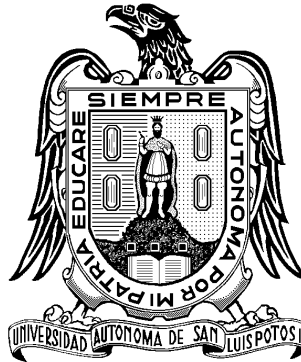

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO



**ESTUDIO DEL FRENADO REGENERATIVO Y SU IMPACTO
EN LA AUTONOMÍA DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO.**

Tesis que para obtener el grado de:
Doctor en Ingeniería Eléctrica
Opción: Control Automático

Presenta:
M.C. Jesús Guadalupe Armenta Campos

Asesor:
Dr. Ciro Alberto Núñez Gutiérrez

Co-Asesor:
Dra. Nancy Visairo Cruz

Agradecimientos

Gracias a mis abuelos, que aunque ya no estén conmigo físicamente, dejaron su legado con su reiterado consejo que lo mejor que se puede heredar en esta vida es la EDUCACIÓN.

A mi familia quienes me apoyaron a lo largo de toda mi vida y siempre han tenido muy en claro el consejo de mis abuelos.

Gracias principalmente a mi novia Elsa Cantú, quien ha sido mi roca, mi guía, mi autocorrector y mi porrista. Quien a lo largo de estos últimos meses no ha dejado de presionarme y motivarme para lograr terminar exitosamente este gran paso. Te amo princesa.

Quiero agradecer a mis asesores Dr. Ciro Nuñez y Dra. Nancy Visairo por la confianza y apoyo que han tenido para mi persona en el desarrollo de este trabajo de tesis. Gracias por darme un reto que ha forjado mi carrera.

Gracias al grupo de sinodales que ayudo a revisar, corregir y mejorar este trabajo de tesis.

A todos los doctores, secretarias y demás personal del CIEP, gracias por toda su ayuda y disposición.

A todos mis compañeros y amigos, especialmente a “Pipopin”, “Chileno” y Aganza por sus consejos y apoyo a lo largo de este trabajo.

Gracias a los amigos que ayudaron a despejar mi mente en los tiempos de estrés, Sergio, “El tremendo Don George” y al “Club de la Milpa”.

Tengo que agradecer por último pero no menos importante al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONCAYT), por haberme otorgado la beca que hizo posible financiar este doctorado.

Índice

	Página
Agradecimientos	I
Índice	III
Contenido temático	III
Lista de figuras	V
Lista de tablas	IX
Simbología	XI
Resumen	XV
Introducción	1
1. Estrategias de administración de la energía para vehículos eléctricos	7
2. Diseño y dimensionamiento del tren de potencia para un vehículo eléctrico	13
2.1. Sistema de tracción	14
2.1.1. Diferencial	15
2.1.2. Transmisión	16
2.1.3. Motor	17
2.2. Sistema de almacenamiento de energía	19
2.2.1. Banco de baterías (<i>BB</i>)	20
2.2.2. Banco de Ultracapacitores (<i>BU</i>)	27
2.2.3. Convertidor CD/CD bidireccional para el VE	31
2.2.4. Circuito eléctrico del sistema de almacenamiento de energía	44
3. Diseño del control supervisorio para un vehículo eléctrico	47
3.1. Sistema de distribución de fuerza de frenado (SDF)	48
3.2. Sistema de administración de energía (SAE)	55
3.2.1. Sistema de adaptación (SA)	68
3.3. Sistema de despacho de convertidor (SDC)	73

4. Validación del desempeño del control supervisorio vía simulación	79
4.1. Validación del controlador del convertidor CD/CD	87
4.2. Comparativa de resultados del control supervisorio	91
4.2.1. Comparativa con tren de potencia con tracción en solo un eje	92
Conclusiones	95
Apéndices	99
A. Vehículos eléctricos comerciales	101
Referencias	103

Lista de Figuras

2.1. Tren de potencia.	13
2.2. Sistema de tracción de un VE.	15
2.3. Topología del sistema de tracción.	15
2.4. Tiempo que tarda el vehículo en acelerar de 0 a 100 km/h, para diferentes potencias del motor eléctrico.	17
2.5. Curvas de Par y potencia del motor IPM1 de BRUSA.	18
2.6. Relación entre Par total requerido y velocidad sostenida del VE.	18
2.7. Topología del sistema de almacenamiento de energía.	20
2.8. Perfil de velocidad del NEDC.	23
2.9. Potencia demandada del bus de CD durante el NEDC.	24
2.10. Potencia demandada del bus de CD por el sistema de tracción a distintas velocidades sostenidas del VE.	25
2.11. Perfil de velocidad a máxima aceleración en Modo-eco.	27
2.12. Distribución de potencia durante la máxima aceleración de Modo-eco.	29
2.13. Relación entre ciclo de trabajo y ganancia del convertidor medio puente en modo elevador.	30
2.14. Comportamiento del voltaje del BU , para la máxima aceleración en Modo-eco.	31
2.15. Convertidores CD/CD bidireccionales reportados para vehículos eléctricos.	32
2.16. Convertidor CD/CD medio puente.	34
2.17. Potencia demandada por el sistema de tracción al bus de CD.	35
2.18. Convertidor CD/CD bidireccional medio puente de 8 ramas.	36
2.19. Inductancia mínima para diferentes relaciones de voltaje.	37
2.20. Circuito equivalente del convertidor operando en modo reductor.	39

2.21. Circuito equivalente del convertidor operando en modo elevador.	40
2.22. Sistema de control en lazo cerrado con $d_{dn} = -\mathbf{K}_{dn}\mathbf{x}_{dn} + K_{i_dn}\sigma_{dn}$	42
2.23. Sistema de control en lazo cerrado con $d_{up} = -\mathbf{K}_{up}\mathbf{x}_{up} + K_{i_dn}\sigma_{up}$	43
2.24. Circuito eléctrico del sistema de almacenamiento de energía.	44
3.1. Control supervisorio.	47
3.2. Diagrama de bloques del control supervisorio propuesto.	49
3.3. Distribución de fuerza de frenado.	49
3.4. Dimensiones del vehículo.	50
3.5. Fuerzas en el vehículo.	51
3.6. Diagrama de flujo del sistema de distribución de fuerza.	53
3.7. Diagrama de flujo del sistema de administración de energía propuesto.	60
3.8. Diagrama de flujo del bloque de aceleración.	62
3.9. Diagrama de flujo del bloque de velocidad sostenida.	63
3.10. Diagrama de flujo del bloque de frenado.	65
3.11. Ciclo de manejo ideal.	65
3.12. Comparativa de distribución de potencia. a) Perfil de velocidad, b) Distribución de potencia usando la ecuación (3.40), c) Distribución de potencia usando la ecuación (3.62).	67
3.13. Diagrama de flujo del sistema de adaptación.	69
3.14. Deslizamiento de ventana para el ciclo de manejo City II, con $N_{p_w} = 3$	70
3.15. Pérdida de energía durante las cuatro primeras iteraciones del cálculo de $K[N_p = 4]$ para el ciclo de manejo City II.	73
3.16. Diagrama de flujo para el cálculo de $Cont$	76
3.17. Energía transmitida por cada rama del convertidor en modo elevador para el NEDC.	77
4.1. Perfil de velocidad del ciclo de manejo City II.	79
4.2. Distribución de potencia para el ciclo de manejo City II.	80
4.3. Valores de $K[N_p]$ para el ciclo de manejo City II.	80
4.4. Estado de carga del BU durante el ciclo de manejo City II.	81
4.5. Distribución de fuerza de frenado entre eje delantero y trasero durante el ciclo de manejo City II.	81
4.6. Fuerza de frenado mecánica aplicada durante el ciclo de manejo City II.	82
4.7. Potencia proporcionada por el BU al bus de CD durante el ciclo de manejo City II.	82
4.8. Potencia transmitida por cada una de las ramas del convertidor CD/CD durante el ciclo de manejo City II.	83

4.9. Distribución de potencia para el NEDC.	84
4.10. Valores de $K[N_p]$ durante el NEDC.	85
4.11. Estado de carga del BU durante el NEDC.	85
4.12. Distribución de fuerza de frenado entre eje delantero y trasero durante el NEDC.	86
4.13. Fuerza de frenado mecánica aplicada durante el NEDC.	86
4.14. Potencia proporcionada por el BU al bus de CD durante el NEDC.	87
4.15. Potencia transmitida por cada una de las ramas del convertidor CD/CD durante el NEDC.	88
4.16. Potencia de referencia para el convertidor CD/CD.	89
4.17. Seguimiento de la potencia de referencia del convertidor CD/CD.	89
4.18. Voltaje en ambos extremos del convertidor CD/CD.	89
4.19. Seguimiento de la corriente de referencia del inductor L_1	90
4.20. Cambio brusco en la corriente de referencia del inductor L_1	90
4.21. Corriente de referencia del inductor L_1 menor al 50 % del rizo de corriente.	90
4.22. Topología del sistema de tracción del VE2.	92

Lista de Tablas

2.1. Características del vehículo eléctrico.	14
2.2. Características de los motores eléctricos.	18
2.3. Tecnologías de baterías más usadas en VE.	21
2.4. Características de las baterías.	22
2.5. Características del ultracapacitor.	29
2.6. Energía almacenable para distintos arreglos del <i>BU</i>	30
2.7. Parámetros de diseño de convertidores.	33
2.8. Fórmulas para el cálculo de los elementos pasivos del convertidor medio puente.	33
2.9. Parámetros de diseño de convertidores multi-rama.	36
2.10. Resultados de cálculo de elementos pasivos.	37
2.11. Ángulo de fase de las portadoras.	38
3.1. Eficiencias de los elementos de conversión y transmisión de energía.	59
3.2. Valores de $K[N_p]$ usados en cada periodo del ciclo de manejo City II.	71
3.3. Estrategia de incorporación de ramas del convertidor.	74
3.4. Orden de incorporación de ramas del sistema de despacho de convertidor.	75
4.1. Consumo de energía del VE para los ciclos de manejo City II, ECE15 y NEDC.	91
4.2. Comparativa entre autonomía del VE1 y VE2 para el nuevo ciclo de manejo europeo.	93
4.3. Comparativa entre autonomía del VE1 y VE2 para el ciclo de manejo ECE-15.	94
4.4. Comparativa entre autonomía del VE1 y VE2 para el ciclo de manejo City II.	94
A.1. Vehículos eléctricos comerciales, parte 1.	101

A.2. Vehículos eléctricos comerciales, parte 2. 102

Simbología

Símbolo	Definición
VE	Vehículo eléctrico
VEs	Vehículos eléctricos
<i>BU</i>	Banco de ultracapacitores
VCI	Vehículos de combustión interna
FR	Frenado regenerativo
SAE	Sistema de administración de energía
<i>UC</i>	Ultracapacitores
<i>SOC</i>	Estado de carga
NEDC	Nuevo ciclo de manejo europeo
CVT	Transmisión variable continua
<i>BB</i>	Banco de baterías
Ah	Amper-hora
N_{min}	Número mínimo de baterías
A_d	Autonomía deseada
E_{km}	Consumo de energía por kilómetro
E_{BAT}	Energía de cada batería
P_{des}	Profundidad de descarga
V_B	Voltaje de cada una de las baterías
W_c	Energía almacenada en un ultracapacitor
C	Capacitancia
V_c	Voltaje del capacitor
E_k	Energía cinética del vehículo
m	Masa del vehículo
v	Velocidad del vehículo

Símbolo	Definición
CD	Corriente directa
P_{Carga}	Potencia demandada por el sistema de tracción al bus de CD
P_{BB}	Potencia proporcionada por el BB
P_{BU}	Potencia entregada por el BU en el bus de CD
V_{uc}	voltaje de ultracapacitores
ΔV_C	Máximo rizo de voltaje de salida
ΔI_L	Máximo rizo de corriente del inductor
ΔV_{Ct}	Máximo rizo de voltaje del capacitor de transferencia
f_{sw}	Frecuencia de conmutación
D	Ciclo de trabajo del convertidor
L_{1min}	Inductancia mínima
C_{1min}	Capacitancia 1 mínima
C_{2min}	Capacitancia 2 mínima
X_{dn}	Vector de espacio de estado para el modo reductor
I_L	Corriente en el inductor
$I_{L1} - I_{L8}$	Corriente de los inductores
V_{C1}	Voltaje en el capacitor 1
V_{in_dn}	Voltaje de entrada del convertidor operando en modo reductor
D_{dn}	Ciclo de trabajo del convertidor operando en modo reductor
R_{eq_dn}	Resistencia equivalente del convertidor operando en modo reductor
V_{in_up}	Voltaje de entrada del convertidor operando en modo elevadores
R_{eq_up}	Resistencia equivalente del convertidor operando en modo elevador
D_{up}	Ciclo de trabajo del convertidor operando en modo elevador
K_{dn}	Ganancias de la retroalimentación de estado para el modo reductor
k_{i_dn}	Ganancia del integrador de la salida para el modo reductor
x_{dn}	Vector de espacio de estado para el modo reductor
y_{dn}	Salida del sistema para el modo reductor
r_{dn}	Referencia de corriente del convertidor operando en modo reductor
e_{dn}	Error existente entre la salida y la referencia para el modo reductor
D_{ss}	Los valor del ciclo de trabajo en estado estacionario
x_{1ss}	Valores de la corriente en el inductor en estado estacionario
x_{2ss}	Valor del voltaje en el capacitor 2 en estado estacionario
K_{up}	Ganancias de la retroalimentación de estado para el modo elevador
K_{i_up}	Ganancia del integrador de la salida para el modo elevador
x_{up}	Vector de espacio de estado para el modo elevador
y_{up}	Salida del sistema para el modo elevador
r_{up}	Referencia de corriente del convertidor operando en modo elevador
e_{up}	Error existente entre la salida y la referencia para el modo elevador
P_{BUreal}	Potencia que entrega el banco de ultracapacitores
V_{BU}	Voltaje del banco de ultracapacitores
V_{BB}	Voltaje del banco de baterías
I_{BUreal}	Corriente del banco de ultracapacitores
I_{BU}	Corriente que el banco de ultracapacitores entrega al bus de CD
I_{BB}	Corriente del banco de baterías

Símbolo	Definición
I_{Carga}	Corriente del sistema de tracción
CS	Control supervisorio
SDF	Sistema de distribución de fuerza de frenado
SA	Sistema de adaptación
SDC	Sistema de despacho de convertidor
F_b	Fuerza de frenado
F_f	Fuerza de frenado en el eje delantero
F_r	Fuerza de frenado en el eje trasero
b	Distancia entre el eje trasero y el centro de masa
H	Altura del centro de masa
G	Centro de masa
a	Distancia entre el eje delantero y el centro de masa
Z_g	Relación existente entre la aceleración del vehículo y la gravedad
$acel$	Aceleración del vehículo
g	Gravedad
F_x	Fuerza aplicada por el sistema de tracción
F_R	Fuerza de resistencia a la rodadura.
F_d	Fuerza de arrastre aerodinámico.
F_p	Peso
F_{px}	Componente del peso en la dirección del movimiento
m	Masa
θ	Ángulo de la pendiente del camino
C_x	Coefficiente de resistencia a la rodadura
ρ	Densidad del viento
A_f	Área frontal del vehículo
C_d	Coefficiente de arrastre aerodinámico del vehículo
v	Velocidad del vehículo
v_w	Velocidad del viento en la dirección del movimiento del vehículo
F_{f_mec}	Fuerza de frenado mecánico que debe ejercerse en el eje delantero
F_{r_mec}	Fuerza de frenado mecánico que debe ejercer el eje trasero
F_{f_reg}	Fuerza que ejerce el frenado regenerativo en el eje delantero
F_{r_reg}	Fuerza que ejerce el frenado regenerativo en el eje trasero
n	Número de muestra
T	Intervalo de muestreo
V_{BUmin}	Voltaje mínimo del BU
V_{BUmax}	Voltaje máximo del BU
SOC_{BUmax}	Valor máximo del estado de carga del banco de ultracapacitores
$F_{f_reg_max}$	Fuerza máxima que se puede ejercer mediante FR en el eje delantero
$F_{r_reg_max}$	Fuerza máxima que se puede ejercer mediante FR en el eje trasero
P_{BBmax}	Potencia máxima que puede aportar la batería
I_{BBmax}	Corriente máxima del banco de baterías
v_0	Velocidad del VE antes de la aceleración
t_{acel}	Periodo de tiempo durante el cual el vehículo acelera

Símbolo	Definición
CD/CD	Corriente directa a corriente directa
CD/CA	Corriente directa a corriente alterna
F_i	Fuerza de inercia
P_{adj}	Potencia de ajuste
η_{conv}	Eficiencia del convertidor CD/CD
N_{tf}	Relación de transmisión total
AF_p	Periodos aceleración-frenado
A_{tiempo}	Tiempo de aceleración
B_{tiempo}	Tiempo de frenado
Np_w	Número de periodos aceleración-frenado por ventana
z	Número de iteración
$\mathbf{V}[z]$	Vector de búsqueda
V_i	i -ésimo elemento del vector de búsqueda
P_{ref}	Potencia de referencia del convertidor CD/CD
$Cont$	Contador
$L_1, L_2, L_3, L_4, L_5, L_6, L_7, L_8$	Inductores del convertidor CD/CD
C_1	Capacitor 1
C_2	Capacitor 2
$T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6, T_7, T_8$	Transistores de las primeras 4 ramas del convertidor CD/CD
$T_9, T_{10}, T_{11}, T_{12}, T_{13}, T_{14}, T_{15}, T_{16}$	Transistores de las últimas 4 ramas del convertidor CD/CD
$D_1, D_2, D_3, D_4, D_5, D_6, D_7, D_8$	Diodos de las primeras 4 ramas del convertidor CD/CD
$D_9, D_{10}, D_{11}, D_{12}, D_{13}, D_{14}, D_{15}, D_{16}$	Diodos de las últimas 4 ramas del convertidor CD/CD
E_F	Energía usada para compensar F_d y F_R durante el frenado
E_A	Energía usada para compensar F_d y F_R durante la aceleración
η_{total}	Eficiencia total en el trayecto desde la rueda hasta el banco de ultracapacitores
K	Parámetro de ajuste del sistema de administración de energía
n_s	Número de muestra donde inicia un periodo aceleración-frenado
n_f	Número de muestra donde un periodo aceleración-frenado termina
SOC_{BU_th}	Límite inferior para el estado de carga del banco de ultracapacitores
P_{ideal}	Potencia ideal que el BU debe entregar durante la aceleración
P_{BUmin}	Potencia mínima que debe ser proporcionada por el BU para regular el SOC_{BU} de acuerdo a la energía cinética
Di	Diferencia entre el valor de E_A asociado al valor de V_i y el valor de E_F
P_{BUmax}	Máxima potencia entregada por el ultracapacitor durante la aceleración del pasado periodo

Resumen

En los últimos años, debido al acrecentamiento en la contaminación del aire de las grandes ciudades y al cambio climático que éste ocasiona, se ha incrementado el interés hacia los vehículos eléctricos ya que éstos son considerados “verdes” al no emitir gases contaminantes. Sin embargo, esta tecnología aún no es capaz de competir con los vehículos de combustión interna, ya que los vehículos eléctricos cuentan con una autonomía inferior y requieren de un tiempo de recarga que puede ir de 20 minutos a 12 horas.

En la actualidad se estudian diversas estrategias y tecnologías para solucionar el problema de la autonomía, siendo una de las más relevantes el uso del frenado regenerativo. Éste aprovecha la energía cinética del vehículo convirtiéndola en energía eléctrica y guardándola en el sistema de almacenamiento de energía. Sin embargo, para que esto se pueda realizar es necesario contar con una estrategia de administración de energía que permita producir el espacio suficiente para almacenar toda la energía generada durante el frenado regenerativo.

Por tal motivo, este trabajo de tesis presenta como principal aportación un sistema de administración de energía que prioriza el aprovechamiento de la energía cinética mediante el frenado regenerativo. Esta estrategia logra identificar el estilo de manejo del conductor y se adapta a él, con esto se logra una mejor regulación del estado de carga del banco de ultracapacitores, logrando generar el espacio suficiente para almacenar la mayoría de la energía cinética aprovechable sin descuidar la parte del desempeño del vehículo, ya que esta estrategia mantiene una reserva de energía en el banco de ultracapacitores que permite acelerar el vehículo a su máxima velocidad en modo-eco, uno de los dos modos de conducción

del vehículo eléctrico. La utilización de esta estrategia de administración de energía permite reducir el consumo de energía por kilómetro y, por consiguiente, aumentar la autonomía de un vehículo eléctrico, hasta en un 48.94 %, sin la necesidad de aumentar el tamaño de los almacenes de energía.

Introducción

Debido al incremento en los niveles de contaminación del aire de las grandes ciudades [1,2] y al cambio climático que estos gases ocasionan, en los últimos años se ha incrementado la investigación, desarrollo y comercialización de los vehículos eléctricos (VEs) por parte de la industria automovilística y centros de investigación. Esto se debe a que los VEs, a diferencia de los vehículos de combustión interna (VCIs), no consumen ningún combustible fósil, y por consiguiente, no emiten ningún gas contaminante al ambiente. Por tal motivo, los VEs son considerados verdes y son vistos por los gobiernos y la sociedad como una solución a los problemas ambientales.

Aunque los VEs pueden sonar como tecnología moderna, no hay nada más alejado de la realidad, puesto que este tipo de vehículos existen desde el siglo XVIII, de hecho, a principios del siglo XIX este tipo de vehículos dominaban las calles [3,4]. Sin embargo, la corta autonomía en comparación con los vehículos de combustión interna los excluyó del mercado por un gran tiempo. No obstante, en los últimos años algunos gobiernos han incentivado la compra y utilización de VEs mediante la reducción o eliminación de impuestos, uso de carriles especiales, construcción de puntos de cargas gratuitos y puestos de estacionamiento exclusivos, entre otros. Estos incentivos, sumados al alza de los precios de los combustibles fósiles en los años previos, han propiciado nuevamente el interés por los VEs.

Uno de los principales impulsores de esta tecnología es la compañía TESLA motors, quien ha impulsado el desarrollo de nuevas tecnologías para estos vehículos y al mismo tiempo ha motivado a las compañías tradicionales a ver este nicho de mercado. El Apéndice A muestra

algunos de los VEs que han estado o están por salir al mercado. Sin embargo, a pesar de los esfuerzos que se han realizado actualmente para el desarrollo de los VEs aún se tienen algunos problemas para que éstos compitan con los vehículos de combustión interna comerciales. Las principales desventajas que presentan los VEs son la baja autonomía y el largo tiempo de recarga, en comparación con los vehículos de combustión interna. La mayoría de los VEs comerciales tienen una autonomía menor a 200 km y velocidades máximas de 120 km/h [5]. Para ver más detalles de desempeño, el Apéndice A muestra tablas al respecto.

Por tal motivo, en los últimos años se han analizado distintos tipos de estrategias para aumentar la autonomía de los VEs. Algunas de las más sobresalientes son:

- **Incrementar la capacidad del almacén de energía del vehículo:** la manera más fácil de aumentar la autonomía de cualquier tipo de vehículo es incrementar la capacidad de los almacenes de energía. En la actualidad los VEs comerciales utilizan un sistema de almacenamiento de energía basado en baterías, por lo tanto, para incrementar la autonomía de un vehículo eléctrico es necesario colocarle más baterías. Sin embargo, al incrementar el número de baterías también aumenta el espacio que éstas ocupan y más importante se eleva el peso del vehículo, acrecentando el consumo de energía por kilómetro. Debido a esto, en la actualidad se trabaja en el desarrollo de tecnologías de baterías que permitan almacenar una mayor cantidad de energía en la menor cantidad de peso y espacio posible. También, en los últimos años se han incrementado las investigaciones que proponen el uso de celdas de combustible en los VEs, esta tecnología permite tener un sistema de almacenamiento de energía con una alta energía específica y un tiempo de recarga similar al de los VCIs [6, 7]. Sin embargo, debido a la falta de puntos de recarga y al alto costo del hidrógeno esta tecnología no es viable en la actualidad.

 - **Aumentar la eficiencia de los elementos de conversión de energía del vehículo:** otra alternativa para mejorar la autonomía de un vehículo eléctrico (VE) es, en lugar de aumentar la capacidad de almacenamiento, efectuar la conversión de energía de una forma más eficiente. Esto permite reducir las pérdidas del sistema y por consiguiente disminuir el consumo de energía por kilómetro, lo cual ayuda a recorrer más distancia con la misma cantidad de energía [8–10]. Debido a que un vehículo eléctrico opera en un rango de puntos de operación, es muy difícil trabajar el sistema en su punto óptimo de operación. Por lo tanto, el incremento de autonomía que se puede lograr es variante, ya que depende tanto del incremento en la eficiencia de los componentes como del punto de operación en el cual son utilizados.
-

- **Reducir el consumo de energía del vehículo mediante el aprovechamiento de la energía cinética del mismo:** otra manera de incrementar la autonomía de un vehículo eléctrico, sin necesidad de utilizar un sistema de almacenamiento de energía de mayor tamaño, es el aprovechamiento de la energía cinética del vehículo. Esto se logra gracias a la utilización de la técnica del frenado regenerativo (FR) [11] que consiste en convertir la energía cinética del vehículo en energía eléctrica durante un proceso de frenado. Esto es posible gracias a que el motor eléctrico puede funcionar bidireccionalmente, como motor y como generador, y también a que el sistema de almacenamiento de energía tiene la capacidad de entregar y recibir energía. De acuerdo con [12] y [13] un vehículo que es sometido a ciclos de manejo urbano con una gran cantidad de frenado disipa (en forma de calor) del 33 al 50 % de la energía que se requiere para operar el vehículo durante el frenado. También, el estudio presentado en [14] señala que el frenado regenerativo puede aprovechar del 12 al 66 % de la energía cinética del vehículo, por lo tanto, utilizando el frenado regenerativo es posible reducir el consumo de energía de un VE hasta en un 33 %, lo cual permite aumentar la autonomía de un vehículo hasta en un 49.25 %.

De lo anterior se puede deducir que la manera más económica de aumentar la autonomía de un vehículo eléctrico ya existente es el aprovechamiento de la energía cinética, pues esta estrategia obtiene ventaja de las características que ya posee el vehículo y no requiere colocar nuevas fuentes o cambiar los componentes por unos de mayor eficiencia.

Para lograr absorber la máxima cantidad de energía cinética disponible al utilizar el FR, se requiere un sistema de administración de energía (SAE) que pueda realizar una distribución adecuada de la demanda de potencia entre las diferentes fuentes de energía que componen el sistema de almacenamiento de energía del vehículo. Así, en los últimos años se han realizado una gran cantidad de estudios sobre estrategias de administración de energía para VEs con sistemas de almacenamiento híbridos [6, 15–37] los cuales aprovechan la energía cinética del VE y aumentan su autonomía.

Sin embargo, estas estrategias aún presentan problemas en la administración de energía de las fuentes con alta potencia específica como los ultracapacitores (UC), esto provoca que en algunas ocasiones no se pueda aprovechar la energía cinética [38] o se reduzca el desempeño del vehículo [6, 16]. Además, existen algunas estrategias de administración de energía que no son factibles de implementar, ya que no toman en cuenta las características eléctricas de los elementos que conforman el sistema de almacenamiento de energía [23, 27]; estas estrategias aunque son prometedoras, son perjudiciales a largo plazo para el vehículo, ya que terminan

dañando o disminuyendo la vida de las baterías.

Considerando todas las problemáticas de las estrategias de administración de energía actuales, para aprovechar correctamente la energía cinética del vehículo sin afectar el desempeño del mismo, se propone la siguiente hipótesis para este trabajo de tesis.

Hipótesis:

Es posible diseñar una estrategia de administración de energía para un vehículo eléctrico que sea capaz de identificar y adaptarse al estilo de conducción del conductor, mejore el aprovechamiento de la energía cinética mediante el uso del frenado regenerativo y aumente la autonomía del vehículo eléctrico, sin afectar su desempeño y sin incrementar la capacidad del almacén de energía.

Objetivo general:

Diseñar un vehículo eléctrico con un control supervisorio que permita priorizar la utilización del frenado regenerativo, aprovechar el máximo de la energía cinética y aumentar la autonomía del vehículo.

Objetivos particulares:

- Seleccionar y dimensionar la topología del tren de potencia para un vehículo eléctrico que permita aprovechar la mayor cantidad de energía cinética del vehículo.
- Diseñar un control supervisorio que permita generar referencias para los diferentes elementos que componen el tren de potencia del vehículo eléctrico.
- Diseñar los controladores para los elementos de conversión de energía del sistema de almacenamiento de energía.

Aportaciones

Como un aporte original al problema de la administración de la energía de las diferentes fuentes, en este trabajo de tesis se presenta el desarrollo de una estrategia de administración de energía capaz de identificar y adecuarse al estilo de manejo de cualquier conductor, lo que permite que el SAE determine la cantidad de energía que cada una de las fuentes, del sistema de almacenamiento de energía del vehículo, debe suministrar durante la aceleración y velocidad sostenida para generar el espacio suficiente en el ultracapacitor que permita almacenar la totalidad de la energía que se genera durante el frenado regenerativo. Todo esto sin afectar el desempeño del vehículo (velocidad y aceleración máxima de diseño)

y considerando las características físicas de los elementos que conforman el sistema de almacenamiento de energía. Además, se realizó el diseño y dimensionamiento del tren de potencia para un vehículo eléctrico, capaz de realizar frenado regenerativo en ambos ejes, reduciendo con esto la necesidad de utilizar el sistema de frenado mecánico y aumentando, en aproximadamente 50 %, la cantidad de energía cinética que puede ser recuperada.

Descripción de los capítulos

Este trabajo de tesis se encuentra estructurado de la siguiente manera: primeramente, en el Capítulo 1 se presenta la discusión de las estrategias de administración de energía existentes. En el Capítulo 2 se presenta el diseño y dimensionamiento del tren de potencia de un vehículo eléctrico, capaz de aplicar frenado regenerativo en los dos ejes y aprovechar la energía cinética del vehículo. En el Capítulo 3 se presenta el diseño del control supervisorio para un vehículo eléctrico encargado de generar todas las referencias para los distintos elementos que conforman el tren de potencia del vehículo. El control supervisorio realiza la distribución de fuerzas de frenado, determina la cantidad de energía que cada fuente debe suministrar y genera las referencias para el elemento de conversión de energía del sistema de almacenamiento de energía de vehículo. En el Capítulo 4 se presenta la validación del desempeño del control supervisorio mediante simulaciones de diferentes ciclos de manejo y condiciones de manejo. Finalmente, se presentan las conclusiones y los temas que pueden ser desarrollados en un futuro por otros trabajos de tesis.

Estrategias de administración de la energía para vehículos eléctricos

Como se mencionó anteriormente, la utilización de la técnica de frenado regenerativo puede aumentar la autonomía de un vehículo eléctrico [12, 13, 39]. El impacto del frenado regenerativo depende de la arquitectura o composición del sistema de administración de energía y de cómo se administre la energía que proveen las diferentes fuentes que lo componen. En la actualidad la mayoría de los vehículos eléctricos comerciales tienen un sistema de almacenamiento de energía basado en baterías. Sin embargo, debido a que la potencia específica de éstas es limitada y no pueden soportar grandes picos de potencia durante la recarga, es imposible aprovechar en su totalidad la energía cinética disponible del vehículo. De acuerdo con [40], un sistema de almacenamiento de energía híbrido compuesto por baterías y ultracapacitores permite aprovechar mejor la energía cinética del vehículo. Esto se debe a las características del UC, el cual posee una mayor potencia específica que permite aprovechar los altos picos de potencia producidos durante el frenado. Sin embargo, aún se siguen generando algunas propuestas que utilizan distintos tipos de tecnologías de baterías para tratar de conseguir un desempeño similar al que se logra con baterías y ultracapacitores, pero la densidad de potencia de las baterías evita que se obtenga un desempeño igual o superior.

Además, no sólo es importante tener la composición del sistema de almacenamiento, también lo es la forma en la cual se administra la energía que entrega cada una de las fuentes que lo conforman. De esto depende la capacidad del vehículo para almacenar la energía cinética del VE que puede ser recuperada utilizando el frenado regenerativo.

No obstante, si no se tiene un elemento almacenador de energía apto y con suficiente espacio para almacenar la energía cinética aprovechable, no se puede utilizar el FR y se debe usar el sistema mecánico de frenado, el cual por definición, desperdicia la energía en forma de calor para cumplir su función con seguridad.

Por tal motivo, en los últimos años se han realizado una gran cantidad de estudios sobre estrategias de administración de energía para vehículos eléctricos con sistemas de almacenamiento híbridos, éstos están conformados por dos o más fuentes de energía, una de alta densidad de energía (fuente principal) y una o más con alta densidad de potencia (fuentes auxiliares).

Algunas de las técnicas más comunes para diseñar sistemas de administración de energía para sistemas de almacenamiento de energía híbridos son: tabla de búsqueda [15], lógica difusa [16–21], optimización [22–24], control predictivo [25, 26], basado en reglas [26, 27], redes neuronales [28], en la frecuencia [6, 29], entre otros. Considerando un VE con un sistema de almacenamiento de energía compuesto únicamente por baterías, en [38] los autores presentan un SAE basado en una tabla de búsqueda que determina la potencia suministrada por cada fuente según su estado de carga (SOC). El sistema de almacenamiento de energía está compuesto por baterías de dos diferentes tecnologías, la principal desventaja de este SAE es que el frenado regenerativo no puede ser utilizado hasta que el SOC de las baterías se encuentre por debajo de un valor de umbral. Además, al tratarse de un sistema de almacenamiento conformado únicamente por baterías, tiene problemas para absorber los picos de potencia que se generan durante el frenado, ya que las baterías están limitadas en la cantidad de corriente con la que pueden ser cargadas y de ser superada se pueden producir daños muy graves en ellas.

Una de las herramientas más reportadas en la bibliografía para el desarrollo de sistemas de administración de la energía para vehículos eléctricos es la lógica difusa. Por ejemplo, en [17] se propone una estrategia basada en la lógica difusa que logra reducir el consumo de energía de un vehículo eléctrico, con sistema de almacenamiento híbrido. El SAE propuesto en [17] se activa únicamente cuando el estado de carga de las baterías es inferior a un umbral. Este sistema de administración de energía reduce o limita el par que el motor eléctrico aplica para impulsar el VE, esto consigue una reducción en la demanda de potencia y el consumo de energía y, por consiguiente, un aumento de la autonomía del VE. Sin embargo, la limitación del par produce una gran desventaja ya que el desempeño del VE se ve mermado al disminuir la aceleración de éste.

En [23] se presenta una estrategia de administración de energía basada en optimización, este trabajo propone el uso de funciones de minimización para administrar la energía de un sistema de almacenamiento compuesto por baterías y ultracapacitores. Esta estrategia prioriza la minimización de la corriente de la batería, lo cual ocasiona que en algunos momentos se produzca una sobre utilización del ultracapacitor al tener que entregar toda la potencia que requiere el vehículo para moverse. Como consecuencia, en algunos instantes

el estado de carga del ultracapacitor disminuye a niveles muy bajos, incluso alcanzando una carga cero; provocando que las baterías tengan que entregar toda la potencia demandada por la carga, esto es sumamente perjudicial pues grandes picos de corriente pueden dañarlas.

Un enfoque interesante se aborda en [16] donde los autores proponen un SAE con una estrategia basada en lógica difusa para un sistema de almacenamiento híbrido. Este SAE varía el valor de referencia de la potencia máxima que pueden suministrar las baterías. La estrategia permite un mejor aprovechamiento de la energía cinética del vehículo, al ser capaz de almacenar gran parte de la energía que se convierte de mecánica a eléctrica durante el frenado regenerativo. Esto se debe principalmente a que el ultracapacitor siempre tiene espacio disponible para almacenar la energía del frenado regenerativo. Sin embargo, la desventaja de esta propuesta es que, en algunas ocasiones, al final del ciclo de manejo el VE no puede iniciar un nuevo ciclo de manejo si éste requiere de una alta aceleración debido a que el estado de carga del ultracapacitor es bajo y las baterías son incapaces de proporcionar toda la potencia que dicha aceleración requiere.

