



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

INSTITUTO DE ENERGÍAS RENOVABLES

INSTITUTO DE INGENIERÍA

**Análisis de flujos de potencia en un
vehículo ligero de tracción eléctrica de
baterías para la integración de celdas
de combustible PEM**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero en Energías Renovables

P R E S E N T A

Salvador Vidal Bravo

DIRECTOR DE TESIS ACADÉMICO

Dr. Javier de la Cruz Soto



Temixco, Mor., 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Membrete de la Biblioteca

Jurado Asignado

Nota al lector

El presente trabajo se publicará en una revista científica, por lo tanto, no se permite reproducir su contenido hasta que se haya publicado.

ÍNDICE GENERAL

Índice de Figuras	xiii
Índice de Gráficas	xvii
Índice de Tablas	xxiii
Nomenclatura	xxv
Acrónimos	xxxí
Resumen	xxxiii
Agradecimientos	xxxv
1. Introducción	1
1.1. Revisión de literatura	7
1.2. Objetivos	8
1.2.1. Objetivo general	8
1.2.2. Objetivos específicos.....	8
1.3. Estructura del trabajo	8
2. Marco Teórico	9
2.1. Conceptos básicos de vehículos eléctricos	9
Introducción	9
2.1.1. Historia de los vehículos eléctricos	9
2.1.2. Clasificación de vehículos en general	11
2.1.3. Trenes de potencia.....	11
2.1.3.1. Vehículo convencional de motor de combustión interna (ICE)	12
2.1.3.2. Vehículo eléctrico a baterías (EV).....	12
2.1.3.3. Vehículo híbrido eléctrico (HEV).....	13
2.1.3.4. Vehículo eléctrico a celdas de combustible (FCEV).....	15
2.1.3.5. Arquitectura de un vehículo eléctrico ligero (LEV)	16
2.1.4. Ciclos de manejo	17
2.2. Carga mecánica	19
Introducción	19
2.2.1. Dinámica de movimiento lineal	20
2.2.1.1. Fuerza de arrastre aerodinámico	20
2.2.1.2. Fuerza normal.....	21
2.2.1.3. Fuerza de resistencia a la rodadura	21
2.2.1.4. Fuerza Tangencial.....	22

2.2.1.5. Fuerza de Tracción	22
2.2.1.6. Potencia de tracción	23
2.2.1.7. Acoplamiento mecánico	24
2.3. Motores Eléctricos.....	27
Introducción	27
2.3.1. Aspectos generales	27
2.3.2. Tipos de motores y sus características.....	28
2.3.2.1. Motores de Corriente Alterna (CA)	28
2.3.2.2. Motores de Corriente Directa (CD).....	29
2.3.3. Principales tipos de motores empleados en vehículos eléctricos	30
2.3.4. Motores de corriente directa con escobillas de devanado en campo (wound field).....	30
2.3.4.1. Modelo eléctrico de un motor de corriente directa	31
2.3.4.2. Fuerza electromotriz.....	32
2.3.4.3. Potencia electromecánica del motor.....	33
2.3.4.4. Potencia eléctrica.....	33
2.4. Electrónica de potencia y control de velocidad.....	35
Introducción	35
2.4.1. Convertidores de potencia.....	36
2.4.2. Dispositivos semiconductores de potencia.....	36
2.4.3. Tipos de convertidores de potencia y sus características	37
2.4.4. Convertidores CD/CD.....	38
2.4.5. Control por modulación por ancho de pulso PWM.....	39
2.4.6. Convertidor chopper.....	40
2.4.7. Accionamiento chopper de motor CD.....	40
2.5. Baterías	44
Introducción	44
2.5.1. Aspectos generales	44
2.5.2. Características técnicas y criterios de selección.....	45
2.5.3. Baterías Ácido-Plomo (Lead-acid batteries) [67]	45
2.5.4. Modelo Eléctrico de Baterías de Ácido-Plomo.....	46
2.5.4.1. Parámetros de desempeño de una batería.....	48
a) Capacidad nominal	48
b) Tasa de carga/descarga	48
c) Estado de carga (SOC)	48
2.6. Celdas de Combustible	51
Introducción	51
2.6.1. Aplicaciones	52
2.6.2. Tipos de celdas de combustible y sus características	53
2.6.3. Celdas de combustible de membrana de intercambio protónico (PEMFC)	53

2.6.4. Fundamentos de operación de una celda de combustible PEM	55
2.6.4.1. Desempeño de una celda de combustible PEM	55
3. Metodología	59
3.1. Descripción del sistema real	61
3.1.1. Características físicas del vehículo	61
3.1.2. Principales componentes del sistema de tracción	62
3.1.3. Conexión eléctrica.....	64
3.2. Modelo inicial del vehículo	66
3.2.1. Modelo eléctrico inicial.....	66
3.2.2. Modelo matemático en estado estacionario	67
3.3. Metodología de experimentación	69
3.3.1. Determinación de la velocidad del vehículo	69
3.3.1.1. Registro de velocidad	70
3.3.1.2. Instalación del dinamo	72
3.3.2. Determinación de potencia en motor y baterías	74
4. Resultados	76
4.1. Resultados de mediciones preliminares	77
4.1.1. Verificación de voltaje en terminales y estado de carga en baterías.....	77
4.1.2. Verificación de presión en los neumáticos	78
4.2. Obtención de parámetros del motor, convertidor de potencia y baterías	79
4.2.1. Determinación de resistencia e inductancia en armadura y campo del motor	79
4.2.2. Determinación de valores de eficiencia del convertidor de potencia.....	79
4.2.3. Determinación de curva de descarga y resistencia interna.....	80
4.3. Resultados de las pruebas en campo	83
4.3.1. Verificación de conexiones.....	83
4.3.2. Resultados del primer recorrido	83
4.3.3. Resultados del segundo recorrido	87
4.3.3.1. Resultados parciales del segundo recorrido (tramos de velocidad constante)	90
4.4. Verificación del modelo matemático en estado estacionario	91
4.4.1. Parámetros de operación en estado estacionario	91
4.4.2. Modelo orientado hacia atrás (backward-facing model).....	93
4.4.3. Modelo orientado hacia adelante (forward-facing model).....	98
4.5. Modelo básico del vehículo	103
4.5.1. Modelo eléctrico básico en estado dinámico.....	103
4.5.2. Modelo matemático básico en estado dinámico.....	104
4.5.2.1. Aceleración en el eje de tracción.....	104
4.5.2.2. Aceleración en el motor.....	106
4.5.2.3. Voltaje y estado de carga en las baterías	106

4.5.2.4. Requerimientos de energía y autonomía	106
5. Simulación	107
5.1. Implementación del modelo eléctrico en PSIM	108
5.2. Estrategias de simulación.....	110
5.2.1. Simulación de subsistemas separados	110
5.2.1.1. Simulación del motor.....	111
5.2.1.2. Simulación del motor y caja de engranes	115
5.2.1.3. Simulación del motor, caja de engranes y control de velocidad	119
5.2.1.4. Simulación de baterías	125
5.2.1.5. Simulación de la carga mecánica	130
5.2.2. Simulación del sistema completo	134
5.2.2.1. Subcircuito de la batería ácido plomo	135
5.2.2.2. Subcircuito del convertidor de potencia.....	136
5.2.2.3. Subcircuito de la carga mecánica	136
5.3. Resultados de simulación del sistema completo.....	137
5.3.1. Velocidad lineal, distancia y aceleración.....	139
5.3.2. Velocidad rotacional y torque.....	140
5.3.3. Voltaje y corriente.....	141
5.3.4. Potencia y energía	143
5.3.5. Descarga de la batería.....	146
5.3.6. Análisis de autonomía	146
5.4. Simulación de ciclos de manejo	150
5.4.1. Ciclo de manejo 1: Japanese 10 Dynamometer Driving Schedule	151
5.4.2. Ciclo de manejo 2: UN/ECE Elementary Urban Cycle	153
5.4.3. Ciclo de manejo 3: WLTC class 1 (Low speed).....	155
5.4.4. Ciclo de manejo 4: New York City Cycle	157
5.4.5. Análisis de autonomía de los resultados de la simulación de ciclos de manejo	159
6. Modelo de Arquitectura Híbrida de Celdas de Combustible	161
6.1. Simulación de la celda de combustible PEM	164
6.1.1. Celda de combustible empleada en la simulación.....	165
6.1.1.1. Curva de polarización de la celda de combustible H2000	165
6.1.2. Modelo de la celda de combustible implementada en PSIM	168
6.1.3. Resultados de la simulación de la celda de combustible H2000.....	172
6.2. Simulación de la configuración híbrida.....	174
6.2.1. Simulación del convertidor de potencia CD/CD reductor	174
6.2.2. Resultados de la simulación de la configuración híbrida.....	178
6.2.2.1. Velocidad lineal y distancia	180
6.2.2.2. Velocidad rotacional y torque.....	181

6.2.2.3. Voltaje y corriente.....	182
6.2.2.4. Potencia y energía	185
6.2.2.5. Descarga de la batería.....	187
6.2.2.6. Consumo de hidrógeno.....	187
6.2.2.7. Análisis de autonomía	190
6.3. Diagrama de conexión	197
7. Conclusiones	198
7.1. Conclusiones generales.....	198
7.2. Análisis de resultados	199
7.2.1. Pruebas de campo.....	199
7.2.2. Pruebas en laboratorio al motor, convertidor y baterías.....	200
7.2.3. Verificación del modelo matemático	201
7.2.4. Resultados de simulación.....	201
7.2.5. Configuración híbrida	203
7.3. Trabajo futuro	205
Anexos	207
Anexo A	
Diagrama de elementos mecánicos y eléctricos del vehículo	209
Anexo B	
Placas de componentes instalados del carro de golf.....	211
Anexo C	
Cálculo de la velocidad máxima en el eje de tracción de un carro de golf	213
Anexo D	
Cálculo de constante del motor	215
Anexo E	
Cálculo de torque máximo en el eje de tracción de un carro de golf.....	216
Anexo F	
Cálculo de potencia mecánica nominal en el rotor del motor	217
Anexo G	
Cálculo de velocidad y torque en el eje de tracción para un valor de eficiencia de transmisión	218
Anexo H	
Cálculo del momento de inercia de la carga mecánica y el motor.....	221
Anexo I	
Cálculo de ciclo de trabajo en el convertidor CD/CD chopper.....	226
Anexo J	
Filtro pasa-bajos en el convertidor de potencia CD/CD chopper.....	228

Anexo K	
Curvas de operación de la batería	229
Anexo L	
Determinación de estado de carga SOC de una batería como una función del tiempo.....	231
Anexo M	
Perfil de velocidad controlada de aproximadamente 5 km/h	233
Perfil de velocidad controlada de aproximadamente 10 km/h	234
Perfil de velocidad controlada de aproximadamente 15 km/h	236
Anexo N	
Ciclos de manejo de baja velocidad	238
Ciclo de manejo 1: Japanese 10 Dynamometer Driving Schedule	238
Ciclo de manejo 2: UN/ECE Elementary Urban Cycle	239
Ciclo de manejo 3: WLTC class 1 (Low speed).....	240
Ciclo de manejo 4: New York City Cycle	241
Anexo O	
Autonomía de un carro de golf en condiciones de operación nominal	242
Autonomía de un carro de golf en condiciones de velocidad variable.....	247
Anexo P	
Cálculo del volumen del tanque de hidrógeno presurizado	249
Cálculo de la masa del tanque de hidrógeno presurizado	251
Cálculo de la energía almacenada en el tanque	252
Anexo Q	
Cálculo del voltaje termodinámico de una celda de combustible PEM	253
Anexo R	
Circuitos del tren de potencia	255
Anexo S	
Circuitos del tren de potencia eléctrico híbrido	261
Bibliografía	267

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Arquitectura de un vehículo convencional de combustión interna.....	12
Figura 2.2 Arquitectura de un vehículo eléctrico a baterías.....	13
Figura 2.3 Arquitectura de un vehículo híbrido eléctrico en serie.....	14
Figura 2.4 Arquitectura de un vehículo híbrido eléctrico en paralelo.....	14
Figura 2.5 Arquitectura de un vehículo híbrido eléctrico en serie-paralelo.....	15
Figura 2.6 Arquitectura de un vehículo eléctrico de celdas de combustible.....	16
Figura 2.7 Arquitectura de un vehículo eléctrico ligero con un motor de corriente directa.....	16
Figura 2.8 Sistema de ejes en un vehículo empleado por la SAE.....	19
Figura 2.9 Fuerzas implicadas en el movimiento de un vehículo en una pendiente.....	20
Figura 2.10 Acoplamiento mecánico de dos cargas M y L.....	24
Figura 2.11 Acoplamiento mecánico entre un motor y el eje de neumáticos por medio de una caja de engranes reductora de velocidad.....	25
Figura 2.12 Clasificación de los principales tipos de motores eléctricos.....	28
Figura 2.13 Clasificación de control de motores eléctricos para aplicaciones en HEV y EV.....	30
Figura 2.14 Diagrama de la estructura básica de un motor CD de devanado en campo.....	31
Figura 2.15 Circuito equivalente de un motor CD devanado en serie.....	31
Figura 2.16 Diagrama de bloques de un sistema de electrónica de potencia.....	35
Figura 2.17 Diagrama general de un convertidor CD/CD.....	39
Figura 2.18 Esquema de convertidor chopper entre una fuente V y una carga R	40
Figura 2.19 Configuración básica de convertidor tipo <i>chopper fed DC motor drive</i>	41
Figura 2.20 Operación de un accionamiento <i>chopper</i>	41
Figura 2.21 Comportamiento de la tensión y corriente durante la conmutación del interruptor.....	42
Figura 2.22 Diagrama básico de operación de una batería.....	44
Figura 2.23 Modelo básico de una batería ideal con un voltaje de salida constante.....	47
Figura 2.24 Circuito equivalente de una batería real con un voltaje de salida y resistencia interna variables respecto al estado de carga.....	50
Figura 2.25 Esquema de una celda de combustible simple.....	51
Figura 2.26 Esquema general de una celda de combustible PEM.....	54
Figura 2.27 Curva característica de corriente-voltaje para una celda de combustible PEM.....	56
Figura 3.1 Estructura básica de la teoría de modelación.....	60
Figura 3.2 Carro de golf empleado como vehículo utilitario en actividades deportivas.....	61

Figura 3.3 Principales componentes del carro de golf.....	62
Figura 3.4 Diagrama de cableado original del carro de golf Yamaha G-16E.	65
Figura 3.5 Flujo de potencia en los componentes de un carro de golf.....	66
Figura 3.6 Circuito equivalente del tren de potencia de un carro de golf (modelo estacionario).	67
Figura 3.7 Modelo matemático inicial en estado estacionario del tren de potencia de un vehículo eléctrico ligero.....	68
Figura 3.8 Plano de INEEL y la ruta empleada durante las pruebas al vehículo.	69
Figura 3.9 Esquema de funcionamiento de un dinamo como generador de corriente alterna.	70
Figura 3.10 Esquema de acoplamiento del dinamo al CNC.	71
Figura 3.11 Relación entre los diámetros de la rueda del dinamo d y el neumático de tracción T.	72
Figura 3.12 Medición de voltaje en el dinamo.	73
Figura 3.13 Diagrama de conexión del equipo de medición en el vehículo.	74
Figura 4.1 Circuito equivalente del tren de potencia de un carro de golf (modelo dinámico).	103
Figura 4.2 Modelo matemático básico en estado dinámico del tren de potencia de un vehículo eléctrico ligero.	105
Figura 5.1 Circuito implementado en PSIM para la simulación del motor.....	111
Figura 5.2 Circuito implementado en PSIM para la simulación del motor y la carga mecánica.....	115
Figura 5.3 Circuito empleado para la simulación del motor, carga mecánica y convertidor de potencia	120
Figura 5.4 Circuito empleado para la simulación de la batería.....	125
Figura 5.5 Circuito empleado para la simulación de la carga mecánica.....	131
Figura 6.1 Configuración de un vehículo de celdas de combustible equipado con baterías recargables	161
Figura 6.2 Configuración <i>soft hybrid</i> de tren de potencia de celdas de combustible y baterías.	162
Figura 6.3 Configuración <i>hard hybrid</i> de tren de potencia de celdas de combustible y baterías.	163
Figura 6.4 Circuito equivalente de la celda de combustible.	164
Figura 6.5 Circuito equivalente de la celda de combustible PEM implementado en PSIM.	168
Figura 6.6 Circuito que modela la ecuación de Nernst.	169
Figura 6.7 Circuito que modela la ecuación del voltaje de activación.	169
Figura 6.8 Circuito que modela la ecuación del voltaje de concentración.	169
Figura 6.9 Circuito que modela la ecuación del voltaje por resistencia.	169
Figura 6.10 Circuito que modela la ecuación de flujo de hidrógeno.	170
Figura 6.11 Circuito del convertidor de potencia diseñado para conectar la celda de combustible con una carga de corriente variable.	175
Figura 6.12 Circuito empleado para controlar el flujo de potencia de las baterías y la celda de combustible.	179

Figura 6.13 Diagrama de conexión del sistema de la celda de combustible al carro de golf.	197
Figura A.1 Diagrama de conexiones eléctricas y mecánicas reales en el carro de golf.....	209
Figura B.1 Placa del motor CD instalado en el carro de golf.	211
Figura B.2 Placa del controlador de velocidad instalado en el carro de golf.....	212
Figura B.3 Placa de una batería ácido-plomo instalada en el carro de golf.....	212
Figura H.1 Distribución de fuerzas en un vehículo de dos ejes.....	222
Figura H.2 Dimensiones del carro de golf empleadas para aproximar el centro de gravedad.....	223
Figura P.1 Volumen del tanque de hidrógeno.	249
Figura R.1 Circuito completo del tren de potencia del vehículo eléctrico ligero.	257
Figura R.2 Subcircuito de la batería ácido-plomo.	258
Figura R.3 Subcircuito del convertidor de potencia.	259
Figura R.4 Subcircuito de la carga mecánica.....	260
Figura S.1 Circuito completo del tren de potencia híbrido del vehículo eléctrico ligero.	263
Figura S.2 Subcircuito de la celda de combustible.	264
Figura S.3 Subcircuito del convertidor de potencia diseñado para conectar la celda de combustible.....	265

