



# UNIVERSIDAD POPULAR AUTÓNOMA DEL ESTADO DE PUEBLA

---

---

FACULTAD DE INGENIERÍA

“SIMULACIÓN DEL FRENADO REGENERATIVO EN VEHÍCULOS  
ELÉCTRICOS UTILIZANDO ULTRA CAPACITORES”

MONOGRAFÍA

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERÍA MECATRÓNICA

PRESENTA :  
PATRICK SUTER RODRÍGUEZ

ASESOR:  
SERGIO ALEJANDRO CARDEÑA MORENO

2023





**UPAEP – Secretaría General**

Dirección General de Apoyos Académicos

Dirección del Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación.

Biblioteca Central - **Karol Wojtyła**

**Tesis Digitales Restricciones de uso:**

**DERECHOS RESERVADOS ©**

**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de textos, imágenes, gráficas, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente de donde la obtuvo mencionando el autor o autores involucrados en el documento.

Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## Agradecimientos:

A mis padres y familia, quienes desde de iniciar la carrera no dudaron que el objetivo sería logrado. Gracias por cada uno de sus consejos grandes o pequeños, gracias por el ánimo y apoyo que me brindaron durante estos últimos años, pero, principalmente, gracias por proporcionarme una educación de calidad. Sin duda, ustedes son los mejores maestros de los cuales he aprendido a lo largo de mi vida. Verdaderamente, les agradezco.

A todos mis profesores y catedráticos quienes tuvieron una gran participación en mi formación, gracias por todo el conocimiento de distintas índoles que me aportaron durante la carrera, puesto que hoy, y en el futuro, yo represento una parte de lo que me enseñaron.

## Índice:

<i>Abreviaturas:</i> .....	10
<i>Introducción:</i> .....	11
<i>Justificación:</i> .....	11
<i>Objetivo general:</i> .....	12
<i>Objetivos específicos:</i> .....	12
<i>Alcances y limitaciones de la simulación del modelo dinámico en PSIM:</i> .....	13
Capítulo 1: Modelo dinámico del vehículo eléctrico.....	14
1: <i>Modelo dinámico del vehículo eléctrico</i> .....	14
1.1: <i>Resistencia de rodadura</i> .....	15
1.2: <i>Resistencia aerodinámica</i> .....	17
1.3: <i>Resistencia a la pendiente</i> .....	19
1.4: <i>Acoplamiento a la transmisión</i> .....	20
1.5: <i>Ecuación dinámica del vehículo</i> .....	22
Capítulo 2: Ultra capacitores .....	23
2: <i>Sistemas de almacenamiento de energía</i> .....	23
2.1: <i>Ultra capacitores</i> .....	24
2.2: <i>Modelo y equilibrio de la celda</i> .....	28
Capítulo 3: Frenado regenerativo .....	30
3: <i>Introducción</i> .....	30
3.1: <i>Principio de funcionamiento</i> .....	31
3.2: <i>Análisis del flujo de la energía</i> .....	32
3.3: <i>Características a tomar en cuenta</i> .....	33
Capítulo 4: Motores DC (corriente continua) .....	34
4: <i>Introducción</i> .....	34
4.1: <i>Antecedentes de los motores de DC</i> .....	34
4.2: <i>Motores de corriente continua (DC)</i> .....	35
4.3: <i>Funcionamiento básico</i> .....	35
4.4: <i>Características del motor DC</i> .....	36
Capítulo 5: Convertidores DC-DC .....	43
5: <i>Interfaz del convertidor</i> .....	43
5.1: <i>Importancia de la utilización convertidores DC-DC</i> .....	45
5.2: <i>Conceptos básicos de un convertidor DC-DC</i> .....	46
5.3: <i>Tipos de convertidores DC-DC</i> .....	47
5.4: <i>Puntos comunes de los convertidores Buck, Boost y Buck-Boost</i> .....	48

5.5: Convertidor Buck-Boost.....	51
5.6: Cálculos de pérdidas.....	52
5.7: Simulación vs. métodos analíticos.....	53
Capítulo 6: Simulación del frenado regenerativo utilizando ultra capacitores en PSIM.....	54
6: Introducción a la simulación.....	54
6.1: Parámetros y simbología.....	54
6.2: Explicación del sistema.....	59
6.3: Análisis de resultados.....	65
Conclusiones:.....	72
Referencias.....	73

## Índice de ilustraciones:

Ilustración 1: Diagrama de fuerzas de un vehículo en pendiente. ....	15
Ilustración 2: Distribución de cargas en un neumático y dirección de rotación de la llanta contra resistencia a la rodadura (Montaño, 2020). ....	15
Ilustración 3: Resistencia a la rodadura (Montaño, 2020). ....	16
Ilustración 4: Zonas de alta y baja presión en el automóvil y sus respectivas resistencias aerodinámicas dependiendo de la forma (Montaño, 2020). ....	18
Ilustración 5: Coeficientes de resistencia al aire de distintos vehículos (Montaño, 2020). ....	19
Ilustración 6: Sistema de tracción utilizado en vehículos eléctricos estándar (Jazar, 2008)..	20
Ilustración 7: Velocidad angular en la rueda (se define $R_d$ como $r_{eff}$ , $W$ como $W_x$ y $V$ como $V_x$ ) (Rajamani, 2006).....	21
Ilustración 8: Clasificación de tipos de capacitores (John M. Miller, s.f.). ....	24
Ilustración 9: Comparación de la energía específica y la potencia específica del sistema de almacenamiento de energía (John M. Miller, s.f.).....	25
Ilustración 10: Clasificación relativa del sistema de almacenamiento de energía en potencias de diez (Emadi, 2005). ....	26
Ilustración 11: Tamaño de los poros del capacitor electrónico de doble capa (EDLC) (Emadi, 2005). ....	26
Ilustración 12: Ultra capacitor con potencial aplicado (Emadi, 2005). ....	27
Ilustración 13: Modelo de celda de montaje de electrodos en los EDLC (Emadi, 2005). ....	28
Ilustración 14: Diagrama del proceso de transferencia de energía (Wanzhong, Gang, Chunyan, Leiyan, & Yufang, 2019).....	30
Ilustración 15: Condición de conducción hacia adelante (4) (Bhurse, 2018). ....	31
Ilustración 16: Condición de frenado regenerativo (4) (Bhurse, 2018). ....	31
Ilustración 17: Fuerza mecánica generada por un conductor expuesto a una corriente sobre un imán (Hughes, 2006). ....	35
Ilustración 18: Bobina cilíndrica de múltiples vueltas y patrón de su flujo magnético (Hughes, 2006). ....	36
Ilustración 19: Líneas de flujo magnético al interior de un circuito con baja reluctancia con un entrehierro (Hughes, 2006).....	37
Ilustración 20: FMM actuando a través de las caras de polos opuestos en la región del entrehierro (Hughes, 2006).....	38
Ilustración 21: Diagrama comparativo entre densidad de flujo y reluctancia efectiva (Hughes, 2006). ....	40
Ilustración 22: Evolución del circuito del motor DC basado en el núcleo en C abierto (Hughes, 2006).....	40
Ilustración 23: Colocación de conductores de corriente en el rotor para maximizar el par en el motor (Hughes, 2006).....	41
Ilustración 24: Influencia que tiene el rotor ranurado en las trayectorias de flujo de los conductores (Hughes, 2006). ....	42
Ilustración 25: Respuesta del ciclo de trabajo del convertidor debido a la alternancia de la demanda de energía (Emadi, 2005). ....	43
Ilustración 26: Atributos del convertidor DC/DC durante los modos Boost /Buck (Schupbach & Balda, 2003).....	44
Ilustración 27: Variación del ciclo de trabajo del convertidor de interfaz de ultra capacitores con la relación de tensión (Emadi, 2005). ....	44

Ilustración 28: Regulador lineal comparado con el regulador de conmutación PWM (Emadi, 2005). .....	45
Ilustración 29: Espectro de potencia general de las topologías de convertidores DC-DC (Emadi, 2005). .....	46
Ilustración 30: Topología y formas de onda del convertidor Buck (Emadi, 2005). .....	48
Ilustración 31: Topología y formas de onda del convertidor Boost (Emadi, 2005). .....	48
Ilustración 32: Topología y formas de onda del convertidor Buck-Boost (Emadi, 2005). .....	49
Ilustración 33: Topología del convertidor Flyback (Emadi, 2005). .....	52
Ilustración 34: Sistema completo de la simulación. ....	59
Ilustración 35: Parámetros del control de simulación. ....	60
Ilustración 36: Subcircuito de accionamiento. ....	61
Ilustración 37: Parámetros de la máquina DC. ....	62
Ilustración 38: Subcircuito fuente de la batería. ....	62
Ilustración 39: Parámetros de la fuente de voltaje DC. ....	63
Ilustración 40: Subcircuito banco de ultra capacitores. ....	63
Ilustración 41: Parámetros de los ultra capacitores. ....	64
Ilustración 42: Subcircuito del modelo dinámico del vehículo. ....	64
Ilustración 43: Gráfica de la pendiente durante el ciclo de manejo. ....	65
Ilustración 44: Gráfica de la velocidad durante el ciclo de manejo. ....	66
Ilustración 45: Gráfica de las revoluciones por minuto durante el ciclo de manejo. ....	66
Ilustración 46: Gráfica del par durante el ciclo de manejo. ....	67
Ilustración 47: Gráfica de la potencia del motor durante el ciclo de manejo. ....	68
Ilustración 48: Gráfica del voltaje en el banco de ultra capacitores durante el ciclo de manejo. ....	68
Ilustración 49: Gráfica de la corriente en el banco de ultra capacitores durante el ciclo de manejo. ....	69
Ilustración 50: Gráfica de los intervalos de tiempo de carga de los ultra capacitores. ....	69
Ilustración 51: Gráfica de los intervalos de tiempo de descarga de los ultra capacitores. ....	70
Ilustración 52: Gráfica comparativa. ....	70
Ilustración 53: Grafica comparativa entre rpm y km/h del Nissan Leaf (Zal, 2017). ....	71

## Índice de tablas:

Tabla 1: Coeficientes de resistencia a la rodadura (Jazar, 2008).....	17
Tabla 2: Propiedades del electrodo EDLC (Emadi, 2005).....	29
Tabla 3: Parámetros del Nissan Leaf. ....	55
Tabla 4: Simbología utilizada en la simulación de PSIM. ....	58
Tabla 5: Parámetros de la simulación (File). ....	60

## *Resumen:*

Este trabajo consiste en la simulación del frenado regenerativo de un vehículo eléctrico (el vehículo en el que se basa esta simulación es el NISSAN *Leaf* 2014) utilizando ultra capacitores como medio de almacenamiento de energía, esta simulación se realizó mediante el software PSIM, que permite hacer simulaciones mecánicas y electrónicas. Además de explicar el funcionamiento de la simulación y sus respectivos resultados, este trabajo también cuenta con la teoría detrás de cada una de las partes que conforman la simulación, estas siendo la física detrás de la dinámica de un vehículo, el funcionamiento de un motor DC, el funcionamiento de los convertidores DC-DC, la física del frenado regenerativo y el funcionamiento de los ultra capacitores.

## *Abstract:*

*This paper consists of the simulation of regenerative braking of an electric vehicle (the vehicle on which this simulation is based is the NISSAN Leaf 2014) using ultra capacitors as a means of energy storage, this simulation was performed using PSIM software, which allows mechanical and electronic simulations. In addition to explaining the operation of the simulation and their respective results, this paper also has the theory behind each of the parts that conform the simulation, these being the physics behind the dynamics of a vehicle, the operation of a DC motor, the operation of DC-DC converters, the physics of regenerative braking and the operation of ultracapacitors.*

## *Abreviaturas:*

*EDLC: Electric double layer capacitor.*

*DC: Direct current.*

*AC: Alternating current.*

*ESR: Equivalent series resistance.*

*SOHIO: Standard Oil of Ohio.*

*MIT: Massachusetts Institute of Technology.*

*HESS: Hybrid Energy Storage System*

*FMM: Magnetomotive force.*

*Polo S: Polo sur.*

*Polo N: Polo norte.*

*IGBT: Insulated Gate Bipolar Transistor.*

*PWM: Pulse Width Modulation.*

*IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers.*

*UL: Underwriters Laboratories.*

*SAE: Society of Automotive Engineers*

*NEC: National Electrical Code.*

*ANSI: American National Standards Institute.*

*GENELEC: European Committee for Electrotechnical Standardization.*

## *Introducción:*

Este trabajo busca probar si el uso de un banco de ultra capacitores es efectivo en el frenado regenerativo de un vehículo eléctrico; basado en esto se simuló la dinámica de un vehículo eléctrico y las respectivas partes eléctricas para simular el flujo de voltaje y corriente que hay entre el motor y el banco de ultra capacitores, pasando primero por un convertidor DC-DC que se encarga de regular el voltaje en ambas direcciones, esto quiere decir cuando el motor hace la función de un generador y carga el banco de ultra capacitores y cuando el banco de ultra capacitores se descarga mandándole de regreso energía al motor.

A lo largo de este trabajo se ira explicando la teoría y funcionamiento de cada una de las partes que conforman esta simulación, esto con el fin de lograr tener un mayor conocimiento sobre el tema y ampliar el conocimiento obtenido durante el diplomado de vehículos eléctricos.

Por último, en esta simulación se propone un ciclo de manejo con características específicas con la intención de demostrar el funcionamiento y efectividad que tiene el banco de ultra capacitores al realizar el frenado regenerativo en un ciclo de manejo de una carretera a altas velocidades, y no demostrar otras características del vehículo como lo hace Nissan en sus pruebas de rendimiento.

## *Justificación:*

La razón por la que se realizó este trabajo fue para obtener un mayor conocimiento sobre los vehículos eléctricos y sobre las simulaciones virtuales de automóviles que se hacen en la industria automotriz, esto con el fin de tener una idea más clara de lo que se aprendió durante el diplomado de vehículos eléctricos de la universidad. Se eligió este tema ya que era un tema de interés personal para mí, además de esto con la mejora constante de los medios de almacenamiento de energía, en este caso los ultra capacitores, es un tema de estudio de actualidad y va a seguir progresando y mejorando en los siguientes años.

## *Objetivo general:*

El fin de este trabajo es realizar una simulación en el software PSIM que pruebe el funcionamiento y eficiencia que tiene un banco de ultra capacitores en un vehículo eléctrico para absorber y descargar energía durante un ciclo de manejo propuesto, así como saber cuáles son sus capacidades y limitaciones de generar energía eléctrica a partir de la energía mecánica provocada por el frenado del vehículo, todo esto en un contexto de un ciclo de manejo en carretera a altas velocidades, ya que es a altas velocidades donde el frenado regenerativo es más efectivo. Esto con el objetivo de ampliar el conocimiento sobre este tema adquirido en el diplomado de vehículos eléctricos de la universidad UPAEP.

## *Objetivos específicos:*

- Explicar la interacción que tiene un vehículo con las fuerzas dinámicas que se ejercen sobre este.
- Comprender el funcionamiento de las máquinas eléctricas, en específico el motor de DC.
- Entender cómo funcionan los sistemas de almacenamiento llamados ultra capacitores.
- Observar cómo afecta la carga y descarga de los ultra capacitores en la aceleración y desaceleración del vehículo.
- Estudiar la importancia y funcionamiento de los convertidores de potencia en el auto eléctrico.
- Diseñar una simulación para realizar la prueba del sistema de frenado regenerativo con un banco de ultra capacitores.
- Evaluar los resultados arrojados por la simulación y analizarlos.
- Sacar conclusiones a partir de los resultados obtenidos en la simulación.

## *Alcances y limitaciones de la simulación del modelo dinámico en PSIM:*

Para la simulación de este trabajo se utilizó el programa PSIM, que es un software en el cual se pueden simular cualquier tipo de circuitos electrónicos, ya sean circuitos de potencia o mecánicos. En el caso particular de este trabajo, la simulación tiene ciertas limitaciones, ya que no cuenta con un control en lazo cerrado en el sistema, por lo cual algunos de los resultados arrojados por este software en la vida real no serían posibles, ya que algunas partes de este sistema, por ejemplo, el motor, se encuentran limitadas en la práctica por dichos circuitos de control.

A su vez, algunos de los parámetros utilizados en esta simulación fueron obtenidos a partir de máquinas similares a las que se hace referencia en este trabajo, esto debido a que estos parámetros no se encuentran a disposición de los usuarios o compradores de dichos sistemas. Es el caso del motor en este trabajo, el motor en el que se basa la simulación es el motor de un Nissan *Leaf* que es un motor desarrollado por Nissan llamado EM57; es un motor trifásico de AC síncrono de imanes permanentes, pero debido a la patente del motor por parte de Nissan solo presentan algunos de sus parámetros, como lo son su potencia de 80 kW, torque máximo de 254 Nm, voltaje de 300 V y las máximas RPM de 10500, por lo que los demás parámetros fueron resueltos a partir de estos o tomados de motores similares a este, en el caso de la simulación de este trabajo para efectos prácticos se utilizó un motor DC para arrancar el vehículo con los datos del motor EM57 de Nissan (Zal, 2017).

Por último, en esta simulación se propone un ciclo de manejo diferente al propuesto por Nissan, lo cual hace que se proporcionen resultados un tanto distintos a los del proveedor, esto sucede debido a que esta simulación únicamente tiene la intención de demostrar el funcionamiento y efectividad que tiene el banco de ultra capacitores al realizar el frenado regenerativo en un ciclo de manejo de una carretera a altas velocidades, y no demostrar otras características del vehículo como lo hace Nissan en sus pruebas de rendimiento.

# Capítulo 1: Modelo dinámico del vehículo eléctrico

## 1: Modelo dinámico del vehículo eléctrico

Un modelo dinámico describe el comportamiento dinámico de un sistema a lo largo del tiempo, generalmente de manera matemática. Este tipo de modelos son utilizados para implementar o mejorar aspectos como el control o la eficacia de un sistema. En años recientes, debido a la dificultad que conlleva la realización de los modelos dinámicos, que en general cuentan con expresiones matemáticas de tamaño y complejidad considerables, se crearon programas computacionales que permiten no solo facilitar la tarea de manipular y simplificar las ecuaciones resultantes, sino que proporcionan una comprensión más intuitiva y amigable con el usuario. En este trabajo, se utilizará uno de estos programas para facilitar la realización del modelo dinámico requerido.

La dinámica vehicular trata fundamentalmente del movimiento que tiene un vehículo con una superficie. Por dar algunos ejemplos de aspectos de interés en este tipo de análisis se pueden mencionar el tiempo de aceleración del auto, frenado del vehículo y su estabilidad, que son citados de manera muy frecuente al hablar de automóviles.

Las fuerzas aplicadas al vehículo son las que determinan el comportamiento dinámico que este tendrá. Estas fuerzas son la segunda ley de Newton, la resistencia de rodadura, la resistencia aerodinámica y la resistencia a la pendiente que, al ser puestas en una ecuación que engloba todas estas fuerzas, llamada ecuación dinámica del vehículo, da como resultado el rendimiento que tiene un automóvil. A continuación, procederemos a explicar cada una de estas fuerzas para su mayor comprensión.

Segunda ley de Newton:

La segunda ley de Newton o principio fundamental establece que: El cambio de movimiento es directamente proporcional a la fuerza motriz impresa y ocurre según la línea recta a lo largo de la cual aquella fuerza se imprime (Newton, 2011). La forma más común de describir la ecuación es:

$$F = m \times a \quad (1)$$

Donde:

F: Es la fuerza total ejercida sobre el cuerpo estudiado, la unidad de medida que se utiliza en el Sistema Internacional es el newton (N).

m: Representa la masa del cuerpo que se está estudiando, la unidad de medida que se utiliza en el Sistema Internacional es el kilogramo (kg).

a: Representa la aceleración con la que cuenta el cuerpo, la unidad de medida que se utiliza en el Sistema Internacional es el metro por segundo al cuadrado (m/s<sup>2</sup>).

En otras palabras, la segunda ley de Newton o ecuación fundamental establece que, si la fuerza resultante que se aplica sobre un cuerpo no es nula, el cuerpo experimentará una aceleración o un cambio en su estado de reposo o movimiento.

En este caso, nos interesa saber los efectos que tiene la segunda ley de Newton sobre nuestro vehículo, particularmente en su aceleración, por lo que, en base en la segunda ley de Newton, la aceleración del vehículo  $dV/dt$  se define como:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\sum F_t - \sum F_{opp}}{m} \quad (2)$$

Donde:

$F_t$ : Son las fuerzas de tracción.

$F_{opp}$ : Son las fuerzas de oposición al movimiento.

$m$ : Es la masa del vehículo.

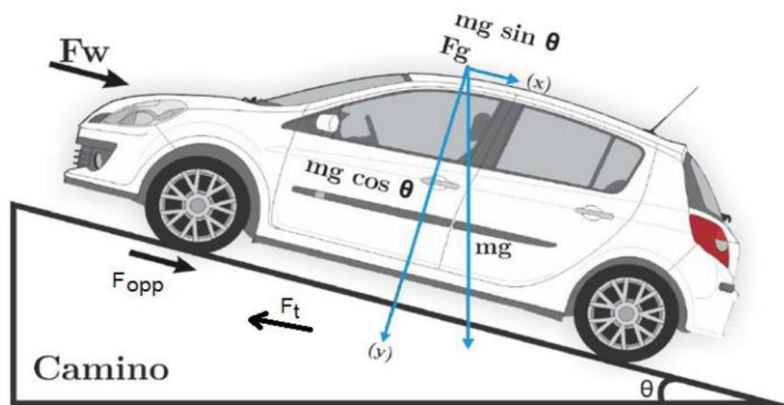


Ilustración 1: Diagrama de fuerzas de un vehículo en pendiente.

### 1.1: Resistencia de rodadura

Este fenómeno físico se presenta cuando sobre una superficie rueda un cuerpo, deformándose uno de estos o ambos a lo largo de la distancia recorrida. Si se presenta un cuerpo indeformable o una superficie con la misma característica, no tiene sentido hablar de este fenómeno ya que no se presentará.

En otras palabras, se puede definir como la cantidad de energía requerida para que un neumático haga avanzar un vehículo en una distancia determinada. La resistencia de rodadura se opone directamente al desplazamiento del vehículo y tiene su origen por el fenómeno que sucede en la zona de contacto de la llanta con la superficie como se puede observar en la Ilustración 2.

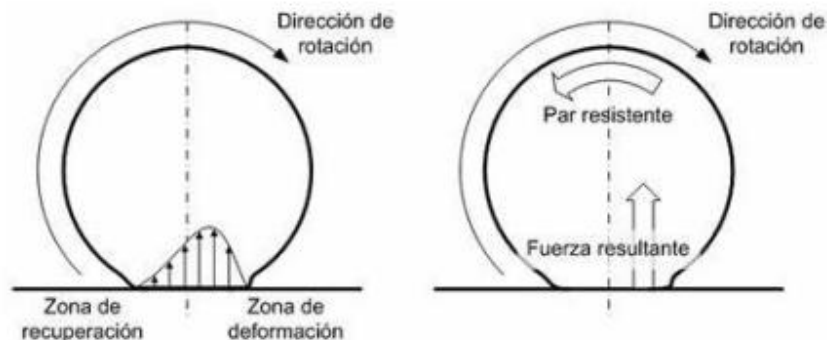


Ilustración 2: Distribución de cargas en un neumático y dirección de rotación de la llanta contra resistencia a la rodadura (Montaño, 2020).

Si se desea reducir la resistencia a la rodadura, el factor más importante a tener en cuenta tiene que ver con un fenómeno llamado histéresis, que ocurre cuando un neumático se flexiona debido al contacto con la carretera, lo cual provoca una pérdida de energía que hace menos eficiente el movimiento hacia adelante del carro.

Gran parte de la energía que es desperdiciada por la histéresis es consecuencia del compuesto o material utilizado en el neumático. Otros factores a tomar en cuenta, además de la histéresis, son la presión de las llantas, la alineación de los neumáticos, el peso del auto, la carga que lleva el carro y su distribución. Entre menor sea la presión de un neumático debajo de su nivel ideal, mayor será su resistencia a la rodadura.

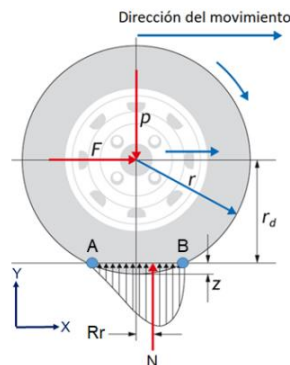


Ilustración 3: Resistencia a la rodadura (Montaño, 2020).

Para describir este fenómeno utilizaremos dos ecuaciones, la primera es la siguiente:

$$Tr = P \times a \quad (3)$$

Donde:

Tr: Momento resistivo de rodadura.

P: Peso del vehículo.

a: Aceleración.

De esta ecuación se deriva la siguiente ecuación con la que tenemos como resultado la fuerza de resistencia a la rodadura:

$$F = \frac{Tr}{rd} = \frac{Pa}{rd} = Pfr \quad (4)$$

Donde:

F: Fuerza de resistencia de rodadura.

P: Peso del vehículo.

fr: Coeficiente de resistencia de rodadura (depende del material del neumático).