En [25] se presenta una estrategia de administración de energía basada en control predictivo para un sistema de almacenamiento híbrido, compuesto por baterías y ultracapacitores. Esta estrategia determina la cantidad de energía que debe entregar cada una de las fuentes basada en información pasada, actual y predicciones del futuro. Lo anterior genera que el estado de carga del ultracapacitor se regule de acuerdo a la velocidad del vehículo. La desventaja de esta estrategia es la gran cantidad de gasto computacional que requiere para realizar la distribución de energía.

En [26] se presentan 4 estrategias de administración de la energía para sistemas de almacenamiento de energía compuesto de baterías y ultracapacitores, una basada en reglas, otra basada en filtrado, otra en control predictivo y otra en lógica difusa. De las cuatro estrategias, tres de ellas no regulan el estado de carga del ultracapacitor, de acuerdo a la velocidad del vehículo, lo que provoca que en algunas ocasiones el vehículo no tenga la suficiente potencia para acelerar a su máxima capacidad. La única estrategia que hace una adecuada regulación del estado de carga del ultracapacitor es la que está basada en control predictivo. Sin embargo, esta regulación provoca picos de corriente en las baterías, que pueden reducir sus ciclos de vida. Además, este artículo presenta una comparativa respecto a la degradación en la capacidad de las baterías, siendo la estrategia basada en lógica difusa la que menor porcentaje de degradación provoca. Lo anterior se debe a que el ultracapacitor se encarga de aportar toda la demanda de potencia de alta frecuencia y a que las baterías no son recargadas durante el frenado regenerativo.

En los últimos años se ha incrementado el desarrollo de estrategias de administración de energía basadas en la frecuencia. En [6] se presenta una estrategia de administración de energía para un sistema híbrido compuesto por una celda de combustible y ultracapacitor. Esta estrategia funciona generando una distribución de potencia basada en la frecuencia de respuesta de las fuentes de energía, el ultracapacitor al tener una respuesta más rápida que la celda es el encargado de aportar la demanda de potencia de alta frecuencia mientras que la celda de combustible aporta la de baja frecuencia. De esta manera el ultracapacitor puede suministrar la potencia durante los transitorios y la celda de combustible tiende a aportar una potencia prácticamente constante. La principal desventaja de esta estrategia radica en el manejo del estado de carga del UC, ya que al finalizar un ciclo de manejo el estado de carga del UC es bajo y, por consiguiente, la aceleración y la velocidad máxima del vehículo se puede ver limitada.

En [29] se muestra otra estrategia basada en la frecuencia, sólo que en esta investigación el sistema de almacenamiento de energía está compuesto por baterías y ultracapacitores. Esta estrategia propone que la demanda de potencia que tenga una frecuencia menor a una determinada frecuencia de corte, que puede variar entre 0.01 y 0.32 Hz, sea proporcionada por la batería y que la demanda de potencia con frecuencia mayor a dicha frecuencia de corte sea proporcionada por el UC. Esto protege a la batería de los altos picos de demanda y la libera de estrés. Además, esta estrategia propone variar el valor de la frecuencia de corte dependiendo del estado de carga del UC, lo cual permite que el sistema sea adaptable. Sin embargo, esta estrategia no adecuaba el estado de carga del UC con respecto a la energía cinética del vehículo, lo cual provoca que en algunas ocasiones el UC deba ser cargado con energía proveniente de la batería. Además, cuando el voltaje del UC se encuentra cercano a su límite inferior, la frecuencia de corte es modificada de tal manera que las baterías deben suministrar demanda de potencia de alta frecuencia lo cual provoca estrés y disminuye su tiempo de vida.

Por otro lado, hoy en día la mayoría de los vehículos eléctricos comerciales y desarrollados en los centros investigación sólo tienen tracción en uno de los ejes. Por consiguiente, para poder aplicar la fuerza de frenado requerida en cada uno de los ejes, de acuerdo a la curva de frenado ideal mencionada en [39, 41], es necesario utilizar frenado mecánico en el eje que no cuenta con motor eléctrico. Esto disminuye la cantidad de energía cinética que estos vehículos pueden recuperar durante el frenado, pues parte de ella es disipada al medio ambiente al utilizar el freno mecánico. Por tal motivo surge la necesidad de diseñar un vehículo eléctrico que tenga la capacidad de aplicar frenado regenerativo en ambos ejes, y que cuente con un sistema de almacenamiento de energía híbrido, compuesto de baterías y ultracapacitores.

Éste debe permitir una autonomía competitiva con los vehículos comerciales y debe contar con una densidad de potencia adecuada, que permita aportar los picos de potencia que se demandan durante la aceleración y almacenar los picos de potencia que se generan durante el frenado regenerativo.

En resumen, las estrategias de administración de energía existentes para sistemas de almacenamiento compuestos por baterías y ultracapacitores permiten determinar la cantidad de energía que debe aportar cada una de las fuentes, pero tienen las siguientes desventajas:

- No realizan una adecuada regulación del estado de carga del UC, lo cual puede producir dos tipos de problemas en el vehículo [16, 23, 26, 28, 29]:
 - 1) una descarga insuficiente del UC, lo que provoca que el espacio existente en el ultracapacitor al inicio del frenado sea insuficiente para almacenar toda la energía que se genera durante el FR, y
 - 2) una sobre descarga del UC, la cual provoca una falta de energía durante la aceleración y por consiguiente una limitación del desempeño del VE .
- No consideran las características físicas de las fuentes de energía, lo cual produce que las baterías sean sometidas a demandas de corriente altamente variantes [27].
- Limitan la aceleración del vehículo con la finalidad de reducir la potencia demandada [17].
- Requieren de una gran cantidad de recursos computacionales [25, 26].

Considerando el estudio del arte realizado y con el objetivo de buscar el mejor desempeño del VE, en este trabajo se diseña una estrategia de administración de energía que sea capaz de regular correctamente el estado de carga del UC, que controle la energía que aporta cada una de las fuentes para lograr un mejor aprovechamiento de la energía cinética del vehículo mediante el uso del frenado regenerativo y, que además, considere un estado de carga mínimo en el UC que le permita al vehículo acelerar a su máximo valor de diseño. También, es necesario diseñar un tren de potencia para un VE que permita aplicar frenado regenerativo en los dos ejes y minimizar la utilización del frenado mecánico.

Diseño y dimensionamiento del tren de potencia para un vehículo eléctrico

El tren de potencia puede ser considerado uno de los sistemas más importantes de un vehículo eléctrico, ya que éste es el encargado de almacenar la energía, convertir la energía eléctrica en mecánica y convertir la energía mecánica en eléctrica. Por tal motivo, es de suma importancia realizar una adecuada selección de la topología del tren de potencia y un correcto dimensionamiento de los elementos que lo conforman. El tren de potencia se puede dividir en dos partes:

- Sistema de tracción.
- Sistema de almacenamiento de energía.

La Figura 2.1 muestra el esquema de conexión del tren de potencia, se puede apreciar que esta estructura permite el flujo en ambas direcciones:

- De las fuentes de energía a las ruedas (aceleración y velocidad sostenida).
- De las ruedas a las fuentes de energía (frenado).

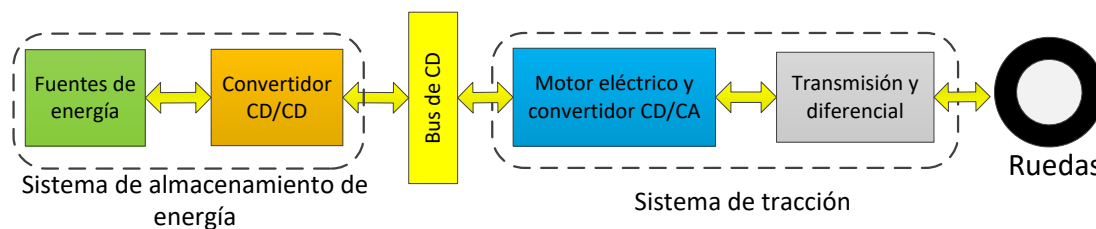


Figura 2.1: Tren de potencia.

Para este trabajo de tesis, la selección y dimensionamiento de los componentes del tren de potencia se realizaron considerando las características físicas del vehículo mostradas en la Tabla 2.1 [4, 42] y dos modos de conducción para el VE:

- Modo-eco: En este modo el vehículo alcanza una velocidad máxima de 120 km/h, máxima velocidad del nuevo ciclo de manejo europeo (NEDC, por sus siglas en inglés). Este modo de conducción prioriza la vida de las baterías. Por esta razón, la corriente de descarga de las baterías es siempre menor o igual que la corriente de descarga estándar, recomendada por el fabricante.
- Modo-deportivo: En este modo, el vehículo puede alcanzar una velocidad máxima de 160 km/h. En este modo la vida útil de las baterías no es prioridad, sino el desempeño del vehículo (aceleración y velocidad).

Tabla 2.1: Características del vehículo eléctrico.

Características	Cantidad	Unidades
Masa	1550	kg
Altura	1.51	m
Ancho	1.78	m
Largo	4.6	m
Coefficiente de arrastre aerodinámico (Cd)	0.275	-
Coefficiente de resistencia a la rodadura	0.014	-
Radio de las llantas	0.31	m
Radio efectivo de las ruedas	0.2635	m
Área frontal	2.6878	m ²
Tiempo de aceleración de 0 a 100 km/h	<10	s

Es importante resaltar que la masa del vehículo terminado, con todos los componentes del tren de potencia, será de 1550 kg.

2.1. Sistema de tracción

El sistema de tracción es el encargado de convertir la energía eléctrica en mecánica y viceversa. Este sistema está conformado por uno o más motores eléctricos, controladores del motor (convertidor de electrónica de potencia) y opcionalmente algún sistema de engranaje

(transmisión y/o diferencial). La Figura 2.2 muestra la conexión y el flujo de potencia del sistema de tracción de un VE.

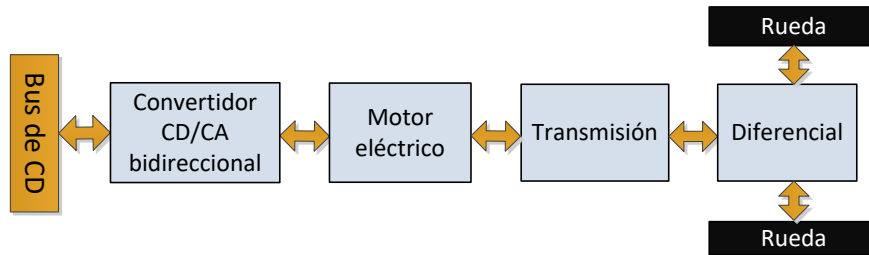


Figura 2.2: Sistema de tracción de un VE.

En [43] se presentan resultados de simulación que demuestran que un sistema de tracción que cuenta con motores eléctricos en ambos ejes permite aplicar frenado regenerativo en ambos ejes y, consecuentemente, lograr un mejor aprovechamiento de la energía cinética del vehículo cuando se considera la distribución de fuerza de frenado entre los ejes del vehículo, de acuerdo a la curva de frenado ideal señalada en [39, 41, 42]. Por tal motivo, se decidió utilizar la topología del sistema de tracción mostrada en la Figura 2.3. El sistema de tracción del VE está conformado por: dos motores eléctricos, dos transmisiones, dos diferenciales y dos convertidores CD/CA bidireccionales (inversores).

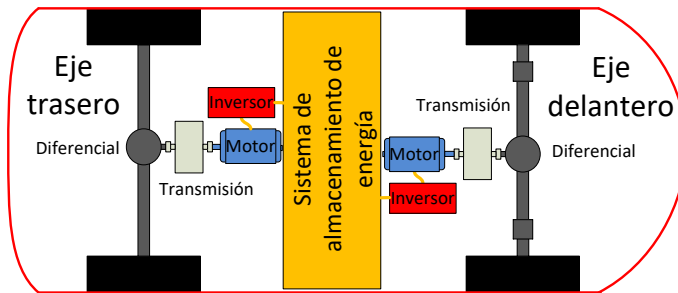


Figura 2.3: Topología del sistema de tracción.

Una vez seleccionada la topología del sistema de tracción, el siguiente paso es seleccionar y dimensionar cada uno de los elementos que lo conforman.

2.1.1. Diferencial

Un diferencial es el elemento mecánico el cual permite que una rueda gire a mayor velocidad que otra cuando el vehículo toma una curva [44]. Debido a que se desea utilizar

una topología con dos motores eléctricos, uno por eje, es necesario utilizar dos diferenciales, uno por cada motor. Por tal motivo, se propone usar dos diferenciales modelo DTSO1 de la marca BRUSA, el cual tiene una relación de transmisión de 1:9.59 [45]. Este diferencial fue seleccionado ya que es recomendado por el fabricante del motor cuya selección se explica en la Sección 2.1.3.

2.1.2. Transmisión

Debido a que la velocidad de rotación de un motor eléctrico es mayor que la velocidad de las ruedas del vehículo, es necesario colocar una transmisión que permita que las ruedas tengan una velocidad angular menor que la del motor y que al mismo tiempo aumente el par.

Se selecciona una transmisión variable continua (CVT) debido a que este tipo de transmisión permite que el motor trabaje a altas revoluciones, donde tiene una eficiencia mayor. Además, ya que este tipo de transmisión tiene una relación de transmisión mayor cuando el vehículo se encuentra moviéndose a bajas velocidades, es posible utilizar un motor de menor potencia para acelerar el vehículo de 0 a 100 km/h. La Figura 2.4 muestra el tiempo que tarda el vehículo en acelerar de 0 a 100 km/h para diferentes potencias de motores, utilizando una transmisión continuamente variable y una constante. Los cálculos fueron realizados considerando una eficiencia de 95 % para la transmisión y 95 % para el diferencial [4] y las características físicas del vehículo descritas en la Tabla 2.1.

Para el cálculo de los valores mostrados en la Figura 2.4 se consideró que el motor eléctrico tiene un par constante desde el reposo hasta alcanzar su velocidad angular nominal (7500 RPM). Posteriormente se calculó la aceleración máxima del vehículo para distintos valores de par, para cada una de las transmisiones, así como la velocidad que tendría el vehículo en cada instante. Por último, se identificó cuánto tiempo tarda el vehículo en acelerar de 0 a 100 km/h y se calculó la potencia del motor eléctrico para cada uno de los valores de par utilizados.

La transmisión continuamente variante seleccionada, tiene el siguiente funcionamiento:

- Para velocidades menores de 30 km/h la relación de transmisión será constante y la máxima que pueda ofrecer la CVT.
 - Para velocidades mayores de 30 km/h y menores a 160 km/h (velocidad máxima del vehículo) la transmisión variará su relación de tal manera que las revoluciones del motor permanezcan constantes a la mayor velocidad angular de la máquina.
-

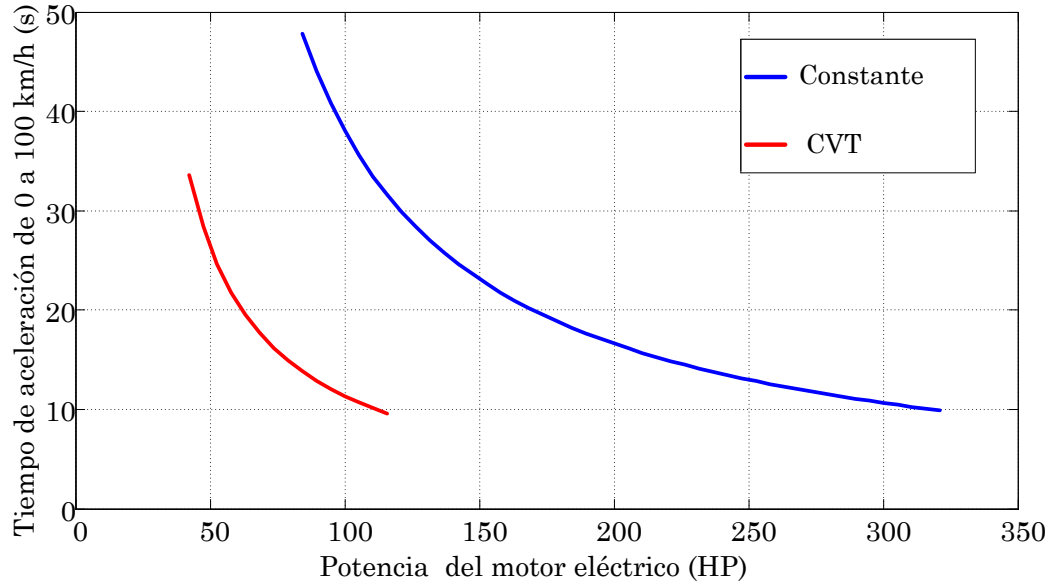


Figura 2.4: Tiempo que tarda el vehículo en acelerar de 0 a 100 km/h, para diferentes potencias del motor eléctrico.

- Para velocidades mayores a 160 km/h la CVT permanecerá con una relación de transmisión constante y será la mínima que la transmisión pueda ofrecer.

2.1.3. Motor

Como se puede interpretar de la Figura 2.4, para alcanzar una aceleración 0 a 100 km/h en menos de 10 segundos utilizando una transmisión CVT, se requiere que el motor proporcione una potencia de 112 HP (83.55 kW). Por tal motivo se seleccionaron dos motores síncronos de imanes permanentes modelo IPM1 de la marca BRUSA y dos inversores DMC514 de la misma marca. Considerar una máquina síncrona de imanes permanentes permite que funcione como motor en una dirección del flujo de potencia y como generador en la dirección opuesta, lo cual facilita la utilización del frenado regenerativo. La Figura 2.5 muestra las curvas de par y potencia generadas por el fabricante, para el motor seleccionado [46].

El frenado regenerativo se logra debido a las características del generador síncrono. Esta máquina eléctrica genera un par que se opone al movimiento del primo motor, el cual es proporcional a la corriente que se tiene en las terminales de la misma [47].

La Tabla 2.2 muestra las características de los motores eléctricos seleccionados. Con estos motores se tiene la potencia suficiente para lograr la aceleración deseada y para sostener la velocidad máxima en modo deportivo. La Figura 2.6 muestra el par total que debe ser

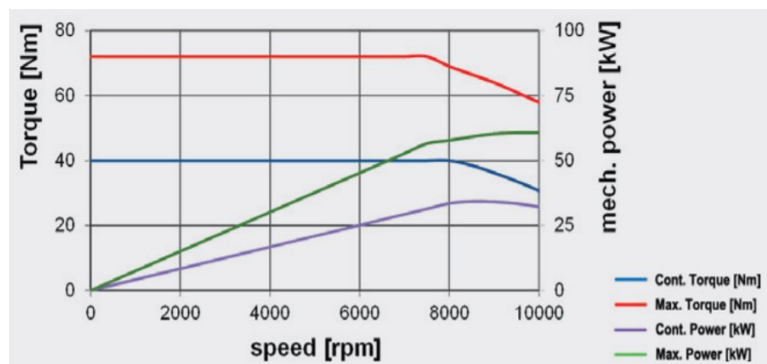


Figura 2.5: Curvas de Par y potencia del motor IPM1 de BRUSA.

aplicado, entre los dos motores eléctricos, para mover el vehículo a distintas velocidades sostenidas.

Tabla 2.2: Características de los motores eléctricos.

Características	Cantidad	Unidad
Potencia nominal	30 (40.2)	kW (HP)
Potencia máxima (30 seg)	56 (75)	kW (HP)
Torque nominal	40	Nm
Torque máximo	72	Nm
Velocidad angular	7500	RPM
Voltaje nominal de CD	400-450	V
Masa	29	kg
Número de motores	2	-
Eficiencia	95	%

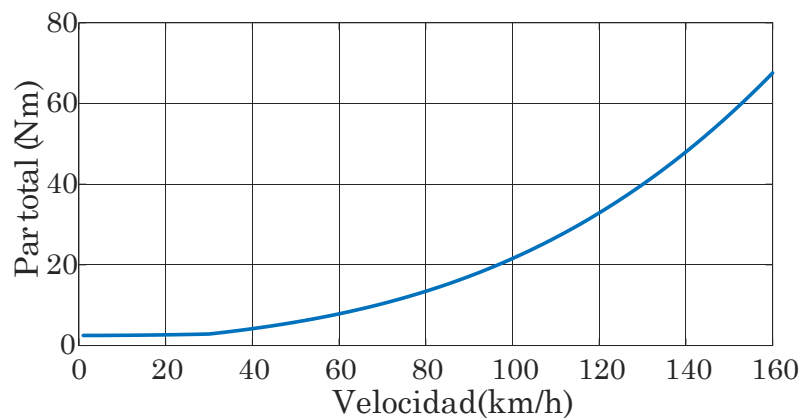


Figura 2.6: Relación entre Par total requerido y velocidad sostenida del VE.

2.2. Sistema de almacenamiento de energía

De acuerdo con [4], el almacenamiento de energía se define como: el conjunto de dispositivos que almacenan energía, que pueden entregar energía (descarga) y absorber energía (carga). Existen diversos tipos de dispositivos de almacenamiento de energía y fuentes que pueden ser utilizados en los vehículos eléctricos, los cuales se pueden conectar en distintas configuraciones para cumplir distintas funciones y necesidades energéticas de los VE.

Debido a que la demanda de potencia de un vehículo puede ser sumamente variante y llegar a contener altos picos de potencia que superan las capacidades físicas de las baterías, es necesario utilizar un sistema de almacenamiento de energía híbrido. Como fuente primaria se seleccionaron las baterías ya que cuentan con una alta energía específica y serán las encargadas de almacenar la mayoría de la energía del vehículo. Como fuente auxiliar se seleccionaron los ultracapacitores debido a su alta potencia específica, éstos serán los encargados de tomar los grandes picos de demanda de potencia que se producen durante la operación del VE. De acuerdo con [40], un sistema de almacenamiento de energía conformado por estos dos elementos tiene un mejor desempeño en el aprovechamiento de la energía del frenado regenerativo que un sistema que sólo utiliza baterías.

De acuerdo con [48, 49] los sistemas de almacenamiento de energía se pueden clasificar en tres tipos: pasivos, semi-activos y activos. Los sistemas pasivos son los más sencillos y con el menor costo ya que consisten en conectar en paralelo ambas fuentes de energía, sin embargo, estos sistemas no logran aprovechar al 100 % las capacidades del UC [50, 51]. Los sistemas activos cuentan con convertidores CD/CD para cada una de las fuentes de energía, esto permite tener un mejor control de la carga y descarga de las fuentes así como del nivel de voltaje en el bus de CD, la desventaja de esta configuración es el alto costo y peso del sistema. El sistema de almacenamiento de energía semi-activo sólo cuenta con un convertidor CD/CD, esto le permite controlar directamente la energía de una de las fuentes e indirectamente la energía de la otra, con un menor costo, menor peso y menor cantidad de pérdidas que al utilizar el sistema con dos convertidores CD/CD [52, 53].

Por tal motivo, en este trabajo de tesis se propone utilizar un sistema de almacenamiento de energía semi-activo como el que se muestra en la Figura 2.7. La topología seleccionada para el sistema de almacenamiento de energía permite que el voltaje en el bus de CD permanezca prácticamente constante, ya que la fluctuación en el voltaje de las baterías es relativamente pequeña. Además, ya que el ultracapacitor se encuentra conectado al bus de CD por medio de un convertidor CD/CD es posible mejorar el aprovechamiento de su capacidad

de almacenamiento, ya que en esta posición el ultracapacitor puede ser operado en un rango mayor de voltaje que al conectarse directamente al bus de CD. El control de la potencia que inyectan la baterías se realiza de manera indirecta, al controlar la potencia demandada por los inversores y la inyectada por el ultracapacitor mediante el convertidor CD/CD.

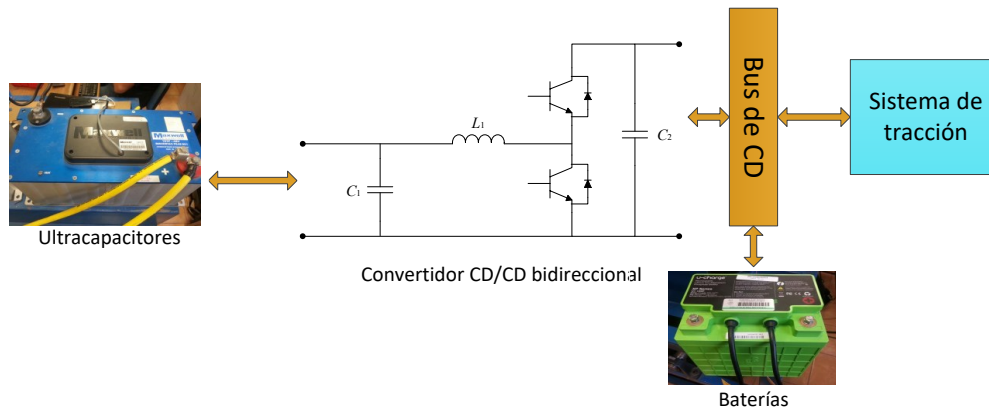


Figura 2.7: Topología del sistema de almacenamiento de energía.

Una vez seleccionada la topología del sistema de almacenamiento de energía y los elementos que lo conforman, es necesario elegir la tecnología de los elementos de almacenamiento y determinar la cantidad de elementos que conformarán el banco de baterías y de ultracapacitores.

2.2.1. Banco de baterías (BB)

De acuerdo con [4], las baterías son dispositivos electroquímicos que convierten la energía eléctrica en energía química potencial durante la carga y convierten la energía química en energía eléctrica durante la descarga. Una batería está compuesta de varias celdas apiladas. Una célula es una unidad independiente y completa que posee todas las propiedades electroquímicas. Básicamente, una célula de batería consta de tres elementos primarios: dos electrodos (positivo y negativo) y un electrolito. Los fabricantes de baterías suelen especificar la capacidad de las baterías en Amper-hora(Ah), que se define como el número de Ah que entrega la batería al descargarse desde un estado completamente cargado hasta que la tensión de la batería caiga a su voltaje de corte. Es importante señalar que una misma batería puede tener un número diferente de Ah a diferentes corrientes de descarga. Generalmente, la capacidad de una batería se reducirá cuando la corriente de descarga se incrementa.

Un elemento muy importante que debe ser monitoreado en las baterías es el estado de

carga (*SOC* por sus siglas en inglés). El *SOC* se define como el porcentaje de energía que le resta a la batería, y se calcula mediante la división de la capacidad restante entre la capacidad completamente cargada. Por lo tanto, una batería completamente cargada tiene un *SOC* del 100 % y una batería totalmente descargada tiene un *SOC* del 0 %.

Otros parámetros importantes de las baterías son [4]:

- **Energía específica:** La energía específica se define como la capacidad de energía por unidad de peso de la batería (Wh/kg). La energía específica teórica es la energía máxima que se puede generar por unidad de masa total del reactivo celular.
- **Potencia específica:** La potencia específica se define como la potencia máxima por unidad de peso que la batería (W/kg) puede entregar en un período corto. Elegir una fuente auxiliar con alta densidad de potencia es de suma importancia pues ayuda a mitigar los picos de demanda que se producen durante la aceleración y el frenado del VE [4].

La Tabla 2.3 muestra las características de algunas de las tecnologías de baterías recargables más utilizadas en vehículos eléctricos [4]. De esta tabla se puede apreciar que la tecnología con mejor relación de energía específica, ciclo de vida y eficiencia es la de iones de Litio, estas características son de gran importancia ya que debido a la aplicación se prioriza que el banco de baterías tenga un peso bajo, almacenen una gran cantidad de energía, tenga la menor cantidad de pérdidas posibles durante el proceso de carga/descarga y puedan ser utilizadas durante mucho tiempo. Por tal motivo, se seleccionó la batería de Litio Níquel Cobalto Manganeso (Li-NCM) modelo BP-HK-LP-10B. Las características de las baterías seleccionadas se muestran en la Tabla 2.4. Este modelo de batería fue seleccionado debido a que tiene una alta energía específica y a la gran cantidad de información que proporciona el fabricante [8].

Tabla 2.3: Tecnologías de baterías más usadas en VE.

Tecnología de batería	Energía específica (Wh/kg)	Potencia específica (W/kg)	Número de ciclos de vida	Eficiencia (%)	Costo (US\$/kWh)
Plomo/ácido	35-50	150-400	500-1000	>80	120-150
Níquel/cadmio	50-60	80-150	800	75	250-350
Níquel/zinc	55-70	170-260	300	65	100-300
Níquel/hidruro metálico	70-95	200-300	750-1200+	70	200-350
Zinc/bromo	70-85	90-110	500-2000	65-70	200-250
Sodio/azufre	150-240	230	800+	80	250-450
Litio/hierro	100-130	150-250	1000+	80	110
Ion de litio	80-130	200-300	1000+	>95	200

Tabla 2.4: Características de las baterías.

Características	Cantidad	Unidad
Modelo	1	BP-HK-LP-10B
Capacidad	10	Ah
Corriente de descarga máxima sostenida	30	A
Corriente de descarga máxima (15 s)	50	A
Corriente de descarga estándar	5	A
Ciclos de vida (80 %)	1000	ciclos
Voltaje de carga	4.2	V
Voltaje a plena carga	4.03	V
Voltaje al 20 % de carga	3.7	V
Masa	235	g
Energía	37	Wh
Energía específica	157.4	Wh/kg
Corriente de carga estándar	2	A
Corriente de carga máxima	5	A
Profundidad de descarga recomendada	80	%

2.2.1.1. Dimensionamiento del banco de baterías

Después de seleccionar el modelo de batería, el siguiente paso para dimensionar el banco de baterías es definir la autonomía mínima deseada y calcular el consumo de energía por kilómetro del vehículo. Ya que la autonomía promedio de los vehículos eléctricos comerciales es de 200 km, se decidió utilizar ese valor como la autonomía mínima de diseño del VE. Lo anterior se realiza con la finalidad de demostrar que es posible aumentar la autonomía de un VE sin necesidad de aumentar la capacidad de su almacén de energía, esto se logra al utilizar una estrategia de administración de energía que prioriza el aprovechamiento de la energía cinética mediante el uso del FR. Para definir el consumo de energía por kilómetro se utilizó el NEDC [54], el cual se utiliza en Europa para determinar la autonomía de los vehículos eléctricos y convencionales. La Figura 2.8 muestra el perfil de velocidad del NEDC.

Para probar las condiciones de operación bajo todas las circunstancias de estilos de manejo, tanto del sistema de administración de la energía como de las topologías de convertidores involucradas, se realizaron simulaciones del sistema integrado. A este sistema integrado se le llamará a partir de aquí “Vehículo Eléctrico Virtual”. Dicho vehículo tiene las mismas características físicas y el mismo sistema de tracción previamente seleccionado.

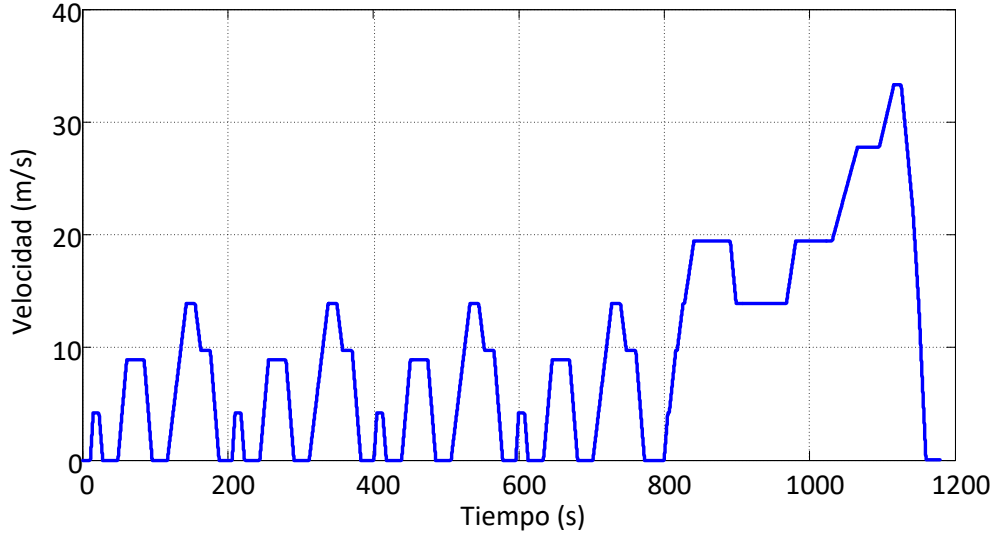


Figura 2.8: Perfil de velocidad del NEDC.

Después de realizar simulaciones con el vehículo eléctrico virtual se obtuvo que, para recorrer los 10.93 km del NEDC se requieren 6.713 MJ. Para obtener este valor, primeramente se calcula la potencia que el sistema de tracciones demanda del bus de CD (ver Figura 2.9) y posteriormente, se realiza la integral de la potencia demandada para calcular la energía que el VE virtual requiere para recrear el NEDC. Por lo tanto, el consumo de energía por kilómetro es de 0.614 MJ/km, y debido a que la mínima autonomía deseada es de 200 km, se propone la ecuación (2.1) para determinar el número mínimo de baterías N_{min} para el vehículo eléctrico. Esta ecuación fue concebida considerando condiciones de temperatura ideales, por tal motivo, solo se considera la energía total necesaria para alcanzar la autonomía deseada y la energía aprovechable de cada batería.

$$N_{min} = \frac{A_d \times E_{km}}{P_{des} \times E_{BAT}} \quad (2.1)$$

donde A_d es la autonomía deseada en km, E_{km} es el consumo de energía por kilómetro (MJ/km), E_{BAT} es la energía de cada batería en MJ y P_{des} es la profundidad de descarga, la cual es de 80 % para la batería seleccionada. Se realizaron los cálculos y se obtuvo que el número mínimo de baterías para una autonomía de 200 km es de $N_{min} = 1153$ baterías, esto sin considerar el frenado regenerativo. Además de determinar el número de baterías que deben conformar el banco de baterías, también es necesario determinar cómo se conectará [4, 55].

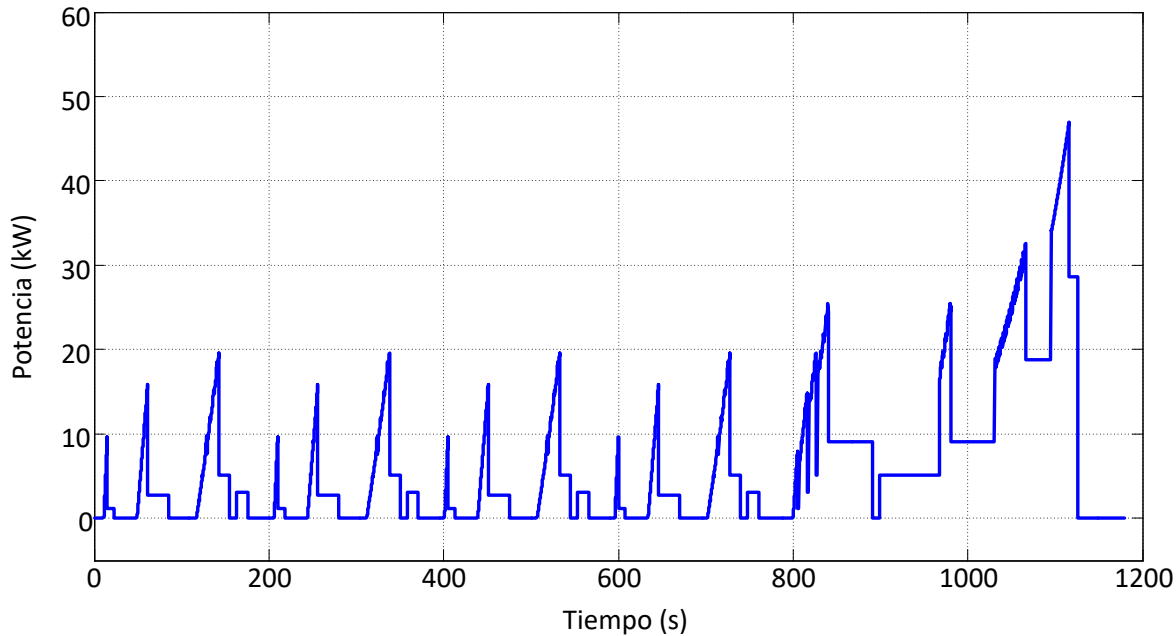


Figura 2.9: Potencia demandada del bus de CD durante el NEDC.