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 2.1 Ciclo de manejo J10 Dynamometer Driving Schedule.....	18
Gráfica 3.1 Caracterización del dinamo empleado para medir la velocidad en el vehículo.....	71
Gráfica 4.1 Perfil de descarga de la batería a 37 A, 5h.....	81
Gráfica 4.2 Valores de resistencia interna de la batería ácido-plomo en para distintos valores de SOC.....	81
Gráfica 4.3 Curva de estado de carga determinada para una capacidad nominal de 185 Ah.....	82
Gráfica 4.4 Voltaje medido en baterías y motor durante el primer recorrido.....	84
Gráfica 4.5 Corriente medida en baterías y motor durante el primer recorrido.....	84
Gráfica 4.6 Potencia alcanzada en baterías y motor durante el primer recorrido.....	85
Gráfica 4.7 Rangos de eficiencia en el convertidor durante el primer recorrido.....	86
Gráfica 4.8 Valores de eficiencia en el convertidor.....	86
Gráfica 4.9 Velocidad medida en el neumático del eje de tracción.....	88
Gráfica 4.10 Voltaje medido en las terminales del motor.....	88
Gráfica 4.11 Corriente medida en baterías y motor durante el segundo recorrido.....	89
Gráfica 4.12 Velocidad lineal medida en los neumáticos del vehículo.....	93
Gráfica 4.13 Velocidad rotacional en el motor y el eje de tracción calculados con el BFM.....	94
Gráfica 4.14 Torque en el motor y eje de tracción calculados con el BFM.....	94
Gráfica 4.15 Voltaje en terminales y FEM en armadura calculados con el BFM.....	95
Gráfica 4.16 Comparación de voltaje real en el motor, voltaje calculado con el BFM y voltaje nominal en baterías.....	95
Gráfica 4.17 Datos de corriente en el motor y baterías reales comparados con los valores calculados empleando el BFM.....	96
Gráfica 4.18 Potencia calculada en el eje de tracción, motor y baterías empleando el BFM comparada con la potencia eléctrica real en las terminales del motor.....	97
Gráfica 4.19 Rangos de eficiencia en el motor calculados empleando el BFM.....	97
Gráfica 4.20 Curva de eficiencia teórica del motor eléctrico.....	98
Gráfica 4.21 Voltaje medido en las terminales del motor y el valor de voltaje nominal en baterías.....	98
Gráfica 4.22 Corriente medida en las terminales del motor y las baterías.....	99
Gráfica 4.23 Torque en el motor y eje de tracción calculados con el FFM.....	99
Gráfica 4.24 Voltaje medido en terminales del motor y FEM en armadura calculados con el FFM.....	100
Gráfica 4.25 Velocidad rotacional en el motor y el eje de tracción calculados con el FFM.....	100

Gráfica 4.26 Velocidad lineal calculada con el FFM comparada con la velocidad lineal medida en los neumáticos del vehículo.....	101
Gráfica 4.27 Potencia calculada en el eje de tracción, motor y baterías empleando el FFM comparada con la potencia eléctrica real del motor	101
Gráfica 4.28 Corriente real y calculada con el FFM.....	102
Gráfica 4.29 Valores de ciclo de trabajo en el convertidor calculados con el FFM.....	102
Gráfica 5.1 Voltaje registrado durante la simulación del motor.....	113
Gráfica 5.2 Corriente registrada durante la simulación del motor.....	113
Gráfica 5.3 Torque registrado durante la simulación del motor.....	114
Gráfica 5.4 Velocidad rotacional registrada durante la simulación del motor.....	114
Gráfica 5.5 Voltaje en terminales y armadura registrados durante la simulación del motor y la carga mecánica.....	116
Gráfica 5.6 Corriente registrada durante la simulación del motor y la carga mecánica.....	117
Gráfica 5.7 Torque registrado durante la simulación del motor y carga mecánica.....	117
Gráfica 5.8 Velocidad rotacional registrada durante la simulación del motor y la carga mecánica.....	118
Gráfica 5.9 Velocidad lineal registrada durante la simulación del motor y la carga mecánica.....	118
Gráfica 5.10 Voltaje en terminales y armadura registrados durante la simulación del motor, carga mecánica y convertidor de potencia.....	122
Gráfica 5.11 Corriente registrada durante la simulación del motor, carga mecánica y convertidor de potencia.....	122
Gráfica 5.12 Torque registrado durante la simulación del motor, carga mecánica y convertidor de potencia.....	123
Gráfica 5.13 Velocidad rotacional registrada durante la simulación del motor, carga mecánica y convertidor de potencia.....	123
Gráfica 5.14 Velocidad lineal registrada durante la simulación del motor, carga mecánica y convertidor de potencia.....	124
Gráfica 5.15 Valores de corriente constante para distintos perfiles de capacidad empleados en la simulación del proceso de descarga en el circuito de la batería.....	128
Gráfica 5.16 Valores de voltaje en terminales para distintos perfiles de capacidad empleados en la simulación del proceso de descarga en el circuito de la batería.....	129
Gráfica 5.17 Curvas de estado de carga para distintos perfiles de capacidad empleados en la simulación del proceso de descarga en el circuito de la batería.....	129
Gráfica 5.18 Comparación de las curvas de descarga obtenidas en las pruebas de laboratorio y simulación.....	130

Gráfica 5.19 Torque necesario para mover la carga mecánica a distintos valores de velocidad constante en el eje de tracción en una superficie plana.	133
Gráfica 5.20 Aumento de torque debido a los efectos de la inclinación del camino.	133
Gráfica 5.21 Comparación de los datos de velocidad del vehículo medidos en pruebas y los valores obtenidos en la simulación.	139
Gráfica 5.22 Distancia calculada a partir de los datos de velocidad obtenidos en la simulación.	140
Gráfica 5.23 Valores de aceleración instantánea calculados y los obtenidos en la simulación.	140
Gráfica 5.24 Comparación de valores de velocidad rotacional en el motor y eje de tracción.	140
Gráfica 5.25 Torque en el motor y eje de tracción.	141
Gráfica 5.26 Comparación de datos de voltaje medido en el motor y valores obtenidos en la simulación.	141
Gráfica 5.27 Valores de voltaje en motor y baterías obtenidos en la simulación.	142
Gráfica 5.28 Valores de corriente en motor y baterías obtenidos en la simulación.	142
Gráfica 5.29 Comparación entre los datos reales de corriente en el motor y los valores obtenidos en la simulación.	143
Gráfica 5.30 Comparación de los datos reales de corriente en las baterías y los valores obtenidos en la simulación.	143
Gráfica 5.31 Potencia eléctrica y mecánica en el motor calculada a partir de los valores obtenidos durante la simulación.	144
Gráfica 5.32 Comparación de potencia en baterías, motor y eje de tracción calculados a partir de datos reales y los obtenidos en la simulación.	144
Gráfica 5.33 Potencia en baterías calculada a partir de los valores obtenidos en la simulación.	145
Gráfica 5.34 Comparación de la energía calculada a partir de mediciones de potencia reales y la obtenida al simular el ciclo de manejo.	145
Gráfica 5.35 Estado de carga de las baterías registrado durante la simulación del ciclo de manejo.	146
Gráfica 5.36 Comparación de los datos de velocidad del ciclo de manejo <i>Japanese 10 Dynamometer Driving Schedule</i> con los resultados de la simulación.	151
Gráfica 5.37 Comparación de los datos de distancia recorrida en el ciclo de manejo <i>Japanese 10 Dynamometer Driving Schedule</i> con los resultados de la simulación.	151
Gráfica 5.38 Requerimiento de energía para el ciclo de manejo <i>Japanese 10 Dynamometer Driving Schedule</i> , calculada a partir de los datos de potencia obtenidos en la simulación.	151
Gráfica 5.39 Descarga de la batería durante la simulación del ciclo de manejo <i>Japanese 10 Dynamometer Driving Schedule</i>	152
Gráfica 5.40 Comparación de los datos del ciclo de manejo <i>UN/ECE Elementary Urban Cycle</i> con los resultados de la simulación.	153

Gráfica 5.41 Comparación de los datos de distancia recorrida en el ciclo de manejo <i>UN/ECE Elementary Urban Cycle</i> con los resultados de la simulación.	153
Gráfica 5.42 Requerimiento de energía para el ciclo de manejo <i>UN/ECE Elementary Urban Cycle</i> , calculada a partir de los datos de potencia obtenidos en la simulación.	153
Gráfica 5.43 Descarga de la batería durante la simulación del ciclo de manejo <i>UN/ECE Elementary Urban Cycle</i>	154
Gráfica 5.44 Comparación de los datos del ciclo de manejo <i>WLTC class 1 (Low speed)</i> con los resultados de la simulación.	155
Gráfica 5.45 Comparación de los datos de distancia recorrida en el ciclo de manejo <i>WLTC class 1 (Low speed)</i> con los resultados de la simulación.	155
Gráfica 5.46 Requerimiento de energía para el ciclo de manejo <i>WLTC class 1 (Low speed)</i> , calculada a partir de los datos de potencia obtenidos en la simulación.	155
Gráfica 5.47 Descarga de la batería durante la simulación del ciclo de manejo <i>WLTC class 1 (Low speed)</i>	156
Gráfica 5.48 Comparación de los datos del ciclo de manejo <i>New York City Cycle</i> con los resultados de la simulación.	157
Gráfica 5.49 Comparación de los datos de distancia recorrida en el ciclo de manejo <i>New York City Cycle</i> con los resultados de la simulación.	157
Gráfica 5.50 Requerimiento de energía para el ciclo de manejo <i>New York City Cycle</i> , calculada a partir de los datos de potencia obtenidos en la simulación.	157
Gráfica 5.51 Descarga de la batería durante la simulación del ciclo de manejo <i>New York City Cycle</i>	158
Gráfica 6.1 Curva de polarización de la celda de combustible H2000.	166
Gráfica 6.2 Curva de potencia de la celda de combustible H2000.	167
Gráfica 6.3 Curva de consumo de hidrógeno en función de la potencia.	167
Gráfica 6.4 Perfil de corriente implementado en la fuente CD para simular la celda de combustible.	172
Gráfica 6.5 Curva de polarización obtenido mediante la simulación del modelo de la celda de combustible.	172
Gráfica 6.6 Curva de potencia obtenido mediante la simulación del modelo de la celda de combustible.	173
Gráfica 6.7 Curva de consumo de hidrógeno en función de la potencia obtenida en la simulación del modelo de celda de combustible.	173
Gráfica 6.8 Curvas de corriente en la entrada y salida del convertidor en el intervalo de operación obtenidas en la simulación.	176

Gráfica 6.9 Curvas de voltaje en la entrada y salida del convertidor en el intervalo de operación obtenidas en la simulación.	177
Gráfica 6.10 Comparación de los datos de velocidad del ciclo de manejo <i>New_York_City_Cycle</i> con los resultados de la simulación del <i>LEV</i> y del <i>FC_LEV</i>	180
Gráfica 6.11 Comparación de los datos de distancia del ciclo de manejo <i>New_York_City_Cycle</i> con los resultados de la simulación del <i>LEV</i> y del <i>FC_LEV</i>	181
Gráfica 6.12 Comparación de los resultados de velocidad rotacional obtenidos en la simulación del <i>LEV</i> y del <i>FC_LEV</i>	181
Gráfica 6.13 Comparación de los resultados de torque obtenidos en la simulación del <i>LEV</i> y del <i>FC_LEV</i>	182
Gráfica 6.14 Comparación de los resultados de voltaje en motor obtenidos en la simulación del <i>LEV</i> y del <i>FC_LEV</i>	182
Gráfica 6.15 Comparación de los resultados de voltaje en motor, baterías y celda de combustible obtenidos en la simulación del <i>LEV</i> y del <i>FC_LEV</i>	183
Gráfica 6.16 Señal de conmutación registrada en los interruptores para controlar el flujo de potencia en la batería y la celda de combustible.	183
Gráfica 6.17 Comparación de los resultados de corriente en motor y baterías obtenidos en la simulación del <i>LEV</i> y del <i>FC_LEV</i>	184
Gráfica 6.18 Corriente en baterías y celda de combustible obtenidos en la simulación del <i>FC_LEV</i>	184
Gráfica 6.19 Comparación de los resultados de corriente en el bus principal obtenidos en la simulación del <i>LEV</i> y del <i>FC_LEV</i>	184
Gráfica 6.20 Comparación de los resultados de voltaje en el bus principal obtenidos en la simulación del <i>LEV</i> y del <i>FC_LEV</i>	185
Gráfica 6.21 Comparación de la potencia eléctrica y mecánica en el motor calculada a partir de los resultados obtenidos en la simulación del <i>LEV</i> y del <i>FC_LEV</i>	185
Gráfica 6.22 Comparación de la potencia en la batería calculada a partir de los resultados obtenidos en la simulación del <i>LEV</i> y del <i>FC_LEV</i>	186
Gráfica 6.23 Comparación de la energía suministrada por las baterías calculada a partir de los resultados obtenidos en la simulación del <i>LEV</i> y del <i>FC_LEV</i>	186
Gráfica 6.24 Comparación de las curvas de descarga obtenidas en la simulación del <i>LEV</i> y del <i>FC_LEV</i>	187
Gráfica 6.25 Valores de corriente en la entrada y salida del convertidor CD/CD reductor de la celda de combustible obtenidas durante la simulación.	188
Gráfica 6.26 Valores de voltaje en la entrada y salida del convertidor CD/CD reductor de la celda de combustible obtenidas durante la simulación.	188

Gráfica 6.27 Potencia a la salida del convertidor CD/CD reductor de la celda de combustible calculada a partir de los valores obtenidos en la simulación.	188
Gráfica 6.28 Energía suministrada por la celda de combustible calculada a partir de los datos obtenidos en la simulación.	189
Gráfica 6.29 Flujo de hidrógeno en la celda de combustible estimado a partir de los datos de potencia.	189
Gráfica 6.30 Volumen de hidrógeno requerido por la celda de combustible.	190
Gráfica K.1 Curva de desempeño de la batería.	229
Gráfica K.2 Curva de estado de carga de la batería según datos del fabricante.	229
Gráfica K.3 Curva de profundidad de descarga según datos del fabricante.	230
Gráfica M.1 Velocidad del vehículo controlada a 5 km/h.	233
Gráfica M.2 Voltaje en las terminales del motor para un perfil de velocidad controlada de 5 km/h.	233
Gráfica M.3 Corriente en las terminales del motor para un perfil de velocidad controlada de 5 km/h.	234
Gráfica M.4 Velocidad del vehículo controlada a 10 km/h.	234
Gráfica M.5 Voltaje en las terminales del motor para un perfil de velocidad controlada de 10 km/h.	235
Gráfica M.6 Corriente en las terminales del motor para un perfil de velocidad controlada de 10 km/h.	235
Gráfica M.7 Velocidad del vehículo controlada a 15 km/h.	236
Gráfica M.8 Voltaje en las terminales del motor para un perfil de velocidad controlada de 15 km/h.	236
Gráfica M.9 Corriente en las terminales del motor para un perfil de velocidad controlada de 15 km/h.	237
Gráfica N.1 Ciclo de manejo <i>Japanese 10 Dynamometer Driving Schedule</i>	238
Gráfica N.2 Ciclo de manejo <i>UN/ECE Elementary Urban Cycle</i>	239
Gráfica N.3 Ciclo de manejo <i>WLTC class 1 (Low speed)</i>	240
Gráfica N.4 Ciclo de manejo <i>New York City Cycle</i>	241
Gráfica O.1 Velocidad lineal máxima teórica y real de un carro de golf con una relación de 12.5:1 en la caja reductora.	244

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Total de emisiones netas de GEI por sector en México 2014	1
Tabla 2.1 Coeficientes de resistencia de rodadura a bajas velocidades.	21
Tabla 2.2 Principales tipos de celdas de combustible comunes y sus características.	53
Tabla 3.1 Dimensiones físicas de un carro de golf.	62
Tabla 3.2 Datos de la placa del motor instalado.	63
Tabla 3.3 Datos de placa de controlador de velocidad.....	64
Tabla 3.4 Datos de placa de una de las seis baterías instaladas.	64
Tabla 4.1 Valores de voltaje antes y después de recarga a 12V/10A/4h.	77
Tabla 4.2 Valores de presión en los neumáticos.....	78
Tabla 4.3 Parámetros del motor CD obtenidos con el analizador de impedancia.	79
Tabla 4.4 Valores de eficiencia del convertidor CD chopper para distintos valores de velocidad.	80
Tabla 4.5 Resumen de resultados de la primera prueba	87
Tabla 4.6 Resumen de resultados del segundo recorrido.	89
Tabla 4.7 Resumen de resultados de los recorridos cortos.	90
Tabla 4.8 Parámetros de operación empleados durante el cálculo del modelo en estado estacionario.	92
Tabla 5.1 Principales elementos de un circuito en PSIM y los colores que los representan.....	109
Tabla 5.2 Parámetros de simulación del motor	112
Tabla 5.3 Resumen de resultados de simulación del motor.	114
Tabla 5.4 Parámetros simulación de la caja de engranes y la carga mecánica.	116
Tabla 5.5 Resumen de resultados de simulación del motor y la carga mecánica.....	119
Tabla 5.6 Parámetros de simulación del convertidor de potencia y el control de velocidad.	121
Tabla 5.7 Resumen de resultados de simulación del motor, carga mecánica y convertidor de potencia.	124
Tabla 5.8 Parámetros de simulación del convertidor de potencia y el control de velocidad.	127
Tabla 5.9 Parámetros de desempeño de una batería ácido plomo tomados como referencia de la hoja de datos técnicos proporcionada por el fabricante.....	128
Tabla 5.10 Parámetros de simulación de la carga mecánica.	132
Tabla 5.11 Parámetros de simulación del sistema completo.	138
Tabla 5.12 Resultados de la simulación del sistema completo.	147
Tabla 5.13 Valores para el error entre las mediciones y la simulación.	148

Tabla 5.14 Resultados del análisis de autonomía para la simulación del sistema completo.....	149
Tabla 5.15 Resumen de resultados de la simulación del ciclo de manejo <i>Japanese 10 Dynamometer Driving Schedule</i>	152
Tabla 5.16 Resumen de resultados de la simulación del ciclo de manejo <i>UN/ECE Elementary Urban Cycle</i>	154
Tabla 5.17 Resumen de resultados de la simulación del ciclo de manejo <i>WLTC class 1 (Low speed)</i>	156
Tabla 5.18 Resumen de resultados de la simulación del ciclo de manejo <i>New York City Cycle</i>	158
Tabla 5.19 Resultados del análisis de autonomía para los cuatro ciclos de manejo.	159
Tabla 6.1 Especificaciones técnicas de una celda de combustible H2000.....	165
Tabla 6.2 Parámetros de simulación de la celda de combustible.	171
Tabla 6.3 Parámetros de operación para la simulación del convertidor de potencia diseñado para conectar la celda de combustible con una carga de corriente variable.....	176
Tabla 6.4 Parámetros de simulación del sistema híbrido.	180
Tabla 6.5 Resultados de la simulación del sistema híbrido para el ciclo de manejo <i>New_York_City_Cycle</i>	191
Tabla 6.6 Parámetros de autonomía del sistema híbrido para el ciclo de manejo <i>New_York_City_Cycle</i>	192
Tabla 6.7 Resultados de la simulación de los sistemas normal e híbrido para los cuatro ciclos de manejo.....	193
Tabla 6.8 Valores de consumo de hidrógeno obtenidos en la simulación de los sistemas normal e híbrido para los cuatro ciclos de manejo.....	194
Tabla 6.9 Resultados del análisis de autonomía de los sistemas normal e híbrido para los cuatro ciclos de manejo.	195
Tabla A.1 Principales componentes y conexiones del sistema de tracción de un carro de golf.	210
Tabla A.2 Dimensiones del vehículo.....	210
Tabla B.1 Datos de la placa del motor instalado.	211
Tabla B.2 Datos de placa del controlador de velocidad.	212
Tabla B.3 Datos de placa de una batería ácido-plomo.	212
Tabla C.1 Velocidad máxima en el eje de tracción para condiciones de potencia nominal en el motor.	214
Tabla E.1 Torque máximo en el eje de tracción para condiciones de potencia nominal en el motor.....	216
Tabla N.1 Parámetros del ciclo de manejo <i>Japanese 10 Dynamometer Driving Schedule</i>	238
Tabla N.2 Parámetros del ciclo de manejo <i>UN/ECE Elementary Urban Cycle</i>	239
Tabla N.3 Parámetros del ciclo de manejo <i>WLTC class 1 (Low speed)</i>	240
Tabla N.4 Parámetros del ciclo de manejo <i>New York City Cycle</i>	241
Tabla P.1 Datos del tanque de hidrógeno presurizado proporcionados por el fabricante.	251
Tabla P.2 Densidad gravimétrica de energía del hidrógeno.	252

