráfica obtenida para el torque, es importante aclarar que este parámetro es el que prolonga la vida útil de los dispositivos del sistema de frenado hidráulico, ya que, si las variaciones de torque en el sistema son altas, la vida útil de los componentes es menor, además, que la variación brusca en el torque también influye en los cambios bruscos de velocidad. A continuación, se presenta la gráfica obtenida de la simulación.



En la gráfica, se puede observar que cuando no hay control, el torque aplicado es el máximo, por esta razón se bloquean las llantas, caso no deseado, en la segunda opción, se presentan cambios bruscos en el torque generando a la vez cambios bruscos en la velocidad, y

como ya se había mencionado anteriormente, son condiciones no deseadas, por último, se muestra que en el sistema de control ON/OFF+ABS, se genera el mayor torque de frenado al iniciar el proceso, pero al detectar el derrape el sistema se encarga de equilibrarlo al torque de operación, que en este caso serían aproximadamente 1200 [Nm], generando una variación suave y eficiente al sistema.

12. Conclusiones

Se diseñó un sistema de frenado regenerativo que cumple con los parámetros establecidos para un vehículo coupé, logrando recuperar la mayor cantidad de energía para ser aprovechada en la aceleración, ayudando al medio ambiente, y a su vez, garantizando el confort y seguridad a los usuarios.

Mediante los parámetros de diseño establecidos, se obtiene una recuperación del 25% aproximado entre la descarga y la carga de la batería, siendo equivalente a los datos obtenidos en el diseño del sistema de frenado en donde se había encontrado que la relación en el ciclo de conducción entre la energía máxima consumida y la máxima regenerada estaba en 33% aproximadamente. Además, satisfaciendo los cambios de acuerdo con el sistema e-pedal, invirtiendo como motor y como maquina eléctrica, adicionando 960 [kJ] de energía y 213 [kW] en un recorrido de 33,33 minutos.

Se modelo el CAD en SolidWorks ajustándose a los espacios con el fin de generar el menor impacto en la variación del centro de masa del vehículo, además, siendo liviano con una masa de 264,5 [kg], y de bajo costo como se requiere para dar solución a una movilidad sostenible en el área urbana de la ciudad de Bucaramanga con una autonomía de 220 [km] aproximadamente.

En la implementación del sistema de frenado hidráulico con ABS se obtuvo un frenado en seco en 26,93 [m] y 3,19 [s] desde que se activa, reduciendo 10,2 [m] y 1,1 [s] al sistema en donde no se aplica ningún tipo de control, además, se logró un frenado estable, sin variaciones bruscas en la velocidad y torque, disminuyendo el desgaste de los componentes involucrados.

13. Recomendaciones

Para futuras investigaciones, se recomienda generar un ciclo de conducción en la ciudad en donde se va a implementar el diseño, con el fin de generar datos que se acerquen a las condiciones reales, para complementar la información y que sea de completa confiabilidad.

Para la implementación del sistema de frenado regenerativo, se recomienda realizar un estudio de la vida útil de los componentes utilizados, con el fin de evaluar factibilidad del desarrollo de vehículos eléctricos de bajo costo.

Se recomienda analizar y hacer pruebas reales con los dispositivos para ajustar los sistemas de control y poder generar una mejor aproximación para optimizarlos y prevenir fallas.

Para la distribución de los componentes implementados en el sistema de frenado regenerativo (componentes eléctricos), se recomienda para futuras investigaciones generar un estudio detallado y riguroso de la distribución, ya que, al no ser el fin del proyecto, no se profundizó en el tema.

