

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



Profesor Patrocinante:
Dr. Leonardo Palma Fanjul.

Informe de Memoria de Título
para optar al título de:
Ingeniero Civil Eléctrico

**Dimensionamiento e implementación de banco de
supercondensadores como fuente secundaria en
sistemas de tracción eléctricos basados en pila de
combustible.**

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Eléctrica

Profesor patrocinante:
Dr. Leonardo Palma Fanjul

Dimensionamiento e implementación de banco de supercondensadores como fuente secundaria en sistemas de tracción eléctricos basados en pila de combustible.

Cristian Sebastián Mayorga Aedo

Informe de Memoria de Título
para optar al Título de

Ingeniero Civil Eléctrico

Agosto de 2023

Resumen

Hoy en día, son muchas las problemáticas medioambientales que se deben enfrentar en todo el mundo debido al calentamiento global. Esto está directamente relacionado con las emisiones de gases a la atmósfera y el efecto invernadero, donde dentro de los principales emisores de gases de invernadero se encuentran los vehículos a combustión.

Esta es una de las razones por la que en los últimos años han adquirido gran popularidad los vehículos eléctricos en cuanto a medios de transporte para personas, sin embargo, por temas de efectividad y costos, no se ha podido masificar, ya que en su gran mayoría se trata de vehículos basados en baterías de ion-litio que, si bien son probablemente la mejor opción hoy en día, presenta varias deficiencias, tales como sus tiempos de carga, los costos que conlleva y su limitada densidad de potencia, lo cual impide entregar grandes cantidades de corriente en aceleraciones y del mismo modo, absorber la energía por medio del frenado regenerativo y, por último, el deterioro de las baterías con el paso del tiempo.

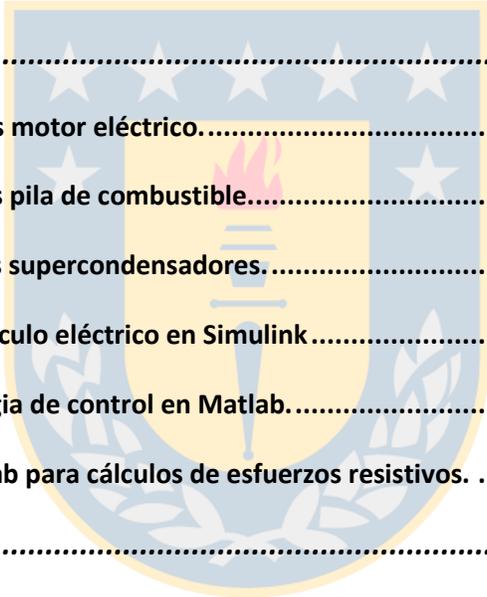
Es por esto por lo que en este trabajo se busca conceptualizar y diseñar una alternativa en cuanto al uso de fuentes de alimentación, la cual consiste en la especificación de un tren de potencia para un vehículo basado en pilas de combustible como fuente primaria y un banco de supercondensadores como fuente secundaria para suministrar o absorber la potencia total requerida siempre que sea necesario. Para ello, se evalúa a través de las leyes de la física el comportamiento del vehículo obteniendo los esfuerzos y permitiendo el cálculo de la potencia y el torque requerido en cada momento, además de que se escogen las principales características de desempeño que debe desarrollar el vehículo. A partir de los resultados obtenidos, se escoge la máquina eléctrica del automóvil y se evalúa en base a simulaciones. Como resultado, se obtiene el dimensionamiento de las fuentes de almacenamiento de energía apoyado por los catálogos disponibles para pilas de combustible y supercondensadores, seguido del diseño de los convertidores dc-dc para la regulación y control de la tensión y potencia que se solicite. Por último, se plantea y evalúa por medio de simulaciones la estrategia de control para un correcto manejo de la energía en ambas fuentes llevándose a cabo por medio del control de los convertidores estáticos utilizados.

Tabla de contenidos

Resumen	3
Tabla de contenidos	4
Lista de tablas	7
Lista de figuras	8
Abreviaciones	10
Nomenclatura	11
Capítulo 1: Introducción	13
1.1 Trabajos previos.....	15
1.2 Discusión	17
1.3 Objetivos	17
1.3.1 Objetivo general.....	17
1.3.2 Objetivos específicos	18
1.4 Alcances y limitaciones.....	18
1.5 Metodología	18
Capítulo 2: Modelado vehículos eléctricos.....	19
2.1 Arquitecturas.....	19
2.1.1 Arquitectura de los HEV y FCEV	20
2.1.2 Arquitectura HEV en serie.....	20
2.1.3 Arquitectura HEV en paralelo	21
2.1.4 Configuración FCEV	22
2.2 Modelado vehículo eléctrico	23
2.2.1 Esfuerzos resistivos	25
2.2.1.1 Resistencia de rodado.....	25
2.2.1.2 Resistencia aerodinámica.....	26

2.2.1.3 Resistencia por pendientes	28
2.2.2 Desempeño del vehículo.....	28
Capítulo 3: Sistema eléctrico en EV y HEV.....	30
3.1 Máquina eléctrica	30
3.1.1 Características motor de tracción.....	31
3.1.1 Motor síncrono de reluctancia.....	32
3.1.2 Motor síncrono de imanes permanentes.....	33
3.1.3 Motor de inducción.....	33
3.2 Fuentes de almacenamiento.....	34
3.2.1 Baterías	34
3.2.2 Pilas de combustible	38
3.2.3 Supercondensadores	42
3.2.3.1 Principio de funcionamiento SC	43
3.3 Convertidores DC/DC	46
3.3.1 Convertidor buck (reductor)	47
3.3.2 Convertidor boost (elevador).....	48
3.3.3 Convertidor buck-boost (reductor-elevador)	50
3.4 Sistema de frenado	52
3.4.1 Importancia del sistema de frenado	52
3.4.2 Frenado mecánico.....	52
3.4.3 Sistema ABS	53
3.4.4 Frenado regenerativo	54
Capítulo 4: Dimensionamiento del vehículo eléctrico.....	57
4.1 Especificación máquina eléctrica	57
4.1.1 Cálculo esfuerzos totales y resistivos del vehículo	58
4.1.2 Especificación del motor	59
4.1.3 Selección del motor	61
4.2 Especificación fuentes de almacenamiento de energía.....	63
4.2.1 Ciclo de conducción	63
4.2.2 Selección pila de combustible.....	67
4.2.3 Selección banco de supercondensadores	69

4.3 Especificación convertidores DC-DC	76
4.3.1 Diseño convertidor dc-dc para pila de combustible.	77
4.3.2 Diseño convertidor dc-dc para banco de SC.	80
Capítulo 5: Estrategia de control	83
5.1 Modos de operación.	84
5.2 Modo tracción.	84
Capítulo 6: Simulaciones y resultados	87
Capítulo 7: Conclusiones	94
7.1 Trabajo futuro	95
Anexos	97
Anexo A: Especificaciones motor eléctrico	97
Anexo B: Especificaciones pila de combustible	98
Anexo C: Especificaciones supercondensadores	99
Anexo D: Evaluación vehículo eléctrico en Simulink	100
Anexo E: Código estrategia de control en Matlab	101
Anexo F: Código en Matlab para cálculos de esfuerzos resistivos.	108
Referencias	110



Lista de tablas

<i>Tabla 1. Valores típicos de coeficientes de resistencia a la rodadura [21].</i>	26
<i>Tabla 2. Valores típicos de coeficiente de resistencia aerodinámica [12].</i>	27
<i>Tabla 3. Características de baterías en el mercado actualmente [22].</i>	36
<i>Tabla 4. Tipos de pila de combustible y sus características.</i>	39
<i>Tabla 5. Comparación baterías ion-litio y supercondensadores en el mercado [18].</i>	43
<i>Tabla 6. Parámetros a considerar para diseño de vehículo eléctrico.</i>	57
<i>Tabla 7. Parámetros de rendimiento del vehículo.</i>	57
<i>Tabla 8. Esfuerzos resistivos presentes en el movimiento del vehículo.</i>	58
<i>Tabla 9. Datos técnicos de motor de imanes permanentes Brogen TZ204XSB12.</i>	62
<i>Tabla 10. Especificaciones técnicas pilas de combustible. (Ballard Power Systems. (2021). FCvelocity – 9SSL)</i>	68
<i>Tabla 11. Electric double layer ultracapacitor 3.0 [V] Tecate Group.</i>	74
<i>Tabla 12. Especificaciones generales ultracapacitor 3.0 [V] Tecate Group</i>	74
<i>Tabla 13. Parámetros banco de SC.</i>	75
<i>Tabla 14. Especificación componentes convertidor dc-dc boost</i>	79
<i>Tabla 15. Especificación componentes de convertidor dc-dc buck-boost.</i>	82

Lista de figuras

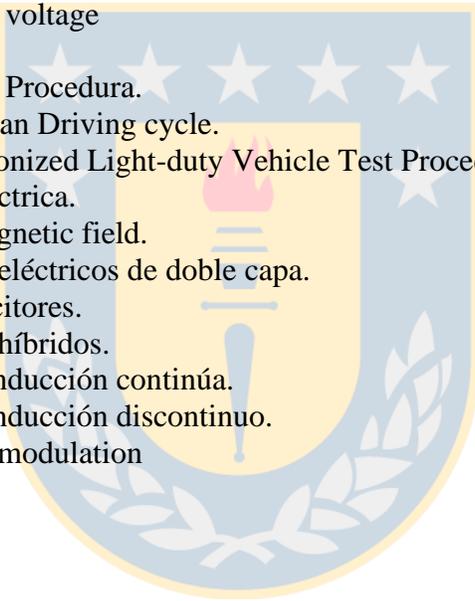
<i>Figura 1. Arquitectura HEV en serie.</i>	21
<i>Figura 2. Arquitectura HEV en paralelo.</i>	22
<i>Figura 3. Arquitectura FCEV en paralelo.</i>	23
<i>Figura 4. Configuración en paralelo propuesta para FCEV.</i>	24
<i>Figura 5. Diagrama de fuerzas vehículo sobre una pendiente [11].</i>	25
<i>Figura 6. Curva característica motores de tracción [25].</i>	31
<i>Figura 7. Curva característica con valores de factor x [25].</i>	32
<i>Figura 8. Ciclo de descarga batería.</i>	35
<i>Figura 9. Principio de funcionamiento FC [23].</i>	38
<i>Figura 10. Curva de polarización pila de combustible [24].</i>	41
<i>Figura 11. Circuito equivalente simple SC.</i>	44
<i>Figura 12. Curva de descarga para distintas características de corriente de SC [15].</i>	45
<i>Figura 13. Circuito convertidor buck.</i>	47
<i>Figura 14. Circuito convertidor boost.</i>	49
<i>Figura 15. Circuito convertidor buck-boost.</i>	50
<i>Figura 16. Configuración absorción energía del frenado regenerativo.</i>	56
<i>Figura 17. Fuerzas resistivas totales en el eje tractivo al variar la velocidad del vehículo y la inclinación de la pendiente en 0%, 5%, 10%, 15% y 20%.</i>	59
<i>Figura 18. Variaciones de velocidades durante ciclo de conducción urbano [26].</i>	64
<i>Figura 19. Diagrama simulación de potencia tractiva, torque, energía y velocidad durante ciclo de conducción.</i>	65
<i>Figura 20. Potencia tractiva durante ciclo WLTP-3.</i>	65
<i>Figura 21. Energía tractiva total durante ciclo WLTP-3.</i>	66
<i>Figura 22. Gráfico de potencia tractiva [kW] a ser suministrada por banco de SC.</i>	70
<i>Figura 23. Mayor periodo de requerimiento de potencia para banco de SC.</i>	71
<i>Figura 24. Potencia tractiva a ser entregada por SC en primeros 10 minutos de ciclo.</i> ..	72
<i>Figura 25. Diagrama de conexión convertidor dc-dc boost unidireccional.</i>	77
<i>Figura 26. Diagrama de conexión convertidor dc-dc buck-boost bidireccional.</i>	80
<i>Figura 27. Flujo de energía entre ME, FC y SC.</i>	83

<i>Figura 28. Estrategia de control híbrido con FC y SC.</i>	85
<i>Figura 29. Ciclo de conducción WLTP-3 [26].</i>	87
<i>Figura 30. Potencia tractiva real y total en [kW]</i>	88
<i>Figura 31. Potencia tractiva total entregada por la FC [kW].</i>	89
<i>Figura 32. Potencia tractiva total entregada por el banco de SC [kW].</i>	89
<i>Figura 33. Potencia comandada, potencia en FC y potencia en banco de SC durante un minuto en ciclo de conducción WLTP-3.</i>	90
<i>Figura 34. Energía tractiva total en la FC [kWh].</i>	91
<i>Figura 35. Energía tractiva total en el banco de SC [kWh].</i>	92
<i>Figura 36. Estado de carga del SC [%]</i>	93
<i>Figura 37. Simulación vehículo eléctrico con ciclo de conducción WLTP-3</i>	100
<i>Figura 38. Cálculo de esfuerzos, potencia y torque durante conducción (glider)</i>	100
<i>Figura 39. Cálculos de potencia y retroalimentación de velocidad del EV (Mediciones)</i>	101
<i>Figura 40. Control PID regulador de la fuerza tractiva.</i>	101



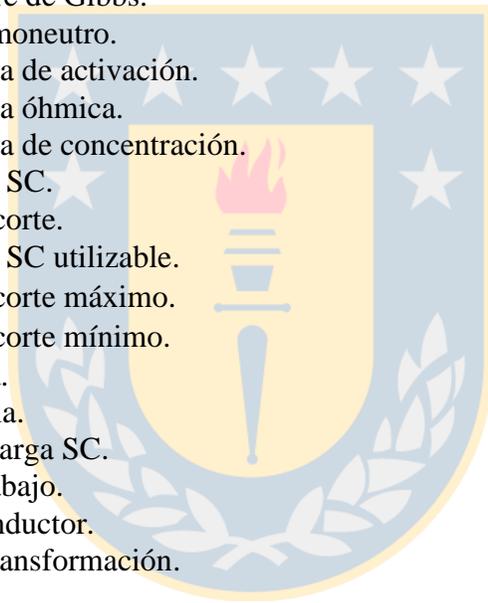
Abreviaciones

ICE:	Internal Combustion Engine.
HEV:	Hybrid Electric Vehicle.
EV:	Electric Vehicle.
BEV:	Battery electric vehicle
FCEV:	Fuel cell electric vehicle.
ESS:	Energy storage system
AC:	Corriente alterna.
DC:	Corriente continua.
LCK:	Ley de corriente de Kirchhoff.
LVK	Ley de voltaje de Kirchhoff.
ESR:	Equivalent series resistance.
SC:	Supercondensador.
OCV:	Open circuit voltage
FC:	Fuel cell.
FTP 75:	Federal Test Procedura.
NEDC:	New European Driving cycle.
WLTP-3:	World harmonized Light-duty Vehicle Test Procedure
ME:	Máquina eléctrica.
RMF:	Rotating magnetic field.
EDLC:	Capacitores eléctricos de doble capa.
PSCs:	Pseudocapacitores.
HCS:	Capacitores híbridos.
CCM:	Modo de conducción continúa.
DCM:	Modo de conducción discontinuo.
PWM:	Pulse width modulation



Nomenclatura

F_t :	Fuera tractiva.
F_{rt} :	Fuerza resistiva
F_{rod} :	Esfuerzo resistencia al rodado.
f_r :	Coefficiente de resistencia de rodado.
F_{aer} :	Esfuerzo resistivo aerodinámico.
ρ :	Densidad del aire.
A_f :	Área frontal vehículo.
C_D :	Coefficiente de resistencia aerodinámica.
C_D :	Velocidad del viento.
F_g :	Esfuerzo resistivo por pendientes.
SOC:	Estado de carga
ΔG° :	Energía libre de Gibbs.
E_{th} :	Voltaje termoneutro.
V_{act} :	Voltaje zona de activación.
V_{ohm} :	Voltaje zona óhmica.
V_{con} :	Voltaje zona de concentración.
E_{SC} :	Energía del SC.
V_C :	Voltaje de corte.
$E_{SC,util}$:	Energía del SC utilizable.
$V_{C,max}$:	Voltaje de corte máximo.
$V_{C,min}$:	Voltaje de corte mínimo.
L:	Inductancia.
C:	Capacitancia.
SOC_{SC} :	Estado de carga SC.
D:	Ciclo de trabajo.
I_{ind} :	Corriente inductor.
$i_c i_g$:	Razón de transformación.
T:	Torque.
P:	Potencia.
ω :	Velocidad angular
V_f :	Velocidad final.
V_b :	Velocidad base.
X:	Factor de rendimiento.
V_{FC} :	Voltaje pila de combustible.
V_{SC} :	Voltaje SC.
N_S :	Número de celdas en serie.
N_P :	Número de celdas en paralelo.
C_{BANCO} :	Capacitancia banco de SC.
C_{celda} :	Capacitancia de cada celda.
N_{celdas} :	Número de celdas totales.
I_{peak} :	Corriente peak.
ω_{BANCO} :	Energía banco.



V_o :	Voltaje de salida.
V_i :	Voltaje de entrada.
P_{com} :	Potencia comandada.
P_b :	Potencia de frenado comandada.
P_{SC} :	Potencia SC.
P_{FC} :	Potencia pila de combustible.
$P_{FC,n}$:	Potencia nominal pila de combustible.
$P_{SC,n}$:	Potencia nominal SC.
$P_{FC,min}$:	Potencia mínima pila de combustible.
$P_{SC,carga}$:	Potencia de carga SC.
$P_{SC,tractivo}$:	Potencia tractiva entregada por SC.
E :	Nivel de energía SC.
E_{min} :	Límite mínimo de almacenamiento de energía SC.
E_{max} :	Límite máximo de almacenamiento de energía SC.



Capítulo 1: Introducción

A lo largo de la historia siempre ha sido necesario contar con un medio de movilidad, ya sea para desplazarse de un lugar a otro, mover cargas pesadas o cualquiera sea la función que las personas le puedan dar. En la antigüedad era posible suplir estas necesidades gracias a animales o simplemente con trabajo manual. Todo cambió con la invención del primer vehículo a vapor construido por Ferdinand Verbiest en 1672 y que dio el primer paso hacia los vehículos de motor a combustión interna que surgirían unos siglos más tarde y serían producidos a gran escala en el mundo, logrando estar tan masificados como se puede ver hoy en día en autos, buses y camiones. Sin embargo, si bien los vehículos pueden facilitar la vida de las personas, estos conllevan un consumo no menor de combustibles fósiles principalmente y que al producirse a gran escala, genera una grave contaminación del aire por lo que son considerados de los mayores emisores de gases asociados al calentamiento global que se vive hoy en día [27].

Es impensable considerar que la producción de vehículos vaya a disminuir en el planeta, ya que cada día son más y más las personas que se suman a suplir sus necesidades adquiriendo un automóvil [7], por lo que nos vemos en la necesidad de buscar algún método por el cual se pueda tener la satisfacción de un automóvil, pero sin la contaminación que ello implica.

De esta forma es que en los últimos años se ha promovido la utilización de vehículos eléctricos, los cuales poseen la característica de reducir la emisión de gases a la atmósfera a cero y donde su mayor limitante hoy en día es su dificultad en la producción y diferencia en los costos. Sin embargo, esto no ha sido impedimento para que grandes empresas como Tesla o Volkswagen comiencen a trabajar y enfocarse en avances tecnológicos que permitan acercar más y más estos nuevos tipos de vehículos a la gente [8].

En específico, dentro de las limitantes del diseño de un vehículo eléctrico está el alcanzar potencias elevadas cuando se requiera, como sería el caso de vencer pendientes pronunciadas, o momentos en que se necesite una desaceleración muy brusca, ya que, para aumentar la potencia del vehículo, implica aumentar el tamaño del banco de baterías/pilas de

combustible lo que muchas veces resulta contraproducente, debido a los altos costos que conlleva y la necesidad de ocupar un mayor espacio y peso dentro del mismo vehículo.

Es por esto que, al día de hoy una buena alternativa es el uso de vehículos híbridos HEV, los que a través de una fuente de energía puramente eléctrica como es un banco de baterías, en conjunto con un ICE, permiten entregar la potencia que sea requerida por el conductor en todo momento (dentro de las especificaciones del vehículo). Y si bien, esta resulta una forma muy conveniente y amigable con el medio ambiente, contar con un ICE implica que aun exista emisión de gases a la atmosfera, aunque estos sean en mucho menor cantidad que un vehículo puramente de combustión interna.

Por lo anterior es que se busca con este trabajo conceptualizar un modelo de tren de potencia para un vehículo puramente eléctrico que posea las características de un HEV, pero reemplazando la parte ICE por pila de combustible y utilizando un banco de supercondensadores como fuente secundaria, logrando entregar en todo momento la potencia requerida por el operador y maximizando las principales características de los supercondensadores, la cual es el poder entregar y absorber grandes cantidades de energía en periodos de tiempo muy cortos en comparación a un banco de baterías, además de que por medio del frenado regenerativo es posible solventar una de las principales deficiencias que poseen las pilas de combustible.

1.1 Trabajos previos

A partir de un análisis bibliográfico de distintas fuentes y autores se indican los principales estudios relacionados en los que fue posible apoyarse para el desarrollo de este informe.

[1] Schiffer, J., Bohlen, O., De Doncker, R. W., Sauer, D. U., & Ahn, K. Y. (2005). Optimized energy management for fuelcell-supercap hybrid electric vehicles. In 2005 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (pp. 341-348). IEEE.

A lo largo de este estudio, se analizan las principales características de las pilas de combustible y banco de supercondensadores, revisando su comportamiento en conjunto y postulando distintas estrategias de control para el manejo de energía por parte de las dos fuentes de alimentación, las cuales son puestas a prueba bajo simulación. Es posible obtener de aquí que en cuanto a la estrategia de control a utilizar resulta conveniente utilizar los SC en su máxima potencia durante las fases de aceleraciones y desaceleraciones.

De la misma forma, durante fases de detención o de velocidad constante resulta conveniente regular el voltaje de los SC cargándolos por medio de la FC, intentado reducir al máximo el uso de esta última.

[2] García, P., Fernández, L. M., Torreglosa, J. P., & Jurado, F. (2012). Control Difuso de un Tranvía Híbrido Propulsado por Pila de Combustible, Batería y Supercondensador. Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial, 9(2), 162-169.

A partir de la información propuesta en esta revista, se visualiza y compara el funcionamiento de un tranvía compuesto por pila de combustible, baterías y supercondensadores, permitiendo tomar varias consideraciones y topologías que son aplicables a menor escala en este estudio. Además, se muestra un enfoque de control difuso para el consumo de energía por parte de las fuentes de alimentación

[3] Saleem, A., Liu, N., Junjie, H., Iqbal, A., Hayyat, M. A., & Mateen, M. (2020). Modelling of an electric vehicle for tractive force calculation along with factors affecting the total tractive power and energy demand. In 2020 3rd International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies (iCoMET) (pp. 1-5). IEEE.

Dentro de las leyes de la física que describen el comportamiento de cualquier objeto en base a las fuerzas presentes en él, es posible llevarlo a un plano en que se estudien todas las fuerzas presentes en un vehículo, logrando obtener el esfuerzo que debe realizar un EV en todo momento, y, por consiguiente, la potencia y torque que se requerirá.

Además, se muestra en este estudio los parámetros que se deben tener en consideración para modelar el vehículo y un ciclo de conducción ya establecido para poder simular el desempeño del automóvil en todo momento, afrontando distintos tipos de aceleraciones, frenados y velocidades.

[4] Karthik, M., & Gomathi, K. (2014). Dynamic neural network based parametric modeling of PEM fuel cell system for electric vehicle applications. In 2014 International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE) (pp. 1-5). IEEE.

En este estudio se revisa el procedimiento de diseño del vehículo eléctrico y se analiza principalmente el comportamiento de la pila de combustible PEM y un sistema de control que permite manejar su estado de carga, además se revisa el tipo de convertidor dc-dc a ser implementado y se evalúa todo mediante simulaciones.

[5] Palacio, V. (2014). Convertidores DC-DC para aprovechamiento de frenado regenerativo en sistemas de tracción alimentados con corriente directa (Tesis de grado). Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia.

A partir de este informe, es posible estudiar distintas topologías de convertidores dc-dc, visualizar con bases las características que deben contar los convertidores a utilizar en el diseño propuesto y considerar características como son los valores peak de corriente y la relación de la corriente de rizado.

Por otro lado, se presenta como opera el modo de frenado, llevado a un ejemplo práctico, indicando el circuito básico para esta operación, un convertidor capaz de llevarlo a cabo y el modo de frenado que se ejecuta.

[6] Hong, J., Jung, S., Dai Thang, P., & Nam, K. (2008). Hybridization fuel cell with supercapacitor for FCEV. In 2008 Twenty-Third Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (pp. 286-290). IEEE.

Por medio de este estudio, se presenta una combinación de una pila de combustible con su convertidor boost dc-dc unidireccional, regulando la corriente de esta fuente y el voltaje de entrada del SC, por otro lado, se diseña un banco de supercondensadores con un convertidor dc-dc buck-boost capaz de controlar el voltaje del enlace DC, incluso frente a variaciones inesperadas del inversor y lo más importante, permite recibir la energía proveniente del frenado regenerativo y regular el voltaje del banco de SC. Se indica el sistema de control utilizado y las simulaciones que evalúan el desempeño del conexionado en serie de ambas fuentes de alimentación.

1.2 Discusión

A partir de la bibliografía revisada en [3] se estudia un modelo matemático que permite el cálculo y el dimensionamiento de las características que debe tener un vehículo eléctrico a diseñar y también un ciclo de trabajo bajo el cual se puede poner a prueba su comportamiento. Por otro lado, en [2] se puede realizar una visión general sobre un sistema ya implementado en el que se aplica el uso de pilas de combustibles, supercondensadores y baterías como fuentes de alimentación de un tren eléctrico. Además, en [1], [4] y [6] se estudia el comportamiento de la implementación de un sistema híbrido entre pilas de combustible y supercondensadores, abordando el funcionamiento de estos mismos de manera individual y en conjunto, analizando las mejores estrategias de control que permiten obtener una mayor eficiencia a través del manejo de los estados de carga de cada fuente. Se considera también la necesidad de implementar un sistema de convertidores dc-dc a la salida de cada fuente con el fin de regular su nivel de voltaje y poder controlar la entrega y absorción de energía por medio del frenado regenerativo, como se señala en el estudio [5].

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Especificar los componentes eléctricos para la implementación de un vehículo eléctrico basado en pilas de combustible y un banco de supercondensadores, evaluando y comprobando su desempeño mediante simulaciones.

1.3.2 Objetivos específicos

- Definir los parámetros y características que se desea tenga el vehículo eléctrico a diseñar.
- A partir de cálculos, dimensionar los componentes internos que permiten dar funcionamiento al vehículo eléctrico
- Seleccionar a partir del catálogo el motor, pilas de combustibles, banco de supercondensadores y convertidores/inversores que mejor se adapten a los requerimientos impuestos.
- Establecer un sistema de control que permita optimizar el consumo de energía entre las pilas de combustibles y el banco de supercondensadores.
- Evaluar el desempeño del vehículo a través de simulaciones.

1.4 Alcances y limitaciones

Se busca en base a los parámetros definidos y las ecuaciones que describen el comportamiento del automóvil, poder especificar los componentes eléctricos presentes en el vehículo eléctrico. También, mediante simulaciones, evaluar el desempeño completo del vehículo bajo ciclos de conducción reales, considerando las pérdidas de energía asociadas a los componentes especificados.

Por otro lado, el presente estudio se centra solo en la especificación de los componentes eléctricos necesarios para el funcionamiento del vehículo, su estrategia de control y su desempeño, excluyendo consideraciones como la especificación estructural del vehículo o el diseño en profundidad del sistema de control para los convertidores.

1.5 Metodología

El desarrollo de este trabajo consta de una primera parte de estudio y definición de conceptos utilizados a lo largo del informe y seguido del dimensionamiento a través de las ecuaciones físicas que describen el comportamiento del vehículo eléctrico y la estrategia de control que se utilizará para el manejo de energía de cada fuente. Finalmente, en base a todo lo obtenido, se evalúa por medio de simulaciones el desempeño del vehículo.

Capítulo 2: Modelado vehículos eléctricos

2.1 Arquitecturas

Son distintas las opciones que existen en el mercado hoy en día cuando se trata de arquitecturas para el tren de potencia de vehículos eléctricos, dentro de las opciones más populares están los Battery Electric Vehicle (BEV), los cuales corresponden a vehículos puramente eléctricos, los cuales pueden contar con uno o más motores eléctricos acompañados de una batería que lo alimenta y se recarga conectándolo a la red eléctrica.

La implementación de los vehículos eléctricos viene de la mano con la intención de ayudar al medio ambiente reduciendo la huella de carbono del planeta, evitando el uso de los automóviles convencionales de Internal Combustion Engine (ICE), sin embargo, los BEV no son la única opción disponible hoy en día. Otros tipos como los Hybrid Electric Vehicle (HEV) o los Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV) se han vuelto una opción bastante llamativa, debido a su eficiencia en el consumo de combustible gracias a la optimización del funcionamiento del motor y la recuperación de energía por medio del frenado regenerativo, permitiendo que, gracias a este último, se logre operar algunos HEV sin siquiera hacer uso de combustible al operar en ciclos de conducción de entre 40 y 60 [km] y permitiendo cargar el vehículo solo durante la noche al conectarlo a la red eléctrica.

Por otro lado, existen automóviles que cumplen con las condiciones de reducir al máximo las emisiones, pero que, por su dificultad en la fabricación o masificación, no son demasiado populares. Un claro ejemplo de esto último son los Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV), este tipo de automóvil se basan en la utilización de hidrógeno como combustible para la producción de electricidad, de esta forma, no se emiten gases contaminantes al medio ambiente, solo vapor de agua.

En los HEV se hace uso de motores eléctricos, los que permiten optimizar el ICE, pudiendo detenerlo en los momentos en que el vehículo se encuentra detenido, o en situaciones en que la fuente secundaria puede suministrar la potencia completa requerida en ese momento y solo sea necesario el uso del motor eléctrico. O bien, en algunas arquitecturas el ICE es controlado de manera que pueda operar en su punto de mayor eficiencia tanto de potencia, torque y velocidad, permitiendo a su vez que el exceso de potencia entregado por

el ICE puede ser redistribuido hacia la fuente secundaria para poder cargarla en caso de ser necesario. Esto permite que el ICE en los HEV sea en general de menor potencia y, por ende, de menor tamaño y costo. Las principales limitantes que presenta el uso de HEV son los altos costos por la implementación de fuentes de almacenamiento eléctrico, el motor eléctrico, los convertidores de potencia, posibles interferencias electromagnéticas y dificultades al momento de realizar mantenimiento o reparaciones al vehículo debido a la escasez de técnicos preparados para estas nuevas tecnologías.