NOMENCLATURA

$\dot{\omega}_T$	Aceleración angular del eje de tracción	rad/s ²
$\dot{\omega}_M$	Aceleración angular del motor	rad/s ²
a	Aceleración del vehículo	m/s ²
h_c	Altura del tanque de hidrógeno	m
h_V	Altura del vehículo	m
α	Ángulo de la superficie	grad
A_F	Área frontal del vehículo	m ²
b_V	Base del vehículo	m
C_x	Capacidad de la batería	Ah
Q	Capacidad liberada por una batería	Ah
E_x	Capacidad nominal de una batería	Wh
C	Capacitancia	F
q	Carga eléctrica	C
δ	Ciclo de trabajo	—
c_D	Coefficiente de arrastre	—
c_R	Coefficiente de rodadura	—
k_A	Constante de armadura	—
k_S	Constante de campo	—
K_M	Constante del motor	—
N_{Avg}	Constante de Avogadro	mol ⁻¹
F	Constante de Faraday	C/mol
R_U	Constante universal de los gases	J/mol · K
I_A	Corriente en armadura	A
I_S	Corriente en campo	A
I_B	Corriente en baterías	A
I_M	Corriente en terminales del motor	A
$I_{M,nom}$	Corriente nominal del motor	A
I_{FC}	Corriente de la celda de combustible	A
I_L	Rizado de corriente en el inductor	A
j	Densidad de corriente	A/m ²
j_0	Densidad de corriente de intercambio	A/m ²

ρ_{air}	Densidad del aire	kg/m ³
ρ_{H_2}	Densidad del hidrógeno	kg/m ³
θ_d	Diámetro de la rueda del dínamo	m
θ_T	Diámetro del neumático del eje de tracción	m
d	Distancia	m
η_{GB}	Eficiencia del diferencial mecánico	%
η_M	Eficiencia del motor	%
η_C	Eficiencia del convertidor de potencia	%
η_B	Eficiencia de la batería	%
η_V	Eficiencia del tren de potencia	%
ΔG	Energía libre de Gibbs	J/mol
ΔH	Entalpía	J/mol
ΔS	Entropía	J/mol · K
E_T	Energía total requerida	Wh
SOC	Estado de carga	%
z	Estado de carga en función del tiempo	%
E_A	FEM en armadura del motor	V
E_{cell}	FEM generada en la celda	V
ϕ	Flujo magnético	Wb
\dot{V}_{H_2}	Flujo volumétrico de hidrógeno	ml/min
f_C	Frecuencia de conmutación	Hz
f_g	Frecuencia de giro	Hz
F_D	Fuerza de arrastre	N
F_R	Fuerza de resistencia a la rodadura	N
F_N	Fuerza normal	N
F_G	Fuerza tangencial	N
F_A	Fuerza por aceleración	N
g	Gravedad	m/s ²
L	Inductancia	H
m_V	Masa del vehículo	kg
m_B	Masa de la batería	kg
m_P	Masa del pasajero	kg
m_T	Masa total	kg
m_{H_2}	Masa del hidrógeno	kg
m_{shaft}	Masa del rotor del motor	kg

J_L	Momento de inercia de la carga mecánica	kg/m^2
J_M	Momento de inercia del motor	kg/m^2
n_B	Número de baterías	—
n_P	Número de pasajeros	—
n_{cell}	Número de celdas	—
n_e	Número de electrones	—
V_{Act}	Pérdidas por activación	V
V_{Con}	Pérdidas por concentración	V
V_{Ohm}	Pérdidas por resistencia	V
T	Periodo de conmutación	1 / Hz
P_E	Potencia eléctrica en el motor	W
P_M	Potencia mecánica en el motor	W
P_B	Potencia en baterías	W
P_T	Potencia mecánica en el eje de tracción	W
$P_{M, \text{nom}}$	Potencia mecánica nominal del motor	W
p_{H_2}	Presión parcial del hidrógeno	Pa
p_{O_2}	Presión parcial del oxígeno	Pa
$p_{\text{H}_2\text{O}}$	Presión parcial del vapor de agua	Pa
DOD	Profundidad de descarga	%
r_T	Radio del neumático en el eje de tracción	m
r_c	Radio del tanque de hidrógeno	m
n_{GB}	Relación de velocidades en la caja de engranes	—
R_A	Resistencia en armadura	Ω
R_S	Resistencia en campo	Ω
R_B	Resistencia interna de la batería	Ω
R_{ohm}	Resistencia en el electrolito	Ω
T_{FC}	Temperatura de la celda de combustible	K
t_{on}	Tiempo de encendido en un conmutador	s
t_{off}	Tiempo de apagado en un conmutador	s
t_0	Tiempo inicial	s
τ_T	Torque en el eje de tracción	Nm
τ_M	Torque en el rotor del motor	Nm
τ_G	Torque por efectos de gravedad y fricción	Nm
W_E	Trabajo eléctrico	J
ω_T	Velocidad angular de tracción	rad/s

ω_d	Velocidad angular del dínamo	rad/s
ω_M	Velocidad angular en el rotor del motor	rad/s
ω_L	Velocidad angular en la carga mecánica	rad/s
N_d	Velocidad de rotación en el eje del dínamo	rpm
N_T	Velocidad de rotación en el eje de tracción	rpm
N_M	Velocidad de rotación en rotor del motor	rpm
$N_{M, nom}$	Velocidad de rotación nominal en el motor	rpm
v_W	Velocidad del viento	m/s
v_T	Velocidad lineal del eje de tracción	m/s
V_d	Voltaje en terminales del dínamo	V
V_B	Voltaje en terminales de la batería	V
$V_{B, nom}$	Voltaje nominal de las baterías	V
$V_{B, OC}$	Voltaje a circuito abierto en las baterías	V
$V_{B, cell}$	Voltaje de una celda de la batería	V
V_M	Voltaje en terminales del motor	V
$V_{M, nom}$	Voltaje nominal del motor	V
V_{FC}	Voltaje en terminales de la celda de combustible	V
E_{Nemst}	Voltaje termodinámico de la celda de combustible	V
V_{H_2}	Volumen del hidrógeno	L
V_{tank}	Volumen total del tanque de hidrógeno	L
V_{se}	Volumen de la semiesfera del tanque	m ³
V_c	Volumen del tanque de hidrógeno	m ³
V_{shaft}	Volumen del rotor del motor	m ³

Subíndices

air	Aire	<i>Air</i>
A	Armadura	<i>Armature</i>
D	Arrastre	<i>Drag</i>
B	Batería	<i>Battery</i>
GB	Caja de engranes	<i>Gear Box</i>
S	Campo	<i>Stator</i>
L	Carga mecánica	<i>Load</i>
C	Convertidor	<i>Converter</i>
E	Eléctrico	<i>Electric</i>
F	Frontal	<i>Front</i>

M	Motor	<i>Motor</i>
N	Normal	<i>Normal</i>
P	Pasajero	<i>Passenger</i>
R	Rodadura	<i>Rolling</i>
G	Tangencial	<i>Tangential</i>
T	Tracción	<i>Traction</i>
V	Vehículo	<i>Vehicle</i>
W	Viento	<i>Wind</i>
c	Cilindro	<i>Cylinder</i>
d	Dinamo	<i>Dynamo</i>
f	Fricción	<i>Friction</i>
g	Giro	<i>Spin</i>
nom	Nominal	<i>Nominal</i>
shaft	Eje del rotor	<i>Shaft</i>
max	Máximo	<i>Maximum</i>
ohm	Resistencia	<i>Ohmic</i>
rch	Recarga	<i>Recharge</i>
dch	Descarga	<i>Discharge</i>

Simulación

Drive_cycle	Ciclo de manejo
I_motor	Corriente en el motor
I_battery	Corriente en la batería
I_dch	Corriente de descarga
I_rch	Corriente de recarga
I_FC	Corriente en la celda de combustible
Polarization_curve	Curva de polarización de la celda de combustible
Eff_chopper	Eficiencia del convertidor de potencia
Eff_motor	Eficiencia del motor
P_axle	Potencia mecánica en el motor
P_motor_mec	Potencia mecánica en el motor
P_motor_elec	Potencia eléctrica en el motor
P_battery	Potencia en la batería
P_FC	Potencia en la celda de combustible

R_int	Resistencia interna
T_comp	Tiempo de cómputo
Tor_load	Torque en la carga mecánica
Tor_axle	Torque en el eje de tracción
Tor_motor	Torque en el rotor del motor
W_axle	Velocidad angular en el eje de tracción
W_motor	Velocidad angular en el rotor del motor
V_dyna	Voltaje en el dinamo
Vehicle_speed	Velocidad lineal del vehículo
Load_speed	Velocidad lineal de la carga mecánica
RPM_load	Velocidad rotacional de la carga mecánica
RPM_axle	Velocidad rotacional en el eje de tracción
RPM_motor	Velocidad rotacional en el rotor del motor
V_motor	Voltaje en el motor
V_battery	Voltaje en la batería
V_dch	Voltaje de descarga en la batería
V_FC	Voltaje de la celda de combustible
FEM_arm	Voltaje en la armadura del motor
Duty_cyle	Ciclo de trabajo en el convertidor de potencia
H2_flow	Flujo volumétrico de hidrógeno

ACRÓNIMOS

GEI	Gases de Efecto Invernadero
ER	Energías Renovables
DOE	Department of Energy (EUA)
SENER	Secretaría de Energía (México)
INEEL	Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias
PEM	Proton Exchange Membrane
MEA	Membrane Electrode Assembly
FHWA	Federal Highway Administration
SUV	Sport Utility Vehicle
ICE	Internal Combustion Engine
EV	Electric Vehicle
HEV	Hybrid Electric Vehicle
FCEV	Fuel Cells Electric Vehicle
LEV	Light Electric Vehicle
EPA	Environmental Protection Agency
NEDC	New European Drive Cycle
SAE	Society of Automotive Engineers
LF	Lateral Force
VF	Vertical Force
MF	Movement Force
BF	Brake Force
CD	Corriente Directa
CA	Corriente Alterna
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistors
PWM	Pulse-Width Modulation
NASA	National Aeronautics and Space Administration
CNC	Control Numérico Computarizado
PSIM	Power Simulation
LHV	Lower Heating Value
HHV	Higher Heating Value
FEM	Fuerza Electromotriz

BFM	Backward-Facing Model
FFM	Forward-Facing Model
RPM	Revoluciones por Minuto
PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cell
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell
AFC	Alkaline Fuel Cell
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell
DMFC	Direct Methanol Fuel Cell
MEA	Membrane Electrode Assembly

RESUMEN

En el presente trabajo se muestra el desarrollo de las pruebas de desempeño realizadas a un vehículo ligero (carro de golf) dentro de las instalaciones del Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL), como parte del proyecto *Creación de infraestructura para el desarrollo y evaluación de opciones tecnológicas energéticas en sistemas avanzados de tracción eléctrica* que lidera dicho instituto.

Las pruebas realizadas al vehículo ligero tuvieron como objetivo obtener parámetros de operación, y el desarrollo de un modelo matemático que describa el comportamiento eléctrico y mecánico de los principales componentes del sistema de tracción (baterías, convertidor de potencia y control, motor eléctrico, diferencial mecánico y eje de tracción) para la simulación y análisis de los flujos de potencia involucrados en la operación del vehículo. Dicho análisis permitió establecer rangos de velocidad y autonomía para distintas condiciones de operación, sirviendo de base para proponer una arquitectura híbrida que incremente el desempeño del vehículo al integrar una planta de potencia adicional al banco de baterías, en este caso un sistema de celdas de combustible alimentadas por hidrógeno comprimido.

Los resultados obtenidos en las simulaciones muestran que el modelo propuesto de tren de potencia híbrido es efectivo en condiciones de manejo de baja velocidad y paradas continuas, similares a los perfiles de manejo en entornos urbanos y ciudades con tránsito vehicular lento. Bajo dichas condiciones de manejo y respecto al vehículo de baterías, la autonomía de recorrido podría aumentar hasta en un 60% con un incremento aproximado del 3% del peso total del vehículo debido a las celdas de combustible y a los cilindros contenedores de hidrógeno.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco de forma cabal a mi profesor y director de tesis académico, el Dr. Javier de la Cruz Soto, por su invaluable ayuda, paciencia y experiencia. Además de brindarme la oportunidad de participar en el proyecto, confié en mí aún en los momentos de mayor incertidumbre. Sin su apoyo incondicional, este trabajo no hubiera sido posible.

Un agradecimiento especial a mi profesor, el Dr. Arturo Fernandez Madrigal, quien incentivó mi interés por aprender más acerca del hidrógeno y las celdas de combustible, brindándome información, asesoría y valiosos consejos.

Agradezco a mi profesor, el Dr. Ulises Cano Castillo, quien me abrió las puertas del INEEL, ofreciéndome su sincera amistad, conocimiento y la oportunidad de superarme a mí mismo. Extiendo el agradecimiento al M.I. Félix Loyola, quien me inculcó la vocación por la investigación y la disciplina del autoaprendizaje. Las aportaciones de ambos investigadores en temas de electromovilidad constituyen las bases del presente trabajo.

Es imprescindible agradecer la asesoría del M.C. Manuel de Jesús López Pérez, su orientación y consejos fueron herramientas valiosas para aclarar conceptos complejos de electrónica de potencia. Así mismo agradezco al Dr. José Roberto Flores Hernández, quien con infinita paciencia y sencillez me explicó los aspectos prácticos de las baterías.

Gracias a la Dr. Tatiana Romero Castañón y a la M.C.I. Lorena Albarrán Sánchez, por su orientación teórica y práctica en temas de celdas de combustible. Un agradecimiento y mención especial a Carlos A. Reynoso Galván y Jorge Avilés, quienes me brindaron su amistad e incalculable ayuda durante el desarrollo de las pruebas, mostrando siempre la mayor capacidad, disposición y cortesía.

El autor agradece el apoyo económico mensual por desarrollo de tesis de licenciatura recibido por parte del proyecto No. 14837 (Fondo Sectorial CONACYT-SENER-Sustentabilidad Energética) *Creación de infraestructura para el desarrollo y evaluación de opciones tecnológicas energéticas en sistemas avanzados de tracción eléctrica*, así mismo reitera su compromiso por buscar siempre una preparación académica de alto nivel.

A mi familia con absoluta dedicación y amor.

*A mis padres Guadalupe Bravo Romero y Silvestre
Vidal Sánchez por su incondicional cariño,
comprensión y soporte.*

*A mi hermana Daniela Vidal Bravo por su
incomparable muestra de valentía y fuerza.*

*A mi abuela Martha Romero Carvente por su
incansable ejemplo de perseverancia y esfuerzo.*

*A mi tía María Carlota Bravo Romero por sus
invaluables muestras de sabiduría y paciencia.*

*Y a mi primo Carlos Alberto León Bravo, quien es la
inspiración y aspiración de un mejor mundo por
venir.*

*Una especial mención a mi pequeño amigo Rocky,
quien trajo alegría y calma a mi intranquilo
espíritu.*

1. INTRODUCCIÓN

La electrificación de vehículos es una tendencia creciente en la industria automotriz. En los últimos años, las principales compañías de automóviles han promovido a nivel comercial vehículos impulsados por motores eléctricos como alternativa a los de combustión interna. Con más de 150 años en desarrollo [1, 2], la tecnología de vehículos eléctricos comenzó a elevar sus ventas en 2010, duplicando cada año hasta posicionarse por encima de los 2 millones de unidades en el mundo en 2016 . Se estima un máximo de 70 millones para el 2025 [3].

Los vehículos eléctricos juegan un papel crucial dentro de las estrategias para disminuir las emisiones de GEI a nivel global [3], debido a que poseen una mayor eficiencia de operación y son considerados “cero emisiones” in situ, a diferencia de los vehículos convencionales de combustión interna [4]. En 2015, el sector transporte representó el 25% de las emisiones totales de CO₂ en el mundo [5].

En México al 2014, el uso de combustibles fósiles en el sector transporte por vehículos de combustión interna representó la categoría con mayores emisiones netas de GEI con el 37.65% [6], superando por separado a los sectores de Petróleo y Gas, Generación Eléctrica, Residencial y Comercial, Industria, Residuos, Agropecuario y Uso del suelo, cambio de uso del suelo y silvicultura (Tabla 1.1).

Tabla 1.1 Total de emisiones netas de GEI por sector en México 2014 [6].

Sector	Total Gg en CO ₂ eq.	Porcentaje
Petróleo y Gas	56,507.307	12.96
Generación Eléctrica	115,819.376	26.56
Residencial y Comercial	25,208.179	5.78
Industria	73,968.709	16.96
Fuentes Móviles	164,199.635	37.65
Residuos	0	0.00
Agropecuario	382.603	0.09
USCUSS	0	0.00
Permanencia USCUSS	0	0.00
TOTAL	436,085.809	100.00

La implementación de vehículos eléctricos implica el desarrollo de una infraestructura de recarga, razón por la cual será necesaria una red de suministro eléctrico más robusta [2]. Es importante mencionar que incluso cuando este tipo de vehículos almacenan energía eléctrica en baterías y la emplean en motores eléctricos con nulas emisiones, la fuente primaria de energía empleada para generar la electricidad aún proviene principalmente de fuentes fósiles [7, 8].

Los crecientes avances en tecnología para el aprovechamiento de fuentes renovables de energía hacen posible disminuir dicha dependencia. En México al 2016, la producción de energía primaria por renovables fue de 8.4%, con un 2.3% de energía geotérmica, eólica y solar juntas, 1.4% de hidroenergía y 4.7% de bioenergía [9]. Se espera que para el 2030 se tenga una capacidad instalada de 15,101.1MW con una generación de 47,365.6GWh por centrales eólicas, 6,890.8MW de capacidad instalada con una generación de 12,697.1GWh por tecnología solar fotovoltaica y 763.6 MW de capacidad instalada con una generación de 257.2GWh por bioenergía [10].