2.2.1.2. Arreglo del banco de baterías

El banco de baterías, además de almacenar la energía mínima para la autonomía seleccionada, también debe ser capaz de cumplir con otros dos aspectos de diseño:

- Mantener el voltaje en el bus de CD en un nivel adecuado para el funcionamiento de los inversores (400-450 V).
- Entregar toda la potencia demandada por el vehículo, a la máxima velocidad del Modo-eco, sin superar la corriente de descarga estándar.

Ya que es necesario que el *BB* tenga un voltaje superior a 400 V en todo momento y como el voltaje mínimo de operación para las baterías es de 3.7 V (al 20% del *SOC*), se puede determinar que se requiere de al menos 109 baterías conectadas en serie para cumplir con este primer requisito y que el voltaje mínimo del *BB* sea 403.3 V. Además, ya que el voltaje a plena carga (*SOC* = 100%) es de 4.03 V, el máximo voltaje que se obtiene al conectar en serie las 109 baterías es de 439.27 V; lo cual es inferior a 450 V que es el valor máximo de operación del inversor seleccionado anteriormente. Por tal motivo se decidió que el *BB* tendrá 109 baterías conectadas en serie.

Con la finalidad de determinar el número de baterías que deben conectarse en paralelo, se calculó la potencia que debe suministrar el *BB* cuando el *VE* se mueve a su máxima velocidad

en Modo-eco (120 km/h). Para este cálculo se consideraron las fuerzas que actúan sobre el vehículo en movimiento constante y bajo las siguientes condiciones: 1) no existe viento ni a favor ni en contra del movimiento del vehículo y 2) el vehículo se desplaza en un camino sin pendiente. De este cálculo se obtuvo que para mover el vehículo virtual a una velocidad constante de 120 km/h el sistema de tracción demanda del bus de CD 28.617 kW. Por tal motivo, ya que el banco de baterías es el encargado de proveer esta potencia, pues el vehículo se encuentra en velocidad sostenida, se procede a determinar el número de baterías que deben ser conectadas en paralelo para poder suministrar dicha demanda. La Figura 2.10 muestra la potencia que el sistema de tracción demanda del bus de CD para todo el rango de valores de velocidad sostenida que puede alcanzar el VE.

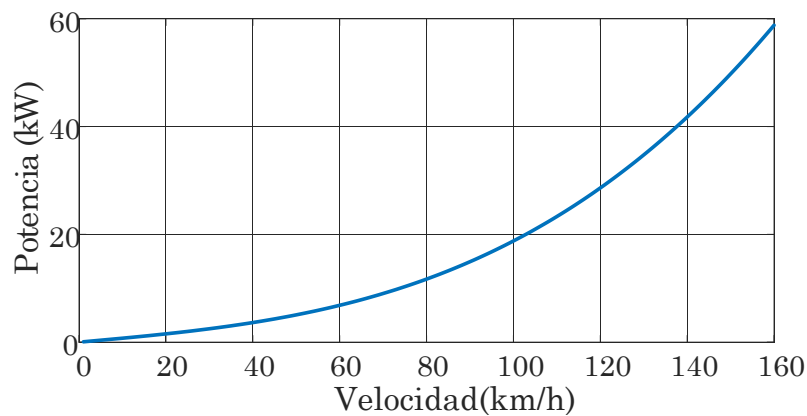


Figura 2.10: Potencia demandada del bus de CD por el sistema de tracción a distintas velocidad sostenida del VE.

Partiendo de que el voltaje mínimo del *BB* es de 403.3 V y que la potencia que el *BB* debe suministrar es de 28.617 kW, se puede determinar que el *BB* debe entregar 70.95 A cuando éste se encuentra en su nivel más bajo de *SOC*. Debido a que la corriente estándar de descarga de cada batería es de 5 A, es necesario que el *BB* cuente con 15 baterías conectadas en paralelo para que éste sea capaz de suministrar la corriente requerida.

De lo anterior se puede resumir que el arreglo de baterías quedó conformado por 1635 baterías BP-HK-LP-10B conectadas en un arreglo de: 109 baterías en serie y 15 en paralelo; por lo tanto, el banco de baterías permite una autonomía de 283.67 km y tiene un peso aproximado de 384.22 kg.

Para poder reducir el número de baterías requeridas, y acercarse a la autonomía mínima de diseño planteada originalmente, es necesario reducir el número de baterías conectadas en paralelo. Esto implicaría que la corriente de descarga de las baterías supere la corriente de descarga estándar, y someterla a un régimen de descarga más estricto, lo que puede reducir

su número de ciclos de vida. Por tal motivo, no es adecuado modificar el arreglo de baterías calculado.

Para lograr una aceleración de 0 a 100 km/h en menos de 10 s se debe aplicar un par constante en todo momento. La Figura 2.11 muestra el perfil de velocidad que se obtiene al aplicar la máxima aceleración del vehículo en Modo-eco, en esta figura se puede apreciar que el vehículo tarda 1.519 s en alcanzar los 30 km/h. Por lo tanto, la potencia del motor es variable desde $t_0=0$ s a $t_1=1.519$ s, cuando la relación de transmisión es constante y la velocidad angular de los motores eléctricos se incrementa. Después de t_1 la potencia permanece constante, esto se debe a que la transmisión continuamente variante hace que las revoluciones del motor permanezcan constantes (7500 RPM) [4]; por esta razón, se propone que la corriente del banco de baterías (I_{BB}) varíe de una manera similar. La corriente del banco de baterías se comportará de la siguiente manera:

o Modo-eco

- La corriente de descarga de las baterías no debe superar su corriente de descarga estándar, 5 A para cada serie de baterías conectada en paralelo y 75 A para el BB .
- De $I_{BB} = 0$ a $I_{BB} = 75$ A, la variación mayor de la corriente es igual a 75/1.519 A por segundo. Esta variación permite llegar a la potencia máxima de descarga del BB al mismo tiempo que la demanda de potencia.
- Una vez que $I_{BB} = 75$ A, la corriente del banco de baterías quedará constante, hasta que la demanda de potencia disminuya o la batería se descargue.

o Modo-deportivo

- La corriente de descarga de las baterías está limitada a la corriente de descarga máxima sostenida, 30 A para cada serie de baterías conectada en paralelo y 450 A para el BB .
- De $I_{BB} = 0$ a $I_{BB} = 450$ A, la variación mayor de la corriente es igual a 150/1.519 A por segundo. Esta variación permite alcanzar dos veces la corriente de descarga estándar del BB cuando la demanda de potencia llega al máximo.
- Una vez que $I_{BB} = 450$ A, la corriente del banco de baterías quedará constante, hasta que la demanda de potencia disminuya o la batería se descargue.

Entre los datos que proporciona el fabricante se encuentra una curva que muestra el voltaje de las baterías a diferentes valores del SOC [8]. De esta gráfica se extrajeron 12 datos y con

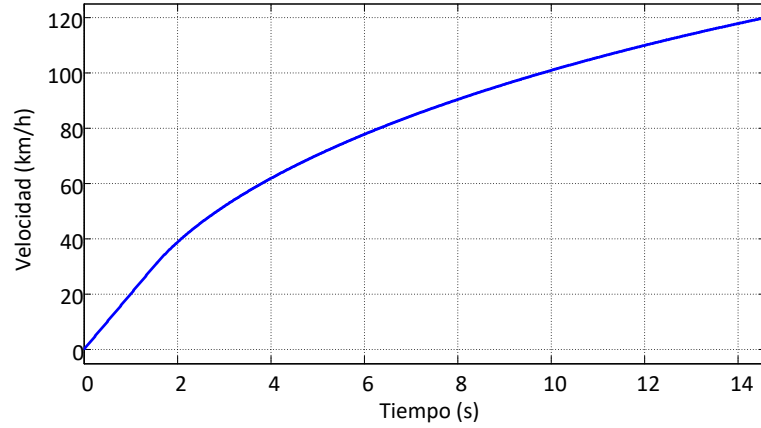


Figura 2.11: Perfil de velocidad a máxima aceleración en Modo-eco.

ellos se realizó una regresión polinomial de orden 7, este tipo de regresión permitía ajustarse a la curva con un error menor al 0.01 % y con el polinomio de menor orden. De esta regresión se obtuvieron los valores de los coeficientes de la ecuación (2.2), la cual permite calcular el voltaje de cada una de las baterías a partir de su estado de descarga ($x=100-SOC$).

$$V_B = (4.960 \times 10^{-13})x^7 - (1.347 \times 10^{-10})x^6 + (1.351 \times 10^{-8})x^5 - (5.467 \times 10^{-7})x^4 + (2.286 \times 10^{-7})x^3 + (6.639 \times 10^{-4})x^2 - (2.075 \times 10^{-2})x + 4.020 \quad (2.2)$$

2.2.2. Banco de Ultracapacitores (BU)

Debido a las constantes aceleraciones y frenados que se producen en la operación de un VE, el perfil de demanda de potencia del sistema de almacenamiento de energía es muy variado. La potencia promedio que se demanda del sistema de almacenamiento de energía es mucho menor que la potencia pico demandada durante los pequeños periodos de aceleración. Es justo en estos intervalos de tiempo en los cuales la demanda de potencia es muy alta cuando la relevancia de una fuente auxiliar con alta potencia específica, como los ultracapacitores, es de suma importancia.

De acuerdo con [4], los ultracapacitores funcionan bajo la tecnología del capacitor de doble capa. La energía almacenada en un ultracapacitor (W_c) se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$W_c = \frac{1}{2}C \times V_c^2 \quad (2.3)$$

donde C es la capacitancia en Farads y V_c es el voltaje del capacitor. Hasta ahora, la tensión nominal de los ultracapacitores con un electrolito acuoso ha sido de aproximadamente 0.9 V por célula y de 2.3 a 3.3 V para cada célula con un electrolito no acuoso.

Debido a que el principal enfoque de este trabajo es el frenado regenerativo, la primera condición que debe cumplir el banco de ultracapacitores es poder almacenar el 100 % de la energía cinética que tiene el vehículo a la máxima velocidad en Modo-eco (120 km/h); por lo tanto, el banco de ultracapacitores debe ser capaz de almacenar 0.861 MJ, la ecuación (2.4) permite calcular la energía cinética del vehículo.

$$E_k(t) = \frac{1}{2}m(t)v(t)^2 \quad (2.4)$$

donde $E_k(t)$ es la energía cinética del vehículo, $m(t)$ es la masa del vehículo y $v(t)$ es la velocidad del vehículo.

Además, el banco de ultracapacitores debe ser capaz de entregar la diferencia existente entre la potencia total y la potencia máxima instantánea que pueden entregar las baterías, sin rebasar la corriente de descarga estándar, durante la aceleración de 0 a 120 km/h en Modo-eco.

La Figura 2.12 muestra la potencia demandada por el sistema de tracción al bus de CD (P_{Carga}) para producir la máxima aceleración en Modo-eco, la potencia proporcionada por el BB (P_{BB}), tomando en cuenta el nivel mínimo del voltaje del BB (403.3 V) y la potencia entregada por el BU en el bus de CD (P_{BU}). Integrando la curva de P_{BU} durante la aceleración, durante todo el tiempo que tarda el VE en llegar a la velocidad máxima del Modo-eco (120 km/h), es posible determinar que la cantidad de energía total aportada por el BU es de 0.9815 MJ. Para el cálculo de la energía aportada por el BU se consideró que el convertidor CD/CD bidireccional que conecta al BU con el bus de CD es de 90 %, este es un valor común para la eficiencia de convertidores en aplicaciones de VE [56, 57].

Tomando en cuenta la densidad energética de los ultracapacitores en el mercado, se decidió seleccionar el modelo BCAP3000 de la marca Maxwell. La Tabla 2.5 muestra las características del ultracapacitor seleccionado.

Para configurar el arreglo del banco de ultracapacitores se tomaron en cuenta los valores máximos del bus de CD y el ciclo de trabajo máximo que se desea usar en el convertidor medio puente, la selección de este convertidor será explicada en la Sección 2.2.3, trabajando en modo elevador que es de 0.75. Se propone no superar este valor de ciclo de trabajo debido a que para valores mayores a 0.75 la ganancia de voltaje del convertidor, en modo elevador,

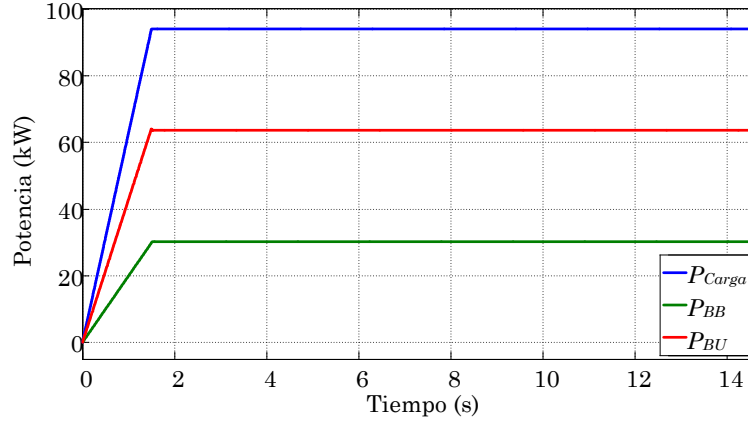


Figura 2.12: Distribución de potencia durante la máxima aceleración de Modo-eco.

Tabla 2.5: Características del ultracapacitor.

Característica	Cantidad	Unidad
Modelo	1	BCAP3000
Voltaje máximo	2.85	V
Voltaje nominal	2.7	V
Corriente máxima	1900	A
Capacitancia	3000	F
Peso	510	g

aumenta significativamente ante variaciones pequeñas del ciclo de trabajo (ver figura 2.13). Sin embargo, nos es conveniente utilizar un valor inferior a 0.75 como cota superior de ciclo de trabajo, ya que esto provoca la necesidad de utilizar una mayor cantidad de ultracapacitores. Tomando en cuenta lo anterior y considerando que el voltaje máximo en el bus de CD es de 439.27 V, utilizando la ecuación (2.5) donde V_{in} es el voltaje de entrada, V_{out} es el voltaje de salida y d_{up} es el ciclo de trabajo del convertidor operando como elevador; se puede determinar que el voltaje mínimo de operación del BU es de 109.82 V. Una vez que se cuenta con el valor mínimo de operación del BU , se procede a identificar cuál es el número mínimo de ultracapacitores conectados en serie que permiten almacenar los 981.50 kJ. Para esto se utiliza la ecuación (2.3) la cual permite calcular la cantidad de energía que puede almacenar un arreglo de ultracapacitores.

$$V_{in} = V_{out}(1 - d_{up}) \quad (2.5)$$

La Tabla 2.6 muestra algunos de los arreglos del BU que fueron considerados, así

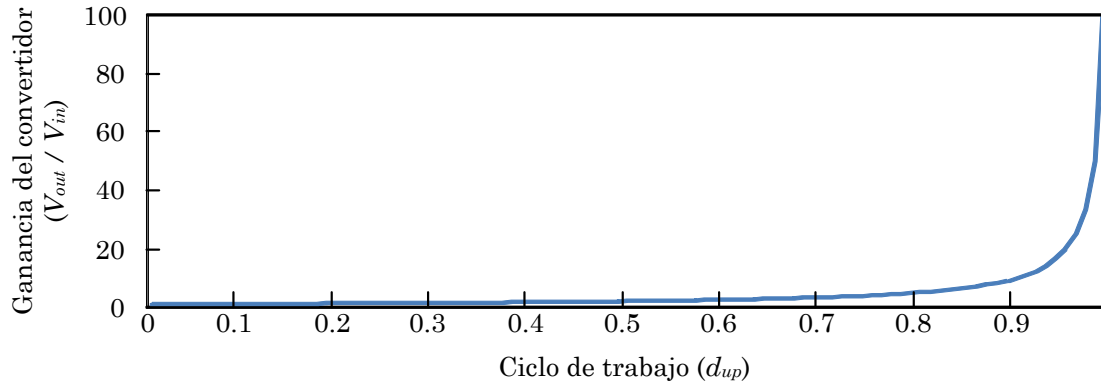


Figura 2.13: Relación entre ciclo de trabajo y ganancia del convertidor medio puente en modo elevador.

como la cantidad de energía que cada arreglo del *BU* permite almacenar. En esta tabla se puede apreciar que el arreglo con la menor cantidad de UC que permite almacenar la energía necesaria para la aceleración, es el que cuenta con 106 UC conectados en serie. El *BU* se operará en un rango de voltajes que va de un mínimo desde 109.82 V hasta un máximo de 286.20 V, con lo cual se pueden almacenar 0.9884 MJ. La Figura 2.14 muestra el comportamiento del voltaje del banco de ultracapacitores cuando el vehículo acelera de acuerdo al perfil de velocidad mostrado en la Figura 2.11. El banco de ultracapacitores tendrá un peso aproximado de 54.06 kg.

Tabla 2.6: Energía almacenable para distintos arreglos del *BU*.

Número de UC en serie	Voltaje mínimo (V)	Voltaje máximo (V)	Capacitancia total (F)	Energía (kJ)
104	109.82	280.80	28.84	963.30
105	109.82	283.50	28.57	975.89
106	109.82	286.20	28.30	988.45
107	109.82	288.90	28.03	1000.98
108	109.82	291.60	27.77	1013.48

La Figura 2.14 muestra el comportamiento del voltaje del *BU* cuando el vehículo recrea el perfil de velocidad mostrado en la Figura 2.11. Como se puede apreciar, el voltaje del banco de ultracapacitores se mantiene superior a 111.15 V cuando el vehículo alcanzó la velocidad máxima para el Modo-eco, lo cual permite que el ciclo de trabajo del convertidor medio puente, funcionando en modo elevador, no supere el 0.75.

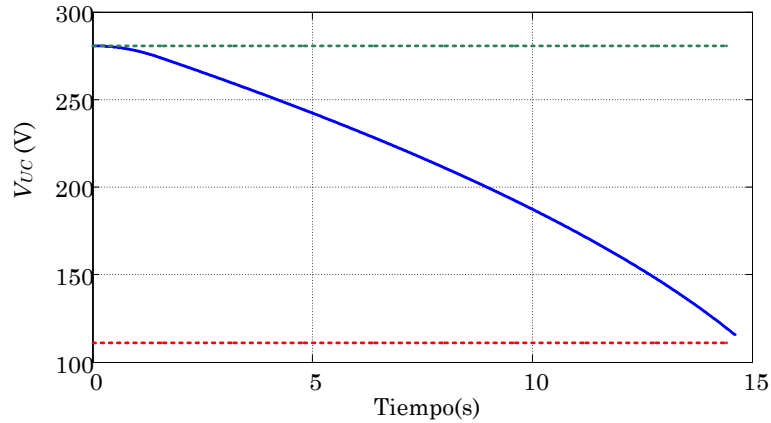


Figura 2.14: Comportamiento del voltaje del BU , para la máxima aceleración en Modo-eco.

2.2.3. Convertidor CD/CD bidireccional para el VE

Como ya se ha mencionado anteriormente el sistema de almacenamiento de energía de un vehículo eléctrico está compuesto por una o más fuentes. Por tal motivo, para acoplar los niveles de tensión de las distintas fuentes que conforman el sistema de almacenamiento de energía, es necesario utilizar convertidores CD/CD unidireccionales o bidireccionales. Además, los convertidores CD/CD se encargan de regular la potencia que entregan las fuentes. Para el caso particular de este trabajo de tesis se utilizó un convertidor CD/CD bidireccional, debido a que se desea que el BU sea capaz de entregar y absorber energía. Ya que se decidió utilizar un sistema de almacenamiento de energía semi-activo, el BB está conectado directamente al bus de CD y no cuenta con un convertidor CD/CD que regule la potencia que éste entrega. Por tal motivo, para controlar la potencia que el BB entrega es necesario hacer un control indirecto, el cual controla la potencia que entregan las baterías al controlar la potencia demandada por el sistema de tracción (P_{Carga}) y la potencia que inyecta el BU (P_{BU}). De esta forma la potencia que suministra el BB es igual a la potencia demandada por el sistema de tracción menos la potencia que es proporcionada por el BU ($P_{BB}=P_{Carga}-P_{BU}$).

Por lo anterior, es necesario seleccionar una topología para el convertidor CD/CD que permita transmitir y controlar la energía en ambas direcciones. Los convertidores CD/CD bidireccionales que han sido mayormente reportados en la bibliografía, para la aplicación de VE son: puente completo, medio puente, Ćuk y Sepic/Luo [11, 57, 58], que se muestran en la Figura 2.15 .

Debido a que el convertidor CD/CD bidireccional será utilizado en un vehículo eléctrico, las principales características consideradas para la selección de la topología del convertidor

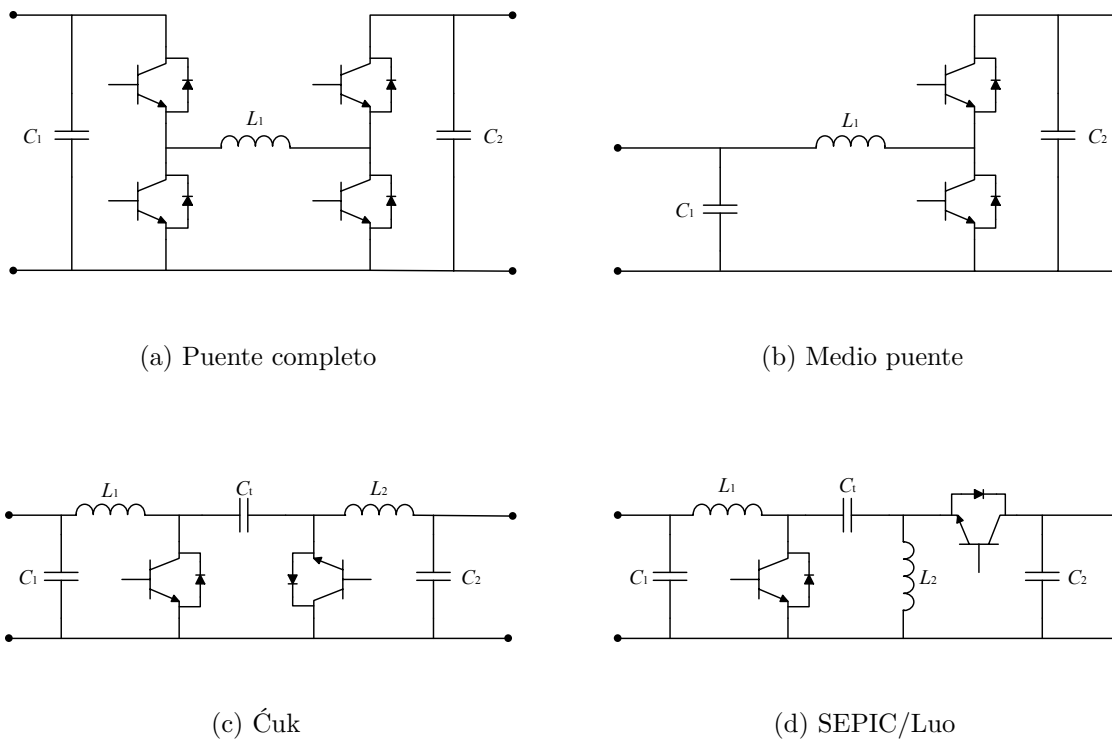


Figura 2.15: Convertidores CD/CD bidireccionales reportados para vehículos eléctricos.

son:

- Peso de los componentes, debido a que al reducir el peso de los componentes:
 - Se reduce el peso total del vehículo.
 - Se reduce la demanda de potencia.
 - Se reduce el consumo energético.
- Número de componentes semiconductores, debido a que al reducir el número de componentes:
 - Se reduce el número de puntos de falla.
 - Se aumenta la eficiencia, al reducir las pérdidas.

Se calcularon los componentes pasivos de los convertidores medio puente, puente completo, Ćuk y SEPIC/Luo. Los componentes de los cuatro convertidores fueron calculados para los parámetros de diseño mostrados en la Tabla 2.7, éstos son los parámetros del convertidor CD/CD bidireccional que se requieren en el sistema de almacenamiento de energía del VE.

Tabla 2.7: Parámetros de diseño de convertidores.

Parámetro	Valor	Unidad
Potencia máxima continua	70	kW
Voltaje del bus de CD	403.30 - 439.27	V
Voltaje del UC	109.27 - 286.2	V
Máximo rizo de voltaje de salida (ΔV_C)	2.5	%
Máximo rizo de corriente del inductor (ΔI_L)	10	%
Máximo rizo de voltaje del capacitor de transferencia (ΔV_{Ct})	10	%
Frecuencia de conmutación (f_{sw})	30	kHz

Después de calcular los componentes pasivos, para cada una de las cuatro topologías, se identificó que las topologías medio puente y puente completo son las que requieren el inductor de menor tamaño. Por tal motivo, considerando que entre menor sea el tamaño del inductor menor será el peso del mismo y que el convertidor medio puente solo requiere la mitad de elementos semiconductores que el convertidor puente completo, se tomó la decisión de seleccionar esta topología para ser usada en el sistema de almacenamiento de energía del VE.

La Tabla 2.8 muestra las ecuaciones para calcular el inductor y los capacitores para el convertidores medio puente [58].

Tabla 2.8: Fórmulas para el cálculo de los elementos pasivos del convertidor medio puente.

Elementos de diseño	Modo elevador	Modo reductor
Ciclo de trabajo	$d_{up} = 1 - \frac{1}{V_{out}/V_{in}}$	$d_{dn} = \frac{V_{out}}{V_{in}}$
Inductancia mínima (L_{1min})	$\frac{V_{out}}{\Delta I_L f_{sw} I_{out}} d_{up} (1 - d_{up})^2$	$\frac{V_{in}}{\Delta I_L f_{sw} I_{in}} d_{dn}^2 (1 - d_{dn})$
Capacitancia 1 mínima (C_{1min})	-	$\frac{(1 - d_{dn})}{8L_{1min}\Delta V_{C1}f_{sw}^2}$
Capacitancia 2 mínima (C_{2min})	$\frac{I_{out}d_{up}}{f_{sw}\Delta V_{C2}}$	-

El convertidor CD/CD bidireccional medio puente tiene la capacidad de elevar el voltaje en una dirección y reducirlo en la otra, tal como se muestra en la Figura 2.16. Se puede apreciar que cuando el transistor T_1 está conmutando, el convertidor opera como un convertidor reductor (Buck); mientras que, cuando el transistor T_2 conmuta, el convertidor

se comporta como un convertidor elevador (Boost).

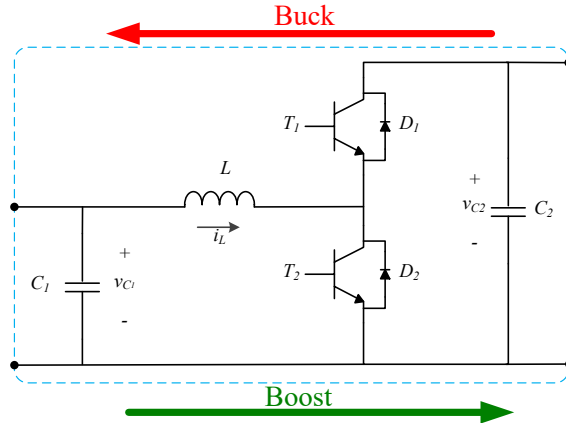


Figura 2.16: Convertidor CD/CD medio puente.

De la Figura 2.12 se interpreta que la potencia máxima que debe suministrar el *BU* al bus de CD es de 63 kW. Por tal motivo, si se considera una eficiencia del convertidor CD/CD de 90 %, se puede definir que la potencia nominal del convertidor bidireccional es de 70 kW. Sin embargo, durante el NEDC y el ciclo de manejo de la ciudad de Nueva York (City II) [54] muy rara vez es necesario transferir esta potencia al sistema de tracción. Esto se debe a que en los ciclos de manejo reales no es necesario aplicar la máxima aceleración del vehículo en Modo-eco, aunque el vehículo esté dimensionado y diseñado para satisfacer esta condición. La Figura 2.17 muestra la potencia que demanda el sistema de tracción al bus de CD durante el nuevo ciclo de manejo europeo; se puede apreciar que, aun cuando el vehículo alcanza los 120 km la demanda de potencia no supera los 50 kW.

Por lo tanto, se consideró conveniente dividir la potencia total del convertidor CD/CD bidireccional y utilizar una topología de medio puente de multi-ramas, ya que esto permite tener las siguientes ventajas:

- Utilizar la técnica de conmutación intercalada (interleave).
- Usar inductores de menor tamaño.
- Operar las ramas en un punto cerca al de máxima eficiencia.

Debido a que se desea operar cada rama del convertidor lo más cercana a su potencia nominal, no es conveniente operar todas las ramas del convertidor al mismo tiempo cuando la potencia que se desea transmitir es pequeña. Por tal motivo, se decide que el número de ramas que estarán en funcionamiento dependerán de la potencia a transmitir. Tomando

en cuenta lo anterior y debido a que se pretende utilizar la técnica de intercalado y a que se desea utilizar señales portadoras con desfase fijo, se propone que el número de ramas del convertidor sea un valor potencia de 2. Por consiguiente, ya que la potencia que debe transmitir el convertidor CD/CD suele ser inferior a 10 kW la mayor parte del tiempo, se propone que el convertidor esté conformado por 8 ramas, cada una de ellas será diseñada para una potencia nominal de 9 kW con lo cual el convertidor tendrá una potencia total de 72 kW; de esta manera se cumple la condición de que la potencia nominal del convertidor sea mayor a los 70 kW, previamente señalados. La Figura 2.18 muestra la configuración del convertidor CD/CD bidireccional medio puente de 8 ramas.

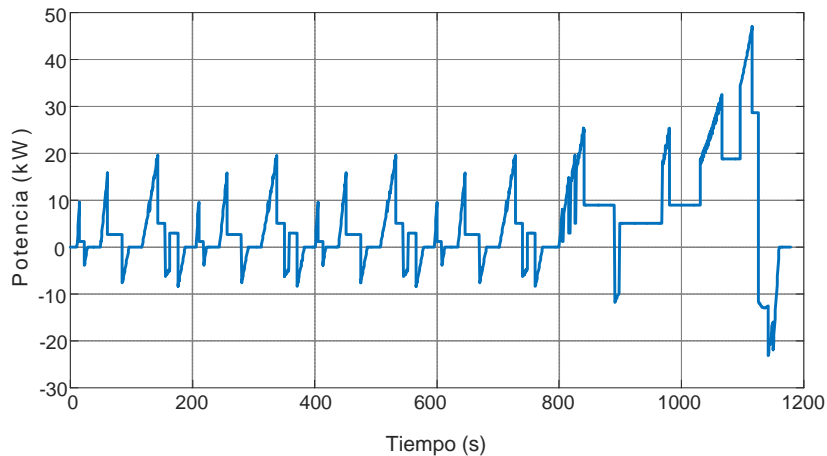


Figura 2.17: Potencia demandada por el sistema de tracción al bus de CD.

Cada una de las ramas fue diseñada para una potencia nominal de 9 kW, para tener una potencia total de 72 kW. Esta división de la potencia se realizó con la finalidad de operar el convertidor lo más cercano a su potencia nominal (por rama); ya que, como se puede ver en la Figura 2.17, la potencia que demanda el vehículo es pequeña la mayor parte del tiempo.

Para calcular el tamaño mínimo de los elementos pasivos es necesario establecer los parámetros operativos que deben cumplir cada una de las ramas del convertidor. La Tabla 2.9 muestra los parámetros de diseño de cada una de las 8 ramas del convertidor CD/CD medio puente. Para el diseño multi-rama se seleccionó un rizo de corriente mayor que en el diseño de una sola rama, debido a que al utilizar la técnica de intercalado, ya que debido al desfase existente entre las corrientes de las ramas del convertidor se genera una cancelación total o parcialmente del rizo de corriente que ve la fuente alimentadora.

Tomando en cuenta los parámetros de la Tabla 2.9 y las ecuaciones de la Tabla 2.8, se calcularon los elementos pasivos del convertidor CD/CD medio puente de 8 ramas. La Tabla 2.10 presenta las inductancias y capacitancias mínimas para cumplir con los parámetros de

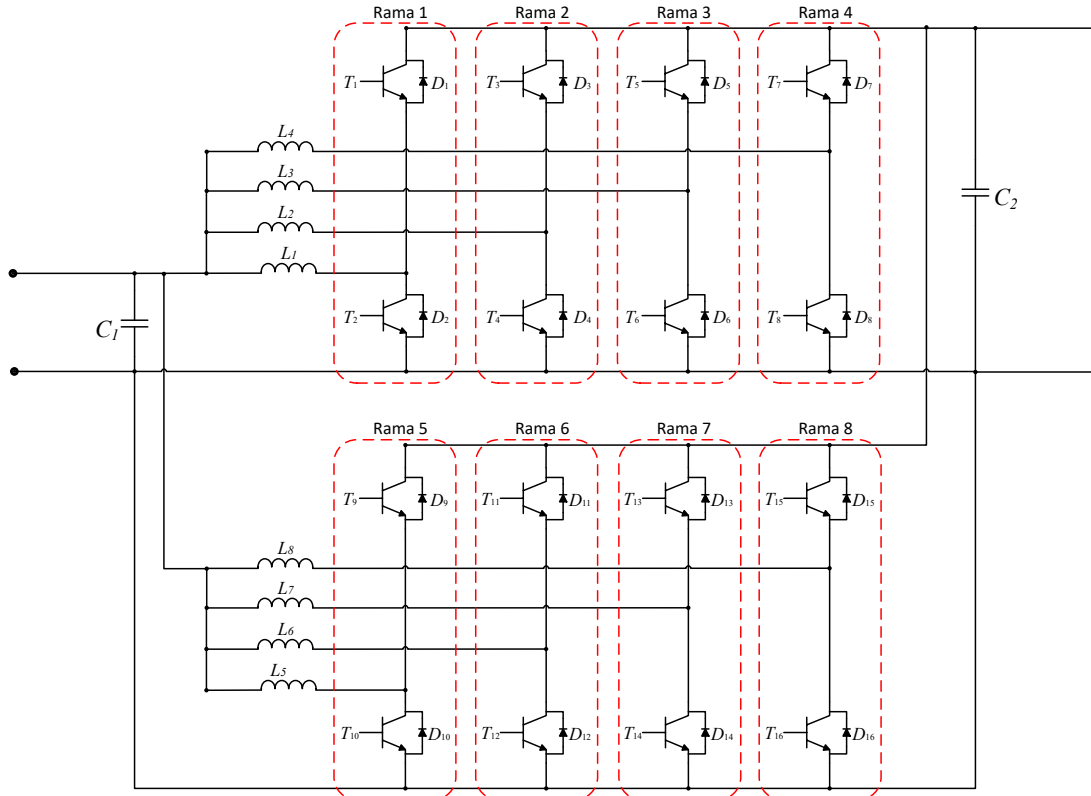


Figura 2.18: Convertidor CD/CD bidireccional medio puente de 8 ramas.

Tabla 2.9: Parámetros de diseño de convertidores multi-rama.

Parámetro	Valor	Unidad
Potencia máxima continua	9	kW
Voltaje del bus de cd	403.30 - 439.27	V
Voltaje del BU	109.82 - 286.2	V
Máximo rizo de voltaje de salida (ΔV_c)	2.5	%
Máximo rizo de corriente del inductor (ΔI_L)	50	%
Frecuencia de conmutación (f_{sw})	30	kHz

diseño.

Para el cálculo de los inductores se consideró todo el rango de valores en los cuales pueden variar, tanto el voltaje del BU como el voltaje del bus de CD. Se realizaron los cálculos para todas las combinaciones de voltajes, para el convertidor operando tanto en modo elevador como reductor. La Figura 2.19 muestra los valores de inductancia mínima requerida, en cada rama del convertidor, para todas las combinaciones de voltajes. Para seleccionar el valor de

Tabla 2.10: Resultados de cálculo de elementos pasivos.

Elemento	Medio puente
Inductores (L_1-L_8)	211.39 μH
Capacitor 1 (C_1)	19.71 μF
Capacitor 2 (C_2)	46.64 μF

las inductancias que serán empleadas en el convertidor se decidió seleccionar la de mayor valor, se puede apreciar que el valor máximo que se requiere para el convertidor operando en modo elevador es igual al valor máximo requerido para el modo reductor.