El coeficiente de resistencia de rodadura se obtiene de la siguiente fórmula:

$$fr = \frac{d}{R} \quad (5)$$

Donde:

fr: Coeficiente de resistencia de rodadura.

d: Distancia recorrida en metros.

R: Radio de la rueda.

La Tabla 1 muestra los distintos valores de coeficientes de resistencia a la rodadura de acuerdo con las condiciones de la superficie:

Condicion del camino o pavimento	$\mu_0$
Muy buen concreto	0.008 – 0.1
Muy buena pista	0.01 – 0.0125
Concreto promedio	0.01 – 0.015
Muy buen pavimento	0.015
Muy buen macadán	0.013 – 0.016
Pista promedio	0.018
Concreto en condiciones deterioradas	0.02
Buen bloque de pavimentación	0.02
Macadán promedio	0.018 – 0.023
Pista en estado deteriorado	0.23
Macadán arenoso	0.023 – 0.028
Buena pavimentacion de piedra	0.033 – 0.055
Buena pavimentacion natural	0.045
Pavimentacion de piedra en malas condiciones	0.085
Nieve (5 cm)	0.025
Nieve (10 cm)	0.037
Ruta natural en mal estado	0.08 – 0.16
Arena	0.15 – 0.3

Tabla 1: Coeficientes de resistencia a la rodadura (Jazar, 2008).

En el caso de que el automóvil se esté desplazando en una pendiente, el peso (P) se reemplazará por la componente perpendicular a la superficie, por lo que la fórmula se modifica y queda expresada como:

$$Fr = fr \times m \times g \times \cos \theta \quad (6)$$

Donde:

$fr$ : Coeficiente de resistencia a la rodadura.

$m$ : Masa del vehículo.

$g$ : Gravedad.

$\theta$ : Es el ángulo del camino, como se puede observar en la Ilustración 1.

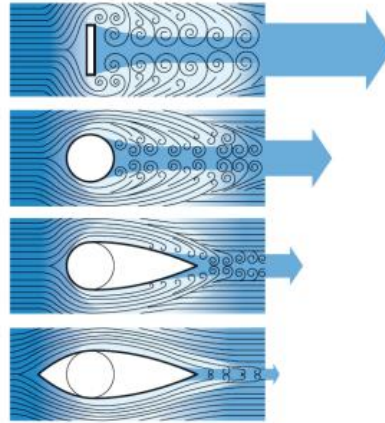
## 1.2: Resistencia aerodinámica

Se refiere a la fuerza que experimenta un cuerpo al desplazarse a través del aire; la fuerza de este fenómeno va en dirección opuesta a la velocidad relativa del cuerpo en su medio. Dicho de otra forma, es la fuerza que se opone al avance de un cuerpo a través del aire, esta fuerza es relacionada habitualmente con la fricción.

Todo vehículo que se esté desplazando a una velocidad (V) experimenta una fuerza de resistencia en el aire debido a dos factores: la resistencia por la forma del automóvil y la fricción inducida.

Resistencia por la forma:

En todo vehículo que se encuentre en movimiento se crean dos zonas de presión que se resisten a su avance, una zona de alta presión en la parte del frente que lo empuja de lado opuesto a su movimiento y una zona de baja presión en la parte posterior que tira del vehículo hacia atrás, esto se puede observar de manera más sencilla en Ilustración 4.



*Ilustración 4: Zonas de alta y baja presión en el automóvil y sus respectivas resistencias aerodinámicas dependiendo de la forma (Montaño, 2020).*

Fricción pelicular:

Este fenómeno se debe a que el aire que se encuentra cercano y alrededor del vehículo se mueve a casi la misma velocidad que el auto que está en movimiento, al contrario que el aire que está aún lejos de este permanece casi inmóvil, y el producto de esta interacción tiene como resultado fricción.

La fórmula utilizada para analizar esta fuerza de arrastre aerodinámica se expresa como:

$$F_w = \frac{1}{2} \rho C_d A_f (v \pm v_w)^2 \quad (7)$$

Donde:

$\rho$ : Corresponde a la densidad del aire.

$C_d$ : Se refiere al coeficiente de resistencia aerodinámica.

$A_f$ : Representa el área frontal del vehículo.

$v$ : Hace referencia a la velocidad lineal del vehículo.

$v_w$ : Corresponde a la velocidad del viento.

Dependiendo de la dirección del aire, la velocidad del viento ( $v_w$ ) puede estar a favor o en contra del vehículo, lo que quiere decir que puede ser positivo o negativo en nuestra ecuación; será positivo cuando este se oponga al movimiento del vehículo y será negativo si está a favor del movimiento del auto.

La resistencia aerodinámica utiliza coeficientes aerodinámicos al igual que sucede con otras fuerzas aerodinámicas, estos coeficientes representan la efectividad que tiene la forma de un cuerpo al desplazarse a través del aire. Este coeficiente es conocido popularmente como coeficiente de penetración, coeficiente aerodinámico o coeficiente de resistencia.

En la Ilustración 5 se muestran los diferentes valores del coeficiente de resistencia aerodinámica según la forma del vehículo

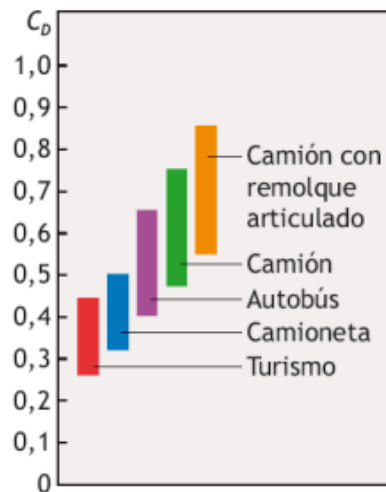


Ilustración 5: Coeficientes de resistencia al aire de distintos vehículos (Montaño, 2020).

### 1.3: Resistencia a la pendiente

Cuando el automóvil se desplaza a través de una pendiente, la resistencia debida a la pendiente tiene un importante lugar en las fuerzas que experimenta el vehículo. Las principales variables a tomar en cuenta dentro de las fuerzas que se oponen a que el auto se desplace a través de una pendiente son su peso y el ángulo de la pendiente por la que este se mueve. Cuando un automóvil se mueve en una pendiente, se sugiere que se coloque una marcha adecuada para que el motor del vehículo no se ahogue, a la vez que es recomendable evitar cambiar de marchas con mucha frecuencia, a menos que la pendiente por la que se circule vaya variando. Otra cosa a tomar en cuenta es la carga que lleva el carro, ya que esto también afectará a la resistencia debida a la pendiente.

La resistencia por pendiente tiene diferentes consecuencias en el rendimiento del vehículo dependiendo de si el vehículo está yendo hacia abajo o hacia arriba. Si es hacia arriba, la resistencia tenderá a detener el automóvil y el conductor del carro tendrá que poner una marcha más fuerte para poder superar esto. Por el contrario, si es hacia abajo el carro será acelerado por dicha pendiente.

Cuando nos referimos a la pendiente, nos referimos al ángulo que forma el plano inclinado con la horizontal. La tangente de este ángulo es lo que llamamos pendiente, esta también puede ser indicada en porcentaje de inclinación en vez de ángulo.

El peso y la carga del automóvil producen dos componentes que se oponen al movimiento del vehículo cuando este se desplaza a través de una pendiente.

Una componente en y que corresponde a la fuerza por resistencia a la rodadura y la componente en x que es la que corresponde a la fuerza de gravedad.

Para resolver esta fuerza que afecta al vehículo se utiliza la expresión que se muestra a continuación:

$$F_g = mg \sin \theta \quad (8)$$

Donde:

m: Hace referencia a la masa del vehículo.

g: Se refiere a la gravedad (9,81 m/s<sup>2</sup>).

## 1.4: Acoplamiento a la transmisión

Generalmente, el sistema de tracción utilizado en un vehículo eléctrico estándar está formado de la manera como se muestra en la Ilustración 6:

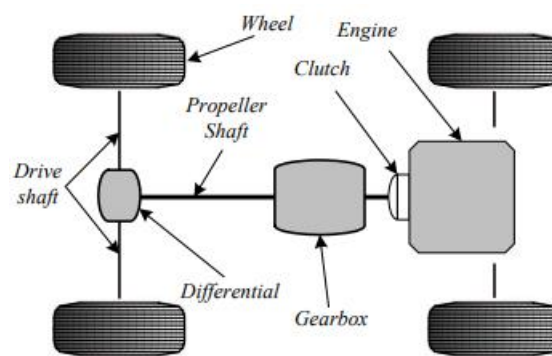


Ilustración 6: Sistema de tracción utilizado en vehículos eléctricos estándar (Jazar, 2008).

La ecuación que describe el par transmitido que tiene el vehículo desde el motor de CD hasta el eje impulsor de los neumáticos es la siguiente:

$$T_w = I_g \times I_o \times n_t \times T_p \quad (9)$$

Donde:

$I_g$ : Corresponde a la razón de los engranes de la transmisión.

$I_o$ : Hace referencia a la razón de engranes del impulsor final.

$n_t$ : Describe la eficiencia que tiene el vehículo desde el motor hasta el eje impulsor.

$T_p$ : Se refiere al par de salida del motor.

A partir de la ecuación anterior, se puede resolver la ecuación que describe la fuerza de tracción sobre el eje impulsor de las ruedas, que es la que se muestra a continuación:

$$F_t = \frac{T_w}{r_d} \quad (10)$$

Donde:

$T_w$ : Corresponde al par transmitido desde el motor de CD hasta el eje impulsor de las llantas.

$r_d$ : Es el radio efectivo de la rueda.

Al sustituir la ecuación (9) en la ecuación (10) se consigue la expresión de la fuerza de tracción en términos del par de máquinas, eficiencia y la relación de engranes.

$$F_t = \frac{I_g \times I_o \times nt \times Tp}{rd} \quad (11)$$

La velocidad de rotación del eje impulsor se obtiene gracias a la ecuación siguiente, donde  $N_w$  está dada en rev/min:

$$N_w = \frac{N_p}{I_g \times I_o} \quad (12)$$

Donde:

$N_w$ : Es a velocidad de rotación del eje impulsor.

$N_p$ : Describe la velocidad mecánica del motor.

$ig*io$ : Hace referencia a la relación de engranajes de la transmisión y el impulsor final.

A continuación, se debe convertir la velocidad mecánica del eje impulsor de rev/min a m/s en velocidad lineal, para realizar esto primero se debe convertir a rad/s:

$$N_w, rad/s = N_p, rev/min \times \left[ \frac{1m}{60s} \right] \times \left[ \frac{2\pi}{rev} \right] \quad (13)$$

A partir de la siguiente ecuación, se encuentra la relación que hay entre la velocidad angular  $\omega$  rad/s y la velocidad lineal  $V$  m/s de la llanta:

$$W \text{ rad/s} = \frac{V}{rd} \quad (14)$$

Donde:

$W$ : Se refiere a la velocidad angular de la rueda.

$V$ : Corresponde a la velocidad en m/s.

$rd$ : Es el radio efectivo de la rueda.

Como se puede observar en la Ilustración 7, la velocidad angular del eje impulsor de las ruedas se encuentra con la velocidad lineal del vehículo.

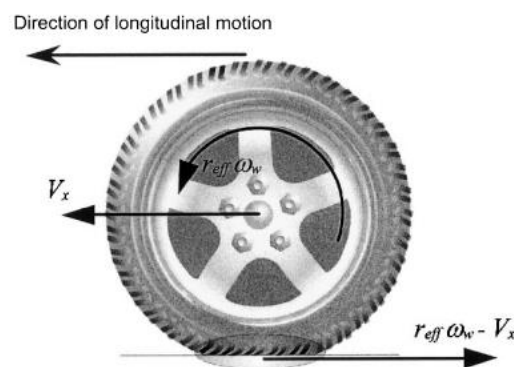


Ilustración 7: Velocidad angular en la rueda (se define  $R_d$  como  $r_{eff}$ ,  $W$  como  $\omega_w$  y  $V$  como  $V_x$ ) (Rajamani, 2006).

El siguiente paso por realizar es despejar la velocidad lineal y sustituir la velocidad angular de la rueda en la ecuación (14):

$$V = \frac{\pi \times Nw \times rd}{30} \quad (15)$$

Para finalizar, se sustituye la ecuación (12) en la ecuación (15) para obtener la velocidad lineal en m/s del vehículo

$$V = \frac{\pi \times Np \times rd}{30(IgIo)} \quad (16)$$

### 1.5: Ecuación dinámica del vehículo

La siguiente ecuación describe la fuerza total requerida por el vehículo para poder moverse:

$$Ft = Fr + Fg + Fw + m \frac{dv}{dt} \quad (17)$$

Se procede a despejar de la ecuación la velocidad con lo que se obtiene:

$$v = \int (Ft - Fr - Fg - Fw) \frac{1}{m} \quad (18)$$

El siguiente paso a realizar para obtener la ecuación dinámica del vehículo es retomar las ecuaciones: (6), (7), (8) y (11). Para sustituirlas en la ecuación (18), para así llegar finalmente a la ecuación que detalla la dinámica del vehículo por completo:

$$v = \int \left[ \left( \frac{Ig * Io * nt * Tp}{rd} \right) - (mg(fr * \cos \theta + \sin \theta)) - \left( \frac{\rho * Cd * Af (v - vw)^2}{2} \right) \right] \frac{1}{m} \quad (19')$$

---

<sup>1</sup> Nota: Todas las ecuaciones utilizadas en este documento tienen como origen los libros citados en las bibliografías referentes a la dinámica del vehículo, pero utilizando la nomenclatura usada durante el Diplomado de vehículo eléctrico de la universidad UPAEP.

# Capítulo 2: Ultra capacitores

## 2: Sistemas de almacenamiento de energía

La función principal del almacenamiento eléctrico es guardar electricidad para que en algún momento en el que se necesite, esta pueda ser utilizada. Este proceso es el que ocurre en la batería de un vehículo o en una pila recargable. En la actualidad, existen diversos tipos de tecnologías capaces de almacenar energía. Las tecnologías de almacenamiento se utilizan en el día a día de todas las personas, ya que cuentan con una gran cantidad de aplicaciones, ya sea en baterías para alimentar dispositivos electrónicos como celulares y computadoras, en el sector del transporte para alimentar autos, camiones y transportes públicos, o en el sector salud para brindarle energía a marcapasos u otros aparatos de este sector.

Para este trabajo, el sistema de almacenamiento a utilizar serán los ultra capacitores, ya que para el objetivo de este trabajo resultan ser idóneos. Antes de entrar en el tema de ultra capacitores se describirá que es un capacitor, su funcionamiento, sus tipos y como calcular su capacitancia.

Un capacitor es un dispositivo de almacenamiento de energía pasivo, utilizado en electricidad y electrónica, que es capaz de almacenar energía manteniendo un campo eléctrico. Sus usos más comunes son: en la sincronización de componentes y dispositivos, en la creación de formas de onda, en el bloqueo de la corriente continua en circuitos electrónicos, en el acoplamiento de señales de corriente alterna, en filtros electrónicos y, por último, claramente, en el almacenamiento de energía.

Todos los capacitores tienen la misma estructura básica; están formados por un par de superficies conductoras llamadas láminas o placas, por la forma que tienen, estas se encuentran separadas por un material dieléctrico o por vacío. El capacitor, al ser sometido a un campo eléctrico, hace que sus placas que se encuentran sometidas a una diferencia de potencial, adquieran una carga eléctrica, positiva en una de ellas y negativa en la otra, teniendo como consecuencia que sea nula la variación de carga total. La capacidad de un capacitor es proporcional al área de su placa e inversamente proporcional a la distancia que hay entre sus placas.

Para obtener el valor de la capacidad de un capacitor, se utiliza la siguiente fórmula:

$$C = (\epsilon_0 * \epsilon_r) * \frac{A}{d} \quad (20)$$

Donde:

$\epsilon_0$ : Se refiere a la permitividad del vacío  $\approx 8,854187817... \times 10^{-12} \text{ F}\cdot\text{m}^{-1}$ .

$\epsilon_r$ : Hace referencia a la permitividad relativa del material dieléctrico o constante dieléctrica.

A: Área efectiva de las placas.

d: Distancia entre las placas.

A continuación, se hará un breve repaso describiendo los tipos de capacitores que existen, esto con el fin de tener un mayor entendimiento del tema. Los capacitores pueden ser de dos

clases: electrostáticos o electrolíticos, de acuerdo con el medio que rodea al campo eléctrico entre un par de electrodos.

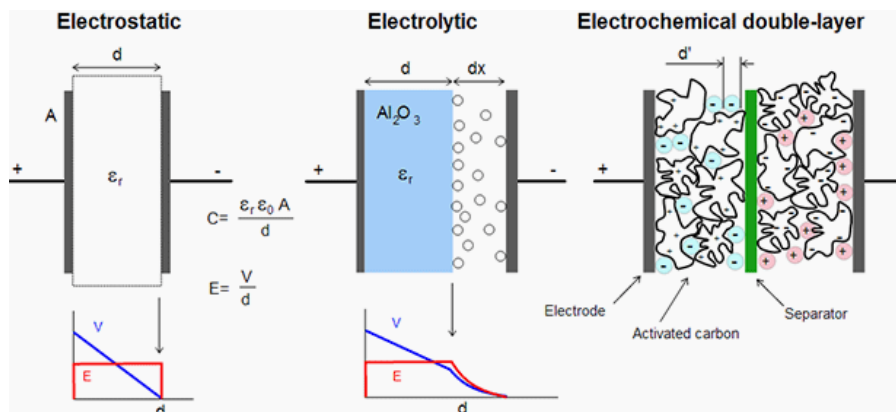


Ilustración 8: Clasificación de tipos de capacitores (John M. Miller, s.f.).

Los capacitores electrónicos de doble capa son una subclase de los capacitores electrolíticos. También son conocidos como: súper condensadores, pseudo capacitores, ultra capacitores o simplemente EDLC por sus siglas en inglés. Estos dispositivos electroquímicos son capaces de contar con una densidad de energía atípicamente alta en contraste con los capacitores normales. Los capacitores electrolíticos de alta capacidad cuentan con una capacitancia miles de veces menor que la de los ultra capacitores.

## 2.1: Ultra capacitores

Estos componentes se comportan como baterías de muy alta potencia y baja capacidad, pero, a diferencia de las baterías, almacenan la energía eléctrica acumulando y separando físicamente las cargas diferentes, mientras que las baterías almacenan la energía químicamente en reacciones químicas reversibles. Los ultra capacitores en el laboratorio han demostrado densidades de potencia de 2000 a 4000 W/kg (Emadi, 2005). Los ultra capacitores son idóneos para la nivelación de la carga necesaria en un vehículo eléctrico o híbrido, ya que pueden proporcionar una gran potencia para las aceleraciones y pueden aceptar una gran potencia durante el frenado regenerativo.

Los ultra capacitores, al igual que los volantes de inercia y las baterías químicas, dependen de las mejoras de sus materiales para alcanzar mejoras en sus objetivos de rendimiento. Para los ultra capacitores hay cinco combinaciones de materiales básicas distintas para la formación de su par de electrodos, entre los que se encuentran: carbono, compuestos de fibra de carbono/metal, Aero gel (carbono espumado), partículas de carbono con un aglutinante, revestimientos mixtos de óxido metálico sobre lámina metálica y películas de polímero conductor dopado sobre tela de carbono.

Además de los materiales anteriormente mencionados, los ultra capacitores utilizan disolventes que pueden ser orgánicos o acuosos al igual que los capacitores normales. Los electrolitos orgánicos cuentan con un alto voltaje de trabajo, tienen una alta compactibilidad y a la vez cuentan con alta densidad energética con una amplia temperatura de trabajo; usualmente se envasan en latas de metal. Por el contrario, los electrolitos acuosos tienen un rango de temperatura limitado y una tensión de descomposición baja de sólo 1 V. Por otro lado, los disolventes acuosos favorecen a los ultra capacitores que tienen una baja ESR

(resistencia serie equivalente: hace referencia a la resistencia de un capacitor al paso de determinada corriente alterna con su respectiva frecuencia). Debido a la alta movilidad iónica no son inflamables y por último tienen un bajo costo.

Actualmente, las tendencias indican que se obtienen densidades de energía más altas utilizando un electrodo compuesto de carbono que a la vez tenga un electrolito orgánico, que cuando se usan dispositivos de electrodos compuestos de carbono o fibra metálica con un electrolito acuoso.

La vida útil de los ultra capacitores es un aspecto clave y fundamental en estos, ya que su vida útil es muy larga. Se espera que cuando los ultra capacitores estén totalmente desarrollados para su uso en vehículos estos duren tanto como el mismo auto. Los ultra capacitores tienen una excelente vida útil debido a que pueden soportar ciclos muy rápidos y profundos sin que se produzca una disminución significativa en su ciclo de vida útil, lo cual tiene consecuencias directas para el comprador, ya que tiene que reemplazar su sistema de almacenamiento antes de lo previsto debido a esto, como suele pasar en la mayoría de las baterías químicas. También tienen una alta eficiencia de ciclo en comparación con las baterías químicas.

El defecto principal de los ultra capacitores es que cuentan con una baja energía específica, que tiene un rango de entre 5-10 Wh/kg (Emadi, 2005). La tensión o voltaje de los ultra capacitores tiene la particularidad de ser directamente proporcional a su estado de carga (es decir la energía que les queda), por lo cual su rango de funcionamiento debe limitarse a las regiones de alto estado de carga o, en su defecto, utilizar una electrónica de control para compensar las grandes variaciones de tensión. Una de las claves para el desarrollo exitoso de ultra capacitores para aplicaciones en vehículos es el uso de una interfaz que permita que el ultra capacitor se adapte al nivel de carga óptimo de las baterías.

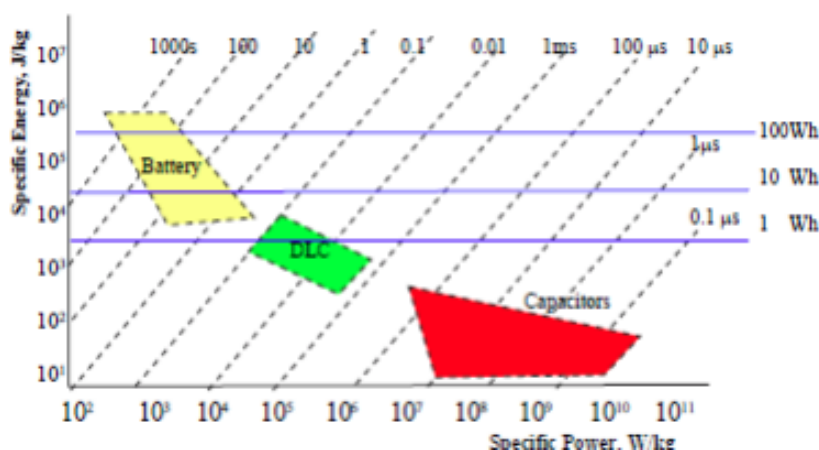


Ilustración 9: Comparación de la energía específica y la potencia específica del sistema de almacenamiento de energía (John M. Miller, s.f.).

Como se observa en la Ilustración 9 la densidad de potencia específica de los ultra capacitores es extremadamente alta, del orden de 0.5 MW/kg y aun mayor, pero sus tiempos de descarga de impulsos es muy baja, de sólo microsegundos.

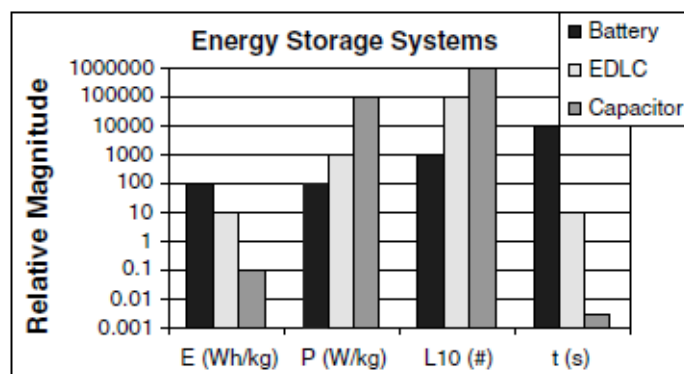


Ilustración 10: Clasificación relativa del sistema de almacenamiento de energía en potencias de diez (Emadi, 2005).

En la Ilustración 10 se muestran las tres principales tecnologías de almacenamiento de energía eléctrica que son: baterías, capacitores y ultra capacitores. Los capacitores sobresalen en cuanto a la potencia de impulso P (W/kg) y la duración del ciclo L10 (#), mientras que las baterías sobresalen en densidad energética E (Wh/kg) y duración de la carga-descarga tiempo t (s).

Los capacitores electrónicos de doble capa, o ultra capacitores, como se les llama frecuentemente, fueron creados y patentados en 1961 por SOHIO (Standard Oil of Ohio). Sus efectos se demostraron dentro de un conjunto de electrodos de carbono en un medio disolvente no acuoso (Endo, 2001) . La capacitancia en un sistema de ultra capacitores depende de las propiedades superficiales del carbón activado utilizado para sus electrodos respecto a su área específica  $m^2/g$  y la distribución del tamaño de sus poros.

Al valor de la capacitancia del ultra capacitor se le añade la accesibilidad iónica que tiene el electrolito a todos los poros disponibles en el carbón activado y a las propiedades únicas del electrolito utilizado.

El tamaño de los poros del electrodo en los ultra capacitores determina en gran parte la capacidad alcanzable de estos dispositivos.