La intermitencia del recurso solar y eólico, hace necesario integrar la generación, distribución y uso de energía de forma eficiente y sustentable por medio del programa de redes inteligentes, el cual busca contribuir sustancialmente a incrementar el uso de fuentes de energía renovables, la integración de sistemas de almacenamiento y la implementación de vehículos eléctricos [11].

La integración de sistemas de almacenamiento de energía atiende principalmente los inconvenientes de disponibilidad e intermitencia de las fuentes renovables [12]. Existen métodos de almacenamiento mecánicos (aire comprimido, volantes de inercia, bombeo hidráulico) y térmicos (bombas de calor, sales fundidas) útiles en grandes centrales de generación eólica y solar térmica, respectivamente. Es común el uso de acumuladores o baterías para el respaldo de sistemas de generación de energía eléctrica, principalmente fotovoltaicos. En la actualidad, las tecnologías de almacenamiento químico no se limitan a baterías y capacitores debido a los continuos avances en la síntesis e implementación de combustibles alternativos [13].

Los esfuerzos de organizaciones internacionales, tanto gubernamentales, académicas e industriales ha dado como resultado una diversificación de la oferta de combustibles. El Departamento de Energía (DOE) de E.U.A., tiene identificados al menos 6 combustibles alternativos (biodiésel, electricidad, etanol, hidrógeno, gas natural y propano) que

participan en el mercado emergente de energéticos y que ya son comercializados en diversas regiones del mundo [14].

El hidrógeno ha sido reconocido como uno de los vectores energéticos con mayor potencial para aplicaciones de respaldo, generación distribuida y a bordo de vehículos [15]. Sus principales métodos de síntesis incluyen la reformación de gas natural y la electrólisis del agua. Si la energía empleada para generar hidrógeno proviene de fuentes de energía renovables, su uso en vehículos eléctricos de celdas de combustible (FCEV) no tiene más emisiones asociadas que vapor de agua. Algunos de los retos que actualmente enfrentan tanto los sistemas de hidrógeno y celdas de combustible son los costos restrictivos de adquisición y operación [16]. La síntesis y manejo del hidrógeno dificulta su implementación inmediata, debido a los altos estándares de seguridad y calidad requeridos en los procesos de producción, distribución, almacenamiento y uso. El principal reto consiste en la implementación de una red de estaciones para repostar hidrógeno en vehículos de celdas de combustible. Es importante mencionar que a pesar de dichos retos, la infraestructura de suministro de hidrógeno ha crecido considerablemente desde el 2002. A la fecha, hay 372 estaciones distribuidas en las regiones de Asia, Europa y Norteamérica [17].

Las celdas de combustible han llamado la atención de los sectores energético, automotriz e industrial debido a sus ventajas respecto a las baterías en aplicaciones móviles [18]. Cuando son alimentadas por hidrógeno almacenado en tanques de alta presión, las celdas de combustible constituyen plantas de potencia que operan con altos índices de eficiencia, tiempos cortos de recarga y una mayor autonomía de recorrido. Estos factores, que implican mayor productividad y desempeño, son de gran importancia para aplicaciones en vehículos de pasajeros, de transporte de carga y utilitarios.

En el ramo de los vehículos de pasajeros, las compañías automotrices asiáticas lideran el desarrollo e implementación de celdas de combustible en vehículos eléctricos. Un ejemplo notable es el modelo *Mirai* (que en japonés significa “futuro”) de la compañía Toyota, lanzado a la venta en 2014, representando para la automotriz el siguiente paso en el ramo de vehículos alternativos después de la aceptación obtenida a nivel mundial por el desarrollo y venta del modelo híbrido *Prius*. El vehículo eléctrico a celdas de combustible *Mirai* tiene una autonomía de 500 km por cada 5 kg de hidrógeno, almacenado en dos contenedores de fibra de carbono a una presión de 70 MPa, y desarrolla una potencia de

151 hp en el motor, lo cual lo hace competitivo con cualquier vehículo de su categoría, sin sacrificar seguridad, desempeño y confort [19].

Los vehículos eléctricos de transporte de carga representan aún mayores retos, debido a los requerimientos de potencia para recorrer grandes distancias y transportar elevados volúmenes de carga, lo cual podría significar limitaciones técnicas, económicas y operativas si la planta de potencia principal fuera un banco de baterías. El modelo *Nikola One* de la compañía americana Nikola Motor Company representa un enorme avance en implementar celdas de combustible en sistemas con una capacidad de hasta 1000 hp y una autonomía de 1500 km [20].

Los vehículos utilitarios son un tipo de transporte poco conocido, pero de gran importancia en los sectores industrial y comercial. Son vehículos utilitarios aquellos diseñados para transportar pequeñas cargas en distancias regularmente cortas a velocidades relativamente bajas [21]. Estos a menudo se diseñan para usos genéricos, pero en ciertos casos pueden tener un propósito específico en una cadena de producción, por lo que existe una amplia variedad de modelos adaptados a partir de un chasis tipo camión. Esta clase de vehículos existen con el propósito de incrementar la productividad en operaciones industriales y comerciales, teniendo un lugar clave en la planeación logística. Si el motor empleado en el sistema de tracción es eléctrico, generalmente es alimentado por un banco de baterías, lo cual significa tiempos de espera prolongados durante la recarga de las mismas, mayor peso a bordo, y una menor autonomía de recorrido.

Un ejemplo relevante de vehículos utilitarios que superan estas desventajas empleando celdas de combustible alimentadas por hidrógeno comprimido son los montacargas que operan con celdas de combustible *Gendrive Fuel Cells*, desarrolladas y comercializadas por la compañía americana Plug Power, la cuales cuentan con una autonomía de 8 horas de trabajo continuo y 3 minutos de recarga de hidrógeno [22]. Las baterías de ión-litio usualmente empleadas en estos montacargas requieren un mínimo de 15 minutos para una recarga rápida y su vida útil está limitada por las condiciones de operación. El hidrógeno empleado en estos vehículos utilitarios es generado vía reformación por la compañía HyGear, y suministrado periódicamente a los dispensadores que se encuentran en las instalaciones de las empresas que adquirieron las celdas y el servicio de repostaje. Actualmente Plug Power proporciona soluciones de movilidad industrial basadas en celdas de combustible a empresas que operan en los ramos de la manufactura, logística, ventas y alimentos, dentro de las que destacan Amazon y Walmart [23].

Existen casos de vehículos utilitarios que fueron diseñados para actividades específicas, pero que cuentan con los elementos para emplearse en otras áreas. Los *carros de golf* que se diseñaron para transportar pasajeros en clubs deportivos, pero también han sido empleados en lugares en donde los recorridos son cortos a velocidades bajas son un ejemplo de ello. En aeropuertos los han adoptado para transportar pasajeros y equipaje al interior de las terminales. También se emplean para recorridos turísticos en reservas naturales y trayectos dentro de zonas hoteleras. De igual forma, son empleados para rondas de vigilancia y auxilio en hospitales, universidades, centros comerciales e instalaciones industriales.

Los carros de golf o *golf cars*, que surgieron en los años 30 en California, E.U.A. [24], han sido considerados de gran utilidad en las aplicaciones anteriormente mencionadas debido a la relativa facilidad para manejarse y sus bajos costos de mantenimiento. Sin embargo, dada su limitación en los rangos de velocidad y autonomía, no cuentan con las características para competir con vehículos tradicionales de pasajeros.

Las ventajas operativas de los carros de golf que se han probado en diferentes entornos a lo largo de muchos años han sido aprovechadas para diseñar los denominados *vehículos ligeros*, que actualmente son considerados como una de las tecnologías disruptivas en el mercado emergente de vehículos eléctricos, y que tiene posibilidades de mayor éxito que incluso la afamada compañía Tesla Motors [25]. Lo anterior se justifica en que el fenómeno de la electrificación de vehículos o *electromovilidad*, se ha extendido a nuevos nichos de oportunidad en donde antes no existía un interés en desarrollar vehículos para aplicaciones locales. Ejemplo de ello son los *vehículos de vecindario*, una aplicación alternativa para los carros de golf en California, E.U.A., en donde se aprovechan las ventajas de una velocidad acotada (que se traduce en una mayor seguridad para los pasajeros y peatones), motor silencioso y cero emisiones de GEI in situ, para recorridos cortos dentro de zonas habitacionales que no requieren de todas las capacidades de un vehículo tradicional.

Desde el punto de vista del autor, actualmente la industria automotriz enfrenta tres grandes cambios de paradigmas en las necesidades de movilidad:

1. El desarrollo y crecimiento de la industria de la electromovilidad debido a la imperante necesidad de mitigar emisiones de GEI y disminuir la dependencia del uso de combustibles fósiles.

2. La tendencia creciente en el uso de plataformas para rentar servicios de transporte que exenten al usuario de adquirir un vehículo propio y sostener gastos de mantenimiento, impuestos y costos de los combustibles. Empresas como Uber y Cabify son un ejemplo de la rentabilidad de estas plataformas.
3. El desarrollo de vehículos autónomos, que buscan incrementar los aspectos de seguridad, desempeño y accesibilidad del vehículo en entornos urbanos que enfrentan índices insostenibles de accidentes y tráfico vehicular.

Tanto el hidrógeno empleado en celdas de combustible como los vehículos ligeros eléctricos son tecnologías que se han desarrollado a lo largo de más de 150 años, sin embargo, encuentran su *technological momentum* en una época en donde los tres cambios de paradigmas anteriormente mencionados coinciden con el crecimiento del sector energético en materia de energías renovables, dando paso a una transformación tecnológica que se traducirá en beneficios económicos, sociales y más importante aún, la preservación y cuidado de la naturaleza.

1.1. Revisión de literatura

En 1980, en Los Alamos National Laboratory, Bobbet et al. integraron una celda de combustible de ácido fosfórico¹ de 2kW a un carro de golf con un banco de cuatro baterías de 12 V [26]. El arreglo de celdas de combustible y baterías fue en paralelo para alimentar un motor General Electric de devanado en serie (wound series) de 4 hp. Más de 30 años después, sobre la misma línea de trabajo, en 2013 en Sudáfrica, Tolj et al. integraron una celda de combustible PEM de 1.2 kW a un carro de golf que originalmente contaba con un banco de 48 V formado por ocho baterías de ácido-plomo [27]. También en 2013, en China, Liang & Jian realizaron pruebas de desempeño de un arreglo híbrido de un stack de celdas de combustible PEM de 2 kW con un banco de ocho baterías con 48 V de voltaje nominal [28].

También existen configuraciones en donde la celda de combustible es la principal fuente. En 2004, la compañía china Shanghai Shen-Li High Tech Co., Ltd, desarrolló un vehículo ligero eléctrico para fines turísticos con una planta de potencia de 5 kW basada en celdas de combustible PEM, con una autonomía de 200 km [29]. En 2001 la compañía canadiense Astris Energi Inc. desarrolló un carro de golf empleando una celda de combustible alcalina de 1kW con una autonomía de 3 días de manejo en condiciones normales [30, 31].

Probablemente, uno de los proyectos más emblemáticos en el uso de celdas de combustible en carros de golf y vehículos eléctricos de vecindario (Neighborhood Electric Vehicle) es el desarrollado desde 1990 en el Schatz Energy Center, en colaboración con Humboldt State University, en California [32]. Las baterías de ácido-plomo de ambos vehículos fueron reemplazadas por celdas de combustible PEM. En el caso particular del carro de golf, la celda de combustible tenía una capacidad de 4 kW, un motor de 2 hp, y un rango de autonomía de 24 km [33].

En 2014, como parte de un proyecto de Oakland University, un grupo de académicos y estudiantes implementaron una celda de combustible PEM de 1.2 W en un arreglo en serie con una batería de ión-litio de 48 V, a un motor de imanes permanente tipo “brushless” de 48 kW [34, 35].

¹ El autor menciona que la tecnología de PAFC era la más avanzada en aquella época.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Desarrollar un modelo que permita la descripción del comportamiento eléctrico y mecánico de los principales componentes del tren de potencia de un vehículo eléctrico ligero (baterías, convertidor de potencia y control de velocidad, motor, diferencial mecánico y eje de tracción) para la simulación y análisis de los flujos de potencia involucrados en su operación.

1.2.2. Objetivos específicos

1. Determinar parámetros de operación del sistema y subsistemas mediante pruebas en campo y laboratorio.
2. Implementar el modelo obtenido en un software de simulación PSIM.
3. Proponer una arquitectura híbrida basada en la tecnología de celdas de combustible PEM.

1.3. Estructura del trabajo

Este trabajo está constituido por siete capítulos presentados de la siguiente manera. El primer capítulo lo constituye la introducción. En el segundo capítulo se muestran los aspectos generales de vehículos eléctricos y los fundamentos de las diversas disciplinas involucradas en su análisis, como lo son la dinámica, motores eléctricos, electrónica de potencia, control de velocidad, baterías eléctricas y celdas de combustible. En el tercer capítulo se presenta la metodología empleada para el desarrollo de un modelo inicial. En el cuarto capítulo se muestran los resultados de las pruebas realizadas al vehículo, los parámetros obtenidos, la formulación y validación del modelo básico. En el quinto capítulo se presenta el proceso y estrategias de simulación del modelo dinámico para diferentes condiciones de manejo, empleando herramientas computacionales de análisis de circuitos. En el sexto capítulo se presenta el desarrollo de un modelo híbrido eléctrico de celdas de combustible y los resultados de su simulación. En el último capítulo se muestran las conclusiones obtenidas así como las recomendaciones para continuar y mejorar el proceso de modelación.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Conceptos básicos de vehículos eléctricos

Introducción

Un vehículo eléctrico emplea una planta de potencia (baterías, capacitores, celdas de combustible) para operar un motor eléctrico, a diferencia de un motor de combustión interna que requiere de un combustible (gasolina, diésel, gas). Los vehículos eléctricos son una tecnología prominente y con mayores ventajas en eficiencia, desempeño, seguridad y disminución de impacto climático respecto a los vehículos convencionales de combustión interna.

Los vehículos eléctricos son sistemas complejos que integran diversos subsistemas y tecnologías. Es posible comparar un vehículo eléctrico con una computadora [36]: el hardware lo conforma todo el sistema mecánico (chasis, carrocería, transmisión) y el sistema eléctrico (motor, baterías, convertidores de potencia, cargador), el software se compone del sistema lógico y de control, que permiten la operación óptima del vehículo por parte de un conductor (o de un sistema de inteligencia artificial en el caso de un vehículo autónomo).

2.1.1. Historia de los vehículos eléctricos

El desarrollo histórico de la tecnología de vehículos eléctricos se puede dividir en tres periodos importantes: la invención, el resurgimiento y actualidad [37]. La aparición de las primeras baterías por Alessandro Volta y el motor eléctrico por Michael Faraday dieron paso a los esfuerzos de pioneros como Ányos Jedlik en 1828, Sibrandus Stratingh en 1835, Robert Anderson en 1832, Thomas Davenport en 1835 [38], Robert Davidson en 1838 y Gustave Trouvé en 1881 [4]. Estos primeros intentos de impulsar vehículos con una fuente eléctrica eléctrica integrada, empleaban baterías que no eran recargables, por lo que el uso extendido de vehículos eléctricos comenzó a finales del siglo XIX gracias a la producción masiva de baterías recargables [39].

Algunos autores mencionan que entre 1895 y 1905 fue el periodo de mayor auge de los autos eléctricos respecto a los de combustión interna. La denominada “Época de Oro” de los vehículos eléctricos alcanzó su cima en 1912, para después terminar con el dominio de los autos de gasolina en 1924 [40]. La producción en serie del Modelo T de Henry Ford y la aparición del encendido eléctrico impulsaron a los vehículos de combustión por encima de otros tipos de propulsión.

La industria automotriz eligió concentrar sus esfuerzos en desarrollar motores de diésel y gasolina, por lo que el interés en emplear electricidad para el transporte resurgiría hasta 1960 [40]. Los problemas derivados de la contaminación del aire a causa de las emisiones por combustión de hidrocarburos fueron la principal causa del resurgimiento de los autos eléctricos. En 1963, en California E.U.A., surgieron iniciativas ambientales que buscaban regular la economía de combustible y emisiones en motores de combustión e impulsar el desarrollo y uso de vehículos eléctricos. En 1996, la compañía General Motors lanzó su modelo eléctrico *GE EV1*, el cual fue un avance significativo al implementar tecnologías de baterías de ión-litio, convertidores de potencia basados en interruptores controlables tipo IGBT y motores eléctricos más eficientes [37]. Durante este periodo también emergieron las plantas de potencia híbridas (con motor de combustión y motor eléctrico), como lo es el caso del Prius, lanzado al mercado por la compañía japonesa Toyota en 1990. Sin embargo, todas estas mejoras no fueron suficientes para garantizar el éxito comercial definitivo de los vehículos alternativos sobre los de combustión a finales del siglo XX. Una combinación de factores tecnológicos, económicos y políticos impidieron una vez más que los autos eléctricos fueran accesibles a los grandes mercados [1, 37, 40, 41].

Con la llegada del nuevo milenio, el gas natural, biocombustibles e hidrógeno comenzaron a considerarse alternativas factibles a los combustibles tradicionales. En 1998, la compañía japonesa Honda lanzó el modelo a gas natural *Civic GX*, en el 2000 la compañía General Motors mostró su prototipo de vehículos de celdas de combustible *HydroGen 1* para demostrar el potencial del hidrógeno como vector energético. En 2007, la compañía estadounidense Tesla Motors lanzó al mercado su modelo de vehículo eléctrico *Tesla Roadster*, abriendo paso a una nueva generación de vehículos con mayores prestaciones de velocidad y autonomía. En 2011, la compañía japonesa Nissan estrenó el *Nissan Leaf*, el modelo de vehículo eléctrico con mayores volúmenes de venta a la fecha [37]. En la actualidad, la mayor parte de las grandes compañías automotrices del mundo cuentan con al menos un prototipo de vehículo eléctrico o híbrido [37].

2.1.2. Clasificación de vehículos en general

Existen varios criterios para la clasificación de un vehículo, entre los que destacan la aplicación, tamaño y peso. El estándar internacional ISO3833 clasifica a los vehículos terrestres en 7 grupos generales: motocicletas, autos de pasajeros, autobuses, camionetas, tractores, autos de pasajeros con remolque y camionetas con remolque o semirremolque [42]. Existen otras clasificaciones como la FHWA que además de la aplicación toman en cuenta el número de ejes y llantas.

Los vehículos de pasajeros pueden clasificarse dependiendo del tamaño de la base de las llantas como pequeño cuando es menor a 2.5 m de largo, mediano cuando es mayor a 2.5 m y menor a 2.8 m, y grande cuando supera los 2.8 metros [42].

De acuerdo a la clasificación por peso un vehículo es ligero cuando su masa total (sin incluir pasajeros y carga) es menor a 1100 kg, mediano cuando es menor de 1550 kg y mayor a 1150 kg. Se considera pesado cuando la masa del vehículo es mayor a 1600 kg [42].