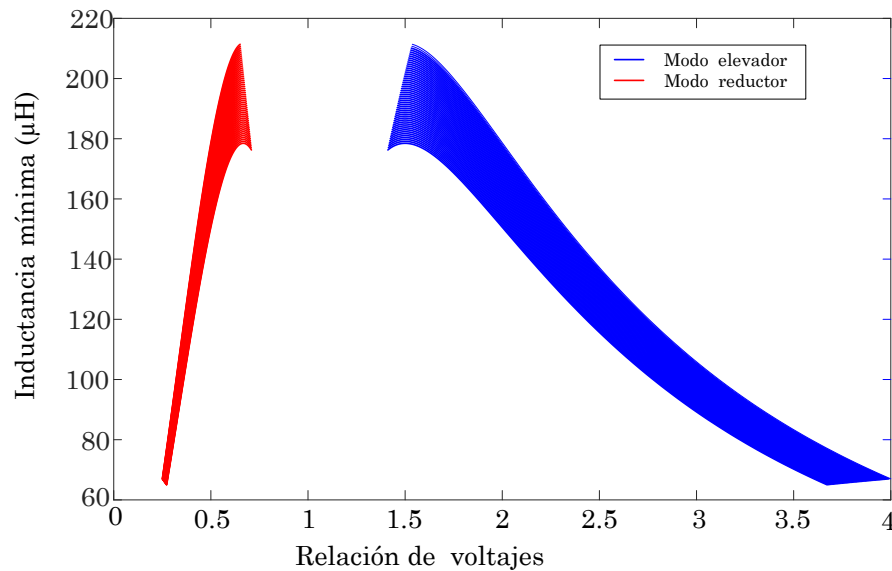


Figura 2.19: Inductancia mínima para diferentes relaciones de voltaje.

Aprovechando la característica multi-rama del convertidor CD/CD bidireccional se decidió utilizar la técnica de intercalado. Esta técnica permite disminuir el rizo de la corriente de entrada y de salida del convertidor, esto se logra gracias al desfase que existe entre las señales portadoras de las ramas del convertidor. La Tabla 2.11 muestra la fase de la portadora de cada una de las ramas del convertidor.

Como se puede apreciar en la Tabla 2.11, se decidió utilizar solo 4 portadoras con un desfase de 90 grados entre ellas.

Tabla 2.11: Ángulo de fase de las portadoras.

Número de rama	Ángulo de fase
1 y 5	0 grados
2 y 6	180 grados
3 y 7	90 grados
4 y 8	-90 grados

2.2.3.1. Control del convertidor CD/CD

Debido a que las 8 ramas del convertidor tienen los mismos parámetros y se plantea utilizar un sistema de despacho de convertidor, el cual distribuya equitativamente la cantidad de potencia y energía entre las ramas del convertidor, se decide utilizar un controlador individual en cada rama, el cual será diseñado una sola vez y replicado para ser utilizado en cada una de las 8 ramas del convertidor. De esta manera, el diseño del controlador del convertidor CD/CD medio puente se reduce a diseñar un esquema de control que estará compuesto por dos controladores, el primero es para el convertidor operando en modo elevador y el segundo para cuando la misma rama del convertidor opera en modo reductor. Para realizar el diseño del controlador se utilizarán los componentes de la rama uno (T_1 , T_2 , D_1 , D_2 y L_1), así como los capacitores de alto y bajo voltaje (C_1 y C_2), por lo tanto, la Figura 2.16 muestra el circuito que será modelado y para el cual será diseñado el controlador.

Como se mencionó anteriormente, el convertidor medio puente funciona como elevador cuando el transistor T_2 y el diodo D_1 están operando; y funciona como reductor cuando operan el transistor T_1 y el diodo D_2 . Tomando en cuenta lo anterior y conociendo que las topologías resultantes son: convertidor elevador (boost) y reductor (buck), se obtuvieron sus modelos promediados. La ecuación (2.7) muestra el modelo promediado del convertidor en modo reductor. Este modelo se obtuvo considerando el circuito equivalente del convertidor operado en modo reductor que se muestra en la Figura 2.20 y el vector de estado descrito por la ecuación (2.6).

$$\mathbf{x}_{dn} = \begin{bmatrix} x_{1_dn} \\ x_{2_dn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{L1} \\ V_{C1} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

donde I_{L1} es la corriente del inductor y V_{C1} el voltaje en el capacitor C_1 .

$$f(x, d) = \begin{cases} \dot{x}_{1_dn} = \frac{-1}{L_1} x_{2_dn} + \frac{V_{in_dn} d_{dn}}{L_1} \\ \dot{x}_{2_dn} = \frac{1}{C_1} x_{1_dn} - \frac{1}{C_1 R_{eq_dn}} x_{2_dn} \end{cases} \quad (2.7)$$

donde V_{in_dn} es el voltaje del bus de CD, d_{dn} es el ciclo de trabajo del convertidor para el transistor T_1 y R_{eq_dn} representa el equivalente a la potencia que debe transmitir el convertidor de bus de CD al BU . Aunque la dinámica de un vehículo eléctrico es compleja, la variación en la potencia que el sistema de tracción demanda del bus de CD varía lentamente, ver Figura 2.17, esto permite representar la carga del convertidor CD/CD bidireccional como una resistencia.

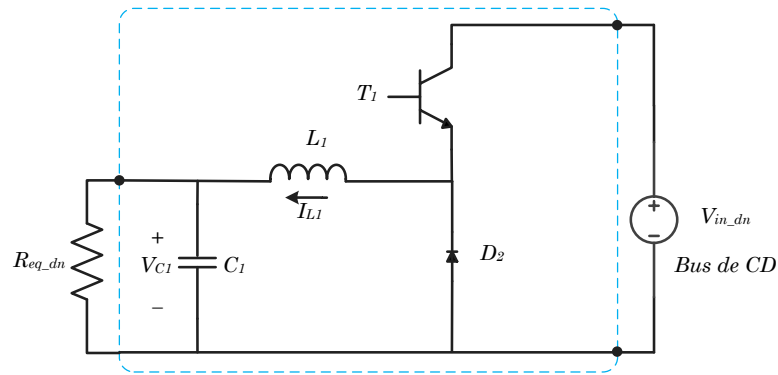


Figura 2.20: Circuito equivalente del convertidor operando en modo reductor.

La ecuación (2.9) representa el modelo promedio del convertidor elevador. Este modelo se obtuvo considerando el circuito equivalente del convertidor operado en modo elevador que se muestra en la Figura 2.21 y el vector de estado descrito por la ecuación (2.8).

$$\mathbf{x}_{up} = \begin{bmatrix} x_{1_up} \\ x_{2_up} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{L1} \\ V_{C2} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

donde I_{L1} es la corriente del inductor y V_{C2} el voltaje en el capacitor C_2 .

$$f(x, d) = \begin{cases} \dot{x}_{1_up} = \frac{d_{up} - 1}{L_1} x_{2_up} + \frac{V_{in_up}}{L_1} \\ \dot{x}_{2_up} = \frac{1 - d_{up}}{C_2} x_{1_up} - \frac{1}{C_2 R_{eq_up}} x_{2_up} \end{cases} \quad (2.9)$$

donde V_{in_up} es el voltaje del BU (V_{BU}), R_{eq_up} representa el equivalente a la potencia que debe transmitir el convertidor del BU al bus de CD y d_{up} es el ciclo de trabajo del convertidor para el transistor T_2 .

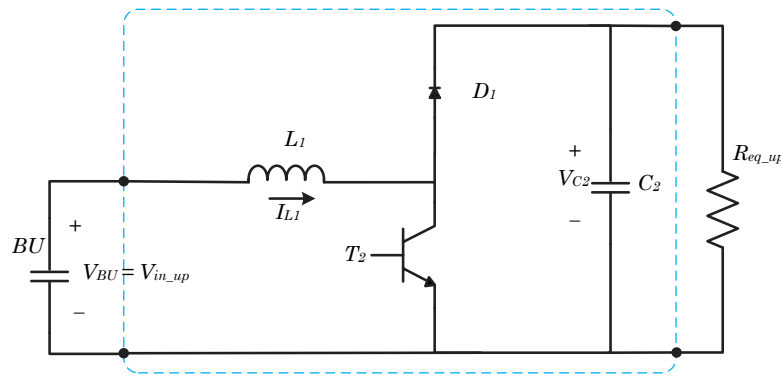


Figura 2.21: Circuito equivalente del convertidor operando en modo elevador.

Modo reductor

El convertidor en modo reductor es el encargado de regular la potencia que recibe el BU , de acuerdo a la referencia que proporciona el control supervisor. Debido a que la corriente de referencia varía lentamente, ésta se puede considerar constante por pequeños instantes de tiempo. Por tal motivo, se propone que el controlador del convertidor esté basado en una retroalimentación de estado y un integrador para la salida (corriente del inductor) [59], ya que el problema de seguimiento de potencia puede abordarse como un problema de regulación de corriente y voltaje.

Para realizar el control, primeramente es necesario obtener el modelo en espacio de estado del convertidor operando en modo reductor. Las ecuaciones (2.10) y (2.11) representan el modelo en espacio de estado del convertidor en modo reductor.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{1_dn} \\ \dot{x}_{2_dn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C_1} & -\frac{1}{C_1 R_{eq_dn}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1_dn} \\ x_{2_dn} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{V_{in_up}}{L} \\ 0 \end{bmatrix} d_{dn} \quad (2.10)$$

$$\begin{bmatrix} y_{dn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1_dn} \\ x_{2_dn} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Los polos naturales del sistema son: $-348.41 + 5466.24i$ y $-348.41 - 5466.24i$, los cuales tienen una parte imaginaria mayor a su parte real. Esto provoca que el coeficiente de amortiguamiento sea muy pequeño y que la respuesta del sistema, aunque rápida, tiene un sobretiro superior al 80%. Por tal motivo, con la finalidad de obtener una respuesta dinámica con un tiempo de estabilización similar (1.149 ms), pero con un sobretiro menor al 2%; se seleccionaron los siguientes polos para el sistema retroalimentado: -34841 , $-3484.1 + 2733.12i$, $-3484.1 - 2733.12i$. Con esto el sistema tiene dos polos dominantes seleccionados para que la dinámica cumpla con las características previamente señaladas y un tercer polo cuyo valor mayor de 5 veces la parte magnitud los polos dominantes, y con esto reducir su impacto en la dinámica del sistema [59].

Tomando en cuenta el modelo en espacio de estado y los polos seleccionados, se calcularon las ganancias del controlador y se obtuvieron los siguientes resultados: $\mathbf{K}_{dn} = [19.78 \times 10^{-3}, -58.93 \times 10^{-3}]^T$ y $K_{i_dn} = 471.81$, donde \mathbf{K}_{dn} y k_{i_dn} son las ganancias de la retroalimentación de estado y la ganancia del integrador de la salida, respectivamente.

La señal de control del sistema queda de la siguiente manera:

$$d_{dn} = -\mathbf{K}_{dn}\mathbf{x}_{dn} + K_{i_dn}\sigma_{dn} \quad (2.12)$$

donde \mathbf{x}_{dn} es el vector de espacio de estado, conformado por x_{1_dn} y x_{2_dn} , y σ_{dn} es la integral del error (e_{dn}) existente entre la referencia de corriente del convertidor operando en modo reductor (r_{dn}) y la salida del sistema (y_{dn}), por lo tanto:

$$\dot{\sigma}_{dn} = e_{dn} = r_{dn} - y_{dn} = r_{dn} - \mathbf{C}_{dn}\mathbf{x}_{dn} \quad (2.13)$$

La Figura 2.22 muestra el diagrama de bloques del sistema con control por retroalimentación de estados con integrador [59].

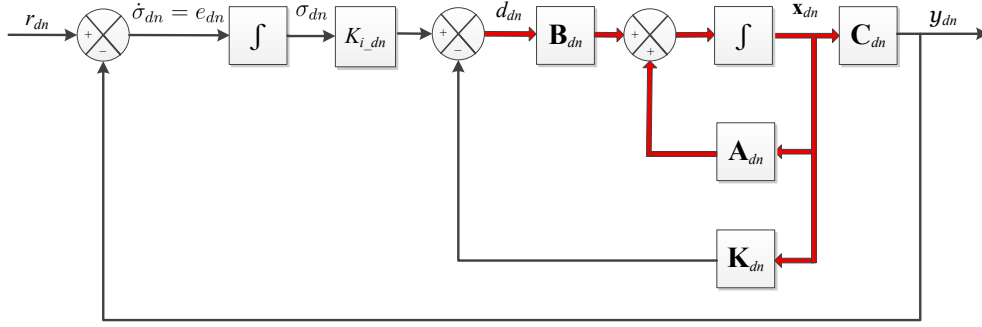


Figura 2.22: Sistema de control en lazo cerrado con $d_{dn} = -\mathbf{K}_{dn}\mathbf{x}_{dn} + K_{i_dn}\sigma_{dn}$.

Modo elevador

El convertidor en modo elevador es el encargado de regular la potencia que entrega el *BU*, de acuerdo a la referencia que proporciona el control supervisorio. Como se mencionó anteriormente, la corriente de referencia varía lentamente, por tal motivo, ésta se puede considerar constante por instantes. Debido a esto, se decide utilizar un controlador basado en retroalimentación de estado y un integrador para la salida (corriente del inductor) [59], ya que al igual que en el modo reductor el problema de seguimiento de potencia puede abordarse como un problema de regulación de corriente y voltaje.

Para facilitar el cálculo del controlador, se realizó una linealización en un punto de equilibrio del sistema ($[d_{ss}, x_{1ss}, x_{2ss}]^T = [0.3484, 31.44, 439.27]^T$). Las ecuaciones (2.14) y (2.15) muestran el sistema de la ecuación (2.9) linealizado.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{(d_{ss} - 1)}{L} \\ \frac{(1 - d_{ss})}{C_2} & -\frac{1}{C_2 R_{eq_up}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{x_{1ss}}{L} \\ -\frac{x_{2ss}}{C_2} \end{bmatrix} d_{up} \quad (2.14)$$

$$\begin{bmatrix} y_{up} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1_dn} \\ x_{2_dn} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

donde d_{ss} , x_{1ss} y x_{2ss} son los valores en estado estacionario del ciclo de trabajo, corriente en el inductor y voltaje en el capacitor C_2 , respectivamente. Para el cálculo de los valores de

estado estacionario se resolvió el sistema de la ecuación (2.9), bajo las siguientes condiciones: potencia a transmitir 9 kW, voltaje del *BB* 286.2 V y voltaje del bus de CD 438.18 V.

Los polos naturales del sistema son: $-62.50 + 2319.07i$ y $-62.50 - 2319.07i$, los cuales al igual que los del reductor tienen una parte imaginaria mucho mayor que su parte real. Lo cual provoca un sobretiro que supera el 90 %. Se propone que el sistema en lazo cerrado tenga un tiempo de estabilización de 4 ms y un sobretiro menor al 1 %, por lo tanto, se seleccionaron los siguientes polos para el sistema retroalimentado: $-1000 + 100i$, $-1000 - 100i$ y -5000.01 . De esta forma el sistema tiene los dos polos dominantes que permiten conseguir las características previamente señaladas y un tercer polo con un valor mayor a 5 veces la magnitud de los polos dominantes [59].

Tomando en cuenta el modelo en espacio de estado y los polos seleccionados, se calcularon las ganancias del controlador y se obtuvieron los siguientes resultados: $\mathbf{K}_{up} = [3.12 \times 10^{-3}, -4.46 \times 10^{-3}]^T$ y $K_{i_up} = 9.72$, donde \mathbf{K}_{up} y K_{i_up} son las ganancias de la retroalimentación de estado y la ganancia del integrador de la salida, respectivamente.

La señal de control del sistema queda de la siguiente manera:

$$d_{dn} = -\mathbf{K}_{up}\mathbf{x}_{up} + K_{i_up}\sigma_{up} \quad (2.16)$$

donde \mathbf{x}_{up} es el vector de espacio de estado, conformado por x_{1_up} y x_{2_up} , y σ_{up} es un nuevo estado que se forma de la integral del error (e_{up}) existente entre la salida del sistema (y_{up}) y la referencia de corriente del convertidor operando en modo elevador (r_{up}), por lo tanto:

$$\dot{\sigma}_{up} = e_{up} = r_{up} - y_{up} = r_{up} - \mathbf{C}_{up}\mathbf{x}_{up} \quad (2.17)$$

La Figura 2.23 muestra el diagrama de bloques del sistema con control por retroalimentación de estado con integrador [59].

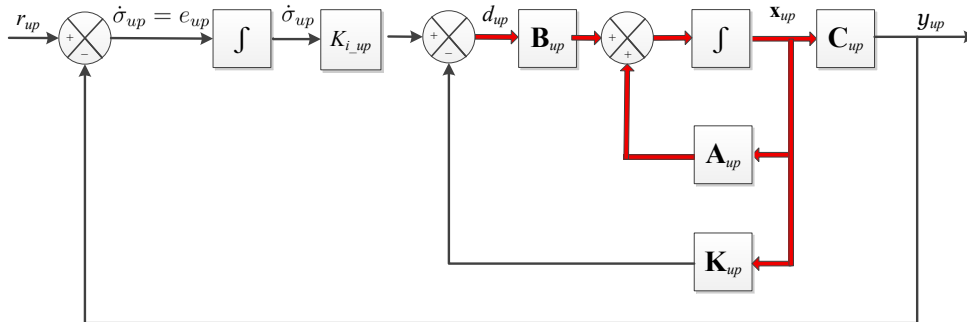


Figura 2.23: Sistema de control en lazo cerrado con $d_{up} = -\mathbf{K}_{up}\mathbf{x}_{up} + K_{i_dn}\sigma_{up}$.

2.2.4. Circuito eléctrico del sistema de almacenamiento de energía

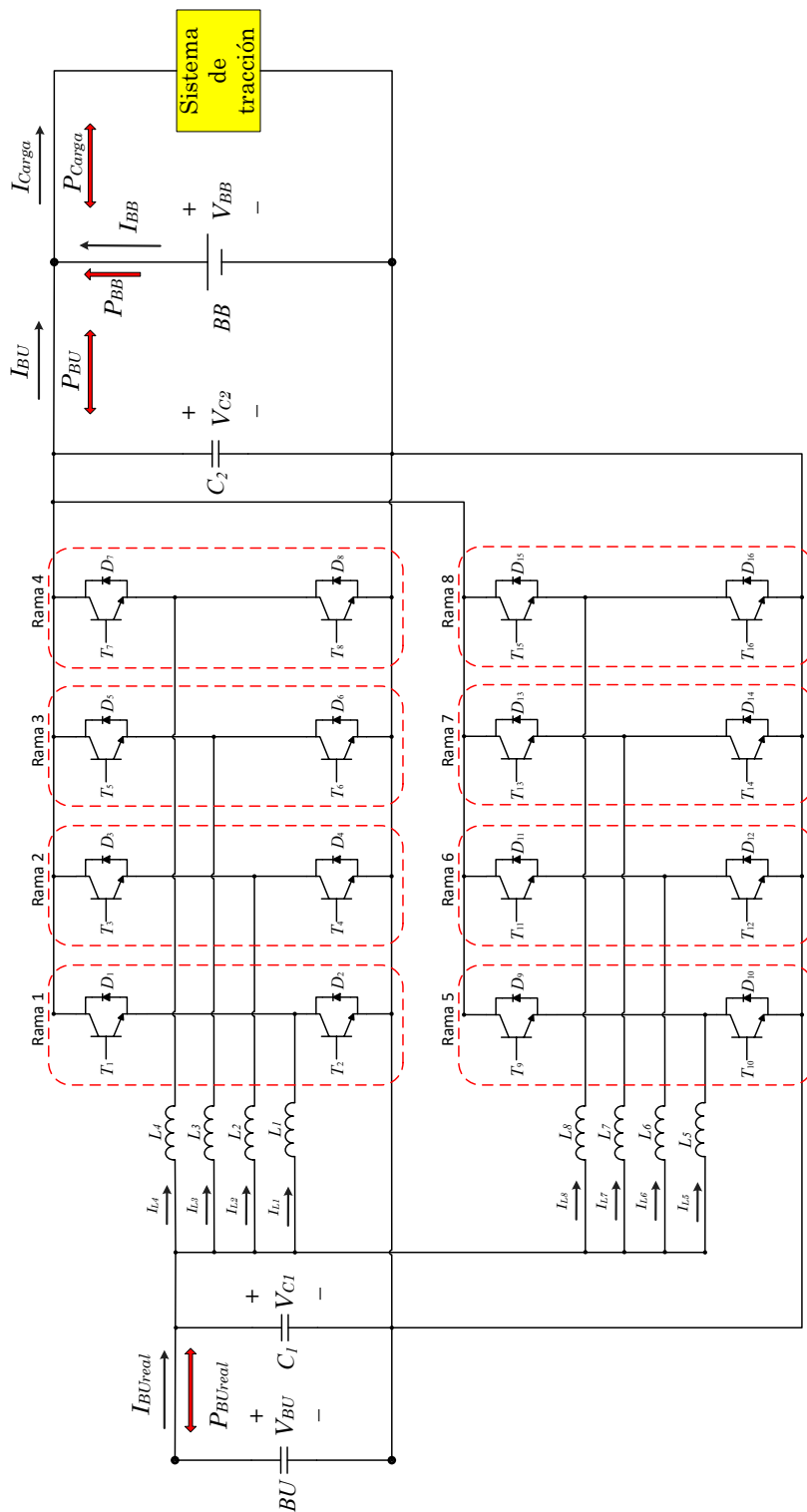


Figura 2.24: Circuito eléctrico del sistema de almacenamiento de energía.

La Figura 2.24 muestra el circuito eléctrico completo del sistema de almacenamiento de energía. En esta figura se puede apreciar la conexión existente entre los elementos que conforman el sistema de almacenamiento de energía. Además, la Figura 2.24 se puede apreciar que la potencia que entrega el *BU* (P_{BUreal}), la potencia que el *BU* entrega al bus de CD (P_{BU}) y la potencia que demanda el sistema de tracción del bus de CD (P_{Carga}), son bidireccionales. Mientras que, la potencia de las baterías (P_{BB}) sólo es en un sentido, es decir, las baterías únicamente entregan potencia. También, en esta misma figura se puede apreciar el sentido de la corriente que ha sido considerada como positiva para los distintos elementos del sistema de almacenamiento de energía.

Diseño del control supervisorio para un vehículo eléctrico

El control supervisorio (CS) es el término utilizado para el control de muchos controladores individuales, como en un sistema de control distribuido o un control maestro. Es un nivel alto de vigilancia y/o control de los controladores de proceso individuales, que no es necesario para el funcionamiento de cada controlador, sino que proporciona al operador una visión general del proceso y permite la integración de la operación entre controladores. Además, puede proporcionar valores de referencia a los distintos controladores de nivel inferior para su funcionamiento adecuado e interacción [60, 61].

La Figura 3.1 muestra un esquema de control supervisorio, se puede apreciar que sus entradas son las señales generadas por los sensores del sistema y las características de sistema, y tiene como salidas señales de referencia para los distintos controladores que está supervisando.

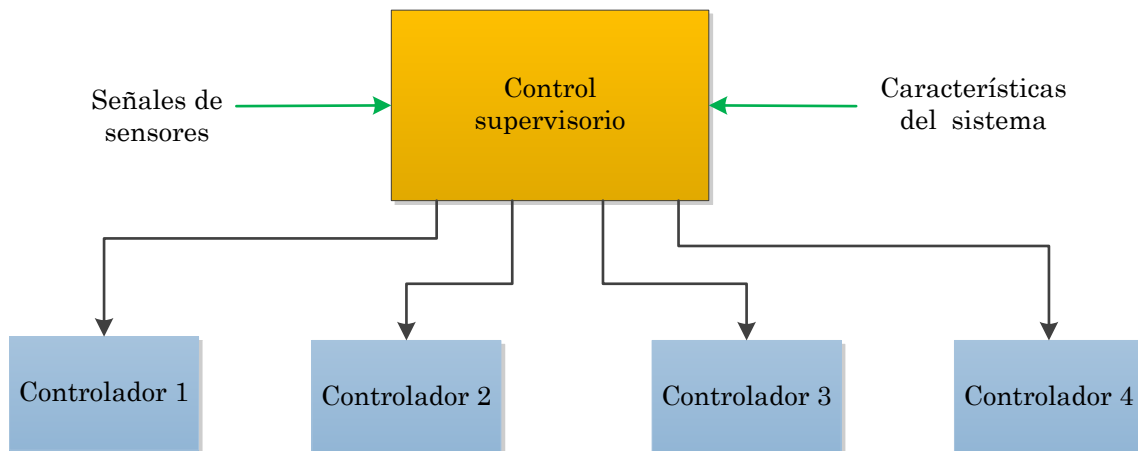


Figura 3.1: Control supervisorio.

Para este trabajo de tesis, se diseñó un control supervisorio de un vehículo eléctrico, el

cual genera referencias para los elementos del tren de potencia del vehículo. El CS propuesto en este trabajo de tesis tiene como objetivo principal el aprovechamiento de la energía cinética del vehículo mediante el uso del frenado regenerativo, este control está conformado por tres sistemas:

- Sistema de distribución de fuerza de frenado (SDF).
- Sistema de administración de energía (SAE).
- Sistema de despacho de convertidor (SDC).

Cada uno de estos sistemas tiene funciones distintas, pero no son independientes, ya que la salida de uno es la entrada de otro. La Figura 3.2 muestra el diagrama de funcionamiento del control supervisorio. Se puede apreciar que las entradas del CS son: voltaje del *BB* y del *BU*, corriente del *BB*, velocidad y aceleración del vehículo, características y especificaciones del vehículo, de los motores, del *BB* y del *BU*. También se puede apreciar que las salidas del CS son: referencias del torque de cada motor, referencia para el frenado mecánico y las referencias para las 8 ramas del convertidor bidireccional CD/CD.

A continuación se presenta una explicación del diseño y funcionamiento de cada uno de los sistemas del control supervisorio.

3.1. Sistema de distribución de fuerza de frenado (SDF)

De acuerdo con [42], los sistemas de frenado mecánico tradicionales producen una distribución de la fuerza de frenado entre los dos ejes del vehículo (delantero y trasero). Esto es algo que se realiza naturalmente por la distribución del líquido de frenos que realiza el cilindro maestro y el movimiento del centro de masa que se produce durante el frenado. La Figura 3.3 muestra la curva de frenado ideal para el vehículo considerado en este trabajo de tesis [42].

La magnitud de la fuerza que se aplica en cada uno de los ejes se puede calcular mediante las siguientes ecuaciones [42]:

$$F_f = \frac{b + Z_g H}{a + b} F_b \quad (3.1)$$

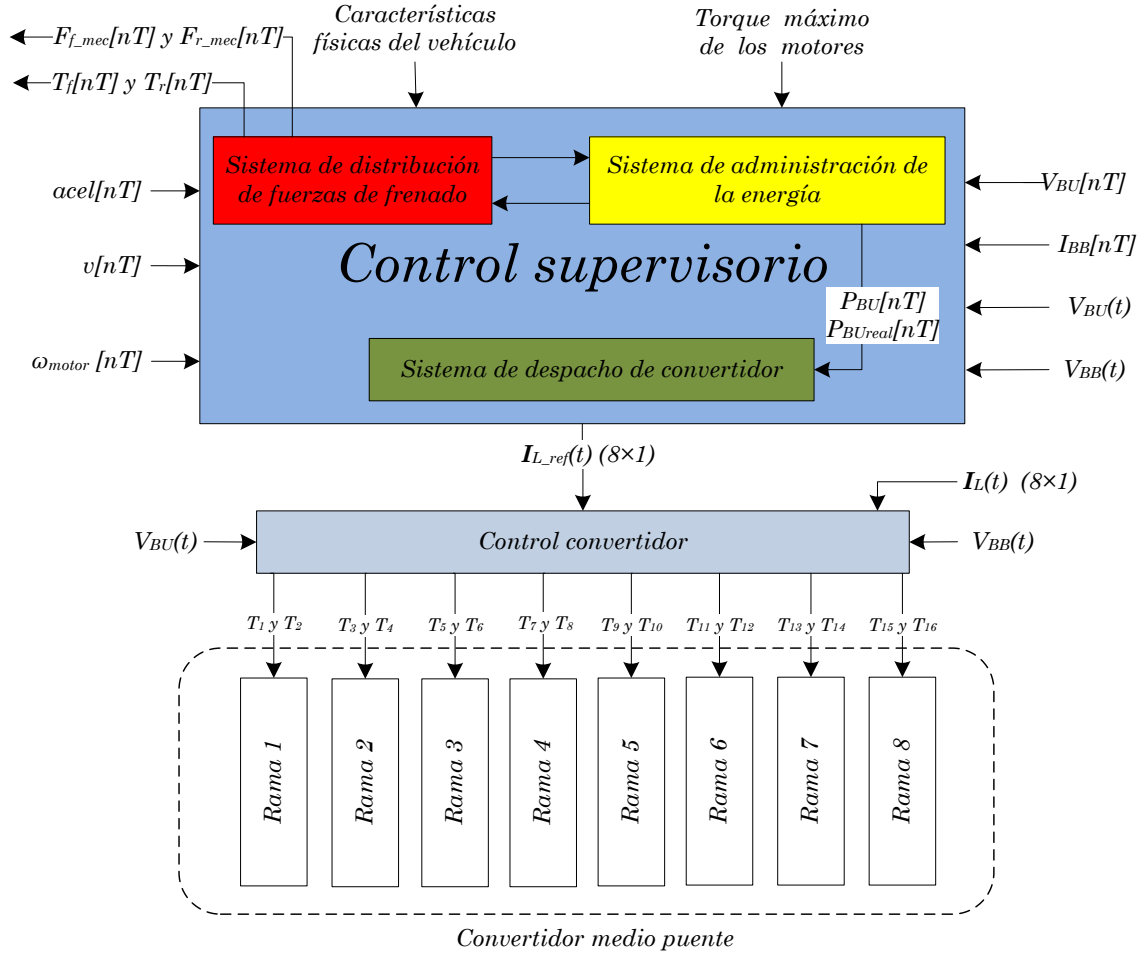


Figura 3.2: Diagrama de bloques del control supervisorio propuesto.

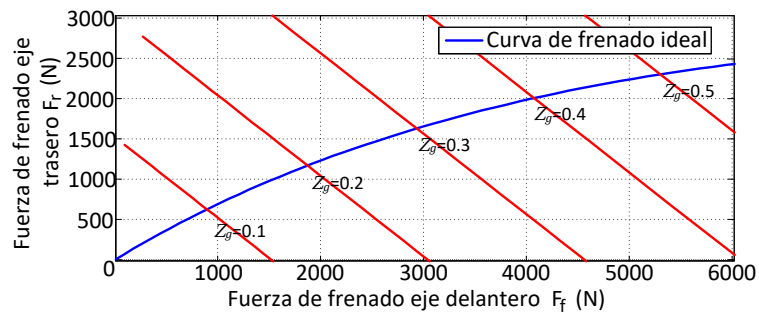


Figura 3.3: Distribución de fuerza de frenado.

$$F_r = F_b - F_f \tag{3.2}$$

donde F_b es la fuerza de frenado ($F_b = F_x$ durante el frenado), F_f es la fuerza de frenado en el eje delantero, F_r es la fuerza de frenado en el eje trasero, b es la distancia entre el eje

trasero y el centro de masa, H es la altura del centro de masa (G), a es la distancia entre el eje delantero y el centro de masa y Z_g es la relación existente entre la aceleración del VE ($accel$) y la gravedad (g) descrita por la ecuación (3.3). La Figura 3.4 muestra las dimensiones del vehículo que se utilizó en el desarrollo de este trabajo de tesis. Es importante señalar que para el desarrollo de estas fórmulas se consideró un camino sin inclinación.

$$Z_g = \frac{accel}{g} \quad (3.3)$$

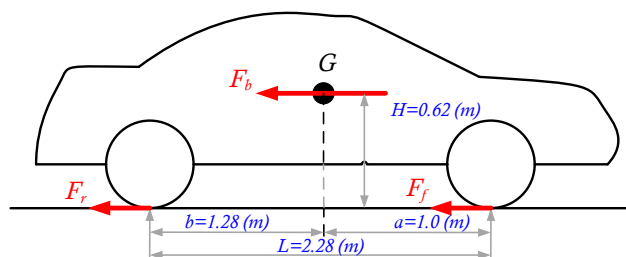


Figura 3.4: Dimensiones del vehículo.

Para el cálculo de F_b es necesario realizar un análisis de las fuerzas que se encuentran presentes en un vehículo en movimiento, algunas de ellas favorecen al movimiento del vehículo y otras se oponen a él. La Figura 3.5 muestra un diagrama de las principales fuerzas que afectan el movimiento del vehículo. Las fuerzas que intervienen en el movimiento en línea recta de un vehículo son:

- F_x : fuerza aplicada por el sistema de tracción (Motor).
- F_R : fuerza de resistencia a la rodadura.
- F_d : fuerza de arrastre aerodinámico.
- F_{px} : componente del peso en la dirección del movimiento.

La ecuación(3.4) muestra la segunda ley de Newton aplicada al movimiento del vehículo, ésta establece que la suma de fuerzas en una dirección es igual a la masa (m) por la aceleración del vehículo.

$$F_x - F_R - F_d - F_{px} = m \times accel \quad (3.4)$$

De la ecuación anterior se puede deducir que:

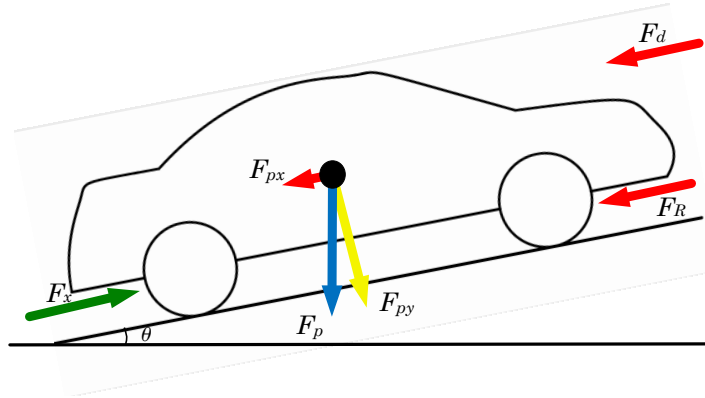


Figura 3.5: Fuerzas en el vehículo.

- Cuando las fuerzas que favorecen al movimiento son mayores que las que se oponen, la velocidad del vehículo aumenta (Aceleración, $acel > 0$)
- Cuando las fuerzas que se oponen al movimiento son mayores que las que lo favorecen, la velocidad del vehículo disminuirá (Frenado, $acel < 0$)
- Cuando las fuerzas que favorecen al vehículo son iguales que las que se oponen, la velocidad del vehículo no se modifica (Velocidad constante $acel = 0$)

La ecuación (3.4) se puede reescribir de la siguiente manera para que indique la cantidad de fuerza que debe aplicar el vehículo:

$$F_x = F_R + F_d + F_{px} + m \times accel \quad (3.5)$$

Los valores de las fuerzas F_R , F_d y F_{px} se calculan mediante las ecuaciones (3.6), (3.7) y (3.8), respectivamente [4].

$$F_R = C_x \times m \times g \times \cos(\theta) \quad (3.6)$$

$$F_d = \frac{1}{2} \times \rho \times A_f \times C_d (v + v_w)^2 \quad (3.7)$$

$$F_{px} = m \times g \times \sin(\theta) \quad (3.8)$$

donde θ es el ángulo de la pendiente del camino, C_x es el valor del coeficiente de resistencia a la rodadura, el cual depende del tipo de vehículo y el material del camino, ρ es la densidad del viento, A_f es el área frontal del vehículo, C_d es el coeficiente de arrastre aerodinámico

del vehículo, v es la velocidad del vehículo y v_w es la velocidad del viento en la dirección del movimiento del vehículo. Ya que θ es cero, las ecuaciones (3.6) y (3.8) se pueden reescritos de la siguiente manera:

$$F_R = C_x \times m \times g \quad (3.9)$$

$$F_{px} = 0 \quad (3.10)$$

El sistema de distribución de fuerza diseñado en este trabajo de tesis se encarga de determinar la fuerza de frenado para el eje delantero (F_f) y para el eje trasero (F_r), de acuerdo con la curva de frenado ideal. Además, determina la cantidad de fuerza de frenado que debe aplicar cada uno de los dos sistemas de frenado que tiene el vehículo eléctrico, frenado regenerativo (generador eléctrico) y frenado mecánico (sistema de freno convencional). La Figura 3.6 muestra el diagrama de flujo del SDF.