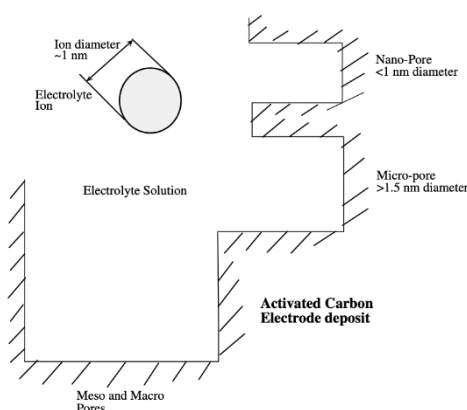


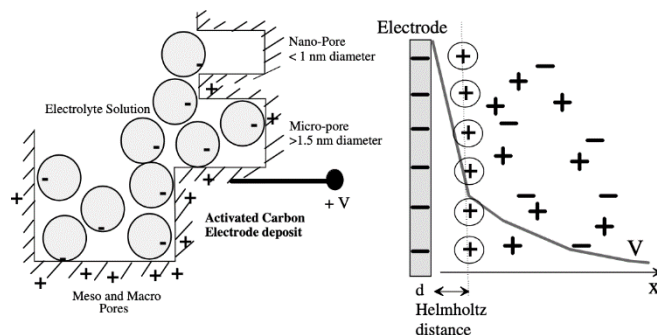
Ilustración 11: Tamaño de los poros del capacitor electrónico de doble capa (EDLC) (Emadi, 2005).

En la Ilustración 11 se muestra el concepto de tamaño de los poros y el acceso a los iones del electrolito. Se observa el carbón activado con tamaños de poro que van desde diámetros

promedios nanométricos hasta micrométricos. Hay tres distribuciones del tamaño de los poros: micro, meso y macro, con áreas superficiales usuales del orden de 1000 a 2000 m<sup>2</sup>/g.

La capacidad de un ultra capacitor no es solo un cálculo de la superficie disponible del electrodo, ya que los iones que ocupan los distintos poros lo hacen de manera escalonada o en forma de capas, en vez de crear una única capa doble. En las primeras investigaciones de los ultra capacitores, se observó que una capa doble se formaba como una capa compacta de moléculas de disolvente ionizadas pegadas a las paredes de los poros sin ninguna otra formación en la solución.

En el primer modelo recién mencionado, se llegó a la designación de la distancia de Helmholtz como método para definir la separación de las cargas en un capacitor electrónico de doble capa. Esta distancia se define como la distancia que hay de los centros iónicos a la superficie de la pared del poro, y esta distancia tiene un orden de decenas de angstroms, en otras palabras, distancias atómicas; esta distancia es un gran factor en la capacidad de desarrollar una capacitancia muy grande en los ultra capacitores. Los investigadores cambiaron el modelo de Helmholtz posteriormente para tomar en consideración una capa de iones de grosor variable y una más en la que los iones tienen libertad de movimiento, a este modelo se le conoce como modelo de doble capa difusa, y fue creado por Gouy y Chapman. Más tarde, Stern combinó los dos modelos anteriores conjeturando que un capacitor electrónico de doble capa se debe a una capa compacta de Helmholtz interna y a una capa difusa externa.



*Ilustración 12: Ultra capacitor con potencial aplicado (Emadi, 2005).*

La Ilustración 12 muestra el movimiento de las cargas iónicas en los poros aplicando un potencial. Se observa que la función de potencial es altamente no lineal más allá del plano de Helmholtz interior, debido a que las cargas se vuelven difusas y cuentan con libertad de movimiento.

Regresando a la Ilustración 11 se puede decir que para tamaños de poro de carbón activado de 3 nm o 30 Angstrom, tanto como para los electrolitos acuosos como para los orgánicos se presentará el efecto EDLC. Por otro lado, si el tamaño de los poros disminuye hasta los 2 nm el efecto EDLC sólo se produce para el electrolito acuoso, por último, para 1 nm el efecto EDLC no se presenta para ambos tipos de electrolitos. Mediante esta dependencia a la morfología del carbón activado en cuanto a la distribución de los poros se confirma la afirmación hecha anteriormente, la cual dice que el tamaño de los poros determina en gran parte la capacitancia posible alcanzable para un componente EDLC.

A continuación, se desarrollará un modelo basado en la descripción anterior del electrodo y la capacitancia de los materiales de un EDLC. Un capacitor electrónico de doble capa es una red de resistencia en serie a través de la fibra de carbono y la capacitancia de doble capa de los poros.

## 2.2: Modelo y equilibrio de la celda

Los capacitores electrónicos de doble capa tienen características de construcción similares a los capacitores electrolíticos de aluminio, en los cuales sus electrodos de alta superficie están enrollados en espiral por medio de un separador aislante y con tántalos, en estos los electrodos son altamente porosos y accesibles al electrolito. En los EDLC, los electrodos de carbono-carbono están compuestos por una cubierta de carbono activado que cuenta con una alta porosidad, en la cual su distribución del tamaño de los poros es mayor que los diámetros de los iones del electrolito. Sus electrodos deben ser expuestos a un vacío para eliminar cualquier gas residual que pueda quedar contenido en los poros antes de hacer la inmersión en el disolvente. Los EDLC de diseño simétrico, es decir con electrodos de carbono-carbono, utilizan electrolitos orgánicos o acuosos como se ha expresado anteriormente, pero cuentan con un separador conductor de iones hecho de papel de vidrio.

Los colectores de corriente de los electrodos en los capacitores electrónicos de doble capa tubulares son láminas de aluminio con una película de polvo de carbón activado depositada. Por otro lado, otros fabricantes están investigando polímeros conductores que puedan ser usados como materiales para sus electrodos. Este tipo de polímero se parece a la construcción de una batería de plomo-ácido, en el sentido de que la carga se encuentra y se almacena en la mayor parte del material del electrodo. La capacidad terminal en los capacitores de doble capa reside en la unión en serie de un capacitor de doble capa anódico y un capacitor de doble capa catódico.

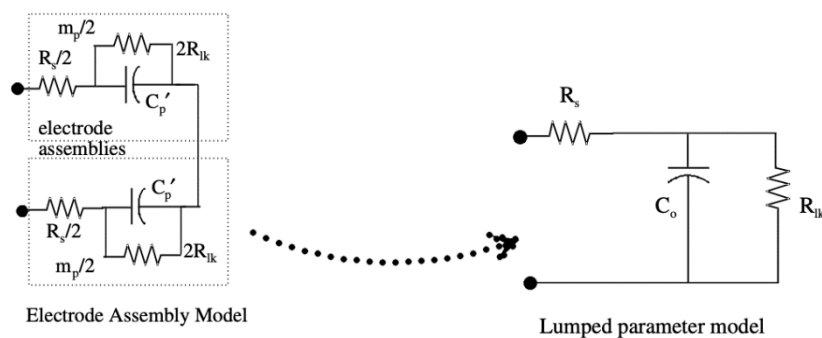


Ilustración 13: Modelo de celda de montaje de electrodos en los EDLC (Emadi, 2005).

La Ilustración 13 muestra el modelo clásico de celda de los capacitores de doble capa, que se basa en las capacitancias individuales del conjunto de electrodos. Estos conjuntos de electrodos cuentan con una resistencia en serie que aparece gracias al tapete de carbón activado altamente poroso y una resistencia de derivación que sirve para frenar las fugas de la celda.

La capacitancia específica del electrodo, también llamada capacitancia por placa ( $C_p$ ), se mide en F/gm. Se considera como la capacitancia efectiva que resulta de una superficie específica ( $S_p$ ) y esta se mide en  $m^2/gm$ , esto ocurre en una distancia de separación de un

Helmholtz (d) al electrolito. Además de esto, el conjunto de la célula está limitado a una masa de  $m_p/2$  en gm, en otras palabras, la mitad de la masa de la celda activa.

La capacitancia específica y la superficie específica para diversas estructuras de electrodos se resume en la siguiente tabla:

Sistema de electrodo	Área específica, $S_p$ ( $m^2/gm$ )	Capacitancia específica, $C_p$ (F/gm)
Compuesto de metal- carbón	2000	200
Aero gel	800	160
Anhidro de óxido de rutenio	150	150

Tabla 2: *Propiedades del electrodo EDLC (Emadi, 2005).*

La ecuación 21 detalla la capacitancia específica que tiene cada electrodo del capacitor de doble capa en un sistema carbono-carbono, dicho de otra forma, en un ultra capacitor simétrico.

$$C'p = \frac{\epsilon_r * \epsilon_o * Sp}{d} (F/gm) \quad (21)$$

Haciendo uso y reconociendo la combinación en serie de dos capacitancias del conjunto de electrodos como se vio en la Ilustración 13. Para una celda de capacitor de doble capa con una masa activa total ( $m_p$ ), la capacitancia equivalente del modelo en parámetros globales es:

$$C_o = \left(\frac{C'p}{2}\right) \left(\frac{m_p}{2}\right) (F) \quad (22)$$

Por lo cual, el modelo equivalente de parámetros aglomerado (*lumped*), mostrado en la Ilustración 13 consta de una resistencia en serie, que representa el efecto combinado de una estructura altamente distribuida y una capacitancia neta para la celda ( $C_o$ ), además de esto cuenta con una resistencia de derivación que representa la fuga de la celda.

Los EDLC o ultra capacitores presentan diversas respuestas constantemente en el tiempo durante la carga y la descarga, que el modelo de parámetros globales mostrado en la Ilustración 13 no puede demostrar. Para demostrar estas respuestas en el tiempo se deben utilizar modelos más complejos, pero debido a la finalidad de este trabajo no es necesario utilizarlos.

# Capítulo 3: Frenado regenerativo

## 3: Introducción

El frenado regenerativo es un fenómeno que consiste en extraer la energía cinética de los neumáticos que se desperdicia en forma de calor y fricción en el frenado convencional. Este tipo de frenado tiene mayor eficacia para vehículos que circulan a velocidades altas. La mejora se realiza a partir del uso de volantes de inercia, ultra capacitores, convertidores electrónicos de potencia y sistemas de almacenamiento de energía. Al utilizar el frenado regenerativo se mejora la autonomía de conducción alrededor de un 16,25% (Bhurse, 2018). Además de esto, el uso de este frenado tiene como consecuencia que se reduzca el tiempo de frenado del vehículo.

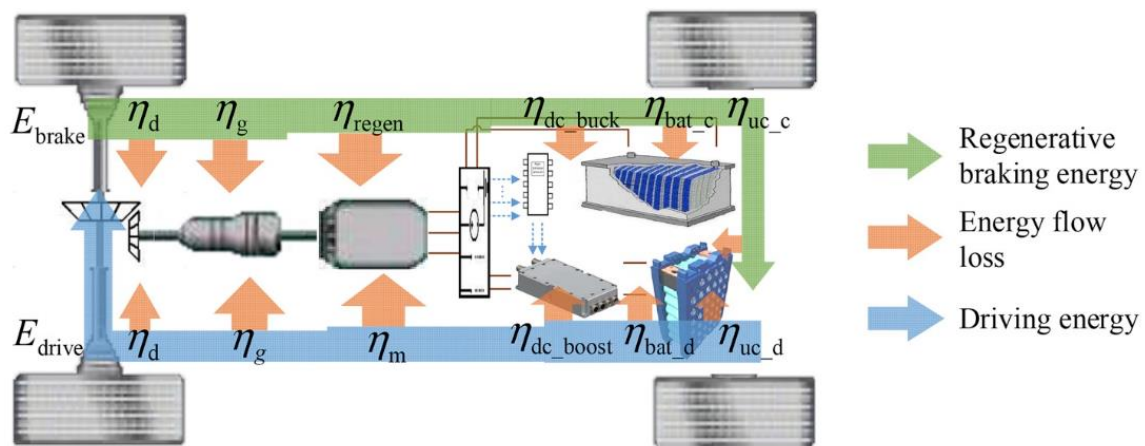


Ilustración 14: Diagrama del proceso de transferencia de energía (Wanzhong, Gang, Chunyan, Leiyang, & Yufang, 2019).

La Ilustración 14 muestra el diagrama esquemático del proceso de transferencia de energía del vehículo. Durante la conducción, el sistema de almacenamiento de energía suministra energía al motor de accionamiento para arrastrar el movimiento del vehículo y obtener energía cinética. Al frenar, el vehículo con el sistema de frenado regenerativo puede convertir parte de la energía cinética en energía química o en almacenamiento de energía mecánica.

En años recientes, la sustentabilidad y la protección del medio ambiente han incrementado su importancia, por lo que los avances en medios de transporte que no contaminen como el caso de los vehículos eléctricos han ido aumentando. El frenado regenerativo es un avance que ayuda a combatir el principal problema que tienen los vehículos eléctricos que es su autonomía, ya que debido al peso y espacio limitados que tienen los carros para colocar las baterías, la cantidad de energía almacenada por los vehículos eléctricos es menor a la de los vehículos convencionales. El frenado regenerativo recupera la energía en las llantas que es desperdiciada en los sistemas de frenado tradicionales, lo que hace que haya una mejora en la autonomía de los vehículos eléctricos.

En el momento en el que el motor llega a una velocidad superior a su velocidad nominal, sobre todo si se cuenta con una pendiente favorable, se genera una amplia cantidad de contrafase en los devanados del motor del vehículo, lo cual es muy favorable para el frenado regenerativo, ya que se recupera la máxima energía del motor. Entre mayor sea la inductancia en el devanado del motor y que se cuente con una baja resistencia en el devanado, más favorece a la recuperación de energía.

Las mayores ventajas del frenado regenerativo son:

- Se consigue una mayor eficiencia de combustible.
- Se desgastan en menor medida los frenos mecánicos.
- Se mejora el control al frenar.
- Se mejora el tiempo de frenado, es decir el vehículo frena más rápido.

### 3.1: Principio de funcionamiento

A través de la interacción que tienen las llantas con el suelo, se puede generar y utilizar la energía cinética que produce el vehículo. Una parte de la energía recuperada se utiliza para vencer la resistencia del aire, la resistencia a la rodadura y la resistencia a la pendiente. El frenado regenerativo es un proceso que extrae la energía cinética y la convierte en energía eléctrica útil que se puede almacenar en diversos sistemas de almacenamiento. Sin embargo, parte de esta energía generada desaparece en pérdidas mecánicas y electromagnéticas a lo largo del sistema de propulsión eléctrico.

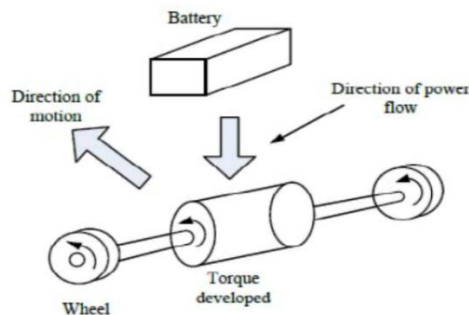


Ilustración 15: Condición de conducción hacia adelante (4) (Bhurse, 2018).

La Ilustración 15 ejemplifica la condición de conducción de avance en la que el motor gira haciendo que el vehículo se dirija hacia adelante, lo que hace que el par motor actúe en la misma dirección de giro que las ruedas. Por último, el diagrama muestra que la batería está suministrando energía.

Según la ley de Lenz la retro emisión se opone directamente al movimiento del vehículo. En este caso en particular, incrementa la fuerza del campo magnético, aumentando de esta forma el perfil de velocidad de los autos.

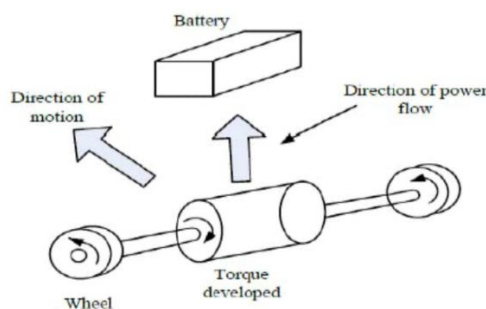


Ilustración 16: Condición de frenado regenerativo (4) (Bhurse, 2018).

En la Ilustración 16 se enseña la regeneración de energía durante el frenado, en la cual el motor actúa como un generador, lo que tiene como consecuencia que la fuerza del campo magnético se reduzca, y por consiguiente también su velocidad. La dirección de giro de la rueda es opuesta a la del par motor. Por último, la ilustración muestra que la energía se transfiere de regreso a la batería o sistema de almacenamiento.

### 3.2: Análisis del flujo de la energía

Al frenar con el frenado regenerativo la energía cinética se recupera de manera eficaz. Las resistencias a las que se somete el vehículo siguen siendo importantes para el flujo de la energía como son la resistencia al aire, a la pendiente y la resistencia a la rodadura que fueron vistas en el primer capítulo; la energía cinética a la que está sometida el vehículo durante el frenado viene dada por la siguiente ecuación:

$$\int \frac{du}{dt} < 0 \delta G \frac{du}{dt} * u dt = E_{brake} - \int P_w dt - \int P_f dt - \int P_i dt \quad (23)$$

Donde:

E<sub>brake</sub>: Se refiere a la energía que pasa por los neumáticos al momento de frenar.

P<sub>w</sub>: Hace referencia a la potencia de la resistencia del aire.

P<sub>f</sub>: Es la potencia de la resistencia a la rodadura.

P<sub>i</sub>: Corresponde a la potencia de la resistencia de la pendiente.

Al mismo tiempo que el frenado vence las resistencias necesarias, la energía cinética que tiene el vehículo se divide en dos partes: una es la energía del frenado regenerativo y la otra es la energía del frenado por fricción.

$$E_{brake} = E_{brake\_rege} + E_{brake\_fric} \quad (24)$$

Donde:

E<sub>brake\_rege</sub>: Se refiere a la energía que se dirige hacia el frenado regenerativo.

E<sub>brake\_fric</sub>: Hace referencia a la energía que se dirige hacia el frenado por fricción. Estas dos variables cuentan con valores negativos.

El motor transforma la energía eléctrica del sistema de almacenamiento de energía en energía cinética durante el avance y aceleración del vehículo, por otro lado, durante el frenado regenerativo la energía cinética se regresa al sistema de almacenamiento mediante un proceso a la inversa.

$$\left( \begin{array}{l} E_{ess\_disc} = \int P_{ess\_disc} dt = E_{drive} / (\eta_m \eta_g \eta_d) \\ E_{ess\_char} = \int P_{ess\_char} dt = E_{brake\_rege} (\eta_d \eta_g \eta_{regen}) \end{array} \right) \quad (25)$$

Donde:

E<sub>ess\_disc</sub>: Es la energía consumida.

E<sub>ess\_char</sub>: Es la energía recuperada por el HESS.

P<sub>ess\_disc</sub>: Hace referencia a la potencia de descarga.

P<sub>ess\_char</sub>: Hace referencia a la potencia de carga del HESS.

η<sub>m</sub>: Corresponde a la eficiencia del motor durante la conducción.

η<sub>regen</sub>: Corresponde a la eficiencia en el frenado regenerativo.

η<sub>g</sub>: Se refiere a la eficiencia del reductor.

η<sub>d</sub>: Se refiere a la eficiencia del diferencial.

Modelo HESS:

Este sistema de frenado regenerativo de doble alimentación está compuesto principalmente por una batería, un convertidor DC-DC, un motor de imanes permanentes, un ultra capacitor, un semieje, un diferencial, un reductor, un inversor y una rueda. También cuenta con un sistema electrohidráulico para controlar el frenado por fricción, el cual coopera en conjunto con el motor de imanes permanentes, que funciona como generador para garantizar los requisitos necesarios de frenado del usuario o conductor del auto.

Se suele utilizar un convertidor DC para igualar la batería ya que esta mejora el flujo de energía en el sistema. La relación de carga y descarga del sistema de almacenamiento de energía en el sistema se describe con la siguiente expresión:

$$\begin{cases} E_{ess\_disc} = E_{bat\_d} + (E_{uc\_d} - Q_{dc\_boost}) \\ E_{ess\_char} = E_{bat\_c} + (E_{uc\_c} - Q_{dc\_buck}) \end{cases} \quad (26)$$

En este sistema de almacenamiento de doble alimentación, la expresión que describe su relación de transferencia de energía es la siguiente:

$$\begin{cases} P_{ess\_disc} = (\eta_{bat\_d} * P_{bat\_d}) + (\eta_{uc\_d} * \eta_{boost} * P_{uc\_d}) \\ P_{ess\_char} = (P_{bat\_c}/\eta_{bat\_c}) + (P_{uc\_c}/(\eta_{uc\_c} * \eta_{buck})) \end{cases} \quad (27)$$

Donde:

$\eta_{bat\_c}$ : Es la eficiencia de carga de la batería.

$\eta_{bat\_d}$ : Es la eficiencia de descarga de la batería.

$P_{bat\_c}$ : Es la potencia de carga de la batería.

$P_{bat\_d}$ : Hace referencia a la potencia de descarga de la batería.

$\eta_{uc\_c}$ : Es la eficiencia de carga del ultra capacitor.

$\eta_{uc\_d}$ : Es la eficiencia de descarga del ultra capacitor.

$P_{uc\_c}$ : Es la potencia de carga del puerto abierto.

$P_{uc\_d}$ : Es la potencia de descarga del puerto abierto.

### 3.3: Características a tomar en cuenta

Hay que tener en cuenta que para que se produzca la regeneración la contrafase debe ser mayor que el voltaje de alimentación. De esta manera, solo la energía regresa a la batería o la corriente inversa circula del motor hasta la alimentación, el motor no tiene la capacidad de producir tanta contrapresión a bajas velocidades. Por lo tanto, se tiene que aumentar la contrafase más que el voltaje de alimentación. Esto se logra con un convertidor de refuerzo separado.

Hay condiciones en las que las baterías se pueden dañar debido a que el voltaje de la batería supera su valor nominal, estas condiciones son cuando la velocidad es superior a la nominal. Por lo que hay que limitar la batería, se tiene que disipar el exceso de energía cuando la batería ya se encuentra totalmente cargada. Esto se suele realizar conectando una resistencia a través del enlace de DC, en este enlace el exceso de energía se va en forma de calor.

Otra característica a tomar en cuenta es la eficiencia de utilización de energía, en la cual generalmente se propone una estrategia de distribución de energía que tome en cuenta la eficiencia global, es decir que distribuya la fuerza de frenado entre el frenado regenerativo y el frenado por fricción. Por último, normalmente se proponen y evalúan los índices de eficiencia de utilización de la energía dentro de esta estrategia de distribución, también se toma en cuenta la distribución de la potencia entre el ultra capacitor y la batería.

Hay que tener en cuenta las normativas al diseñar la distribución de fuerzas de frenado en un auto. La normativa que determina las fuerzas de frenado de los ejes delanteros es la normativa de estabilidad y seguridad ECE R13-H (Y. Gao, 2008). A la vez que estas se limitan por el par máximo y la región de mayor eficiencia del motor.

# Capítulo 4: Motores DC (corriente continua)

## 4: Introducción

El motor es el principal componente de un vehículo eléctrico, debido a esto es muy importante elegir el tipo de motor apropiado con una potencia adecuada. Un ejemplo de esto podría ser referirse a un motor de la siguiente manera: motor de 30 CV o de 50 CV; esto es inexacto ya que la potencia varía con los amperios y voltios, además de que la potencia pico es mayor que la potencia continua.

Otro aspecto que se tiene que tomar en cuenta es el no comparar motores de gas con motores eléctricos, ya que los motores de gas tienen una potencia máxima relacionada al vacío y los eléctricos una potencia continua bajo una carga. Para la identificación precisa de un motor, este debe identificarse mediante su nombre o número de modelo o de serie.

### 4.1: Antecedentes de los motores de DC

Debido a su sistema de escobillas y colectores, los motores de corriente continua tienen dinámicas más complejas que los motores de corriente alterna. Exceptuando al disco de Faraday que cuenta con una rotación continua al funcionar con una fuente de alimentación de corriente continua. Sin embargo, debido a dificultades prácticas el disco de Faraday no se pudo convertir en un instrumento muy utilizado por la industria de la época; incluso antes de la aparición del disco de Faraday, un herrero estadounidense hizo un motor conmutador de escobillas en la década de 1830 (Gottlieb, 1997), pero debido a la tecnología inadecuada del momento, como lo eran las baterías de ese entonces, el invento solo se destacó como una curiosidad y no como una herramienta útil.

Cuando por fin se puso en marcha la tecnología de los motores de corriente continua, creció rápidamente y estuvo disponible para satisfacer las necesidades y demandas de la industria del automóvil, la industria textil para realizar prendas en serie y, por último, para generar energía para el alumbrado público utilizándose de manera inversa como generador.

Gracias al avance de la tecnología en la actualidad, como lo son los avances en los rectificadores de estado sólido, los nuevos materiales magnéticos y las técnicas de control electrónico, los motores de corriente continua vuelven a tener un interés generalizado, teniendo estos una función muy importante en aparatos de mucha utilidad. Por otro lado, los motores de corriente continua se han convertido en un motor universal, que pueden funcionar tanto como con corriente continua como con corriente alterna, esto último haciendo unas cuantas modificaciones al motor.

Las ventajas más interesantes de un motor de corriente continua son:

- Capacidad de trabajar a velocidades bajas.
- Existen motores DC de todo tipo de tamaños.
- Regulación de velocidad simple y económica comparada con los motores CA.
- Posibilidad de usar reductores para conseguir una mayor fuerza de giro.
- Posible alimentación con baterías o con energía fotovoltaica.