Otras clasificaciones son por el tipo de suspensión, motor, transmisión, distribución del peso y perfil aerodinámico, los cuales son factores involucrados en la dinámica del vehículo. La clasificación dependiendo de la forma es: sedan, coupe, convertible, minivan/van, vagón y SUV (Sport Utility Vehicle). Otras clasificaciones comunes son de acuerdo al número de pasajeros y capacidad de carga: económico, compacto, intermedio, tamaño estándar, tamaño completo, de lujo premium, convertible premium, convertible, minivan, tamaño mediano y SUV [42].

2.1.3. Trenes de potencia

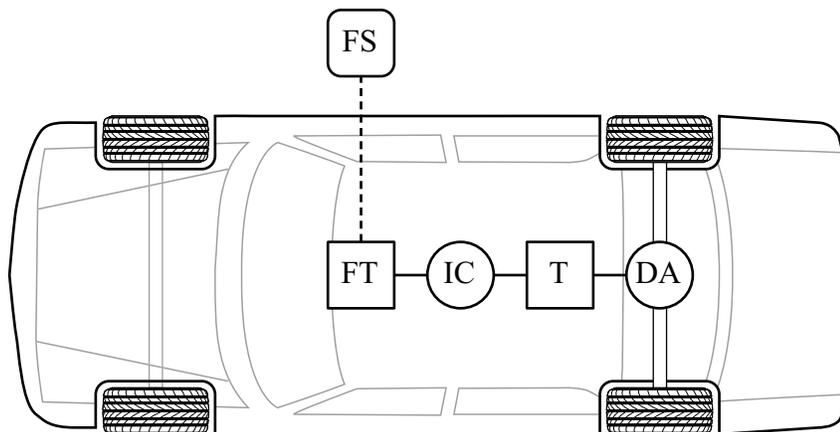
El tren de potencia de un vehículo básicamente está conformado por el motor, transmisión y el eje de tracción. El motor proporciona la potencia mecánica a partir de una fuente de energía (química, eléctrica) necesaria para mover el vehículo. El sistema de transmisión transfiere la potencia mecánica a la salida del motor, ajustando la velocidad y torque necesarios en el eje de las ruedas de tracción [43]. La configuración en la que se disponen estos componentes esenciales para mover el vehículo se conoce como arquitectura del tren de potencia [37].

De manera general, las arquitecturas de trenes de potencia son [37]:

1. Convencional con motor de combustión interna (ICE)
2. Eléctricos a baterías (EV)
3. Híbridos eléctricos (HEV)
4. Eléctricos a celdas de combustible (FCEV)

2.1.3.1. Vehículo convencional de motor de combustión interna (ICE)

La arquitectura de combustión interna es la base de los vehículos modernos. De forma simplificada se puede apreciar en la [Figura 2.1](#) que la configuración está conformada por un motor de combustión interna (IC) acoplado mecánicamente a la transmisión (T) que transfiere la potencia al eje de tracción (DA). El combustible que alimenta al motor puede tratarse de gasolina, diésel, gas natural, o biocombustibles, y es almacenado en el tanque (FT). La recarga de combustible se hace a partir de un suministro externo (FS).



FS: *Fuel Supply*
FT: *Fuel Tank*
IC: *Internal Combustion*
T: *Transmission*
DA: *Drive Axle*

Figura 2.1 Arquitectura de un vehículo convencional de combustión interna [37].

2.1.3.2. Vehículo eléctrico a baterías (EV)

La arquitectura básica de un vehículo eléctrico se conforma por un motor eléctrico (M) acoplado mecánicamente a una transmisión (T) que transfiere potencia a el eje de tracción como se muestra en la [Figura 2.2](#).

El motor es alimentado por energía eléctrica almacenada en la batería (B), que requiere de una conexión con el motor de corriente alterna por medio de un inversor (I). La recarga de las baterías se efectúa por medio de un cargador eléctrico (EC) que se conecta a la red de suministro eléctrico.

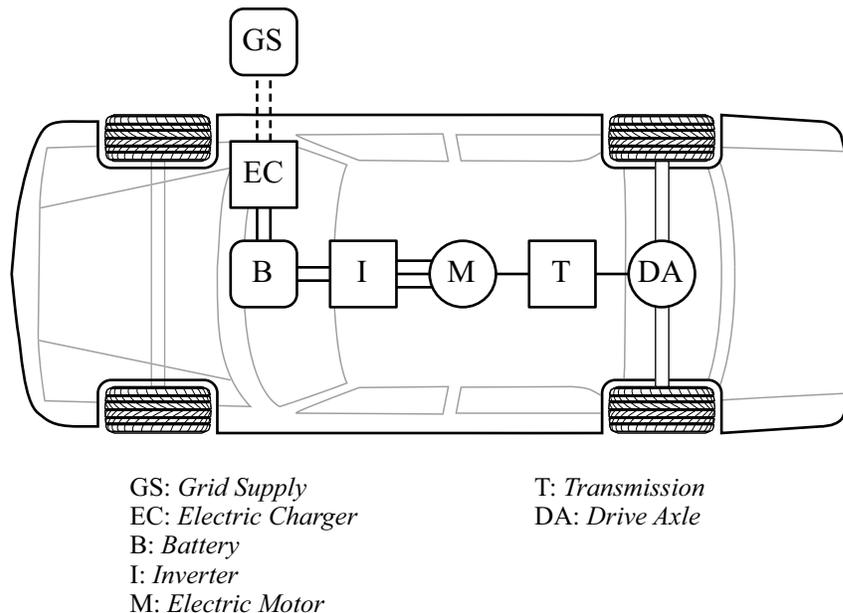


Figura 2.2 Arquitectura de un vehículo eléctrico a baterías.

2.1.3.3. Vehículo híbrido eléctrico (HEV)

Los vehículos híbridos eléctricos comparten las características de la arquitectura de vehículos convencionales de motor de combustión interna y de vehículos eléctricos de baterías. Existen tres configuraciones generales de un vehículo híbrido eléctrico: en serie, en paralelo y la combinación serie-paralelo.

La [Figura 2.3](#) muestra la configuración básica de un vehículo híbrido eléctrico en serie. Un motor de combustión interna (IC) es acoplado mecánicamente a un generador eléctrico (G) para recargar el banco de baterías (B). Al igual que una arquitectura básica de un vehículo eléctrico, el motor está acoplado al sistema de tracción.

A diferencia de la arquitectura en serie, en un vehículo híbrido en paralelo el eje de tracción (DA) está acoplado de forma simultánea al motor de combustión (IC) y al eléctrico (M) que es alimentado por el sistema de baterías (B) que son recargables al conectarse a la red (GS), como se muestra en la [Figura 2.4](#).

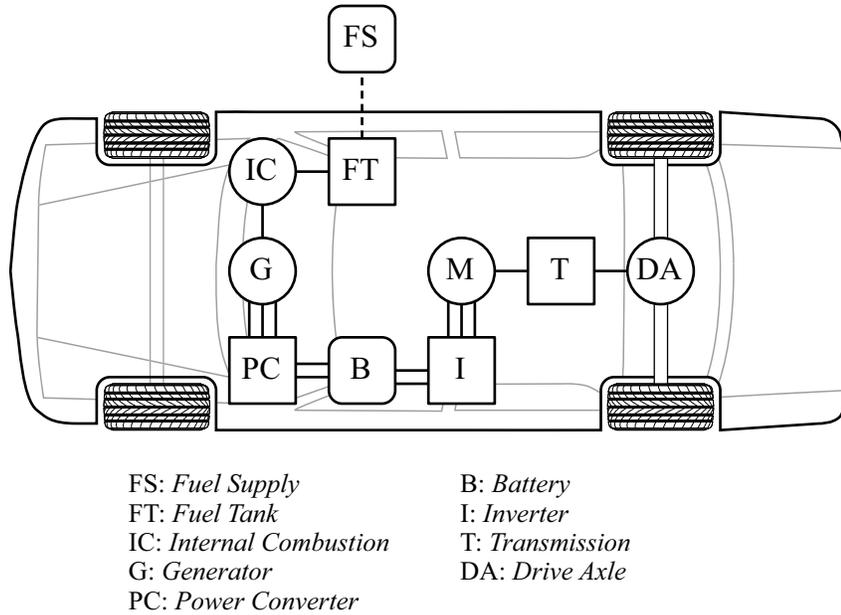


Figura 2.3 Arquitectura de un vehículo híbrido eléctrico en serie.

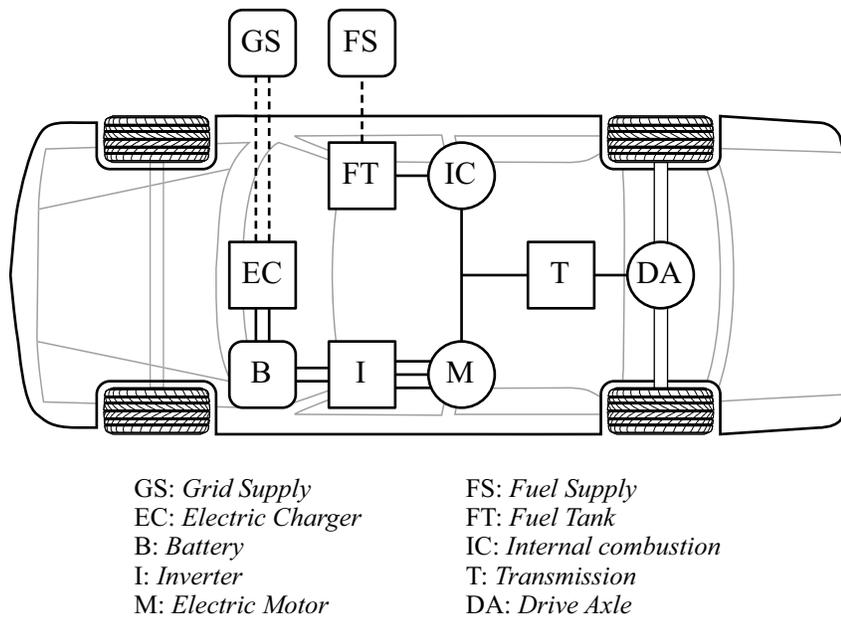


Figura 2.4 Arquitectura de un vehículo híbrido eléctrico en paralelo.

La Figura 2.5 muestra la configuración serie-paralelo de un vehículo híbrido eléctrico. La potencia del motor de combustión (IC) es transferida de manera simultánea al sistema de tracción (DA) y a un generador eléctrico para recargar el banco de baterías (B) para alimentar el motor eléctrico (M) que también está acoplado al sistema de tracción.

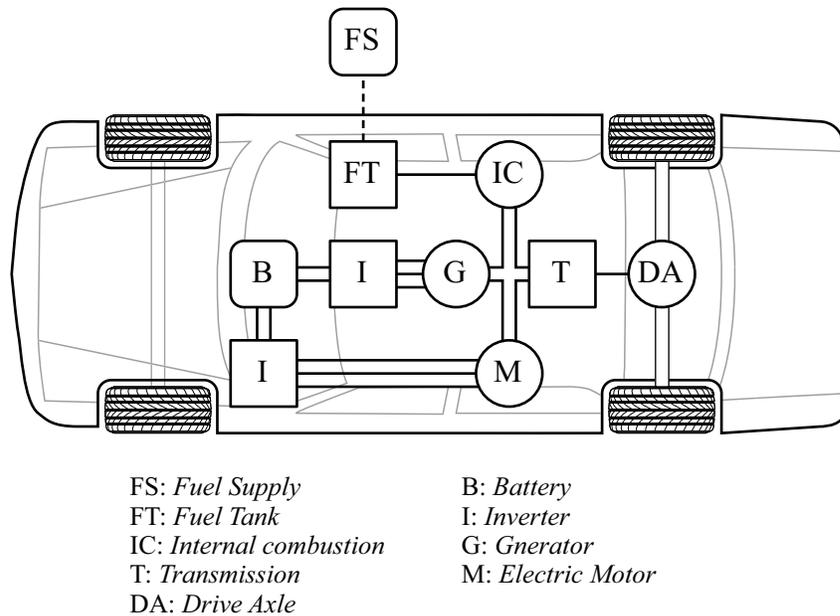


Figura 2.5 Arquitectura de un vehículo híbrido eléctrico en serie-paralelo.

2.1.3.4. Vehículo eléctrico a celdas de combustible (FCEV)

Un vehículo eléctrico a celdas de combustible emplea hidrógeno y oxígeno como reactivos químicos para generar energía eléctrica.

La [Figura 2.6](#) muestra la configuración del tren de potencia de un vehículo eléctrico que emplea un sistema de celdas de combustible para alimentar el motor y cargar un banco de baterías.

El hidrógeno es almacenado en un tanque (HT), conectado a la celda de combustible (FC). El oxígeno necesario para completar la reacción electroquímica es comúnmente obtenido del aire, mientras que el hidrógeno es recargado de un suministro externo (HS).

La celda de combustible alimenta de corriente al motor eléctrico (M) y está acoplado por medio de un sistema de convertidores de potencia (PC). La batería (B) es empleada como una fuente secundaria, y puede ser recargada por la celda de combustible o por un sistema de frenos de regeneración.

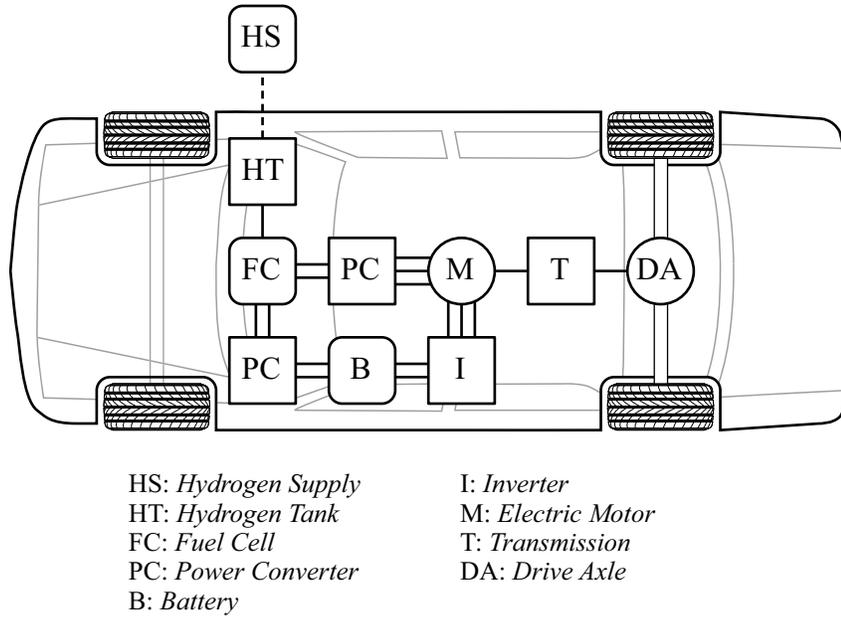


Figura 2.6 Arquitectura de un vehículo eléctrico de celdas de combustible.

2.1.3.5. Arquitectura de un vehículo eléctrico ligero (LEV)

Un carro de golf es un vehículo ligero (con un peso menor de 500 kg) de baja velocidad diseñado para operar empleando gasolina en un motor de combustión o para usar electricidad en un motor eléctrico.

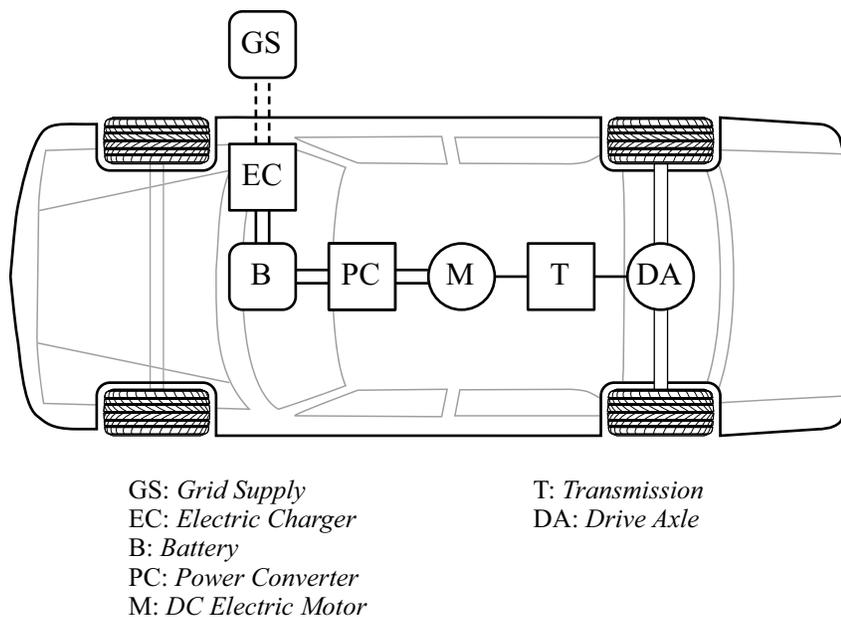


Figura 2.7 Arquitectura de un vehículo eléctrico ligero con un motor de corriente directa.

La arquitectura de un carro de golf eléctrico tiene la configuración de un vehículo eléctrico mostrado en la [Figura 2.7](#). Las baterías (B) empleadas en estos vehículos son del tipo ácido-plomo, el motor (M) es de corriente directa de devanado en campo, con una configuración en serie. Un convertidor de potencia (PC) tipo *DC/DC chopper*, regula la entrada de corriente y reduce el voltaje de las baterías al motor. Un diferencial mecánico (T) reduce la velocidad en el rotor del motor y transmite la fuerza al eje de tracción (DA).

2.1.4. Ciclos de manejo

Debido a que las condiciones de operación de cualquier vehículo nunca serán las mismas para otro, debido a múltiples factores (localización, temperatura, conductor, superficie de carretera, etc) es necesario contar con una referencia de operación para evaluar el desempeño de los vehículos y las distintas configuraciones de trenes de potencia.

Un ciclo de manejo es un perfil estandarizado que se usa como referencia para comparar la economía de combustible y emisiones [37, 44]. Consiste en una secuencia de puntos que describen la velocidad versus tiempo que un vehículo debe seguir durante la prueba [45]. Los parámetros más importantes que se toman en cuenta en un ciclo de manejo son la distancia (km), el tiempo (s), la velocidad promedio (km/h) y la velocidad máxima (km/h) [37].