Por otro lado, los FCEV son capaces de generar electricidad a partir de hidrógeno, lo cual permite impulsar el vehículo o bien, almacenarlo en una fuente secundaria. Sus principales limitantes son el alto costo de las celdas de combustible, el almacenamiento de hidrógeno y la falta de una infraestructura de carga.

2.1.1 Arquitectura de los HEV y FCEV

Existen varias configuraciones o arquitecturas del tren de potencia utilizadas para el conexionado de los elementos eléctricos en un HEV, las categorías básicas de estos son los híbridos en serie, híbridos en paralelo, híbridos en serie-paralelo e híbridos complejos. A continuación, se describen los dos principales tipos de configuración utilizados donde se debe notar que el tipo de conexión se encuentra directamente relacionado a la eficiencia del sistema.

2.1.2 Arquitectura HEV en serie

En el tipo de conexión HEV en serie, el motor de combustión interna funciona exclusivamente como generador para cargar el banco de baterías, el cual es el responsable de impulsar y transmitir la potencia a las ruedas. Las principales ventajas que presenta este tipo de conexión es su simplicidad y la capacidad del ICE de poder funcionar a una velocidad óptima con el fin de maximizar la eficiencia en la generación de energía y mantener la autonomía total del vehículo. Sin embargo, posee varias desventajas en comparación a las demás arquitecturas de HEV, una de ellas es la necesidad de tres dispositivos de propulsión como son el ICE, el generador y la ME, esto implica que existan pérdidas en cada una de estas etapas del sistema.

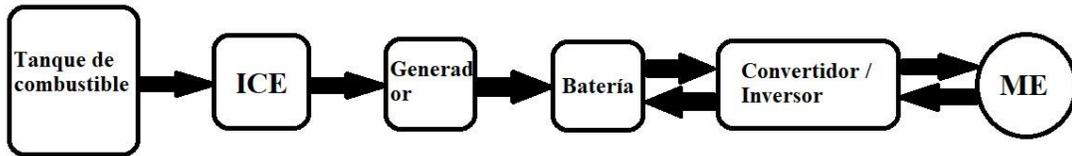


Figura 1. Arquitectura HEV en serie.

2.1.3 Arquitectura HEV en paralelo

Para la conexión del HEV en paralelo, se tiene que tanto el ICE como el motor eléctrico están conectados mecánicamente a las ruedas del vehículo, esto permite que ambos motores puedan operar de forma conjunta alcanzando valores altos de potencia cuando la demanda es elevada o bien, pueden trabajar de manera independiente, permitiendo que el vehículo pueda ser propulsado solo por el motor eléctrico en condiciones de baja demanda, en donde el ICE puede permanecer apagado por largos periodos de conducción, o por otro lado, utilizar solo el ICE como propulsión en casos que no se requiera o se encuentre sin carga la fuente de alimentación secundaria. Es posible cargar la fuente secundaria mediante la recuperación de la energía por medio del frenado regenerativo o también es posible absorber la energía excedente del ICE.

Las principales ventajas de esta configuración por sobre un esquema en serie son que no es requerido un generador, debido a que tanto el ICE, como el motor eléctrico se conectan de forma mecánica a las ruedas del vehículo, junto con esto se suma que no es necesario convertir la potencia múltiples veces lo que evita el exceso de pérdidas en los elementos eléctricos, por lo que la eficiencia del automóvil en general es mayor a la configuración en serie. Por último, al existir la posibilidad de operar tanto el ICE, como la ME de manera independiente, permite dimensionar el motor de tracción más pequeño.

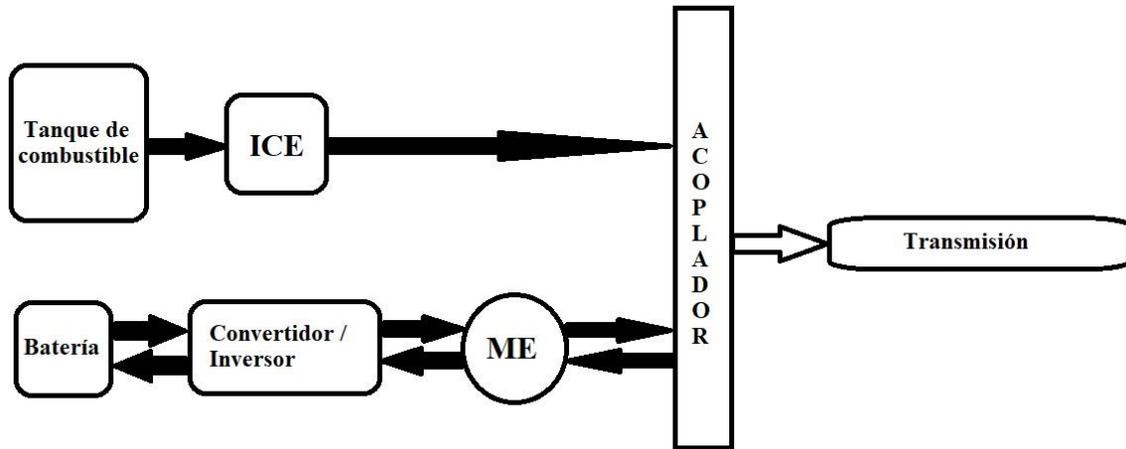


Figura 2. Arquitectura HEV en paralelo.

2.1.4 Configuración FCEV

El tipo de conexión utilizado convencionalmente para FCEV puede ser considerado en su mayoría como un vehículo híbrido en serie, donde la pila de combustible produce electricidad para alimentar al motor eléctrico. Este tipo de configuración posee la desventaja en comparación a los demás tipos de vehículos eléctricos que no permite la recuperación de energía por ningún medio, por lo que en definitiva actúa como un ICE de mayor eficiencia y con cero emisiones de gases, lo que resulta conveniente, pero que podría ser optimizado.

En base a esto es que se busca el uso de una fuente secundaria trabajando en conjunto con la pila de combustible, donde las características principales que debiese tener dicha fuente son que permita la recuperación de energía por medio del frenado regenerativo y que permita alcanzar valores peak de potencia en la ME cuando sea requerido por el operador.

De esta forma, resulta conveniente el análisis de la arquitectura del FCEV como si se tratase de un HEV, donde se concentra el estudio en la configuración en paralelo, debido a las ventajas por sobre la configuración en serie que fueron indicadas en el capítulo 2.3. La arquitectura en paralelo propuesta para el estudio del vehículo se muestra en la Figura 3, en la que se aprecia la bidireccionalidad del flujo de potencia en la fuente secundaria que permite

la absorción por parte del frenado regenerativo, o bien, por el excedente de energía producido en la fuente primaria.

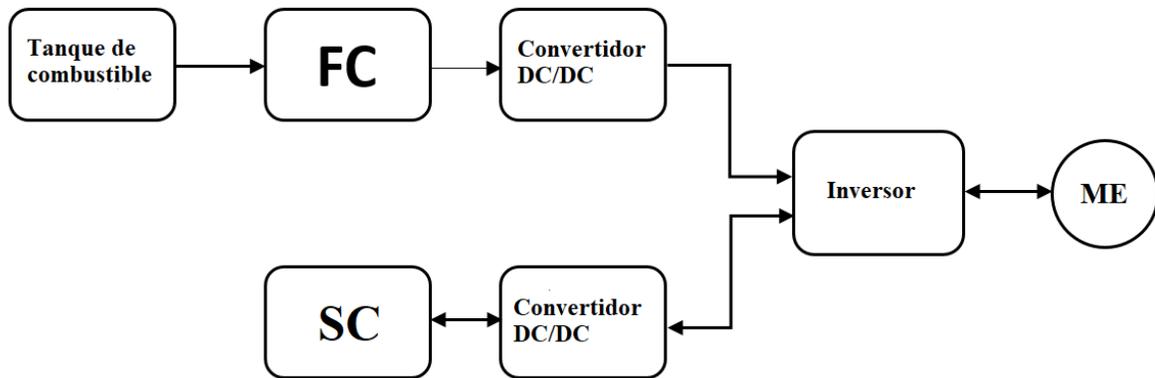


Figura 3. Arquitectura FCEV en paralelo.

2.2 Modelado vehículo eléctrico

Para el diseño de cualquier tipo de vehículo, se tienen varias consideraciones para la especificación de los componentes, lo cual siempre está respaldado por una serie de fundamentos científicos y cálculos que permiten seleccionar cada componente de manera exacta, sin necesidad de sobredimensionar demasiado estos.

En específico para un vehículo eléctrico, es importante poder definir la potencia y el torque que debe ser capaz de suministrar el motor eléctrico a utilizar, el tamaño de sus fuentes de alimentación, los convertidores DC/DC unidireccional o bidireccional dependiendo de la fuente que se vaya a implementar, el inversor encargado de transformar la corriente continua proveniente de las fuentes de alimentación a corriente alterna para ser utilizada por la máquina eléctrica, la caja reductora y diferencial, con la capacidad de transformar el torque y velocidad del motor al eje de las ruedas del vehículo, entre otras. En la Figura 4 se muestra la configuración propuesta para el diseño del vehículo con las componentes mencionadas anteriormente.

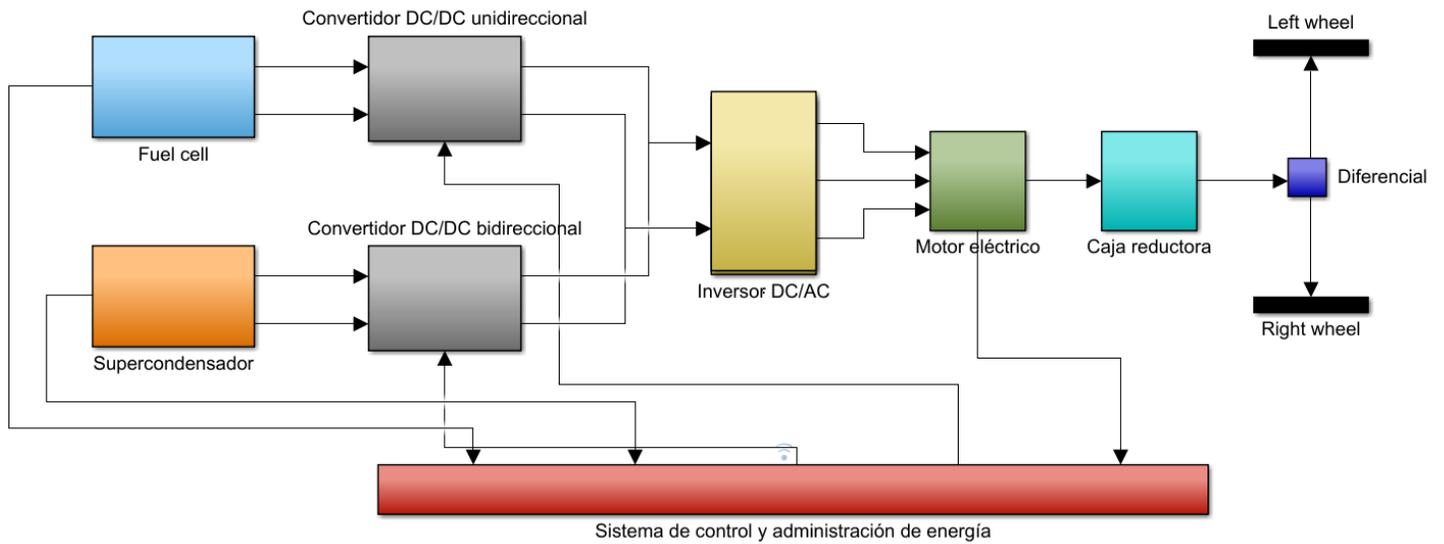


Figura 4. Configuración en paralelo propuesta para FCEV.

Se puede observar de la configuración propuesta que se requiere el uso de un convertidor dc-dc para la pila de combustible y también uno para el banco de supercondensadores, los cuales tendrán como función principal regular la tensión variable que entregan ambas fuentes y convertirla en un voltaje constante a la salida. También se considera la implementación de un inversor dc-ac que permita transformar la corriente continua por parte de ambas fuentes en corriente alterna que utiliza la ME a escoger. Por último, se considera en la arquitectura la caja reductora encargada de disminuir el giro del motor a la velocidad adecuada para las ruedas del vehículo y por otro lado, el diferencial cuya finalidad es distribuir la velocidad de las ruedas, permitiendo que giren a velocidades distintas en las situaciones que se requiera.

Ahora bien, para llevar a cabo el dimensionamiento de los componentes, es primordial conocer el comportamiento del vehículo bajo condiciones normales de funcionamiento, principalmente para especificar la potencia y torque requeridos para alcanzar el nivel de desempeño que se desea. De esta manera, se plantean las ecuaciones dinámicas que describen el esfuerzo tractivo que debe ser capaz de desarrollar el vehículo eléctrico y las fuerzas resistivas que se oponen al movimiento

La segunda ley de Newton define que la aceleración de un objeto va a ser directamente proporcional a la suma de las fuerzas que actúan sobre él e inversamente proporcional a su masa. Así, la ecuación que describirá la aceleración del vehículo es:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\sum F_t - \sum F_{rt}}{\delta M_v}$$

Donde F_t es la fuerza tractiva total del vehículo, F_{rt} la fuerza resistiva total presente, M_v la masa del vehículo y δ corresponde al factor de masa.

2.2.1 Esfuerzos resistivos

Llevado al caso del automóvil, podemos notar que son tres las principales fuerzas resistivas que enfrenta el vehículo al moverse bajo condiciones normales, las cuales dependen en gran parte del roce aerodinámico, la resistencia al rodado de los neumáticos y el peso del vehículo al afrontar una pendiente, como se observa en la Figura 5. A continuación, se muestra cómo actúa cada una de estas fuerzas y como se incluirán al modelado del vehículo.

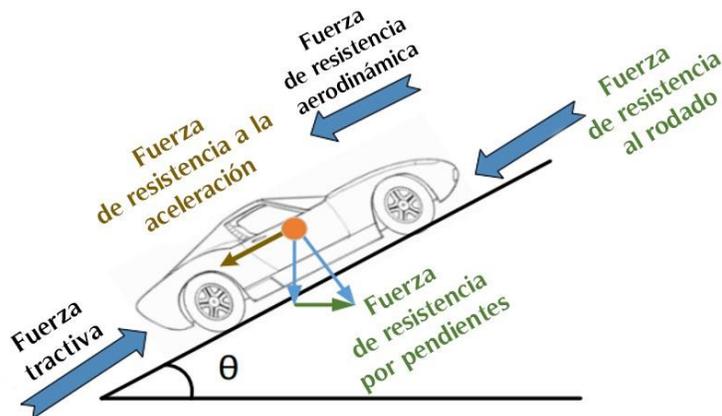


Figura 5. Diagrama de fuerzas vehículo sobre una pendiente [11].

2.2.1.1 Resistencia de rodado.

Representa la segunda mayor fuerza resistiva presente en el movimiento del vehículo o incluso la mayor si se conduce a bajas velocidades, aún más grande que la resistencia aerodinámica. La resistencia de rodado consiste en una fuerza en dirección contraria al

movimiento del vehículo y es producida por la deformación que ocurre en los neumáticos al moverse por caminos de distintos materiales. Esta deformación a su vez es provocada por las variaciones asimétricas de la presión en los puntos de contacto entre el neumático y la superficie de rodadura, esto genera que exista una mayor presión en la parte delantera del área de contacto de la rueda que en la mitad trasera.

De esta forma, la resistencia de rodadura dependerá en gran medida del tipo de superficie de contacto, presentándose una mayor resistencia de rodadura en superficies blandas.

Es por ello que para fines analíticos se establece un valor predeterminado que define la resistencia de rodado de cada tipo de superficie, el cual es llamado coeficiente de resistencia de rodado f_r , el cual es definido por la distancia en que se desplaza la reacción del suelo con respecto a la ubicación del eje de la rueda dividido por el radio efectivo del neumático, donde los principales valores para algunos tipos de superficies se encuentran indicados en la Tabla 1.

Tabla 1. Valores típicos de coeficientes de resistencia a la rodadura [21].

Superficie de la carretera	Coefficiente de resistencia a la rodadura
Neumáticos de auto sobre hormigón o asfalto	0.013
Neumáticos de auto sobre grava laminada	0.02
Rueda sobre carril	0.001 – 0.002
Neumáticos de camión sobre hormigón o asfalto	0.006 – 0.01
Asfalto	0.025
Carretera sin asfaltar	0.05
Campo	0.1 – 0.35

A partir de esto, se logra definir a partir de una ecuación cual es la fuerza de rodado del vehículo, considerando el peso de este, el coeficiente de resistencia de rodado y el ángulo de inclinación de la superficie.

$$F_{rod} = P f_r \cos(\theta) \quad (1)$$

2.2.1.2 Resistencia aerodinámica.

La resistencia aerodinámica corresponde a la fuerza ejercida por el aire cuando el vehículo se encuentra en movimiento. Este fenómeno se produce debido a que el vehículo al desplazarse debe mover consigo un volumen importante de aire, lo que a su paso genera un vacío en la parte trasera del vehículo, lo cual provoca depresiones en esta zona, por lo que

debe ser rellenada lo antes posible. Esto se puede notar en mayor medida cuando el vehículo se desplaza a grandes velocidades, lo que implica que sea necesario mover grandes cantidades de volumen de aire por unidad de tiempo en su parte frontal, mientras que se origina un gran vacío en la parte trasera del vehículo el cual no puede ser rellenado rápidamente, por lo que provoca una zona de depresión en la parte trasera del automóvil, el cual tenderá a succionar a éste, oponiéndose a su movimiento.

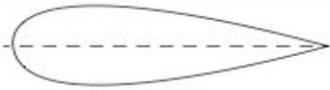
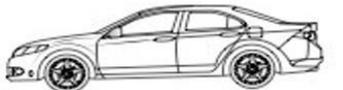
Es por esto por lo que, al momento de encontrarse en movimiento el vehículo, se debe tener en consideración tanto el volumen de aire que se empuja en la zona frontal, como el vacío generado en la zona trasera del automóvil. Dentro de los factores que influyen en este tipo de resistencia están la viscosidad, la densidad del aire y la presión, como también la forma, rugosidad, área de contacto con el aire y la velocidad relativa del vehículo.

De manera matemática, este tipo de fuerza resistiva se puede resumir en la siguiente ecuación

$$F_{aer} = \frac{1}{2} \rho A_f C_D (V + V_W)^2 \quad (2)$$

De donde V_W es la velocidad del viento y C_D se define como coeficiente de resistencia aerodinámica caracterizada por la forma del vehículo, algunos de sus valores típicos se encuentran en la Tabla 2.

Tabla 2. Valores típicos de coeficiente de resistencia aerodinámica [12].

			C_L	C_D
1	Vehículo de revolución de baja resistencia		0	0.04
2	Vehículo de baja resistencia cerca del suelo		0.18	0.15
3	Automóvil genérico		0.28	0.35
4	Prototipo vehículo de carreras		-3.00	0.75

2.2.1.3 Resistencia por pendientes

Este tipo de resistencia se produce al momento del vehículo avanzar por alguna pendiente, produciéndose una fuerza en dirección de la misma pendiente, la cual puede ser contraria al movimiento del vehículo en caso de estar ascendiendo, o puede ser a favor de este al encontrarse descendiendo.

De esta forma, se puede resumir el comportamiento de esta fuerza considerando la masa del vehículo, la fuerza de gravedad y la pendiente en cuestión, resultando la ecuación (3)

$$F_g = M_V g \sin(\Theta) \quad (3)$$

$$F_{rt} = F_{rod} + F_{aer} + F_g \quad (4)$$

Y a partir de estos tres tipos de resistencia presentes en el movimiento del vehículo, se puede obtener el esfuerzo resistivo y, por ende, el esfuerzo tractivo necesario por el vehículo para alcanzar la potencia deseada en cualquier momento.

2.2.2 Desempeño del vehículo

Al momento de diseñar el tren de potencia de un vehículo eléctrico es importante definir parámetros bajo los cuales se quiere que se encuentre el automóvil en cuestión, los cuales se deben definir bajo ciertos estándares propuestos por el diseñador y que deben ser puestos a prueba en base a las ecuaciones dinámicas del vehículo.

Dentro de los principales índices que se utilizan para medir el desempeño de un vehículo y que tendrán influencia en los resultados del modelo dinámico se consideran.

- Velocidad máxima.
- Superación de pendientes.
- Aceleración.
- Características de frenado.

Para el caso de vehículos de conducción urbana y en carretera es normal que su velocidad máxima varíe entre 120 a 180 km/h, con una aceleración de 0 a 100 generalmente mayor a los 10 segundos, sin embargo, en vehículos deportivos se alcanzan velocidades mayores a los 400 km/h con tiempos de aceleración de 0 a 100 menores a los 3 segundos, lo que implica una máquina eléctrica que permita desarrollar grandes niveles de potencia.

Así, para el diseño del tren motriz de un vehículo eléctrico, la potencia del motor como las características de la transmisión son los aspectos principales por considerar para cumplir con las especificaciones de desempeño del vehículo.

Ahora bien, en términos generales para la especificación del tren de potencia de un vehículo eléctrico se deben tener en consideración todas las características físicas del vehículo que se planea dimensionar y los esfuerzos resistivos que estos conllevan ya sea por la aerodinámica del vehículo, su capacidad de superar pendientes y también las características externas como son la velocidad del viento y la densidad del aire o el terreno bajo el cual circula el vehículo.



Capítulo 3: Sistema eléctrico en EV y HEV

3.1 Máquina eléctrica

Una máquina eléctrica (ME) es un elemento capaz de transformar energía eléctrica en energía mecánica o a la inversa, absorbiendo energía mecánica para transformarla en eléctrica. En este caso con el objetivo de poder entregar la potencia necesaria a la ME en todo momento y considerando los valores peak que se requieran, la ME debe ser acompañada por un sistema de alimentación formado por dos fuentes conectadas en paralelo debido a las ventajas que presenta este tipo de conexión, como es que no se requiere de un generador y que no es necesario convertir la potencia múltiples veces lo que incrementa la eficiencia en general del vehículo, reduciendo el exceso de pérdidas en los elementos eléctricos y además, con este tipo de conexión se permite operar la ME solo con una fuente de alimentación en momentos de bajo consumo.

Dentro de los beneficios que tiene la implementación del motor eléctrico en comparación al clásico ICE, es que ofrece una experiencia mucho más silenciosa, se disminuye en su totalidad la emisión de gases a la atmósfera, su mantenimiento resulta muy económico y poseen una eficiencia energética superior, siendo la eficiencia del ME cercana a un 70% a 80% con respecto a su fuente de alimentación, mientras que un ICE solo puede aprovechar aproximadamente un 25% de la energía química contenida en el combustible.

Hoy en día, los vehículos eléctricos presentes en el mercado pueden llegar a contar con más de una ME para impulsarse con fines de alcanzar mayores niveles de rendimiento, sin embargo, la arquitectura que se plantea en el presente trabajo solo hace uso de un motor eléctrico.

3.1.1 Características motor de tracción.

Las curvas características de operación de los accionamientos de velocidad variable para los motores de tracción se muestran en la Figura 6.

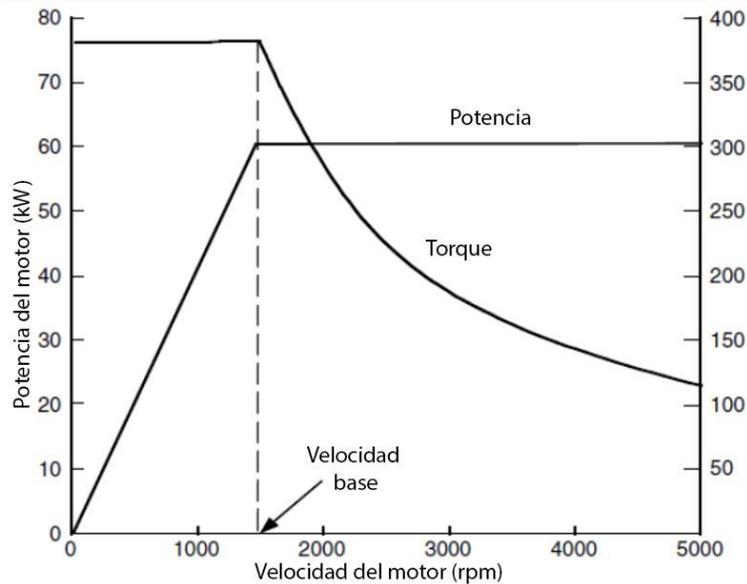


Figura 6. Curva característica motores de tracción [25].

De la figura 6 se observan dos regiones divididas por la velocidad base, la operación para velocidades por sobre este valor se considera a tensión constante y se opera con flujo debilitado, manteniendo la potencia constante.

Mientras que para el caso de la operación a velocidades inferiores a la velocidad base de la ME, la tensión es variable con respecto a la frecuencia de operación, lo que da como resultado un torque constante.

Durante la operación por sobre la velocidad base, se define el factor x como la razón entre la velocidad máxima de la ME y su velocidad base. En la Figura 7 se muestra la curva característica para distintos valores del factor x .

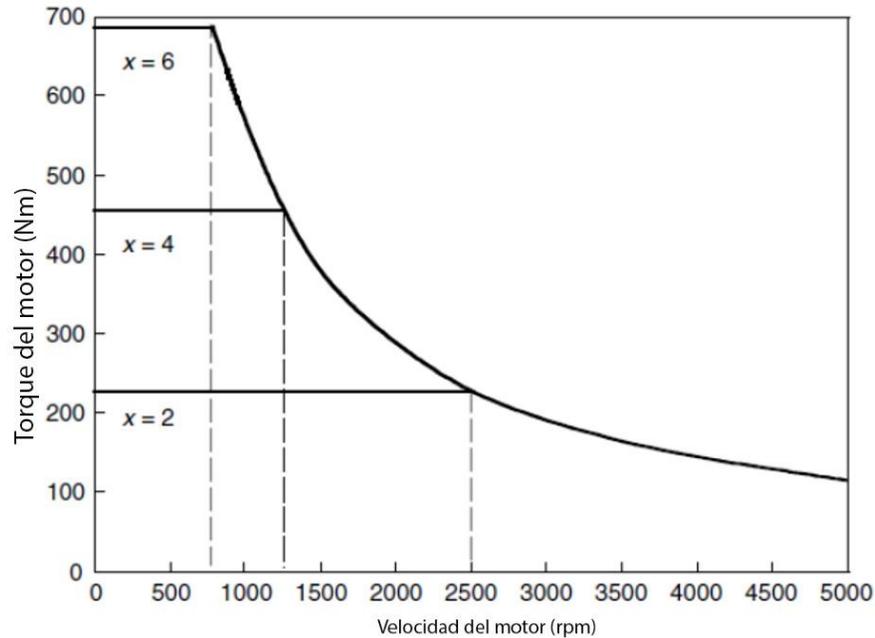


Figura 7. Curva característica con valores de factor x [25].

De esta forma, se puede observar que, para obtener un buen desempeño a bajas velocidades, se requerirá una ME con un factor X elevado, lo que implica una mayor aceleración del vehículo y permite una mayor velocidad en la subida de pendientes.

Los motores de tracción suelen tener un valor X común, para el caso de los motores de imanes permanentes poseen normalmente un factor X cercano a 2, las máquinas de inducción poseen un valor aproximado de 4, mientras que las máquinas de reluctancia poseen el factor X más elevado cercano a 6.

A continuación, se indican las opciones de motores más utilizados hoy en día con fines de electromovilidad.

3.1.1 Motor síncrono de reluctancia.

Los motores de reluctancia constan de un rotor con partes metálicas y funciona a través de la energización de bobinas que producen el RMF e impulsan el movimiento del rotor.

Este tipo de motor posee la característica de ser robusto y económico, además que permite poder entregar altos niveles de potencia sobre todo a velocidades elevadas, sin embargo, resultan poco eficientes a baja velocidad.

3.1.2 Motor síncrono de imanes permanentes.

Como su nombre lo indica, la característica principal de este tipo de motor es que consta de imanes adheridos al rotor. Este tipo de motor giran sincronizados con la frecuencia de alimentación a cualquier par hasta el máximo de potencia, además de que al estar permanentemente excitados responden de buena manera ante las variaciones de carga.

Dentro de sus ventajas se puede decir que suelen ser bastante ligeros, silenciosos y muy eficientes a velocidades bajas, sin embargo, tienden a ser más caros económicamente y tienen la desventaja que sus imanes permanentes pueden llegar a desmagnetizarse con la temperatura y que requieren elementos extra para su funcionamiento, como son sensores de posición del rotor, convertidores, entre otros.

Por otro lado, existe otro tipo de motor de imán permanente, pero sin escobillas, los cuales tienen la característica de que los imanes se encuentran en el rotor y poseen características similares a las del motor de imanes permanentes tradicional.

3.1.3 Motor de inducción

En este tipo de motor, la corriente que atraviesa el bobinado del estator genera el campo magnético, por lo que se requiere de una corriente AC trifásica para producir el RMF.

También este tipo de motor es considerado simple, económico y genera poco ruido y vibraciones, además que presenta eficiencias cercanas al 80% por lo que resulta bastante fiable y buena elección.

3.2 Fuentes de almacenamiento

3.2.1 Baterías

Las baterías son los elementos de almacenamiento de energía más utilizados hoy en día en cuanto a la electromovilidad, su funcionamiento consiste en la transformación de energía química a energía eléctrica al momento de descargarse y el procedimiento a la inversa al cargarse.

Su estructura está formada por un ánodo y un cátodo los cuales se encuentran separados por medio de un electrolito, en el que su reacción dependerá del material por el cual estén compuestas las baterías. Por otro lado, estas reacciones electroquímicas producidas dan como resultado un voltaje y potencias muy bajas, por lo que, para llevar su funcionamiento a grandes escalas, es necesario crear bancos de baterías, en donde se conectan una gran cantidad de ellas en serie y paralelo, con el fin de alcanzar el voltaje, densidad de energía y potencias deseadas.