Sin embargo, incluso con la tecnología actual, el principal inconveniente de estos motores es que su mantenimiento es laborioso y costoso, principalmente debido al desgaste que tienen las escobillas al tener contacto con las delgas; en los motores DC de baja potencia las escobillas están hechas de grafito, por otra parte si el motor requiere soportar una mayor

corriente se fabrican de una aleación de grafito y metal para tener mayor resistencia, este tipo de motores se utilizan para los motores de arranque en los vehículos. También es muy común fabricar rotores con láminas de acero eléctrico, debido a que este material disminuye las pérdidas en campos magnéticos variables, llámese pérdidas por histéresis o por corrientes de Foucault.

## 4.2: Motores de corriente continua (DC)

Este tipo de motores son máquinas que convierten la energía eléctrica en energía mecánica, debido al campo magnético dentro de estos se provoca una rotación dentro del motor.

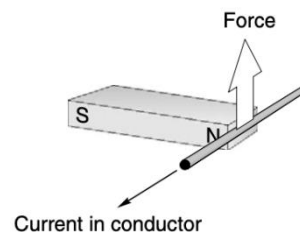
Los motores de corriente continua se dividen en dos partes que son:

El rotor, que es la parte del motor que gira dentro del estator; es un componente generalmente cilíndrico que cuenta con un eje, un núcleo y con un devanado, este se alimenta de corriente continua a través del colector que está formado por delgas, estas delgas son normalmente de cobre y están en un contacto alternante con las escobillas que están fijas en el motor.

Por otro lado, el estator, que es la parte que se encarga de dar soporte mecánico al motor, es decir es la parte fija e inmóvil; suele estar formado por diferentes imanes y bobinas, debido a esto contienen los polos magnéticos del aparato. Suelen contener devanados de hilo de cobre puestos sobre imanes permanentes o un núcleo de hierro.

## 4.3: Funcionamiento básico

El funcionamiento de un motor DC se puede explicar mediante el caso de una espira, formada por un material conductor, expuesta a un campo magnético, a la cual se le aplica cierto voltaje en sus extremos de tal manera que pase una corriente a través de esta, como se puede observar en la Ilustración 17.



*Ilustración 17: Fuerza mecánica generada por un conductor expuesto a una corriente sobre un imán (Hughes, 2006).*

El experimento expone que la magnitud de la fuerza depende directamente de la corriente en el conductor y de la fuerza del imán, además de esto muestra que la fuerza es mayor cuando el campo magnético del imán es perpendicular al conductor.

En el caso de los motores de corriente continua, la espira constituye el rotor, los imanes y bobinas del estator producen el campo magnético necesario. Cuando pasa una corriente a través de un conductor, este se encuentra sometido a un campo magnético, debido a esto experimenta una fuerza denominada fuerza de Lorentz, que es perpendicular al plano formado por la corriente y el campo magnético, dicha fuerza se expresa mediante la siguiente ecuación.

$$F = B * L * I * \text{sen}(\phi) \quad (28)$$

Donde:

F: Es la fuerza dada en Newtons.

I: Es la corriente del conductor dada en amperios.

L: Se refiere a la longitud del conductor dada en metros.

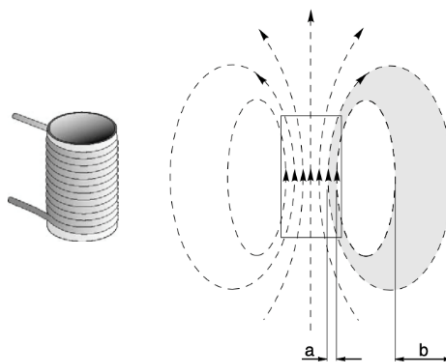
B: Hace referencia a la densidad de campo magnético dada en Tesla.

$\Phi$ : Es el ángulo que forman I y B.

#### 4.4: Características del motor DC

Para sacarle el mayor provecho a estos motores es necesario disponer de imanes fuertes y hacerlos interactuar con muchos conductores, los cuales deben llevar la máxima corriente posible. Aunque los imanes son esenciales para el funcionamiento del motor, estos actúan como catalizadores en el motor, la mayor parte de la potencia mecánica de salida tiene su origen en la alimentación eléctrica en los conductores. A su vez, es importante crear altas densidades de flujo magnético en los motores; el flujo se encuentra dentro de "circuitos magnéticos" bien definidos, la mayor parte del tiempo, estos circuitos están formados de hierro o acero, en estos las líneas de flujo se extienden uniformemente para aprovechar al máximo la superficie disponible que tiene el motor.

En la mayoría de los motores, el campo magnético se produce mediante bobinas de alambre que tienen corriente, por lo que es conveniente estudiar cómo se organizan las bobinas y su circuito magnético de hierro para producir un campo magnético elevado, que posteriormente interactúa con otros conductores para producir fuerza, y por lo tanto la rotación que nos interesa.



*Ilustración 18: Bobina cilíndrica de múltiples vueltas y patrón de su flujo magnético (Hughes, 2006).*

En la Ilustración 18, se muestra el patrón de flujo a la derecha y la bobina a la izquierda. Cada vuelta de la bobina produce un campo magnético, cada uno de estos se superpone al otro y así se incrementa sustancialmente. Esto hace que las trayectorias de flujo cerradas se parezcan mucho más a los imanes que se mostraron en el experimento anterior.

Una vez que los tubos de flujo ya no están bajo la influencia concentradora de la fuente, el aire que rodea a la bobina ofrece un camino homogéneo para el flujo, los tubos al pasar esto se pueden extender por todo el espacio circundante. Hay que tener en cuenta que entre cada par de líneas de flujo hay una cantidad igual de flujo, a medida que las líneas de flujo se alejan de la bobina estos se debilitan, por lo cual es necesario buscar una manera de aumentar la densidad de flujo y tener un medio apropiado para concentrar el flujo y evitar que se propague por el aire.

FMM (fuerza magnetomotriz):

Las formas más efectivas de aumentar la densidad de flujo en una bobina son aumentar la corriente en las bobinas o añadir más espiras a la bobina. La fuerza magnetomotriz en la bobina es el producto del número de vueltas de la bobina (N) y su corriente (I). Una FMM puede obtenerse por medio de un gran número de espiras de un hilo fino que transporte una corriente baja o de manera inversa pocas espiras gruesas, pero con una alta corriente, mientras el producto de (NI) sea constante, la FMM no se altera.

Similitud con un circuito eléctrico:

Se puede hacer un paralelismo con un circuito eléctrico, ya que el flujo magnético en los motores es proporcional a la FMM que lo impulsa, esto es similar a como la corriente que fluye en un circuito es proporcional a los voltios que la impulsan; en los circuitos eléctricos esta relación se expresa mediante la ley de Ohm que es la siguiente:

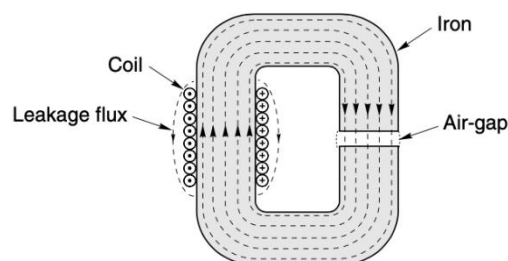
$$v = \frac{I}{R} \quad (29)$$

Para obtener una mayor corriente es necesario reducir la resistencia en el circuito, ya que la corriente en un circuito depende de su resistencia. Se puede realizar lo mismo en el caso de los motores, ya que existe la denominada ley de Ohm magnética, esto se hace a partir de la introducción del concepto de reluctancia (R). Este concepto hace referencia a la dificultad que tiene el flujo magnético en completar su circuito, tal y como ocurre cuando la corriente se opone a una resistencia para completar su circuito eléctrico. La ley de Ohm magnética se expresa de esta forma:

$$\Phi = \frac{NI}{R} \quad (30)$$

De la ecuación anterior, se llega a la conclusión que para aumentar el flujo para la FMM se debe reducir la reluctancia que tiene el circuito magnético.

Para obtener una mayor FFM, se debe sustituir la mayor parte de la trayectoria que tiene el flujo en el aire, ya que este es una sustancia pobre, hablando en el aspecto magnético, y debe sustituirse por un material como el acero magnético, ya que este material tiene una reluctancia mucho menor a la del aire.



*Ilustración 19: Líneas de flujo magnético al interior de un circuito con baja reluctancia con un entrehierro (Hughes, 2006).*

Gracias a que la reluctancia en las trayectorias de hierro es mucho menor a las que se tenían en el aire, se consigue obtener una FMM mayor, ya que se cuenta con más flujo total producido. Otra ventaja de realizar este cambio es que casi todo el flujo que se produce está confinado en el hierro en vez de esparcirse en el aire de alrededor, a su vez se puede observar en el interior de la plancha que la densidad de flujo permanece constante en toda la sección, esto debido a que como hay poca reluctancia en el hierro, el flujo no tiene la tendencia de desplazarse de un lado a otro. Cuando el entrehierro es relativamente pequeño, como en el

caso de los motores, se suele observar que el flujo salta a través del entrehierro y que no tiende a expandirse al aire circundante, como la mayor parte de las líneas de flujo atraviesan el entrehierro, la densidad de flujo en el entrehierro tiene el mismo valor que en el interior del hierro. La reluctancia suele ser menor en las piezas de hierro que en los entrehierros en la mayor parte de los circuitos magnéticos formados por hierro y uno o más entrehierros.

Entrehierros:

Siempre se pretende utilizar la más alta cantidad de densidad de flujo en los motores para tener la posibilidad de desarrollar fuerza sobre los conductores que transportan la corriente, está claro que es físicamente imposible colocar los conductores dentro del hierro, debido a esto los conductores se colocan en la región del entrehierro en el circuito magnético, como se mostró en la Ilustración 17.

Haciendo nuevamente una analogía con los circuitos eléctricos, las piezas de hierro hacen el papel que tienen los cables de cobre en este tipo de circuitos, estos sirven para guiar el flujo hasta su destino, y deben tener la característica de ser moldeables y que se opongan poco al flujo; aunque existe una diferencia fundamental entre los dos y es que en los circuitos eléctricos no fluye la corriente hasta que el circuito se completa y es después de esto que la corriente se acumula en los cables, en cambio en un circuito magnético el flujo puede correr incluso antes de que se instale el hierro y aunque la mayor parte del flujo atravesará la plancha, una pequeña parte seguirá filtrándose al aire, a esto se le llama flujo de fuga.

Densidades de flujo y reluctancia en el entrehierro:

Es fácil estimar la densidad de flujo en el entrehierro si se desprecia la reluctancia de las partes de hierro del circuito magnético, esto se hace al considerar al hierro un conductor perfecto de flujo, si se hace esto no se utiliza nada de la FMM para conducir el flujo a través de las piezas de hierro, únicamente para conducir el flujo a través del entrehierro.

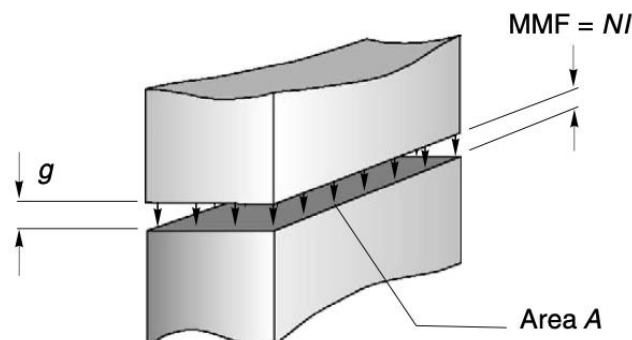


Ilustración 20: FMM actuando a través de las caras de polos opuestos en la región del entrehierro (Hughes, 2006).

La Ilustración 20 describe cómo se aplica una FMM directamente en el entrehierro a través de la longitud  $g$ ; para poder determinar qué cantidad del flujo cruza a través del hueco de los polos se necesita saber la reluctancia. La reluctancia de cualquier material está directamente vinculada con su dimensión y sus propiedades magnéticas; la reluctancia de un prisma rectangular de aire con una sección transversal ( $A$ ) y una longitud ( $g$ ) se mide con la siguiente fórmula:

$$R_g = \frac{g}{A\mu_0} \quad (31)$$

Donde:

$\mu_0$ : Es la permeabilidad del espacio libre o constante magnética primaria, cuantifica las propiedades magnéticas del vacío, para este caso también es la permeabilidad del aire, su valor constante es de  $4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m en el sistema SI.

$g$ : Es la longitud del material.

$A$ : Es la sección transversal.

No existe un nombre para la unidad de reluctancia, lo cual resulta bastante sorprendente.

Si se desea incluir la reluctancia de las piezas de hierro del circuito, la expresión cambia de la siguiente forma:

$$R_{fe} = \frac{l_{fe}}{A\mu_{fe}} \quad (32)$$

Si se desea obtener la reluctancia total, se le tiene que sumar la reluctancia del aire a esta expresión.

Donde:

$\mu_{fe}$ : Es la permeabilidad del hierro, la cual es mucho mayor a las del aire, lo que tiene como consecuencia que la reluctancia del hierro sea mucho menor que la reluctancia de la separación de los polos, a pesar que la longitud del hierro sea mayor.

$l_{fe}$ : Es la longitud del hierro.

Esta ecuación arroja un resultado esperable que es que, si se duplica el entrehierro, se duplica la reluctancia, y por otro lado si se duplica el área se reduce a la mitad la reluctancia.

Si se desea obtener el flujo, se le aplica la ley de Ohm magnética a la ecuación, dando como resultado la siguiente fórmula:

$$\Phi = \frac{FMM}{R} = \frac{NI * A\mu_0}{g} \quad (33)$$

Finalmente, si se desea obtener la densidad de flujo magnético en el hueco se hace de la manera siguiente:

$$B = \frac{\Phi}{A} = \frac{\mu_0 * NI}{g} \quad (34)$$

A partir de esta ecuación se puede calcular la densidad de flujo en el entrehierro, una vez que se conozca la FMM de la bobina (NI) y la longitud de su entrehierro (g). Como ya se dijo con anterioridad, no es necesario conocer los detalles que tenga el devanado más que saber el número de vueltas y su corriente, tampoco es necesario conocer su sección transversal a menos que se quiera obtener el flujo total.

Saturación:

Existe un límite para la densidad de flujo a la que puede funcionar una plancha, de lo contrario sería posible aplastar el flujo en una sección transversal muy pequeña, lo que se sabe que no es posible. Como se vio anteriormente, el hierro casi no tiene reluctancia en comparación con el aire.

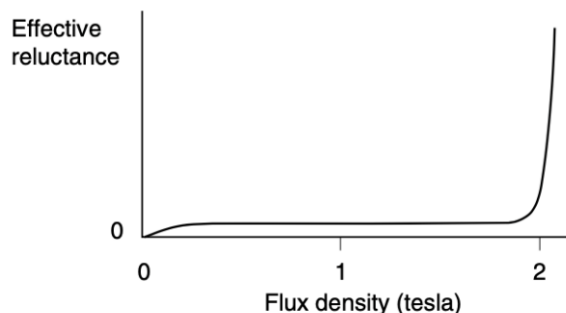


Ilustración 21: Diagrama comparativo entre densidad de flujo y reluctancia efectiva (Hughes, 2006).

En el diagrama anterior, se muestra que a medida que aumenta la densidad de flujo y se aproxima a la saturación, la reluctancia efectiva aumenta rápidamente. Por desgracia, esta situación sólo se da mientras la densidad de flujo sea menor a 1,6 - 1,8 T, dependiendo del acero que se esté analizando. Si se trabaja con un hierro con densidades de flujo más altas, ya no se comporta como un conductor de flujo ideal, debido a que ya tiene una reluctancia significativa; al pasar el flujo a través del hierro, una parte significativa de la fuente FMM se utilizará, lo cual es indeseable por lo que es recomendable no sobrecargar las partes de hierro en el circuito.

El término utilizado para describir cuando la reluctancia empieza a apreciarse es llamado saturación, debido a que, si se continúa incrementado la FMM o reduciendo las piezas de hierro, eventualmente la densidad de flujo que se alcanza es casi constante alrededor de 2T. Para evitar los efectos adversos que tiene la saturación en el circuito, el tamaño de las piezas de hierro se elige basado en que su densidad de flujo no superé 1.5T. Con este nivel de densidad de flujo, la reluctancia de las partes de hierro es pequeña con la del entrehierro comparativamente.

Circuitos magnéticos en motores:

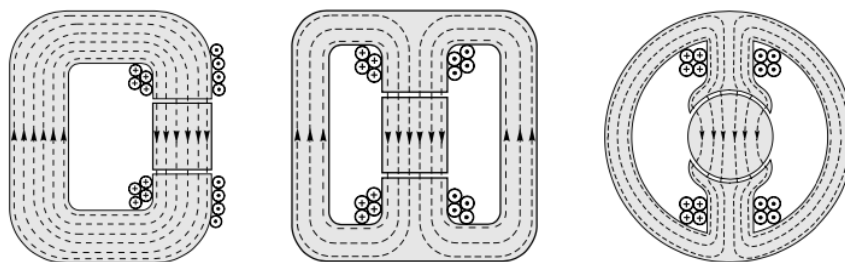
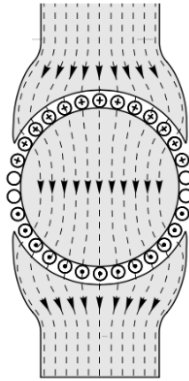


Ilustración 22: Evolución del circuito del motor DC basado en el núcleo en C abierto (Hughes, 2006).

En la Ilustración 22, se muestra la evolución que tuvo el núcleo C y se refiere al sistema Weld de un motor DC. La primera etapa de la evolución es la del lado izquierdo en donde el hueco único original de longitud (g) se dividió en dos huecos con una longitud de (g/2) para que el rotor pudiera girar, de la misma manera la bobina se divide en dos para mantener la simetría. La siguiente etapa es la del centro de la ilustración, en la que la trayectoria magnética que originalmente era única se divide en dos trayectorias paralelas de la mitad de la sección transversal, las cuales ahora transportan la mitad del flujo. La última etapa es la de la derecha, en la cual las trayectorias de flujo y las caras de los polos se curvan para que se adapten de mejor manera al rotor, la bobina tiene varias capas que se adaptan al espacio disponible, lo cual no tiene ningún efecto negativo en la FMM y el entrehierro sigue siendo pequeño, por lo que el flujo cruza sin ningún problema con dirección al rotor.

Producción de par o torque:

Se debe obtener el máximo beneficio de la densidad de flujo una vez que el diseño del circuito magnético nos asegure obtener la más alta densidad de flujo bajo los polos. Por lo cual se deben disponer un conjunto de conductores que se encuentren fijados al motor y se tiene que asegurar que una parte de estos conductores estén situados bajo un polo N y lleven corriente positiva, mientras que en la otra parte se deben colocar bajo el polo S y deben llevar por el contrario corriente negativa, como se puede observar en la Ilustración 23.



*Ilustración 23: Colocación de conductores de corriente en el rotor para maximizar el par en el motor (Hughes, 2006).*

La fuerza electromagnética tangencial sobre los conductores negativos será hacia la derecha, mientras que la fuerza sobre todos los conductores positivos será hacia la izquierda, por lo que el rotor girará gracias a un par neto.

Magnitud del par:

El par resultante se define mediante la siguiente expresión:

$$T = Fr \quad (35)$$

Donde:

T: Es el par resultante.

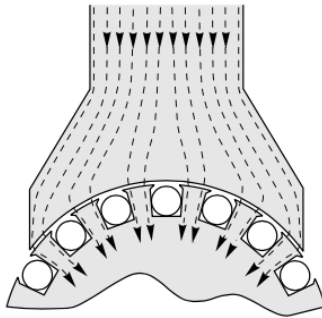
r: El radio del motor.

F: Es la fuerza tangencial total.

La fuerza tangencial total (F) depende enteramente de la densidad de flujo generada por el devanado Weld, del número de conductores con los que cuenta el rotor, de la corriente de cada uno ellos y de la longitud que tenga el rotor.

Hendidura en el rotor:

Los primeros motores DC se fabricaban como el mostrado en la ilustración anterior, se utilizaban cuerdas y cinta adhesiva para fijar los conductores al rotor, esto ocasionaba que el entrehierro tuviera que ser al menos igual al diámetro del hilo y a la vez que los conductores tuvieran que estar fijos al rotor para transmitirle su fuerza de giro. Esto cambió en el siglo XIX cuando se ideó que los conductores se hundieran parcialmente en ranuras mecanizadas en paralelo al eje para así poder reducir el espacio de aire, con el fin de que los devanados excitadores se pudieran reducir. Esto proporcionó una mejor ubicación para los conductores del rotor con lo que se consiguió ejercer más fuerza sobre los conductores y por lo tanto transmitirla al cuerpo del rotor.



*Ilustración 24: Influencia que tiene el rotor ranurado en las trayectorias de flujo de los conductores (Hughes, 2006).*

Como se aprecia en la Ilustración 24, con el tiempo los conductores se introdujeron en ranuras cada vez más profundas hasta que estos dejaron de sobresalir de la superficie del rotor, por otro lado, el entrehierro se hizo tan pequeño como permitieron las holguras mecánicas entre el estator y el rotor.

Fuerza contraelectromotriz:

Es el voltaje creado por los conductores del motor, que se crea gracias al corte de las líneas de fuerza. La fuerza contraelectromotriz está asociada directamente a la velocidad de giro del motor y a la vez a su flujo magnético. Al arrancar este tipo de motores, se producen picos de corriente, debido a que no se cuenta con una fuerza contraelectromotriz al estar la máquina en reposo, debido a esto el bobinado se comporta como un conductor de baja resistencia en un inicio.

Número de escobillas dentro del motor:

La función de las escobillas es poner en cortocircuito a todas las bobinas de la zona neutral, por ejemplo, si el aparato tiene dos polos también contará con dos zonas neutras, a la vez el número de escobillas del motor tendrá que ser igual al número de polos de este. La posición en la que están las escobillas debe ser coincidente a las líneas neutras de los polos. Si un motor DC cuenta con un bobinado imbricado tiene que llevar el mismo número de escobillas que de polos, de otra manera si el motor cuenta con un bobinado ondulado, en teoría es suficiente colocar únicamente dos escobillas, aunque se puede elegir colocar las mismas escobillas que su número de polos, esto sucede ya que hay dos trayectorias para la corriente de manera paralela en el motor.

Reversibilidad

La única diferencia entre un motor DC y un generador DC es la forma de la utilización, ya que en esencia están constituidos de los mismos componentes. La reversibilidad de un motor quiere decir que, si se gira el rotor 180 grados, este producirá fuerza electromotriz en el devanado inducido y esta fuerza es capaz de transformarse en electricidad. Por otra parte, la reversibilidad en un generador es que mediante las delgas del colector se le aplique un voltaje continuo al devanado inducido, con el fin de que el generador sea capaz de transformar la fuerza contraelectromotriz en energía mecánica, lo que hace que funcione como lo haría un motor.

# Capítulo 5: Convertidores DC-DC

## 5: Interfaz del convertidor

A partir de este momento, se asumirá que la topología del convertidor será Buck-Boost, siendo la elegida para interconectar el banco de ultra capacitores con el motor de tracción del vehículo.

Para el modo de carga Buck, la configuración de medio puente tiene un ciclo de trabajo ( $d$ ), que concuerda con la relación de tensión de trabajo ( $\sigma$ ). Dicho de otra manera ( $d=\sigma$ ) durante la carga. Por otro lado, durante la descarga, el convertidor de medio puente trabaja en modo Boost con un ciclo de trabajo que va de 0 a 0.5. Lo que significa que a lo largo de la descarga (modo Boost) el ciclo de trabajo del convertidor se describe con la siguiente expresión ( $d = (1 - \sigma)$ ).

La Ilustración 25 enseña el cambio que tiene el ciclo de trabajo en respuesta a una secuencia de un impulso de descarga y una secuencia de impulso de carga a potencia constante.

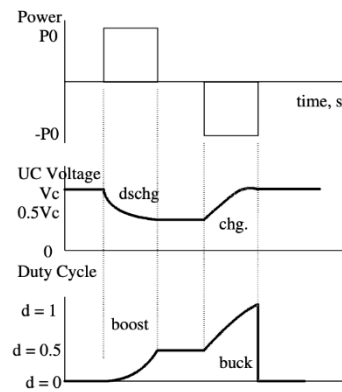


Ilustración 25: Respuesta del ciclo de trabajo del convertidor debido a la alternancia de la demanda de energía (Emadi, 2005).

La tabla que se muestra en la Ilustración 26 resume los atributos relevantes del convertidor DC-DC de la corriente del interruptor, la corriente del inductor y la corriente del diodo que se generan durante los modos de funcionamiento Boost y Buck.