14. Referencias Bibliográficas

- Bosch, R. (1996). Manual de la técnica del automóvil. Barcelona: Reverte S.A.
- Cabrera, R. (2020). Como funciona un motor eléctrico de coche. Lovesharing Recuperado de <https://www.lovesharing.com/como-funciona-un-motor-electrico-de-coche/>
- Cao, W. (2021). Modeling and simulation of the anti-lock braking system based on MATLAB/Simulink. En Journal of Physics: Conference Series (Vol. 1941, Número 1, p. 012075). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1941/1/012075>
- Carlos Pardo. (junio de 2021). Controlador PID. Sphinx. Picuino Recuperado de <https://www.picuino.com/es/arduprog/control-pid.html>
- Domínguez, E. (2018). Sistemas de transmisión y frenado. Madrid: Editex
- García, G. (5 de enero de 2019). Tecnologías de frenado regenerativo para coches eléctricos. Híbridos y Eléctricos Recuperado de <https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/tecnologia/tecnologias-frenado-regenerativo-coches-electricos/20181231131615024252.html>
- Guzzella, L., & Sciarretta, A. (2013). Vehicle Propulsion Systems Introduction to Modeling and Optimization Third Edition (3.^a ed.). New York Dordrecht London: Springer. New York Dordrecht London: Springer.
- Hurtado, A. (2014). Desarrollo de ciclos de conducción para el área metropolitana centro occidente – amco. (pregrado). Universidad tecnológica de Pereira.
- Kayacan, E., Oniz, Y., & Kaynak, O. (2009). Un enfoque de modelado de sistemas grises para Control de modo deslizante de antibloqueo Sistema de frenado. En IEEE Transactions on Industrial Electronics.

- Leon, C. (2019). Estimación del consumo de combustible mediante la determinación de ciclos de conducción representativos en Bucaramanga, Santander (Pregrado). Universidad Autónoma de Bucaramanga.
- Mohamad Heerwan Bin Peeie, Hirohiko Ogino & Yasuo Oshinoya (2016) Skid control of a small electric vehicle with two in-wheel motors: simulation model of ABS and regenerative brake control, *International Journal of Crashworthiness*, 21:5, 396-406, DOI: 10.1080/13588265.2016.1147731.
- Murias, D. (5 de abril de 2020). Anatomía de un coche eléctrico: su sencilla mecánica, al desnudo. *Motorpasión* Recuperado de <https://www.motorpasion.com/coches-hibridos-alternativos/anatomia-coche-electrico-su-sencilla-mecanica-al-desnudo>
- Nian, X. (2014). Sistema de frenado regenerativo de un vehículo eléctrico impulsado por un motor DC sin escobillas. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, (61), 1 – 11
- Parera, A. (1988). Frenos ABS en los automóviles. En *Autores científico-técnicos y académicos*. https://www.acta.es/medios/articulos/automocion_y_transporte/009031.pdf
- Salcedo, S. (2015). Diseño, especificación y evaluación de un sistema de frenado regenerativo (Pregrado). Universidad de los Andes.
- Spencer Vargas, D. (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>
- Sun, Y. (2018). Estudio en la estrategia de control de frenado regenerativo para un vehículo eléctrico bajo condiciones de frenado típicas. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng*, (452), 1 –

Teyssier, Y. (31 de mayo de 2019). Tipos de sistemas de Control. Urany Recuperado de <https://urany.co/blog/tipos-de-sistemas-de-control>

Visioli, A. (2006). Practical PID Control. Brescia: Springer

Wafi, M. (2020). Modeling and Simulation of ABS through Different Types of Controllers Using Simulink (Posgrado). Eastern Mediterranean University.

Apéndices

Apéndice A. Código de Matlab Diseño de frenado regenerativo a partir del ciclo de conducción

Los apéndices están adjuntos y pueden visualizarlos en la base de datos de la biblioteca
UIS

Apéndice B. Modelado en 3D SolidWorks

Los apéndices están adjuntos y pueden visualizarlos en la base de datos de la biblioteca
UIS

Apéndice C. Modelo Simulink sistema de frenado regenerativo

Los apéndices están adjuntos y pueden visualizarlos en la base de datos de la biblioteca
UIS

Apéndice D. Código de Matlab sistema de frenado hidráulico ABS

Los apéndices están adjuntos y pueden visualizarlos en la base de datos de la biblioteca
UIS

Apéndice E. Modelo Simulink sistema de frenado hidráulico con ABS

Los apéndices están adjuntos y pueden visualizarlos en la base de datos de la biblioteca
UIS