Una de las principales características y ventajas que presentan la implementación de baterías en la electromovilidad es su bidireccionalidad, dando la posibilidad de recuperar parte de la energía cinética presente en el vehículo al momento de frenar, ayudando considerablemente el rendimiento y la carga de este mismo, especialmente en trayectos que implican constantes aceleraciones y frenados. Sin embargo, esta capacidad de recargar las baterías por medio de energía cinética se encuentra limitada por las características de cada batería, donde generalmente es posible solo recuperar aproximadamente un 30% de la energía total presente en el frenado

Ahora bien, la capacidad de almacenamiento de una batería se mide en Ampere-hora, esto indica la cantidad de carga eléctrica que pasa por los terminales de la batería cuando esta proporciona una corriente eléctrica de 1 ampere durante 1 hora. Por otro lado, en la Figura 8 se muestra el proceso de descarga de una batería, donde se puede observar que existen 2 límites de voltaje, primero el Open circuit voltaje (OCV) el cual corresponde al voltaje de la batería al no estar conectada a ningún circuito externo y por tanto no está siendo descargada. El OCV representa el valor máximo de voltaje al que puede operar una batería. Por otro lado, el Cut-off voltaje se considera el valor mínimo de voltaje al cual puede operar una batería para evitar daños permanentes en ella. De esta forma, se definen los límites máximos y

mínimos a los que puede operar una batería para evitar daños, prolongar su vida útil y asegurar su buen funcionamiento, teniendo que la capacidad que realmente es utilizada de la batería corresponde a desde cerca de un 30% hasta un 80% aproximadamente, dependiendo el tipo de batería.

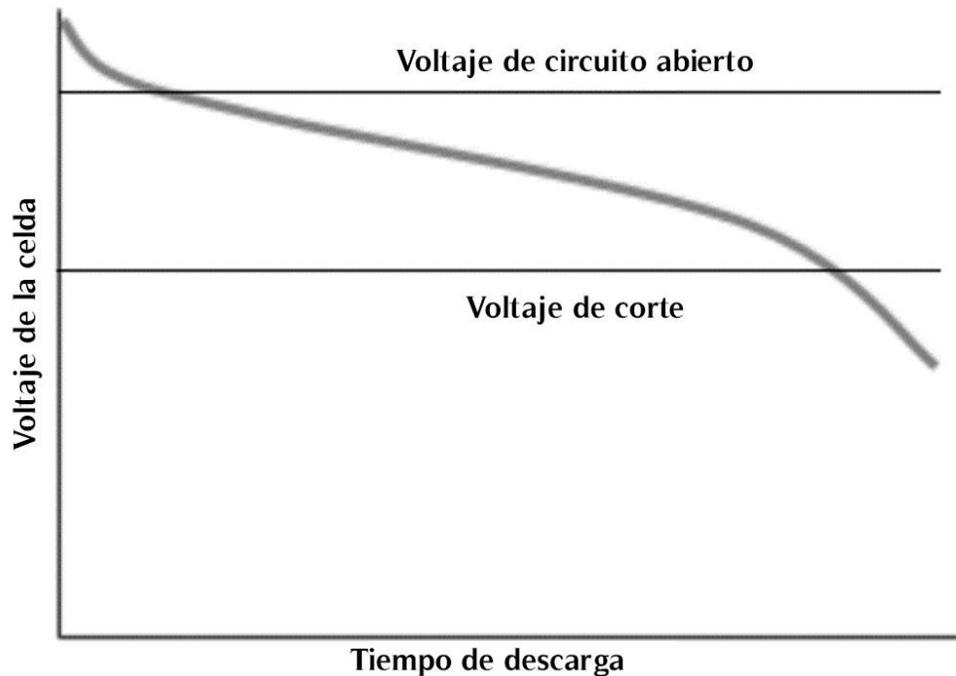


Figura 8. Ciclo de descarga batería.

Con el fin de obtener un mayor manejo de la batería, se define el concepto de estado de carga (SoC), el cual indica la relación entre la capacidad restante utilizable de la batería y su capacidad cuando está completamente cargada, de esta forma, el cambio en el SoC en un periodo de tiempo con una corriente de descarga o carga i y una capacidad en Ampere-hora $Q(i)$ se tiene que el SoC de la batería se puede expresar como:

$$SOC = SOC_0 - \int \frac{idt}{Q(i)} \quad (5)$$

Y de esta forma, la energía suministrada por la batería se expresa como

$$EC = \int_0^t V(i, SOC) dt \quad (6)$$

Por otro lado, el rendimiento y ventajas de las baterías va a depender de los componentes de los cuales esté formado, existiendo una gran variedad de posibilidades, como son baterías de plomo ácido, níquel-cadmio, níquel hierro, aluminio-aire y las más populares actualmente, las baterías de ion-litio, en todas sus variaciones. Estas últimas son bastante utilizadas debido a sus buenas características, dependiendo cual sea su composición exacta, pero en general presentan buenas características en cuanto a densidad energética y alcanzando potencias elevadas y un ciclo de vida de hasta 8 a 10 años dependiendo de su uso. En la Tabla 3 se muestran los distintos tipos de baterías utilizadas en el mercado actualmente y sus principales características de potencia máxima, energía específica y eficiencia.

Tabla 3. Características de baterías en el mercado actualmente [22]

System	Specific Energy (Wh/kg)	Peak Power (W/kg)	Energy Efficiency (%)	Cycle life	Self-Discharge (% per 48h)
Acid aqueous solution					
Lead/acid	35 - 50	150 - 400	>80	500 - 1000	0.6
Alkaline aqueous solution					
Nickel/cadmium	50 - 60	80 - 150	75	800	1
Nickel/iron	50 - 60	80 - 150	75	1500 - 2000	3
Nickel/zinc	55 - 75	170 - 260	65	300	1.6
Nickel/metal hydride	70 - 95	200 - 300	70	750 - 1200+	6
Aluminum/air	200 - 300	160	<50	?	?
Iron/air	80 - 120	90	60	500+	?
Zinc/air	100 - 220	30 - 80	60	600+	?
Flow					
Zinc/bromine	70 - 85	90 - 110	65 - 70	500 - 2000	?
Vanadium redox	20 - 30	110	75 - 85	-	-
Molten salt					
Sodium/sulfur	150 - 240	230	80	800+	0
Sodium/nickel chloride	90 - 120	130 - 160	80	1200+	0
Lithium/iron sulfide (FeS)	100 - 130	150 - 250	80	1000+	?
Organic/lithium					
Lithium-ion	80 - 130	200 - 300	>95	1000+	0.7

En la actualidad, las baterías más utilizadas en electromovilidad corresponden a las baterías de ion-litio, esto se ve respaldado por la Tabla 3 debido a la gran eficiencia que presentan y los niveles aceptables de potencia y de energía específica que poseen, sin embargo, hoy en día no se ha logrado conseguir una batería que posea las características perfectas, ya que si bien algunas baterías como las de ion-litio son eficientes en algunos

sentidos, pierden en otros, como puede ser en su incapacidad de entregar grandes potencias en periodos cortos de tiempo, por lo que se sigue buscando nuevas opciones que puedan alcanzar cada vez mejores características.

A lo largo de este trabajo no se hace uso de baterías de este tipo, sin embargo, al ser la principal fuente de alimentación utilizada hoy en día, es necesario introducirlas como método de comparación.



3.2.2 Pilas de combustible

A diferencia de las baterías químicas tradicionales, una pila de combustible genera energía eléctrica a través de reacciones químicas, en vez de almacenar energía. La principal característica que se obtiene del uso de este tipo de fuente es que se hace uso de combustible que generalmente es hidrógeno y un comburente que suele ser oxígeno, por lo que las emisiones de gases presentes en los vehículos que utilizan este tipo de fuente solo corresponden a vapor de agua.

Tanto los vehículos híbridos basados en ICE, como los basados en pilas de combustible presentan semejanzas en aspectos como el tiempo de recarga y el rango de conducción que permiten, sin embargo, al ser una tecnología que aún se está masificando, carece de una infraestructura de carga.

Ahora bien, al igual que en las baterías, la pila de combustible cuenta con un ánodo el cual es alimentado con combustible (H_2), que al hacer contacto con el ánodo y el catalizador, libera electrones capaces de cruzar a través del electrolito utilizado hasta el cátodo, como se muestra en la Figura 9.

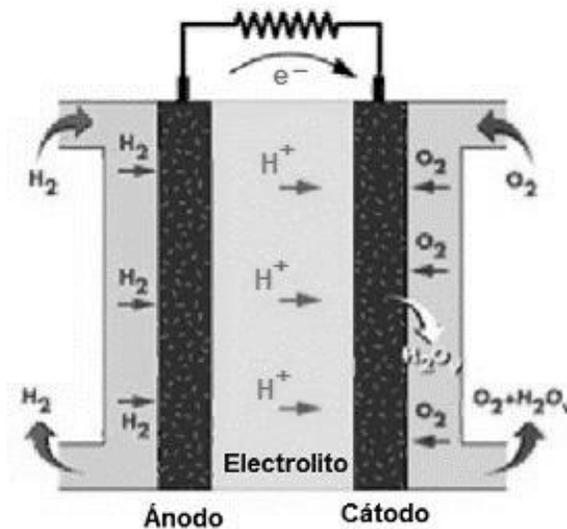


Figura 9. Principio de funcionamiento FC [23].

Existen distintos tipos de pilas de combustible, los cuales dependerán del combustible y electrolito utilizado en ellas, dentro de los más utilizados actualmente se encuentran los siguientes 6 tipos.

- Membrana de intercambio de protones (PEM)
- Alcalina (AFC)
- Ácido fosfórico (PAFC)
- Carbonato fundido (MCFC)
- Óxido sólido (SOFC)
- Metanol directo (DMFC)

En la **Tabla 4** se indican las principales características y ventajas de cada uno de ellos.

Tabla 4. Tipos de pila de combustible y sus características.

	PEMFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC	DMFC
Temperatura de operación °C	60-80	100-120	200-250	600-700	800-1000	50-120
Rango de potencia	5-250 [kW]	5-150 [kW]	50 [kW]- 11[MW]	100 [kW]- 2[MW]	100-250 [kW]	5 [kW]
Estado de electrolito	Sólido	Líquido	Líquido	Líquido	Sólido	Sólido
Ventajas	Baja temperatura. Arranque rápido. Baja corrosión y mantenimiento. Coste del catalizador. Sensibilidad a las impurezas del combustible.	Mayor eficiencia Reacción catódica más rápida Sensibilidad al CO ₂ del aire.	Acepta H ₂ impuro Coste del catalizador. Arranque lento y baja densidad de potencia.	Reformado interno Cogeneración Corrosión por altas temperaturas. Arranque lento y baja densidad de potencia.	Reformado interno Cogeneración Corrosión por altas temperaturas. Arranque lento	No necesita reformador de combustible. Baja eficiencia
Desventajas						
Eficiencia	40 – 60 [%]	60 – 70 [%]	36 – 42 [%]	50 – 60 [%]	50 – 60 [%]	>40 [%]

En base a esto, es posible visualizar que, para fines de implementación en vehículos eléctricos, la que mejor se adapta es la pila de combustible PEM, debido a sus rangos de potencia y temperaturas óptimos para este tipo de trabajo.

Dentro de las desventajas que se pueden encontrar de las pilas de combustible PEM, en comparación a otras fuentes de alimentación eléctricas, es que la FC es una fuente unidireccional, es decir, solo es capaz de entregar energía eléctrica durante su operación, sin la cualidad que tienen las baterías o bancos de supercondensadores de recuperar parte de la energía utilizada por medio del frenado regenerativo.

Por otro lado, si bien poseen un arranque relativamente rápido, este no es inmediato, por lo que existe un tiempo típico al empezar a hacer uso de la FC en el que no es posible obtener la potencia total deseada.

Además, las FC suelen caracterizarse por tener una respuesta dinámica lenta, lo que en casos de que exista una demanda de potencia elevada repentinamente, es difícil que la misma FC pueda suplir con ella.

Es por estas razones que una buena estrategia que da solución a todas estas desventajas es la implementación de un sistema de alimentación híbrido, a través de una fuente secundaria de baterías y/o banco de supercondensadores, los cuales tienen la particularidad de que pueden entregar potencias por sobre la demanda promedio en cualquier instante y de forma inmediata aportar potencia en el arranque de las pilas de combustible, y también poder almacenar la energía recuperada por medio del frenado regenerativo.

Para poder determinar las prestaciones que tendrá la FC se define su curva de polarización, la cual se divide en 3 regiones: Región 1 o zona de pérdidas por activación, región 2 o zona de pérdidas óhmicas y región 3 zona de pérdidas por concentración, donde se busca operar siempre en la región 2, donde su comportamiento es casi lineal y solo se encuentran presentes las pérdidas dentro de la pila de combustible.

A continuación, se presenta la ecuación de Nerst, la cual muestra la máxima tensión que es posible extraer de la FC, si no se consideran las pérdidas térmicas.

$$E_{th}(T, P) = -\Delta G^\circ \frac{T}{nF} + \frac{RT}{nF} \ln(Q) \quad (7)$$

Y la curva de polarización típica se muestra en la Figura 10.

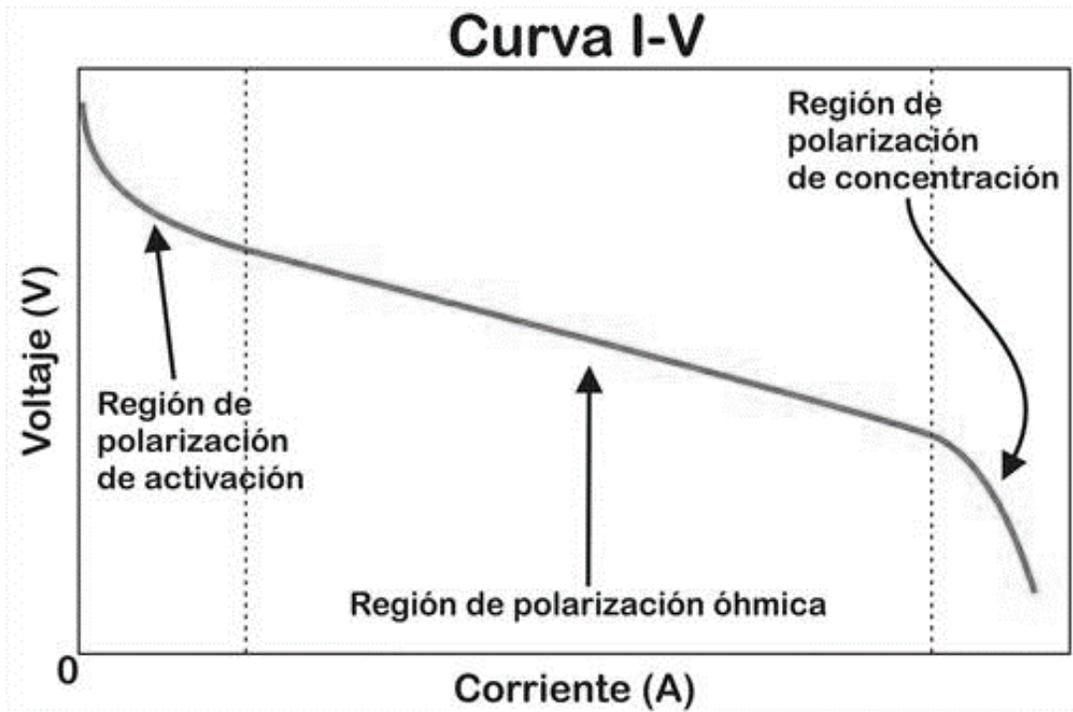


Figura 10. Curva de polarización pila de combustible [24].

Así, al considerar las pérdidas en cada una de las regiones se puede obtener la tensión total que es capaz de entregar la FC, como se muestra en la siguiente ecuación.

$$V = V_{th} - V_{act} - V_{ohm} - V_{con} \quad (8)$$

Por otro lado, de las regiones de operación mostradas en la figura Figura 10 se puede notar que las pérdidas por activación son producidas a alto nivel de voltaje y baja densidad de corriente, además se considera que esta corresponde a la energía necesaria para iniciar la reacción electroquímica donde los principales factores que influyen en estas pérdidas son el catalizador, las condiciones de operación y los mecanismos de reacción.

En la región de pérdidas óhmicas presenta un comportamiento prácticamente lineal, donde se presentan mayormente pérdidas al interior de la pila, siendo los factores que influyen en estas pérdidas la conductividad y el espesor del material y la resistencia de contacto.

Por último, las pérdidas en la región de concentración son producidas a alta densidad de corriente, donde la generación de agua líquida impide que el oxígeno alcance el catalizador y se produzca la reacción catódica provocando una caída considerable de tensión. Uno de los principales factores que influyen en estas pérdidas es el bloqueo de las superficies por impurezas.

3.2.3 Supercondensadores

Un supercondensador es un elemento electroquímico capaz de sustentar una densidad de energía inusualmente alta en comparación a los condensadores normales que, a diferencia de las baterías, almacenan la energía en forma de campo eléctrico mediante acumulación de cargas eléctricas entre dos placas paralelas con un dieléctrico que las separa, permitiendo cargar y descargar grandes cantidades de energía en periodos cortos de tiempo.

Dependiendo de sus aplicaciones, es posible encontrar distintos tipos de supercondensadores, como pueden ser los capacitores eléctricos de doble capa (EDLC), pseudocapacitores (PsCs) y capacitores híbridos (HCs).

Dentro de este estudio, se hace énfasis en el uso de los EDLC, cuyas características son ideales para su implementación en electromovilidad, debido a que permite entregar y absorber altas cantidades de potencia en cortos periodos de tiempo, presentan una densidad energética alta en comparación a los condensadores comunes, su eficiencia les permite recuperar gran parte de la energía utilizada y además, poseen una larga vida útil.

Una de las grandes ventajas de los supercondensadores en su aplicación en vehículos eléctricos es su capacidad de entregar y recibir grandes cantidades de corriente en periodos de tiempo muy reducidos, esto se traduce en que son capaces de suministrar potencias muy elevadas de manera muy rápida lo que los vuelve una excelente opción al momento de utilizarlos como fuente secundaria en conjunto con alguna otra fuente de alimentación como pueden ser bancos de baterías, pilas de combustible o incluso con vehículos ICE, teniendo tan buen rendimiento que ya ha llegado a ser implementado por modelos de vehículos deportivos de gran renombre, como es el caso del Lamborghini SIÁN FKP 37.

Otra importante característica de los SC es que, cuentan con una densidad de potencia hasta 10 veces mayor que las baterías de ion-litio, lo que implica que es posible entregar energía como también recibirla de manera mucho eficaz y rápida, lo que lo vuelve una mejor opción que las baterías tradicionales si se considera solo el concepto de frenado regenerativo.

En la Tabla 5 se muestran a manera de comparación las características de los SC y las baterías de ion-litio, donde si bien se recalcan las características eléctricas de ambos, resulta importante observar la diferencia en cuanto al peso y volumen que poseen, donde los

supercondensadores al almacenar su energía de manera electrostática, no requieren de otros elementos activos como es el caso de las baterías, logrando los primeros ocupar un tercio del espacio que ocupa una batería normal y con un peso que puede ser hasta 5 veces menor que el de las baterías de ion-litio presentes en el mercado actualmente.

Además, al igual que en el caso de las baterías, es necesario modelar una conexión de varias celdas de SC con el fin de alcanzar los voltajes y potencias deseadas.

Tabla 5. Comparación baterías ion-litio y supercondensadores en el mercado [18].

	SC	Batería ion-litio
Tiempo de carga	1-10 [s]	10-60 [min]
Ciclo de vida	10000 +	1000 +
Tensión celda	0.7 -3.2 [V]	2.3-3.7 [V]
Energía específica	5 [Wh/kg]	100-200 [Wh/kg]
Potencia específica	>10000 [W/kg]	>1000 [W/kg]
Vida útil	10-15 [años]	5-10 [años]
Eficiencia	97-98 [%]	94-95 [%]
Rango de temperatura	[-40,70] [°C]	[-20,60] [°C]
Peso	200 – 500 [g]	1000 - 1800 [g]
Volumen	0.0003 [m ³]	0.0009 [m ³]

Es aquí donde se evidencia la principal desventaja de los bancos de SC en vehículos eléctricos la cual es su baja energía específica en comparación a otros depósitos de almacenamiento como se observa en la Tabla 5. Es por ello que su implementación en la electromovilidad aún no tiene demasiada popularidad, sin embargo, su utilización como fuente secundaria entregando los valores peak de potencia que sean requeridos si resulta bastante llamativo en especial cuando se considera una fuente primaria como es la pila de combustible debido a que el banco de SC suple las principales carencias que presentan las FC, por lo que resulta prometedor el estudio del uso de ambas fuentes en un sistema híbrido.

3.2.3.1 Principio de funcionamiento SC

El principio de funcionamiento de los SC consiste en la implementación de dos electrodos sumergidos en un electrolito, donde al aplicarse un voltaje en los terminales del condensador, provoca la aparición de burbujas en el electrolito creando así una doble capa en la interface de ambos la cual a su vez incrementa el área efectiva del dispositivo, produciendo una alta capacidad.

Ahora bien, dentro de las especificaciones que se deben tener en consideración esta la energía total capaz de almacenar el banco de SC, la cual puede ser calculada por la ecuación

$$E_{SC}(t) = \frac{1}{2} CV_C^2(t) \quad (9)$$

Como al igual que en las baterías, no es recomendable llevar a 0 la energía total dentro del SC, por lo que la ecuación anterior se reemplaza por

$$E_{SC,util}(t) = \frac{1}{2} C \left(V_{C,max}^2(t) - V_{C,min}^2(t) \right) \quad (10)$$

Y el estado de carga queda definido por

$$SOC_{SC} = \left(\frac{V_C}{V_{max}} \right)^2 \quad (11)$$

Por último, para el modelado de un supercondensador en términos de electromovilidad permite despreciar varios elementos, pudiendo ser resumido en un circuito equivalente como se muestra en la Figura 11 y presentando una curva de descarga considerablemente lineal, como se muestra en la Figura 12.

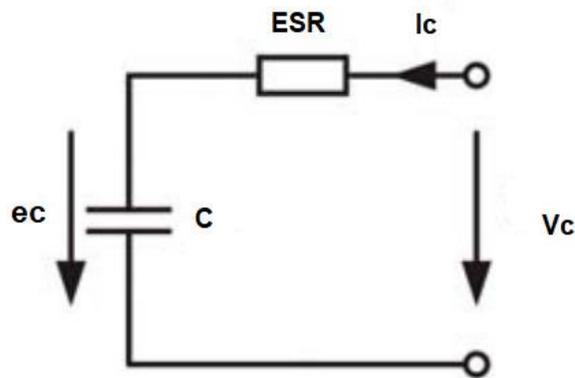


Figura 11. Circuito equivalente simple SC.

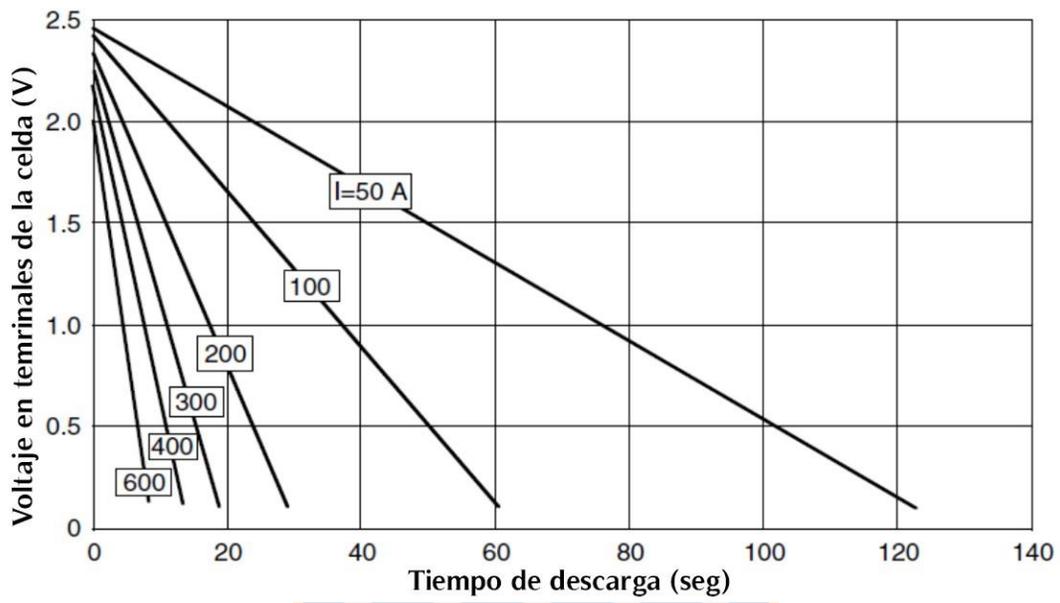


Figura 12. Curva de descarga para distintas características de corriente de SC [15].



3.3 Convertidores DC/DC

Los convertidores DC/DC corresponden a un tipo de convertidor de potencia, el cual transforma corriente continua de un nivel de tensión a otro. Son dispositivos que utilizan electrónica de potencia, teniendo dentro de sus principales aplicaciones su uso para el control en motores eléctricos o en cualquier aplicación donde se requiera adaptar la tensión desde la fuente a la carga, ya sea para elevar o reducir su voltaje.

Hacer uso de convertidores DC/DC permite también regular la potencia que pasa en ambas direcciones, en caso de convertidores bidireccionales, esto permite controlar tanto la energía requerida en cada momento por el vehículo eléctrico, como también el proceso de recuperación de la energía por medio del frenado regenerativo.

El principio de operación de los convertidores DC/DC electrónicos se basa en la conmutación, almacenando la energía de entrada por un breve periodo de tiempo y entregándola en la salida a una distinta tensión. Esto se logra a través de dispositivos almacenadores de energía como son los capacitores a través de campo eléctrico, o bien a través de inductores por medio de campo magnético. Además de esto, para lograr la conmutación se utilizan dispositivos semiconductores como pueden ser transistores y/o diodos, los cuales efectúan una operación a modo de interruptores y son dirigidos generalmente por algún sistema PWM.

A continuación, se presentan algunos de los tipos de convertidores DC/DC disponibles hoy en día, dependiendo de la función para la cual sea requerido.

3.3.1 Convertidor buck (reductor)

El convertidor reductor buck es un convertidor dc-dc, el cual se utiliza principalmente con la finalidad de reducir la tensión de salida. Esto se logra mediante el uso de un inductor controlado por dispositivos semiconductores, que por lo general consisten en un transistor y un diodo, los que se encargan de conmutar la conexión entre la carga y la fuente. En la Figura 13 se presenta el circuito para el convertidor buck.

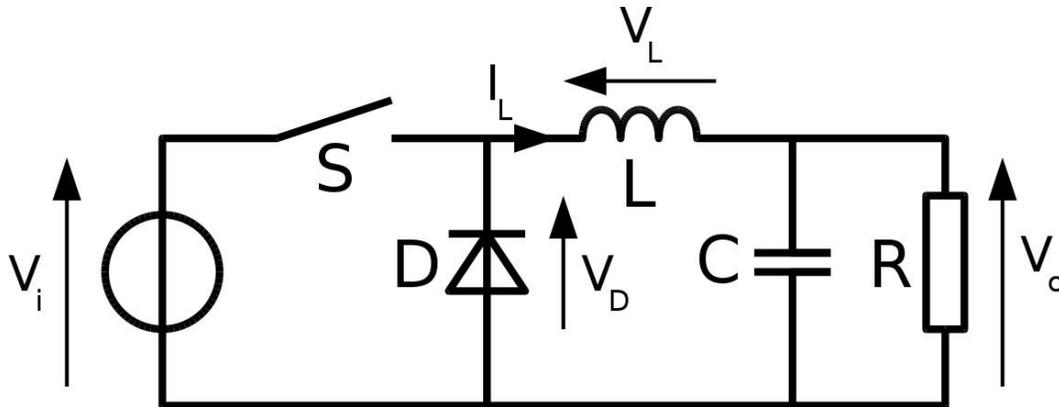


Figura 13. Circuito convertidor buck.

Ahora bien, se definen dos modos de operación para este tipo de convertidor, los cuales son.

- Modo de conducción continua (CCM)

Este tipo de conducción se caracteriza ya que la corriente del inductor es continua en todo momento, sin llegar a cero. En este caso, se puede relacionar el ciclo de trabajo y los voltajes de entrada y salida del convertidor por medio de la siguiente ecuación.

$$V_o = V_i D \quad (12)$$

- Modo de conducción discontinuo (DCM)

El DCM resulta menos utilizado que el CCM debido a que presenta mayores pérdidas de energía durante su funcionamiento, sin embargo, es utilizado en distintas aplicaciones que se requiere de sus características de control.

A diferencia del CCM, el DCM se produce cuando la corriente del inductor se reduce a cero en algún momento durante el ciclo de conmutación. En este modo, la corriente del

inductor no siempre fluye, lo que significa que la energía almacenada en el inductor se libera en intervalos discretos en lugar de ser liberada continuamente.

Para diferenciar cuando se opera en uno o en otro modo, se establece una inductancia crítica para la cual, cualquier valor que se encuentre por sobre él, implicará un funcionamiento en CCM. La siguiente ecuación describe el valor mínimo de esta inductancia.

$$L \geq \frac{(1 - D)R}{2f_s} \quad (13)$$

De la misma forma, se define el condensador crítico a utilizar para limitar el voltaje de rizado producido por la corriente que circula por la inductancia.

$$C \geq \frac{(1 - D)V_o}{8V_r L f_s^2} \quad (14)$$

Por último, para incrementar la eficiencia del convertidor buck es ideal trabajar con frecuencias relativamente altas e intentado reducir al máximo el tamaño de los componentes utilizados (L y C).

3.3.2 Convertidor boost (elevador)

Caso contrario a la función del convertidor buck, el convertidor elevador boost tiene como objetivo obtener tensiones mayores a la salida, en comparación a la entrada del convertidor y suministrar dicha tensión de manera controlada y constante. El funcionamiento es similar al convertidor buck, ya que dependerá principalmente de elementos semiconductores capaces de conmutar la conexión entre la carga y la fuente, En la Figura 14, se presenta el circuito para el convertidor boost.

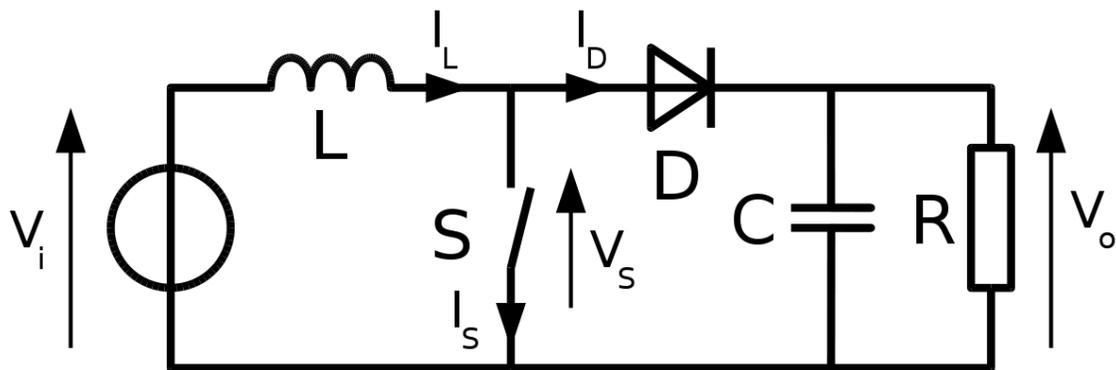


Figura 14. Circuito convertidor boost.