Como se puede ver en la figura 3.6, lo primero que se hace es leer los datos de velocidad del VE (v), $accel$ y voltaje del BU (V_{BU}), posteriormente se calcula el estado de carga del BU, justo después se entra a una toma de decisión para determinar si el vehículo está frenando. Si el vehículo no está frenando, los valores de F_b , F_f y F_r son cero, pero si el vehículo está frenando, es necesario calcular los valores de las fuerzas de frenado, de acuerdo a la curva de frenado ideal.

Este sistema también está encargado de determinar el par que deben ejercer cada uno de los motores eléctricos para producir las fuerzas F_f y F_r . El sistema prioriza el uso del frenado regenerativo, cuando la fuerza necesaria para frenar el vehículo es mayor que la que puede producir el frenado regenerativo, el sistema distribuye la fuerza de frenado, entre el frenado regenerativo y el mecánico. La fuerza de frenado mecánico que debe ejercerse en el eje delantero (F_{f_mec}) y la que debe ejercer el eje trasero (F_{r_mec}), es la diferencia entre la fuerza total a ejercerse en los ejes (F_f y F_r) y la fuerza que ejerce el frenado regenerativo en el eje delantero (F_{f_reg}) y la que ejerce en el eje trasero (F_{r_reg}).

Una vez que se han calculado los valores de las fuerzas de frenado, el siguiente paso es determinar si es posible aplicar frenado regenerativo, esto se hace mediante la comparación del SOC_{BU} y su valor máximo (SOC_{BUmax}), mediante la siguiente ecuación:

$$SOC_{BU}[nT] \geq SOC_{BUmax} \quad (3.11)$$

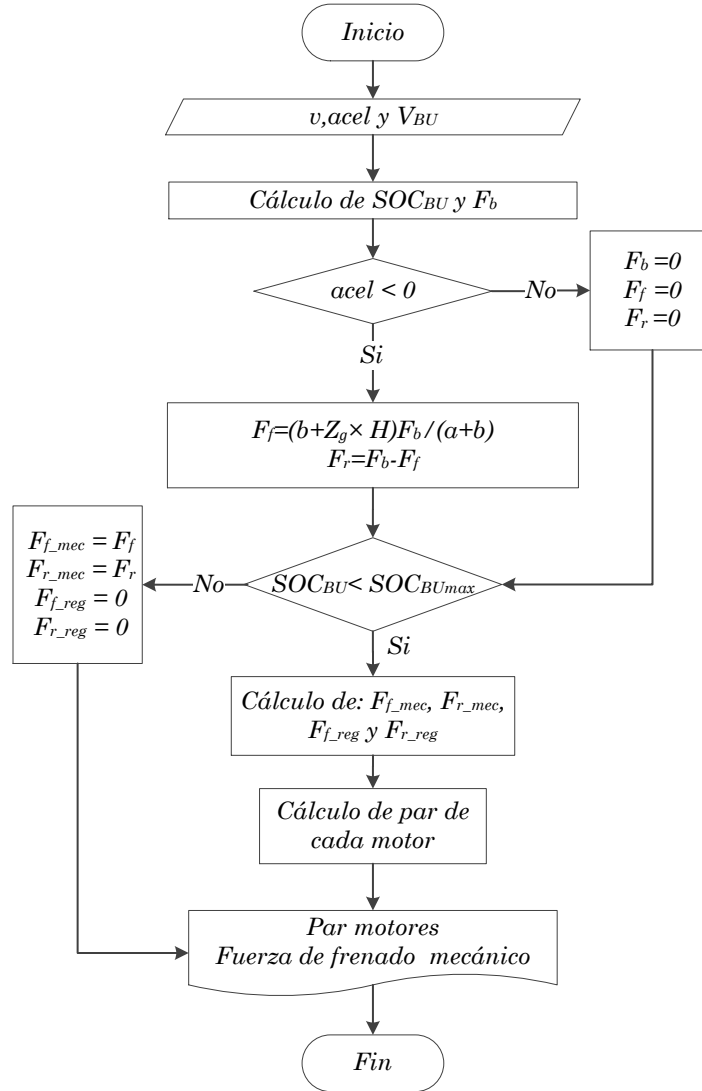


Figura 3.6: Diagrama de flujo del sistema de distribución de fuerza.

donde n es el número de muestra y T es el intervalo de muestreo.

El valor de SOC_{BU} se calcula mediante la siguiente ecuación [4]:

$$SOC_{BU}[nT] = \frac{\frac{1}{2}CV_{BU}[nT]^2 - \frac{1}{2}CV_{BUmin}^2}{\frac{1}{2}CV_{BUmax}^2 - \frac{1}{2}CV_{BUmin}^2} 100 \quad (3.12)$$

donde V_{BU} es el voltaje en el BU , V_{BUmin} es el voltaje mínimo del BU y V_{BUmax} es el valor máximo del BU . Después de factorizar, se obtiene la siguiente ecuación:

$$SOC_{BU}[nT] = \frac{V_{BU}[nT]^2 - V_{BUmin}^2}{V_{BUmax}^2 - V_{BUmin}^2} 100 \quad (3.13)$$

Y ya que el SOC_{BUmax} es el valor del estado de carga del BU cuando éste está en su nivel máximo de voltaje (V_{BUmax}), la ecuación (3.13) aplicada al SOC_{BUmax} queda de la siguiente manera:

$$SOC_{BUmax} = \frac{V_{BUmax}^2 - V_{BUmin}^2}{V_{BUmax}^2 - V_{BUmin}^2} 100 = 100 \quad (3.14)$$

Si la condición descrita en la ecuación (3.11) es afirmativa, entonces el vehículo no puede aplicar frenado regenerativo ya que el BU no tiene espacio para almacenar la energía recuperada, por consiguiente, todo el frenado debe ser aplicado con frenado mecánico y el FR no se utilizará y se utilizan las ecuaciones de la (3.15) a la (3.18) para realizar la distribución de fuerzas de frenado [39].

$$F_{f_mec}[nT] = F_f[nT] \quad (3.15)$$

$$F_{r_mec}[nT] = F_r[nT] \quad (3.16)$$

$$F_{f_reg}[nT] = 0 \quad (3.17)$$

$$F_{r_reg}[nT] = 0 \quad (3.18)$$

De lo contrario, si la condición descrita en la ecuación (3.11) es negativa, es posible utilizar el frenado regenerativo; por lo tanto, es necesario realizar el reparto de F_f y F_r entre los dos sistemas de frenado. Se propone que la distribución de estas fuerzas se realiza de la siguiente manera:

- 1) Se determina el par que deben ejercer cada uno de los motores eléctricos para producir las fuerzas F_f y F_r .
- 2) El sistema prioriza el uso del frenado regenerativo por lo que, si el par necesario es menor que el par máximo de los motores todo el frenado se realiza con frenado regenerativo y se utilizan las ecuaciones de la (3.19) a la (3.22) para realizar la distribución de fuerzas de frenado.
- 3) Cuando el par necesario es mayor que el par máximo de alguno de los motores, el sistema distribuye la fuerza de frenado entre el frenado regenerativo y el mecánico utilizando las ecuaciones de la (3.23) a la (3.26).

$$F_{f_mec}[nT] = 0 \quad (3.19)$$

$$F_{r_mec}[nT] = 0 \quad (3.20)$$

$$F_{f_reg}[nT] = F_f[nT] \quad (3.21)$$

$$F_{r_reg}[nT] = F_r[nT] \quad (3.22)$$

$$F_f[nT] = F_{f_reg_max}[nT] \quad (3.23)$$

$$F_r[nT] = F_{r_reg_max}[nT] \quad (3.24)$$

$$F_{f_mec}[nT] = F_f[nT] - F_{f_reg}[nT] \quad (3.25)$$

$$F_{r_mec}[nT] = F_r[nT] - F_{r_reg}[nT] \quad (3.26)$$

donde $F_{f_reg_max}[nT]$ y $F_{r_reg_max}[nT]$ son las fuerzas máximas que se pueden ejercer mediante frenado regenerativo en los ejes delantero y trasero, respectivamente.

Una vez que se tiene la distribución de fuerzas, los valores del par de cada uno de los motores y la fuerza que debe aplicar el freno mecánico son enviados a los sistemas encargados de aplicarlo.

3.2. Sistema de administración de energía (SAE)

Todos los sistemas de administración de energía (SAE) basan su funcionamiento en la ley de conservación de energía, esto significa que la potencia requerida por el vehículo durante la aceleración y la velocidad sostenida debe ser proporcionada por la combinación de las fuentes de energía. Por ejemplo, para una sistema de almacenamiento de energía, como el de este trabajo de tesis, basado en un banco de baterías y un banco de ultracapacitores, la ecuación de la ley de Conservación de Energía es:

$$P_{Carga} = P_{BB} + P_{BU} \quad (3.27)$$

donde P_{Carga} es la potencia demandada por el sistema de tracción al bus de CD, P_{BB} es la potencia entregada por el banco de baterías y P_{BU} es la potencia entregada por el BU al bus de CD.

Como se mencionó anteriormente, el BB se utiliza como fuente principal y el BU como una fuente auxiliar. Por tal motivo, de acuerdo a la ley de conservación de energía, la distribución de la potencia para el sistema de almacenamiento de energía del VE, queda de la siguiente manera:

$$P_{BB}(t) = P_{BBmax}(t) = V_{BB}(t) \times I_{BBmax}(t) \quad (3.28)$$

Si $P_{BBmax}(t) \geq P_{Carga}(t)$ entonces:

$$P_{BB}(t) = P_{Carga}(t) \quad (3.29)$$

$$P_{BU} = 0 \quad (3.30)$$

Mientras que, si $P_{BBmax}(t) < P_{Carga}(t)$ entonces:

$$P_{BB}(t) = P_{BBmax}(t) \quad (3.31)$$

$$P_{BU} = P_{Carga}(t) - P_{BB}(t) \quad (3.32)$$

donde $P_{BBmax}(t)$ es la potencia máxima que puede aportar la batería en el tiempo t , $V_{BB}(t)$ es el voltaje del banco de baterías y $I_{BBmax}(t)$ es la máxima corriente que pueden entregar las baterías en el tiempo t . Sin embargo, en la mayoría de las ocasiones esta estrategia impide que el *BU* libere suficiente energía durante la aceleración y/o la velocidad sostenidas, para obtener el espacio suficiente que permita almacenar toda la energía aprovechable del frenado regenerativo. Esto se debe a que el *BU* sólo proporciona la diferencia entre la potencia requerida por el vehículo y la que puede entregar el *BB*. Esto es un problema ya que la mayoría del tiempo el banco de baterías es capaz de aportar toda la potencia y, por consiguiente, el *BU* no aporta nada de potencia.

Para aprovechar la técnica del frenado regenerativo es necesario realizar una descarga controlada del *BU* que permita generar el espacio suficiente para almacenar toda o la mayor cantidad de la energía cinética aprovechable del vehículo. Por tal motivo, el primer paso para desarrollar el algoritmo de la estrategia de administración de energía es asumir que toda la energía cinética del vehículo puede ser absorbida por el *BU* durante el frenado regenerativo. Como se mencionó anteriormente, la ecuación (2.4) permite determinar la energía cinética del vehículo.

La ecuación que determina la velocidad del vehículo $v(t)$ en el movimiento rectilíneo uniformemente acelerado es:

$$v(t) = v_0(t) + accel(t) t_{accel} \quad (3.33)$$

donde $v_0(t)$ es la velocidad del VE antes de la aceleración, $accel(t)$ es la aceleración del VE en el tiempo t y t_{accel} es el periodo de tiempo durante el cual el vehículo acelera. La ecuación de la energía cinética en función de la aceleración y la velocidad del VE se puede obtener sustituyendo (3.33) en (2.4):

$$E_k(t) = \frac{1}{2}m(t)v_0^2(t) + m(t)accel(t)v_0(t)t_{accel} + \frac{1}{2}m(t)accel^2(t)t_{accel}^2 \quad (3.34)$$

Sin embargo, ya que un VE no siempre tiene una aceleración constante, es necesario modificar la ecuación (3.34) para incorporar la afectación de la velocidad, y por consiguiente, la energía cinética del vehículo cuando éste tiene una aceleración no constante. Por lo tanto, se modifica el término $accel$ por $accel_0$, el cual indica el valor de la aceleración del vehículo durante el periodo t_{accel} . La ecuación resultante queda de la siguiente forma:

$$E_k(t) = \frac{1}{2}m(t)v_0^2(t) + m(t)accel_0(t)v_0(t)t_{accel} + \frac{1}{2}m(t)accel_0^2(t)t_{accel}^2 \quad (3.35)$$

Ya que la integral de la potencia es la energía, se deriva la ecuación (3.35) con respecto al tiempo para obtener la ecuación (3.36). Esta ecuación determina la cantidad ideal de la potencia que debe proporcionar el *BU* durante la aceleración, para obtener suficiente espacio para almacenar toda la energía cinética del vehículo durante el frenado.

$$\frac{d(E_k(t))}{dt} = P_{ideal}(t) = m(t)accel_0(t)v_0(t) + m(t)accel_0^2(t)t_{accel} \quad (3.36)$$

donde $P_{ideal}(t)$ es la potencia ideal que el *BU* debe entregar durante la aceleración. Como el sistema de administración de energía es un sistema digital, es necesario reescribir la ecuación (3.36) para el tiempo discreto, la ecuación resultante es [62]:

$$P_{ideal}[nT] = m[nT]accel[(n-1)T]v[(n-1)T] + m[nT]accel^2[(n-1)T]T \quad (3.37)$$

La ecuación (3.37) determina la potencia que debe descargar el *BU* para poder almacenar toda la energía cinética que posee el vehículo al momento de iniciar el frenado. Sin embargo, en la realidad existen diversos factores que impiden que sea posible aprovechar el 100% de la energía cinética del vehículo. Por tal motivo, para poder generar una ecuación que determine con mayor precisión la potencia que debe descargar el *BU* para almacenar el 100% de la energía cinética aprovechable, es necesario estudiar las fuerzas que intervienen en el movimiento del vehículo.

De la Figura 3.5 y la ecuación (3.5) se puede deducir que para un vehículo que se mueve en un camino sin pendiente ($F_{px} = 0$), el valor de F_x es siempre positivo para toda $acel > \epsilon$ y siempre negativa para toda $acel < \epsilon$; donde ϵ se define como el valor de aceleración que satisface la siguiente ecuación:

$$F_R + F_d + m \times accel = 0 \quad (3.38)$$

De lo anterior se puede deducir que, cuando un vehículo está acelerando en un camino sin pendiente, la fuerza de inercia $F_i = m \times accel$, la fuerza de arrastre aerodinámico F_d y la resistencia de rodadura F_R se oponen al movimiento del vehículo, pero cuando el vehículo está frenando, sólo la fuerza de inercia contribuye al movimiento mientras que las otras dos fuerzas continúan oponiéndose al movimiento. Por esta razón, no es posible aprovechar toda la energía cinética. Por lo tanto, es necesario modificar la ecuación (3.37) para evitar una descarga excesiva del BU .

Para ajustar la descarga del BU es necesario conocer la cantidad de energía cinética que pierde el vehículo al ser frenado por las fuerzas que se oponen al movimiento durante el frenado (F_d y F_R). Dicha energía puede ser calculada al integrar la potencia que el vehículo debe aplicar para contrarrestar F_d y F_R . Por tanto, la función de potencia de ajuste (P_{adj}) que debe ser restada al valor obtenido mediante la ecuación (3.37), para considerar la pérdida de energía cinética durante el frenado, está dada por la siguiente ecuación:

$$P_{adj}[nT] = (F_R[nT] + F_d[nT])v[nT] \quad (3.39)$$

Por lo tanto, la potencia mínima que debe ser proporcionada por el BU (P_{BUmin}) para obtener el espacio necesario para almacenar toda la energía regenerada durante el frenado se obtiene con la resta de las ecuaciones (3.37) y (3.39):

$$P_{BUmin}[nT] = (P_{ideal}[nT] - P_{adj}[nT])\eta_{total} \quad (3.40)$$

donde η_{total} es la eficiencia total en el trayecto desde las ruedas hasta el BU . Es importante considerar esta eficiencia ya que los convertidores involucrados no tienen 100 % de eficiencia. El impacto de la ecuación (3.40) depende de la forma en que se utiliza, las reglas y toma de decisiones que el SAE realiza para regular el estado de carga del BU , de acuerdo a la energía cinética del vehículo, y la energía que el vehículo necesita para acelerar desde su velocidad actual a la velocidad máxima en Modo-eco. La Tabla 3.1 muestra los valores de eficiencias que fueron considerados para los distintos elementos de conversión y transmisión de energía.

Tabla 3.1: Eficiencias de los elementos de conversión y transmisión de energía.

Elemento	Eficiencia
Convertidor CD/CD (η_{conv})	90 % [56, 57]
Convertidor CD/CA (η_{inv})	95 % [63]
Motor (η_{mot})	95 % [46]
Diferencial (η_{dif})	95 % [4]
Transmisión (η_{tran})	95 % [4]
Total (η_{total})	73.30 %

El SAE propuesto en este trabajo de tesis considera tres escenarios dependiendo del valor de la aceleración: aceleración positiva, velocidad constante y frenado. La Figura 3.7 muestra el algoritmo del sistema de gestión de energía propuesto.

En la Figura 3.7 se puede apreciar que el primer paso es leer las señales de entrada del sistema de administración de energía, que son: el voltaje del banco de baterías (V_{BB}), el voltaje del banco de ultracapacitores (V_{BU}), la velocidad del vehículo (v), la aceleración ($accel$), la eficiencia del convertidor CD/CD (η_{conv}), la eficiencia total del tren de potencia desde las ruedas hasta el BU (η_{total}), la relación de transmisión total (N_{tf}), la corriente del BB (I_{BB}) y la corriente demandada por el sistema de tracción (I_{Carga}).

El segundo paso consiste en calcular una serie de variables que son utilizadas en la toma de decisiones. Dentro de los elementos que se calculan están: la potencia mínima de descarga del BU (P_{BUmin}), el estado de carga del BU (SOC_{BU}), el estado de carga máximo del BU (SOC_{BUmax}), el límite inferior para el estado de carga del BU ($SOC_{BU_{th}}$), la potencia demandada por el sistema de tracción al bus de CD (P_{Carga}) y la potencia máxima que pueden entregar el BB (P_{BBmax}), las cuales son calculadas mediante las ecuaciones (3.40) (3.13), (3.14), (3.41), (3.42) y (3.43), respectivamente.

$$SOC_{BU_{th}}[nT] = \frac{\frac{1}{2}C(V_{BUmax}^2 - V_{BUmin}^2) - E_k[nT]}{\frac{1}{2}C(V_{BUmax}^2 - V_{BUmin}^2)} \times 100 \quad (3.41)$$

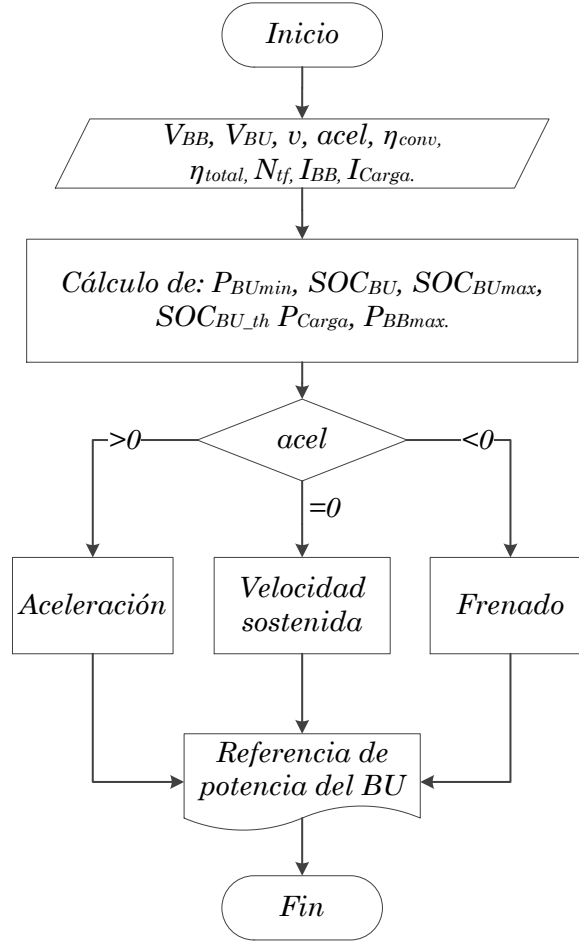


Figura 3.7: Diagrama de flujo del sistema de administración de energía propuesto.

$$P_{Carga}[nT] = V_{BB}[nT] \times I_{Carga}[nT] \quad (3.42)$$

$$P_{BBmax}[nT] = V_{BB}[nT] \times I_{BBmax}[nT] \quad (3.43)$$

donde I_{BBmax} es la corriente máxima que puede aportar el BB en el instante nT , y se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$I_{BBmax}[nT] = I_{BB}[(n-1)T] + \frac{75}{1.519}T \quad (3.44)$$

Posteriormente se realiza una toma de decisión basada en el valor de la aceleración del VE, que nos lleva a uno de los tres bloques que serán explicados más adelante y como paso final se obtiene como señal de salida la referencia de potencia para el BU (P_{BUreal}), la cual

entra en el sistema de despacho del convertidor para generar las referencias de corrientes de las 8 ramas del convertidor CD/CD bidireccional.

Utilizando el sistema de administración de energía propuesto, la energía en el *BU* puede cambiar de un valor máximo a un valor inferior que depende de la velocidad del vehículo durante la aceleración. De tal manera que la cantidad de energía que se extrae del *BU* durante el tiempo de aceleración es igual la que regresará a él durante el frenado, esto gracias al aprovechamiento de la energía cinética del vehículo durante el frenado regenerativo. Es importante señalar que esta estrategia fue diseñada para ciclos de manejo ideales, los cuales tienen la misma pendiente para la aceleración que para el frenado.

La Figura 3.8 muestra el diagrama de flujo del bloque de aceleración del SAE. En el diagrama de flujo se puede apreciar que la primera toma de decisión se realiza tomando en cuenta la comparativa entre P_{BBmax} y P_{Carga} ; si se cumple la condición de la ecuación (3.45), entonces la potencia de la carga se distribuye de acuerdo con las ecuaciones (3.46) y (3.47), de lo contrario, la potencia de carga se distribuye entre ambas fuentes de acuerdo a las ecuaciones (3.31) y (3.32).

$$P_{BBmax}[nT] \geq P_{Carga}[nT] \quad (3.45)$$

$$P_{BB}[nT] = P_{Carga}[nT] \quad (3.46)$$

$$P_{BU}[nT] = 0 \quad (3.47)$$

$$P_{BB}[nT] = P_{BBmax}[nT] \quad (3.48)$$

$$P_{BU}[nT] = P_{Carga}[nT] - P_{BBmax}[nT] \quad (3.49)$$

La segunda decisión toma en cuenta la potencia que debe entregar el *BU*, P_{BU} y P_{BUmin} calculadas mediante las ecuaciones (3.49) y (3.40), respectivamente. Si la condición descrita por la ecuación (3.50) se cumple, entonces P_{BUreal} se calcula utilizando la ecuación (3.51) y los valores de $P_{BB}[nT]$ y $P_{BU}[nT]$ no se modifican. De lo contrario, se procede a la tercera condición, la cual toma en cuenta el estado de carga del *BU* y la cota inferior para el SOC_{BU} (SOC_{BU_th}), la cual se calcula con la ecuación (3.41), esta cota depende de la velocidad del VE. Si la condición descrita en la ecuación (3.52) se cumple, entonces los valores de $P_{BUreal}[nT]$, $P_{BU}[nT]$ y $P_{BB}[nT]$ se calculan con las ecuaciones (3.53), (3.54) y (3.55), respectivamente. De lo contrario, $P_{BUreal}[nT]$ se calcula utilizando la ecuación (3.51) y los valores de $P_{BB}[nT]$ y $P_{BU}[nT]$ no se modifican.

$$P_{BU}[nT] \geq P_{BUreal}[nT]\eta_{conv} \quad (3.50)$$

$$P_{BUreal}[nT] = \frac{P_{BU}[nT]}{\eta_{conv}} \quad (3.51)$$

$$SOC_{BU}[nT] > SOC_{BU_th}[nT] \quad (3.52)$$

$$P_{BUreal}[nT] = P_{BUmin}[nT] \quad (3.53)$$

$$P_{BU}[nT] = P_{BUreal}[nT] \eta_{conv} \quad (3.54)$$

$$P_{BB}[nT] = P_{Carga}[nT] - P_{BU}[nT] \quad (3.55)$$

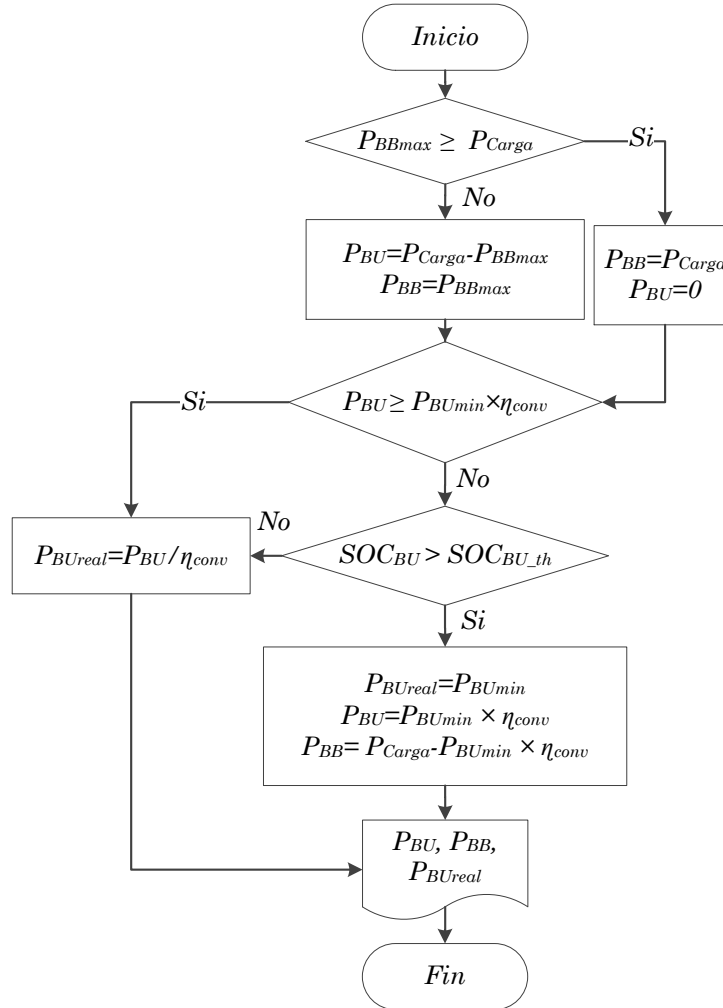


Figura 3.8: Diagrama de flujo del bloque de aceleración.

La Figura 3.9 muestra el diagrama de flujo del bloque de velocidad sostenida del SAE. La primera parte del bloque de velocidad sostenida es una toma de decisiones basada en P_{Carga} y P_{BBmax} . Si la condición descrita en la ecuación (3.45) no se cumple, entonces los valores de $P_{BB}[nT]$, $P_{BU}[nT]$ y $P_{BUreal}[nT]$ se calculan con las ecuaciones (3.48), (3.49) y (3.51), respectivamente. Pero si la condición si se cumple, entonces el BB puede proporcionar la

potencia para mover el vehículo y además cargar el BU . Por lo tanto, se procede a la segunda toma de decisión, ésta se basa en el SOC_{BU} y el SOC_{BU_th} . Si se cumple la condición descrita por la ecuación (3.56), entonces el SOC_{BU} está por debajo de la cota inferior, y por lo tanto, el BU se debe cargar con la potencia excedente del BB y los valores de $P_{BB}[nT]$, $P_{BU}[nT]$ y $P_{BUreal}[nT]$ se calculan con las ecuaciones (3.48), (3.49) y (3.57), respectivamente; de lo contrario los valores de $P_{BB}[nT]$, $P_{BU}[nT]$ y $P_{BUreal}[nT]$ se calculan con las ecuaciones (3.46), (3.47) y (3.57), respectivamente.

$$SOC_{BU}[nT] < SOC_{BU_th}[nT] \quad (3.56)$$

$$P_{BUreal}[nT] = P_{BU}[nT] \eta_{conv} \quad (3.57)$$

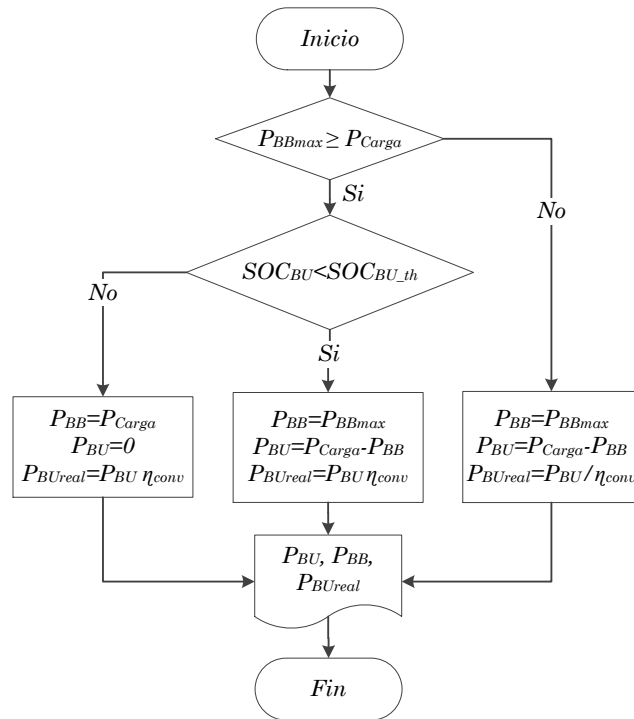


Figura 3.9: Diagrama de flujo del bloque de velocidad sostenida.

La Figura 3.10 muestra el diagrama de flujo del bloque de frenado del SAE. El primer paso es verificar si se cumple la condición descrita en la ecuación (3.58), si la primera condición se cumple entonces el vehículo demanda potencia y se pasa a la toma de decisión descrita en la ecuación (3.45), si esta condición también se cumple, entonces el BB es capaz de aportar toda la potencia demandada por el vehículo y los valores de $P_{BB}[nT]$, $P_{BU}[nT]$ y $P_{BUreal}[nT]$ se calculan con las ecuaciones (3.46), (3.47) y (3.51), respectivamente. Pero si la condición descrita en la ecuación (3.45) es negativa, entonces los valores de $P_{BB}[nT]$, $P_{BU}[nT]$

y $P_{BUreal}[nT]$ se calculan con las ecuaciones (3.48), (3.49) y (3.51), respectivamente. Por otro lado, si la condición descrita en la ecuación (3.58) no se cumple, entonces el vehículo ya no demanda potencia y es posible aplicar el FR. Por lo tanto, el siguiente paso es calcular la P_{BB} utilizando la ecuación (3.59), esto es importante debido a que con ello se evitan los altos transitorios de corriente que pueden dañar el BB . Posteriormente, se pasa a la toma de decisión descrita por la ecuación (3.60) la cual considera los valores de $SOC_{BU}[nT]$ y del estado de carga máximo para el BU (SOC_{BUmax}). Si la decisión es positiva, entonces el BU puede absorber la energía generada con el FR y los valores de $P_{BU}[nT]$ y $P_{BUreal}[nT]$ se calculan con las ecuaciones (3.61) y (3.57), respectivamente; pero si el resultado de la toma de decisión es negativo, entonces el BU se encuentra lleno, por lo cual ya no es posible almacenar la energía del FR y los valores de $P_{BU}[nT]$ y $P_{BUreal}[nT]$ se calculan con las ecuaciones (3.47) y (3.57), respectivamente. Además, será necesario utilizar el frenado mecánico para detener el vehículo.

$$P_{Carga}[nT] > 0 \quad (3.58)$$

$$P_{BB}[nT] > 0 \quad (3.59)$$

$$SOC_{BU}[nT] < SOC_{BUmax}[nT] \quad (3.60)$$

$$P_{BU}[nT] = P_{Carga}[nT] \quad (3.61)$$

Como se mencionó anteriormente, esta estrategia y la ecuación (3.40) fueron diseñadas considerando un ciclo de manejo ideal, la Figura 3.11 muestra un ejemplo de un ciclo de manejo ideal, donde la energía usada para compensar F_d y F_R durante la aceleración (E_A) es igual a la energía usada para compensar F_d y F_R durante el frenado (E_F). Sin embargo, esto no ocurre en los ciclos de conducción reales como el City II y NEDC. Esto ocasiona que la distribución de potencia generada al utilizar la ecuación (3.40) para un ciclo de manejo real no sea perfecta, ya que los valores de E_A y E_F son diferentes para la mayoría de los periodos aceleración-frenado (AF_p), lo que produce un mal manejo de la energía, y por consiguiente, un desperdicio de la misma.

Por esta razón, es esencial modificar la ecuación (3.40) agregando un término que afecte a P_{adj} , ya que éste es el encargado de considerar el valor de la energía gastada para compensar las fuerzas F_d y F_R . Por tal motivo, se propone modificar la ecuación (3.40) agregando el

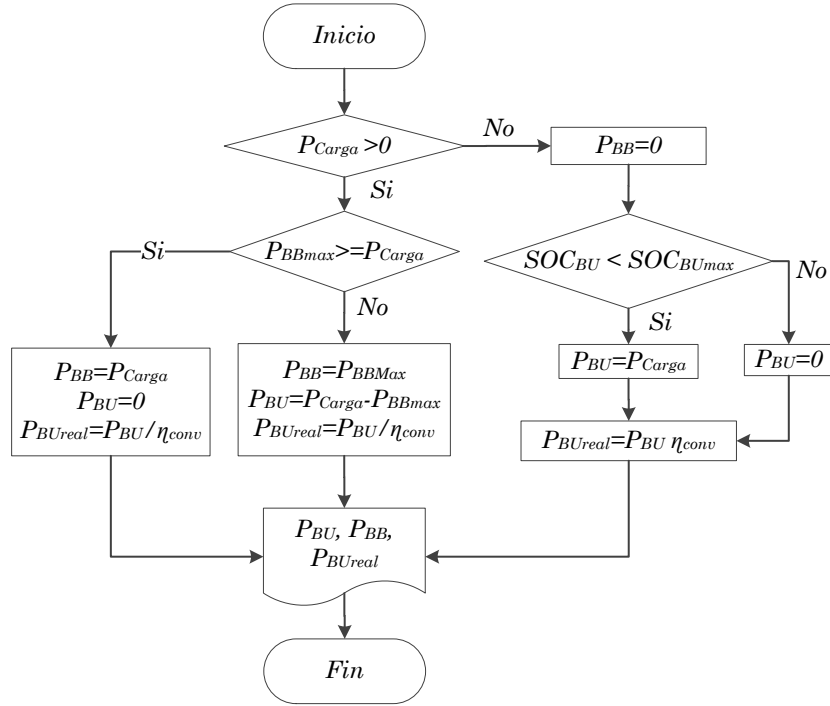


Figura 3.10: Diagrama de flujo del bloque de frenado.