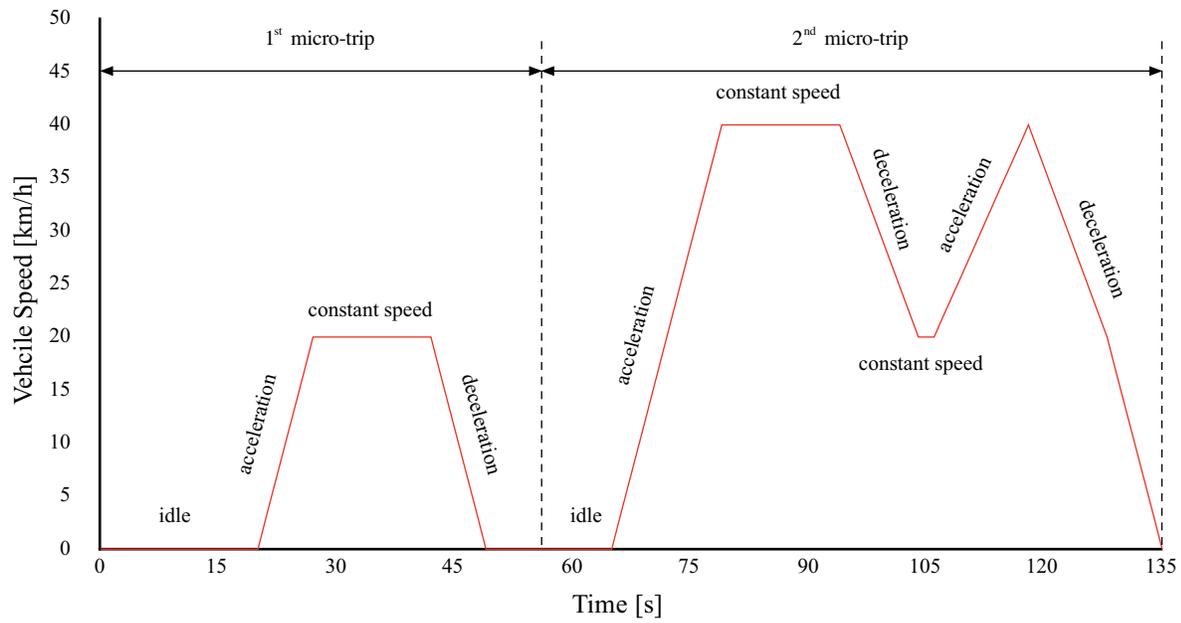
Existen diversos ciclos de manejo que representan de forma estadística las condiciones de operación de los vehículos en distintas regiones como los estándares de la EPA (Environmental Protection Agency) en Estados Unidos, el JC08 en Japón y el NEDC (New European Drive Cycle) en Europa.

Como ejemplo, la [Gráfica 2.1](#) muestra el tramo de baja velocidad del ciclo de manejo J10-15 empleado para emular las condiciones de operación de un vehículo en un entorno congestionado de ciudades asiáticas [46]. Los principales elementos del ciclo de manejo son el período de inactividad (idle), aceleración, velocidad constante y desaceleración. Se puede observar que los períodos de inactividad dividen en intervalos que recorridos cortos el ciclo de manejo.

Las pendientes por aceleración y desaceleración muestran los intervalos en los que el vehículo debe alcanzar el régimen de velocidad constante o detenerse. Los intervalos de inactividad prolongados describen zonas de congestionamiento vehicular, en donde los

2. Marco Teórico

vehículos se encuentran detenidos, pero mantienen el motor en marcha o ralentí, lo que representa un consumo de combustible y emisiones.



Gráfica 2.1 Ciclo de manejo J10 Dynamometer Driving Schedule.

2.2. Carga mecánica

Introducción

Cuando un vehículo está en operación, existen diversos parámetros que determinan la fuerza necesaria para mover su masa y la de los pasajeros a una velocidad determinada. De forma general, el comportamiento dinámico es determinado por las fuerzas que actúan sobre el vehículo por factores como fricción en los neumáticos, la gravedad y la aerodinámica [47]. Estas fuerzas son de gran importancia en el momento de calcular los requerimientos de energía y potencia necesarios para la operación de un vehículo.

En el análisis de movimiento de un vehículo se emplea el sistema de referencia de coordenadas ortogonales mostrado en la [Figura 2.8](#). La convención de la SAE Internacional (*Society of Automotive Engineers*) considera el eje x como el eje longitudinal con un rango de giro *roll*, el eje y como el eje transversal con una velocidad de *pitch* con un rango de deslizamiento lateral, el eje z como el eje vertical con una velocidad *yaw* con un rango de vibración vertical [47].

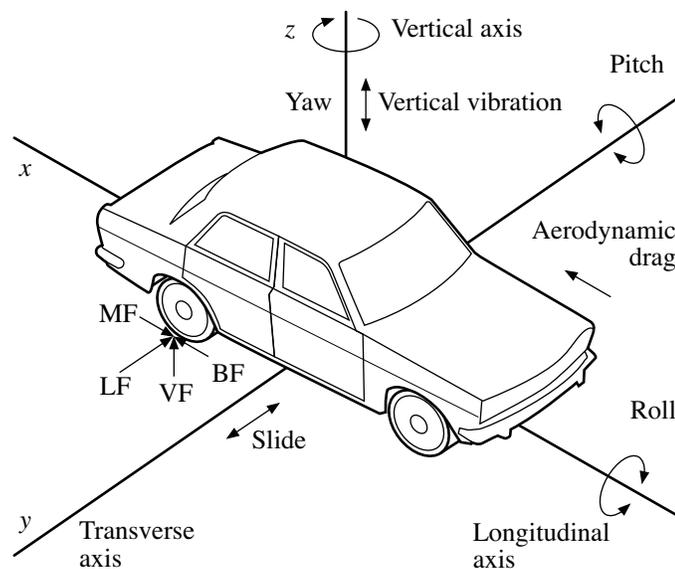


Figura 2.8 Sistema de ejes en un vehículo empleado por la SAE [47, 48].

Las fuerzas laterales LF y verticales VF actúan sobre el neumático debido a su contacto con la superficie del camino. Las otras dos fuerzas son la de movimiento MF y de frenado BF que actúan sobre los neumáticos mientras el vehículo se desplaza.

2.2.1. Dinámica de movimiento lineal

El análisis tridimensional del movimiento de un vehículo se puede simplificar para estudiar los efectos de las fuerzas involucradas durante su desplazamiento en los ejes longitudinal y vertical. La [Figura 2.9](#) muestra las principales fuerzas que actúan en un vehículo cuando su movimiento es en línea recta [42, 47, 48]. Las fuerzas involucradas son de arrastre aerodinámico F_D , normal F_N , de resistencia a la rodadura F_R tangencial F_G y de tracción F_T .

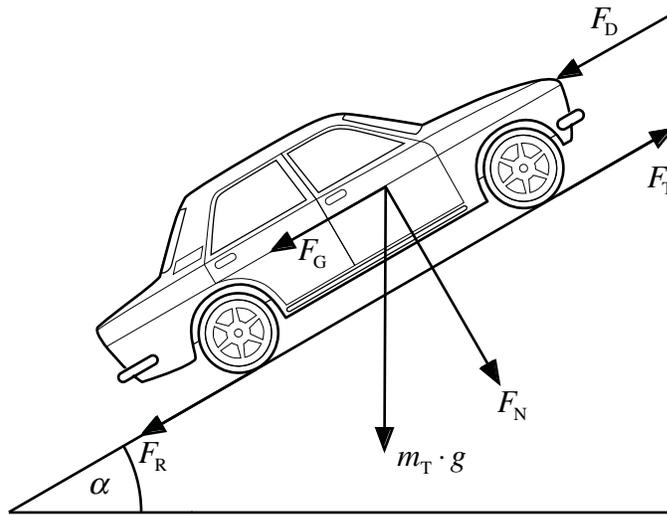


Figura 2.9 Fuerzas implicadas en el movimiento de un vehículo en una pendiente.

2.2.1.1. Fuerza de arrastre aerodinámico

El arrastre aerodinámico F_D es la fuerza del viento que actúa sobre un vehículo en movimiento. Esta fuerza depende de las condiciones de magnitud de velocidad o rapidez del vehículo v_T y del viento v_w , así como del diseño aerodinámico y área frontal A_F del vehículo [37].

$$F_D = \frac{1}{2} \rho_{\text{air}} c_D A_F (v_T \pm v_w)^2 \quad (2.1)$$

Para cada tipo de perfil aerodinámico aplicado a un vehículo, existe un coeficiente c_D , que define la magnitud de la fuerza de arrastre aerodinámico. Se considera la densidad del aire ρ_{air} en condiciones estándar de presión y temperatura.

2.2.1.2. Fuerza normal

La fuerza normal F_N es ejercida sobre el vehículo en todo momento, tanto si se encuentra en reposo como en movimiento. Depende directamente de la masa total del vehículo m_T , la gravedad g y el ángulo α de inclinación del camino.

$$F_N = m_T \cdot g \cdot \cos \alpha \quad (2.2)$$

2.2.1.3. Fuerza de resistencia a la rodadura

La fuerza de resistencia a la rodadura F_R es producida por la deformación que ocurre cuando un neumático está en contacto con la superficie de un camino [48]. Debido a que el peso del vehículo recae en las llantas, y tiene una dirección perpendicular a la superficie, la fuerza de resistencia a la rodadura es igual a la fuerza normal F_N multiplicada por el coeficiente de rodadura c_R .

$$F_R = F_N \cdot c_R \quad (2.3)$$

De forma general coeficiente de rodadura c_R está determinado principalmente por el tipo de terreno, desgaste, condiciones de humedad. También influyen factores como la velocidad del vehículo, el tipo y condiciones del neumático o rueda (material, presión, desgaste).

Tabla 2.1 Coeficientes de resistencia de rodadura a bajas velocidades [4, 49].

Condiciones del camino	Coficiente de resistencia de rodadura
Neumáticos de automóvil en concreto o asfalto	0.013 - 0.020
Neumáticos de automóvil en grava	0.020 - 0.030
Carretera de macadán de alquitrán	0.025 - 0.050
Carretera sin pavimento	0.050 - 0.150
Campo	0.100 - 0.350
Arena seca	0.100 - 0.300
Arena húmeda	0.060 - 0.150
Carretera con hielo	0.015 - 0.030
Neumático de camión en concreto o asfalto	0.006 - 0.010
Rueda en riel de acero	0.001 - 0.002

La [Tabla 2.1](#) muestra los rangos de coeficientes de resistencia de rodadura cuando el vehículo se desplaza a bajas velocidades [4, 49], en la que se puede observar que la diferencia entre conducir un vehículo en una carretera asfaltada en un entorno urbano o en un camino sin pavimento puede tener un gran impacto en la fuerza necesaria para mover al vehículo.

2.2.1.4. Fuerza Tangencial

La fuerza tangencial F_G es ejercida sobre el vehículo cuando sube una pendiente. Al igual que la fuerza normal, depende de la masa total del vehículo, la gravedad y el ángulo de inclinación del camino. Sin embargo, cuando el vehículo se mueve en una superficie horizontal, la fuerza tangencial se hace cero.

$$F_G = m_T \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (2.4)$$

2.2.1.5. Fuerza de Tracción

La fuerza necesaria para mover el vehículo se denomina fuerza de tracción F_T , y es la suma de las fuerzas involucradas en el movimiento de un vehículo en línea recta, es decir, la fuerza de arrastre aerodinámico, la fuerza tangencial y la fuerza de resistencia de rodadura (que es la fuerza normal multiplicada por un coeficiente de rodadura).

$$F_T = F_R \pm F_G \pm F_D \quad (2.5)$$

La fuerza tangencial es también conocida como de escalamiento, y como se mencionó previamente, depende del grado de inclinación de la superficie. Cuando la inclinación es positiva, es decir, el vehículo sube la pendiente, la fuerza de escalamiento toma valores positivos y se suma a la fuerza de tracción. En cambio, cuando la inclinación es negativa, es decir, el vehículo baja la pendiente, dicha fuerza toma valores negativos y se resta.

De forma similar, ocurre con la fuerza de arrastre aerodinámico. Cuando el viento sopla en dirección contraria al vehículo, dicha fuerza se suma a la de tracción, en cambio, cuando la dirección del viento es igual a la que sigue el vehículo, la fuerza de arrastre se resta. Es importante mencionar, que este análisis de fuerzas es una simplificación válida para vehículos que se desplazan en línea recta.

2.2.1.6. Potencia de tracción

Cuando un vehículo viaja a velocidad lineal constante v , la fuerza necesaria para mover el vehículo a dicha velocidad es igual a la potencia de tracción P_T [48].

$$P_T = F_T \cdot v \quad (2.6)$$

La potencia de tracción es uno de los parámetros más importantes para evaluar el desempeño de un vehículo, debido a que determina la energía necesaria para operarlo. La potencia de tracción que es transmitida del motor a los neumáticos, se determina como el torque para mover la carga τ_T multiplicado por su velocidad angular ω_T .

$$P_T = \tau_T \cdot \omega_T \quad (2.7)$$

La velocidad angular de la carga está en función de la frecuencia de giro f_g en los neumáticos de tracción.

$$\omega_T = 2\pi \cdot f_g \quad (2.8)$$

Una forma común de expresar la velocidad de giro en los neumáticos son las revoluciones por minuto (rpm), la cual también se puede calcular en función de la frecuencia.

$$N_T = f_g \cdot 60 \quad (2.9)$$

Para calcular la frecuencia de giro en una llanta, es posible emplear la relación entre la circunferencia del neumático y la velocidad lineal, en donde $c_T = 2\pi r_T$.

$$f_g = \frac{c_T}{v_T} \quad (2.10)$$

Cuando un vehículo se desplaza en una trayectoria lineal a una velocidad constante v_T es posible calcular la velocidad angular ω_T en los neumáticos conociendo el valor del radio r_T .

$$\omega_T = \frac{v_T}{r_T} \quad (2.11)$$

La potencia de tracción mostrada en las ecuaciones 2.6 y 2.7 relaciona la fuerza necesaria para mover el vehículo a una velocidad constante, con el torque y velocidad angular en los neumáticos.

2.2.1.7. Acoplamiento mecánico

Es evidente que la fuerza necesaria para mover los neumáticos que a su vez impulsen el vehículo proviene de un motor. Previamente se mencionó que los motores empleados pueden ser de combustión interna, eléctricos o ambos. En el caso de los motores eléctricos, se requiere aplicar una fuerza al rotor para iniciar su funcionamiento debido a que posee una masa. Por lo tanto, se puede considerar al rotor como una carga mecánica con un momento de inercia J_M , al que se debe aplicar un toque τ_M para que gire con una velocidad angular ω_M .

El motor se acopla mecánicamente por medio de mecanismos de transmisión con el eje de tracción del vehículo (tracción delantera o trasera) o directamente con la rueda en el caso de los denominados motores *in-wheel*.

El torque necesario para mover la carga del motor M, es igual a la aceleración angular $\dot{\omega}_M$ multiplicada por el valor del momento de inercia sumado al torque τ_{Mf} debido a los efectos de fricción y gravedad [50]. La misma relación aplica para el torque aplicado a la carga L como se muestra en la Figura 2.10.

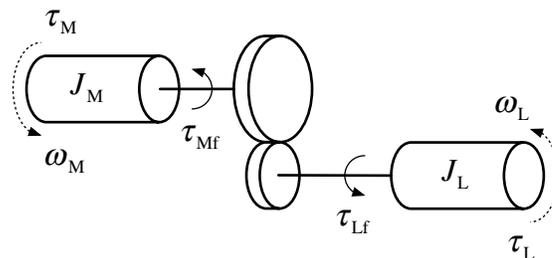


Figura 2.10 Acoplamiento mecánico de dos cargas M y L.

$$\tau_M = J_M \dot{\omega}_M + \tau_{Mf} = J_M \frac{d\omega_M}{dt} + \tau_{Mf} \quad (2.12)$$

$$\tau_L = J_L \dot{\omega}_L + \tau_{Lf} = J_L \frac{d\omega_L}{dt} + \tau_{Lf} \quad (2.13)$$

Las relaciones anteriores permiten describir el comportamiento dinámico de una carga mecánica acoplada a un motor eléctrico, sin embargo, en un análisis en estado estacionario se puede estudiar el comportamiento del acoplamiento en términos de velocidad angular y torque sin tomar en cuenta la aceleración angular y el momento de inercia.

Un caso sencillo de acoplamiento mecánico entre un motor y el eje de tracción es el de una caja de engranes. Las cajas de engranes tienen como objetivo acoplar dos tipos de mecanismos rotatorios, y adecuar los valores de torque y velocidad angular.

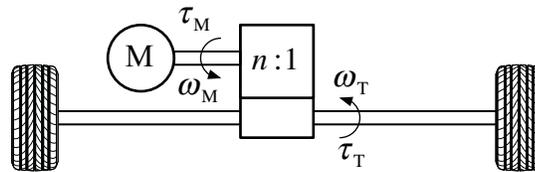


Figura 2.11 Acoplamiento mecánico entre un motor y el eje de neumáticos por medio de una caja de engranes reductora de velocidad.

La [Figura 2.11](#) muestra el caso de un motor acoplado mecánicamente al eje de los neumáticos por medio de una caja de engranes reductora, la velocidad angular de la flecha del motor ω_M será un número de veces n mayor que la velocidad angular ω_T del eje de los neumáticos.

$$\omega_M = n \cdot \omega_T \quad (2.14)$$

Idealmente, la potencia del motor debe ser igual a la transmitida al eje de los neumáticos, por lo que se puede tener una relación entre el torque del motor τ_M y el torque en el eje de tracción τ_T .

$$\tau_M = \frac{\tau_T}{n} \quad (2.15)$$

Como se mencionó previamente, la potencia mecánica en la flecha del motor está definida como el torque por la velocidad angular.

$$P_M = \tau_M \cdot \omega_M \quad (2.16)$$

Si se consideran despreciables las pérdidas por transmisión de potencia en el acoplamiento mecánico, la potencia en el motor y el eje de tracción es la misma. Esto se muestra en las relaciones entre el torque y velocidad angular.

$$\tau_M \omega_M = \tau_T \omega_T \quad (2.17)$$

$$\frac{\omega_M}{\omega_T} = \frac{\tau_T}{\tau_M} \quad (2.18)$$

Las relaciones anteriores, muestran que cuando la velocidad rotacional en la flecha del motor es mayor que su torque, la velocidad angular en la carga será menor que el torque. Esta relación entre los parámetros de velocidad angular y torque, es muy importante para el control de velocidad y aceleración de un vehículo.

2.3. Motores Eléctricos

Introducción

Un motor eléctrico es un dispositivo que convierte energía eléctrica en energía mecánica [2]. El tipo de aplicación, las condiciones de operación y las restricciones de costos son criterios importantes para seleccionar la máquina eléctrica adecuada [2].

Existen varios parámetros que afectan los procesos de diseño de una máquina eléctrica; incluyendo las características de torque-velocidad, potencia nominal, temperatura, volumen y restricciones de eficiencia. Estos parámetros son útiles para definir el número de fases y de polos, configuración del devanado, selección del material de laminación, forma de la bobina, el uso de imanes permanentes y su material [2].

2.3.1. Aspectos generales

En la actualidad, los motores eléctricos tienen una amplia gama de aplicaciones que va desde laminadoras de acero y tracción ferroviaria, hasta una gran cantidad de accionamientos y máquinas industriales (bombas, compresores, ventiladores, etc.), robótica, impresoras y servos de precisión [51]. El resurgimiento de iniciativas para impulsar sistemas de tracción eléctrica, los cuales permiten disminuir el uso de combustibles fósiles, ha despertado el interés en la aplicación de este tipo máquinas en vehículos eléctricos a baterías (BEV), híbridos eléctricos (HEV) y eléctricos a celdas de combustible (EV), debido a las ventajas de eficiencia de operación y mantenimiento, respecto a los motores tradicionales de combustión interna.