Al igual que en el convertidor buck, se distinguen también el CCM y DCM, de esta forma, se indican las ecuaciones para ambos modos de conducción.

- Modo de conducción continua (CCM)

La relación entre el voltaje de entrada y salida del convertidor y el ciclo de trabajo a utilizar queda definida por.

$$V_o = \frac{V_i}{1 - D} \quad (15)$$

- Modo de conducción discontinua (DCM)

Se toman las mismas consideraciones que en el convertidor buck, teniendo una impedancia crítica para la cual el convertidor opera en CCM, la cual queda definida por la siguiente expresión.

$$L \geq \frac{V_o(1 - D)D}{f_s \Delta i_L} \quad (16)$$

Mientras que, para mantener la corriente en la carga distinta de cero en todo momento, se requiere un capacitor cuya función es disminuir el rizado en el voltaje de salida y suministrar corriente en los momentos que no se encuentre encendido el diodo.

De esta forma, el condensador a utilizar debe tener como mínimo un valor de capacitancia descrito en la siguiente ecuación.

$$C \geq \frac{I_o D}{8 f_s \Delta V} \quad (17)$$

3.3.3 Convertidor buck-boost (reductor-elevador)

El convertidor buck-boost es un tipo de convertidor dc-dc, el cual presenta las características de los dos tipos de convertidor vistos en el inciso anterior, siendo capaz de elevar el voltaje de la salida con respecto a la entrada, como también reducirlo, según se requiera. En la Figura 15 se muestra el circuito para un convertidor buck-boost.

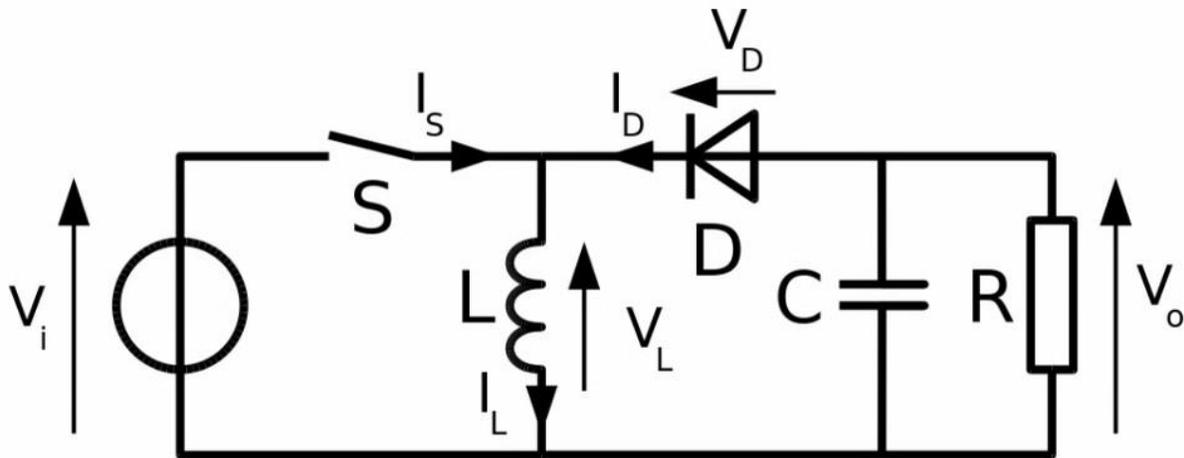


Figura 15. Circuito convertidor buck-boost.

En la operación del convertidor buck-boost se tendrán dos tipos de funcionamiento. El primero se caracteriza mayormente por tener una tensión con polarización inversa en la salida, mientras que el segundo tipo de funcionamiento no presenta la característica inversora, permite trabajar tanto como elevador, como reductor y permite además el uso de la misma inductancia para ambos modos de trabajo.

Como ya se ha visto, el proceso de control de voltaje es llevado a cabo por medio de dos semiconductores, los cuales permiten llevar a cabo la conmutación del conexionado.

En específico para los intervalos en que el switch se encuentra ON, la fuente se conecta directamente al inductor, el cual se encarga de almacenar energía, mientras el condensador conectado suministra corriente a la carga de salida, evitando en todo momento que esta sea cero.

Para los intervalos en que el switch se encuentra en OFF, se desconecta la fuente de voltaje y el inductor entrega la energía almacenada al conectarse al condensador y a la carga.

Ahora bien, para modo de conducción continuo se calcula la variación de la corriente del inductor cuando el switch está ON.

$$\Delta I_{ind,on} = \int_0^{DT} dI_{ind} = \int_0^{DT} \frac{V_i}{L} dt = \frac{V_i DT}{L} \quad (18)$$

Cuando el switch está OFF se tiene.

$$\Delta I_{ind,off} = \int_0^{(1-D)T} dI_{ind} = \int_0^{(1-D)T} \frac{V_o}{L} dt = \frac{V_o(1-D)T}{L} \quad (19)$$

Considerando que el convertidor opera en régimen permanente, se debe cumplir que la energía almacenada en los componentes sea igual al inicio y final de cada ciclo, así la energía del inductor es de:

$$E = \frac{1}{2} L I_{ind}^2 \quad (20)$$

Y la suma de las variaciones en los estados ON y OFF debe ser 0.

$$\Delta I_{ind,on} + \Delta I_{ind,off} = 0 \quad (21)$$

Lo que, al reemplazar y despejar, nos da como resultado la relación del ciclo de trabajo y los voltajes de entrada y salida del convertidor.

$$D = \frac{V_o}{V_o - V_i} \quad (22)$$

Se puede obtener así el valor de inductancia mínimo para que el convertidor solo opere en CCM y no en DCM como sigue.

$$L > \frac{R(1-D)}{2f_s} = \frac{V_o(1-D)}{2f_s I_o} \quad (23)$$

Por último, el valor del capacitor se calcula al igual que en el convertidor boost.

$$C > \frac{DV_o}{V_r R f_s} = \frac{I_o D}{f_s \Delta V_H} \quad (24)$$

3.4 Sistema de frenado

3.4.1 Importancia del sistema de frenado

El sistema de frenado es uno de los componentes más importantes de cualquier vehículo, ya que garantiza la seguridad y control durante la operación de este. En el caso de los vehículos eléctricos, el diseño y dimensionamiento adecuado del sistema de frenado se vuelve aún más crítico debido a las características particulares de este tipo de vehículos. En esta sección, se aborda la importancia del sistema de frenado y la necesidad de incorporar tanto un conjunto de frenado convencional o mecánico como un sistema de frenado ABS y frenado regenerativo en un vehículo eléctrico basado en pilas de combustible y supercondensadores.

En los vehículos eléctricos, el sistema de frenado desempeña un papel esencial en la eficiencia energética y en la recuperación de energía durante la desaceleración y frenado. Además, debido a la naturaleza del tren motriz eléctrico, los vehículos eléctricos tienden a tener un centro de gravedad más bajo en comparación con los vehículos de combustión interna, lo que puede afectar las características de frenado y la estabilidad durante el frenado.

Si bien se busca que en los vehículos eléctricos se priorice el uso del frenado regenerativo para la recuperación de energía al desacelerar, en general solo es posible recuperar en torno a un 30% de la energía, el otro 70% es disipado en los frenos mecánicos.

3.4.2 Frenado mecánico

El sistema de frenado convencional en vehículos eléctricos e híbridos se basa en la fricción para reducir la velocidad del vehículo. Cuando el conductor presiona el pedal de freno, se activa un cilindro maestro que genera presión hidráulica la cual se transmite a través de las líneas de freno hasta los calipers que se encuentran en cada rueda del vehículo. Dentro de estos calipers, hay pistones y pastillas de freno que al llegar la presión hidráulica a los calipers produce que los pistones empujen las pastillas de freno contra los discos de freno que están conectados a las ruedas. La fricción generada entre las pastillas y los discos de freno crea una resistencia que reduce la velocidad del vehículo. Este proceso se repite en cada rueda, permitiendo que el vehículo desacelere y se detenga de manera efectiva.

También es importante mencionar que el sistema de frenado convencional genera calor debido a la fricción. Por esta razón, los discos de freno suelen tener ventilación para ayudar a disipar el calor de manera eficiente y evitar el sobrecalentamiento.

El frenado convencional se utiliza en combinación con el frenado regenerativo en vehículos eléctricos e híbridos para maximizar la eficiencia y la recuperación de energía durante el frenado.

3.4.3 Sistema ABS

El sistema de frenos antibloqueo (ABS) en los vehículos eléctricos e híbridos es un componente fundamental para garantizar la seguridad y el control durante situaciones de frenado críticas, siendo su objetivo principal el evitar el bloqueo de las ruedas, lo que podría llevar a una pérdida de tracción y control del vehículo.

El ABS opera utilizando una serie de sensores colocados en cada rueda del vehículo, estos sensores monitorean constantemente la velocidad de rotación individual de cada rueda durante el frenado. Si el sistema detecta una tendencia a que una o varias ruedas se bloqueen es activado de inmediato.

Cuando el ABS se activa, se inicia un proceso rápido y preciso para evitar el bloqueo de las ruedas. El módulo de control del ABS recibe información de los sensores y toma medidas para mantener un frenado efectivo y seguro. Una de las acciones clave del ABS es modular la presión hidráulica en cada rueda de forma independiente. Para lograrlo, utiliza solenoides o válvulas controladas electrónicamente. Estos dispositivos permiten liberar y reaplicar la presión de frenado en intervalos muy cortos de tiempo, generalmente varias veces por segundo.

Cuando se detecta el bloqueo inminente de una rueda, el ABS reduce la presión hidráulica en esa rueda específica. Al disminuir la presión de frenado, se evita que la rueda se bloquee y se recupera la tracción. Una vez que la rueda vuelve a girar libremente, el ABS reaplica rápidamente la presión de frenado para continuar la desaceleración. Este proceso de liberación y reaplicación de la presión de frenado se repite de forma continua mientras el ABS está activo.

El objetivo es mantener una fricción óptima entre los neumáticos y la superficie de la carretera ya que al prevenir el bloqueo de las ruedas, el ABS ayuda a mantener el control del vehículo y evita que se produzcan derrapes o pérdida de estabilidad. En resumen, el sistema ABS en los vehículos eléctricos e híbridos utiliza sensores y válvulas para modular la presión de frenado en cada rueda, evitando el bloqueo y permitiendo un frenado controlado y seguro. Esta tecnología contribuye significativamente a la seguridad vial al mantener la tracción y la estabilidad del vehículo durante situaciones de frenado críticas.

3.4.4 Frenado regenerativo

El frenado regenerativo es una característica clave en los vehículos eléctricos e híbridos que permite aprovechar la energía cinética durante la desaceleración y convertirla en energía eléctrica utilizable. Durante este proceso, el motor eléctrico cambia su función para actuar como generador en vez de motor, absorbiendo la energía proveniente del frenado y almacenándola en las fuentes bidireccionales presentes, las cuales pueden ser baterías o supercondensadores, lo que aumenta considerablemente la autonomía de estas fuentes y, por ende, la autonomía del vehículo.

Por otro lado, el freno regenerativo por sí solo no es suficiente para poder detener un automóvil en cualquier momento. Factores como el estado de carga de las baterías o supercondensadores impiden que la energía pueda ser absorbida si se encuentran completamente cargados, por lo que cuando se requiere una desaceleración mayor, el sistema de frenos mecánicos se activa para proporcionar la fuerza de frenado adicional necesaria.

Es por esto que, las fuentes de alimentación presentan limitaciones en la potencia que son capaces de recuperar.

La ecuación (25) describe la potencia debido al frenado regenerativo en los terminales de una batería o banco de supercondensadores.

$$P_{bi} = \frac{\alpha V}{\eta_t \eta_m} \left(M_v g (f_r + i) + \frac{1}{2} \rho C_D A_f V^2 + M_v \delta \frac{dV}{dt} \right) \quad (25)$$

De esta ecuación se define el factor de frenado regenerativo α el cual corresponde al porcentaje de la energía relacionada con el frenado que es posible recuperar, este factor es una función de la fuerza de frenado aplicada y el diseño del tren motriz. El factor de frenado regenerativo no posee un valor específico, ya que depende directamente de las especificaciones del vehículo y de la fuente de alimentación encargada de absorber la energía.

Ahora bien, existen fabricantes que permiten ajustar el nivel de absorción del frenado regenerativo, permitiendo que el conductor pueda determinar el porcentaje de energía a ser recuperada durante el frenado, variando dentro de los rangos accesibles por la fuente de alimentación. Para el caso de las baterías la capacidad de recuperación de energía durante el frenado oscila entre un 10% a un 30% de la energía cinética del vehículo en movimiento. Donde dicho valor puede verse afectado por factores como la eficiencia del sistema de frenado regenerativo, la velocidad, el peso del vehículo y las condiciones de conducción.

Para el caso de los supercondensadores, al igual que para las baterías no existe un valor específico del factor de frenado regenerativo, sin embargo, los SC al tener una mayor densidad de potencia, les permite absorber la energía durante el frenado de una manera mucho más eficiente y en un periodo corto de tiempo. En cuanto al porcentaje de energía que son capaces de recuperar durante el frenado, este depende de distintos factores, como son el estado de carga del SC, el tamaño de este último o también de la estrategia de control utilizadas, pero en general, se considera para motivos de cálculos que la energía cinética del vehículo en movimiento que es capaz de recuperar es de aproximadamente un 80% [1], lo cual lo vuelve una alternativa mucho más eficiente en cuanto a la recuperación de energía que las baterías.

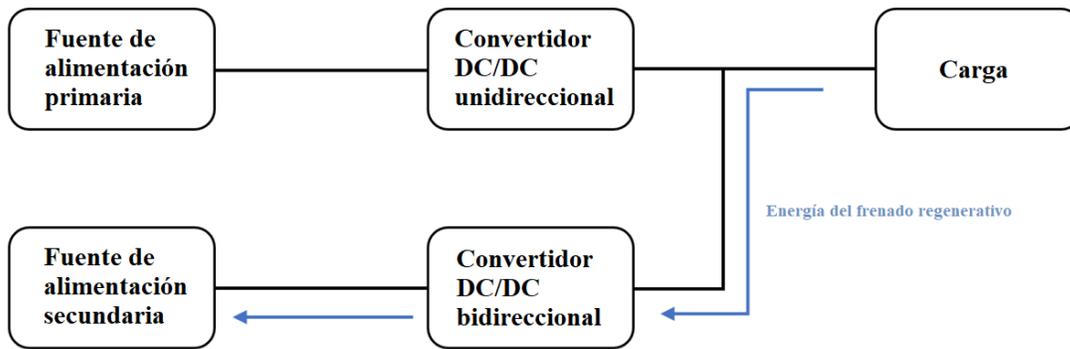


Figura 16. Configuración absorción energía del frenado regenerativo.

En la Figura 16 se muestra el esquema propuesto para la absorción de energía durante el frenado regenerativo, en el cual se considera para el presente trabajo que la fuente primaria de alimentación corresponde a un banco de pila de combustible, mientras que la fuente secundaria corresponde al banco de supercondensadores el cual tiene un valor de factor de frenado regenerativo $\alpha = 80\%$. Además de que se observa la necesidad de implementar un convertidor dc-dc bidireccional para el banco de supercondensadores debido a que se requiere entregar potencia desde este hacia la máquina eléctrica, como también recibir energía desde la máquina eléctrica hacia el banco de supercondensadores.

Capítulo 4: Dimensionamiento del vehículo eléctrico

4.1 Especificación máquina eléctrica

El primer paso en el diseño del vehículo eléctrico a especificar es definir las características físicas aproximadas que se espera que posea y los principales parámetros de rendimiento que se desea satisfacer, como son la aceleración, operación en pendientes, velocidad máxima, etc.

En la Tabla 6 se muestran las especificaciones de diseño definidas y que corresponden a un vehículo típico, donde además se consideran las condiciones externas del automóvil como es el movimiento por un camino asfaltado, es decir, tendrá un $f_r = 0.013$, con una inclinación del 5%, una densidad del aire de $1.21 \text{ [Kg/m}^3\text{]}$, un coeficiente de resistencia aerodinámica $C_d = 0.3$ y una velocidad del viento despreciable.

Tabla 6. Parámetros a considerar para diseño de vehículo eléctrico.

Peso en vacío	1650 [Kg]
Peso total	1950 [Kg]
g	9,81 [m/s ²]
Alto	1,5 [m]
Ancho	1,8 [m]
Af	2,7 [m ²]
Largo	4,7 [m]
α	2.86°
Cd	0,3
fr	0,013
Vw	0 [m/s]
ρ	1,21 [Kg/m ³]
rd	0,2159 [m]

Por otro lado, los parámetros de rendimiento que se esperan del vehículo se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Parámetros de rendimiento del vehículo.

Aceleración de 0 a 100 [km/h]	17 [s]
Velocidad máxima	135 [km/h]
Velocidad crucero	120 [km/h]
Velocidad frente a inclinación del 5%	80 [km/h]

4.1.1 Cálculo esfuerzos totales y resistivos del vehículo

A partir de los datos anteriores, se hace uso de las ecuaciones que describen las fuerzas resistivas que están presentes en el movimiento del vehículo.

- Resistencia de rodado: $F_{rod} = P * f_r * \cos(\theta)$ (26)

- Resistencia aerodinámica: $F_{aer} = \frac{1}{2} * \rho * A_f * C_D * (v + v_w)^2$ (27)

- Resistencia por pendientes: $F_g = M_v * g * \sin(\theta)$ (28)

Y que utilizando los datos de la Tabla 6, se obtienen los esfuerzos resistivos que debe enfrentar el vehículo a distintas velocidades y que resulta en los valores mostrados en la Tabla 8 y en la Figura 17.

Tabla 8. Esfuerzos resistivos presentes en el movimiento del vehículo.

V(kph)	F _{aer}	F _{rod}	F _g	F _r
0	0,0	248,37	954,45	1202,8
10	3,8	248,37	954,45	1206,6
20	15,1	248,37	954,45	1218,0
30	34,0	248,37	954,45	1236,9
40	60,5	248,37	954,45	1263,3
50	94,5	248,37	954,45	1297,4
60	136,1	248,37	954,45	1339,0
70	185,3	248,37	954,45	1388,1
80	242,0	248,37	954,45	1444,8
90	306,3	248,37	954,45	1509,1
100	378,1	248,37	954,45	1581,0
110	457,5	248,37	954,45	1660,4
120	544,5	248,37	954,45	1747,3
130	639,0	248,37	954,45	1841,9
135	689,1	248,37	954,45	1892,0

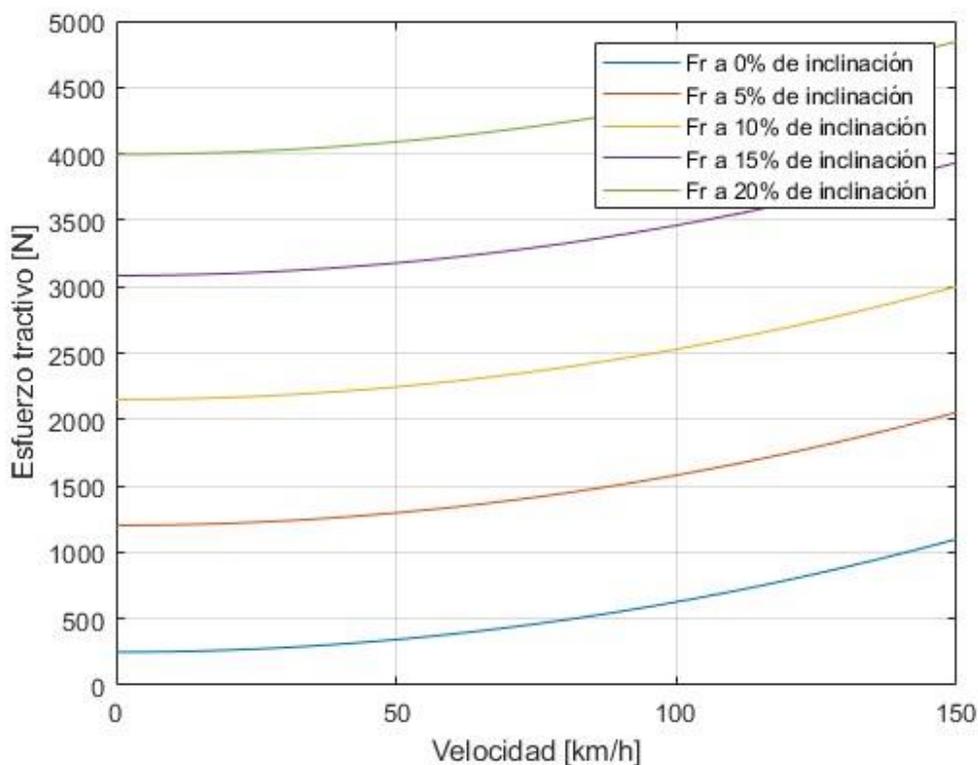


Figura 17. Fuerzas resistivas totales en el eje tractivo al variar la velocidad del vehículo y la inclinación de la pendiente en 0%, 5%, 10%, 15% y 20%.

Es posible observar en la Figura 17 que, si bien la velocidad del vehículo influye en la fuerza tractiva requerida por el tren de potencia, el mayor factor a considerar es la inclinación del camino por donde circula el vehículo. Dentro de la Figura 17 se señalan los dos puntos bajo los cuales se considera la especificación del vehículo, el cual corresponde a la fuerza tractiva necesaria para circular a una velocidad de 80 [km/h] en una inclinación del 5% y la fuerza tractiva para moverse a velocidad crucero en un camino sin ninguna inclinación.

4.1.2 Especificación del motor

Como se indica en la Tabla 7, se busca que el vehículo sea capaz de circular a una velocidad constante de 80 [km/h] frente a una inclinación del 5%, es decir, a un ángulo de 2.86°, y que, para ello, se necesitará un esfuerzo tractivo igual a 1580.95 [N] y, además, su velocidad crucero está definida en los 120 [km/h] en un camino sin inclinación. Luego, haciendo uso de las siguientes relaciones, podemos obtener el torque y la potencia necesaria para cumplir con las especificaciones establecidas.

$$T = F * r_d \quad (29)$$

$$P = T * \omega \quad (30)$$

$$\omega = \frac{v}{r_d} \quad (31)$$

Luego, a partir de las especificaciones de diseño en la Tabla 6 y Tabla 7 se tiene:

- $\omega_{80 \text{ km/h}} = 102.928 \text{ [rad/s]}$
- $T_{5\%} = 311.939 \text{ [Nm]}$
- $P_{5\%} = 32.107 \text{ [kW]}$

Y para velocidad crucero, donde el esfuerzo necesario es de 793.184 [N]

- $\omega_{120 \text{ km/h}} = 154.39 \text{ [rad/s]}$
- $T_{\text{crucero}} = 171.248 \text{ [Nm]}$
- $P_{\text{crucero}} = 26.439 \text{ [kW]}$

Al considerar el diseño de un tren de potencia híbrido, se espera que el vehículo pueda circular de forma normal sin necesidad de operar la fuente secundaria para las condiciones de velocidad crucero y con inclinación del 5% antes calculadas, lo que implica que el valor de potencia especificado para la fuente primaria, es decir, la FC, se define como potencia promedio del vehículo la cual como mínimo corresponde a 32.107 [kW].

Ahora bien, para poder conseguir una aceleración de 0 a 100 [km/h] en 17 segundos, se hace uso de la expresión (32) que considera los valores promedio de los esfuerzos de rodadura y aerodinámicos, entregando un valor aproximado de la potencia tractiva necesaria.

$$P_t = \frac{\delta M_v}{2t_a} (V_f^2 + V_b^2) + \frac{2}{3} M_v g f_r V_f + \frac{1}{5} \rho A_f C_D V_f^3 \quad (32)$$

Para ello se usa la velocidad final que fue establecida y se procede a calcular la velocidad base del vehículo, considerando un factor de rendimiento $X = 3$, debido a que no se requiere un desempeño alto al momento del arranque y corresponde a un valor medio en la curva de torque indicada en la Figura 7, donde además, corresponde a un valor mayor que el factor de rendimiento promedio en vehículos de imanes permanentes ($X = 2$), pero menor al de máquinas de inducción ($X = 4$).

$$V_f = 135 [km/h] = 37.5 [m/s]$$

$$\omega_f = \frac{37.5}{0.2159} = 173.69 [\text{rad/s}]$$

$$V_b = \frac{V_f}{X} = \frac{37.5}{3} = 12.5 [m/s] \quad (33)$$

Así, al reemplazar se obtiene P_t que corresponde a la potencia en el eje tractivo del vehículo.

$$P_t = 106.17 [kW] \quad (34)$$

$$T_t = \frac{P}{\omega_f} = 611.25 [\text{Nm}] \quad (35)$$

4.1.3 Selección del motor

Para la selección de la máquina eléctrica a utilizar se consideran las pérdidas correspondientes al tren de potencia de alrededor a 10% u 11%, por lo que el valor de potencia que debe ser capaz de entregar como mínimo la ME debe ser de 119.29 [kW] detrás de la caja reductora y un torque por determinar, dependiendo de la razón de transformación utilizada en dicha caja.

Basándose en los datos obtenidos, se busca en los catálogos disponibles en internet motores que cumplan con los requisitos anteriores, escogiendo el motor de imanes permanentes Brogen TZ204XSB12, el cual incluye un inversor dc-ac para la ME, donde la potencia peak del motor es de 120 [kW] y sus principales características son mostrados en la Tabla 9, mientras que las demás características del motor se encuentran en Anexo A.

Es posible destacar que si bien la máquina eléctrica escogida debe ser capaz de entregar como mínimo la potencia de 119.29 [kW], el vehículo al momento de operación difícilmente alcanza estos niveles de potencia, ya que en situaciones de conducción normal los requerimientos de potencia suelen asemejarse más al valor de potencia a velocidad crucero calculado. Es por esto que al escoger el motor de tracción, se considera como valor peak 119.29 [kW], mientras que el valor de potencia nominal resulta mucho menor.

Tabla 9. Datos técnicos de motor de imanes permanentes Brogen TZ204XSB12.

Sistema de trabajo	S9	Voltaje nominal (VAC)	220
Potencia nominal (kW)	63	Potencia máxima (kW)	120
Torque nominal (Nm)	150	Torque máximo (Nm)	250
Velocidad nominal (rpm)	4000	Velocidad máxima (rpm)	12000

Partiendo por estos nuevos datos entregados por el motor, es posible recalculer la velocidad base del vehículo y establecer la razón de transformación asociada a la caja reductora que enlaza la parte mecánica del vehículo con el motor eléctrico.

Se sabe que $\omega_f = 173.69$ [rad/s] por lo que al pasar a RPM considerando una frecuencia de 60 [Hz] se tendrá $n_f = \frac{60\omega_f}{2\pi} = 1658$ RPM y que al ser esta la velocidad máxima que alcanza el vehículo se relaciona directamente con la velocidad máxima a la que gira el motor eléctrico, en este caso siendo $N_{max} = 12000$ RPM y de esta forma se obtiene la razón de transformación de la caja reductora.

$$i_c i_g = \frac{n_f}{N_{max}} = \frac{1658}{12000} = 0.1382 \quad (36)$$

Con la razón de transformación establecida, se puede recalculer la velocidad base del vehículo, la cual está relacionada directamente con la velocidad nominal del motor, en este caso $N_B = 4000$ RPM, así:

$$n_B = N_B i_c i_g = 4000 * 0.1382 = 552.8 \text{ [RPM]} \quad (37)$$

$$\omega_B = \frac{2\pi n_B}{60} = 57.89 \text{ [rad/s]} \quad (38)$$

$$V_b = \omega_B r_d = 57.89 * 0.2159 = 12.5 \text{ [m/s]} = 45 \text{ [km/h]} \quad (39)$$

Resultando la misma velocidad base que fue calculada en (33).

Por último, multiplicando el torque T_t por la razón de transformación $i_c i_g$ se obtiene el torque que es necesario entregar por parte del motor eléctrico

$$T = T_t i_c i_g = 611.25 * 0.1382 = 84.5 \text{ [Nm]} \approx 85 \text{ [Nm]} \quad (40)$$

Se puede notar que el torque que se necesita entregar por parte del motor eléctrico es mucho menor que el torque máximo de la máquina eléctrica escogida, debido a que dentro de los catálogos no se encontró otro motor que cumpliera con los requisitos, sin embargo, para fines de simulación y diseño se continúa con el motor escogido, teniendo en consideración que para una implementación real se debiese ajustar a un motor que posea un valor de torque cercano al obtenido en (40).

4.2 Especificación fuentes de almacenamiento de energía.

Las tres principales fuentes que podemos utilizar para alimentar la ME del vehículo son las baterías, pilas de combustible y supercondensadores, siendo las primeras las más utilizadas hoy en día en la movilidad eléctrica debido a la gran variedad de materiales con los que son fabricadas las baterías y su buen desempeño en general, sin embargo, las características intrínsecas que poseen las pilas de combustible y los supercondensadores, hacen que su trabajo en conjunto sea una excelente alternativa en vistas a futuro. Es por esto por lo que los análisis se enfocan en el funcionamiento de estas dos últimas, considerando las pilas de combustible como fuente primaria, siendo las encargadas de entregar la potencia promedio que requiera el vehículo. Por otra parte, se hace uso de un banco de supercondensadores el que es responsable de entregar la potencia peak necesaria en todo momento y se considera una conexión en paralelo entre ambas fuentes debido a las ventajas en el control del sistema de alimentación que otorga al vehículo.

4.2.1 Ciclo de conducción

Para el correcto dimensionamiento de las fuentes de alimentación es necesario establecer un ciclo de conducción el cual consiste en la simulación del comportamiento del vehículo para distintas variaciones de velocidad y así poder evaluar su rendimiento. Para el presente trabajo se hace uso de un ciclo de conducción que simula intervalos de velocidades bajas, medias, altas y superaltas, con distintas variaciones de velocidad para poder asemejarse al comportamiento tanto urbano como en carretera. En la Figura 18 se muestra la gráfica de velocidad de este ciclo.