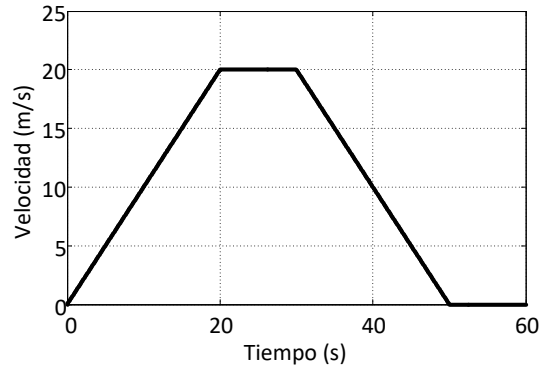


Figura 3.11: Ciclo de manejo ideal.

término $K[N_p]$, el cual multiplica el valor a P_{adj} con la finalidad de aumentar o disminuir el impacto de éste y conseguir que el valor considerado durante la aceleración ($K[N_p] \times E_A[N_p]$) sea igual que el obtenido durante el frenado ($E_F[N_p]$). La ecuación resultante queda de la siguiente manera:

$$P_{BUmin}[nT] = (P_{ideal}[nT] - K[N_p] \times P_{adj}[nT])\eta_{total} \quad (3.62)$$

donde $K[N_p]$ es un parámetro que se calcula para cada período de aceleración-frenado (AB_p) que comienza y termina en $v = 0$, N_p es el número de período y $K[N_p]$ se calcula mediante

(3.63):

$$K[N_p] = \frac{E_F[N_p]}{E_A[N_p]} \quad (3.63)$$

donde:

$$E_F[N_p] = \sum_{n=n_s[N_p]}^{n_f[N_p]} P_{adj}[nT] \times \frac{\eta_{total}}{\eta_{conv}} \times T, \quad \forall accel[nT] < 0 \quad (3.64)$$

$$E_A[N_p] = \sum_{n=n_s[N_p]}^{n_f[N_p]} P_{adj}[nT] \times \frac{\eta_{total}}{\eta_{conv}} \times T, \quad \forall accel[nT] > 0 \quad (3.65)$$

donde $n_s[N_p]$ es el número de muestra donde el AF_p comienza y $n_f[N_p]$ es el número de muestra donde el AF_p termina y donde comienza el siguiente período de aceleración-frenado.

Con el fin de demostrar los beneficios que presenta el utilizar la ecuación (3.62) en lugar de la ecuación (3.40), se llevó a cabo una simulación considerando un ciclo de manejo con el perfil de velocidad de la Figura 3.12a. Este ciclo de manejo tiene tres casos diferentes que pueden ocurrir en un ciclo de manejo real, para la relación entre las pendientes de aceleración y frenado: Caso 1 $A_{tiempo} > B_{tiempo}$ (de 0 a 39 s), Caso 2 $A_{tiempo} = B_{tiempo}$ (de 40 a 79 s) y el Caso 3 $A_{tiempo} < B_{tiempo}$ (de 80 a 120 s); donde A_{tiempo} es el tiempo de aceleración y B_{tiempo} es el tiempo de frenado.

La Figura 3.12b muestra la potencia demandada por la carga y la distribución de la misma entre las dos fuentes del sistema de almacenamiento de energía de acuerdo con el SAE propuesto usando la ecuación (3.40) para los tres casos de la Figura 3.12a. Se puede apreciar que cuando $A_{tiempo} > B_{tiempo}$, el BU se carga por completo antes de que finalice el frenado, como consecuencia, al no tener un lugar para almacenar la energía cinética disponible, no se puede utilizar el frenado regenerativo y es necesario utilizar el freno mecánico. Un ciclo ideal se obtiene cuando $A_{tiempo} = B_{tiempo}$, como se mencionó anteriormente, la distribución de potencia generada al utilizar la ecuación (3.40) para un ciclo ideal es perfecta. Cuando $A_{tiempo} < B_{tiempo}$ el BU descarga más energía de la que se puede recuperar durante el frenado regenerativo, por tal motivo al finalizar el tiempo de frenado el BU tiene un estado de carga inferior al 100% y debe ser cargado con energía del banco de baterías, esto causa pérdidas de energía debido al paso de la energía por el convertidor CD/CD.

Si el valor de $K[N_p]$ se calcula previamente para cada AF_p del perfil de velocidad mostrado en la Figura 3.12a, entonces es posible obtener una distribución de potencia ideal para

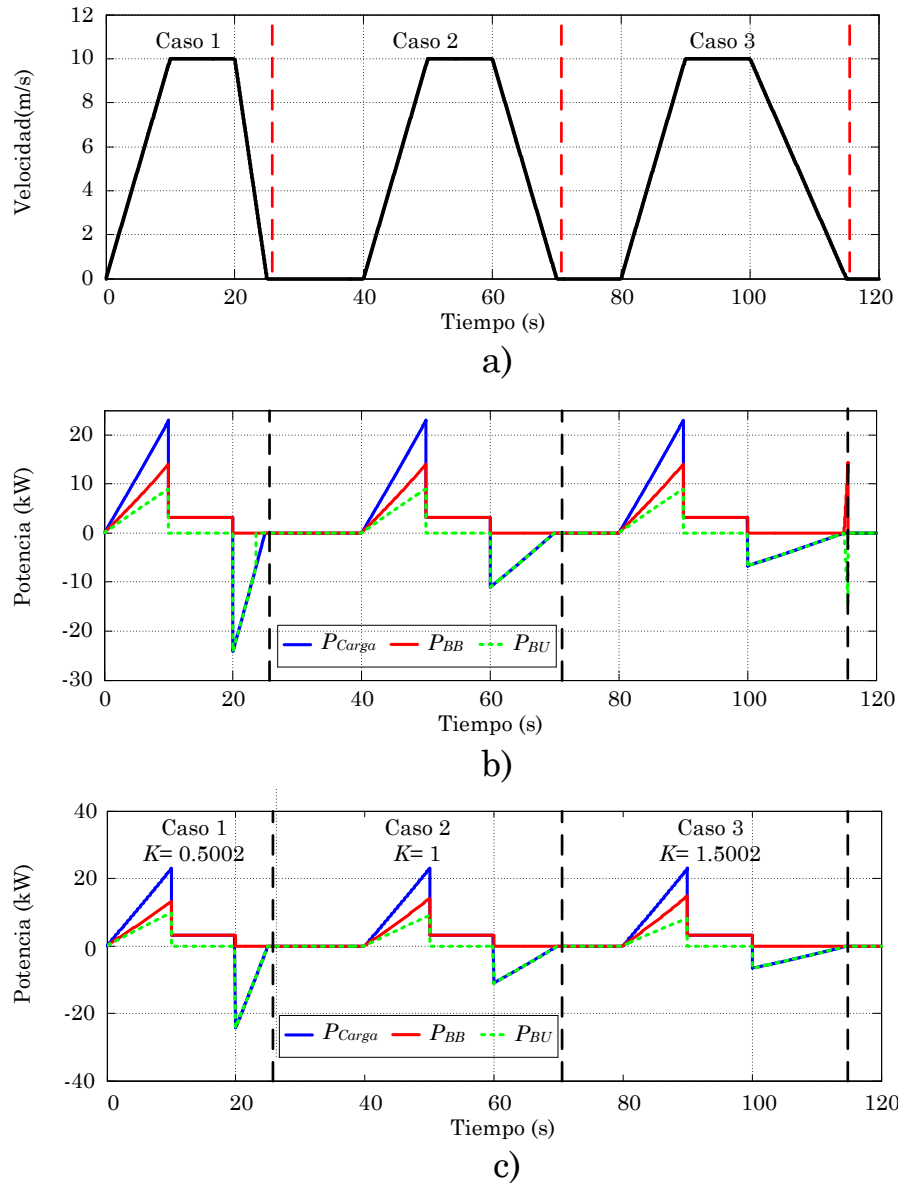


Figura 3.12: Comparativa de distribución de potencia. a) Perfil de velocidad, b) Distribución de potencia usando la ecuación (3.40), c) Distribución de potencia usando la ecuación (3.62).

cada AF_p . La Figura 3.12c muestra la distribución de potencia considerando el SAE con la ecuación (3.62) y la $K[N_p]$ ideal, la cual fue calculada previamente fuera de línea. Como se puede observar, la distribución de potencia resultante es perfecta para cada uno de los AF_p . Sin embargo, en una situación real es imposible saber con anticipación el comportamiento del perfil de velocidad del VE. Por esta razón, en la siguiente sub-sección se presenta una estrategia que permite proponer el valor de $K[N_p]$ a partir del historial de conducción del conductor.

3.2.1. Sistema de adaptación (SA)

Utilizando el procedimiento descrito en la sección anterior, es posible producir una solución exacta para cada periodo aceleración-frenado de un ciclo de manejo, siempre y cuando se conozca el comportamiento de la velocidad de antemano; pero esto no es posible en un caso real. Así, en esta sección se presenta un algoritmo llamado “sistema de adaptación” que permite calcular en línea el valor de $K[N_p]$ para ciclos de manejo desconocidos, adaptando la distribución de potencia al estilo de conducción del conductor. La Figura 3.13 muestra el diagrama de flujo del sistema de adaptación.

Como puede observarse en el diagrama de flujo de la Figura 3.13, el algoritmo comienza estableciendo las condiciones iniciales. El siguiente paso es leer los valores de velocidad, aceleración, fuerza de arrastre, fuerza de resistencia a la rodadura y velocidad angular. Posteriormente, el valor de velocidad del vehículo se utiliza para decidir si AF_p ha terminado; cuando esta condición es negativa, el algoritmo se pasa a la última toma de decisiones del diagrama de flujo, de lo contrario, N_p se incrementa. Cuando termina el período, se guarda el número de muestra y se calculan los valores de E_A y E_F del período anterior. Después, se pasa a la toma de decisión descrita por la ecuación (3.66) la cual considera los valores de N_p y del número de periodos aceleración-frenado por ventana (N_{p_w}). Si la condición no se cumple, entonces el SA no tiene la suficiente información para realizar el cálculo de un nuevo valor de $K[N_p]$, por lo tanto, el valor de $K[N_p]$ se calcula mediante la ecuación (3.67); pero si el resultado de la toma de decisión es positiva, un nuevo valor de $K[N_p]$ se calcula utilizando un método iterativo, mostrado en la sección verde del diagrama de flujo, que se explicará más adelante. Los siguientes pasos, son deslizar la ventana preparando al sistema para el siguiente AB_p y enviar el resultado del valor $K[N_p]$ calculado. Finalmente, se toma una decisión considerando el estado del VE, si el vehículo se encuentra encendido, el algoritmo regresa al paso dos del diagrama de flujo. Pero, si el vehículo se encuentra apagado, entonces el algoritmo termina.

$$N_p > N_{p_w} \quad (3.66)$$

$$K[N_p] = K[N_p - 1] \quad (3.67)$$

El valor que se seleccione para N_{p_w} tiene una gran relevancia en el sistema de adaptación, ya que de éste depende la cantidad de información que se utilizará para identificar el estilo de conducción, y por consiguiente, afecta el consumo de energía del vehículo. Si N_{p_w} es pequeño, el valor de $K[N_p]$ que se obtenga podría ser inadecuada debido a que la información

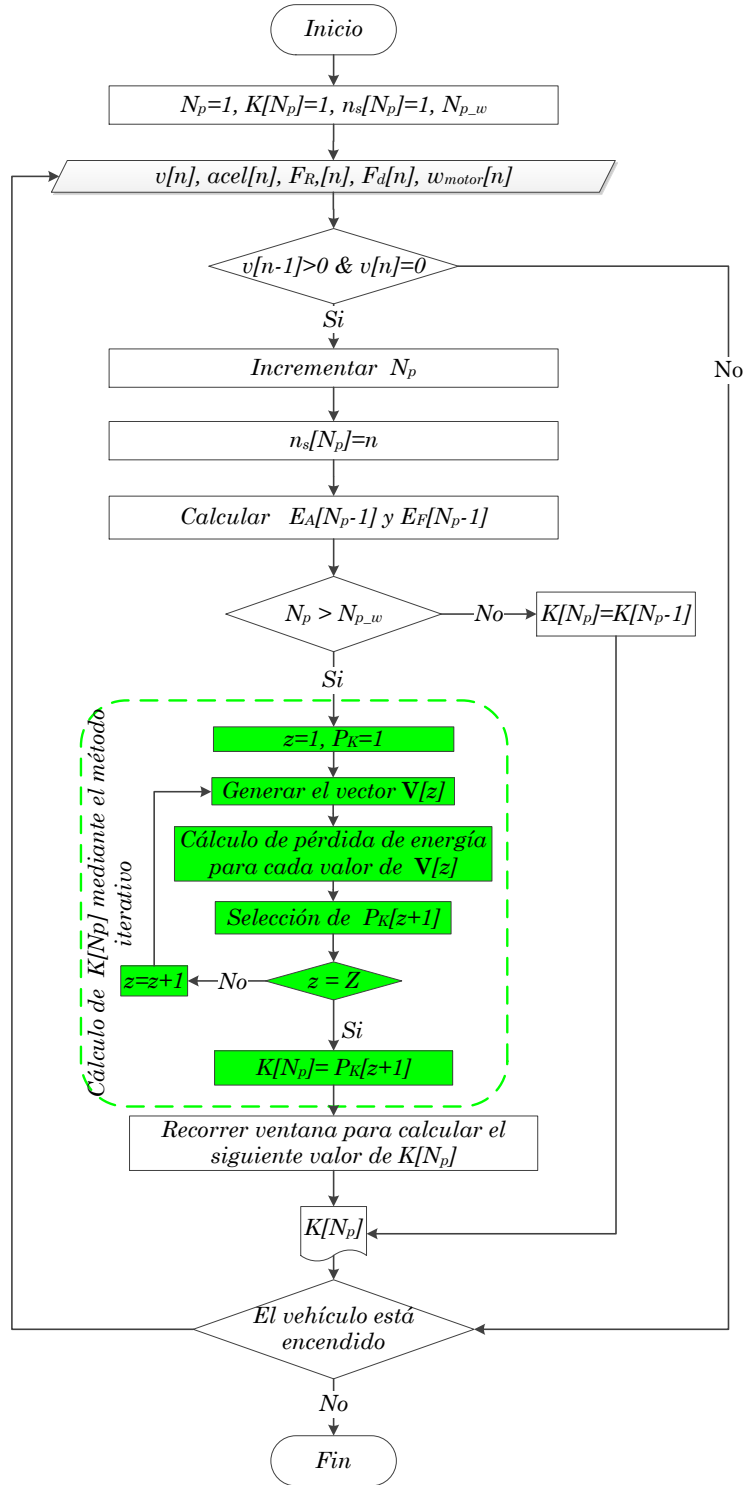


Figura 3.13: Diagrama de flujo del sistema de adaptación.

obtenida puede llegar a ser insuficiente para identificar el estilo de conducción del conductor. Por otro lado, si N_{p_w} es grande, el cálculo de $K[N_p]$ tomará mucho tiempo y aumentaría

la posibilidad de que el conductor haya llegado a su destino antes de que un nuevo valor de $K[N_p]$ sea calculado. Con el fin de determinar un adecuado valor de N_{p_w} se realizaron pruebas de simulación considerando valores desde 1 hasta 7 para el NEDC y el ciclo de manejo City II. Se identificó que con 3 ó 4 periodos aceleración-frenado por ventana se obtienen los mejores resultados en cuanto a consumo de energía. La Figura 3.14 muestra el movimiento de una ventana deslizante con $N_{p_w} = 3$ para el ciclo de conducción City II, se puede apreciar que la primer ventana toma la información de los primeros tres periodos aceleración-frenado y que ésta se va deslizando un periodo a la derecha, de tal manera que para el cálculo de $K[N_p]$ siempre se utilicen los últimos tres periodos aceleración-frenado que el vehículo haya recorrido.

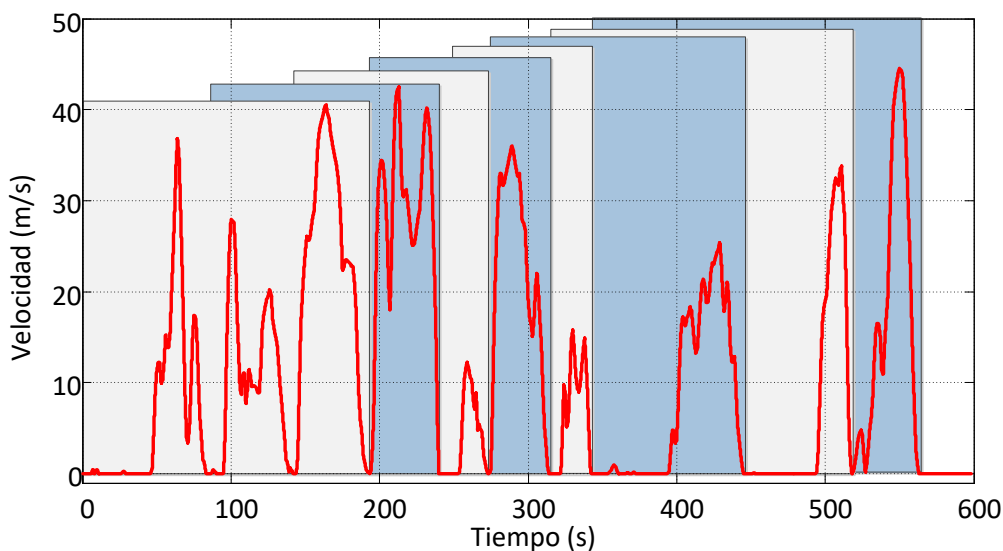


Figura 3.14: Deslizamiento de ventana para el ciclo de manejo City II, con $N_{p_w} = 3$.

La Tabla 3.2 muestra los valores de K para los 10 períodos aceleración-frenado del ciclo de conducción City II, el valor de $K[N_p]$ utilizado durante los tres primeros períodos es 1, esto se debe a que $N_{p_w} = 3$, por lo que el primer $K[N_p]$ calculado con el método iterativo es cuando $N_p = 4$. Se eligió el valor de N_{p_w} de tres debido a que éste produce un consumo bajo de energía y requiere un menor gasto computacional que al utilizar cuatro periodos por ventana.

3.2.1.1. Método iterativo para la adaptación del sistema al estilo de conducción

El primer paso del método iterativo para el cálculo de $K[N_p]$, mostrado en los bloques verdes de la Figura 3.13, es definir el valor de inicio para el contador de número de iteraciones

Tabla 3.2: Valores de $K[N_p]$ usados en cada periodo del ciclo de manejo City II.

Número de periodo	K
1	1
2	1
3	1
4	0.895544267248
5	0.794571029416
6	0.794571029416
7	0.794571029416
8	0.991955738325
9	0.783082961457
10	0.574770286805

(z), el cual se inicializa en 1, y definir el valor de inicio de búsqueda para la primera iteración del método ($P_K[z] = 1$), valor propuesto para comenzar la búsqueda de $K[N_p]$.

Después, se genera un vector de búsqueda ($\mathbf{V}[z]$), este vector contiene los 21 valores candidatos de $K[N_p]$ considerados en la iteración actual y están dados por:

$$\mathbf{V}[z] \triangleq [P_K[z] - \alpha(z) : \alpha(z) \times 10^{-1} : P_K[z] + \alpha(z)] \quad (3.68)$$

donde $\alpha(z) = 10^{1-z}$ y z es el número de iteración. Por lo tanto, el primer vector de búsqueda que se genera es:

$$\mathbf{V}[1] = [0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7, 1.8, 1.9, 2]$$

Una vez que se tiene el vector de búsqueda, el siguiente paso es calcular las pérdidas de energía que genera cada elemento $V_i \in \mathbf{V}[z]$, donde V_i es el i -ésimo elemento del vector. El cálculo de estas pérdidas se realiza mediante el siguiente procedimiento:

- 1: Calcular el valor de $D_i[N_p]$, el cual es la diferencia entre el valor de $E_A[N_p]$ asociado al valor de V_i ($K[N_p] = V_i$) y el valor de $E_F[N_p]$, para el primer periodo de la ventana. Este valor se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$D_i[N_p] = (V_i \times E_A[N_p]) - E_F[N_p] \quad (3.69)$$

2: Determinar si el valor de V_i produce una descarga excesiva o insuficiente del BU y calcular las pérdidas asociadas a la utilización de V_i (E_i), para esto se utilizan las siguientes reglas:

- Si $D_i[N_p] < 0$, significa que al utilizar el valor V_i como $K[N_p]$ en la ecuación (3.62) la energía entregada por el BU es menor que la energía que se recupera durante el FR y, por consiguiente, se alcanza el nivel máximo de SOC_{UC} antes de que se termine el frenado. Por lo tanto, la pérdida de energía para el periodo ($E_i[N_p]$) se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$E_i[N_p] = | D_i[N_p] \times \eta_{total} | \quad (3.70)$$

- Si $D_i[N_p] = 0$, significa que la energía entregada por el BU es igual a la energía que se puede recuperar con la FR y $E_i[N_p] = 0$.
- Si $D_i[N_p] > 0$, significa que la energía entregada por el BU es mayor que la energía que se puede recuperar con la FR y, por consiguiente, el BU debe ser llenado con energía del BB . Por lo tanto, $E_i[N_p]$ se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$E_i[N_p] = | D_i[N_p] \times (1 - \eta_{conv}) | \quad (3.71)$$

3: Repetir los pasos 1 y 2 para los demás AF_p de la ventana.

4: Sumar los tres valores E_i que fueron calculados para el mismo valor V_i , uno por cada AF_p de la ventana, para obtener la pérdida de energía total por ventana. Este paso se repite para cada elemento de $\mathbf{V}[z]$.

El siguiente paso consiste en identificar el valor V_i que produce la menor pérdida de energía total por ventana, este valor será utilizado como punto central para la búsqueda de la siguiente iteración ($P_K[z + 1]$).

Este procedimiento se repite hasta $z = Z$, donde Z es el número de iteraciones del método, y determina el número de decimales que tendrá el valor de $K[N_p]$ que se obtenga. Cuando $z=Z$, el último $P_K[z + 1]$ es utilizado como $K[N_p]$ ($K[N_p] = P_K[Z + 1]$).

La Figura 3.15 muestra las primeras 4 iteraciones del método iterativo del cálculo de $K[N_p]$ para el cuarto periodo de aceleración-frenado del ciclo de conducción City II. Se puede apreciar que $P_K = 1$ cuando $z = 1$ y que el valor de $V_i \in \mathbf{V}[z = 1]$ que producen la menor pérdida de energía es $V_i = 0.9$. Por esta razón, el valor de P_K para la siguiente iteración es

$P_K[z = 2] = 0.8$. Además, es posible notar que cuando el número de iteraciones aumenta, la exactitud del valor de P_K se incrementa.

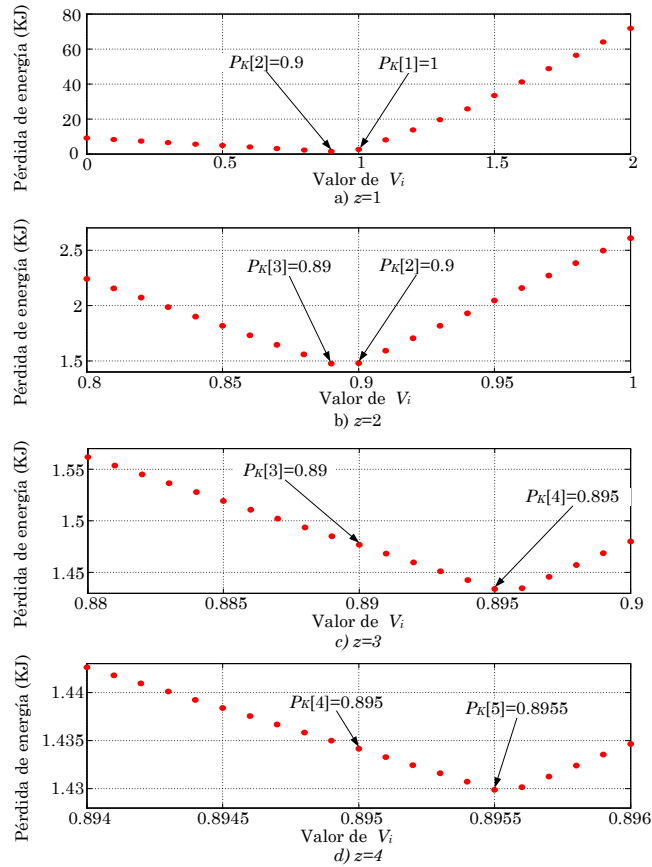


Figura 3.15: Pérdida de energía durante las cuatro primeras iteraciones del cálculo de $K[N_p = 4]$ para el ciclo de manejo City II.

3.3. Sistema de despacho de convertidor (SDC)

En el capítulo anterior se presentó el convertidor CD/CD bidireccional de 8 ramas que será utilizado en el vehículo eléctrico. Esta topología permite utilizar desde 1 hasta las 8 ramas, dependiendo de la potencia que se necesite transmitir desde el BU al bus de CD o viceversa. Esto permite que el convertidor opere en un punto cercano a su potencia nominal y por ende a su máxima eficiencia, aún cuando la potencia de referencia del convertidor CD/CD (P_{ref}) sea baja. La potencia P_{ref} se calcula con la ecuación (3.72) cuando el convertidor opera en modo reductor y con la ecuación (3.73) cuando el convertidor opera en modo elevador de la siguiente manera:

$$P_{ref}[nT] = P_{BUreal}[nT] \quad (3.72)$$

$$P_{ref}[nT] = P_{BU}[nT] \quad (3.73)$$

Sin embargo, ya que rara vez se utilizan las 8 ramas es necesario utilizar un sistema de despacho para el convertidor para determinar la referencia de potencia de cada una de las ramas. El SDC reparte el trabajo que realiza el convertidor entre sus ocho ramas, para producir un desgaste equitativo entre ellas.

El primer paso para el diseño del SDC es definir el número de ramas que se utilizarán dependiendo de la potencia de referencia para el convertidor. Debido a que el convertidor está diseñado para trabajar con la metodología de intercalado y que el desfase entre las ramas es de 90 grados, se plantea que el número de ramas en operación se realice de acuerdo a la Tabla 3.3. La potencia de referencia para cada una de las ramas en operación es igual a P_{ref} dividido entre el número de ramas. Esto evita que las ramas del convertidor operen a muy baja potencia, lo que causaría que el convertidor trabaje en modo de conducción discontinua por un mayor tiempo del que ya lo hace. Además, se puede apreciar, en la Tabla 3.3, cómo la incorporación de las ramas se realiza cuando la potencia por rama es menor o igual a 8.5 kW.

Tabla 3.3: Estrategia de incorporación de ramas del convertidor.

$P_{ref}[nT]$ (kW)	Número de ramas en operación	Potencia de referencia por rama
$0 < P_{ref} \leq 8.5$	1	P_{ref}
$8.5 < P_{ref} \leq 17$	2	$\frac{P_{ref}}{2}$
$17 < P_{ref} \leq 34$	4	$\frac{P_{ref}}{4}$
$34 < P_{ref} \leq 70$	8	$\frac{P_{ref}}{8}$

El segundo paso para el diseño del SDC es determinar las secuencias de incorporación de las ramas del convertidor. La secuencia de incorporación rota tomando en cuenta las ramas que ya han operado y cuáles aún no lo hacen. Esta rotación de secuencias es la que garantiza un desgaste equitativo de las 8 ramas. La Tabla 3.4 muestra 8 diferentes secuencias en las cuales las ramas del convertidor deben incorporarse al funcionamiento, la determinación de cuál orden debe ser usado en el siguiente periodo aceleración-frenado depende del valor del contador ($Cont$). Los 8 secuencias de incorporación fueron diseñados considerando la técnica de intercalado y los desfases existentes entre las portadoras de los controladores de las ramas.

La Figura 3.16 muestra el diagrama de flujo mediante el cual se realizan los incrementos

Tabla 3.4: Orden de incorporación de ramas del sistema de despacho de convertidor.

Valor de $Cont$	1	2	3	4	5	6	7	8
$P_{ref}[nT]$ (kW)	Secuencia de incorporación de ramas							
$0 < P_{ref}[nT] \leq 8.5$	1	2	3	4	5	6	7	8
$8.5 < P_{ref}[nT] \leq 17$	1 y 2	1 y 2	3 y 4	3 y 4	5 y 6	5 y 6	7 y 8	7 y 8
$17 < P_{ref}[nT] \leq 34$	1 - 4	1 - 4	3 - 6	3 - 6	5 - 8	5 - 8	1, 2, 7 y 8	1, 2, 7 y 8
$34 < P_{ref}[nT] \leq 70$	Todas	Todas	Todas	Todas	Todas	Todas	Todas	Todas

en el contador. El primer paso para el cálculo de este contador es leer el valor previo de $Cont[nT]$, en caso de que sea la primera vez que el vehículo es puesto en funcionamiento $Cont[nT]$ es igual a 1, posteriormente se lee el dato de la velocidad, después se entra a una toma de decisión, si la condición no se cumple, el periodo aceleración-frenado no ha terminado y se regresa al paso anterior para leer el siguiente dato de velocidad; pero si la condición se cumple se procede al siguiente paso, el cual consiste en identificar el valor de $P_{BUmax}[nT]$, que es la máxima potencia entregada por el ultracapacitor durante la aceleración del pasado periodo. Una vez identificado el valor de $P_{BUmax}[nT]$, se utiliza para tomar 3 decisiones y determinar el incremento adecuado para el valor de $Cont[nT]$. Después, se verifica que el valor del contador no sea mayor que 8 (número máximo de órdenes de incorporación), si el valor es menor que 8 se continúa al siguiente paso, de lo contrario se ajusta el valor de $Cont[nT]$ y se pasa al siguiente paso. Por último, se verifica que el vehículo siga encendido, de ser así se utiliza el valor del contador ($Cont$) en el siguiente periodo aceleración-frenado y se regresa al paso donde se lee la velocidad del vehículo, en caso de que el vehículo no se encuentre encendido se guarda el valor de contador para ser utilizado en la siguiente ocasión en que el vehículo se encienda.

Para probar la utilidad y el buen desempeño del sistema de despacho de convertidor se realizaron simulaciones con ciclos de manejo reales. La Figura 3.17 muestra la energía que manejó cada una de las ramas del convertidor en modo elevador, cuando el vehículo es sometido al nuevo ciclo de manejo europeo. En esta misma figura se puede ver que al finalizar la primera simulación del NEDC, la cantidad de energía manejada por la rama 7 del convertidor en modo elevador es menor que la manejada por la rama 4; sin embargo, esa diferencia va disminuyendo conforme el vehículo se sigue utilizando. Además, se puede apreciar que la cantidad de energía transferida del ultracapacitor al bus de CD por cada una de las ramas, es igual después de que el vehículo recrea 8 veces el ciclo de manejo, esto se debe a que el convertidor es de 8 ramas. También se realizaron simulaciones con el ciclo City

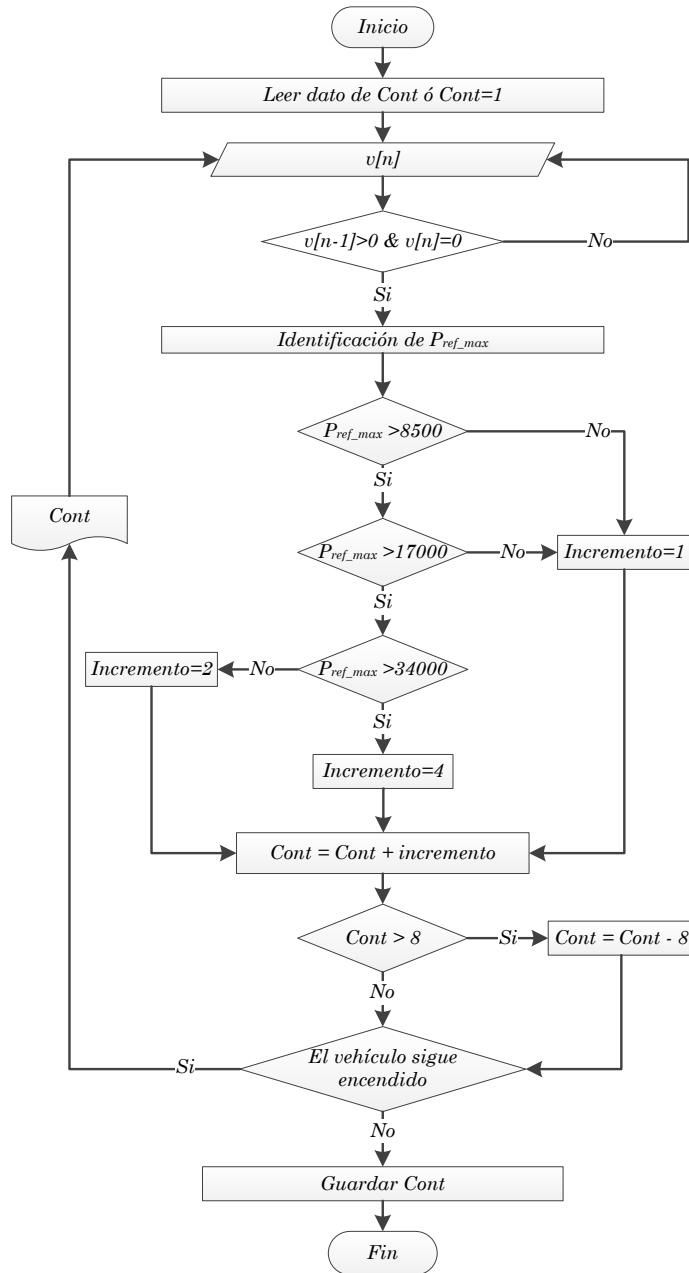


Figura 3.16: Diagrama de flujo para el cálculo de $Cont$.

II obteniendo resultados similares, un desbalance de la utilización de las ramas después de pocas repeticiones del ciclo de manejo y un balance equitativo en las 8 ramas después de 8 repeticiones del ciclo de manejo City II.

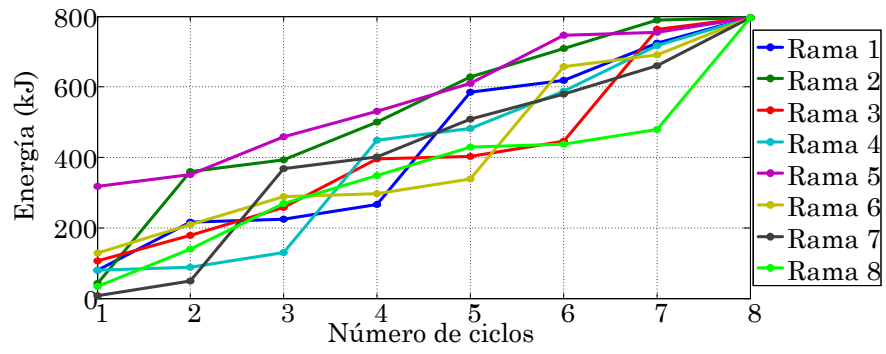


Figura 3.17: Energía transmitida por cada rama del convertidor en modo elevador para el NEDC.

Validación del desempeño del control supervisorio vía simulación

Con la finalidad de validar el correcto desempeño del control supervisorio previamente descrito se realizaron una serie de simulaciones utilizando el ciclo de manejo City II, este ciclo fue seleccionado por presentar una alta dinámica en su perfil de velocidad, permitiendo maximizar el impacto de la estrategia del frenado regenerativo. La Figura 4.1 muestra el perfil de velocidad del ciclo de manejo City II.

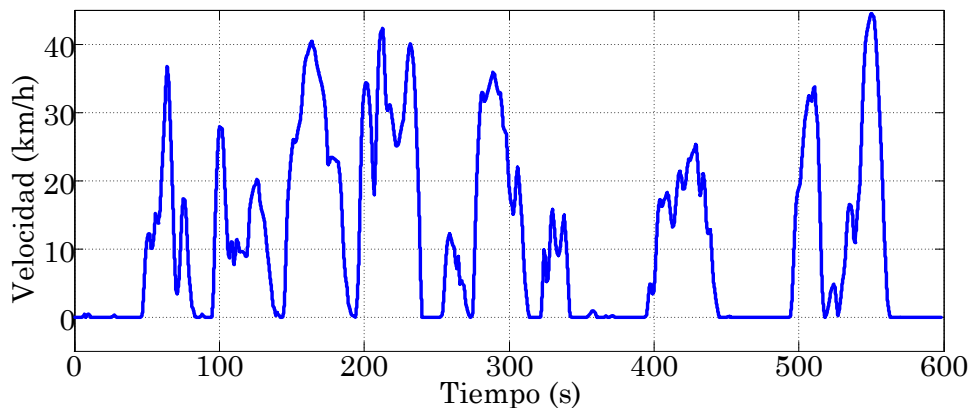


Figura 4.1: Perfil de velocidad del ciclo de manejo City II.