Attribute	Boost Mode (Discharge)	Buck Mode (Charge)
Definition, UC voltage ratio, $\sigma$	$V_c = \sigma_d V_d$ Discharge mode: $\sigma_d = 1.0 \rightarrow 0.5$	$V_c = \sigma_c V_d$ Charge mode: $\sigma_c = 0.5 \rightarrow 1.0$
Definition, duty cycle, $d =$	$\left(1 - \frac{1}{\frac{V_{out}}{V_{in}}}\right)$	$\left(\frac{V_{out}}{V_{in}}\right)$
Duty cycle, $d =$	$(1 - \sigma_d)$	$\sigma_c$
Ripple current ratio, $r_L =$	$\left(\frac{\Delta I_L}{\langle I_L \rangle}\right)$	$\left(\frac{\Delta I_L}{\langle I_L \rangle}\right)$
Inductor ripple current, $\Delta I_L =$	$\frac{V_d}{f_s L} \sigma_d (1 - \sigma_d)$	$\frac{V_d}{f_s L} \sigma_c (1 - \sigma_c)$
Inductor average current, $\langle I_L \rangle =$	$\left(\frac{I_{dm}}{\sigma_d}\right)$	$\left(\frac{I_{dm}}{\sigma_c}\right)$
Inductor rms current, $I_{Lrms} =$	$\frac{I_{dm}}{\sigma_d} \sqrt{1 + \frac{r_L^2}{12}}$	$\frac{I_{dm}}{1 - \sigma_c} \sqrt{1 + \frac{r_L^2}{12}}$
Output capacitor pk-pk current, $I_{cpp} =$	$\frac{I_{dm}}{\sigma_d} \left(1 + \frac{r_L}{12}\right)$	$I_{dm} r_L$
Switch rms current, $I_{sw} =$	$\frac{I_{dm}}{\sigma_d} \sqrt{1 - \sigma_d} \sqrt{1 + \frac{r_L^2}{12}}$	$\frac{I_{dm}}{\sigma_c} \sqrt{\sigma_c} \sqrt{1 + \frac{r_L^2}{12}}$
Switch pk- current, $I_{swpk} =$	$\frac{I_{dm}}{\sigma_d} \left(1 + \frac{r_L^2}{12}\right)$	$\frac{I_{dm}}{\sigma_c} \left(1 + \frac{r_L^2}{12}\right)$
Diode rms current, $I_{dio} =$	$\frac{I_{dm}}{\sigma_d} \sqrt{\sigma_d} \sqrt{1 + \frac{r_L^2}{12}}$	$\frac{I_{dm}}{\sigma_c} \sqrt{1 - \sigma_c} \sqrt{1 + \frac{r_L^2}{12}}$

Ilustración 26: Atributos del convertidor DC/DC durante los modos Boost /Buck (Schupbach & Balda, 2003).

En la Ilustración 26 para el nivel de corriente de salida requerido en el convertidor ( $I_d$ ), las corrientes del convertidor muestran magnitudes que son proporcionales al ciclo de trabajo del interruptor ( $d$ ); esto ocurre al seguir la relación que hay entre la tensión ( $\sigma$ ) del ultra capacitor y los valores especificados para la corriente de rizado del inductor y la tensión de rizado del condensador de salida, estas dos últimas siendo restricciones de diseño. En el modo Boost, el condensador de salida es un condensador electrolítico local o en algunos casos el condensador de enlace de DC, y por otro lado en el modo Buck el ultra capacitor es el condensador de salida.

La Ilustración 27 enseña la correlación que hay entre la variación del ciclo de trabajo del interruptor activo del convertidor y la relación de tensión del ultra capacitor ( $\sigma$ ).

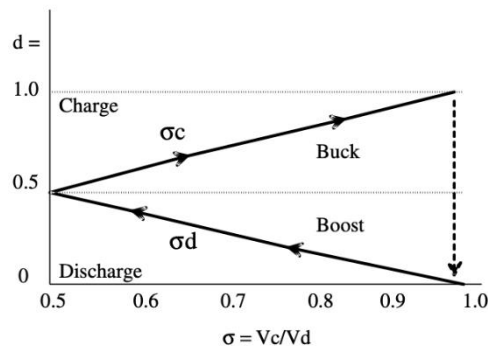


Ilustración 27: Variación del ciclo de trabajo del convertidor de interfaz de ultra capacitores con la relación de tensión (Emadi, 2005).

En el modo de descarga, es decir el modo Boost, la tensión del ultra capacitor se muestra disminuyendo desde la carga completa hasta la mitad de la tensión. En cambio, en el modo Buck (modo de carga) hay un aumento de la tensión desde la mitad de la tensión del bus hasta la tensión nominal del bus.

Como se vio en la lista de parámetros de la Ilustración 26: Atributos del convertidor DC/DC durante los modos Boost /Buck . la corriente de bus máxima ( $I_{dm}$ ) es un parámetro clave ya que es una restricción de diseño en el convertidor de interfaz. En el proceso de carga o descarga de energía al ultra capacitor, la corriente máxima del bus alcanzará ser la mitad de la corriente máxima del inductor. Existe una situación similar en el caso de la corriente de pico del condensador ( $I_{cpp}$ ).

Las corrientes de interruptor y de diodo son las relaciones necesarias para el cálculo de la eficiencia de carga y descarga del ultra capacitor con interfaz de convertidor, como se mostró en la Ilustración 26.

### 5.1: Importancia de la utilización convertidores DC-DC

Los reguladores de tensión lineales convierten un nivel de DC en otro más bajo a más alto según se requiera, logran hacer esto utilizando un circuito de transistores de paso en serie. El problema principal de este tipo de reguladores lineales es que su transistor de paso en serie normalmente funciona en la región lineal de sus curvas características, por lo que generalmente presenta una pérdida mayor comparándolo con un convertidor de conmutación.

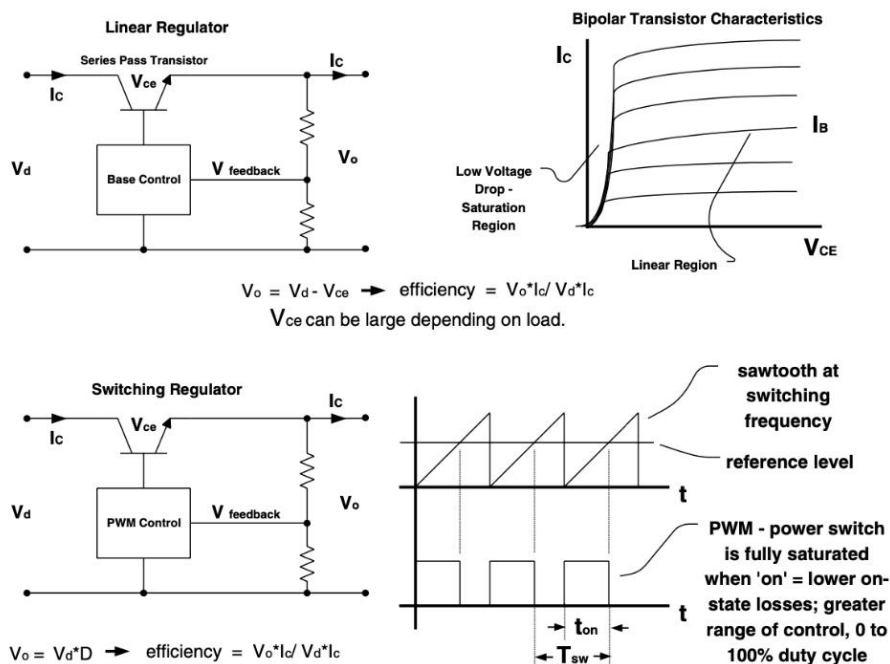


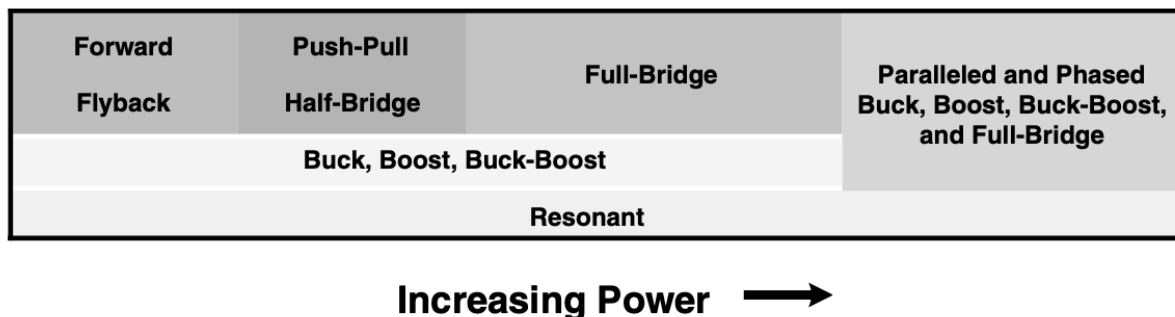
Ilustración 28: Regulador lineal comparado con el regulador de conmutación PWM (Emadi, 2005).

Como se muestra en la ilustración anterior, la efectividad en este sistema depende en gran medida del voltaje en el dispositivo de paso, en serie. Por otro lado, en los convertidores de conmutación, el semiconductor de potencia funciona de la siguiente manera, modo totalmente encendido o totalmente apagado, por lo cual en el estado de encendido trabaja en la región no lineal de baja caída de tensión, teniendo una menor pérdida de conducción (es decir  $V \times I$ ) a lo largo del dispositivo.

Como los PWM (modulación de anchura de impulsos) del interruptor de potencia se utilizan para controlar la potencia a través del convertidor DC-DC, su eficacia depende, en menor medida, de la diferencia de voltaje entre la entrada y la salida, lo que posibilita su funcionamiento con un rango de tensión de entrada más amplio y de mayores eficiencias.

Los convertidores DC-DC pueden tener un aislamiento galvánico desde la entrada a la salida en forma de un transformador o de igual manera pueden no estar aislados. El núcleo de los convertidores DC-DC es la conmutación de alta frecuencia de un dispositivo semiconductor de potencia utilizando PWM.

En los convertidores DC-DC de menor potencia es más común la conmutación de alta frecuencia, así como cuando se utilizan técnicas resonantes. El uso de esta conmutación permite reducir los voluminosos transformadores y componentes de filtrado (inductores y condensadores), reduciendo también de esta forma su costo y el coste de embalaje. Sus limitaciones son las pérdidas de conmutación en los dispositivos semiconductores de potencia y los límites de tamaño que deben tener los materiales del núcleo del transformador de alta frecuencia, que en este caso es de cerámica. De esta forma, se puede decir que una desventaja de esta conmutación es el mayor coste inicial de desarrollo de los componentes magnéticos de alta frecuencia, ya que tienen mayor tamaño y costo de transportación.



*Ilustración 29: Espectro de potencia general de las topologías de convertidores DC-DC (Emadi, 2005).*

El gráfico de la ilustración anterior enseña los tipos de convertidores que son utilizados a distintos niveles de potencia.

## 5.2: Conceptos básicos de un convertidor DC-DC

Un convertidor DC-DC es cualquier sistema de electrónica de potencia cuya finalidad es tomar como entrada una potencia en DC de una fuente con voltios-amperios determinados y crear como salida una potencia de DC con voltios-amperios de una característica específica. Las características de voltios-amperios que un convertidor puede tener pueden ser tan simples como voltajes y corrientes máximas y mínimas, como también pueden ser más complejas, como curvas características que pueden depender de otros parámetros externos, como pueden ser los requisitos de control de la corriente, las características de salida de la energía fotovoltaica (de paneles solares) o de las baterías de combustible.

Entre algunos de los requisitos que los convertidores pueden incluir, son especificaciones de impedancia de entrada y salida para adaptarse mejor a los filtros, así como regulación de tensión, rangos de temperatura de funcionamiento, requisitos relativos a la vibración, las cargas de funcionamiento y también sus fuentes, por otro lado, su eficiencia, peso, volumen, durabilidad, fiabilidad, protección y coste entran también dentro de sus normas aplicables.

Generalmente, el primer paso para el desarrollo o la adquisición de un convertidor DC-DC es tener una lista de especificaciones que engloban cada una de las áreas recién mencionadas

en detalle, esto utilizando las normas técnicas de la IEEE, UL, SAE, NEC, ANSI y CENELEC como fuentes de referencia. En el caso de los vehículos comerciales, los aspectos más importantes para esta rama son la durabilidad, la fiabilidad y el coste. Esto debido a que pueden estar expuestos a entornos difíciles, por lo que se requiere prestar especial atención a las consideraciones térmicas y de vibración en el diseño y el embalaje, además de esto normalmente los compartimentos del motor, y otras partes de un auto, tienden a estar expuestas a mucho calor o frío en ciertos lugares debido a su clima.

Las aplicaciones más comunes de los convertidores DC-DC suelen ser para alimentar otros circuitos, por ejemplo: para carga de baterías, calentadores, soldadores. Otro uso común es utilizarlos como convertidores ascendentes, que transfieren su energía de un bus de voltaje DC más bajo a un bus de voltaje DC mayor y de manera inversa utilizarlos como convertidores descendentes, estos transfieren su energía de un bus de tensión DC más alto a un bus de tensión DC menor. Otra aplicación muy común, y como es el caso en este trabajo, los convertidores DC-DC se utilizan en accionamientos de motores de DC. En algunos casos, este tipo de convertidores se combinan con otro tipo de convertidores de potencia, como lo son los rectificadores e inversores, esto con el fin de formar convertidores de potencia más complejos, como los convertidores DC-AC y AC-DC.

### *5.3: Tipos de convertidores DC-DC*

Existen una amplia variedad de tipos de convertidores DC-DC, como los de tipo Boost (step-up), Buck (step-down), Buck-Boost (step-up o -down), Flyback, Sepic, Cúk, los impulsados por inversores: Half-bridge, Full-bridge, Push-Pull y por último los tipos resonantes.

Para aplicaciones que necesitan una conversión DC-DC para sus niveles de potencia más elevados, es necesario utilizar unidades de convertidores DC-DC en paralelo, que funcionan con un escalonamiento que necesita que los pulsos de conmutación de cada una de las unidades estén escalonados a 360 grados; de esta manera se logra que en el convertidor combinado haya una ondulación de corriente de mayor frecuencia, lo cual reduce los requisitos de filtrado y aumenta las piezas similares utilizadas, lo que tiene como consecuencia la reducción de costos. Por otro lado, para sistemas de mayor potencia se suelen utilizar sistemas de inversor-rectificador o sistemas DC-AC/AC-DC de dos etapas con un transformador elevador o reductor para producir la conversión DC-DC.

Es necesario explicar que el funcionamiento en corriente continua significa que la corriente del inductor, en el convertidor, nunca permanece en corriente cero y es continua. La corriente en el inductor sólo llegará a cero en el pico más bajo de la forma de onda de la corriente una vez en cada ciclo, es decir en el límite de la conducción continua y discontinua.

Suele evitarse el modo de funcionamiento discontinuo debido a las desventajas que conlleva, entre las que están: menor rendimiento de potencia, corrientes de pico más altas, mayor dificultad en el desarrollo del control y mayor dificultad computacional en el análisis de este modo. A la vez, los requisitos de filtrado también son mayores para este modo, ya que hay mayores requisitos de pico para el mismo rendimiento en un sistema similar con funcionamiento en modo de corriente continua.

Se le denomina parásitos a las resistencias, capacitancias e inductancias adicionales asociadas a los componentes electrónicos, como lo puede ser la resistencia en serie equivalente (ESR) de un condensador, o la resistencia en serie de un inductor. La mayor parte del efecto de los parásitos puede eliminarse o reducirse con métodos de control adecuados, así como los convertidores pueden seguir funcionando con parásitos.

## 5.4: Puntos comunes de los convertidores Buck, Boost y Buck-Boost

Los convertidores DC-DC Boost, Buck y Buck-Boost cuentan con un interruptor de potencia, un diodo y un inductor, también suelen ir acompañados de un condensador, que sirve como filtro de salida, y de un filtro de entrada. Los componentes pueden variar ligeramente su disposición de una topología a otra, sin embargo, enseguida se presentarán algunas de sus similitudes.

En las siguientes explicaciones, y cómo se enseña en la Ilustración 30, Ilustración 31 e Ilustración 32, la tensión de entrada del convertidor es denominada ( $V_d$ ), ( $\Delta I$ ) se refiere a la variación de pico a pico de la corriente del inductor, ( $V_O$ ) por su parte es la tensión de salida del convertidor, ( $t_{on}$ ) se utiliza para el tiempo de duración del interruptor de potencia en un ciclo de conmutación y ( $L$ ) es utilizado para la inductancia.

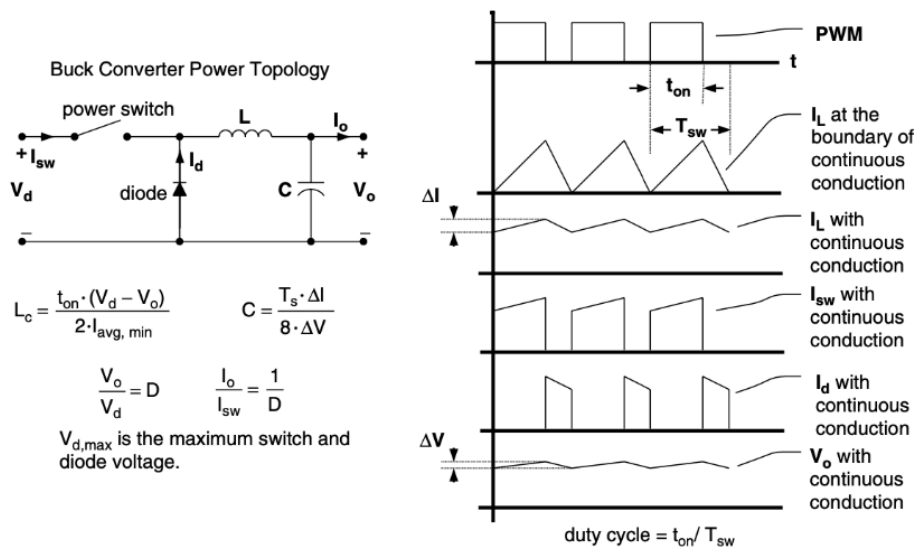


Ilustración 30: Topología y formas de onda del convertidor Buck (Emadi, 2005).

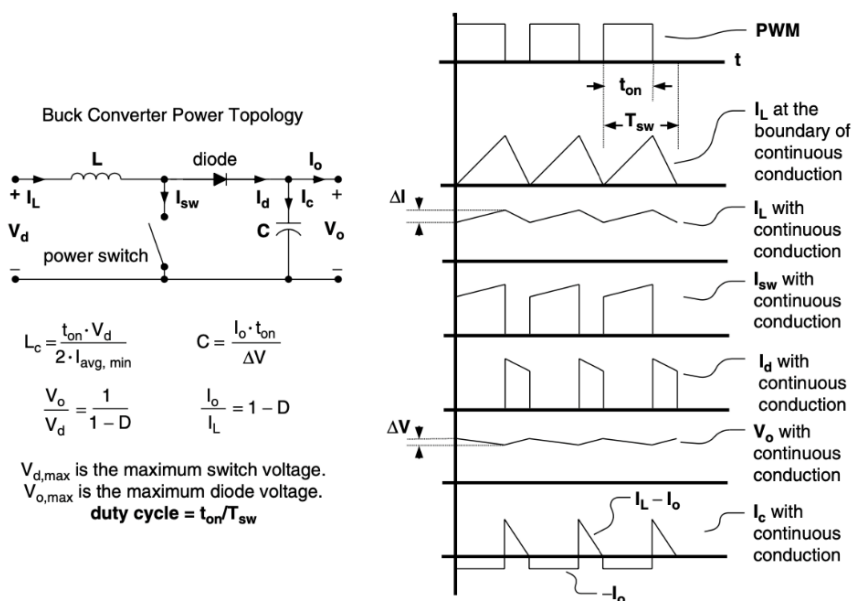


Ilustración 31: Topología y formas de onda del convertidor Boost (Emadi, 2005).

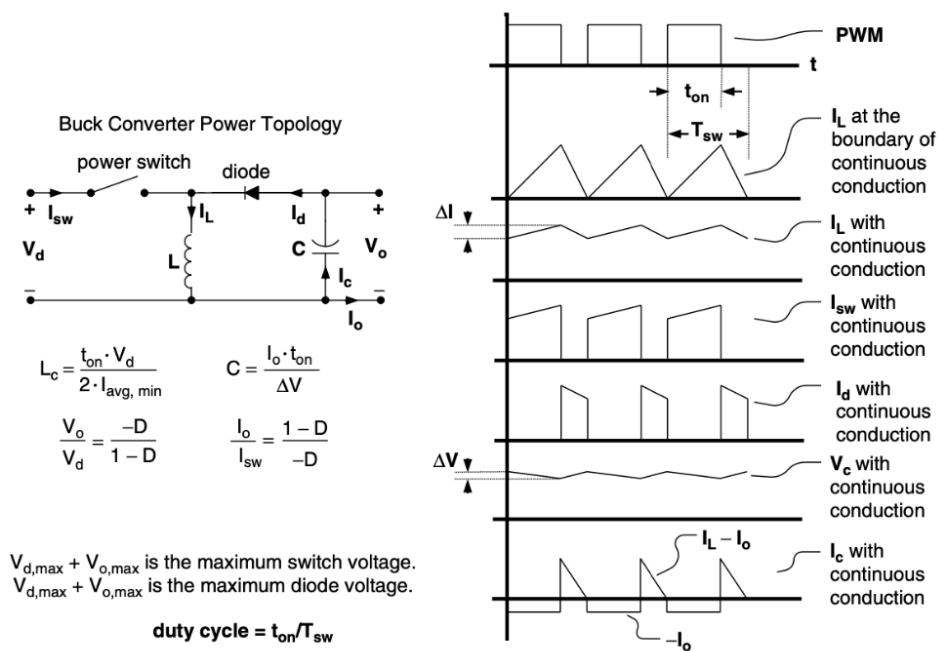


Ilustración 32: Topología y formas de onda del convertidor Buck-Boost (Emadi, 2005).

En el Boost, Buck y Buck-Boost, la tensión a través del inductor ( $V_d - V_o$ ) en el Buck, ( $V_d$ ) en el Boost y Buck-Boost hace que la velocidad de subida de la corriente del inductor y la magnitud de ( $\Delta I$ ) en el inductor varíen, ya que dependen de esta. Lo cual hace que la variación de la corriente de rizado en el inductor ( $\Delta I$ ) se pueda expresar mediante la siguiente ecuación para el caso Buck:

$$\Delta I = \frac{V_d - V_o}{L} t_{on} \quad (36)$$

$\Delta I$  varía en función de la tensión en el inductor, la inductancia del circuito y el ciclo de trabajo de la conmutación para los casos del Buck, Boost y Buck-Boost, la siguiente fórmula muestra como se define  $\Delta I$  en el caso Boost y Buck-Boost:

$$\Delta I = \frac{V_d}{L} t_{on} \quad (37)$$

Durante el modo de funcionamiento de corriente continua en un punto estable para los tres convertidores ocurre que el interruptor se prende en cada ciclo y asume de inmediato el funcionamiento al mismo nivel de corriente con el cual comenzó en el ciclo anterior ( $I_1$ ). Como se observó en las ilustraciones 30, 31 y 32.

Después, la corriente aumenta a la vez que el inductor se carga hasta una corriente denominada ( $I_2$ ), como se dijo anteriormente; al llegar este momento el interruptor se apaga, y una vez que el interruptor se apaga, es el diodo el que asume el nivel de corriente ( $I_2$ ) y en consecuencia disminuye el campo del inductor hasta alcanzar el nivel ( $I_1$ ), es en este instante donde comienza de nuevo un ciclo.

Se escoge un nivel de corriente promedio mínimo necesario para la salida del convertidor, esto con el fin de asegurar el funcionamiento en corriente continua, esta corresponde a la corriente media mínima del inductor ( $I_{avg,min}$ ).

Como se observa en las ilustraciones 30, 31 y 32 cuando se está en el límite de la conducción continua ( $I_{avg,min} = 0,5 \Delta I$ ). Durante el intervalo de encendido o  $t_{on}$ , la ecuación se define de la siguiente manera para el Buck:

$$L \frac{\Delta I}{t_{on}} = V_d - V_o \quad (38)$$

En el Boost y Buck-Boost es de la siguiente forma:

$$L \frac{\Delta I}{t_{on}} = V_d \quad (39)$$

Finalmente, la fórmula se manipula sustituyendo por  $\Delta I$  de la siguiente forma para el Buck:

$$L_c = \frac{t_{on} * (V_d - V_o)}{2 * I_{avg,min}} \quad (40)$$

Y para el Boost y Buck-Boost es de la siguiente manera:

$$L_c = \frac{t_{on} * V_d}{2 * I_{avg,min}} \quad (41)$$

En el Boost, Buck y Buck-Boost, la inductancia crítica es la inductancia mínima requerida para generar una conducción continua con una carga tal que la corriente en el inductor sea igual o mayor que ( $I_{avg,min}$ ). En el Boost, la relación es dada de la siguiente manera ( $1 / (1 - D)$ ), la relación ( $V_o / V_d$ ) del Buck es ( $D$ ) y en el Buck-Boost es ( $-D / (1 - D)$ ) en donde ( $D$ ) se define como ( $t_{on} / T_{sw}$ ), de modo que ( $T_{sw}$ ) es el periodo de conmutación.