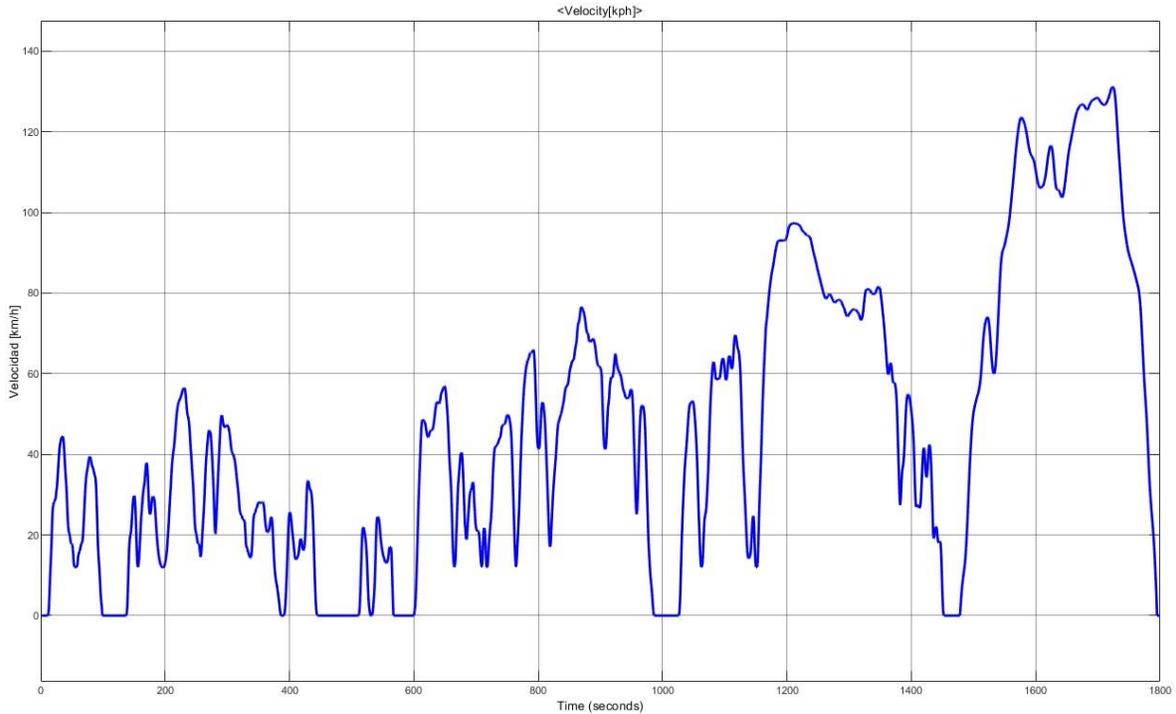


Figura 18. Variaciones de velocidades durante ciclo de conducción urbano [26].

Se incluye a estas simulaciones los parámetros establecidos en la Tabla 6 y las ecuaciones para el esfuerzo tractivo correspondiente al vehículo, como se muestra en el diagrama de la Figura 19, en el cual se realizan todos los cálculos correspondientes para la obtención de la energía y la potencia tractiva a lo largo de todo el ciclo de conducción obteniéndose la gráfica para la potencia tractiva que es requerida en cada instante y la energía tractiva total en el tren motriz, como se muestra en la Figura 20 y Figura 21 respectivamente.

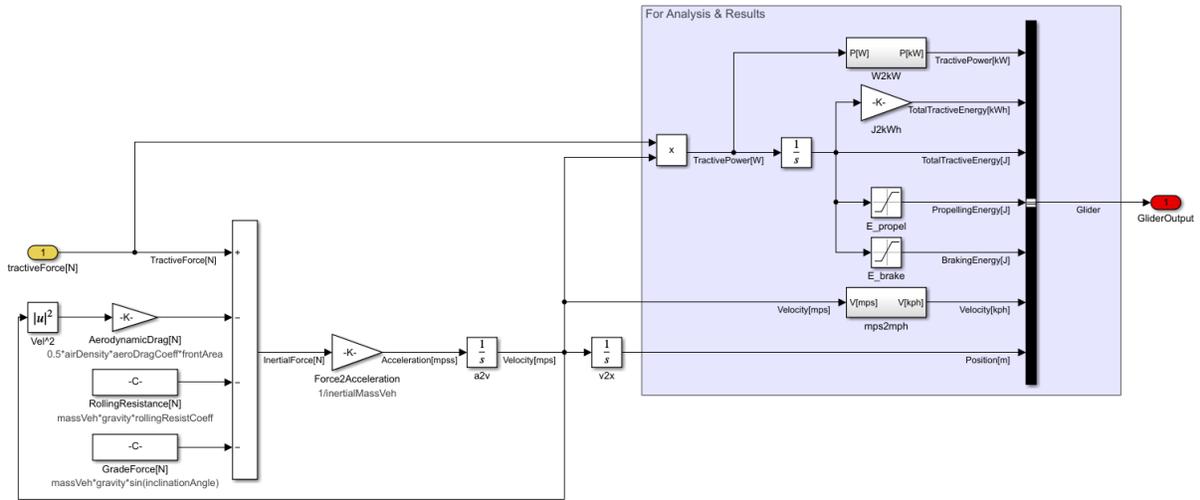


Figura 19. Diagrama simulación de potencia tractiva, torque, energía y velocidad durante ciclo de conducción.

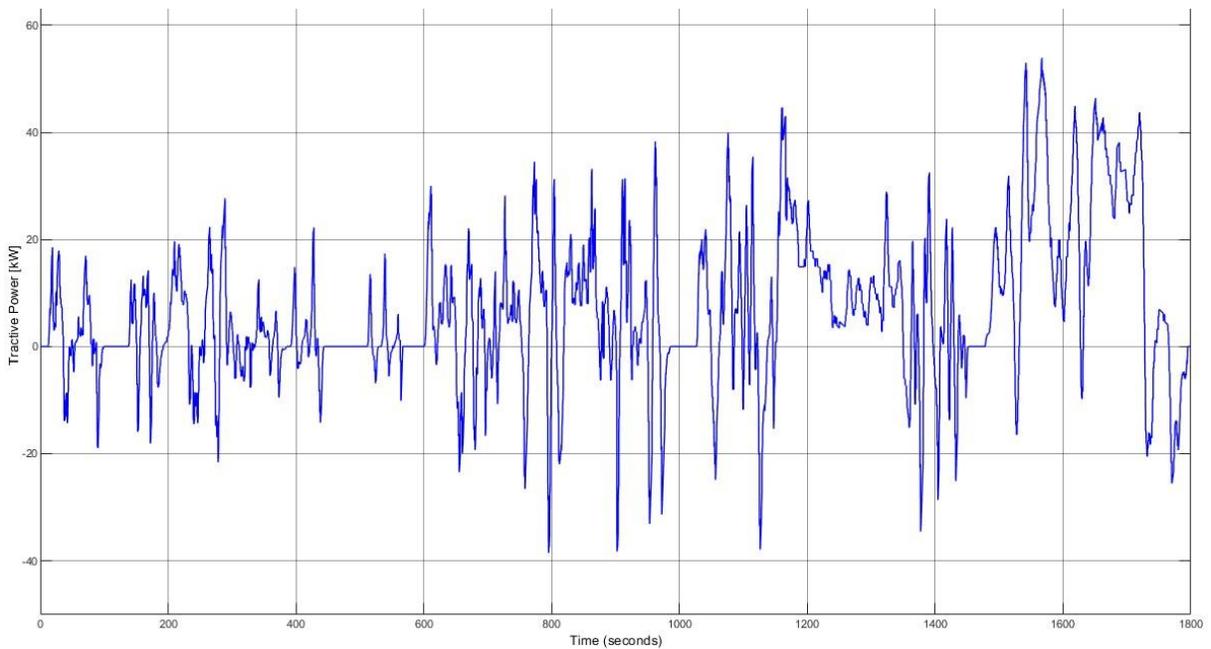


Figura 20. Potencia tractiva durante ciclo WLTP-3.

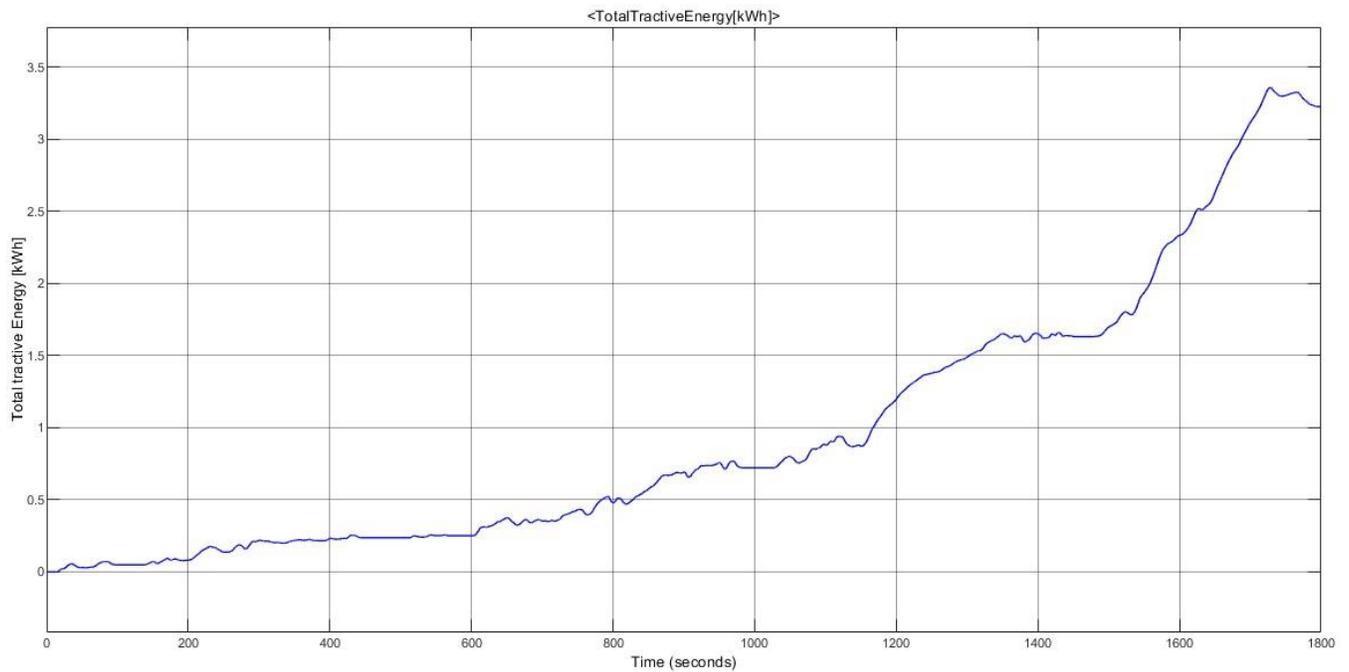


Figura 21. Energía tractiva total durante ciclo WLTP-3.

Se observa en la Figura 20 que para velocidades medias y bajas la potencia requerida es en su mayoría por debajo de la potencia promedio calculada, debido a que solo se considera un terreno plano y sin cambios bruscos en la velocidad del vehículo, sin embargo, para potencias altas y superaltas que reflejan el comportamiento asemejando a la conducción en carretera si resulta por sobre esta potencia, lo que implica la necesidad del uso de una fuente secundaria para aportar la potencia total requerida por el vehículo.

4.2.2 Selección pila de combustible

Ahora bien, interesa saber cuál es la potencia tractiva que debe entregar tanto la fuente primaria del vehículo, como el banco de supercondensadores. Para ello se considera el promedio de potencia calculado, el cual debe ser suministrado por la pila de combustible, sin embargo, se debe tener en consideración las pérdidas presentes en todo el intervalo desde la producción de energía en la pila, hasta ser consumida en el motor eléctrico.

Es ideal esperar que el sistema presente la mayor eficiencia posible, pero, de todas formas, se considera una eficiencia total del intervalo desde la pila de combustible hasta la ME de un 80%. De esta forma se tiene que.

$$P_{FC} = \frac{P_{promedio}}{\eta} = \frac{32.107}{0.80} = 40.134 \text{ [kW]} \quad (41)$$

Una vez se conoce el valor de potencia que se demanda en la pila de combustible, se puede buscar en los catálogos disponibles en el mercado la mejor opción que cumpla con los requisitos.

Para el diseño de una fuente de alimentación de un medio de transporte, se considera que la mejor opción a utilizar es una pila de combustible con membrana de intercambio de protones (PEM), por lo que, buscando en los catálogos de este tipo, se encuentran las opciones de FCvelocity – 9SSL del fabricante Ballard, mostradas en la Tabla 10 y todas sus demás características se encuentran en anexo B, donde la FC de mayor potencia es la de 21.2 [kW] y 70.7 [V], por lo que es necesario combinar dos pilas de estas características para alcanzar la potencia especificada $P_{FC} = 40.134 \text{ [kW]}$,

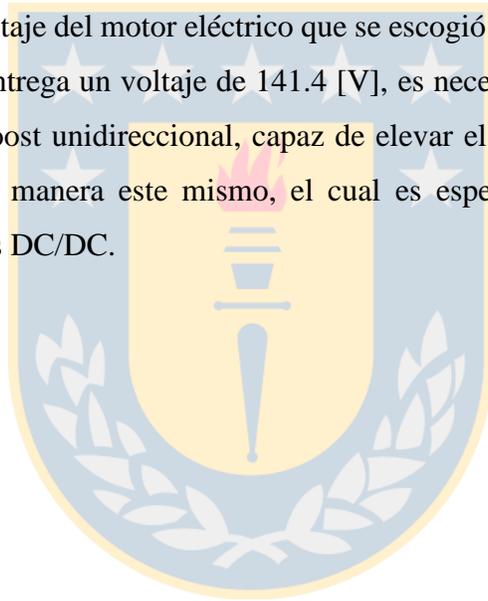
Tabla 10. Especificaciones técnicas pilas de combustible. (Ballard Power Systems. (2021).

FCvelocity – 9SSL)

Potencia nominal	3.8	4.8	10.6	14.4	17.3	21.2
Voltaje DC (a 300A)	12.9	16.1	35.4	48.2	57.9	70.7
Masa [Kg]	6.2	6.8	10.2	12.1	14.3	16.6
Longitud núcleo de la pila	92	104	174	220	255	302
Ancho núcleo de la pila	760					
Alto núcleo de la pila	60					

De esta forma, al utilizar una combinación de estas dos pilas en serie, se tendrá una potencia total de $P_{FC} = 42.4 [kW]$ y un voltaje $V_{FC} = 141.4 [V]$, con un peso de 33.2 [Kg], ocupando un volumen total de $0.302 [m] \times 0.76 [m] \times 0.06 [m] = 0.0138 [m^3]$.

Notando que el voltaje del motor eléctrico que se escogió es de 220 [V] y el conjunto de pilas de combustible entrega un voltaje de 141.4 [V], es necesaria la implementación de un convertidor DC/DC boost unidireccional, capaz de elevar el voltaje para la entrada del motor y regular de igual manera este mismo, el cual es especificado en el capítulo de selección de convertidores DC/DC.



4.2.3 Selección banco de supercondensadores

Como se menciona en el capítulo anterior, se define que la potencia total de la fuente primaria corresponde a $P_{FC} = 42.4 [kW]$, y como la eficiencia del intervalo entre la pila de combustible a la ME se considera como un 80%, se tiene que la potencia total de la fuente primaria real es de:

$$P_{FC,real} = P_{FC} \times \eta = 42.4 \times 0.8 = 33.92 [kW] \quad (42)$$

De aquí que el nuevo valor de la potencia promedio corresponde a 33.92 [kW]

De esta forma, la fuente primaria es capaz de entregar de manera constante los 33.92 [kW], mientras que toda la potencia requerida que se encuentre por sobre este valor, debe ser suministrada por la fuente secundaria, es decir, el banco de supercondensadores.

Gráficamente se puede observar que la Figura 22 representa la potencia a ser entregada por el banco de supercondensadores. En ella se puede notar que los momentos en que resulta necesario el uso de la fuente secundaria se presenta mayormente en las regiones de altas y muy altas velocidades, debido a que estas zonas son donde se llega mayormente a necesitar superar la potencia promedio del vehículo y solo por intervalos pequeños de tiempo.

Por otro lado, dado que el ciclo de conducción escogido no presenta grandes aceleraciones a bajas velocidades, no se requiere el uso de la fuente secundaria en estos niveles, sin embargo, en periodos de conducción real si es cierto que existen grandes aceleraciones en poco tiempo o distintos desniveles en el camino que se traducirían en elevaciones en el consumo de potencia del vehículo que no quedan graficados a través de una simulación, donde además, se podría ver y utilizar una de las mejores características de los supercondensadores, que es su rápida carga/descarga y su capacidad de absorber gran parte de la energía cinética del vehículo al momento de desacelerar gracias al frenado regenerativo.

Es por esto que para el cálculo y la especificación del banco de SC se toma en consideración los valores peak de potencia principalmente en altas velocidades, sin embargo, la estrategia de control de las fuentes de alimentación es la encargada de optimizar el uso de ambas fuentes, dando prioridad a la operación del banco de SC en las aceleraciones y desaceleraciones del vehículo, independiente de la potencia que sea requerida, con el fin de aprovechar al máximo las características de los supercondensadores.

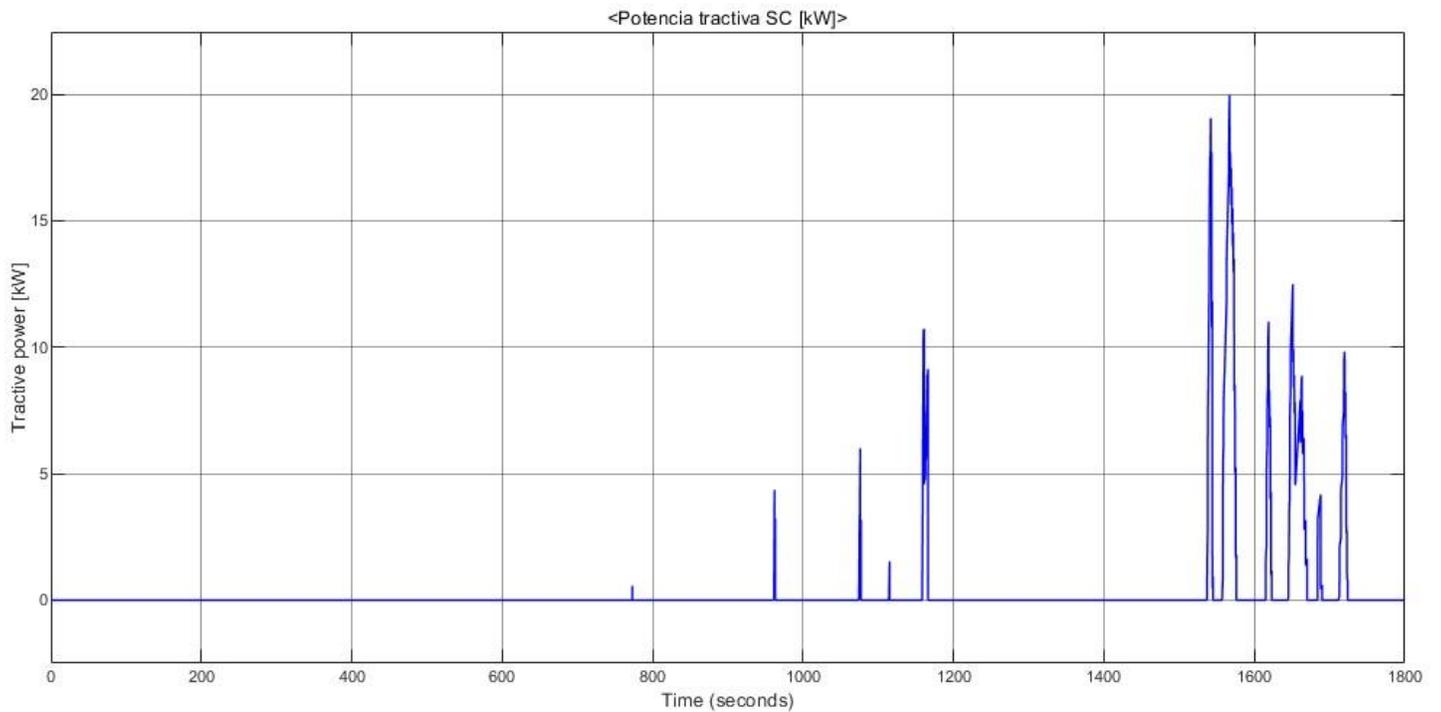


Figura 22. Gráfico de potencia tractiva [kW] a ser suministrada por banco de SC.

El banco de supercondensadores a escoger actúa como fuente secundaria en el sistema que se diseña, esto quiere decir, que debe ser capaz de entregar la potencia peak que se le solicite, como también por un tiempo determinado. Es por esto, que dentro de la Figura 22 que representa la potencia a ser entregada por el SC, se selecciona la mayor etapa de funcionamiento que se presente dentro del ciclo WLTP-3, es decir, la que presente mayor cantidad de potencia requerida durante un tiempo prolongado, siendo el escogido el que se muestra en la Figura 23.

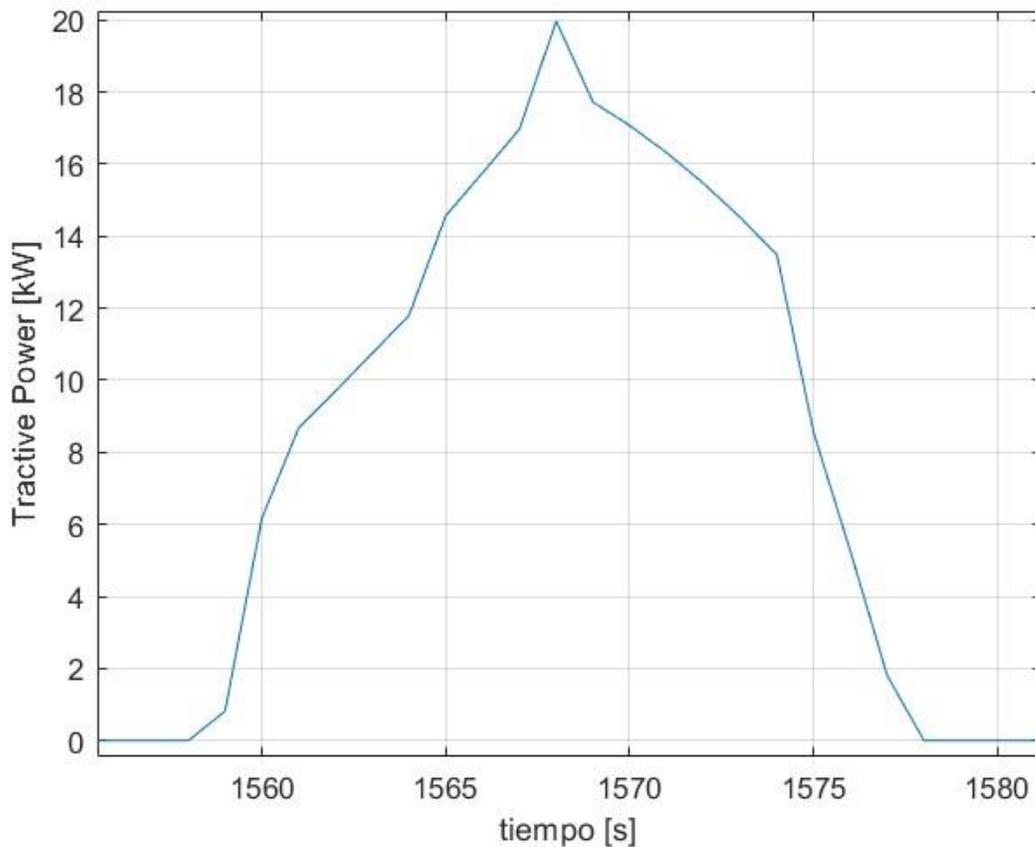


Figura 23. Mayor periodo de requerimiento de potencia para banco de SC.

Se debe tener en consideración que el banco de SC tiene la particularidad de ser una fuente bidireccional, es decir, tiene la capacidad de entregar y recibir energía, por lo que, al dimensionar su capacidad, se debe considerar la energía necesaria para cumplir la etapa de mayor consumo, la cual corresponde a la señalada en la Figura 23 y que posterior a ella, se presenta un periodo de frenado o bien de bajo consumo de potencia, lo que permite volver a recargar el SC a través de la pila de combustible o bien, gracias al frenado regenerativo.

Al calcular el área bajo la curva de la Figura 23, se obtiene que se requiere de una capacidad de almacenamiento dada por (43).

$$E_{SC} = 2.2538 \times 10^5 [J] = 0.0627 [kWh] \quad (43)$$

Además, el funcionamiento de las pilas de combustible requiere de una temperatura de operación que puede tardar hasta 10 minutos en alcanzar, esto implica que, durante los primeros minutos de funcionamiento del vehículo, la potencia que entregará la fuente primaria resulta muy reducida en comparación a la que debiese entregar con normalidad, por lo que la fuente secundaria es la encargada de compensar dicha falta.

Para objetivos de cálculo, se considera que la potencia entregada por la pila de combustible durante este periodo es cercana a un 20% de su capacidad nominal, por lo que la potencia que debe suministrar la fuente secundaria para compensar y poder cumplir el ciclo de conducción se muestra graficada en la Figura 24.

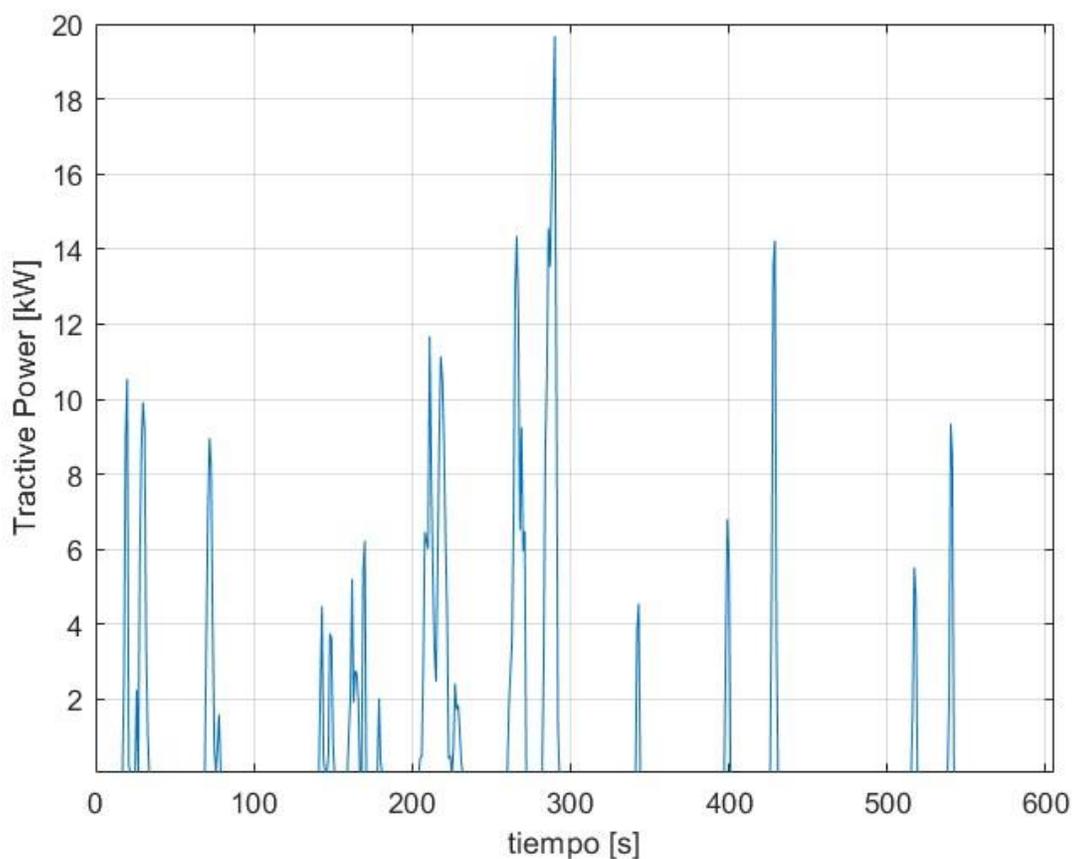


Figura 24. Potencia tractiva a ser entregada por SC en primeros 10 minutos de ciclo.

Al calcular la energía total en el ciclo de la Figura 24, se obtiene que el banco de SC debe almacenar como mínimo:

$$E_{SC} = 5.5471 \times 10^5 [J] = 0.1542 [\text{kWh}] \quad (44)$$

Con este valor de la energía necesaria y el voltaje de operación del motor, es posible empezar a dimensionar el banco de SC, considerando supercondensadores de tensión 3 [V] por celda y para el cálculo de la energía útil se considera una profundidad de descarga del 30%, lo que implica una tensión de corte del 70% de la tensión nominal al descargarse.

De esta forma, el estado de carga cuando el supercondensador se considerará descargado es de:

$$SOC_c = \left(\frac{V_c}{V_{max}} \right)^2 = \frac{(0.7V_{C_{max}})^2}{V_{C_{max}}^2} \quad (45)$$

$$SOC_c = \frac{(0.7V_{C_{max}})^2}{V_{C_{max}}^2} = \frac{0.49V_{C_{max}}^2}{V_{C_{max}}^2} = 49\% \quad (46)$$

Lo cual corresponde a la energía remanente al llegar a este punto.

Por otro lado, la cantidad de supercondensadores en serie para suministrar el voltaje deseado se calcula como se muestra a continuación

$$N_s = \frac{V_{max}}{3} = \frac{220}{3} = 73.333 \approx 74 \quad (47)$$

Mientras que la capacidad del banco está condicionada por la energía total requerida que fue establecida con anterioridad, de aquí, se usa la siguiente relación.

$$\omega_{BANCO} = \frac{1}{2} C_{BANCO} (V_{max}^2 - V_{min}^2) \quad (48)$$

$$\omega_{BANCO} = \frac{1}{2} C_{BANCO} (V_{max}^2 - 0.49V_{max}^2)$$

$$\omega_{BANCO} = \frac{1}{2} C_{BANCO} (1 - 0.49)V_{max}^2 = \frac{0.51}{2} C_{BANCO} V_{max}^2 \quad (49)$$

Al despejar la capacidad del banco y reemplazar el voltaje máximo y la potencia requerida del banco en Joules [J] se tiene:

$$C_{BANCO} = \frac{2\omega_{BANCO}}{0.51V_{max}^2} = \frac{2 \times 5.5471 \times 10^5}{0.51 \times (220)^2} = 44.945 \text{ [F]} \quad (50)$$

$$V_{BANCO} = 3 * N_S = 3 * 74 = 222 \text{ [V]} \quad (51)$$

De esta forma, la capacidad total del banco de supercondensadores es de $C_{BANCO} = 44.945 \text{ [F]}$, por lo que cada celda debe ser de:

$$C_{celda} = C_{BANCO} N_S = 44.945 * 74 = 3325.93 \text{ [F]} \approx 3400 \text{ [F]} \quad (52)$$

A partir de este valor se procede a buscar en los catálogos disponibles en el mercado, sin embargo, el valor resulta más alto de los diseños que se encuentran especificados, por lo que se conectan varias celdas individuales en paralelo para alcanzar la capacidad deseada.