La Figura 4.2 muestra la distribución de potencia generada por el sistema de administración de energía, se puede apreciar la potencia que es demandada por la carga en el bus de CD así como la cantidad de potencia que entregan el *BB* y el *BU*. También se observa que la mayor parte de la energía generada durante el frenado regenerativo se almacena en el *BU*, esto se logra gracias a que el SAE regula el estado de carga del *BU* permitiendo generar el suficiente espacio en el *BU* para almacenar dicha energía. Además, ya que la estrategia de administración de energía considera las características eléctricas de las baterías, la variación de potencia que éstas aportan está limitada, lo que provoca que los cambios en la demanda

de potencia del BB se suavicen y que el estrés del BB disminuya, evitando reducir su tiempo de vida.

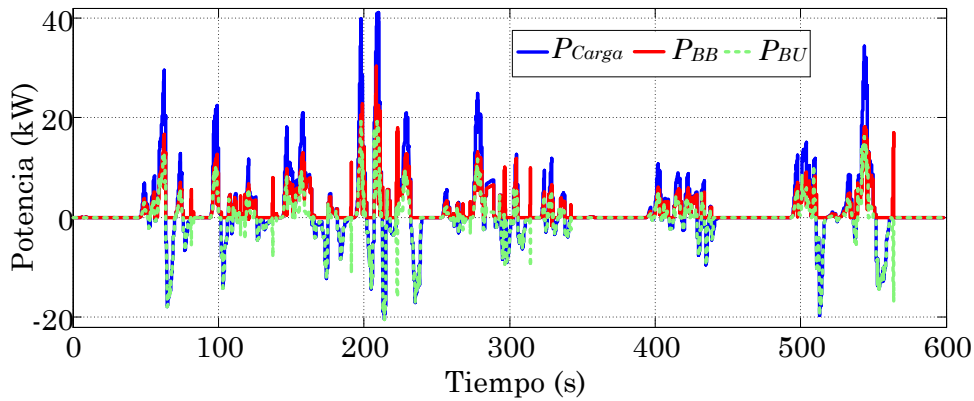


Figura 4.2: Distribución de potencia para el ciclo de manejo City II.

Para lograr la distribución de potencia el SAE calculó y utilizó las ganancias que se muestran en la Figura 4.3. También muestra que durante los tres primeros periodos aceleración-frenado el valor de $K[N_p]$ se mantuvo en 1. Lo anterior se debe a que el algoritmo de adaptación requiere la información de 3 periodos para calcular un nuevo valor de $K[N_p]$.

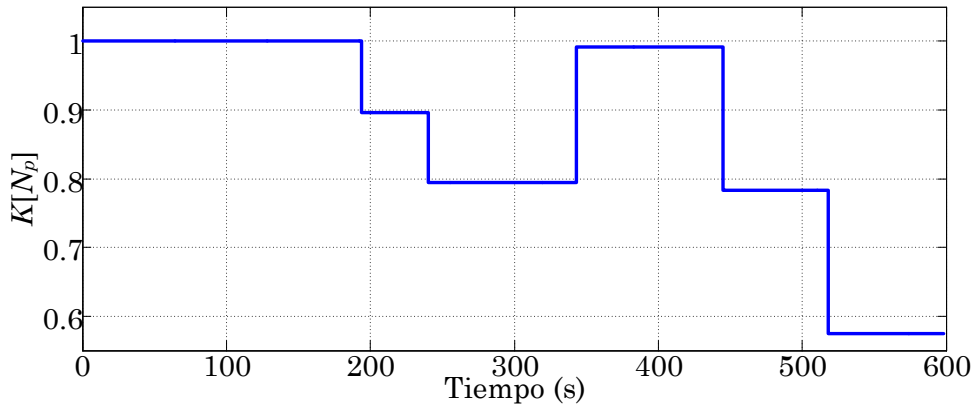


Figura 4.3: Valores de $K[N_p]$ para el ciclo de manejo City II.

La Figura 4.4 muestra el estado de carga del BU . Como se puede apreciar, el valor del SOC_{BU} varía conforme se incrementa o reduce la velocidad del vehículo y, por consiguiente, la energía cinética. También se puede apreciar al término del tiempo de frenado, que el estado de carga del BU es muy cercano al 100%, aunque en algunas ocasiones éste no llega a llenarse por completo y se debe terminar de cargar con energía proveniente del BB . El error máximo que se produce en el estado de carga del BU para el ciclo de manejo City II es inferior al 0.5%, por lo tanto, se puede afirmar que el BU siempre tiene la suficiente energía para

permitir que el VE logre su máxima aceleración.

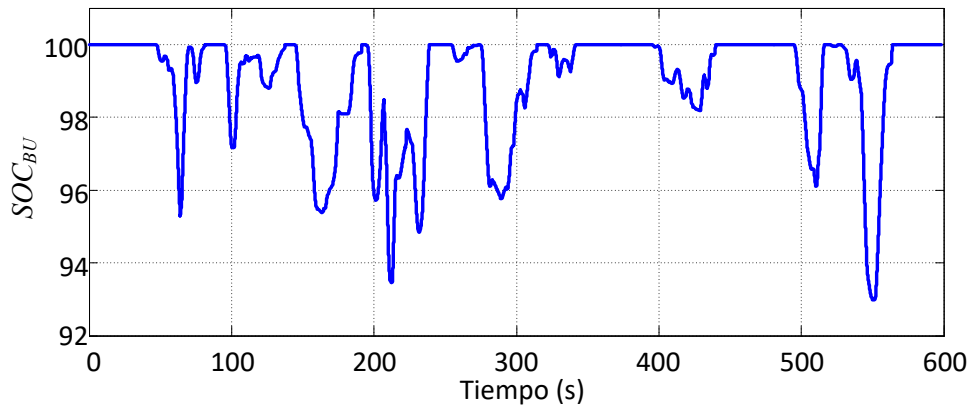


Figura 4.4: Estado de carga del *BU* durante el ciclo de manejo City II.

La Figura 4.5 muestra la fuerza de frenado total que se aplica, así como la cantidad de fuerza que se ejerce en cada uno de los ejes de acuerdo a la curva de frenado ideal. Debido a que el vehículo cuenta con motores eléctricos en ambos ejes es posible aplicar frenado regenerativo en ambos y con ello evitar el uso del freno mecánico.

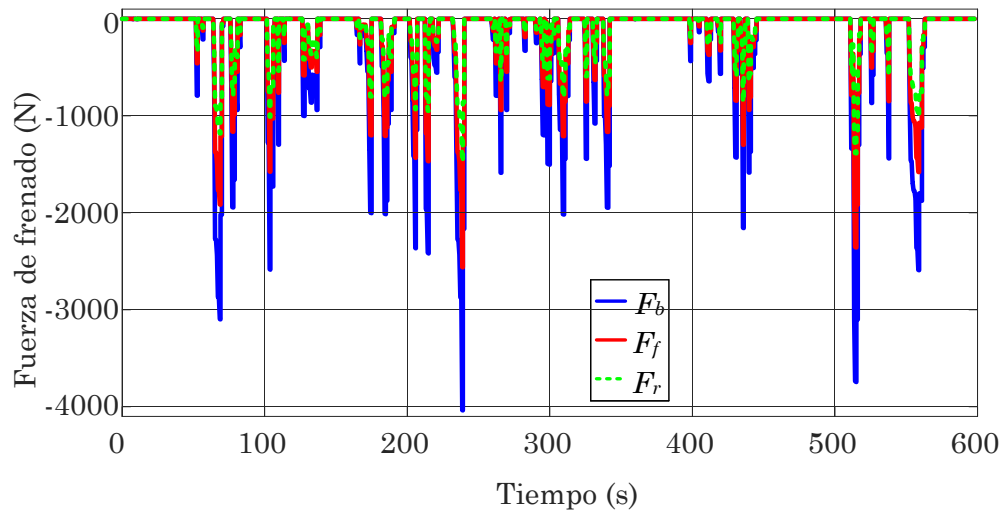


Figura 4.5: Distribución de fuerza de frenado entre eje delantero y trasero durante el ciclo de manejo City II.

El SDF determinó que para el ciclo de manejo City II toda la fuerza de frenado puede ser aplicada únicamente con frenado regenerativo. Sin embargo, en ciertos periodos de tiempo es necesario utilizar el frenado mecánico, esto se debe a que en algunas ocasiones el *BU* se llena en su totalidad antes de que el frenado finalice y no es posible utilizar el FR. La Figura

4.6 muestra tanto la magnitud como los intervalos de tiempo durante los cuales se aplica el freno mecánico.

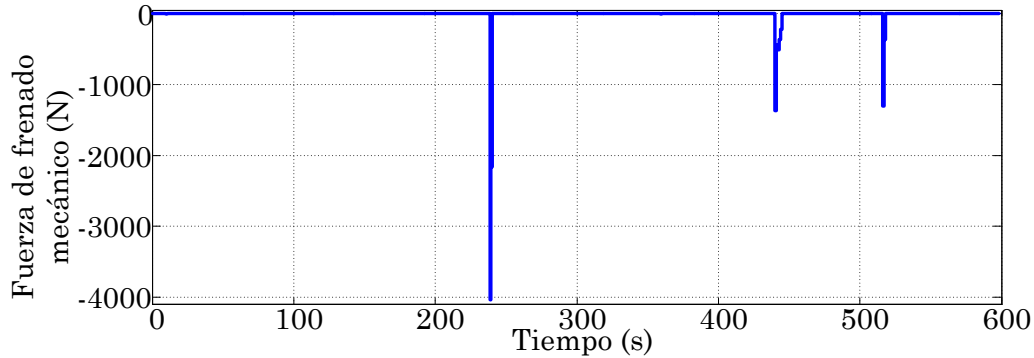


Figura 4.6: Fuerza de frenado mecánica aplicada durante el ciclo de manejo City II.

Como se mencionó anteriormente, el SDC es el encargado de determinar cuántas y cuáles ramas del convertidor serán utilizadas para trasladar la energía del *BU* al bus de CD y viceversa. La Figura 4.7 muestra la cantidad de potencia que, de acuerdo al SAE, debe ser proporcionada por el *BU* durante el ciclo de manejo City II. También muestra los límites establecidos en el SDC para utilizar uno, dos o cuatro ramas del convertidor. En esta figura se puede apreciar que en muy pocas ocasiones es necesario utilizar más de una rama del convertidor y con menor frecuencia es necesario usar 4 ramas.

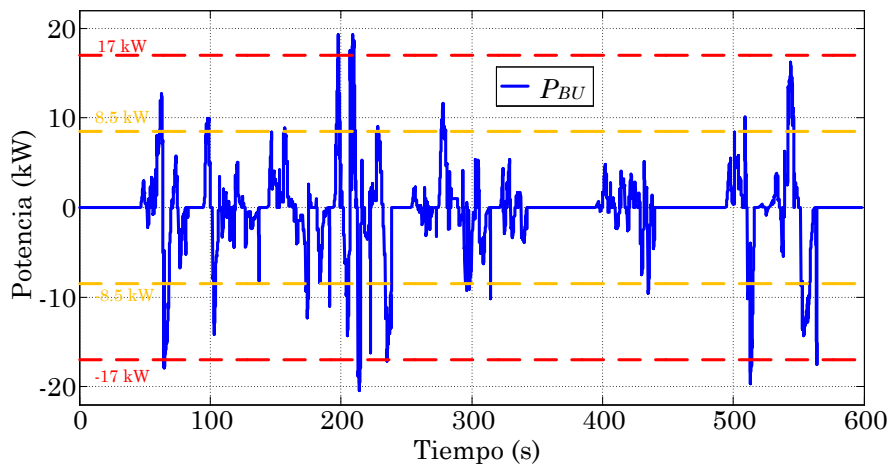


Figura 4.7: Potencia proporcionada por el *BU* al bus de CD durante el ciclo de manejo City II.

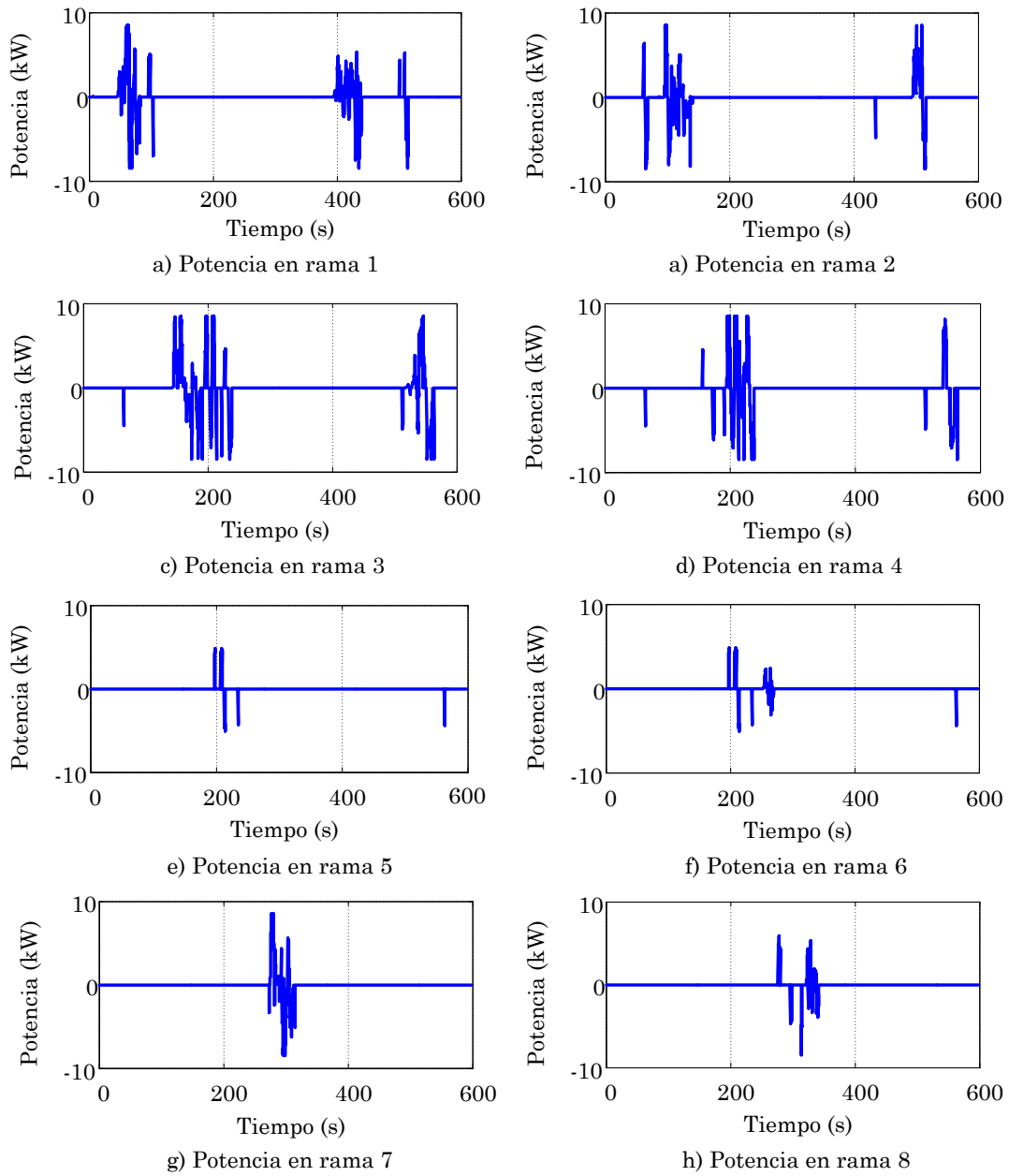


Figura 4.8: Potencia transmitida por cada una de las ramas del convertidor CD/CD durante el ciclo de manejo City II.

La figura 4.8 muestra la potencia que debe ser transmitida por cada una de las ramas de acuerdo con el sistema del despacho de convertidor, se puede apreciar que aunque la potencia de referencia para el ultracapacitor no supera en ningún momento los 21 kW, se utilizan todas las ramas del convertidor. Esto se debe a la rotación en el orden de incorporación de las ramas del convertidor, de acuerdo al valor de $Cont$. Se hace evidente al ver la figura

4.8 que la cantidad de energía transmitida por las ramas del convertidor en cualquiera de las direcciones no es la misma al finalizar un ciclo de manejo; sin embargo, la finalidad del sistema de despacho del convertidor no es que el desgaste de las 8 ramas del convertidor sea igual al finalizar un recorrido con el vehículo eléctrico, si no que el sistema tenga un desgaste equitativo de todas las ramas en el transcurso de la vida útil del convertidor.

Posteriormente se realizó otra simulación utilizando como perfil de velocidad el nuevo ciclo de manejo europeo, este ciclo fue seleccionado debido a que es repetitivo en la forma de onda de los primeros 12 periodos aceleración-frenado. Esto permite mostrar la forma en la cual el SAE se adapta al estilo de conducción y reduce la pérdida de energía.

La Figura 4.9 muestra la distribución de potencia generada por el sistema de administración de energía, se puede apreciar la potencia que es demandada por la carga en el bus de CD así como la cantidad de potencia que entregan el *BB* y el *BU*. Se puede apreciar cómo en los primeros tres periodos el *BU* no puede tomar toda la potencia que el sistema de tracción inyecta al bus de CD, pero después de que el valor de $K[N_p]$ es ajustado, al principio del cuarto periodo aceleración-frenado, el *BU* es capaz de tomar toda la potencia inyectada por el sistema de tracción.

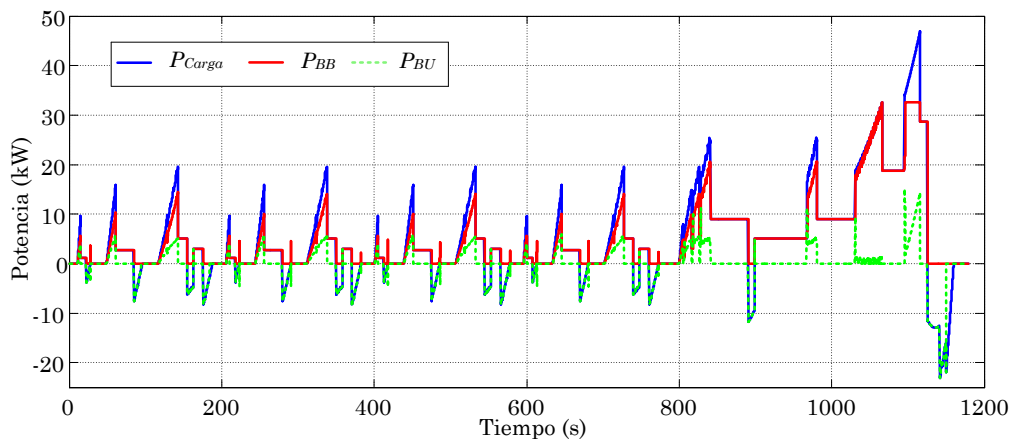


Figura 4.9: Distribución de potencia para el NEDC.

La Figura 4.10 muestra el valor $K[N_p]$ utilizado durante los 13 periodos del ciclo de manejo. Al igual que en el caso del ciclo de manejo City II, durante los tres primeros periodos aceleración-frenado el valor de $K[N_p]$ se mantuvo en 1. Posteriormente, este valor cambia y se mantiene constante por los siguientes 10 periodos, esto se debe a que en el NEDC hay tres perfiles de periodos aceleración-frenado que se están repitiendo constantemente, por lo cual la información que es utilizada para el cálculo de $K[N_p]$ es la misma, lo que ocasiona que el sistema de adaptación del SAE siempre calcule el mismo valor. Después del decimotercer

periodo, el valor de $K[N_p]$ es modificado debido a que se rompe con la repetitividad que se tenía en la forma de onda de la velocidad del vehículo (ver Figura 2.8).

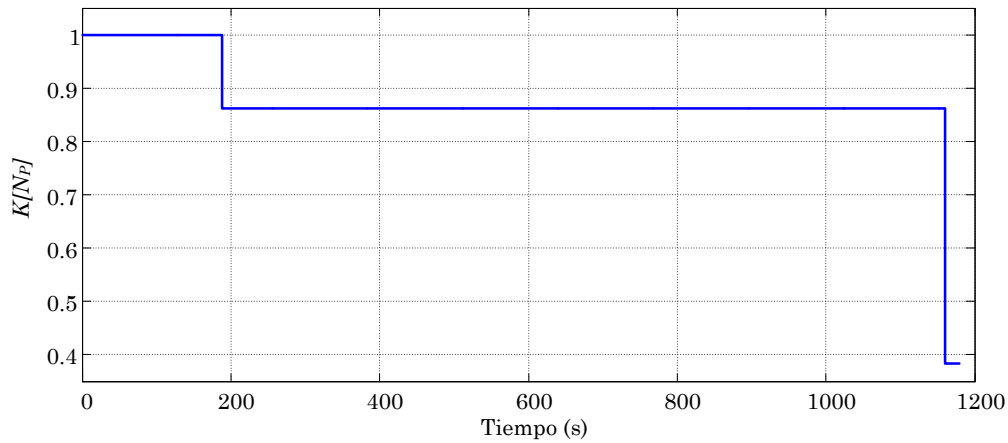


Figura 4.10: Valores de $K[N_p]$ durante el NEDC.

La Figura 4.11 muestra el estado de carga del BU . Se puede apreciar que el valor del SOC_{BU} varía de acuerdo con la velocidad del vehículo, y que al término del tiempo de frenado el estado de carga del BU es muy cercano al 100 %.

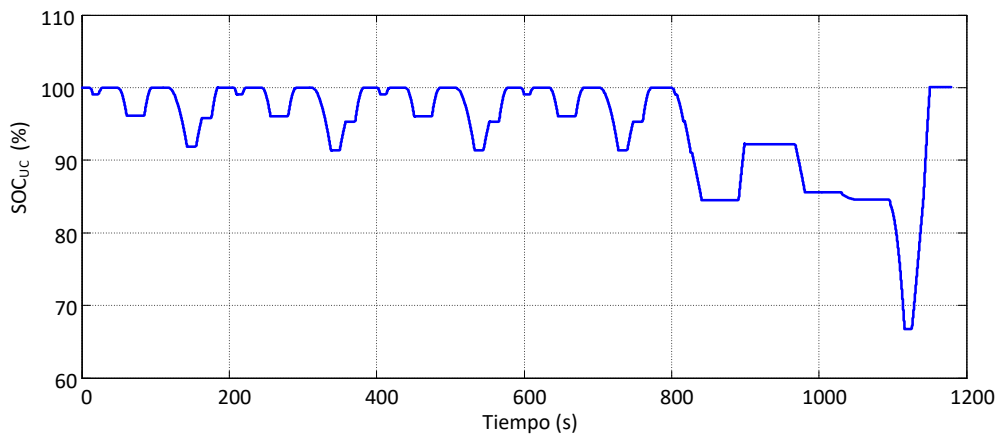


Figura 4.11: Estado de carga del BU durante el NEDC.

La Figura 4.12 muestra la fuerza de frenado total que se aplica, así como la cantidad de fuerza que se ejerce en cada uno de los ejes de acuerdo a la curva de frenado ideal. Como el vehículo cuenta con motores eléctricos en ambos ejes es posible aplicar frenado regenerativo en ambos y con ello reducir el uso del freno mecánico.

De acuerdo con el SDF para el NEDC toda la fuerza de frenado puede ser aplicada únicamente con frenado regenerativo. Sin embargo, existen ciertos periodos de tiempo en los cuales se requiere el uso del frenado mecánico debido a que el BU no puede almacenar la

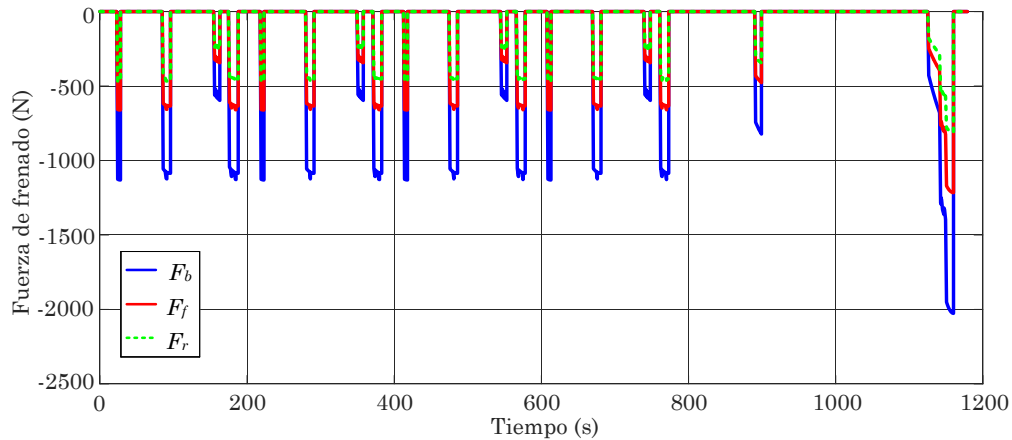


Figura 4.12: Distribución de fuerza de frenado entre eje delantero y trasero durante el NEDC.

energía que se produce durante el FR. La Figura 4.13 muestra tanto la magnitud como los intervalos de tiempo durante los cuales se aplica el freno mecánico.

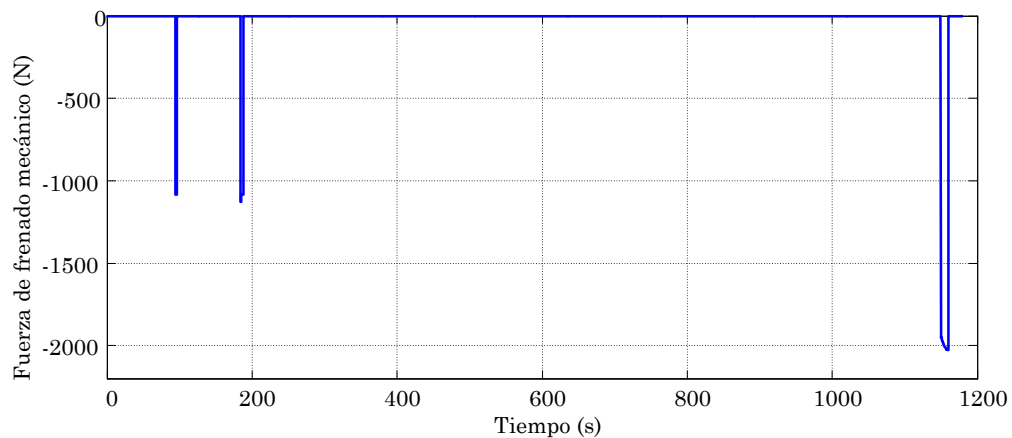


Figura 4.13: Fuerza de frenado mecánica aplicada durante el NEDC.

La Figura 4.14 muestra cuánta potencia debe ser proporcionada por el *BU* durante el NEDC. También muestra los límites establecidos en el SDC para utilizar uno, dos o cuatro ramas del convertidor. En esta figura se puede apreciar que en muy pocas ocasiones es necesario utilizar más de una rama del convertidor y con menor frecuencia es necesario usar 4 ramas.

La Figura 4.15 muestra la potencia que debe ser transmitida por cada una de las ramas de acuerdo con el SDC. Se puede apreciar que en esta ocasión también se utilizaron todas las ramas del convertidor, esto gracias a la rotación en el orden de incorporación de las ramas del convertidor.

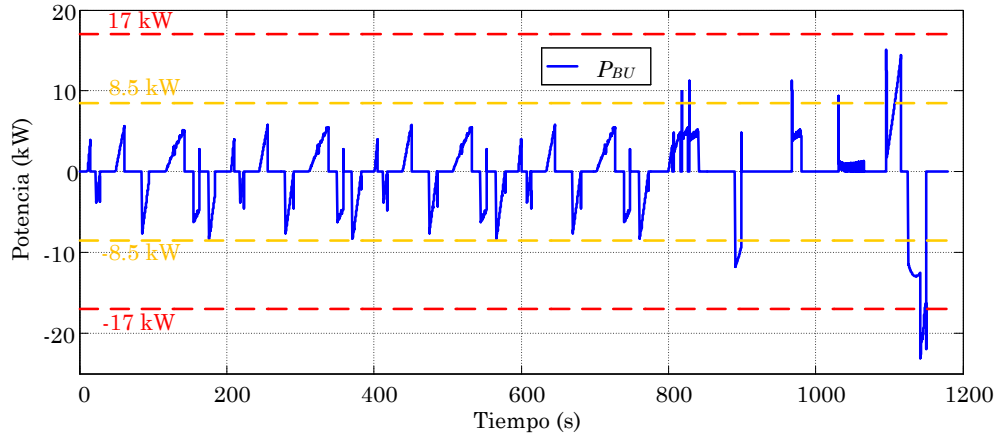


Figura 4.14: Potencia proporcionada por el *BU* al bus de CD durante el NEDC.

4.1. Validación del controlador del convertidor CD/CD

Para lograr que cada una de las ramas del convertidor transmita la cantidad de potencia que determina el sistema de despacho de convertidor, es necesario que el controlador del convertidor CD/CD funcione correctamente, tanto para potencias positivas como negativas. Por tal motivo, en esta sección se pondrá a prueba el desempeño de dicho controlador. Para validar el correcto desempeño del convertidor funcionando en lazo cerrado se realizó una simulación en "PSIM®", del circuito mostrador en la figura 2.24, en la cual el convertidor debe seguir la referencia de potencia descrita en la Figura 4.16. Debido a que se desea ver el comportamiento del controlador para todo el rango de voltaje del *BU* se decide cambiar el valor de la capacitancia del *BU*, de 28.30 F a 50.32 mF, con la finalidad de que éste almacene menos energía y se pueda descargar en un menor tiempo, reduciendo así el tiempo requerido para la simulación.

La Figura 4.17 muestra la cantidad de potencia que el convertidor toma o entrega del *BU*, se puede apreciar que ésta es igual a la potencia de referencia la mayor parte del tiempo. P_{UCreal} solo difiere de P_{ref} durante los transitorios que ocurren cuando se cambia la cantidad de ramas del convertidor que están en funcionamiento.

La Figura 4.18 muestra los voltajes del banco de baterías y del banco de ultracapacitores. Se puede apreciar que el V_{BU} va disminuyendo, desde su valor máximo (283.30 V) hasta un valor cercano al mínimo de operación (111.15 V), cuando el *BU* entrega energía. Y se incrementa cuando el *BU* recibe energía. Además, en esta figura también se puede apreciar que el voltaje del *BB* es prácticamente constante, éste solo varía durante los transitorios previamente señalados.

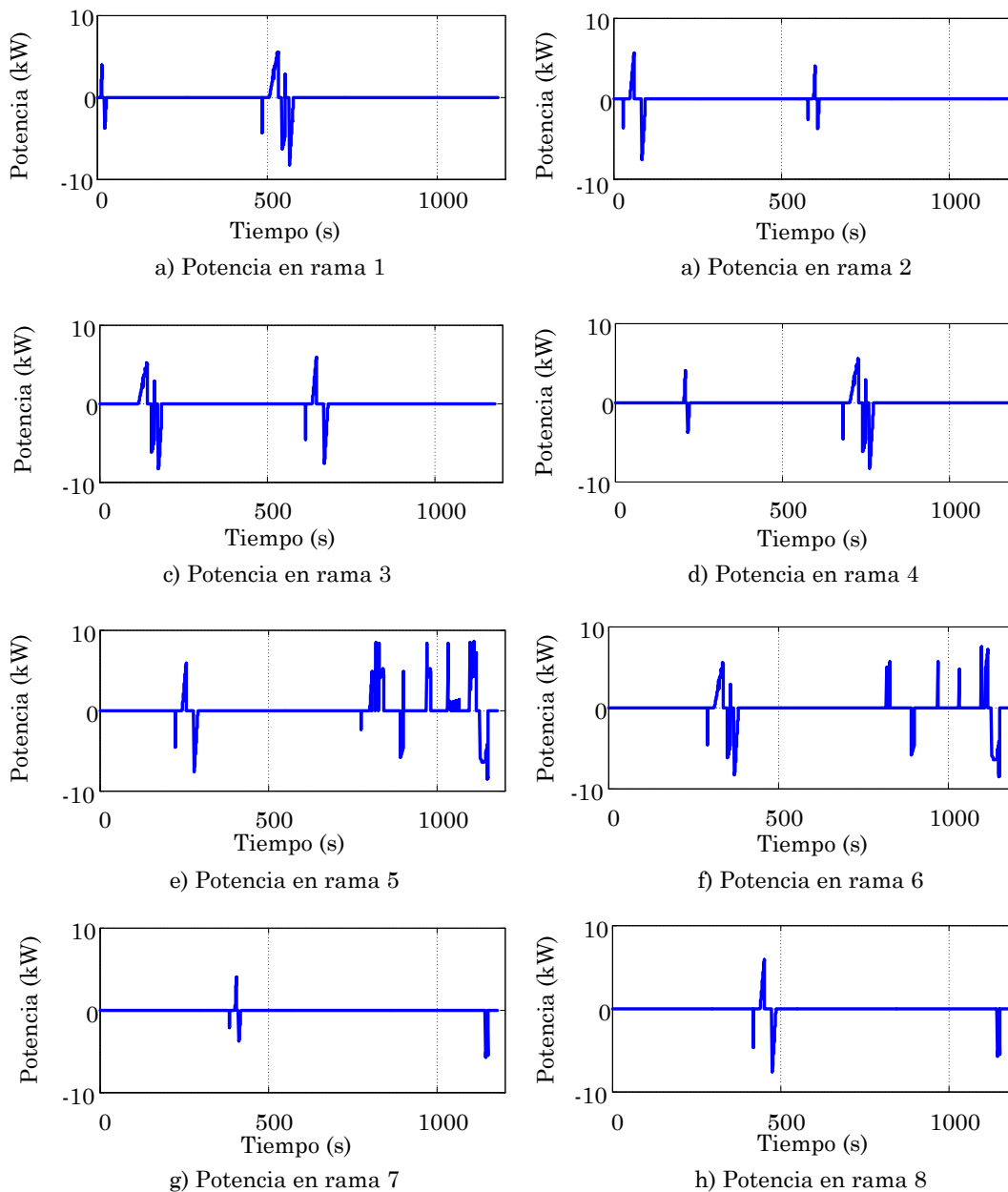


Figura 4.15: Potencia transmitida por cada una de las ramas del convertidor CD/CD durante el NEDC.

La Figura 4.19 muestra la corriente referencia para el inductor 1 (I_{L1_ref}) y la corriente del inductor L_1 (I_{L1}), se puede apreciar que la mayor parte del tiempo la corriente promedio del inductor 1 es igual a la referencia que debe seguir. Las únicas ocasiones en las cuales ambas corrientes no son iguales son:

- Durante cambios bruscos en la corriente de referencia.

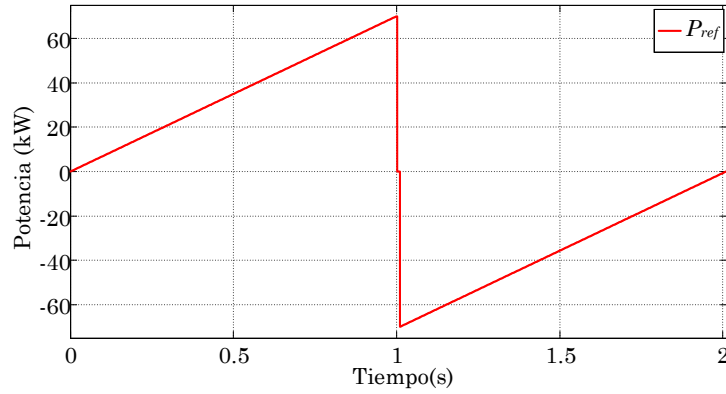


Figura 4.16: Potencia de referencia para el convertidor CD/CD.