Para establecer la inductancia crítica, se debe elegir un punto de funcionamiento que esté dentro del rango de tensiones de entrada y salida, en el que se consuma la mínima corriente del inductor. Usualmente, se necesita una carga mínima para que se cree una conducción continua. Como ( $I_{avg,min}$ ) es la corriente media mínima del inductor, la tensión de entrada y ( $D$ ) se pueden saber para esta condición, se puede establecer ( $L_c$ ). Normalmente, se utiliza un valor de 2 a 10 veces ( $L_c$ ) mayor a la inductancia, lo que causa que se reduzca la corriente de rizado en el inductor y a la vez la corriente de entrada.

Una consideración más que se tiene que tener en esta decisión es la pendiente de la parte de rampa de la forma de onda de la corriente en el inductor. Si la pendiente no es lo suficientemente grande, la retroalimentación de corriente de control es más propensa al ruido dentro del circuito. Por otro lado, si la pendiente es demasiado grande, los picos de la corriente serán más altos para generar la potencia de salida deseada. Entre más altos sean los picos, las pérdidas en los componentes de potencia del circuito serán mayores, es decir, será mayor la pérdida en interruptores, capacitores, diodos e inductores. Por el contrario, entre mayor sea el valor de la inductancia para la misma corriente media, más caro y voluminoso será el inductor.

$$I = C \frac{dV}{dt} \quad (42)$$

Para determinar la capacidad del filtro de salida se tiene en cuenta la ondulación de la tensión de salida, conociendo que para el Buck ( $Q = VC$ ) en el condensador y que  $I (\Delta t = \Delta Q)$  se define la siguiente ecuación:

$$\Delta Q = \frac{1}{2} * \frac{T_{sw}}{2} * \frac{\Delta I}{2} = C * \Delta V \Rightarrow C = \frac{T_{sw} * \Delta I}{8 * \Delta V} \quad (43)$$

Para el Boost y Buck-Boost, la carga requerida se define como el área entre la corriente media del inductor y la forma de onda de la corriente del inductor para el Buck, así como el área entre la corriente media de salida y la corriente del diodo en el Boost y Buck-Boost.

$$\Delta Q = I_o * t_{on} = C * \Delta V \Rightarrow C = \frac{I_o * t_{on}}{\Delta V} \quad (44)$$

Ambas áreas, la que está por encima y por debajo de la media, deben ser iguales y son la carga que tiene que ser almacenada y devuelta hacia el condensador de salida y desde este. Se necesitan estos valores de capacitancia para el requisito de ondulación de tensión necesaria de ( $\Delta V$ ) con una ondulación de corriente pico a pico de ( $\Delta I$ ) para el caso del Buck y para una corriente de salida media de ( $I_o$ ) en el caso del Boost y del Buck-Boost. Esta es la capacitancia mínima requerida.

Para manejar la corriente de rizado del Buck se debe elegir el valor real de la capacitancia, de otra manera para el Boost y Buck-Boost se debe elegir la corriente de salida para poder cumplir las demás especificaciones del convertidor.

Las corrientes máximas en el diodo, interruptor y el inductor se generan a plena carga y sus formas de onda son de la siguiente forma: en el interruptor y el diodo son trapezoidales y las del inductor son triangulares con un componente de DC.

## 5.5: Convertidor Buck-Boost

Las ecuaciones asociadas, y las formas de onda de este tipo de convertidor, fueron mostradas en la Ilustración 32. El convertidor Buck-Boost tiene la capacidad de proporcionar una disminución o un aumento del voltaje de entrada a la salida en función del ciclo de trabajo en el que esté trabajando.

Como se aprecia en la Ilustración 32, el convertidor Buck-Boost genera una tensión de salida de polaridad negativa. El interruptor de potencia en estos convertidores está totalmente encendido al estar en el intervalo de encendido, esto hace que se cargue el campo inductor, ya que la corriente fluye a través del inductor y el interruptor. A la vez, el capacitor de salida suministra corriente a la carga durante este intervalo.

En el intervalo de apagado, el interruptor se encuentra totalmente apagado lo cual hace que el campo inductor se colapse. La corriente del inductor fluye hacia el condensador de filtro de salida y hacia la carga a través del diodo, ya que este proporciona el camino que la corriente tiene que seguir.

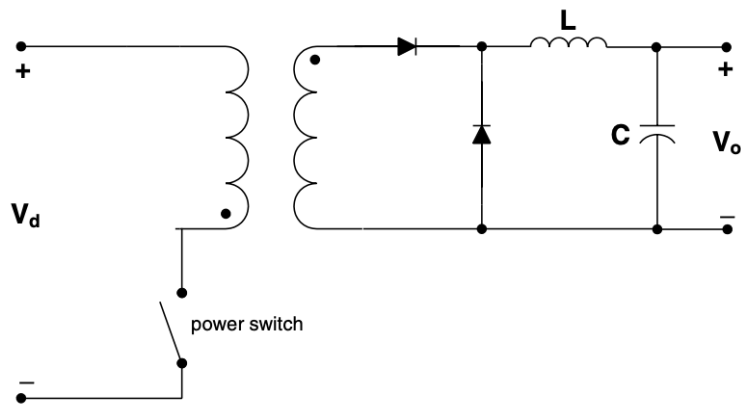


Ilustración 33: Topología del convertidor Flyback (Emadi, 2005).

Hay que tener en consideración que el convertidor actúa como un Buck si ( $0 < D < 0,5$ ), lo que hace que ( $V_o < V_d$ ) y actúa como en una operación Boost si ( $0,5 < D < 1$ ) lo que tiene como consecuencia que ( $V_o \geq V_d$ ). La relación de corriente para los convertidores Buck-Boost se describe mediante la siguiente expresión:

$$\frac{I_o}{I_{SW}} = \frac{1 - D}{D} \quad (45)$$

A partir de esta expresión, se puede deducir que la corriente de entrada puede ser mayor o menor que la de salida. La necesidad de voltaje del interruptor de potencia en el convertidor Buck-Boost es igual al potencial máximo que pasa a través de él cuando se encuentra apagado, esto se expresa de la siguiente manera ( $V_d$ , máx. +  $V_o$ , máx.). El valor nominal del voltaje inverso máximo soportado por el diodo es igual a ( $V_d$ , máx. +  $V_o$ , máx.), esto es requerido cuando el interruptor está prendido.

A los convertidores Buck-Boost con el transformador aislado se les conoce como Flyback. En este tipo de convertidores se utiliza la inductancia magnetizante del transformador como inductor. La inductancia magnetizante se carga cuando el interruptor este encendido, al mismo tiempo el flujo de la corriente es bloqueado por el diodo en el secundario. De otra manera, cuando el interruptor está apagado el campo se colapsa, el voltaje que pasa a través de la inductancia se invierte y la corriente fluye en el secundario por medio del diodo llegando hasta la carga y el filtro de salida.

Ya que los convertidores Flyback solo utilizan el primer cuadrante de la curva de histéresis, debido al material del núcleo de su transformador, suelen utilizarse sólo a baja potencia. Las corrientes de pico tienden a ser mayores en el Flyback para la misma potencia nominal que en otro tipo de convertidores aislados, ya que estos utilizan la conmutación bipolar, a la vez los convertidores Flyback suelen tener una compensación en el tamaño del transformador y en la inductancia magnetizante.

## 5.6: Cálculos de pérdidas

Las pérdidas más comunes en el circuito de potencia son las pérdidas en la conmutación y en la conducción en el interruptor de potencia; también hay pérdidas de conducción en el diodo y por último hay que tomar en cuenta las pérdidas en el inductor, en el filtro de entrada y en el capacitor.

En el diseño de estos convertidores es normal inductancia parásita. Esto tiene como consecuencia picos de sobretensión al apagar los interruptores de potencia. Normalmente,

para evitar problemas, los valores nominales de voltaje de los dispositivos deben ser mayores que el valor teórico requerido. En general, se utiliza dos veces el voltaje más alto del circuito.

### ***5.7: Simulación vs. métodos analíticos***

Las simulaciones ofrecen al usuario una forma sencilla y rápida de determinar las corrientes medias, de pico y eficaces en los dispositivos de potencia, como lo son los inductores, capacitores, semiconductores y transformadores.

Simular los convertidores DC-DC, en uno de los paquetes de simulación disponibles como PSIM, proporciona valiosa información acerca del funcionamiento del circuito, que de otra manera siendo analizados de forma analítica serían más difíciles de obtener, como los cálculos de las corrientes eficaces que, al realizarlos de forma manual, requieren utilizar más herramientas matemáticas como lo son el álgebra y la integración, lo cual conlleva una mayor dificultad. Los cálculos de las formas de onda compuestas, como las corrientes de los capacitores, son aún más complicados de hacer; es debido a esto, que se suelen utilizar las simulaciones que permiten conocer los niveles de la forma de onda global, así como su contenido armónico, lo que tiene como consecuencia obtener cálculos más detallados de las pérdidas y de la vida útil de los convertidores.

# Capítulo 6: Simulación del frenado regenerativo utilizando ultra capacitores en PSIM

## 6: Introducción a la simulación

El objetivo de esta simulación es probar el funcionamiento y eficiencia que tiene un banco de ultra capacitores en un vehículo eléctrico para absorber y descargar energía durante el ciclo de manejo determinado, así como saber cuáles son sus capacidades o limitaciones de generar energía eléctrica a partir de la energía mecánica provocada por el frenado del vehículo, todo esto en un contexto de un ciclo de manejo en carretera a altas velocidades, ya que es a altas velocidades donde el frenado regenerativo es más efectivo. Para poder realizar este objetivo se utilizó el programa PSIM que es capaz de realizar simulaciones con un alto grado de confiabilidad y exactitud.

Como se verá más adelante, se pretende ver cómo afecta la carga y descarga de los ultra capacitores en la aceleración y desaceleración del vehículo, esto con el fin de ver si en verdad el banco de ultra capacitores está ayudando al carro a frenar, al absorber energía, y si al descargar su flujo de energía de regreso lo ayuda a acelerar.

En los siguientes temas se irá explicando paso a paso el funcionamiento de cada uno de los circuitos y subcircuitos del sistema, así como la simbología que fue utilizada para realizar esta simulación en el programa PSIM, a su vez se mostrarán los parámetros utilizados para realizar la simulación, así como de donde se obtuvieron. Por último, se mostrarán los resultados obtenidos a partir de esta simulación y se llegará a una conclusión de si esta simulación fue satisfactoria o no para probar lo que se pretendía en un inicio.

### 6.1: Parámetros y simbología







Los parámetros utilizados en la simulación son los datos del modelo Nissan *Leaf* SV 2017, estos parámetros fueron reunidos de los datos proporcionados por Nissan y, además de esto, por empresas que realizaron pruebas del rendimiento de este automóvil:








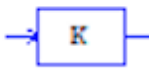

Símbolo	Valor	Descripción
Af	2.28 m <sup>2</sup>	Área frontal del vehículo
m	1536 kg	Masa del vehículo
g	9.81 m/s <sup>2</sup>	Gravedad
Cd	0.28	Coefficiente de resistencia aerodinámica
Fr	0.012	Coefficiente de resistencia de rodadura
Rd	0.3 m	Radio efectivo de la rueda
$\rho$	1.225 kg/m <sup>3</sup>	Densidad del aire
Nt	0.97	Eficiencia que tiene el vehículo desde el motor hasta el eje impulsor

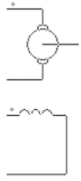
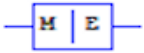
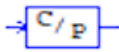

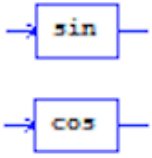

Ig	1	Razón de los engranajes de la transmisión
Io	8.1938	Razón de engranes del impulsor final
rpm máx	10500 rpm	rpm máximos del motor
rpm nom	3000 rpm	rpm nominal del motor
Vm	300 v	Voltaje del motor
Pm	80 kW	Potencia del motor
Tm	254 Nm	Torque del motor
0-100 km/h	11.5s	Tiempo de 0 a 100 km/h
Vm	145 km/h	Velocidad máxima

Tabla 3: Parámetros del Nissan Leaf.

Simbología utilizada en la simulación de PSIM:

Nombre	Función	Símbolo
Sonda de voltaje	La sonda de voltaje o <i>Voltage Probe</i> (VP), mide la tensión eléctrica de un nodo con respecto a tierra.	
Sonda de corriente	Este tipo de sonda mide la corriente a través de esta.	
Sensor de tensión o voltaje	Los sensores de tensión miden como su nombre indica la tensión dentro de un circuito de potencia y envían dicho valor al circuito de control.	
Sensor de corriente	Los sensores de corriente miden como su nombre indica la corriente dentro de un circuito de potencia y envían dicho valor al circuito de control.	
Archivo de parámetros	Se utiliza para almacenar el valor de los parámetros de los componentes que son utilizados en la simulación, que no tienen declarados sus valores y a la vez ajusta sus límites. Para su mayor comprensión, por ejemplo, la resistencia de un resistor, puede especificarse como R1 en la simulación, y el valor de R1 se define en el archivo de parámetros.	
VDC	PSIM maneja diversos tipos de fuentes de voltaje o corriente independientes. En este caso es una fuente de voltaje. Un lado del voltaje continuo está siempre conectado a tierra	

IDC	Este símbolo hace referencia a una fuente de corriente continua, estas siempre tienen una amplitud constante.	
Tierra	Dentro de la biblioteca de PSIM hay tres tipos de tierra diferentes. Aunque tienen formas diferentes, están conectados eléctricamente entre sí. Tienen imágenes diferentes, pero las funciones son exactamente las mismas; la forma diferente de estas conexiones a tierra permite al usuario separar la conexión a tierra en diferentes secciones funcionales dentro de los circuitos.	
Fuente lineal por partes (en par)	En este tipo de fuentes, la forma de onda se crea a partir de muchos segmentos lineales. Se define por medio del número de puntos, los valores y el tiempo correspondiente en segundos.	
Sumador 2 entradas (+/-)	Este símbolo suma o resta dos entradas. En los sumadores de una y dos entradas, su entrada puede ser un valor escalar o un vector.	
Sumador 3 entradas (+/-)	Este símbolo suma o resta tres entradas. En el caso de un sumador de tres entradas, la entrada sólo puede ser un escalar. A su vez, en los sumadores de tres entradas, la entrada con un punto es la primera entrada.	
Multiplicador	Los multiplicadores cuentan con dos señales de entrada, y su salida es la multiplicación de estos valores. La entrada de un multiplicador puede ser un valor escalar o un vector. En el caso de que las dos entradas sean vectores, sus dimensiones deben ser iguales.	
Constante	Permite a los usuarios definir una constante. Actúa como una fuente de voltaje conectada a tierra.	
Proporcional	El símbolo es un Controlador proporcional. La entrada que tiene el controlador multiplicada por una ganancia es igual a la salida del controlador proporcional.	
Fuentes controladas por tensión	La salida de una fuente controlada es igual a la ganancia multiplicada por la tensión o corriente de control, a excepción de las fuentes controladas de ganancia variable. En las fuentes controladas por voltaje o tensión, el voltaje de control se dirige del nodo positivo al nodo negativo.	

Máquina de DC	PSIM cuenta con el módulo de accionamiento del motor que proporciona modelos de máquinas y modelos de carga mecánica para estudios de accionamiento de motores.	
Interfaz mecánica-eléctrica	Cuando utilizamos PSIM, los circuitos equivalentes mecánicos para motores y cargas mecánicas usan un modelo de circuito basado en condensadores. Este bloque proporciona el acceso al circuito equivalente mecánico interno. Si el lado mecánico de un bloque de interfaz representado con la letra "M" está conectado a un eje mecánico, el lado eléctrico representado con la letra "E" será el nodo de velocidad del circuito equivalente mecánico. Por lo cual, se podrá conectar cualquier circuito eléctrico a este nodo.	
Interfaz de control a potencia	Este bloque pasa un valor del circuito de control al circuito de potencia. Es utilizado como amortiguador entre el circuito de control y el circuito de potencia. La salida del bloque se maneja como una fuente de tensión constante cuando el circuito de potencia se está resolviendo. Gracias a este bloque, algunas de las funciones que sólo pueden generarse en el circuito de control pueden generarse a la vez en el circuito de potencia.	
Condensadores o capacitores	PSIM proporciona tanto resistencias individuales, como inductores y condensadores. En nuestro caso solo se utilizaron capacitores. Se pueden definir o declarar las condiciones iniciales, tanto de las corrientes de los inductores, como las tensiones de los condensadores. Las tensiones iniciales de todos los condensadores de las ramas trifásicas son todas nulas.	
Seno y Coseno	En PSIM se proporcionan cuatro funciones trigonométricas: seno (sin), coseno (cos), arco coseno y arco tangente. Para los bloques sin y cos, la entrada está en grados y la salida es igual a la función trigonométrica correspondiente de la entrada.	
Control de la simulación	El paso de tiempo en una simulación en PSIM es fijo durante toda esta, para que los resultados de tu simulación sean precisos se debe elegir un tiempo adecuado para esta; los factores que limitan el paso del tiempo en una simulación de circuito son el periodo, la anchura, pulsos y forma de la onda y por último los intervalos transitorios. Se recomienda que el tiempo sea de menor magnitud que los factores mencionados anteriormente.	


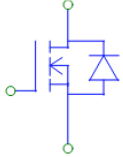
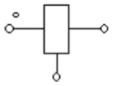
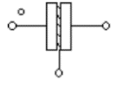


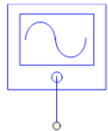

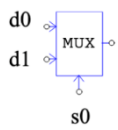
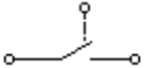
Etiqueta	<p>El menú Etiqueta tiene las siguientes funciones:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Texto: Coloca el texto en la pantalla.</li> <li>• Línea: Dibuja una línea.</li> <li>• Línea punteada: Dibuja una línea punteada.</li> <li>• Flecha: Dibuja una línea con una flecha.</li> </ul>	
MOSFET ideal	Es un interruptor activo que cuenta con un diodo antiparalelo. Se enciende cuando la señal de activación tiene un valor lógico alto (es decir con el valor de un 1 V o superior). El MOSFET se apaga en el momento en que el valor de la señal de puerta es bajo o la corriente es cero.	
Sensor de velocidad	Se utiliza para medir la velocidad.	
Sensor de par	Se usa para medir el par.	
Ultra capacitores	Son dispositivos de almacenamiento de energía eléctrica que cuentan con un gran número de ciclos de carga y descarga y una alta densidad de potencia.	
Controlador de encendido y apagado	Estos dispositivos son usados como interfaz entre una señal de control y un interruptor de alimentación. Su función es transmitir la entrada al circuito de potencia como señal de activación (la entrada es una señal lógica (es decir 0 ó 1) en el circuito de control).	
Osciloscopio de un canal	Estos dispositivos permiten ver las formas de onda de la simulación en plena simulación, mientras esta se ejecuta, al contrario de las sondas de voltaje y corriente que se tiene que correr la simulación.	
Fuente de voltaje de onda cuadrada	Este tipo de fuentes se definen por su ciclo de trabajo, su amplitud pico a pico, su desplazamiento de DC y su frecuencia. El ciclo de trabajo es la relación entre el periodo y el intervalo de alto potencial.	
Multiplexor de dos entradas	En un multiplexor la salida es igual a una entrada seleccionada en función de una señal de control. Para el multiplexor utilizado en este trabajo, este cuenta con dos entradas y una señal de control.	
Interruptor bidireccional de una fase	Los interruptores bidireccionales conducen la corriente hacia las dos direcciones.	

Tabla 4: Simbología utilizada en la simulación de PSIM.

Para toda la información de la tabla anterior se tuvo como referencia el manual de usuario oficial de Powersim Tech.

## 6.2: Explicación del sistema

Sistema completo:

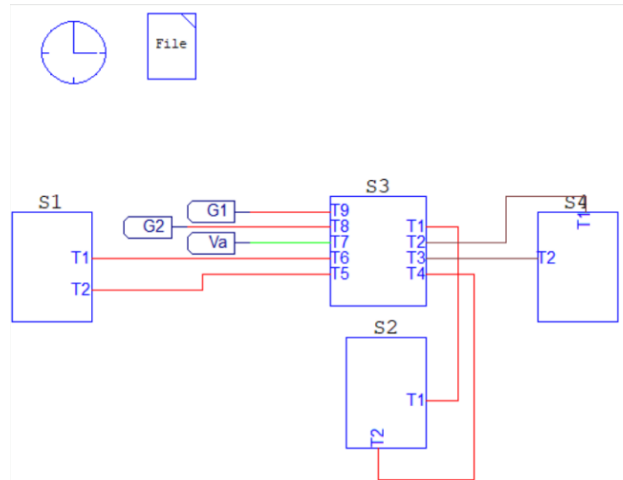


Ilustración 34: Sistema completo de la simulación.

Descripción:

En la ilustración anterior se muestra el circuito principal de la simulación, en el cual se pueden observar sus subsistemas, siendo S1 el subsistema del banco de ultra capacitores, S2 el subsistema de la fuente de la batería, S3 el subsistema del accionamiento de la simulación y por último S4 el subsistema de la dinámica del vehículo; cada uno de estos subsistemas será explicado a continuación en sus respectivos temas para tener una mayor comprensión sobre estos. A la vez que en este circuito principal se encuentran los subsistemas, también se encuentran "File" y "Simulation Control" que se explicarán con las siguientes ilustraciones.

En la Tabla 5, se describen los parámetros que se introdujeron en el "File" de la simulación de este trabajo:

Símbolo	Valor	Descripción
lg	1	Razón de los engranajes de la transmisión
lo	8.1938	Razón de engranes del impulsor final
nt	0.97	Eficiencia que tiene el vehículo desde el motor hasta el eje impulsor
rd	0.3 m	Radio efectivo de la rueda
m	1536 kg	Masa del vehículo
fr	0.012	Coeficiente de resistencia de rodadura
$\rho$ (rho)	$1.225 \text{ kg/m}^3$	Densidad del aire
Cd	0.28	Coeficiente de resistencia aerodinámica
Af	$2.28 \text{ m}^2$	Área frontal del vehículo
g	$9.81 \text{ m/s}^2$	Gravedad

$\theta$ (Theta)	0	Angulo de inclinación del camino
Vw	0	Velocidad máxima

Tabla 5: Parámetros de la simulación (File).

En esta ilustración, se observan los parámetros del vehículo ya dentro de la simulación en PSIM; estos parámetros son los recientemente mencionados en la tabla anterior,  $i_g$  es igual a 1 debido a que es una transmisión directa,  $\rho$  (rho) hace referencia a la densidad del aire,  $\theta$  (theta) es el ángulo de la pendiente que es 0 pero esto es debido a que es modificado en el *piecewise* linear en esta simulación.

Para esta simulación, se usó el peso en vacío del carro llamado *kerb weight*, que es el peso del vehículo, el depósito lleno de combustible y todo el equipamiento de serie. Este peso no incluye el peso de los pasajeros, la carga que pueda tener el carro o el equipamiento adicional que pueda tener, se considera el peso más cercano al peso real con el que cuenta el vehículo.

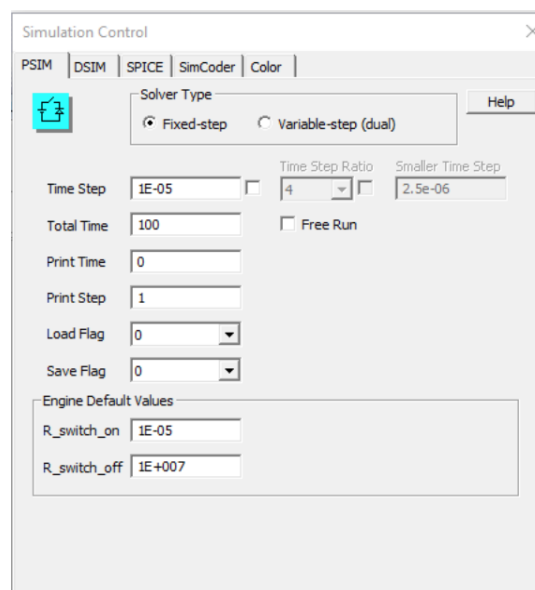


Ilustración 35: Parámetros del control de simulación.

En esta ilustración se observan los parámetros del control de simulación que es el encargado de determinar el tiempo que dura la simulación, que en este caso es de 100 segundos.

Por último, se explicarán las conexiones entre cada subcircuito en este sistema, esto siendo que la terminal 1 del subcircuito del banco de ultra capacitores se conecta a la terminal 6 del subcircuito de accionamiento, la terminal 2 del subcircuito del banco de ultra capacitores se conecta a la terminal 5 del subcircuito de accionamiento.

La terminal 1 del subcircuito de la fuente de la batería se conecta a la terminal 1 del subcircuito de accionamiento, y la terminal 2 del subcircuito de la fuente de la batería se conecta a la terminal 4 del subcircuito de accionamiento, por último, la terminal 3 del subcircuito de accionamiento se conecta a la terminal 2 del subcircuito del modelo dinámico, y la terminal 2 del subcircuito de accionamiento se conecta a la terminal 1 del subcircuito del modelo dinámico.

Cabe destacar que G1, G2 y Va, que se encuentran conectadas a las terminales 9, 8 y 7 del circuito de accionamiento, hacen que se mantengan los valores que se le otorgan a estas variables dentro de este subcircuito.