Dentro de los supercondensadores disponibles, están los indicados en la Tabla 11, donde todas sus características se presentan en anexo C.

Tabla 11. Electric double layer ultracapacitor 3.0 [V] Tecate Group.

Part Number	Nom. Cap. (F)	GMV (F)*	ESR DC (mΩ)	ESR AC (mΩ)	Leakage Current (mA) (72 hrs @ 25C)	Dimensions (mm)			Rated Current (A)	Weight/Unit (grams)
						D1	D2	L		
TPLH-3R0/650SL60X51	650	650	0.6	0.35	1.5	60	60.7	51.5	590	210
TPLH-3R0/1200SL60X74	1200	1200	0.36	0.25	2.7	60	60.7	74	1060	295
TPLH-3R0/1500SL60X85	1500	1500	0.31	0.27	3	60	60.7	85	1300	330
TPLH-3R0/2000SL60X102	2000	2000	0.3	0.21	4	60	60.7	102	1500	390
TPLH-3R0/3000SL60X138	3000	3000	0.26	0.17	5	60	60.7	138	2200	525

*NOTE: GMV = Guaranteed Minimum Value.

Tabla 12. Especificaciones generales ultracapacitor 3.0 [V] Tecate Group

Item	Performance
Operating temperature	-40°C to +65°C
Storage temperature	-40°C to +70°C
Capacitance range	650F to 3,000F
Rated voltage	3 VDC
Surge voltage	3.2 VDC

De las opciones disponibles, se escoge las celdas TPLH-3R0/1200SL60X74, de 1200 [F] / 3 [V].

Con lo que se calcula:

$$N_p = \frac{C_{celda}}{C_{SC}} = \frac{3400}{1200} = 2.83 \approx 3 \quad (53)$$

Por último, el número de celdas es obtenido multiplicando las celdas en serie y en paralelo.

$$N_{celdas} = N_s N_p = 74 * 3 = 222 \quad (54)$$

Mientras que la corriente peak que es posible adquirir del banco de supercondensadores es de:

$$I_{peak} = 1060 \times 3 = 3180 [A] = 3.18 [kA] \quad (55)$$

La resistencia equivalente serie y paralelo del banco es de:

$$ESR_p = \frac{0.3}{3} = 0.1 [m\Omega] \quad (56)$$

$$ESR_s = 0.1 \times 74 = 7.4 [m\Omega] \quad (56)$$

Y sus características físicas quedarán indicadas como sigue:

$$Volumen_{SC} = D1 \times D2 \times L \times N_{celdas} = 0.06 \times 0.067 \times 0.074 \times 222 = 0.066 [m^3] \quad (57)$$

$$Masa_{SC} = M_{celda} \times N_{celdas} = 295 \times 222 = 65490 [g] = 65.49 [Kg] \quad (58)$$

Por lo que el banco de supercondensadores queda definido por los siguientes parámetros:

Tabla 13. Parámetros banco de SC.

C_{BANCO}	44.945 [F]
V_{BANCO}	222 [V]
ω_{BANCO}	0.1542 [kWh]
$Volumen_{SC}$	0.066 [m ³]
$Masa_{SC}$	65.49 [Kg]

4.3 Especificación convertidores DC-DC

A partir de las distintas topologías de convertidores estáticos analizada en el capítulo 3.3, podemos establecer el tipo de convertidor que se requiere para cada fuente de alimentación presente en el vehículo.

En primera instancia, tomando en consideración que el voltaje suministrado por el SC depende directamente del estado de carga de la fuente (SoC), es necesaria la implementación de un convertidor dc-dc boost (elevador) en ambos casos con el fin de poder incrementar el voltaje a la salida del convertidor y mantenerlo regulado para que no existan variaciones fuera de los márgenes establecidos.

Ambos convertidores dc-dc están basados en una modulación por ancho de pulsos (PWM), el que está encargado de realizar la conmutación.

Por otro lado, se establece que, para el caso del convertidor conectado a la pila de combustible, solo debe ser capaz de entregar energía a la máquina eléctrica, por lo que es necesario el uso de un convertidor dc-dc boost unidireccional.

Para el caso del convertidor conectado al banco de SC es necesario regular tanto el voltaje suministrado a la ME, como también debe ser capaz de recuperar la energía obtenida por medio del frenado regenerativo y la que es suministrada desde la pila de combustible para cargar el banco de SC, por lo que se requiere elevar el voltaje al descargar el SC y reducirlo, al recibir energía en modo de carga. De esta forma, se utiliza un convertidor dc-dc buck-boost bidireccional.

El sistema que se implementa para el control de gestión de energía actúa directamente en el ciclo de trabajo de los convertidores, de modo de entregar las potencias requeridas en todo momento y de manera eficiente.

4.3.1 Diseño convertidor dc-dc para pila de combustible.

Basados en la topología para un convertidor boost unidireccional vista en este informe, se puede conocer cuál es el comportamiento de este mismo si se definen los parámetros deseados y se calculan los componentes a utilizar. La función y objetivo de este convertidor es elevar los niveles de voltaje entregados por la pila de combustible y adaptarlos al nivel solicitado en la carga, que en este caso es la conexión al inversor y motor de 220 [V].

El diseño del convertidor boost se muestra en la Figura 25.

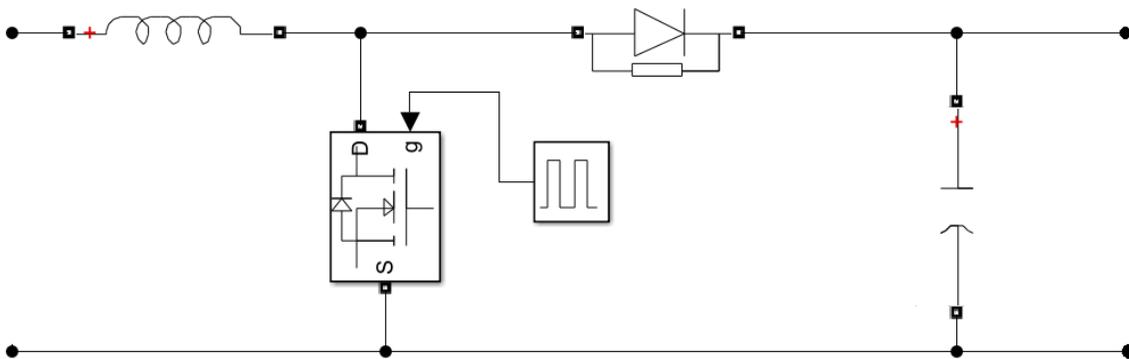


Figura 25. Diagrama de conexión convertidor dc-dc boost unidireccional.

En base a la curva de polarización de la pila de combustible, y para mantener el voltaje dentro de la zona de operación óhmica, se considera que este varía entre 70-141 [V], por lo que para la regulación del ciclo de trabajo se utiliza la ecuación (15)

$$D = \frac{V_o - V_i}{V_o} \quad (59)$$

Obteniendo que el rango en el que varía el ciclo de trabajo del convertidor está descrito como se muestra a continuación.

$$0.36 \leq D \leq 0.68 \quad (60)$$

Por otro lado, el rizado de corriente se describe en la siguiente ecuación.

$$\Delta i_L = \frac{V_i D}{L f_s} \quad (61)$$

Al ser el voltaje de la pila de combustible variable, se reemplaza en la ecuación los valores considerando el voltaje de salida.

$$\Delta i_L = \frac{V_o(1-D)D}{Lf_s} \quad (62)$$

A partir de esta expresión se puede derivar con respecto a D para obtener cual es la corriente de rizado máxima y para qué ciclo de trabajo D se consigue.

$$\Delta i_{L,max} = \frac{di_L}{dD} = 0 \rightarrow D = 0.5 \quad (63)$$

Para el diseño de este convertidor, se considera una corriente de rizado $\Delta i_{L1} = 5[A]$, un voltaje ripple de 1% y una frecuencia de conmutación de 25K [Hz], además del ciclo de trabajo máximo en $D = 0.5$. Con esto es posible calcular los componentes almacenadores de energía mínimos para operar en CCM.

$$L \geq \frac{V_o(1-D)D}{f_s \Delta i_{L1}} = 440[\mu H] \quad (64)$$

Ahora bien, para el cálculo del condensador de salida, se debe considerar las características del banco de pila de combustible utilizado, el cual posee una potencia máxima de 42.4 [kW] y que opera a un voltaje de 220 [V] a la salida del convertidor dc-dc, por lo que es posible obtener la corriente máxima de la salida del convertidor como se muestra en la siguiente ecuación.

$$I_o = \frac{P_o}{V_o} = 192.7 [A] \quad (65)$$

Y a partir de las mismas consideraciones utilizadas para el cálculo de la inductancia, se hace uso de la ecuación mostrada a continuación para obtener el valor del condensador mínimo de salida para operar en CCM.

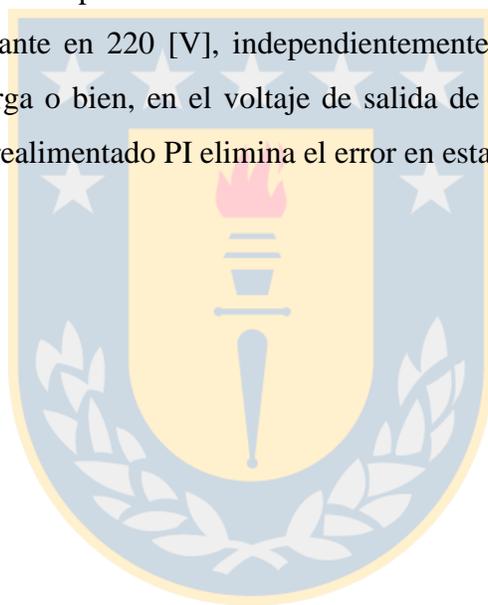
$$C \geq \frac{I_o(1-D)}{8f_s \Delta V} = 219[\mu F] \quad (66)$$

De esta forma, los parámetros para el convertidor boost quedan definidos por los valores de la Tabla 14.

Tabla 14. Especificación componentes convertidor dc-dc boost

Voltaje de entrada [V]	70 – 141
Voltaje de salida [V]	217.8 – 222.2 [V]
Corriente de rizado [A]	5
Voltaje ripple [%]	1
Frecuencia de conmutación [Hz]	25K
Ciclo de trabajo	$0.68 > D > 0.36$
Condensador C [μ F]	219
Inductancia L [μ H]	440

Se considera el uso de un transistor MOSFET y un diodo con tiempo de recuperación rápido. Además, es necesario implementar un sistema realimentado PI, para poder mantener el voltaje de salida constante en 220 [V], independientemente de las variaciones que se puedan producir en la carga o bien, en el voltaje de salida de la pila de combustible. La utilización de un circuito realimentado PI elimina el error en estado estacionario.



4.3.2 Diseño convertidor dc-dc para banco de SC.

Como se indica en capítulos anteriores, se implementa un convertidor dc-dc buck-boost bidireccional como se muestra en la Figura 26. Este tipo de convertidor permite la conversión de altos niveles de potencia, además de que es posible cargar el banco de SC al trabajar en modo buck y descargarlo en modo boost.

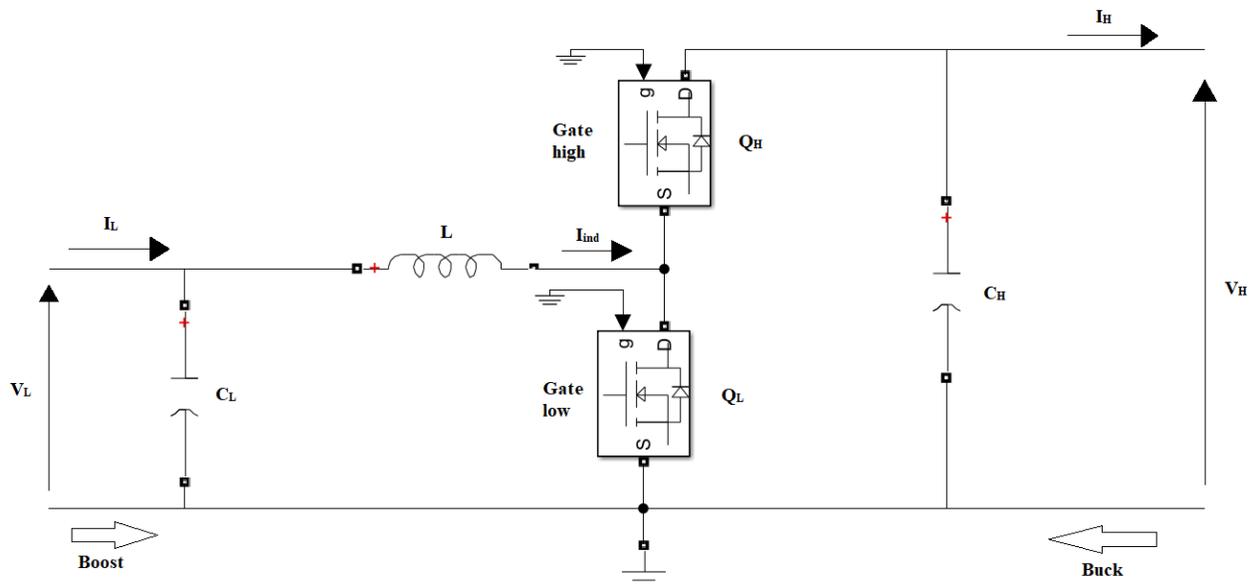


Figura 26. Diagrama de conexión convertidor dc-dc buck-boost bidireccional.

Para el funcionamiento como convertidor boost, V_L es el voltaje de entrada suministrado por el SC, mientras que V_H es la salida del convertidor, cuyo voltaje es entregado al inversor, en este caso Q_L controla el flujo de potencia.

Al operar como convertidor buck, la entrada de voltaje es suministrada en V_H , el cual es entregado por medio del frenado regenerativo del vehículo o bien, por parte de la pila de combustible al operar en niveles de potencia por debajo del promedio y que permitan entregar parte de su potencia para cargar el SC. De esta forma, V_L corresponde a la salida del convertidor, cargando el banco de SC. Durante este modo de operación, Q_H controla el flujo de potencia en el sistema.

Una vez señalados los modos de operación del convertidor, se procede a diseñar primero considerando el modo de operación boost, de aquí se pueden desprender las siguientes ecuaciones

$$V_H = \frac{V_L}{1 - D} \quad (67)$$

$$L = \frac{V_L D}{f_s \Delta i_L} \quad (68)$$

$$C_H = \frac{\Delta Q_H}{\Delta V_H} = \frac{I_o D}{f_s \Delta V_H} \quad (69)$$

$$C_L = \frac{\Delta Q_L}{\Delta V_L} = \frac{\Delta i_L}{8 f_s \Delta V_L} \quad (70)$$

Para la realización de los cálculos se tienen las siguientes consideraciones:

- El voltaje V_L de entrada considera la profundidad de descarga de 30% del SC, por lo que tiene un rango de 154 [V] hasta 222 [V].
- Voltaje V_H de salida se encuentra fijo en 220 [V]
- Voltaje de ripple en la salida de 1%, $\Delta V_H = 2.2$
- Una corriente de descarga de 100 [A]
- Corriente de rizado de 10%, $\Delta I_{ind} = 10[A]$
- Frecuencia de conmutación $f_s = 25$ [kHz]

Para el modo de convertidor buck se utiliza la misma selección de capacitores que para el convertidor boost,

$$V_L = D V_H \quad (71)$$

$$L = \frac{V_L (1 - D)}{f_s \Delta I_{ind}} \quad (72)$$

Al resolver, se obtienen las dimensiones indicadas en la Tabla 15.

Tabla 15. Especificación componentes de convertidor dc-dc buck-boost.

Voltaje de entrada [V]	154 – 222
Voltaje de salida [V]	217.8 – 222.2 [V]
Corriente de rizado [A]	10
Voltaje ripple [%]	1
Frecuencia de conmutación [Hz]	25K
Ciclo de trabajo	$0.3 > D > 0$
Condensador de bajo voltaje C_L [μ F]	32.47
Condensador de alto voltaje C_H [μ F]	545.45
Inductancia L [μ H]	431.2

Además del dimensionamiento de los componentes del convertidor dc-dc buck-boost, se debe controlar mediante PWM y un control realimentado, al igual que para la pila de combustible debido al voltaje variable que es entregado por parte del banco de SC, pero agregando un control al momento de cargar el SC.

Capítulo 5: Estrategia de control

Como ya se ha visto a lo largo de este informe, la implementación de cualquier fuente de alimentación para un vehículo eléctrico lleva consigo un sistema de control, el cual es el encargado de administrar de manera eficiente los requerimientos del operador (conductor) a través de los pedales de aceleración y freno, traduciéndolos en incrementos de potencia, reducción de potencia, operación de frenado regenerativo o mecánico, etc.

En el escenario del vehículo diseñado se cuenta con dos fuentes de alimentación, donde una solo es capaz de entregar potencia hasta el valor promedio, mientras que la otra es capaz de entregar las potencias hasta los valores peak y, además, recuperar parte de la energía cinética del automóvil al desacelerar.

De esta forma, se elabora una estrategia de control, la cual tiene como objetivo satisfacer en todo momento la demanda de potencia y mantener tanto el banco de supercondensadores, como las pilas de combustible en su región óptima de funcionamiento.

En la Figura 27 se muestra el flujo de energía presente en el conexionado de las fuentes de alimentación a la ME, donde se observa que la pila de combustible es capaz de entregar energía tanto a la ME como al banco de supercondensadores, mientras que este último, solo entregará potencia a la ME, pero puede recibir la energía producida tanto por el frenado regenerativo, como también en momentos de bajo consumo de potencia, donde la pila de combustible pueda entregar parte de su energía para recargar el SC.

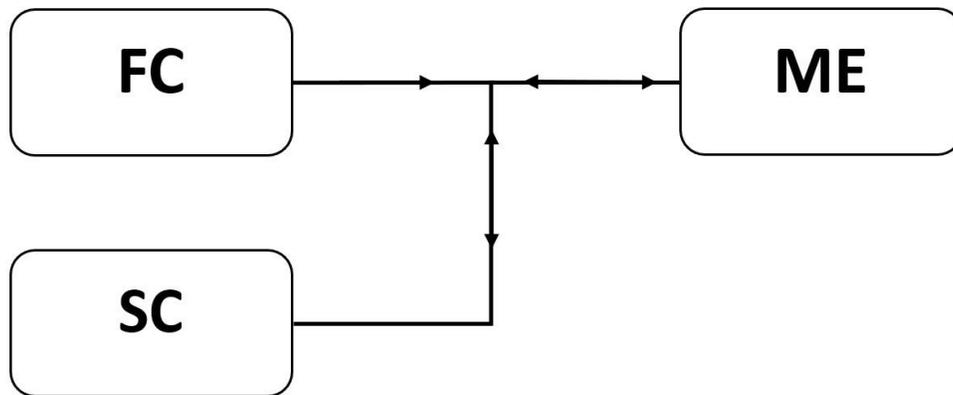


Figura 27. Flujo de energía entre ME, FC y SC.

5.1 Modos de operación.

Para la realización de la estrategia de control, se identifican los 4 posibles estados de operación del EV, los cuales se diferencian por su aceleración y velocidad.

- **Modo de reposo (standstill).**

En este modo el vehículo se encuentra detenido y ni la pila de combustible, ni el supercondensador entregan energía a la ME.

- **Modo de frenado o desaceleración.**

La pila de combustible opera en vacío y el SC absorbe gran parte de la energía cinética del vehículo por medio del frenado regenerativo. Si la desaceleración es muy grande, se combina el frenado regenerativo con un frenado mecánico.

- **Modo de velocidad constante.**

Durante este tipo de funcionamiento, el vehículo se encuentra operando por debajo del límite de potencia promedio a velocidad y potencia constante, por lo que es impulsado en su totalidad por la pila de combustible.

- **Modo de aceleración.**

En este tipo de operación, la energía necesaria para el proceso de aceleración es suministrada por el banco de supercondensadores en su totalidad de ser posible, pero también puede ser apoyado por la pila de combustible, dependiendo los requerimientos de potencia.

5.2 Modo tracción.

Para el funcionamiento del modo de tracción del vehículo, se tienen varias consideraciones.

Cuando la potencia requerida es mayor que la potencia promedio establecida, el vehículo debe operar en modo híbrido, donde tanto la FC y el SC entregan energía a la ME, siendo la FC la encargada de entregar la potencia promedio y el SC los valores peak.

Al operar en niveles por debajo de la potencia promedio, se debe tener en consideración el estado de carga del SC, estableciendo que, si este necesita recargarse, la FC opera en su valor nominal, entregando energía tanto a la ME, como también al SC.

De lo establecido en [1] se presenta que la estrategia más eficiente para el manejo de ambas fuentes de alimentación consiste en utilizar los SC en su máxima potencia al momento de los modos de aceleración y frenado, cargando además estos mismos por medio de la FC

en los momentos de reposo o velocidad constante con potencias por debajo del promedio. El objetivo de esto es utilizar lo menos posible la pila de combustible durante aceleraciones y frenados, maximizando las características de eficiencia del supercondensador. En la Figura 28 se muestra la estrategia de control propuesta.

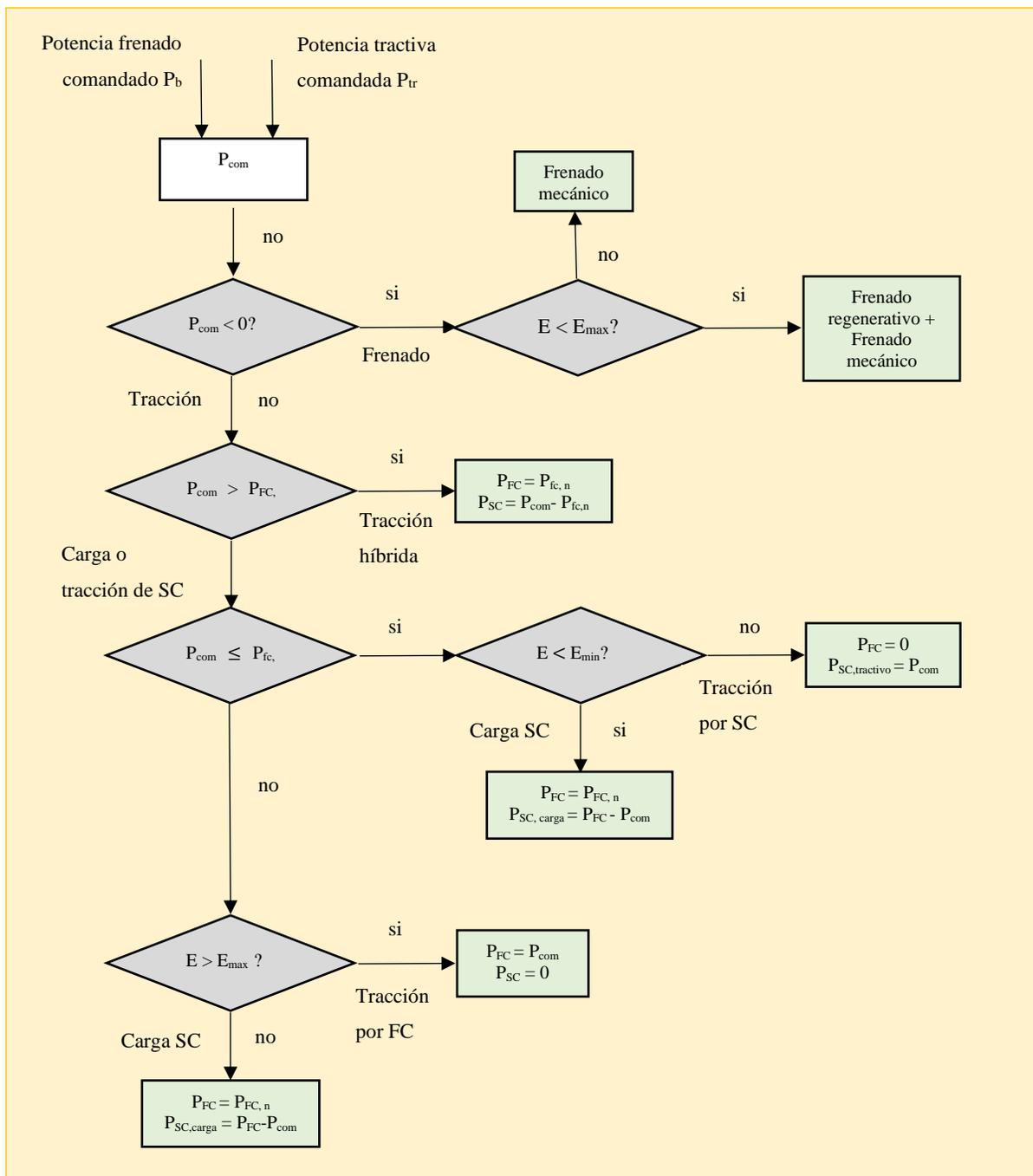


Figura 28. Estrategia de control híbrido con FC y SC.

En esta estrategia de control propuesta se considera la referencia de dos pedales operados por el conductor del vehículo, uno de ellos es el encargado de frenar el vehículo y el otro es el encargado de entregar la potencia tractiva. A esta señal se le denomina potencia comandada P_{com} y en base a ella se toman las siguientes consideraciones.

Analizando la señal de potencia comandada se evalúa si es que P_{com} es menor o mayor a cero, lo cual define si se actúa el sistema de frenado del vehículo o bien, el sistema de tracción. Al momento de operar el sistema de frenado, se debe considerar el estado de carga del banco de supercondensadores y la magnitud de la energía total a ser disipada, donde, en caso de no ser posible disipar por medio del frenado regenerativo, se hace uso del frenado mecánico.

Por otro lado, al operar el sistema de tracción, se evalúa la potencia comandada y se analiza si esta es mayor o menor a la potencia promedio del vehículo, por lo que, de ser mayor se considera el funcionamiento híbrido de tracción, donde opera tanto la fuente primaria, como la secundaria de alimentación, es decir, que $P_{FC} = P_{FC,nom}$ y $P_{SC} = P_{com} - P_{FC}$. En el caso de que la potencia comandada sea menor que la potencia mínima preestablecida para la FC y el banco de SC necesita cargarse, la FC opera en su valor nominal, suministrando energía eléctrica tanto para propulsar el vehículo, como también carga el banco de SC. Por otra parte, si el banco de SC no necesita recargarse, la FC opera en su valor mínimo y el vehículo es propulsado por la fuente secundaria.

Finalmente, si la potencia comandada es mayor a la potencia mínima de la FC y menor que su potencia nominal, y, además, el banco de SC no necesita recargarse, el vehículo es propulsado solamente por la FC. Caso contrario en que el banco de SC si requiere cargarse, la FC opera a su valor nominal y su potencia es dividida tanto para propulsar el vehículo, como también para cargar el banco de SC.

De esta forma la estrategia de control propuesta permite hacer mayor uso de las características que benefician al banco de supercondensadores, permitiendo que este opere siempre que sea posible manteniendo un nivel adecuado de energía de reserva en caso de ser necesario y además maximizando el punto de operación óptimo de la pila de combustible de forma que en caso de no estar entregando su potencia nominal al motor, parte de esta energía sea distribuida para cargar el banco de supercondensadores.

Capítulo 6: Simulaciones y resultados

Como se ha visto en capítulos anteriores, para poder evaluar el comportamiento del vehículo y asemejarlo a la realidad, se hace uso de ciclos de conducción en los cuales se presentan distintas variaciones de velocidad bajo las cuales debe operar el automóvil y, por ende, las distintas potencias requeridas por parte del eje tractivo.

A lo largo de este capítulo se realizan simulaciones para evaluar el comportamiento de la estrategia de control diseñada, para ello se hace uso del ciclo de conducción indicado en la Figura 29 y también se agrega la eficiencia de los componentes seleccionados para el vehículo, donde se considera una eficiencia total del sistema de un 80% tomando en cuenta los convertidores dc-dc, ME, inversor, caja reductora. Además, para el factor de frenado regenerativo como se vio en el capítulo 3.4.4, se considerará un $\alpha = 80\%$.

En la Figura 29 se observa el ciclo de conducción WLTP-3 a utilizar para la simulación del vehículo, en el cual se presentan los distintos niveles de velocidades bajo los cuales se opera.

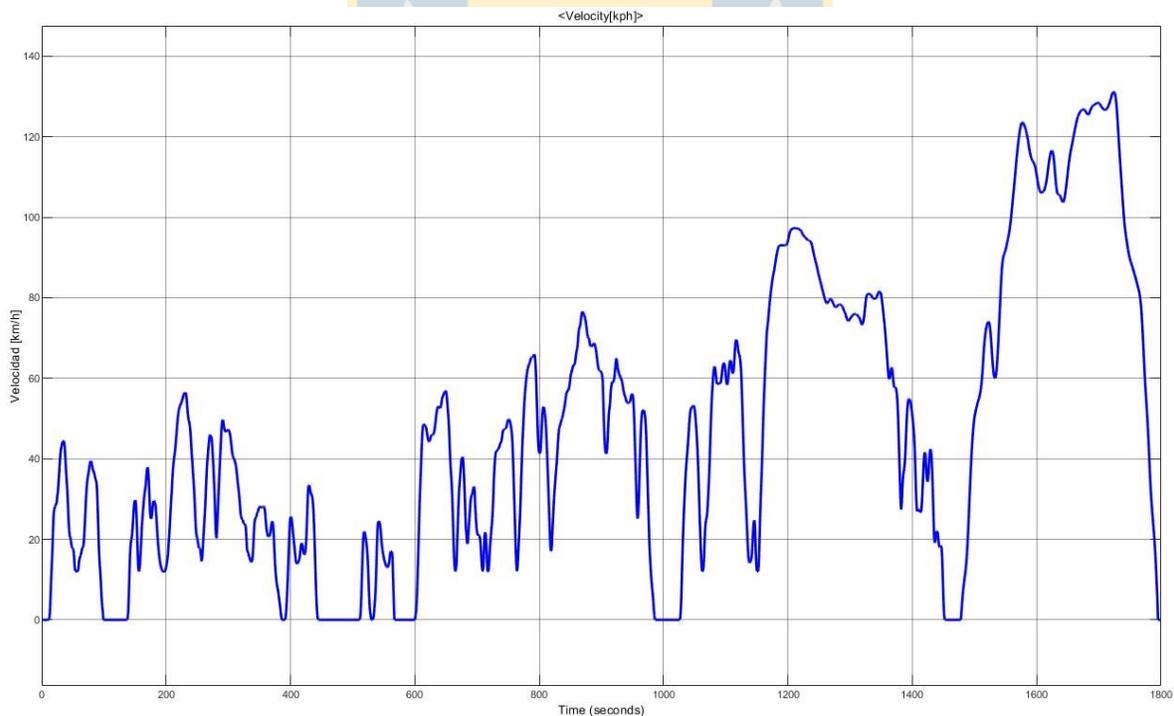


Figura 29. Ciclo de conducción WLTP-3 [26].