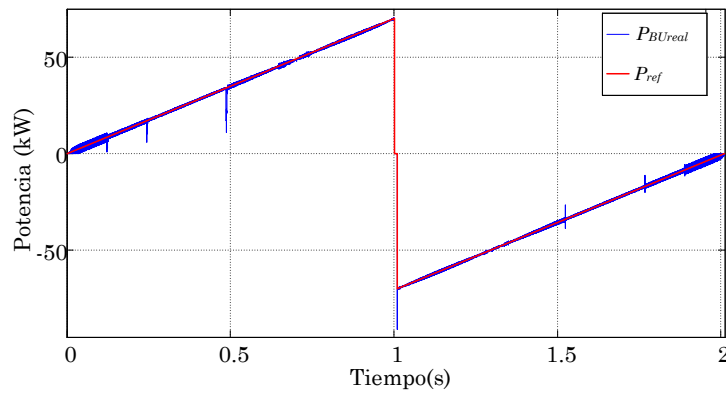


Figura 4.17: Seguimiento de la potencia de referencia del convertidor CD/CD.

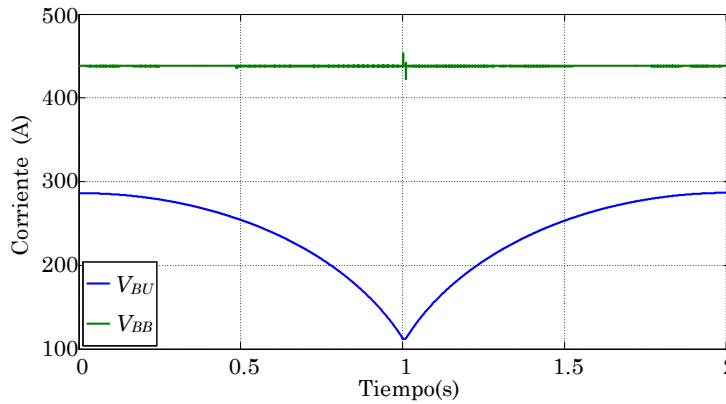


Figura 4.18: Voltaje en ambos extremos del convertidor CD/CD.

- Cuando I_{L1_ref} es muy pequeña, menor al 50% del rizo de corriente, y el convertidor opera en modo de conducción discontinua.

Las Figuras 4.20 y 4.21 muestran un acercamiento de la Figura 4.19 en las zonas donde se presentan cambios bruscos en la corriente de referencia y cuando I_{L1_ref} es muy pequeña,

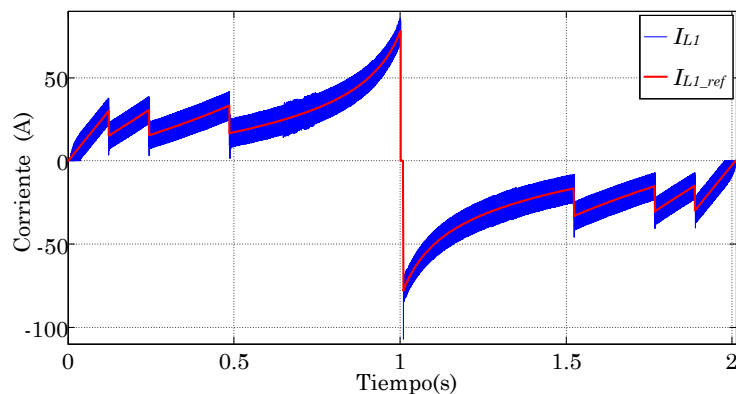


Figura 4.19: Seguimiento de la corriente de referencia del inductor L_1 .

respectivamente.

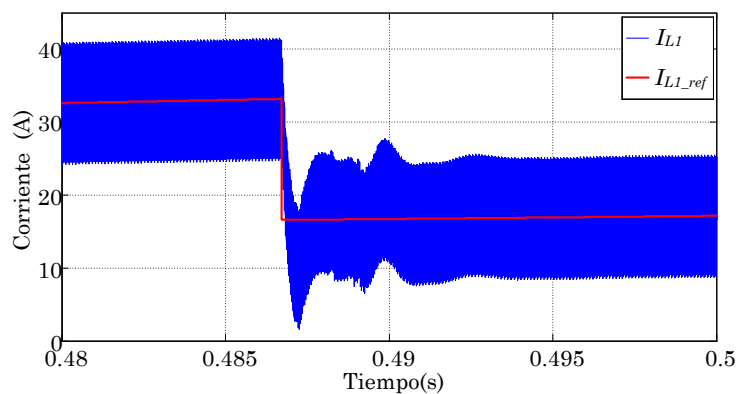


Figura 4.20: Cambio brusco en la corriente de referencia del inductor L_1 .

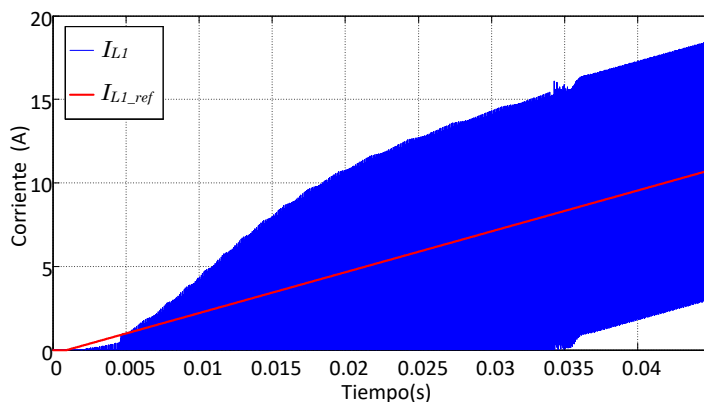


Figura 4.21: Corriente de referencia del inductor L_1 menor al 50% del rizo de corriente.

De los resultados obtenidos se puede concluir que, aún cuando el controlador por retroalimentación de estado con integrador para la salida es un control para regulación,

es posible utilizarlo en esta aplicación para tareas de seguimiento debido a que la referencia varía lentamente en comparación a la respuesta del sistema en lazo cerrado.

4.2. Comparativa de resultados del control supervisorio

Finamente para cuantificar el impacto de la estrategia de administración de energía desarrollada en este trabajo de tesis sobre la autonomía del VE, se realizó un análisis cuantitativo del consumo energético del vehículo eléctrico durante diferentes ciclos de manejo. La Tabla 4.1 muestra la cantidad de energía que consumió el VE virtual durante la recreación de tres ciclos de manejo sin usar el frenado regenerativo y usando la estrategia de administración de energía propuesta en este trabajo de tesis.

Tabla 4.1: Consumo de energía del VE para los ciclos de manejo City II, ECE15 y NEDC.

Ciclo de manejo	Distancia (km) recorrida	Consumo de energía (MJ)		Incremento de autonomía (%) usando EAE propuesta
		sin FR	con EAE propuesta	
City II	1.898	1.4704	0.9872	48.94
ECE15	0.994	0.5339	0.4198	27.17
NEDC	10.913	6.7119	5.8785	14.17

Los resultados muestran que al utilizar el tren de potencia descrito en las Figuras 2.3 y 2.7 con el control supervisorio propuesto, se puede aprovechar la energía cinética del VE y, consecuentemente, incrementar su autonomía hasta en un 48.35%. Por lo tanto, es posible demostrar que mediante una adecuada regulación del estado de carga del *BU* se puede mejorar el rendimiento de un VE aumentando así su autonomía, como se estableció en la Hipótesis de este trabajo. Esta estrategia de administración de energía permite mantener siempre cargado al *BU* con el fin de contar con la energía necesaria para la máxima aceleración en cualquier instante de tiempo. Además, la estrategia de administración de energía desarrollada logra adaptarse al estilo de manejo del conductor sin la necesidad de un gran gasto computacional como el que requiere la estrategia de control predictivo presentada en [25, 26].

4.2.1. Comparativa con tren de potencia con tracción en solo un eje

Con la finalidad de mostrar que el uso de un sistema de tracción y un CS diseñado para maximizar el aprovechamiento de la energía cinética mediante el frenado regenerativo, puede lograr un incremento en la autonomía igual e incluso mayor que el usar un banco de baterías de mayor capacidad, se realizó un comparativo entre el incremento en la autonomía que se obtiene al utilizar la topología de tren de potencia y el control supervisorio seleccionados, al cual llamaremos VE1, con respecto a utilizar una topología con tracción en un solo eje y un banco de baterías de mayor capacidad energética, al cual llamaremos VE2. Ambos vehículos tendrán el mismo peso, la diferencia entre ellos es que el VE1 tendrá un sistema de tracción de mayor peso, debido al uso de dos transmisiones y dos diferenciales. Mientras que, el VE2 tendrá un sistema de almacenamiento de energía de mayor peso, ya que este contará con un banco de baterías de mayor tamaño. La Figura 4.22 muestra el sistema de tracción del VE2.

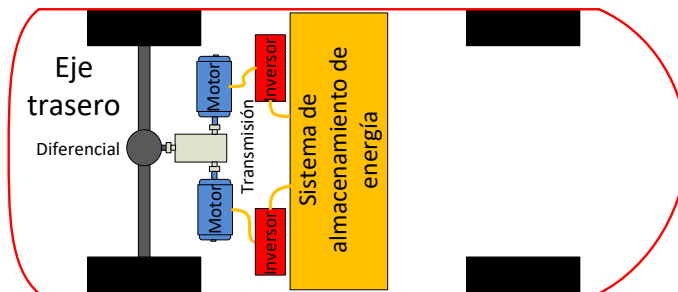


Figura 4.22: Topología del sistema de tracción del VE2.

El primer paso para realizar la comparativa es calcular el tamaño del banco de baterías del VE2 (*BB2*), el cual debe tener un peso equivalente al peso del *BB* del VE1 más el peso de los elementos extras del sistema de tracción.

Para ello es necesario identificar cuánto se incrementa el peso del vehículo al utilizar la topología seleccionada en comparación con una topología para tracción en un solo eje. El primer paso para calcular este incremento de peso es determinar la cantidad de elementos que requieren los sistemas de tracción de cada una de las topologías.

En ambas se requieren dos motores, en la seleccionada para este trabajo de tesis se utiliza uno por eje, mientras que en la topología con tracción de un solo eje se utilizan ambos en el mismo eje, debido a que uno solo no tiene la potencia suficiente para acelerar el vehículo de 0 a 100 km/h, por lo que ni los inversores ni los motores utilizados en este trabajo de tesis representan un incremento de peso. Sin embargo, el diferencial y la transmisión sí

representan un aumento en el peso del vehículo, ya que la topología seleccionada requiere dos transmisiones y dos diferenciales, uno por cada eje; mientras que la topología para tracción en un solo eje requiere la mitad de los componentes anteriormente mencionados. Por lo tanto, si se considera que el peso de estos componentes es similar a los sugeridos por el fabricante de los motores eléctricos, se puede señalar que cada componte extra tiene un peso aproximado de 25 kg [45, 64]. Por tal motivo, se puede estimar que la topología seleccionada para este trabajo de tesis pesa 50 kg más que la topología de tracción en un solo eje.

Entonces como el *BB* pesa 384.22 kg, más el incremento de peso debido a los componentes extras (50 kg), se puede calcular que el *BB2* tendrá un peso de 434.22 kg. Si se utiliza el mismo modelo de batería, con un peso de 235 g, el *BB2* estará conformado por 1847 baterías. Las cuales son capaces de almacenar energía para que el vehículo tenga una autonomía de 320.45 km, bajo las mismas condiciones planteadas en el Capítulo 2, lo cual representa un aumento en la autonomía de 12.96 %.

Tabla 4.2: Comparativa entre autonomía del VE1 y VE2 para el nuevo ciclo de manejo europeo.

Especificaciones	VE1	VE2
Peso del banco de baterías (kg)	384.22	434.22
Número de baterías	1635	1847
Energía aprovechable del banco de baterías (MJ)	174.22	196.81
Consumo sin FR (MJ/km)	0.614	0.614
Autonomía Sin FR (km)	283.75	320.54
Consumo con FR (MJ/km)	0.537	No aplica
Autonomía usando FR (km)	323.97	No aplica

La Tabla 4.2 muestra que el VE2 tiene una autonomía 12.96 % mayor que el VE1, sin usar frenado regenerativo. Mientras que, al utilizar frenado regenerativo en el VE1 se logra un aumento en la autonomía de este en un 14.17 %. Además, se puede señalar que la autonomía que se obtiene al utilizar el VE1 con FR y el VE2 sin frenado regenerativo es muy similar.

En la Tabla 4.3 se puede apreciar como para el ciclo de manejo ECE-15 el VE1 con frenado regenerativo logra una mayor autonomía que al usar el VE2 sin frenado regenerativo.

Por ultimo, la Tabla 4.4 nos muestra que el VE1 usando frenado regenerativo logra una autonomía 80 km mayor que el VE2.

Tabla 4.3: Comparativa entre autonomía del VE1 y VE2 para el ciclo de manejo ECE-15.

Especificaciones	VE1	VE2
Peso del banco de baterías (kg)	384.22	434.22
Número de baterías	1635	1847
Energía aprovechable del banco de baterías (MJ)	174.22	196.81
Consumo sin FR (MJ/km)	0.537	0.537
Autonomía Sin FR (km)	324.40	366.46
Consumo con FR (MJ/km)	0.422	No aplica
Autonomía usando FR	412.57	No aplica

Tabla 4.4: Comparativa entre autonomía del VE1 y VE2 para el ciclo de manejo City II.

Especificaciones	VE1	VE2
Peso del banco de baterías (kg)	384.22	434.22
Número de baterías	1635	1847
Energía aprovechable del banco de baterías (MJ)	174.22	196.81
Consumo sin FR (MJ/km)	0.767	0.767
Autonomía Sin FR (km)	224.89	254.05
Consumo con FR (MJ/km)	0.520	No aplica
Autonomía usando FR (km)	334.97	No aplica

Los resultados aquí presentados permiten validar la hipótesis planteada al principio de este trabajo de tesis, se demostró que la estrategia de administración de energía desarrollada logró incrementar la autonomía del VE sin la necesidad de aumentar la capacidad energética del banco de baterías y sin afectar en ningún momento el desempeño del vehículo. Además, muestran que al utilizar el FR se logra un incremento en la autonomía similar o mayor al obtenido al incrementar el tamaño del banco de baterías.

Conclusiones

Conclusiones

Un vehículo eléctrico que utilice una topología de tren de potencia que tenga dos motores eléctricos, uno por cada eje, puede aprovechar de mejor manera la energía cinética cuando se considere la distribución de fuerza de frenado de acuerdo a la curva de frenado ideal, a diferencia de los vehículos eléctricos comerciales que sólo cuentan con motor eléctrico en uno de sus ejes. Esto se debe a que un tren de potencia con motores en ambos ejes puede aplicar frenado regenerativo en ambos ejes, lo cual reduce el uso del frenado mecánico y evita que gran parte de la energía cinética del vehículo sea disipada al medio ambiente en forma de calor.

Sin embargo, aunque el uso de una adecuada topología de tren de potencia permite aplicar frenado regenerativo en ambos ejes, esto no implica que siempre se pueda realizar. Esto se debe a que, además de una adecuada topología, se requiere una estrategia de administración de energía que genere el espacio suficiente en los almacenes de energía para almacenar toda la energía generada por el frenado regenerativo, de lo contrario éste no puede ser aplicado y debe ser usado frenado mecánico.

Una manera de desarrollar una estrategia de administración de la energía que permita aprovechar la mayoría de la energía cinética del vehículo es mediante el estudio de la dinámica del vehículo durante el proceso de frenado. Ya que de esta forma se puede analizar la energía

cinética del vehículo justo en el momento en el que se empieza el frenado así como las fuerzas que se oponen al movimiento del vehículo y le restan energía. De esta forma se puede calcular la cantidad de energía cinética que realmente puede ser convertida a energía eléctrica, y desarrollar una ecuación que permita controlar la descarga del banco de ultracapacitores para generar el espacio suficiente para almacenar dicha energía. Además, el uso de la ecuación desarrollada permite regular el estado de carga del banco de ultracapacitores en un valor cercano al 100 % durante la mayoría del tiempo, esto permite que el sistema de almacenamiento de energía siempre tenga la energía suficiente para acelerar el vehículo a su máxima aceleración.

Además, el análisis de las fuerzas presentes durante la aceleración y frenado del vehículo, permite identificar el estilo de conducción de cualquier conductor y adaptar la estrategia de administración de energía. Con lo cual, se genera una mejor distribución de la potencia y por consiguiente se logra reducir el consumo de energía del vehículo y aumentar la autonomía del mismo, sin la necesidad de aumentar la capacidad del sistema de almacenamiento de energía.

Por otra parte, el uso de un convertidor medio puente de múltiples ramas permite operar el sistema en un punto de operación de mayor eficiencia y disminuye el tiempo durante el cual el convertidor trabaja en modo de conducción discontinua.

Trabajos publicados

- J. Armenta, C. Núñez, N. Visairo, I. Lázaro. “An advanced energy management system for controlling the ultracapacitor discharge and improving the electric vehicle range”. *Journal of Power Sources*, Elsevier. Volume 284, 2015. pp. 452-458. ISSN 0378-7753. Factor de impacto: 5.211. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.03.056>
 - A. Mendoza-Torres, J. Armenta, N. Visairo, and C. Nuñez, “A switching control strategy to tracking problem for a bidirectional dc/dc converter,” in *2016 13th International Conference on Power Electronics (CIEP)*, June 2016, pp. 204–209.
 - J. Armenta, A. Mendoza-Torres, N. Visairo, and C. Nuñez, “Study of performance of power train topology for electric vehicle,” in *2016 13th International Conference on Power Electronics (CIEP)*, June 2016, pp. 81–86.
-

Aportaciones

Este trabajo de tesis aporta como idea original la siguiente ecuación:

$$P_{BUmin}[nT] = (P_{ideal}[nT] - K[N_p] \times P_{adj}[nT])\eta_{total}$$

La cual permite:

- Regular el estado de carga del banco de ultracapacitores de acuerdo a la energía cinética del vehículo.
- Aumentar la autonomía de un vehículo eléctrico.
- Mantener el desempeño del vehículo eléctrico.

Trabajos futuros

- Considerar la recarga de las baterías durante el frenado regenerativo.
 - Considerar la inclinación del camino en la ecuación descarga del convertidor.
-

Apéndice

Vehículos eléctricos comerciales

Las tablas A.1 y A.2 muestran algunos de los vehículos eléctricos que han estado o están por salir al mercado [5].

Tabla A.1: Vehículos eléctricos comerciales, parte 1.

Marca	Modelo	Tecnología	Autonomía (Km)	Velocidad máx (km/h)	Precio
Aixam	Mega e-City	Eléctrico	65	65	14745 €
Audi	E-tron Quatro	Eléctrico	500	210	–
BMW	i3 (33 kWh REX)	Eléctrico	450	150	41200 €
BYD	E6 (90kW)	Eléctrico	300	140	45368 €
Chevrolet	Bolt	Eléctrico	320	145	33300 €
Chevrolet	Volt	H-Serial	83 - 500 ⁺	160	44525 €
Citroën	C-Zero	Eléctrico	150	130	20500 €
Citroën	Berlingo Electric (Furgón)	Eléctrico	170	110	29904 €
Citroën	E-Mehari	Eléctrico	200	110	26000 €
Eve	M1.lle	Eléctrico	130	100	–
Ford	Focus electric	Eléctrico	160	136	39000 €
Hyundai	Ioniq	Eléctrico	250	165	34500 €
KIA	Soul EV	Eléctrico	212	145	23986 €
Little	Ebox 2 (4WD LITIO)	Eléctrico	100	50	24000 €
Little	Ebox 6 (LITIO)	Eléctrico	100	50	–
Little	Little 4	Eléctrico	100	45	13000 €
Little	Panter 4	Eléctrico	60	50	–
Mahindra Reva	REVAi (19 Li-ion 3p Aut.)	Eléctrico	120	80	12995 €
Mercedes-Benz	Clase B ED	Eléctrico	200	160	43425 €
Mercedes-Benz	SLS AMG Electric Drive	Eléctrico	250	250	434000 €
Mitsubishi	i-MiEV	Eléctrico	150	130	24400 €

Nota: el símbolo “+” indica que la autonomía es usando tanto baterías como combustible fósil.

Tabla A.2: Vehículos eléctricos comerciales, parte 2.

Marca	Modelo	Tecnología	Autonomía (Km)	Velocidad máx (km/h)	Precio
Nissan	e-NV200 (Combi Profesional)	Eléctrico	170	123	25241 €
Nissan	e-NV200 Evalia 7	Eléctrico	170	123	37793 €
Nissan	Leaf (30 kWh Tekna)	Eléctrico	250	145	37435 €
Noun Electric	NosMoke	Eléctrico	100	70	17340 €
Opel	Ampera (Selective)	H-Serial	60 - 500 ⁺	160	39900 €
Opel	Ampera-e	Eléctrico	500	150	–
Peugeot	iOn	Eléctrico	150	130	21600 €
Peugeot	Partner Electric	Eléctrico	170	110	28000 €
Porsche	Mission E	Eléctrico	500	250	–
Renault	Fluence Z.E (Dynamique)	Eléctrico	185	135	27700 €
Renault	Kangoo Z.E	Eléctrico	170	130	24800 €
Renault	Maxi Z.E.	Eléctrico	170	130	27220 €
Renault	Twizy (Intens 80)	Eléctrico	100	80	8730 €
Renault	Zoe (Intens R90 400)	Eléctrico	400	135	26425 €
Rimac	Concept_One	Eléctrico	400	355	850000 €
Rimac	Concept_S	Eléctrico	400	365	873000 €
Smart	Forfour Electric Drive	Eléctrico	155	130	–
Smart	Fortwo electric drive (coupé)	Eléctrico	145	125	25500 €
Tazzari	EM1	Eléctrico	130	100	23800 €
Tazzari	Zero Classic	Eléctrico	200	100	20300 €
Tazzari	Zero Evo	Eléctrico	200	100	20500 €
Tesla	MODEL 3	Eléctrico	346	250	31000 €
Tesla	MODEL S (P100D kWh)	Eléctrico	613	250	154517 €
Tesla	MODEL X (P100D kWh)	Eléctrico	542	250	155727 €
Tesla	Roadster	Eléctrico	360	201	–
Think	THINK City (2+2p Aut.)	Eléctrico	180	110	31000 €
Twike	Twike	Eléctrico y pedal	600	85	22127 €
Volkswagen	e-Golf	Eléctrico	190	140	36850 €
Volkswagen	e-UP	Eléctrico	160	130	28050 €
Zytel	Cuatro	Eléctrico	100	105	–
Zytel	Gorila EV	Eléctrico	100	150	–

Referencias

- [1] J. Green and S. Sánchez, *La Calidad del Aire en América Latina: Una Visión Panorámica*, 2012th ed. Washington D.C., USA: Clean Air Institute, 2013.
- [2] M. Cinta, “Contaminación por autos...¿problema en el futuro?” in *MERC División Automotriz*, Abril 2005.
- [3] M. Guarnieri, “Looking back to electric cars,” in *2012 Third IEEE HISTory of ELECTro-technology CONference (HISTELCON)*, Sept 2012, pp. 1–6.
- [4] M. Ehsani, Y. Gao, S. E. Gay, and A. Emadi, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals*, 1st ed. Boca Raton: CRC Press, 2004.
- [5] Electromaps. Todo sobre los coches eléctricos. [Online]. Available: <https://www.electromaps.com/coches-electricos>
- [6] C. Sandoval, V. M. Alvarado, J.-C. Carmona, G. L. Lopez, and J. Gomez-Aguilar, “Energy management control strategy to improve the fc/sc dynamic behavior on hybrid electric vehicles: A frequency based distribution,” *Renewable Energy*, vol. 105, pp. 407 – 418, 2017. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148116310771>
- [7] J. Morales-Morales, I. Cervantes, and U. Cano-Castillo, “On the design of robust energy management strategies for fchev,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 64, no. 5, pp. 1716–1728, May 2015.

-
- [8] [Online]. Available: <http://www.electriccarpartscompany.com/Bestgo-10Ah-Li-NCM-Lithium-Pouch-Cell-Model-BP-HK-LP-10B>
- [9] J. Hur, H. G. Sung, B. K. Lee, C. Y. Won, and B. H. Lee, "Development of high-efficiency 42v cooling fan motor for hybrid electric vehicle applications," in *2006 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, Sept 2006, pp. 1–6.
- [10] T. L. Beechner and A. L. Carpenter, "A >98% efficient >150 krpm high-temperature liquid-cooled sic vfd for hybrid-electric turbochargers," in *2017 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, March 2017, pp. 3674–3680.
- [11] S. F. Tie and C. W. Tan, "A review of energy sources and energy management system in electric vehicles," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 20, no. 0, pp. 82 – 102, 2013.
- [12] B. Cao, Z. Bai, and W. Zhang, "Research on control for regenerative braking of electric vehicle," in *IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety, 2005.*, Oct 2005, pp. 92–97.
- [13] J. Paterson and M. Ramsay, "Electric vehicle braking by fuzzy logic control," in *Conference Record of the 1993 IEEE Industry Applications Conference Twenty-Eighth IAS Annual Meeting*, Oct 1993, pp. 2200–2204 vol.3.
- [14] J. X. Junzhi Zhang, Xin Lu and B. Li, "Regenerative braking system for series hybrid electric city bus," in *The World Electric Vehicle Journal*, vol. 2, no. 4, 2008, pp. 128–134.
- [15] M. Hannan, F. Azidin, and A. Mohamed, "Multi-sources model and control algorithm of an energy management system for light electric vehicles," *Energy Conversion and Management*, vol. 62, no. 0, pp. 123 – 130, 2012.
- [16] L. Rosario and P.-K. Luk, "Applying management methodology to electric vehicles with multiple energy storage systems," in *Machine Learning and Cybernetics, 2007 International Conference on*, vol. 7, Aug 2007, pp. 4223–4230.
- [17] V. Galdi, A. Piccolo, and P. Siano, "A fuzzy based safe power management algorithm for energy storage systems in electric vehicles," in *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2006. VPPC '06. IEEE*, Sept 2006, pp. 1–6.
- [18] C.-Y. Li and G.-P. Liu, "Optimal fuzzy power control and management of fuel cell/battery hybrid vehicles," *Journal of Power Sources*, vol. 192, no. 2, pp. 525 – 533, 2009.
-

-
- [19] O. Erdinc, B. Vural, and M. Uzunoglu, "A wavelet-fuzzy logic based energy management strategy for a fuel cell/battery/ultra-capacitor hybrid vehicular power system," *Journal of Power Sources*, vol. 194, no. 1, pp. 369 – 380, 2009, {XIth} Polish Conference on Fast Ionic Conductors 2008.
- [20] D. Gao, Z. Jin, and Q. Lu, "Energy management strategy based on fuzzy logic for a fuel cell hybrid bus," *Journal of Power Sources*, vol. 185, no. 1, pp. 311 – 317, 2008.
- [21] X. Li, L. Xu, J. Hua, X. Lin, J. Li, and M. Ouyang, "Power management strategy for vehicular-applied hybrid fuel cell/battery power system," *Journal of Power Sources*, vol. 191, no. 2, pp. 542 – 549, 2009.
- [22] Z. Yu, D. Zinger, and A. Bose, "An innovative optimal power allocation strategy for fuel cell, battery and supercapacitor hybrid electric vehicle," *Journal of Power Sources*, vol. 196, no. 4, pp. 2351 – 2359, 2011.
- [23] M.-E. Choi and S.-W. Seo, "Robust energy management of a battery/supercapacitor hybrid energy storage system in an electric vehicle," in *Electric Vehicle Conference (IEVC), 2012 IEEE International*, March 2012, pp. 1–5.
- [24] J. Xi, M. Li, and M. Xu, "Optimal energy management strategy for battery powered electric vehicles," *Applied Energy*, vol. 134, no. 0, pp. 332 – 341, 2014.
- [25] M. West, C. Bingham, and N. Schofield, "Predictive control for energy management in all/more electric vehicles with multiple energy storage units," in *Electric Machines and Drives Conference, 2003. IEMDC'03. IEEE International*, vol. 1, June 2003, pp. 222–228 vol.1.
- [26] Z. Song, H. Hofmann, J. Li, J. Hou, X. Han, and M. Ouyang, "Energy management strategies comparison for electric vehicles with hybrid energy storage system," *Applied Energy*, vol. 134, no. 0, pp. 321 – 331, 2014.
- [27] J. P. Trovão, P. G. Pereirinha, H. M. Jorge, and C. H. Antunes, "A multi-level energy management system for multi-source electric vehicles – an integrated rule-based meta-heuristic approach," *Applied Energy*, vol. 105, pp. 304 – 318, 2013. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261913000081>
- [28] J. Moreno, M. Ortuzar, and J. Dixon, "Energy-management system for a hybrid electric vehicle, using ultracapacitors and neural networks," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 53, no. 2, pp. 614–623, April 2006.
-

- [29] A. Florescu, S. Bacha, I. Munteanu, A. I. Bratcu, and A. Rumeau, “Adaptive frequency-separation-based energy management system for electric vehicles,” *Journal of Power Sources*, vol. 280, pp. 410 – 421, 2015. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775315001330>
- [30] W. Yanzi, X. changle, and W. Wang, “Energy management strategy based on fuzzy logic for a new hybrid battery-ultracapacitor energy storage system,” in *2014 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*, Aug 2014, pp. 1–5.
- [31] C. Romaus, D. Wimmelbücker, K. S. Stille, and J. Böcker, “Self-optimization energy management considering stochastic influences for a hybrid energy storage of an electric road vehicle,” in *2013 International Electric Machines Drives Conference*, May 2013, pp. 67–74.
- [32] C. Zhao, H. Yin, and C. Ma, “Two-level energy management strategy for a fuel cell-battery-ultracapacitor hybrid system,” in *IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Oct 2016, pp. 2135–2140.
- [33] S. Bourdim, T. Azib, K. E. Hemsas, and C. Larouci, “Efficient energy management strategy for fuel cell ultracapacitor hybrid system,” in *2016 International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC)*, Nov 2016, pp. 1–6.
- [34] M. Choi, J. Lee, and S. Seo, “Real-time optimization for power management systems of a battery/supercapacitor hybrid energy storage system in electric vehicles,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 63, no. 8, pp. 3600–3611, Oct 2014.
- [35] Z. Chen, C. C. Mi, R. Xiong, J. Xu, and C. You, “Energy management of a power-split plug-in hybrid electric vehicle based on genetic algorithm and quadratic programming,” *Journal of Power Sources*, vol. 248, no. 0, pp. 416 – 426, 2014.
- [36] W. Xiong, Y. Zhang, and C. Yin, “Optimal energy management for a series-parallel hybrid electric bus,” *Energy Conversion and Management*, vol. 50, no. 7, pp. 1730 – 1738, 2009.
- [37] W. Shabbir and S. A. Evangelou, “Real-time control strategy to maximize hybrid electric vehicle powertrain efficiency,” *Applied Energy*, vol. 135, no. 0, pp. 512 – 522, 2014.
-

-
- [38] D. Sun, F. Lan, and J. Chen, “Energy management strategy research and performance simulation for electric vehicles based on dual-energy storage system,” in *Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering (ICIII), 2013 6th International Conference on*, vol. 3, Nov 2013, pp. 442–445.
- [39] J. X. Junzhi Zhang, Xin Lu and B. Li, “Regenerative braking system for series hybrid electric city bus,” *The World Electric Vehicle Journal*, vol. 2, no. 4, pp. 128 – 134, 2008.
- [40] J. Cao, B. Cao, Z. Bai, and W. Chen, “Energy-regenerative fuzzy sliding mode controller design for ultracapacitor-battery hybrid power of electric vehicle,” in *Mechatronics and Automation, 2007. ICMA 2007. International Conference on*, Aug 2007, pp. 1570–1575.
- [41] F. Wang, X. Yin, H. Luo, and Y. Huang, “A series regenerative braking control strategy based on hybrid-power,” in *Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring (CDCIEM), 2012 International Conference on*, March 2012, pp. 65–69.
- [42] K. X. Guoqing Xu, Weimin Li and Z. Song, “An intelligent regenerative braking strategy for electric vehicle,” *Energies*, no. 4, pp. 1461 – 1477, 2011.
- [43] J. Armenta, A. Mendoza-Torres, N. Visairo, and C. Núñez, “Study of performance of power train topology for electric vehicle,” in *2016 13th International Conference on Power Electronics (CIEP)*, June 2016, pp. 81–86.
- [44] F. C. Nash, *Automotive fundamentals*, 5th ed. McGraw-Hill Ryerson Ltd, 1985.
- [45] [Online]. Available: <http://www.brusa.biz/produkte/antrieb/antriebseinheiten/dtso1-096.html>
- [46] [Online]. Available: <http://www.ankoenerji.com.tr/images/upload/IPM1.pdf>
- [47] S. J. Chapman, *Máquinas eléctricas*, 5th ed. México, México: McGraw Hill, 2012.
- [48] H. Liu, Z. Wang, J. Cheng, and D. Maly, “Improvement on the cold cranking capacity of commercial vehicle by using supercapacitor and lead-acid battery hybrid,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 58, no. 3, pp. 1097–1105, March 2009.
- [49] R. A. Dougal, S. Liu, and R. E. White, “Power and life extension of battery-ultracapacitor hybrids,” *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, vol. 25, no. 1, pp. 120–131, Mar 2002.
-

-
- [50] Z. Amjadi and S. S. Williamson, "Power-electronics-based solutions for plug-in hybrid electric vehicle energy storage and management systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 2, pp. 608–616, Feb 2010.
- [51] M. B. Camara, H. Gualous, F. Gustin, A. Berthon, and B. Dakyo, "dc/dc converter design for supercapacitor and battery power management in hybrid vehicle applications-polynomial control strategy," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 2, pp. 587–597, Feb 2010.
- [52] W. Lhomme, P. Delarue, P. Barrade, A. Bouscayrol, and A. Rufer, "Design and control of a supercapacitor storage system for traction applications," in *Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005 Industry Applications Conference, 2005.*, vol. 3, Oct 2005, pp. 2013–2020 Vol. 3.
- [53] J. Cao and A. Emadi, "A new battery/ultracapacitor hybrid energy storage system for electric, hybrid, and plug-in hybrid electric vehicles," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, no. 1, pp. 122–132, Jan 2012.
- [54] T. J. Barlow, S. Latham, I. S. McCrae, and P. G. Boulter, *A reference book of driving cycles for use in the measurement of road vehicle emissions*, 3rd ed. Berkshire, UK: Transport Research Laboratory, 2009.
- [55] R. Tjandra, H. Qiu, G. Wilson, X. Liu, Y. Tang, and P. Venkatesh, "Design consideration on size of hybrid electric marine vessel's battery energy storage-ferry case study," in *2017 Asian Conference on Energy, Power and Transportation Electrification (ACEPT)*, Oct 2017, pp. 1–5.
- [56] J. Dixon and M. Ortuzar, "Ultracapacitors + dc-dc converters in regenerative braking system," *Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE*, vol. 17, no. 8, pp. 16–21, Aug 2002.
- [57] S. F. Tie and C. W. Tan, "A review of power and energy management strategies in electric vehicles," in *Intelligent and Advanced Systems (ICIAS), 2012 4th International Conference on*, vol. 1, June 2012, pp. 412–417.
- [58] R. Schupbach and J. Balda, "Comparing dc-dc converters for power management in hybrid electric vehicles," in *Electric Machines and Drives Conference, 2003. IEMDC'03. IEEE International*, vol. 3, June 2003, pp. 1369–1374 vol.3.
- [59] K. Ogata, *Ingeniería de control moderna*, 5th ed. Madrid, España: Pearson, 2010.
-

-
- [60] P. M. Jones and C. M. Mitchell, “Human-computer cooperative problem solving: theory, design, and evaluation of an intelligent associate system,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 25, no. 7, pp. 1039–1053, Jul 1995.
- [61] P. M. Jones and C. A. Jasek, “Intelligent support for activity management (isam): an architecture to support distributed supervisory control,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, vol. 27, no. 3, pp. 274–288, May 1997.
- [62] J. Armenta, C. Núñez, N. Visairo, and I. Lázaro, “An advanced energy management system for controlling the ultracapacitor discharge and improving the electric vehicle range,” *Journal of Power Sources*, vol. 284, pp. 452 – 458, 2015. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775315004723>
- [63] [Online]. Available: <http://www.brusa.biz/en/products/drive/controller-400-v/dmc514.html>
- [64] [Online]. Available: <http://www.brusa.biz/produkte/antrieb/antriebseinheiten/dtsp1.html>
-