Accionamiento de la simulación:

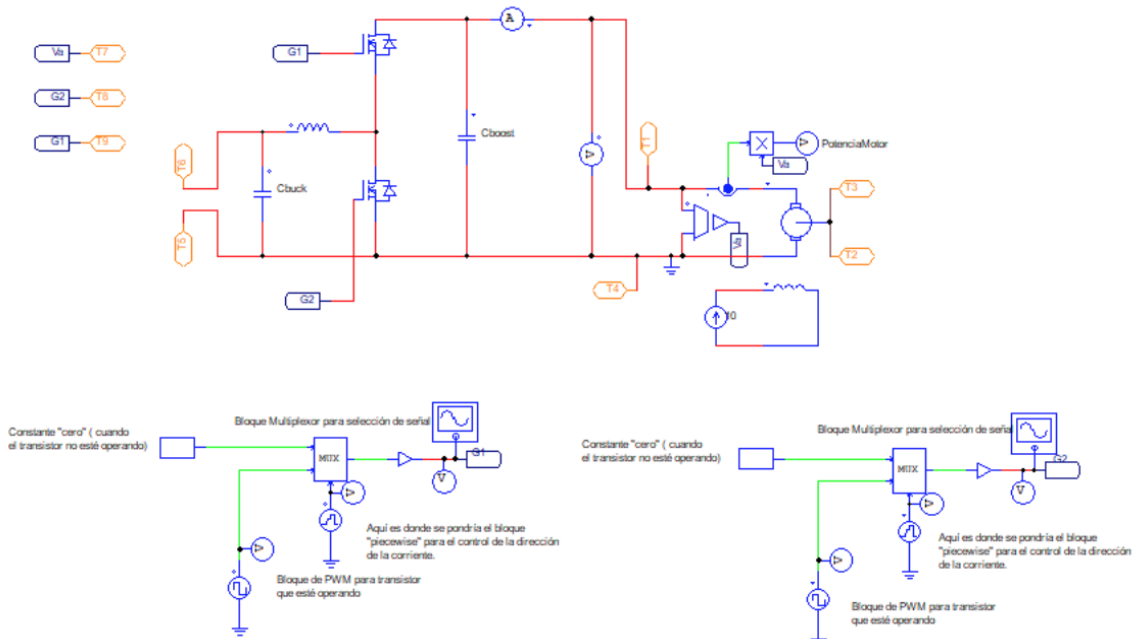


Ilustración 36: Subcircuito de accionamiento.

Descripción:

Esta parte de la simulación es el subcircuito de accionamiento, en el cual se encuentran partes que son indispensables para que la simulación funcione de manera adecuada, como lo son el convertidor DC-DC Buck-Boost y el motor DC; esta parte del circuito, como su nombre lo indica, se encarga de accionar o dicho de otra manera iniciar el sistema.

El convertidor DC-DC sirve para regular el voltaje que alimenta al banco de ultra capacitores en el modo de carga y para regular el voltaje que sale de los ultra capacitores hacia el motor en el modo de descarga; las terminales T5 y T6 son las que se dirigen al banco de ultra capacitores del sistema.

Los dos circuitos que se ven en la parte inferior de la ilustración sirven tanto para controlar los PWM a los que opera el convertidor, así como para elegir la dirección de la corriente en el convertidor, estos operan en conjunto haciendo una conmutación, es decir cuando uno está en operación el otro no lo está.

La función de controlar los PWM la realiza el bloque *square* que le impone un ciclo de trabajo de 0.5 es decir la mitad del tiempo al MOSFET del convertidor y, al pasar por el multiplexor junto a la constante de 0 ya que son sus entradas, indica cuando habrá PWM y cuando no, es decir cuando el MOSFET está operando y cuando no. El bloque *piecewise* que se encuentra en estos circuitos es el encargado de controlar la dirección de la corriente haciendo una conmutación en tiempos determinados para cambiar su dirección, este realiza la función de control en el multiplexor. Cada una de las terminales en estos circuitos llega directamente a los MOSFET's del convertidor, estos siendo G1 y G2 respectivamente.

Por otro lado, el motor DC es el encargado de que el vehículo se mueva. Enseguida se mostrarán los parámetros utilizados para esta máquina DC, este motor DC a la vez es controlado por una fuente de alimentación de una batería externa que sirve para iniciar el

motor, pero esto se explicará en profundidad en el tema de la fuente de la batería; las terminales que se dirigen hacia esta fuente son las terminales T4 Y T1 en este subcircuito.

Este subcircuito cuenta con diversas sondas de voltaje y corriente a lo largo del circuito para saber qué valor tienen en esa parte del circuito, también cuenta con un sensor de voltaje y uno de corriente que son multiplicados para obtener la potencia del motor. Por último, las terminales T3 y T2 de este subcircuito son las que se conectan al subcircuito del modelo dinámico del vehículo del sistema.

En la ilustración mostrada a continuación, se enseñan los parámetros con los que cuenta el motor DC de la simulación, este motor fue utilizado para arrancar el vehículo.

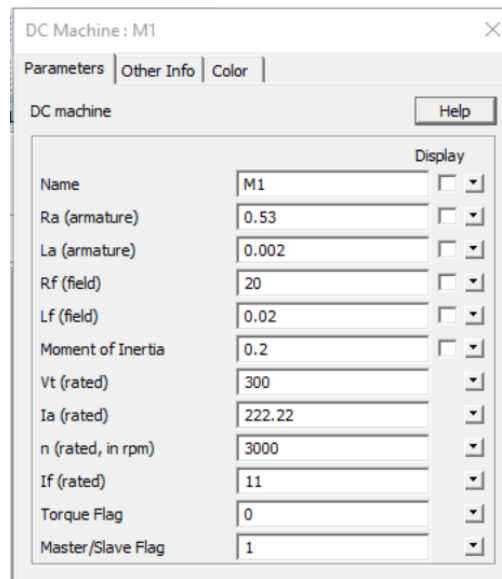


Ilustración 37: Parámetros de la máquina DC.

Se decidió utilizar este tipo de motor para esta simulación, ya que los datos proporcionados del motor AC síncrono EM57 desarrollado por Nissan no se encontraban completos en su totalidad, debido a que la empresa que los desarrolla no quiere que cualquier persona tenga acceso a estos datos. Los datos que nos proporciona Nissan y que se utilizaron en la simulación son: 300 volts nominales, motor de 80 kW, rpm máximos de 10500 y se eligió utilizar un valor de rpm nominal de 3000.

Fuente de la batería:

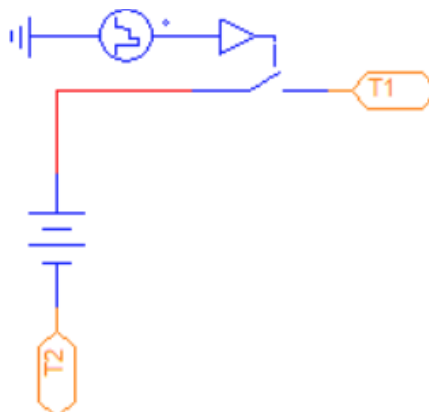


Ilustración 38: Subcircuito fuente de la batería.

Descripción:

Este subcircuito es el encargado de alimentar el motor DC, esto con el fin de arrancar el motor por pequeños lapsos de tiempo para después poder ver el efecto que tiene el banco de ultra capacitores al frenar y acelerar el auto. Este subcircuito se conecta al subcircuito de acoplamiento mediante sus dos terminales y está constituido por un controlador de encendido y apagado, un *piecewise*, una fuente de alimentación DC (batería), un *switch* y una tierra.

El *piecewise* hace que la fuente le mande energía al motor en los siguientes momentos del segundo 0 al 7 de la simulación y del segundo 50.1 al 57, a la vez este hace que el motor no se energice de los segundos 7.1 al 50 y del 57.1 al 100.

En la ilustración siguiente se puede observar que la fuente DC tiene una amplitud de 900 y tiene el nombre de MIBlitio ya que funciona como una batería de litio para el motor.

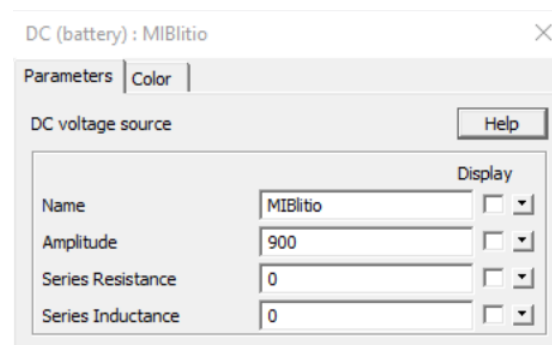


Ilustración 39: Parámetros de la fuente de voltaje DC.

Banco de ultra capacitores:

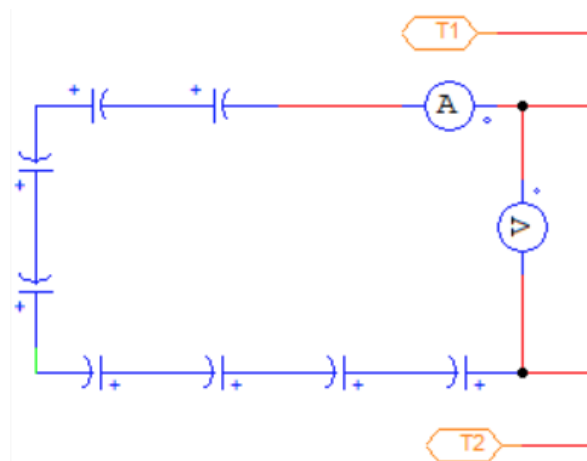


Ilustración 40: Subcircuito banco de ultra capacitores.

Descripción:

Este subcircuito consiste de 8 ultra capacitores en serie que forman el banco de ultra capacitores del sistema, además de esto tiene una sonda de voltaje y de corriente; para saber los valores de estos, sus terminales se conectan al convertidor DC-DC del subcircuito de accionamiento.

En la siguiente ilustración, se muestran los parámetros de los ultra capacitores; se mostrará uno solo, ya que todos cuentan con los mismos parámetros.

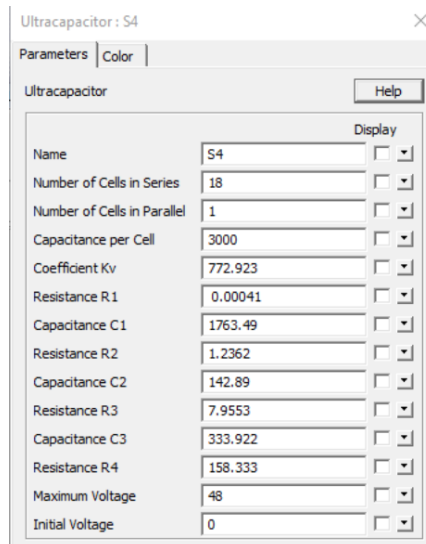


Ilustración 41: Parámetros de los ultra capacitores.

Estos parámetros fueron extraídos de la empresa Maxwell, específicamente de la *datasheet* de su módulo de ultra capacitores de 48V (Technologies, 2022).

Modelo dinámico del vehículo:

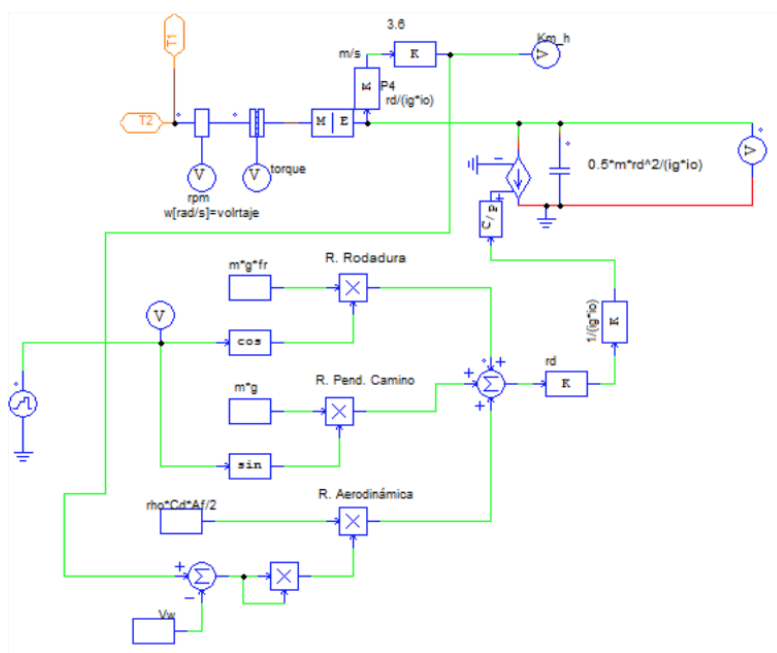


Ilustración 42: Subcircuito del modelo dinámico del vehículo.

Descripción:

En esta ilustración, se observa el subcircuito encargado de simular la dinámica del vehículo, en la parte superior izquierda se pueden ver las terminales que se conectan al subcircuito de accionamiento.

En la parte superior de la simulación se observa un sensor de torque y uno de velocidad que miden al motor del subcircuito de accionamiento, enseguida se encuentra el bloque mecánico-eléctrico que transforma todos los datos mecánicos del subcircuito de accionamiento a su relativo equivalente eléctrico, esto se realiza debido a que en el software no se pueden combinar datos mecánicos y eléctricos sin cambiarlos a su respectivo equivalente.

El *piecewise* en este subcircuito es el encargado de proporcionar los grados de inclinación de la pendiente a los que se somete el vehículo a lo largo de su ciclo de manejo, este afecta directamente a los parámetros para calcular la resistencia a la rodadura y la resistencia a la pendiente. Para obtener los resultados de las diferentes resistencias en la simulación se utilizaron constantes que contienen las debidas ecuaciones necesarias para obtenerlas y una serie de constantes proporcionales que hacen que la constante sea multiplicada por una respectiva ganancia, estos pasan por una serie de multiplicaciones y sumas para, por fin, obtener la ecuación final de la dinámica del vehículo; los valores de cada parámetro utilizado en este subcircuito se encuentran dentro del file que se encuentra en el circuito principal.

Por último, todos los datos que arroja la ecuación de la dinámica del vehículo pasan por el bloque de interfaz de control a potencia, cuya función es pasar los parámetros de control a parámetros de potencia; arriba de este bloque se encuentra una fuente controlada por voltaje, la cual hace que su salida sea igual a la ganancia multiplicada por la tensión o corriente de control. Para finalizar, los resultados de la dinámica del vehículo son almacenados en el capacitor.

### 6.3: Análisis de resultados

Para explicar las gráficas de esta simulación es necesario saber qué es un ciclo de manejo: un ciclo de manejo hace referencia a una serie de puntos de datos que representan la velocidad de un vehículo en contra de un tiempo. Con esto se pueden conseguir datos como son la eficiencia de un vehículo.

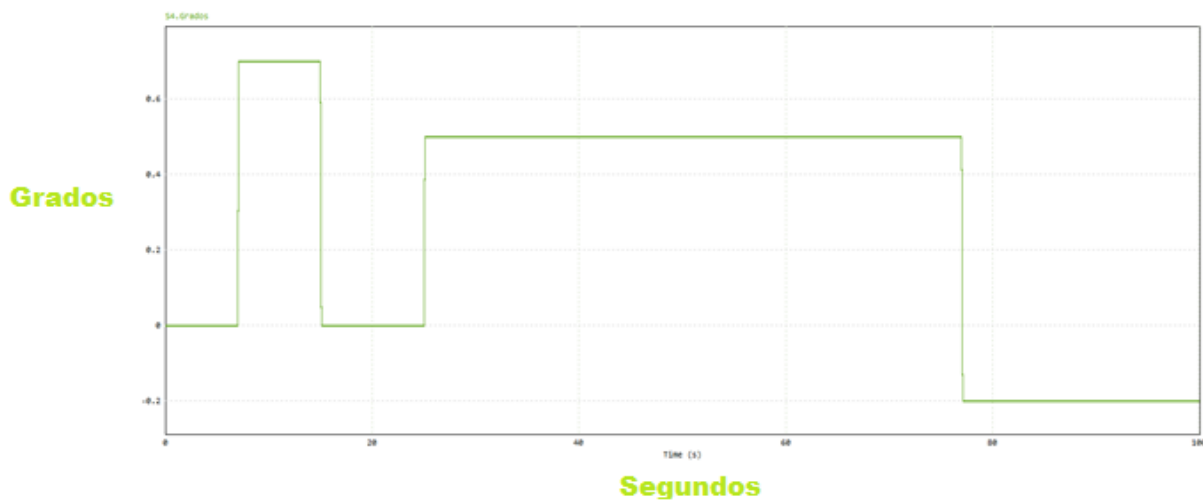


Ilustración 43: Gráfica de la pendiente durante el ciclo de manejo.

Esta gráfica describe el ciclo de manejo que tiene el vehículo, respecto a los ángulos de las pendientes que tiene el camino que recorre. En esta gráfica, los ángulos varían de 0.8 grados a -0.2 grados, los ángulos positivos significan que el carro está pasando por una subida en el camino (esto durante el tiempo que dure este ángulo), por lo que el vehículo tiende a bajar su velocidad. Por otro lado, cuando el ángulo es negativo quiere decir que el carro está en una bajada por lo cual la pendiente está a su favor y tiende a acelerar, cuando el ángulo indica cero es que el camino es plano y no hay una pendiente. La simulación empieza con una inclinación de 0 grados durante 7 segundos, para luego tener una inclinación de 0.7 grados del segundo 7.1 al 15, en seguida regresa a los 0 grados del segundo 15.1 al 25, cambia a 0.5 grados del segundo 25.1 al 77 y por último del 77.1 al 100 cambia directamente a -0.2 grados.

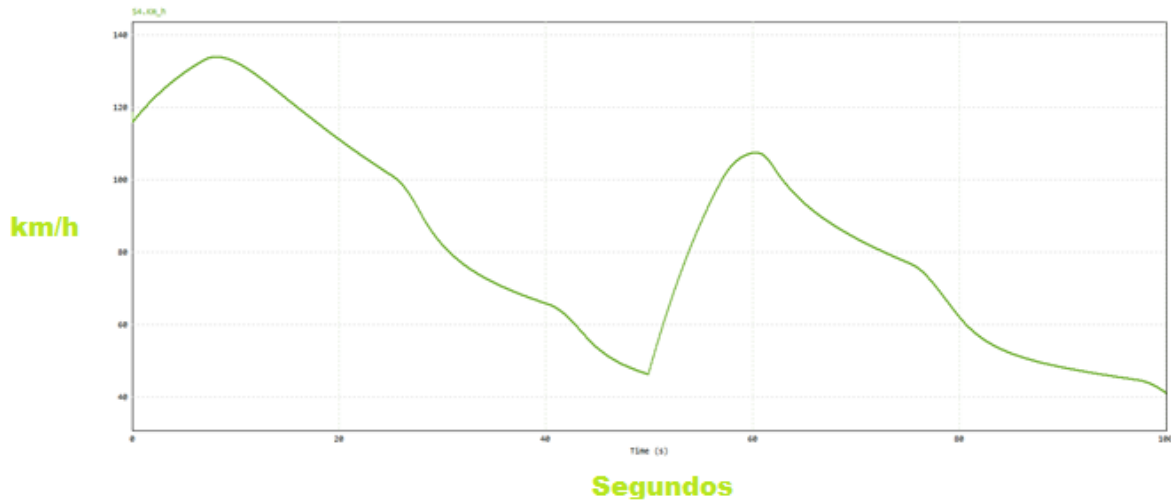


Ilustración 44: Gráfica de la velocidad durante el ciclo de manejo.

En esta gráfica, se puede observar que la velocidad del vehículo inicia alrededor de 120 km/h, esto debido a que la simulación inicia con el motor ya encendido y con sus rpm nominales desde un inicio, de ahí el vehículo acelera por unos segundos y después de un tiempo el vehículo llega a una velocidad máxima de 134 km/h, se queda en esa velocidad hasta que el vehículo apaga el motor DC para probar sí, al estar apagado y a la hora de que el vehículo frene, los ultra capacitores son capaces de recuperar energía de manera eficiente; además de esto el carro llega a la primera pendiente, esto hace que su velocidad vaya bajando hasta alcanzar los 46 km/h. Debido a las diferentes pendientes de subida a las que el vehículo se somete, su velocidad no baja de manera lineal sino que fluctúa, a la vez la velocidad fluctúa debido a que los ultra capacitores le van restando velocidad al auto cuando estos se encuentran cargando, pero a la vez también hay intervalos en los que estos le devuelven la energía al motor por lo que el vehículo mantiene por unos segundos más su velocidad a pesar de que el motor se encuentra desconectado debido al *piecewise*, en seguida el vehículo vuelve a acelerar debido a que el motor DC en la simulación se vuelve a conectar por unos segundos y llega a 108 km/h, después de esto sucede de nuevo el proceso de prueba del frenado regenerativo por lo que el motor se desconecta nuevamente y ya que el banco de ultra capacitores está absorbiendo energía del frenado, el carro va frenando poco a poco y se vuelven a ver las fluctuaciones ya explicadas en la gráfica.

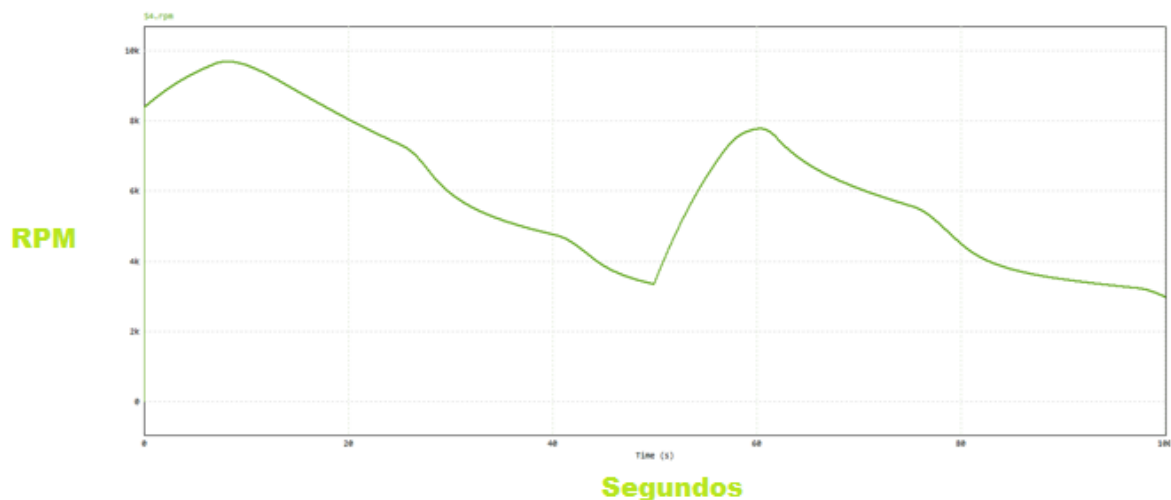
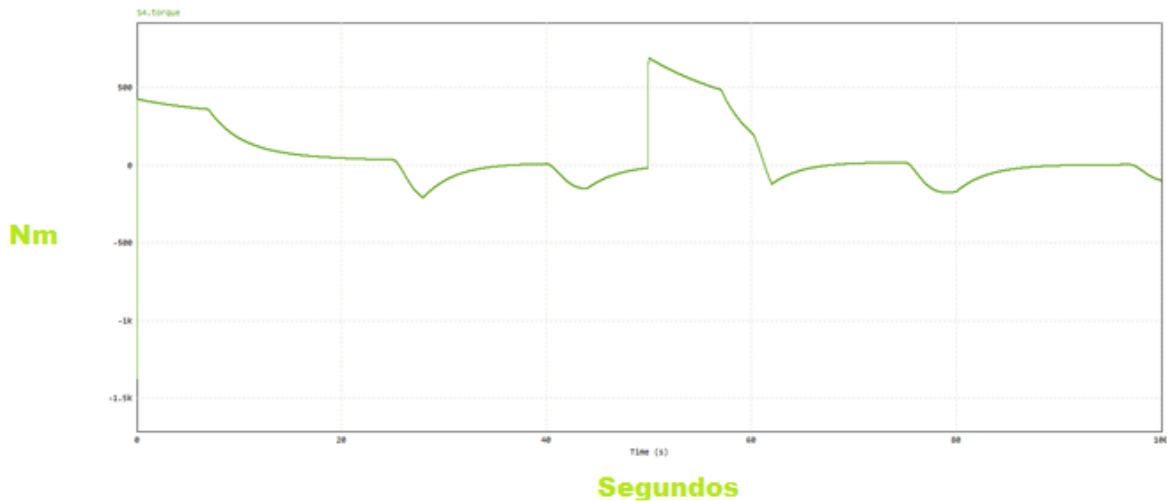


Ilustración 45: Gráfica de las revoluciones por minuto durante el ciclo de manejo.

Esta gráfica describe las rpm con las que cuenta el motor a lo largo del ciclo de manejo, como se puede observar en un inicio, cuenta con alrededor 8000 rpm, que son las rpm nominales

que se designaron para esta simulación, al llegar a la primera pendiente que es una subida y al ser desconectado el motor DC van bajando las rpm del vehículo, bajan hasta llegar a 3366 rpm (las fluctuaciones observadas en esta gráfica funcionan de la misma manera que en la gráfica anterior de la velocidad del vehículo). Al conectar nuevamente el motor DC por unos segundos, casi alcanza sus rpm nominales nuevamente, para después desacelerar debido al frenado del vehículo y la absorción de energía de los ultra capacitores que hacen que las revoluciones del motor bajen.