En base a esto, se calcula la potencia en el eje tractivo requerida en todo momento por el vehículo, como también la potencia que debe desarrollar la ME tomando en consideración todas las pérdidas presentes en el sistema como se muestra en la Figura 30.

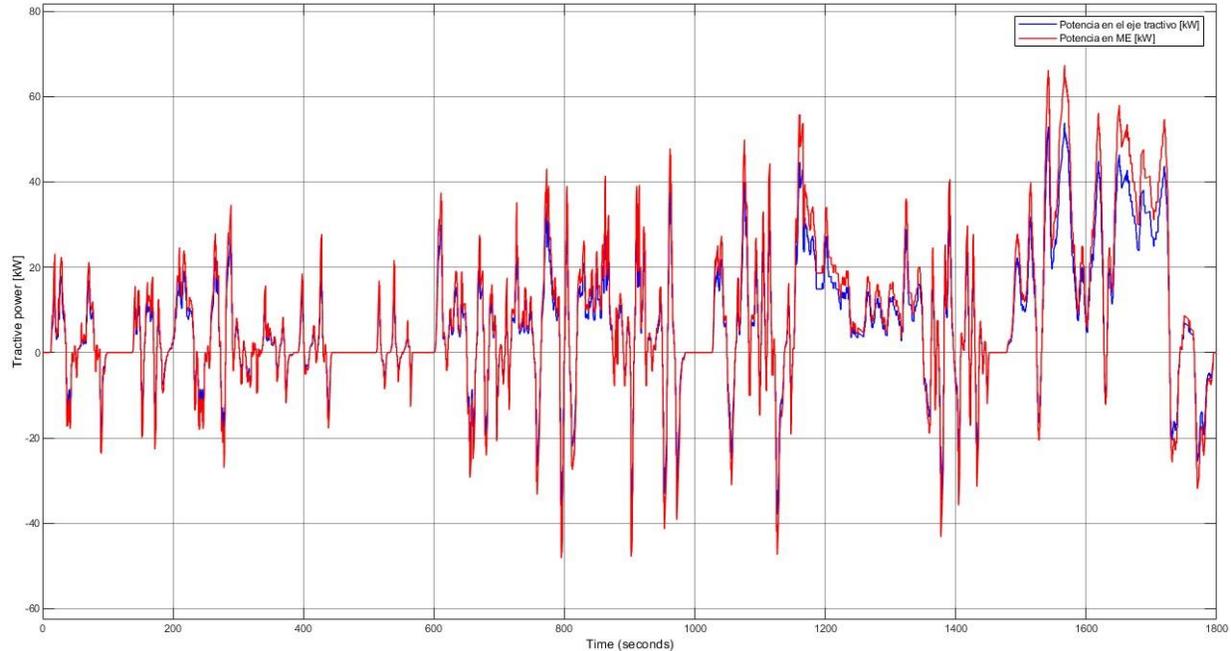


Figura 30. Potencia tractiva real y total en [kW]

Para la implementación de la estrategia de control se considera el valor de potencia nominal obtenido para la pila de combustible de $P_{FC,nom} = 33.92 [kW]$ y un valor mínimo equivalente al 20% de su valor nominal, lo que equivale a $P_{FC,min} = 6.78 [kW]$. Por otro lado, la energía total que puede ser almacenada en el banco de SC es de $E_{SC} = 0.1542 [kWh]$, de donde se considera un rango de operación desde el 25% hasta un 80% de carga total de dicho banco de SC.

En el Anexo E se encuentra el código en matlab en el que se aplica la estrategia de control indicada en la Figura 28. En la Figura 31 y Figura 32 se muestra la potencia tractiva a ser entregada por la pila de combustible y por el banco de SC respectivamente.

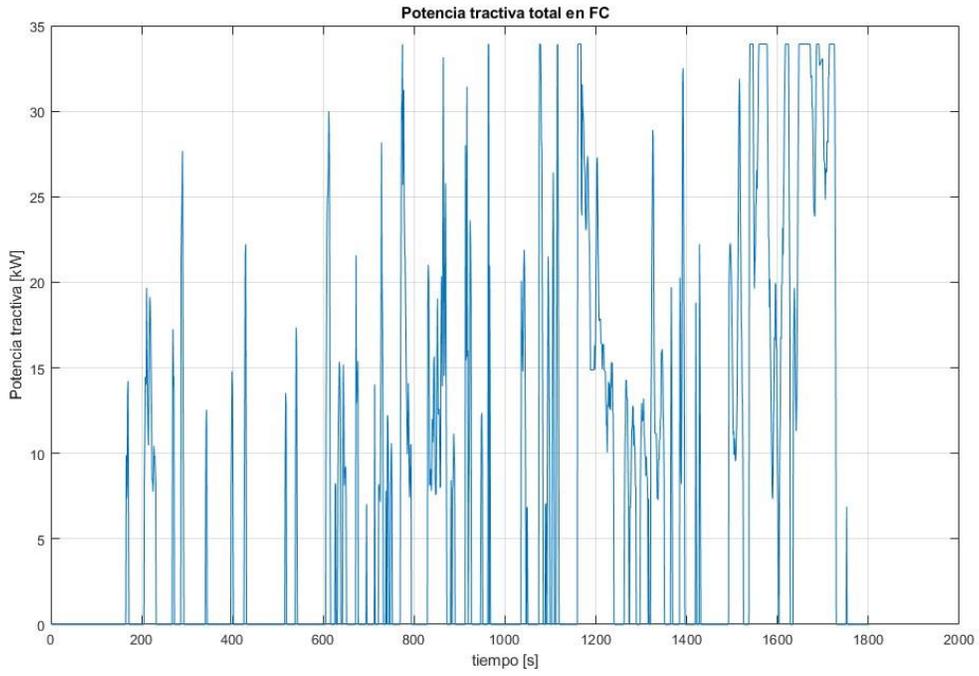


Figura 31. Potencia tractiva total entregada por la FC [kW].

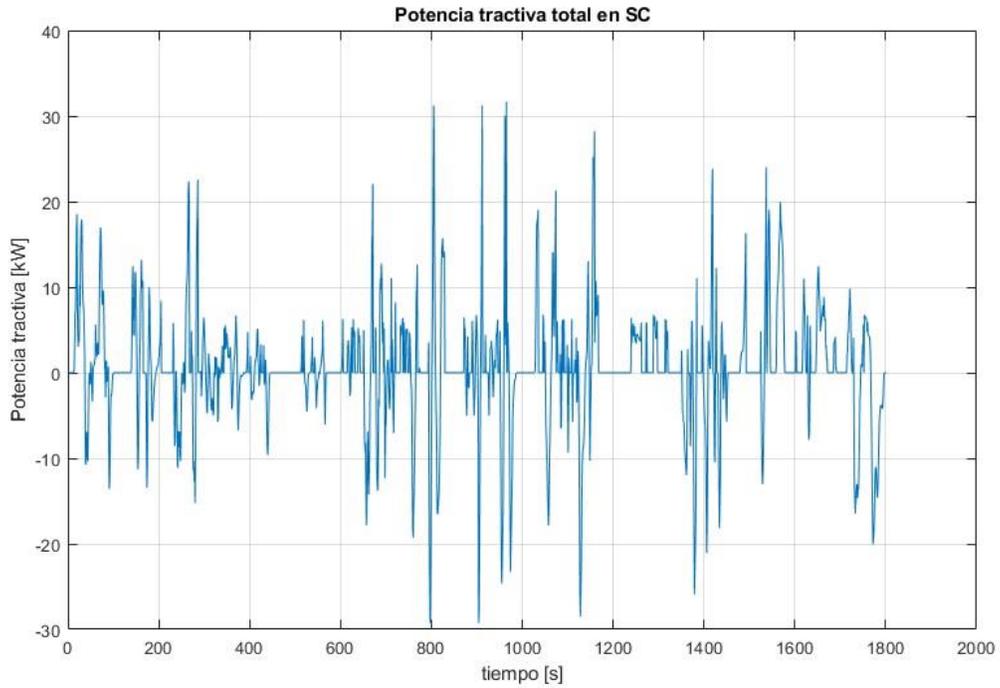


Figura 32. Potencia tractiva total entregada por el banco de SC [kW].

De la Figura 31 se puede destacar que existen muchos periodos de tiempo en los que no se requiere la operación de la pila de combustible, ya que la potencia es entregada por el banco de SC, además que gracias a la estrategia de control propuesta se logra que este mismo opere a lo largo de todo el ciclo de conducción en gran medida, aprovechando notoriamente sus características de eficiencia y su tiempo de carga. También es posible comparar la potencia tractiva entregada por el banco de SC de la Figura 32 y la potencia para la cual fue dimensionado este banco en la figura Figura 22, donde se consideraba que la función principal de la fuente secundaria es entregar la potencia peak que requiera el vehículo, sin embargo, se logra mantener un nivel de reserva de energía en todo momento con el fin de que permita entregar los niveles altos de potencia que se necesiten en conjunto con la pila de combustible como se muestra en la Figura 33, en donde se muestra un intervalo de 1 minuto en el que opera la pila de combustible entregando su valor nominal y el banco de supercondensadores entregando la potencia requerida para alcanzar los valores peak.

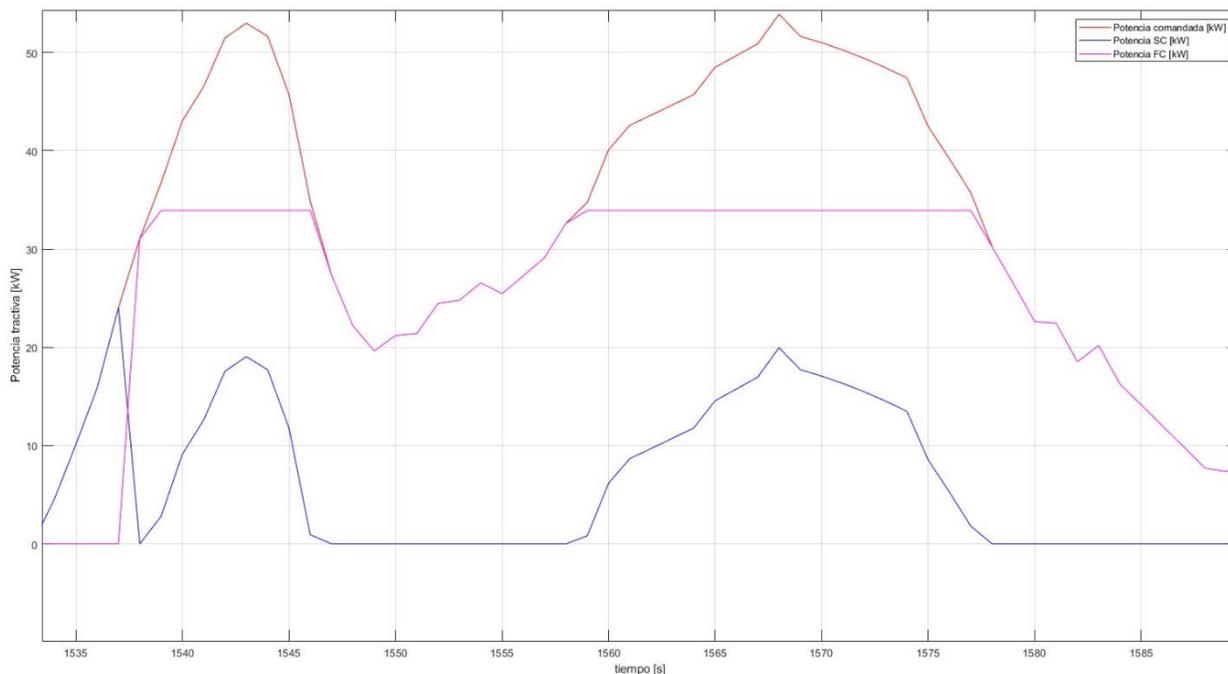
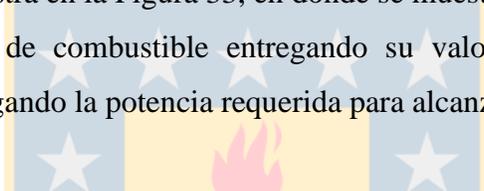


Figura 33. Potencia comandada, potencia en FC y potencia en banco de SC durante un minuto en ciclo de conducción WLTP-3.

También, en la Figura 34 y Figura 35 se observa la energía tractiva total a lo largo del ciclo de conducción tanto para la pila de combustible, como para el banco de SC respectivamente. Se considera en este caso la capacidad de carga del banco de SC por medio del frenado regenerativo o por la entrega de energía por parte de la fuente primaria en los momentos en que la demanda de potencia esté por debajo de la potencia nominal de la FC. Por otra parte, como se ha mencionado a lo largo del presente informe, la pila de combustible no posee la capacidad de recuperar energía en ninguna situación, por lo que su consumo de energía resulta solo en aumento.

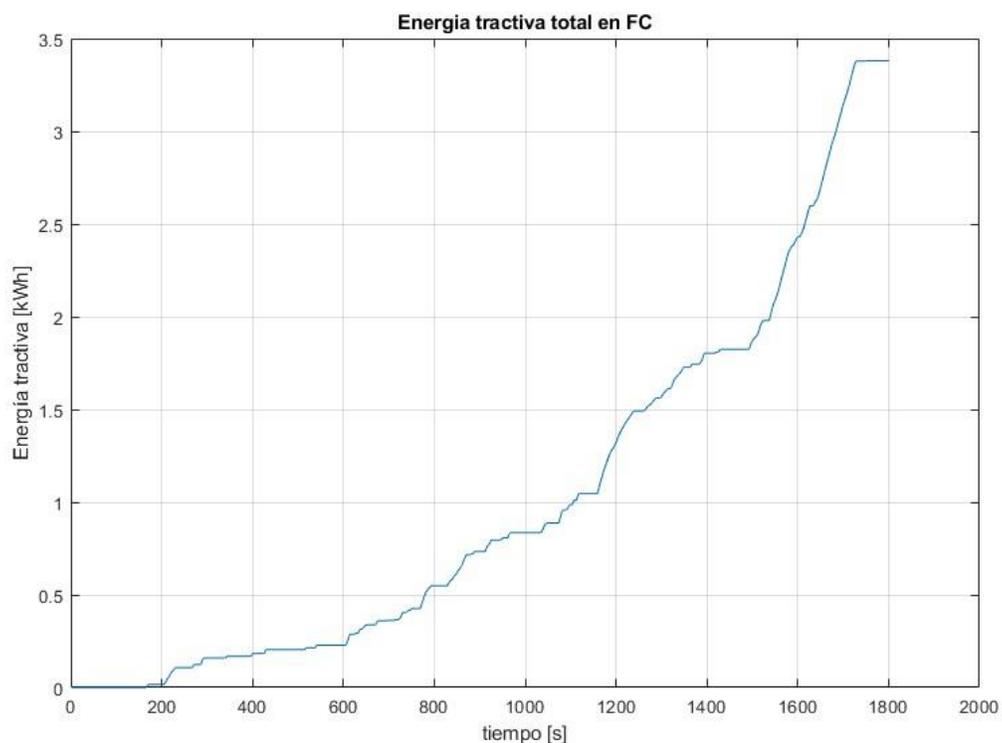


Figura 34. Energía tractiva total en la FC [kWh]

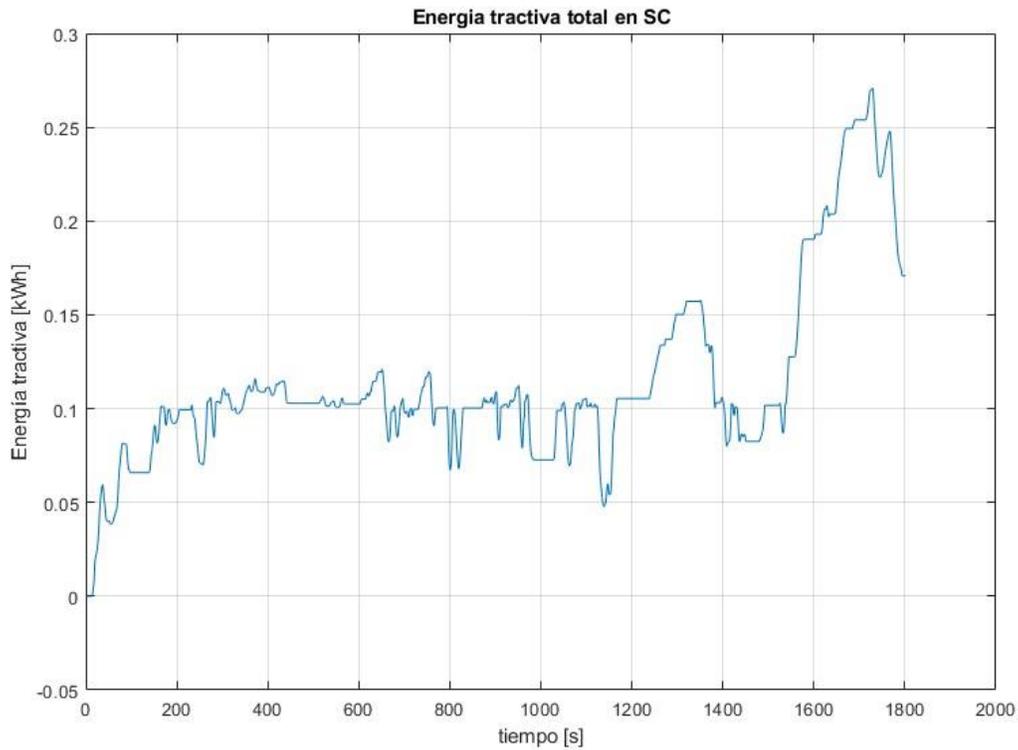


Figura 35. Energía tractiva total en el banco de SC [kWh]

En base a las variaciones en la energía tractiva durante el ciclo de conducción y considerando que la capacidad total de energía que posee el banco de SC es de $E_{SC} = 0.1542$ [kWh], es posible calcular el estado de carga del SC en porcentaje en todo momento, permitiendo observar gráficamente el comportamiento, la profundidad de descarga y la carga del banco de SC, como se muestra en la Figura 36.

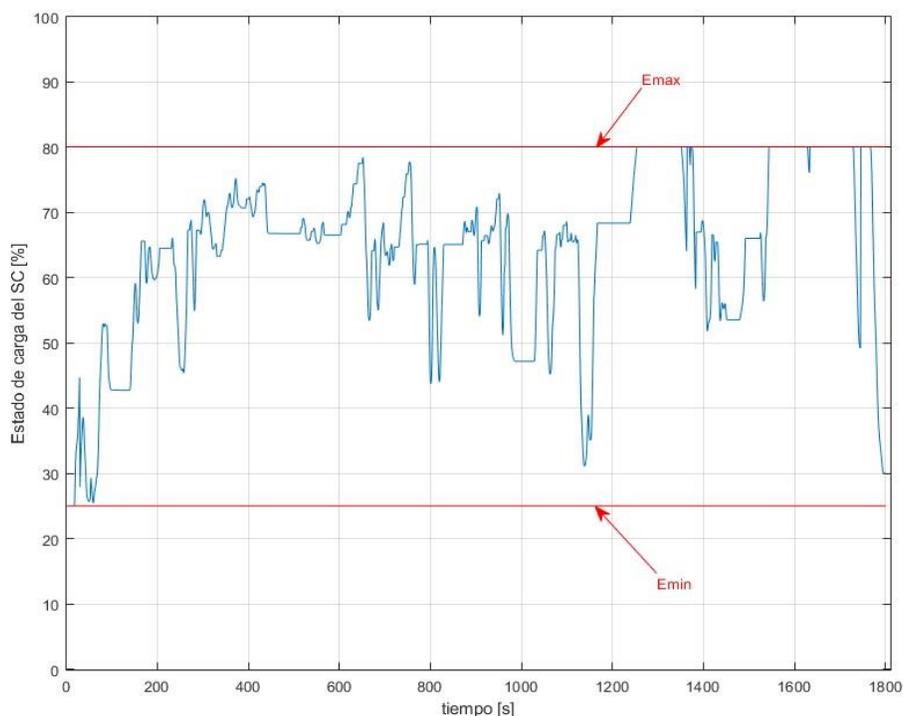


Figura 36. Estado de carga del SC [%]

En la Figura 36 es posible observar que el dimensionamiento del banco de SC permite suplir de perfecta manera los requisitos de energía a lo largo de todo el ciclo de conducción permitiendo su carga y descarga repetidas veces. También, si bien al dimensionar el banco de SC en el capítulo 4.2.3 se considera su funcionamiento solo para complementar a la fuente primaria en los momentos de alto consumo de potencia, al implementar la estrategia de control, se logra obtener una eficiencia mucho mayor a la esperada, permitiendo operar el banco de SC a lo largo de todo el ciclo de conducción maximizando sus características de carga y descarga.

Capítulo 7: Conclusiones

A lo largo de este informe se presentaron los principales tópicos de los elementos presentes en los vehículos eléctricos, realizando a partir de ellos un estudio y posterior dimensionamiento de los principales componentes y características necesarios para la especificación de un FCEV, como son el motor eléctrico, las fuentes de alimentación, los convertidores dc-dc unidireccional y bidireccional para cada fuente, como también las características físicas, como el largo, ancho, alto, peso, etc.

Basados en estas características se modela el comportamiento del vehículo en base a los esfuerzos tractivos, potencias y torques necesarios a lo largo de un ciclo de conducción ya establecido, los cuales fueron desarrollados, obteniéndose un buen desempeño por parte del automóvil, cumpliendo con todos los estándares que se establecieron, pudiendo suplir de manera eficiente con los requerimientos de potencia por parte del operador en todo momento.

Se observa al momento de simular el vehículo en base a un ciclo de conducción que para velocidades bajas y medias, la potencia requerida no supera el valor promedio, por lo que la pila de combustible es capaz de encargarse sin necesidad del uso de una fuente secundaria, sin embargo, es en los ciclos de conducción urbana, donde los supercondensadores obtienen su mayor eficiencia, debido a que se presentan gran cantidad de aceleraciones y frenados en corto tiempo, lo que permite descargar y cargar el banco de SC con mayor frecuencia que en ciclos en carretera gracias al frenado regenerativo, logrando reutilizar gran parte de la energía, reduciendo notablemente el uso de la pila de combustible y por ende, el uso de H_2 .

También es destacable que si bien, los ciclos de conducción utilizados simulan de buena forma el comportamiento de un vehículo al operar a distintas velocidades en un periodo de tiempo, este no se asemeja en su totalidad a la realidad, donde es posible evidenciar aceleraciones y desaceleraciones mucho mayores, conducción sobre distintas superficies y con diferentes inclinaciones, lo que haría variar mucho más los consumos de potencia.

La selección de una correcta estrategia de control resulta esencial en un sistema híbrido de pilas de combustible con banco de supercondensadores, ya que esto permite el uso

de los SC en momentos de aceleración y desaceleración que se requieran, y no solo para entregar potencia peak.

Al comparar los resultados obtenidos para la potencia entregada por el banco de SC con lo previsto al momento de su dimensionamiento, es posible notar que gracias a la estrategia de control definida se hace un uso mucho más eficiente de las características de los supercondensadores y, por ende, se logra que la fuente primaria de FC opere en menor medida.

A diferencia de las baterías utilizadas en vehículos eléctricos en la actualidad, los supercondensadores poseen una energía específica mucho menor, lo que implica que sus ciclos de carga y descarga sean demasiado cortos y en muy breves periodos de tiempo. Esto si bien permite reutilizar la energía constantemente gracias al frenado regenerativo y su alta eficiencia, requiere de un constante deterioro físico, que, si bien se compensa gracias a sus más de 10000 ciclos de vida, no deja de ser un punto que considerar al momento de la implementación en un vehículo híbrido.

Se considera también el esencial trabajo que desempeñan los convertidores dc-dc dentro del sistema de tracción del vehículo, ya que resulta indispensable poder controlar el voltaje que es entregado por las fuentes de alimentación y, sobre todo, poder controlar la potencia a entregar a la máquina eléctrica en base a los requerimientos del operador.

Por último, se puede considerar que tanto el motor, banco de supercondensadores y pilas de combustible se encuentran dentro de un margen aceptable, debido a que sus características como volumen, peso y desempeño se asemejan a vehículos eléctricos actuales del mercado.

7.1 Trabajo futuro.

Como se ha discutido a lo largo del trabajo sobre la selección de los convertidores dc-dc unidireccional y bidireccional para su implementación para la pila de combustible y el banco de supercondensadores, respectivamente, no se establece concretamente el sistema de control PWM, por lo que es necesario diseñar un sistema retroalimentado a utilizar, de manera que, en base a las variaciones del voltaje de entrada de la fuente, sea posible ajustar

el ciclo de trabajo del PWM, con el objetivo de mantener el voltaje de salida siempre constante y regulado.

En base a lo señalado anteriormente, de manera de confirmar el funcionamiento y considerar la eficiencia del sistema, se debiese evaluar por medio de simulaciones tanto el comportamiento de los convertidores dc-dc, como también el de ambas fuentes de alimentación.

Como se logró ver en los resultados y simulaciones en el capítulo 12, existe un esfuerzo constante por parte del banco de supercondensadores, debido a que completa los ciclos de carga y descarga en breves periodos de tiempo, lo que podría reducir su vida útil en mayor cantidad de lo que se tiene estipulado. Resulta conveniente que se realice un estudio comparativo entre las baterías más utilizadas en vehículos eléctricos y los supercondensadores, con el fin de crear una idea general de cuanto es la vida útil real que podría llegar a tener cada uno.

También, al momento de la especificación de la máquina eléctrica, se considera el motor adjunto en el anexo A, en el cual se considera la implementación de un inversor incluido en el motor escogido, sin embargo, el cálculo y dimensionamiento del inversor puede resultar más conveniente, ya que se puede tomar en consideración las características específicas que se requieran. En el concepto de la ME es importante recalcar que es posible escoger un motor que cumpla de mejor manera con los estándares propuestos, en específico, con el valor de torque calculado y la potencia nominal, evitando su sobredimensionamiento.

Por último, el diseño de un vehículo eléctrico híbrido con estas características tiene como objetivo buscar ser una alternativa a los EV presentes hoy en día en el mercado, entregando las mismas características que pudiese tener tanto un vehículo ICE o un EV. Por esta razón, resultaría útil poder realizar un estudio para comparar tanto en temas de eficiencia, desempeño, costos y accesibilidad los distintos vehículos disponibles en el mercado, señalando las ventajas y desventajas que brinda cada uno.

Anexos

Anexo A: Especificaciones motor eléctrico.

120KW Electric Car Motor (Motor + Inverter)

- 1) Small size and high energy. The motor weighs about 45Kg, but the peak power is up to 120kW;
- 2) the measured performance is perfect. The highest efficiency of the assembly system reaches 94.8%, and the high efficiency area of >85% accounts for 85% of BBB>
- 3) Perfect electric control match of motor. Peak torque under electric peak current condition, perfect design match!
- 4) Can be used in cars, small trucks, Marine motor.
- 5) Permanent magnet motor, high efficiency.

Model	TZ204XSB12	No.	
Coil connection	Y	Phase	Three-phase
Working system	S9	Rated voltage (VAC)	220
Continuous power(KW)	63	Peak power(KW)	120
Continuous torque (N.m)	150	Peak torque (N.m)	250
Rated speed (rpm)	4000	Maximum speed (rpm)	12000
Stall torque(N.m)	250	Stalling duration(s)	10
Insulation class	H	Protection level	IP67
quality	45KG	Dimensions	L310X D241
cooling method	Liquid cooling	Cooling water flow (L/Min)	> 8

Anexo B: Especificaciones pila de combustible.

PRODUCT SPECIFICATIONS

Rated Power [kW] ¹	3.8	4.8	10.6	14.4	17.3	21.2
DC voltage (at 300A) ¹	12.9	16.1	35.4	48.2	57.9	70.7
Mass (with no coolant) [kg]	6.2	6.8	10.2	12.1	14.3	16.6
Stack core length [mm]	92	104	174	220	255	302
Stack core width [mm]	760					
Stack core height [mm]	60					

Type	PEM (Proton Exchange Membrane) fuel cell stack	
Performance	Maximum current	300A
	Shock and vibration	Automotive ²
Fuel:	Fuel composition (pre-humidification)	SAE J2719
Oxidant	Oxidant composition (pre-humidification)	Compressed ambient (filtered to remove particulates)
Stack Temperatures	Storage temperature ³	-40 to 60° C (-40 to 140° F)
	Start-up temperature	> 2° C (> 36° F)
	Fluid inlet temperature (operating)	2 to 68° C (36 to 154° F) ¹

Additional information available upon request.

¹ Values achieved at Ballard-specified conditions at the beginning of operational life.

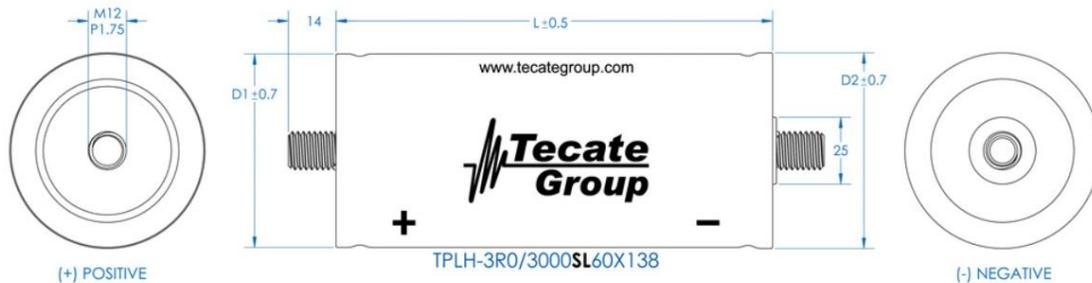
² Vibration 5g, meets USABC/SNL CRADA No. SC961447 USABC 10. Shock: 5g sections of IEC 60068-2-27 Ea and IEC 60068-2-29 Eb.

³ Allowable temperature following approved Ballard dry out procedure only, without dry out procedure +2 ~60° C.

Anexo C: Especificaciones supercondensadores.