El desarrollo de los motores eléctricos modernos es el resultado de los avances progresivos en teoría electromagnética, mecánica e ingeniería de control. Desde 1831, con la invención del dínamo por el físico británico Michael Faraday, el generador de Taylor en 1840, el modelo de motor de Nicola Tesla en 1888 hasta los innumerables modelos de motores actuales [52], se han desarrollado múltiples tipos de motores para aplicaciones específicas con distintas características técnicas.

2.3.2. Tipos de motores y sus características

En general, los motores son clasificados por los requerimientos de alimentación y aplicación [53]. La clasificación más común es por el tipo de alimentación: corriente alterna (CA) y directa (CD).

2.3.2.1. Motores de Corriente Alterna (CA)

Un motor de corriente alterna es una máquina que convierte energía eléctrica de CA en energía mecánica. La Figura 2.12 muestra que hay una gran variedad de estos motores que se diferencian por sus principios de funcionamiento, características físicas y nivel de potencia [54].

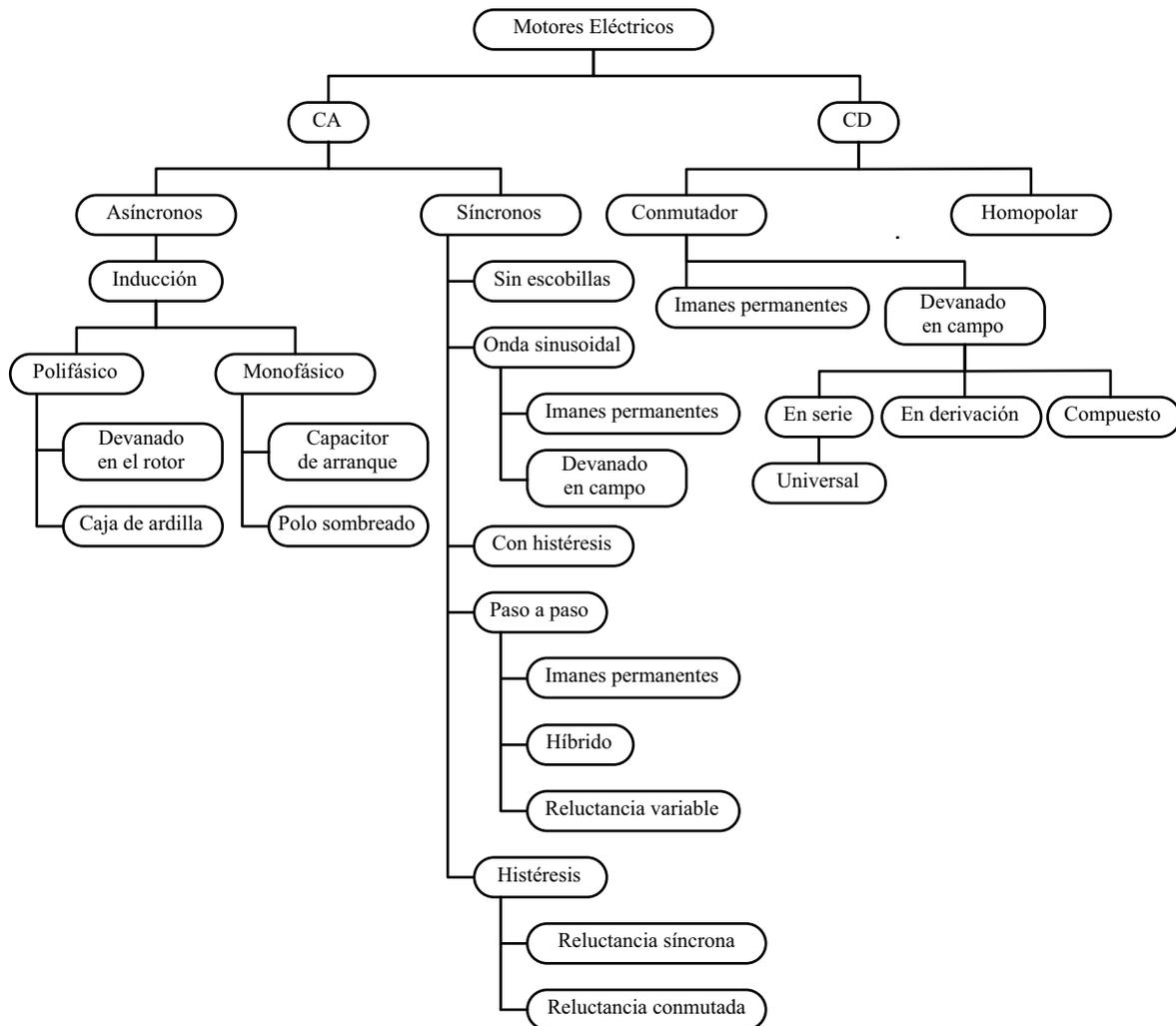


Figura 2.12 Clasificación de los principales tipos de motores eléctricos [55].

Para los motores de CA, el devanado en el estator genera un campo magnético giratorio cuando se suministra una corriente alterna polifásica. La velocidad de rotación del campo viene dada por la frecuencia de corriente del estator dividida por el número de pares de polos magnéticos creados por los devanados. Según las leyes de Faraday y Lenz, las corrientes son inducidas en los devanados del rotor siempre que la velocidad del rotor difiera de la velocidad del campo magnético producido por el estator. Esta diferencia de velocidad, llamada velocidad de deslizamiento, debe mantenerse pequeña para garantizar una alta eficiencia de conversión de energía. Bajo esta limitación, un cambio de velocidad de rotación requiere un ajuste de la frecuencia eléctrica del estator [54].

Los motores de CA se utilizan en casi todas las aplicaciones industriales, tales como [54]:

1. Transporte: tracción de vehículos, propulsión marina.
2. Fresado en cemento, acero, papel y otras industrias.
3. Bombeo/compresión en la industria del petróleo y gas.
4. Grúas y vehículos industriales.
5. Máquinas domésticas (ascensores, lavadoras y otros).

2.3.2.2. Motores de Corriente Directa (CD)

La configuración general de una máquina de CD, al igual que máquinas de CA, se compone de un estator (parte fija o estacionaria), un rotor (la parte móvil o giratoria) y un espacio de aire, denominado entrehierro [56].

El devanado en el estator es el resultado de la conexión en serie todos los conductores enrollados en los polos. Este tipo de devanado, denominado devanado de campo, está conectado a una fuente de CD y es alimentado por una corriente continua.

Por efecto de esta corriente, se crea un campo magnético, cuyas líneas de fuerza fluyen en el estator, atraviesan el pequeño entrehierro, entran en el rotor, lo atraviesan y luego regresan al estator. Por convención, el flujo magnético sale de los polos norte y entra en los polos sur [56].

La [Figura 2.12](#) muestra que los motores de corriente directa se clasifican en conmutados y homopolares. Los motores conmutados pueden ser de imanes permanentes, o de

devanado de campo. Este tipo de motores tienen los conductores del rotor conectados a un conmutador, que contiene segmentos conductores separados por pequeñas capas de material aislante [56].

2.3.3. Principales tipos de motores empleados en vehículos eléctricos

Los principales tipos de motores empleados en vehículos de tracción eléctrica son máquinas de inducción de corriente alterna, motores sincrónicos de imanes permanentes, motores de corriente directa tipo “brushless” y de devanado en campo [57].

La Figura 2.13 muestra los principales tipos de motores usados en vehículos híbridos y eléctricos, clasificados por el tipo de controlador que se usa para regular los requerimientos de corriente en el motor.

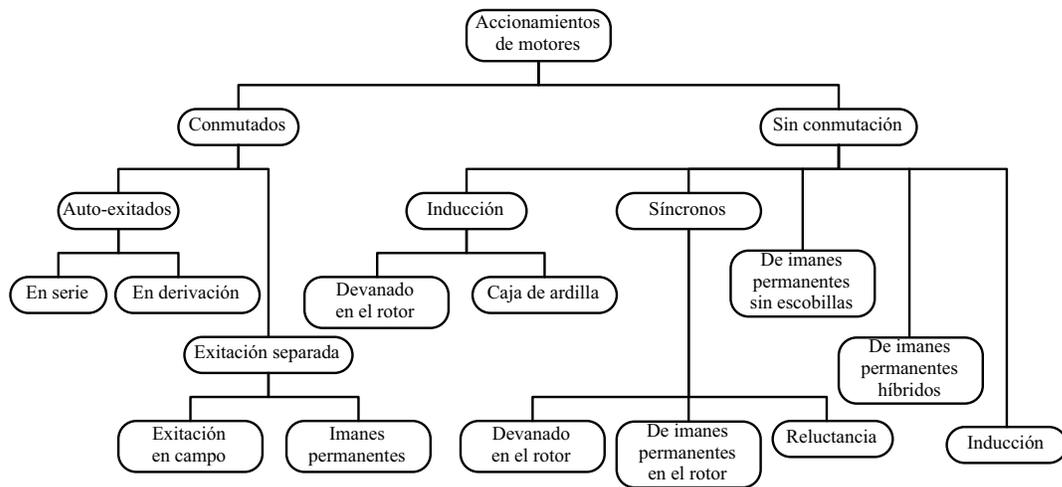


Figura 2.13 Clasificación de control de motores eléctricos para aplicaciones en HEV y EV [4].

A continuación se presenta una breve descripción del tipo de motor utilizado en el carro de golf.

2.3.4. Motores de corriente directa con escobillas de devanado en campo (wound field)

Un motor CD de devanado en campo funciona con electroimanes en lugar de imanes permanentes para generar el flujo de campo como se muestra en la Figura 2.14. Este tipo de motor emplea escobillas como contactos para conducir la corriente al rotor y tienen limitaciones en el voltaje de operación, durabilidad, tamaño y tiempo de vida debido a las escobillas.

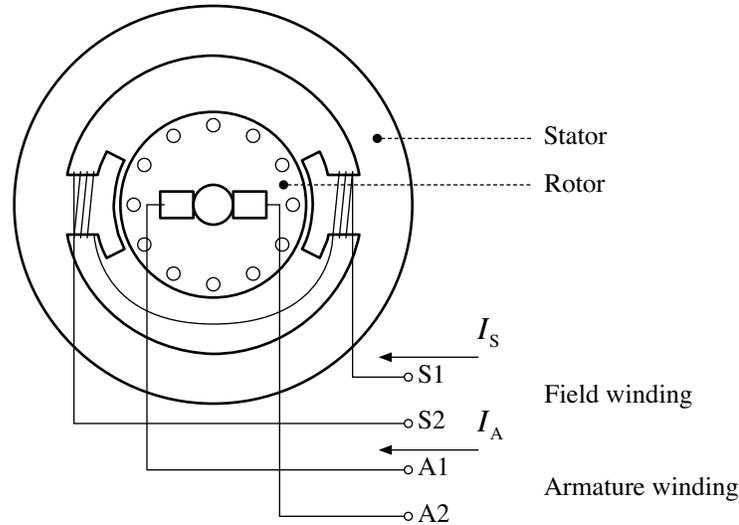


Figura 2.14 Diagrama de la estructura básica de un motor CD de devanado en campo [2].

Los motores CD de devanado de campo son empleados para tracción en vehículos eléctricos ligeros y utilitarios (por ejemplo, en carros de golf y levanta cargas) debido a sus características de alto par de arranque y rangos de potencia. También son empleados en vehículos eléctricos de pasajeros como el *Fiat Panda Elettra*, modelo comercializado en 1999 por la compañía italiana Fiat [58].

2.3.4.1. Modelo eléctrico de un motor de corriente directa

Un motor CD devanado en serie consiste en un arreglo del inductor L_S de campo conectado en serie con la armadura en donde se genera una fuerza electromotriz E_A .

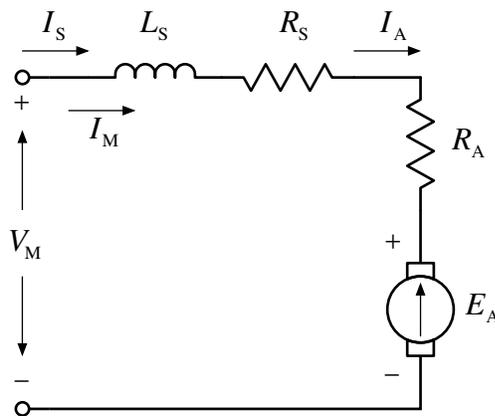


Figura 2.15 Circuito equivalente de un motor CD devanado en serie [59].

La Figura 2.15 muestra el circuito equivalente del motor CD devanado en serie, en donde se pueden observar los componentes conectados en serie, incluyendo la resistencia de campo R_S y la resistencia de armadura R_A . El circuito es alimentado de una fuente de voltaje V_M en terminales que suministra la corriente de línea I_M .

El circuito muestra como el arreglo en serie permite que la corriente de línea sea igual a la corriente en el inductor I_S y a la corriente en la armadura I_A .

$$I_M = I_S = I_A \quad (2.19)$$

También es posible analizar el arreglo y aplicar la Ley de Kirchhoff para obtener una relación entre el voltaje en terminales y el voltaje en campo y armadura.

$$V_M = E_A + I_A \cdot R_A + L_S \frac{dI_S}{dt} + I_S \cdot R_S \quad (2.20)$$

Cuando el valor de la corriente en campo es constante, el término de voltaje en el inductor se vuelve cero. Así se puede obtener una relación de voltaje en terminales en estado estacionario.

$$V_M = E_A + I_A (R_A + R_S) \quad (2.21)$$

2.3.4.2. Fuerza electromotriz

La fuerza electromotriz generada en la armadura o voltaje inducido E_A depende del flujo magnético ϕ , una constante k_A específica para el motor y la velocidad angular ω_M del rotor.

$$E_A = \phi \cdot k_A \cdot \omega_M \quad (2.22)$$

El torque generado en la flecha del motor o par inducido T_M también depende del flujo magnético y la constante k_S . Pero el parámetro que define la cantidad de torque es la intensidad de corriente en armadura I_A .

$$\tau_M = \phi \cdot k_S \cdot I_A \quad (2.23)$$

Debido a que el flujo de corriente y la constante específica del motor son válidas para las dos expresiones anteriores, es posible definir una constante K_M para obtener las relaciones entre voltaje y corriente inducidos, así mismo para torque y velocidad angular en el rotor.

$$K_M = \phi \cdot k_A = \phi \cdot k_S = \frac{E_A}{\omega_M} = \frac{\tau_M}{I_A} \quad (2.24)$$

2.3.4.3. Potencia electromecánica del motor

Aplicando la Ley de Ohm a la expresión anterior se puede obtener una expresión de potencia eléctrica en armadura P_A relacionada con la potencia mecánica en el rotor.

$$P_A = P_M = I_A \cdot E_A = \tau_M \cdot \omega_M \quad (2.25)$$

La potencia mecánica del motor P_M muestra que cuando el voltaje inducido es mayor que la corriente en armadura, la velocidad angular del rotor aumenta, disminuyendo el torque. En caso contrario, si la corriente de armadura es mayor que el voltaje inducido, el torque aumenta y disminuye la velocidad angular.

2.3.4.4. Potencia eléctrica

En términos de la Ley de Kirchhoff para el circuito equivalente del motor CD devanado en serie, se puede obtener una expresión para la corriente de línea I_M en función del torque necesario en la flecha del rotor.

$$I_M = I_A = \frac{\tau_M}{K_M} \quad (2.26)$$

Así mismo, también se puede obtener una expresión de voltaje en terminales del motor para girar el rotor a una velocidad angular.

$$V_M = K_M \cdot \omega_M + I_A (R_A + R_S) \quad (2.27)$$

Las dos expresiones anteriores son de gran utilidad para controlar el torque y velocidad angular en el eje de tracción del vehículo variando los parámetros de corriente y voltaje en terminales.

La potencia eléctrica en terminales del motor es igual al voltaje en terminales por la corriente.

$$P_E = V_M \cdot I_M \quad (2.28)$$

Es importante observar que las ecuaciones 2.25 y 2.28 muestran que la potencia mecánica entregada por el motor siempre será menor que la potencia eléctrica necesaria en sus terminales.

2.4. Electrónica de potencia y control de velocidad

Introducción

La electrónica de potencia es la encargada de procesar y controlar el flujo de energía eléctrica mediante el suministro de voltaje y corriente en una forma óptima para la carga, como se muestra en la [Figura 2.16](#) [60]. Su importancia radica en la capacidad de conversión y control de la energía con una mayor eficiencia y una menor dificultad para disipar energía en comparación con los dispositivos de electrónica lineal [60].

Otras consideraciones importantes son la reducción de tamaño, peso y costos de los dispositivos de conversión y control [60], además de una mayor estabilidad del sistema durante posibles perturbaciones [61].

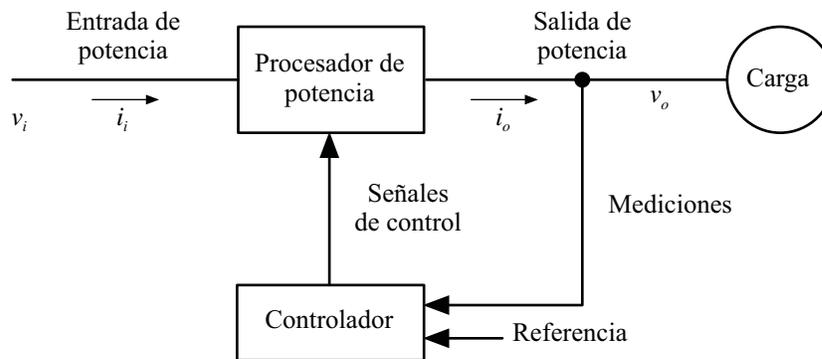


Figura 2.16 Diagrama de bloques de un sistema de electrónica de potencia [60].

La electrónica de potencia es uno de los campos con mayor potencial para aplicaciones en el sector energético moderno, en donde la mayor parte de los productos electrónicos requieren un suministro regulado de energía [60].

Además, en un contexto de uso eficiente de la energía para disminuir los impactos ambientales derivados de su generación, transmisión, distribución y consumo, la electrónica de potencia aumenta la eficiencia de conversión y control de la energía, así como la integración de sistemas de generación de energía por fuentes renovables [60].

La implementación de la electrónica de potencia en el sector transporte hace posible contar con sistemas de control de tracción en vehículos eléctricos y el control de recarga de las baterías [60].

2.4.1. Convertidores de potencia

Los convertidores de potencia están conformados por dispositivos semiconductores de potencia (circuitos integrados) que responden a las señales de control de conmutación (señales de encendido y apagado), esto con el objetivo de regular la energía con la mayor eficiencia [61].

También es posible que el sistema de conversión de potencia incluya elementos de almacenamiento de energía, como inductores y capacitores [61].