*Ilustración 46: Gráfica del par durante el ciclo de manejo.*

En esta gráfica, se puede observar el par que tiene el vehículo a lo largo del ciclo de manejo, en un principio es positivo con un valor de 425 Nm, ya que el motor en el inicio de la simulación tiene una velocidad alta y a la vez un par alto, se mantiene de esta manera los primeros 7 segundos que es cuando la batería sigue alimentando el motor, en el momento en que la batería deja de suministrar energía al motor, el par empieza a bajar más rápidamente, cuando el torque tiene un valor negativo quiere decir que el auto está regenerando energía mediante el banco de ultra capacitores a partir del frenado, esto se debe a que el convertidor Buck-Boost entra a conmutar cargando los ultra capacitores; posteriormente se puede observar que el par recupera fuerza debido a que el banco de ultra capacitores devuelve la energía que carga al motor, posteriormente se observa que al cabo de unos segundos los ultra capacitores se están cargando por lo que el torque es negativo nuevamente, en seguida el par llega a un valor de 700 Nm ya que en este momento la batería vuelve a suministrar energía al motor a través del *piecewise*, del segundo 50.1 al 57 la batería suministra energía al motor para luego ser desconecta nuevamente, lo cual hace que el torque baje más rápidamente como se vio anteriormente. Por último, las tres veces que se observa que el par tiene un valor negativo después de la conexión de la batería al motor es cuando el vehículo está en el modo de regeneración, por lo cual el torque es negativo.

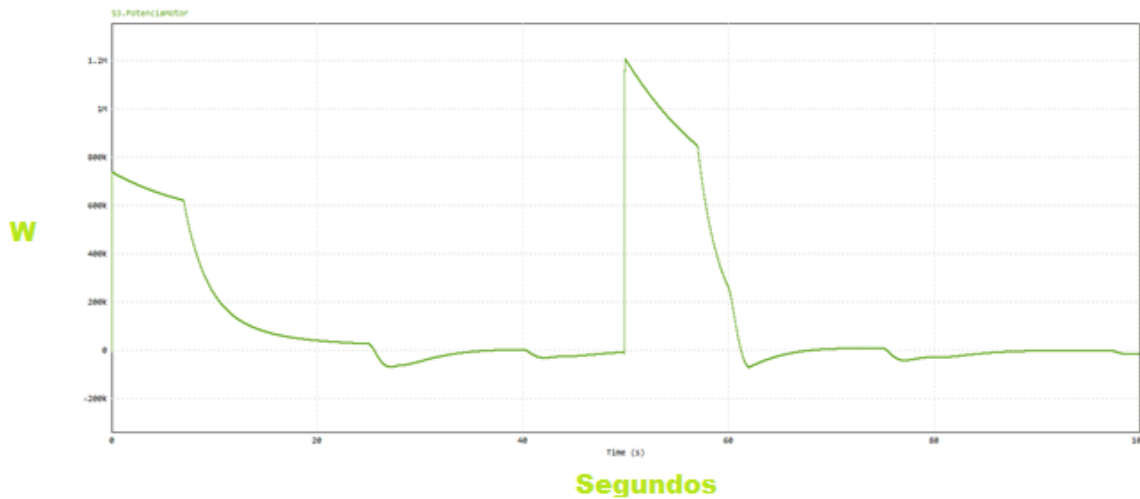


Ilustración 47: Gráfica de la potencia del motor durante el ciclo de manejo.

En esta gráfica se observa la potencia del motor a lo largo del ciclo de manejo del vehículo, esta gráfica es muy parecida a la del torque del auto, ya que la potencia del motor es el resultado de la corriente y el voltaje con los que cuenta el motor y estos se ven afectados de la misma manera que el torque en esta simulación, con la diferencia en los valores que tienen. En esta gráfica, el valor de la potencia en un inicio es de 738 kW y en su punto más alto llega a un valor de 1.2 MW, los puntos en los que la potencia es negativa es cuando el carro se encuentra en el modo de regeneración de energía, por lo cual el motor se encuentra funcionando como un generador, por lo tanto, la potencia tiene un valor negativo.

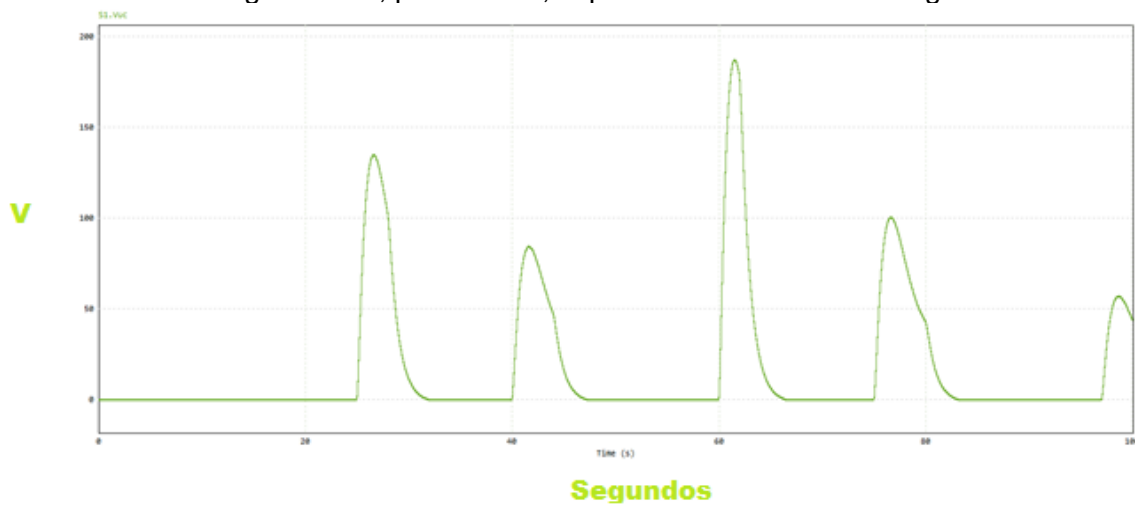


Ilustración 48: Gráfica del voltaje en el banco de ultra capacitores durante el ciclo de manejo.

En esta gráfica, se enseña el voltaje en el banco de ultra capacitores. En los primeros segundos no hay voltaje en los ultra capacitores, ya que el carro acelera durante los primeros segundos de la simulación, posteriormente entra a conmutar el convertidor Buck-Boost cargando los ultra capacitores y es por eso que se ve un aumento en el voltaje dentro de los ultra capacitores, esto quiere decir que estos se están cargando como se esperaba; en seguida el voltaje vuelve a bajar cuando el *piecewise* conmuta al transistor para subir el voltaje del auto, es decir para inyectar energía nuevamente al vehículo. Esto se repite a lo largo de la simulación con diferentes tiempos en los que los *piecewise* hacen que se carguen los ultra capacitores y devuelvan la energía al vehículo. Los intervalos de tiempo en los que el *piecewise* hace que se carguen los ultra capacitores, y por lo tanto suba su voltaje, son los siguientes: del segundo 25.1 al 28 llegando a un voltaje de 135 V, del 40.1 al 44 llegando a un voltaje de 84 V, del 60.1 al 62 llegando a un voltaje de 187 V, del 75.1 al 80 llegando a un voltaje de 100 V y por último del 97.1 al 100 llegando a un voltaje de 57 V. En esta gráfica se

puede observar que entre mayor velocidad tenga el vehículo a la hora de aplicar el frenado regenerativo, mayor es el voltaje que puede conseguir el banco de ultra capacitores. Los intervalos que se encuentran entre los que se acaban de mencionar son los momentos en que los ultra capacitores le devuelven la energía al vehículo, y por lo tanto se quedan sin voltaje.

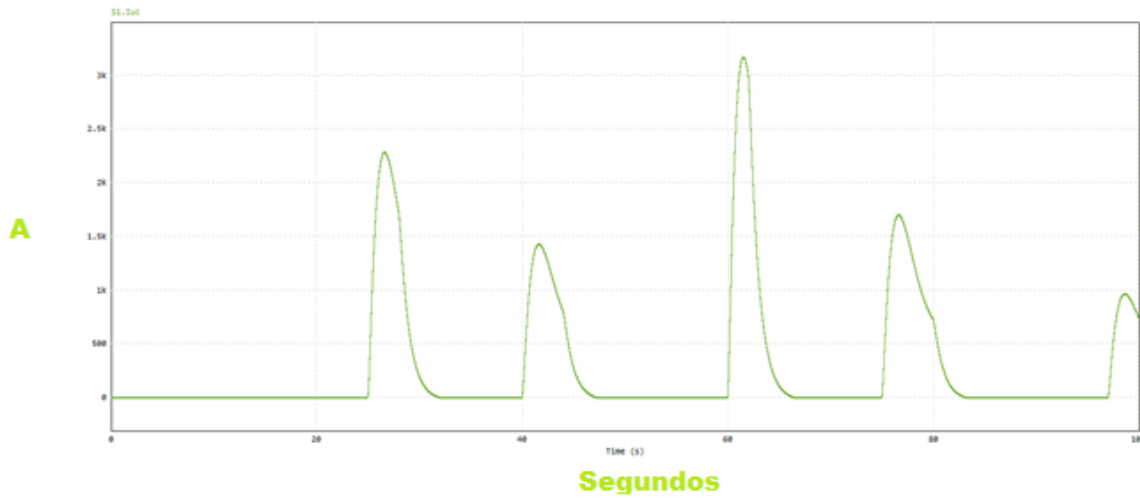


Ilustración 49: Gráfica de la corriente en el banco de ultra capacitores durante el ciclo de manejo.

Esta gráfica muestra la corriente en el banco de ultra capacitores. La única diferencia que tiene con la gráfica anterior son los valores que alcanza la corriente en la simulación, pero por otro lado es muy similar a la gráfica del voltaje debido a que cuando los ultra capacitores se cargan, se eleva su corriente, así como su voltaje, y cuando estos se descargan, tanto su corriente como su voltaje disminuyen sus valores; es debido a esto que las gráficas se comportan de la misma manera. Los valores que alcanza en sus picos la corriente son 2.28 kA, 1.43 kA, 3.2 kA, 1.7 kA y 967 Amperes, los valores de esta grafica alcanzan valores muy altos ya que no se cuenta con un control de lazo cerrado en el sistema, en la realidad los valores no alcanzan valores tan altos.

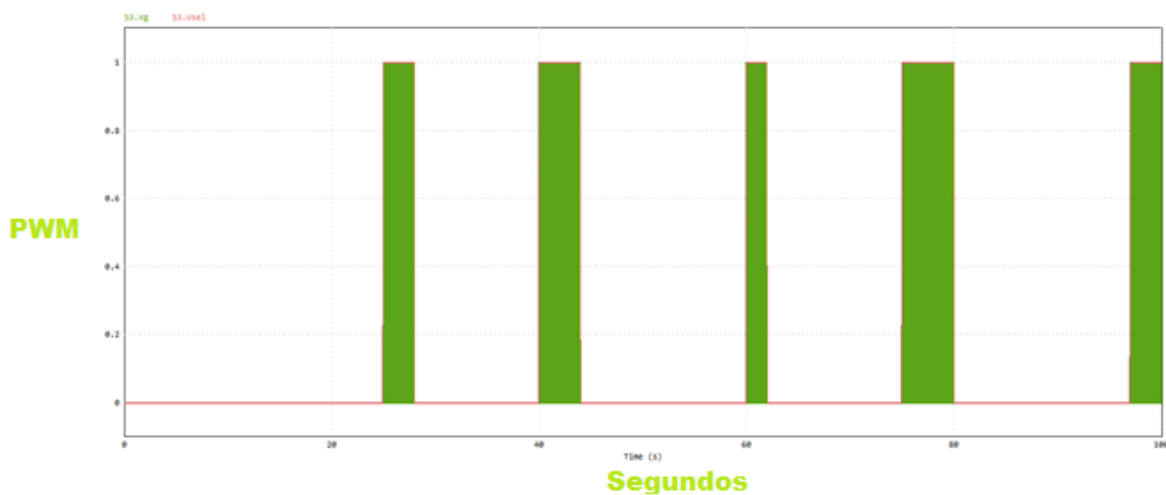


Ilustración 50: Gráfica de los intervalos de tiempo de carga de los ultra capacitores.

Esta gráfica muestra los intervalos de tiempo en los que el convertidor DC-DC Buck-Boost conmuta y produce PWMs para cargar el banco de ultra capacitores del sistema, estos intervalos no duran más de 5 segundos cada uno, esto debido a las características que tienen los ultra capacitores, estos captan una gran cantidad de energía pero no pueden almacenar mucha energía, haciendo que estos intervalos duren este tiempo se le saca mayor provecho

a estos y estos funcionan de una forma más eficiente, lo cual hace que su ciclo de vida dure más tiempo. Además de esto, si se alargan los intervalos de tiempo el carro sigue perdiendo energía.

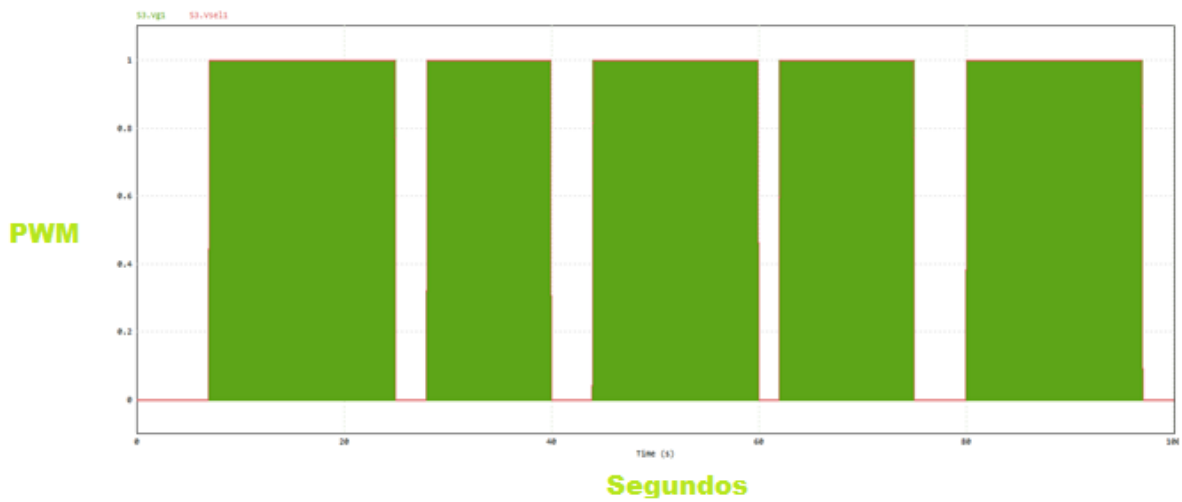


Ilustración 51: Gráfica de los intervalos de tiempo de descarga de los ultra capacitores.

Esta gráfica enseña los intervalos de tiempo en los que el transistor conmuta para subir el voltaje, es decir para inyectar energía de regreso al vehículo. En la gráfica se muestran los PWMs que se encargan de realizar esta devolución de energía al vehículo. Los valores de esta gráfica van de 0 a 1, ya que son los valores altos y bajos, 1 siendo cuando los transistores conmutan y 0 cuando no están trabajando.

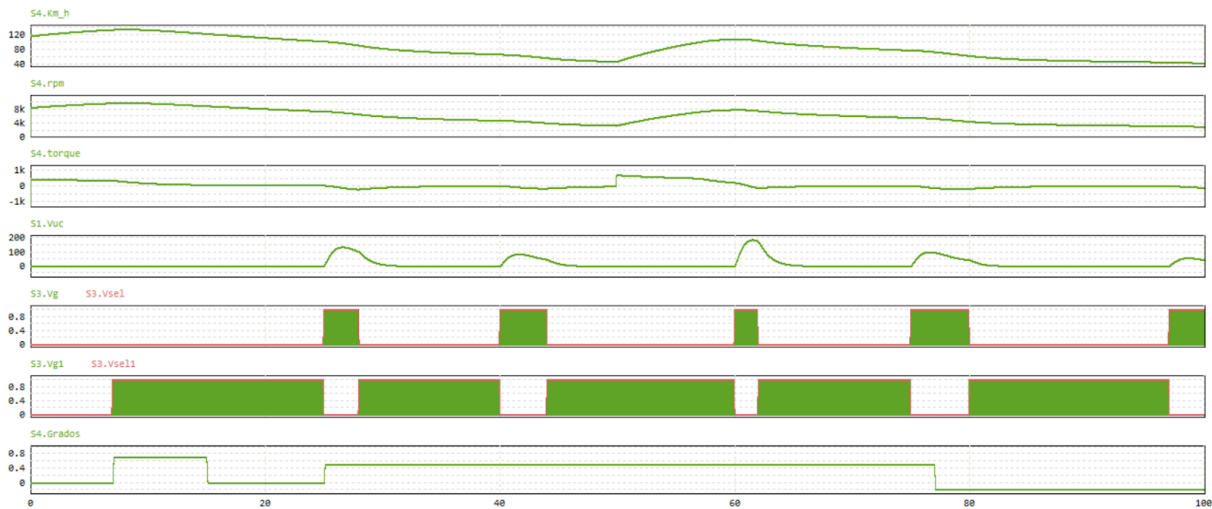


Ilustración 52: Gráfica comparativa.

Esta gráfica es un conjunto de todas las gráficas mostradas anteriormente, tiene el fin de poder ver con mayor facilidad los cambios que tiene cada una de las gráficas en las otras. Al conmutar las gráficas de Vg y Vsel y la gráfica de Vg1 y Vsel1 todas las demás van reaccionando a estas.

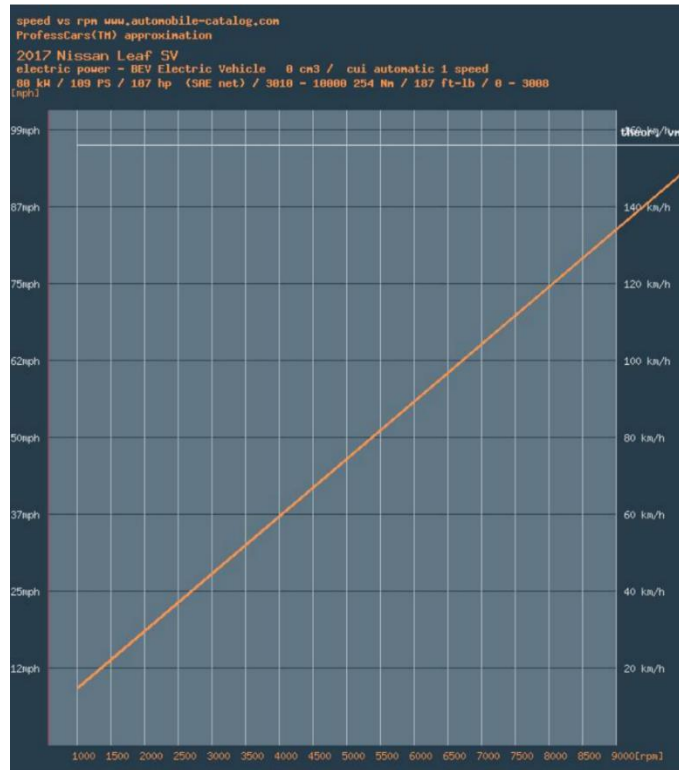


Ilustración 53: Grafica comparativa entre rpm y km/h del Nissan Leaf (Zal, 2017).

Esta gráfica muestra la velocidad del vehículo en km/h respecto a las rpm con las que cuenta el Nissan Leaf SV 2017. Estos datos son datos recopilados en una prueba de performance que fue hecha para este vehículo. En esta gráfica, se puede observar que cuando el auto cuenta con alrededor de 3500 rpm el vehículo alcanza una velocidad de 45 km/h, la simulación hecha para este trabajo arroja un dato muy similar, esto se puede comprobar observando la Ilustración 44 y la Ilustración 45, en el caso de esta simulación para un valor de 3366 rpm se consigue una velocidad de 46 km/h.

## Conclusiones:

En este trabajo se presentó una simulación del frenado regenerativo en un vehículo eléctrico utilizando un banco de ultra capacitores, como medio de almacenamiento, utilizando el programa PSIM y, en base a los resultados obtenidos de la simulación del vehículo propuesta, con su respectivo ciclo de manejo, efectivamente, se evidencia el correcto funcionamiento del frenado regenerativo, es decir que a partir de esta simulación se puede observar como el banco de ultra capacitores se carga al frenar el vehículo cuando se mueve a altas velocidades, como estos al cargarse hacen que el vehículo frene y, de manera contraria, como estos al descargarse, le devuelven al motor energía que este utiliza para poder volver a acelerar el vehículo.

A la vez, cada una de las partes del sistema funciona de la manera esperada, esto siendo que el convertidor DC-DC Buck-Boost efectivamente regula el voltaje que pasa entre el motor y el banco de ultra capacitores, bajando el voltaje cuando la corriente se dirige al banco y subiendo cuando la energía regresa al motor. Por otro lado, la parte del sistema que se encarga de simular la dinámica del vehículo muestra resultados acordes a los que tendría el auto en el que se basa este trabajo, por lo tanto, se puede concluir que funciona de manera correcta.

A través de este trabajo se puede aprender más sobre algunos de los temas que son vistos en el diplomado de vehículos eléctricos de la universidad UPAEP y tener una mayor noción del funcionamiento de algunas de las partes que conforman un vehículo eléctrico, así como también adquirir una mayor habilidad en el uso del simulador PSIM, a la vez de obtener un mayor entendimiento de la física a la que está sometida un vehículo.

# Referencias

- Anonimo. (Mayo de 2020). *PSIM User Manual*. Obtenido de <https://www.powersimtech.com/wp-content/uploads/2021/01/PSIM-User-Manual.pdf>
- Bhurse, S. S. (2018). A Review of Regenerative Braking in Electric. *Aurangabad Government College of Engineering*, 5.
- Emadi, A. (2005). *Handbook of automotive power electronics and motor drives*. Chicago: Taylor & Francis Group.
- Endo, M. &. (2001). High Power Electric Double Layer Capacitor (EDLC's); from Operating Principle to Pore Size Control in Advanced Activated Carbons. *Carbon letters*, 128.
- Gottlieb, I. (1997). *Practical electric motor Handbook*. Oxford: Newnes.
- Hughes, A. (2006). *Electric motors and drives fundamentals, types and applications*. Oxford: Newnes.
- Jazar, G. N. (2008). *Vehicle Dynamics. Theory and Application*. Springer.
- John M. Miller, J.-N.-J. M. (s.f.). *MAXWELL TECHNOLOGIES WHITE PAPER*. Obtenido de Ultracapacitor Assisted Electric Drives for Transportation: [https://maxwell.com/wp-content/uploads/2021/08/whitepaper\\_electricdrives.pdf](https://maxwell.com/wp-content/uploads/2021/08/whitepaper_electricdrives.pdf)
- Julius Partridge, D. A. (2019). The Role of Supercapacitors in Regenerative. *energies*, 15.
- Mohan, N., Undeland, t. M., & Robbins, W. P. (2009). *Electrónica de potencia convertidores aplicaciones y diseño*. México D.F.: Mc Graw Hill.
- Montaño, S. I. (2020). *Repositorio Institucional Abierto*. Obtenido de <http://hdl.handle.net/20.500.12272/5497>
- Newton, I. (2011). *Principios matemáticos de la filosofía natural*. Madrid: Tecnos.
- Patridge, J., & Abouelamaimen, D. (2019). The Role of Supercapacitors in Regenerative Braking Systems. *Energies*, 15.
- Rajamani, R. (2006). *Vehicle Dynamics and Control*. Austin: Springer.
- Schupbach, R., & Balda, J. (2003). Comparing DC/DC Converters for Power Management in Hybrid Electric Vehicles. *Comparing DC/DC Converters for Power Management in Hybrid Electric Vehicles*. Wisconsin: IEEE International Electric Machines and Drives Conference.
- Technologies, M. (2022). *Maxwell*. Obtenido de [https://maxwell.com/wp-content/uploads/2022/11/3001491-EN.8\\_DS\\_48V-165F-C0B-BMOD0165-P048.pdf](https://maxwell.com/wp-content/uploads/2022/11/3001491-EN.8_DS_48V-165F-C0B-BMOD0165-P048.pdf)
- Wanzhong Zhao, G. W. (2019). Energy transfer and utilization efficiency of regenerative braking with hybrid energy storage system. *Journal of Power Sources*, 183.
- Wanzhong, Z., Gang, W., Chunyan, W., Leiyan, Y., & Yufang, L. (2019). Energy transfer and utilization efficiency of regenerative braking with hybrid energy storage system. *Journal of Power Sources*, 10.
- Y. Gao, L. C. (2008). Design and control principles of hybrid braking system for EV, HEV and FCV. *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 6.
- Y.Lee, H., & Goodenough, J. (1999). Supercapacitor Behavior with KCl Electrolyte. *Journal of Solid State Chemistry*, 223.
- Zal, P. (2017). *automobile-catalog*. Obtenido de [https://www.automobile-catalog.com/car/2017/2604740/nissan\\_leaf\\_sv.html#gsc.tab=0](https://www.automobile-catalog.com/car/2017/2604740/nissan_leaf_sv.html#gsc.tab=0)
- Zorpette, G. (2005). Super Charged. *IEEE Spectrum*, 32-37.