GENERAL SPECIFICATIONS

Item	Performance
Operating temperature	-40°C to +65°C
Storage temperature	-40°C to +70°C
Capacitance range	650F to 3,000F
Rated voltage	3 VDC
Surge voltage	3.2 VDC
Temperature characteristics	Capacitance change: Within $\pm 5\%$ of initial measured value at +25°C (-40°C to +65°C) Internal resistance: Within $\pm 50\%$ of initial measured value at +25°C (at -40°C)
Endurance (At rated voltage & max. operating temp)	After 1500 hours: Capacitance change: Within $\pm 20\%$ of initial rated value Internal resistance: Within 2 times of initial specified value
Projected Load life (At rated voltage & 25°C)	10 years: Capacitance change: Within $\pm 20\%$ of initial rated value Internal resistance: Within 2 times of initial specified value
Projected cycle life (From rated voltage to 1/2 rated voltage at 25°C)	1,000,000 cycles between Vr and $\frac{1}{2}$ Vr: Capacitance change: Within $\pm 20\%$ of initial rated value Internal resistance: Within 2 times of initial specified value
Shelf life	After 4 years at 25°C without load, the capacitor shall meet the specified endurance limits.



STANDARD PRODUCTS

Part Number	Nom. Cap. (F)	GMV (F)*	ESR DC (mΩ)	ESR AC (mΩ)	Leakage Current (mA) (72 hrs @ 25C)	Dimensions (mm)			Rated Current (A)	Weight/Unit (grams)
						D1	D2	L		
TPLH-3R0/650SL60X51	650	650	0.6	0.35	1.5	60	60.7	51.5	590	210
TPLH-3R0/1200SL60X74	1200	1200	0.36	0.25	2.7	60	60.7	74	1060	295
TPLH-3R0/1500SL60X85	1500	1500	0.31	0.27	3	60	60.7	85	1300	330
TPLH-3R0/2000SL60X102	2000	2000	0.3	0.21	4	60	60.7	102	1500	390
TPLH-3R0/3000SL60X138	3000	3000	0.26	0.17	5	60	60.7	138	2200	525

*NOTE: GMV = Guaranteed Minimum Value.

Anexo D: Evaluación vehículo eléctrico en Simulink

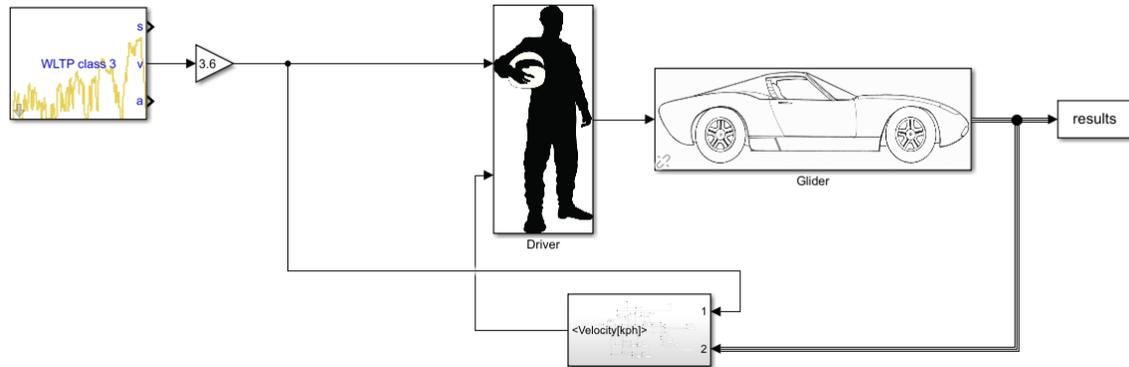


Figura 37. Simulación vehículo eléctrico con ciclo de conducción WLTP-3

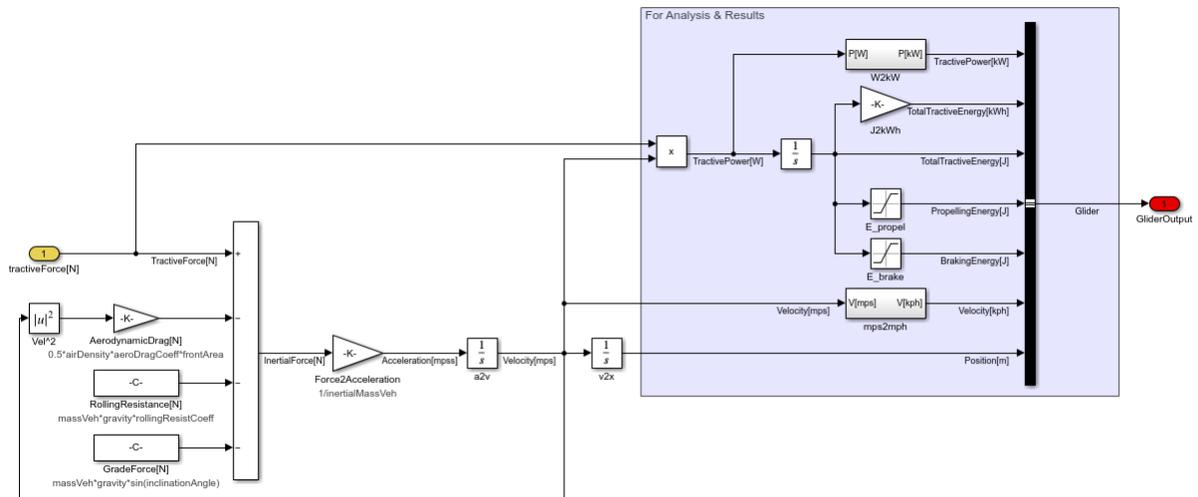


Figura 38. Cálculo de esfuerzos, potencia y torque durante conducción (glider)

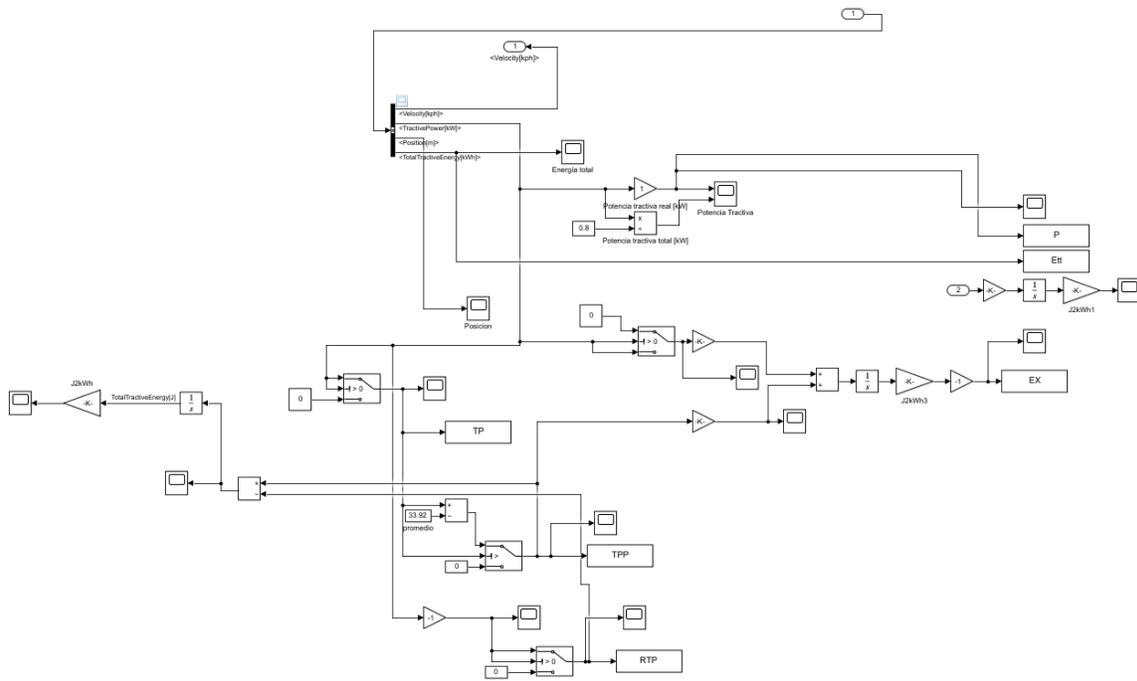


Figura 39. Cálculos de potencia y retroalimentación de velocidad del EV (Mediciones)

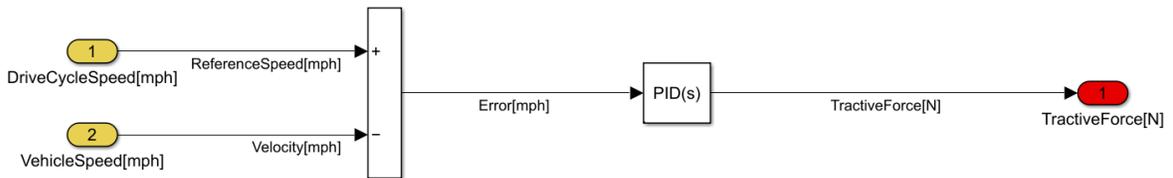


Figura 40. Control PID regulador de la fuerza tractiva.

Anexo E: Código estrategia de control en Matlab.

```
clear all
close all
clc
n=length(P);
t=1:1801;
Pcom = P*1000;
Pfcnom =33920;
Et=0.8*0.1542;      % Energía total almacenada en los supercondensadores
Emin=0.25*Et;
Pfcmin=0.2*Pfcnom;

flag0=0;
flag1=0;
flag2=0;
flag3=0;
flag4=0;
flag5=0;
flag10=0;
for i=2:n
    if Pcom(i) > Pfcmin
        flag10=flag10+1;
    end
end

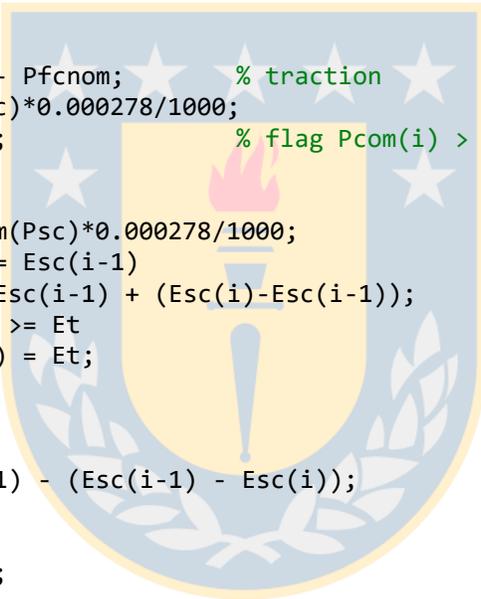
figure(1)
plot(t,Pcom)
grid on
ylabel('Potencia tractiva [kW]')
xlabel('tiempo [s]')
title('Potencia comandada')
F = 1:1801;
E = F*0;
Psc = F*0;

for i = 2:n
if Pcom(i) < 0
    Psc(i)=0.8*Pcom(i);
    Pfc(i)=0;
    flag0=flag0+1;
    %%
    if E(i) < Et
        Esc = cumsum(Psc)*0.000278/1000;
        if Esc(i) >= Esc(i-1)
            E(i) = Esc(i-1) + (Esc(i)-Esc(i-1));
            if E(i) >= Et
                E(i) = Et;
            else
                end
        else
            E(i) = E(i-1) - (Esc(i-1) - Esc(i));
        end
    if E(i) <= Emin
        E(i) = Emin;
    end
end
```



```

else
end
else % E(i) >= Et
Esc = cumsum(Psc)*0.000278/1000;
if Esc(i) > Esc(i-1)
E(i) = E(i-1) + (Esc(i) - Esc(i-1));
if E(i) >= Et
E(i) = Et;
else
end
else % Esc(i) <= Esc(i-1)
E(i) = E(i-1) - (Esc(i-1) - Esc(i));
if E(i) <= Emin
E(i) = Emin;
end
end
end
else % Pcom(i) >= 0
if Pcom(i) > Pfcnom
Pfc(i)=Pfcnom;
Psc(i)=Pcom(i) - Pfcnom; % traction
Esc = cumsum(Psc)*0.000278/1000;
flag1 = flag1+1; % flag Pcom(i) > Pfcnom
%%
if E(i) < Et
Esc = cumsum(Psc)*0.000278/1000;
if Esc(i) >= Esc(i-1)
E(i) = Esc(i-1) + (Esc(i)-Esc(i-1));
if E(i) >= Et
E(i) = Et;
else
end
else
E(i) = E(i-1) - (Esc(i-1) - Esc(i));
end
if E(i) <= Emin
E(i) = Emin;
else
end
else % E(i) >= Et
if Esc(i) > Esc(i-1)
E(i) = E(i-1) + (Esc(i) - Esc(i-1));
if E(i) >= Et
E(i) = Et;
else
end
else % Esc(i) <= Esc(i-1)
E(i) = E(i-1) - (Esc(i-1) - Esc(i));
if E(i) <= Emin
E(i) = Emin;
else
end
end
end
end
%
```

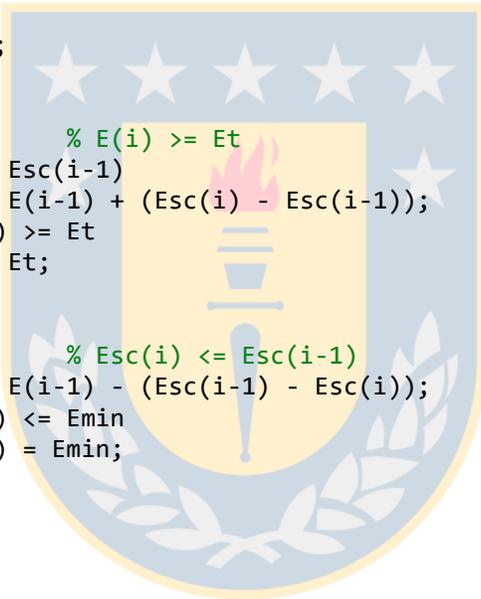


```

elseif Pcom(i) <= Pfcmin
    if E(i-1) < Et*0.3
        Pfc(i) = 0;%Pfcnom;
        Psc(i) = Pcom(i);%(Pfc(i) - Pcom(i));        % charging
        Esc = cumsum(Psc)*0.000278/1000;
        flag2 = flag2+1;        % flag Pcom(i) > Pfcnom
    %%
    if E(i) < Et
        Esc = cumsum(Psc)*0.000278/1000;
        if Esc(i) >= Esc(i-1)
            E(i) = Esc(i-1) + (Esc(i)-Esc(i-1));
            if E(i) >= Et
                E(i) = Et;
            else
                end
        else
            E(i) = E(i-1) - (Esc(i-1) - Esc(i));
        end
    if E(i) <= Emin
        E(i) = Emin;
    else
        end
    else
        % E(i) >= Et
        if Esc(i) > Esc(i-1)
            E(i) = E(i-1) + (Esc(i) - Esc(i-1));
            if E(i) >= Et
                E(i) = Et;
            else
                end
        else
            % Esc(i) <= Esc(i-1)
            E(i) = E(i-1) - (Esc(i-1) - Esc(i));
            if E(i) <= Emin
                E(i) = Emin;
            else
                end
        end
    end
end
end
%
else
    % E(i)> Emin
    Pfc(i)=0;
    Psc(i) = Pcom(i);        % traction
    Esc = cumsum(Psc)*0.000278/1000;

    flag3 = flag3+1;        % flag Pcom(i) > Pfcnom
    %%
    if E(i) < Et
        Esc = cumsum(Psc)*0.000278/1000;
        if Esc(i) >= Esc(i-1)
            E(i) = Esc(i-1) + (Esc(i)-Esc(i-1));
            if E(i) >= Et
                E(i) = Et;
            else
                end
        else
            end
    else
        E(i) = E(i-1) - (Esc(i-1) - Esc(i));
    end
end

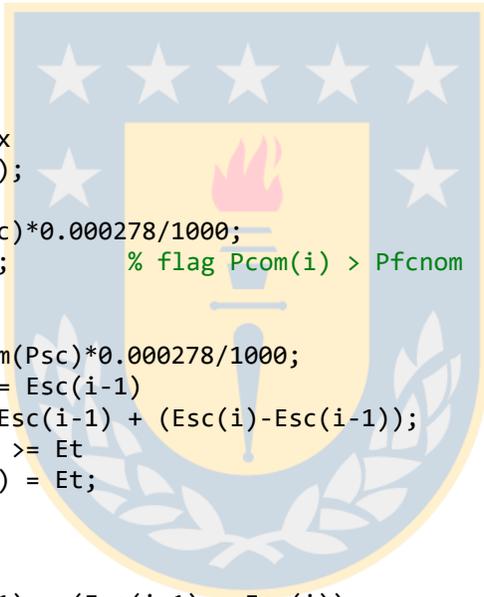
```



```

        end
    if E(i) <= Emin
        E(i) = Emin;
    else
    end
    else
        % E(i) >= Et
        if Esc(i) > Esc(i-1)
            E(i) = E(i-1) + (Esc(i) - Esc(i-1));
            if E(i) >= Et
                E(i) = Et;
            else
            end
        else
            % Esc(i) <= Esc(i-1)
            E(i) = E(i-1) - (Esc(i-1) - Esc(i));
            if E(i) <= Emin
                E(i) = Emin;
            else
            end
        end
    end
end
%
end
elseif E(i-1) > Emax
    Pfc(i) = Pcom(i);
    Psc(i) = 0;
    Esc = cumsum(Psc)*0.000278/1000;
    flag4 = flag4+1; % flag Pcom(i) > Pfcnom
    %%
    if E(i-1) < Et
        Esc = cumsum(Psc)*0.000278/1000;
        if Esc(i) >= Esc(i-1)
            E(i) = Esc(i-1) + (Esc(i)-Esc(i-1));
            if E(i) >= Et
                E(i) = Et;
            else
            end
        else
            E(i) = E(i-1) - (Esc(i-1) - Esc(i));
        end
    if E(i) <= Emin
        E(i) = Emin;
    else
    end
    else
        % E(i) >= Et
        if Esc(i) > Esc(i-1)
            E(i) = E(i-1) + (Esc(i) - Esc(i-1));
            if E(i) >= Et
                E(i) = Et;
            else
            end
        else
            % Esc(i) <= Esc(i-1)
            E(i) = E(i-1) - (Esc(i-1) - Esc(i));
            if E(i) <= Emin
                E(i) = Emin;
            else
            end
        end
    end
end

```

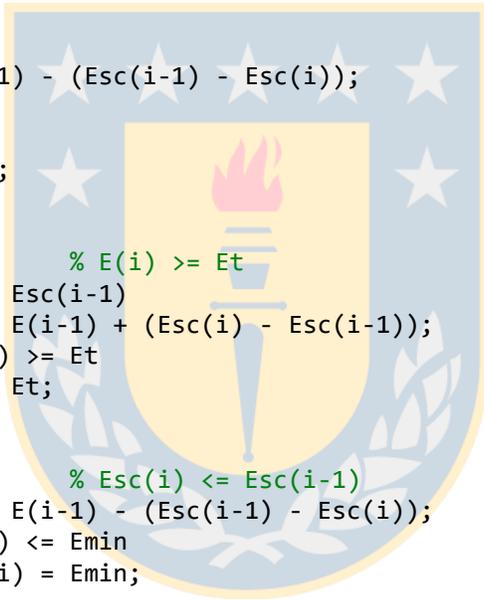


```

        end
    end
end
%
else        % Pcom(i) < Pfcnom
    Pfc(i) = 0;%Pfcnom;
    Psc(i) = Pcom(i);%(Pfc(i) - Pcom(i));        % charging
    Esc = cumsum(Psc)*0.000278/1000;
    flag5 = flag5+1;        % flag Pcom(i) > Pfcnom

    %%
    if E(i-1) < Et
        Esc = cumsum(Psc)*0.000278/1000;
        if Esc(i) >= Esc(i-1)
            E(i) = Esc(i-1) + (Esc(i)-Esc(i-1));
            if E(i) >= Et
                E(i) = Et;
            else
                end
        else
            E(i) = E(i-1) - (Esc(i-1) - Esc(i));
            end
        if E(i) <= Emin
            E(i) = Emin;
        else
            end
        else        % E(i) >= Et
            if Esc(i) > Esc(i-1)
                E(i) = E(i-1) + (Esc(i) - Esc(i-1));
                if E(i) >= Et
                    E(i) = Et;
                else
                    end
            else        % Esc(i) <= Esc(i-1)
                E(i) = E(i-1) - (Esc(i-1) - Esc(i));
                if E(i) <= Emin
                    E(i) = Emin;
                else
                    end
            end
        end
    end
end
%
end
end
end
%%
Efc=cumsum(Pfc)*0.000278/1000;
E2=E*100/0.1542;

```



```

%%
figure(2)
plot(t,Psc/1000)
grid on
ylabel('Potencia tractiva [kW]')
xlabel('tiempo [s]')
title('Potencia tractiva total en SC')

```

```

figure(3)
plot(t,Pfc/1000)
grid on
ylabel('Potencia tractiva [kW]')
xlabel('tiempo [s]')
title('Potencia tractiva total en FC')

```

```

figure(4)
plot(t,Efc)
grid on
ylabel('Energía tractiva [kWh]')
xlabel('tiempo [s]')
title('Energia tractiva total en FC')

```

```

figure(5)
plot(t,Esc)
grid on
ylabel('Energía tractiva [kWh]')
xlabel('tiempo [s]')
title('Energia tractiva total en SC')

```

```

for i=1:n
N25(i)=25;
N80(i)=80;
end

```

```

figure(6)
plot(t,E2,t,N25,'r',t,N80,'r')
grid on
ylabel('Estado de carga del SC [%]')
xlabel('tiempo [s]')

```

```

Ptotal=Psc+Pfc;

```

```

figure(7)
plot(t,Ptotal)
grid on
ylabel('Potencia tractiva [kW]')
xlabel('tiempo [s]')

```

```

Ptotal2=Ptotal.';
Pres=Pcom-Ptotal2;

```

```

figure(8)
plot(t,Pres)
grid on
ylabel('Potencia tractiva [kW]')
xlabel('tiempo [s]')

```



Anexo F: Código en Matlab para cálculos de esfuerzos resistivos.

```
clear all
close all
clc
Fr0=0;
Fr5=0;
Fr10=0;
Fr15=0;
Fr20=0;
alfa=[0 2.86 5.71 8.53 11.31]; % inclinacion
p=1.21; % densidad del aire
ancho=1.8; % ancho vehiculo
alto=1.5; % alto vehiculo
Af=ancho*alto; % area frontal
Cd=0.3; % coef de resistencia aerodinamica
V=0:5:135 % velocidad del vehiculo
Vw=0; % velocidad del viento
rd=0.2159 ; % radio efectivo de la rueda
a=0; % a
fr=0.013; % coef resistencia de rodado
Mv=1950; % masa vehiculo
g=9.81; % gravedad
P=Mv*g; % peso del vehiculo
d=1;

k=3.1415/180;
Frod=P*fr*cos(alfa(1)*k);
Faer=(p*Af*Cd*((V+Vw)*(5/18)).^2)/2;
Fg=Mv*g*sin(alfa(1)*k);
Fr0=Frod + Faer + Fg;

Frod=P*fr*cos(alfa(2)*k);
Faer=(p*Af*Cd*((V+Vw)*(5/18)).^2)/2;
Fg=Mv*g*sin(alfa(2)*k);
Fr5=Frod + Faer + Fg;

Frod=P*fr*cos(alfa(3)*k);
Faer=(p*Af*Cd*((V+Vw)*(5/18)).^2)/2;
Fg=Mv*g*sin(alfa(3)*k);
Fr10=Frod + Faer + Fg;

Frod=P*fr*cos(alfa(4)*k);
Faer=(p*Af*Cd*((V+Vw)*(5/18)).^2)/2;
Fg=Mv*g*sin(alfa(4)*k);
Fr15=Frod + Faer + Fg;

Frod=P*fr*cos(alfa(5)*k);
Faer=(p*Af*Cd*((V+Vw)*(5/18)).^2)/2;
Fg=Mv*g*sin(alfa(5)*k);
Fr20=Frod + Faer + Fg;
```

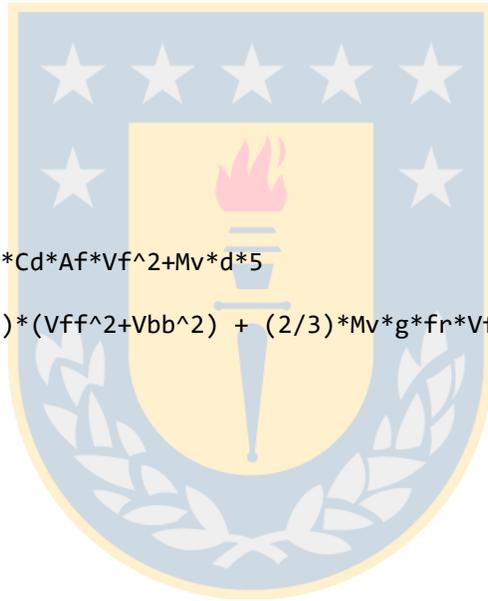
```

figure(2)
plot(V,Fr0)
xlabel('Velocidad [km/h]')
ylabel('Esfuerzo tractivo [N]')
grid on
hold on
plot(V,Fr5)
plot(V,Fr10)
plot(V,Fr15)
plot(V,Fr20)
legend('Fr 0%', 'Fr 5%', 'Fr 10%', 'Fr 15%', 'Fr 20%')
hold off
X=4;
Nmax=12000;
Nb=4000;
ta=17;
Vf=135;
Vff=Vf/3.6;
%Vb=Vff/X;
wf=Vff/rd;
nf=wf*60/(2*pi);
icig=nf/Nmax
nbb=Nb*icig;
wb=nbb*2*pi/60;
Vbb=wb*rd;

Ft=Mv*g*fr*cos(a)+0.5*p*Cd*Af*Vf^2+Mv*d*5

Potencia=((1*Mv)/(2*ta))*(Vff^2+Vbb^2) + (2/3)*Mv*g*fr*Vff + (1/5)*p*Af*Cd*Vff^3
Torque=Potencia/wf

```



Referencias

- [1] Schiffer, J., Bohlen, O., De Doncker, R. W., Sauer, D. U., & Ahn, K. Y. (2005). Optimized energy management for fuelcell-supercap hybrid electric vehicles. In 2005 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (pp. 341-348). IEEE.
- [2] García, P., Fernández, L. M., Torreglosa, J. P., & Jurado, F. (2012). Control Difuso de un Tranvía Híbrido Propulsado por Pila de Combustible, Batería y Supercondensador. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 9(2), 162-169.
- [3] Saleem, A., Liu, N., Junjie, H., Iqbal, A., Hayyat, M. A., & Mateen, M. (2020). Modelling of an electric vehicle for tractive force calculation along with factors affecting the total tractive power and energy demand. In 2020 3rd International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies (iCoMET) (pp. 1-5). IEEE.
- [4] Karthik, M., & Gomathi, K. (2014). Dynamic neural network based parametric modeling of PEM fuel cell system for electric vehicle applications. In 2014 International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE) (pp. 1-5). IEEE.
- [5] Palacio, V. (2014). Convertidores DC-DC para aprovechamiento de frenado regenerativo en sistemas de tracción alimentados con corriente directa (Tesis de grado). Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia.
- [6] Hong, J., Jung, S., Dai Thang, P., & Nam, K. (2008). Hybridization fuel cell with supercapacitor for FCEV. In 2008 Twenty-Third Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (pp. 286-290). IEEE.
- [7] OICA. (2020). World Motor Vehicle Production: World Ranking of Manufacturers 2019.
- [8] Universidad de Michigan. (2019). Are Electric Vehicles Really Greener? Depends on Where You Are.
- [9] Kirubakaran, A., Jain, S., & Nema, R. K. (2009). The PEM fuel cell system with DC/DC boost converter: design, modeling and simulation. *International Journal of recent trends in Engineering*, 1(3), 157.

- [10] Vinnikov, D., Roasto, I., & Zakis, J. (2010). New bi-directional DC/DC converter for supercapacitor interfacing in high-power applications. In Proceedings of 14th International Power Electronics and Motion Control Conference EPE-PEMC 2010 (pp. T11-38). IEEE.
- [11] Kim, S., & Williamson, S. S. (2010). Modeling, design, and control of a fuel cell/battery/ultra-capacitor electric vehicle energy storage system. In 2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (pp. 1-5). IEEE.
- [12] Katz, J. (2017). An Introduction to Automobile Aerodynamics: More than Meets the Eye.
- [13] Camara, M. B., Gualous, H., Gustin, F., Berthon, A., & Dakyo, B. (2009). DC/DC converter design for supercapacitor and battery power management in hybrid vehicle applications—Polynomial control strategy. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57(2), 587-597.
- [14] Mendoza Pérez, C. D., Fragela López, J., Veja Fernández, A., Rabelo Artiles, D., Canasí Piñeiro, M., & Gutiérrez Menéndez, A. M. (2022). Caracterización del Vehículo Eléctrico Aries C2, de la Empresa MINGHONG. *Ingeniería Energética*, 43(2), 110-118.
- [15] Palma, L. (2022). Almacenamiento en supercondensadores [Presentación en clases]. Universidad de Concepción, Chile.
- [16] Herath, N., Binduhewa, P., Samaranayake, L., Ekanayake, J., & Longo, S. (2017). Design of a dual energy storage power converter for a small electric vehicle. In 2017 IEEE International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS) (pp. 1-6). IEEE.
- [17] Kolli, A., Gaillard, A., De Bernardinis, A., Bethoux, O., Hissel, D., & Khatir, Z. (2015). A review on DC/DC converter architectures for power fuel cell applications. *Energy Conversion and Management*, 105, 716-730.
- [18] Escobar Alvarez, J. I. (2019). Convertidor dc-dc para sistema híbrido de batería ion-litio y supercapacitores para aplicación en electromovilidad (Tesis de pregrado, p. 19). Universidad Federico Santa María, Valparaíso, Chile.

[19] Rojas, J., Renaudineau, H., Kouro, S., & Rivera, S. (2017). Partial power DC-DC converter for electric vehicle fast charging stations. In IECON 2017-43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (pp. 5274-5279). IEEE.

[20] Gu, R., Malysz, P., & Emadi, A. (2015). A novel battery/ultracapacitor hybrid energy storage system analysis based on physics-based lithium-ion battery modeling. In 2015 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC) (pp. 1-6). IEEE.

[21] Sen, O. T. (2021). Vehicle Fundamentals (p. 5). Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey.

[22] Palma, L. (2022). Almacenamiento en baterías [Presentación en clases]. Universidad de Concepción, Chile.

[23] Rodriguez H. (2021). Tutorial n° 115. Pilas de combustible. Recuperado de <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn115.html>

[24] Hernández N. (2018). Emulación de una celda de combustible tipo PEM (Tesis de maestría). Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México.

[25] Palma, L. (2022). Modelo del vehículo eléctrico [Presentación en clases]. Universidad de Concepción, Chile.

[26] Organización Internacional de Normalización. (2019). ISO 17205:2019, "Road vehicles - Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure (WLTP) - Part 3: Dynamometer test for electric vehicles."

[27] Agencia Europea de Medio Ambiente. (2022). Transport and environment report 2022, Digitalisation in the mobility system: challenges and opportunities.