2.4.2. Dispositivos semiconductores de potencia

Los dispositivos semiconductores de potencia son componentes esenciales en la etapa de regulación de energía, debido a que son los encargados de conmutar voltaje y corriente [61].

De forma general, los dispositivos semiconductores de potencia pueden clasificarse de la siguiente manera:

- **Tipo 1.** Dispositivos que pasan al estado de conducción cuando se polarizan directamente. Se apagan cuando el flujo de corriente es interrumpido.
- **Tipo 2.** Dispositivos que inician el estado de conducción cuando se polarizan y reciben una señal de activación de una terminal de control. Se apagan cuando se interrumpe la corriente.
- **Tipo 3.** Dispositivos con sus estados de conducción y apagado controlados mediante una señal aplicada por una terminal de control.

El tipo adecuado de convertidor depende del tipo de fuente (CA o CD), la topología del convertidor (CA/CA, CA/CD, CD/CD, CD/CA) o por la conexión de salida pasiva (R, RL, RLC) o activa (red eléctrica, sistema de almacenamiento o carga) [61].

Los dispositivos semiconductores de potencia más comunes son [60]:

- **Diodos.** Un diodo es un dispositivo semiconductor diseñado para permitir el paso de corriente en una sola dirección [62]. En los diodos los estados de conexión y desconexión son controlados por el circuito de potencia [60].
- **Tiristores.** Un tiristor es un nombre genérico para una familia de dispositivos semiconductores fabricados por cuatro capas de semiconductores [62]. Los tiristores son activados mediante una señal de control, pero pueden ser desactivados por medio del circuito de potencia (control por fase) o por un circuito de control externo [60].
- **Interruptores controlables.** Los interruptores controlables se conectan y desconectan mediante señales de control, abarcando varios tipos de dispositivos como transistores de unión bipolar (Bipolar Junction Transistors, BJT), transistores de efecto de campo óxido metálico semiconductor (Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistors, MOSFET), tiristores desactivables por puerta (Gate Turn-Off, GTO) y transistores bipolares de puerta aislada (Insulated Gate Bipolar Transistors, IGBT) [60].

2.4.3. Tipos de convertidores de potencia y sus características

Los convertidores de potencia tienen una gran importancia en el momento de adecuar la energía proveniente de la fuente (generador, red de energía eléctrica, sistema de almacenamiento) al perfil de demanda requerido por la carga. Se pueden clasificar dependiendo del tipo de corriente proveniente de la fuente, ya sea en corriente directa (CD) o alterna (CA) [61].

- **Rectificadores (CA/CD).** Los rectificadores generan una salida de voltaje y corriente en CD, a partir de la entrada de corriente y voltaje provenientes de una fuente de CA [61]. Los rectificadores son usados cuando la energía a la entrada proviene de la red de suministro CA (monofásica o trifásica), o cuando proviene de un generador síncrono y comúnmente alimentan máquinas CD, cargas resistivas e inductivas, sistemas de almacenamiento como baterías y otros convertidores (CD/CD, CD/CA) [61].

- **Reguladores (CA/CA).** En los reguladores CA/CA, la entrada y la salida de corriente y voltaje son en CA, sin embargo, la amplitud del voltaje de salida puede ser igual, menor o mayor que el de la fuente [61]. Al igual que los rectificadores, los reguladores CA/CA son empleados cuando la energía proviene de la red de suministro o de un generador síncrono y a salida se conectan máquinas de inducción de jaula de ardilla o de rotor devanado, motores universales, cargas resistivas, inductivas y capacitivas, o bien, derivaciones de la red en CA [61].
- **Inversores (CD/CA).** A partir de una fuente CD conectada a la entrada, un inversor genera una onda simétrica de voltaje y corriente en CA a la salida. Los valores de amplitud y frecuencia de la señal CA generada, son ajustables en función al tipo de control ejercido sobre los interruptores del inversor [61]. Debido a que la salida del inversor es corriente alterna, es común que se conecten máquinas de inducción de jaula de ardilla monofásicas y trifásicas, cargas resistivas, inductivas y capacitivas, además de ser posible la conexión con otros convertidores [61].
- **Reguladores (CD/CD).** En los reguladores CD/CD, la entrada y la salida de corriente y voltaje son en CD, sin embargo, la amplitud del voltaje de salida puede ser igual, menor o mayor que el de la fuente [61]. Los reguladores CD/CD son empleados cuando la fuente suministra corriente o voltaje en CD, como paneles solares, baterías y celdas de combustible, son útiles para conectar baterías, máquinas CD y otros convertidores de entrada CD [61].

2.4.4. Convertidores CD/CD

Como se mencionó previamente, los convertidores CD/CD son útiles en aplicaciones en donde la fuente proporciona un nivel fijo o variable de corriente CD, como es el caso de las celdas solares, bancos de baterías y celdas de combustible, en donde la demanda de energía en la carga puede ser igual, menor o mayor que la proporcionada por la fuente [61].

Las principales aplicaciones de convertidores CD/CD son [61]:

- Fuentes de alimentación que operan en modo conmutado
- Cargadores de baterías
- Unidades de frenado en accionamiento CA y CD
- Sistemas fotovoltaicos

- Etapa intermedia de adaptación entre convertidores CA/CD y CD/CA
- Accionamiento y aislamiento en la medición de señales en procesos industriales
- Navegación marítima y espacial
- Vehículos eléctricos e híbridos

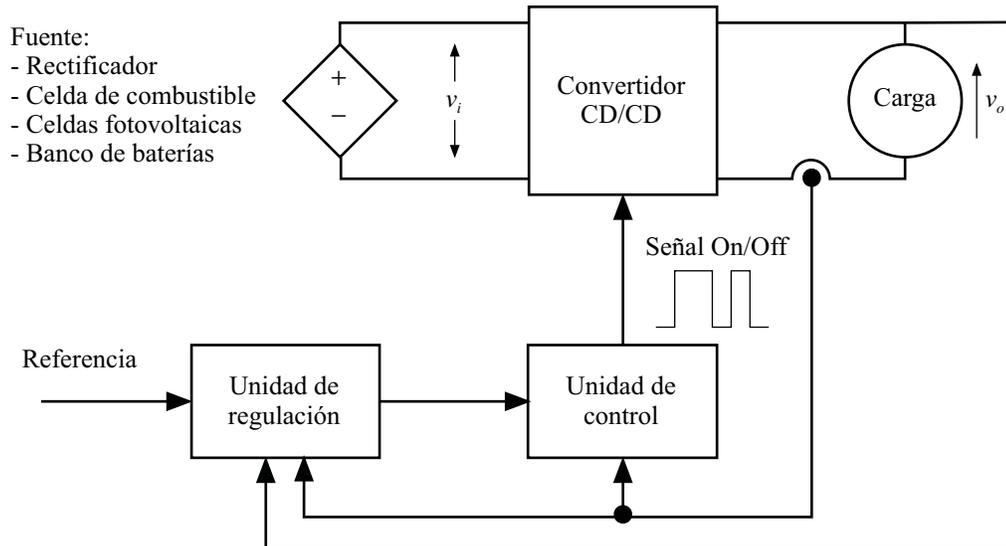


Figura 2.17 Diagrama general de un convertidor CD/CD [61].

La [Figura 2.17](#) muestra los principales componentes involucrados en un sistema de conversión de potencia CD/CD. La fuente se conecta a la carga mediante el convertidor, un sistema de control permite regular la señal de conmutación (On/Off) para reducir o aumentar la tensión.

El sistema de control puede ser de lazo abierto sin recibir una señal de retroalimentación de la carga, o bien de lazo cerrado obteniendo señales de retroalimentación que permitan regular los valores de control a partir de una señal de referencia.

2.4.5. Control por modulación por ancho de pulso PWM

En la configuración PWM se genera un patrón de pulsos con período constante controlando el ciclo de trabajo de la señal resultante, es decir, ajustando la relación entre el tiempo de conducción del elemento de potencia respecto al período fijo de la señal [61].

Los convertidores PWM tienen las ventajas de requerir pocos componentes, tener una eficiencia alta, operar con una frecuencia constante, tener un control relativamente sencillo

y la disponibilidad comercial de los circuitos integrados controladores, además de tener la habilidad de alcanzar altos rangos de conversión, tanto para topologías de reductores como elevadores [63].

Las desventajas de los convertidores CD/CD con PWM es que la forma rectangular del pulso causa pérdidas de encendido y apagado en el semiconductor, lo cual limita la operación en rangos de frecuencias de megahertz [63].

2.4.6. Convertidor *chopper*

El propósito de un convertidor tipo *chopper* es a partir de una fuente de voltaje constante, brindar un voltaje variable a una carga. La [Figura 2.18](#) muestra la idea simple de un convertidor *chopper*, un interruptor S se “enciende” y “apaga” de forma controlada, variando la tensión entre la fuente V y la carga R [63, 64].

Esta idea básica de conmutación gobierna a los convertidores de potencia anteriormente mencionados que emplean dispositivos semiconductores tipo MOSFET, IGBT MCT, BJT y GTO como interruptores controlados por técnicas de modulación tipo PWM [63].

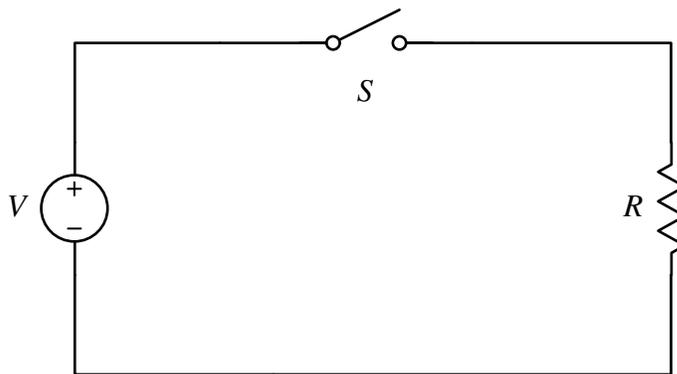


Figura 2.18 Esquema de convertidor *chopper* entre una fuente V y una carga R .

2.4.7. Accionamiento *chopper* de motor CD

Los convertidores tipo *chopper* son empleados en accionamientos (drivers) de sistemas de tracción, colocando el convertidor entre una fuente de voltaje fija, por ejemplo, una batería, y la armadura del motor CD para el control de velocidad por debajo de la velocidad nominal del motor.

La configuración básica de un convertidor tipo *chopper fed DC motor drive* se muestra en la Figura 2.19, en donde se puede observar la presencia de los componentes básicos de un convertidor de potencia, una fuente V , un interruptor S , un diodo D y un arreglo RLE en serie correspondiente a la carga.

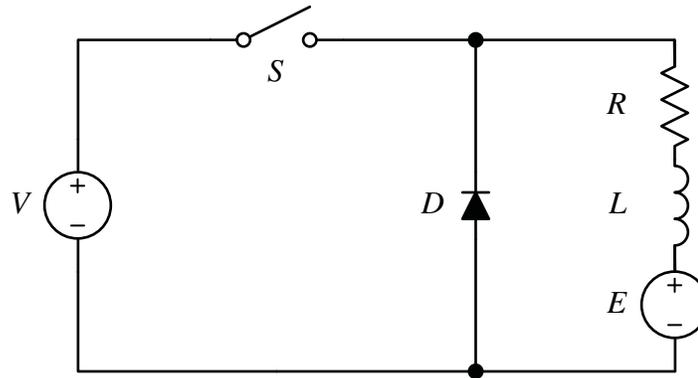


Figura 2.19 Configuración básica de convertidor tipo *chopper fed DC motor drive* [63].

Los componentes del arreglo RLE corresponden con los componentes de un motor CD devanado en campo y conexión en serie. El inductor L representa el campo, la fuente E representa la armadura y la resistencia R corresponde a las resistencias internas de campo y armadura. La fuente V comúnmente corresponde a una batería ideal.

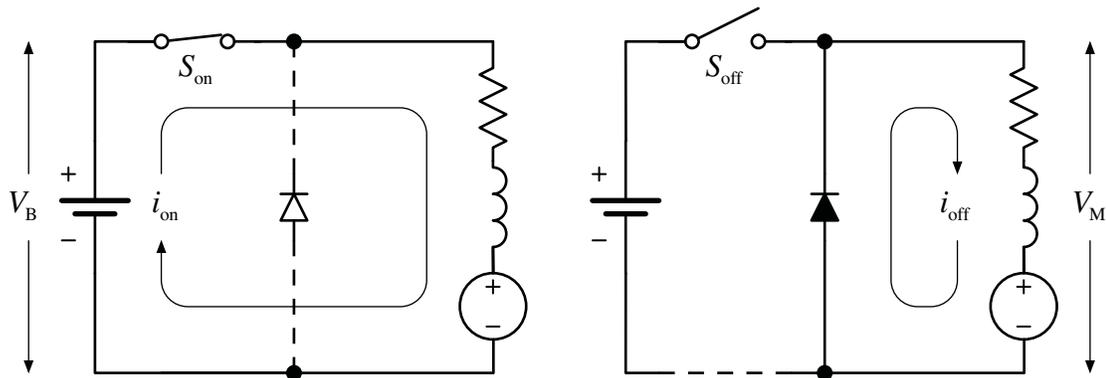


Figura 2.20 Operación de un accionamiento *chopper* [51].

La Figura 2.20 muestra los dos estados de operación de un accionamiento *chopper*. Cuando el interruptor se encuentra encendido, conecta las terminales de la batería con las terminales del motor en serie, permitiendo el flujo de corriente i_{on} a lo largo del circuito. Cuando el interruptor se apaga, el circuito queda desconectado, permitiendo que la corriente i_{off} almacenada en el arreglo RLE circule a través del diodo.

El comportamiento de la tensión y la corriente durante la conmutación se puede observar en la [Figura 2.21](#), en la que se puede observar para los tiempos de encendido t_{on} y apagado t_{off} .

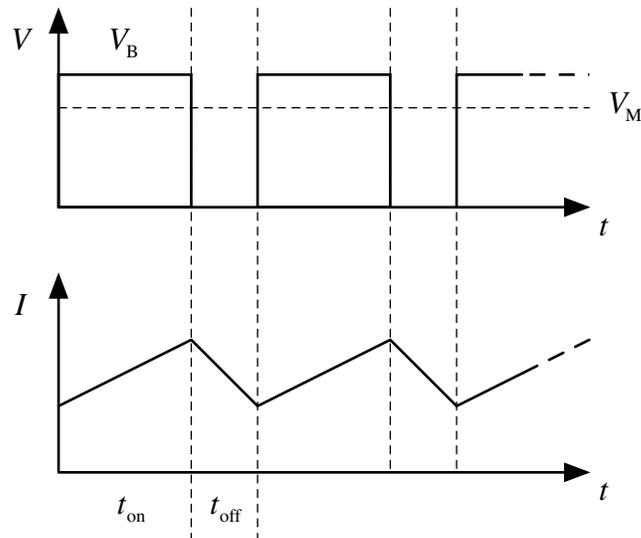


Figura 2.21 Comportamiento de la tensión y corriente durante la conmutación del interruptor [64].

Los tiempos de conmutación se relacionan con un ciclo de trabajo δ que para una frecuencia de conmutación constante $T = 1/f$ se puede expresar como:

$$\delta = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = \frac{t_{on}}{T} \quad (2.29)$$

La relación entre la tensión de la fuente o batería V_B y las terminales del arreglo RLE que representa un motor CD conectado en serie está dada por:

$$V_M = \delta \cdot V_B \quad (2.30)$$

La corriente en el motor CD se da aplicando la ley de Ohm en el arreglo RLE que también se puede expresar en función del ciclo de trabajo [64]:

$$I_M = \frac{V_M}{R} = \frac{\delta \cdot V_B}{R} \quad (2.31)$$

El valor efectivo (RMS) del voltaje en el motor $V_{M(RMS)}$ está dado por:

$$V_{M(RMS)} = \sqrt{\frac{V_B^2 \cdot t_{on}}{T}} = V_B \sqrt{\frac{t_{on}}{T}} = V_B \sqrt{\delta} \quad (2.32)$$

2.5. Baterías

Introducción

Una batería es un dispositivo que convierte la energía química contenida en sus materiales activos directamente en energía eléctrica por medio de una reacción electroquímica de oxidación-reducción. En el caso de una batería recargable, el sistema se recarga mediante el proceso inverso. Este tipo de reacción implica la transferencia de electrones de un material a otro a través de un circuito eléctrico como se muestra esquemáticamente en la [Figura 2.22](#).

Dado que la batería convierte electroquímicamente la energía química en eléctrica, no está sujeta a las limitaciones del ciclo de Carnot dictadas por la segunda ley de la termodinámica como lo están las máquinas térmicas o los motores de combustión. Por lo tanto, las baterías son capaces de tener mayores eficiencias de conversión de energía [65].

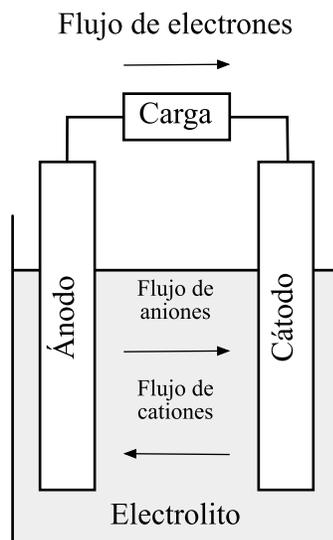


Figura 2.22 Diagrama básico de operación de una batería.

2.5.1. Aspectos generales

Las baterías son un elemento clave para el almacenamiento de electricidad obtenida a partir de energía solar y eólica. Los vehículos eléctricos representan la otra aplicación potencial para sistemas avanzados de baterías [66].

Las baterías se clasifican como primarias (no recargables) o secundarias (recargables), dependiendo de su capacidad para ser recargadas eléctricamente.

Dentro de esta definición, otras clasificaciones se utilizan para identificar estructuras o diseños particulares de baterías como las baterías de reserva y las celdas de combustible [65]. Respecto a las celdas de combustible, se abordará el tema con mayor profundidad en el apartado [2.6. Celdas de Combustible](#).

2.5.2. Características técnicas y criterios de selección

Los requisitos múltiples y variados de energía, así como las distintas condiciones ambientales y eléctricas de operación requieren el diseño y selección de la tecnología de baterías más adecuada.

Por este motivo se pueden mencionar los siguientes parámetros de selección como referencia, en función de la aplicación.

- Tipo de batería
- Voltaje
- Corriente y perfil de la carga
- Ciclos de carga
- Requerimientos de temperatura
- Vida útil
- Dimensiones físicas (peso y volumen)
- Periodo de autodescarga
- Ciclo de carga-descarga
- Condiciones ambientales de operación
- Seguridad y confiabilidad
- Mantenimiento
- Costo
- Impactos ambientales

2.5.3. Baterías Ácido-Plomo (Lead-acid batteries) [67]

Dado que el presente trabajo se basa en una aplicación vehicular de la tecnología de baterías de ácido-plomo, se tomará particular interés en su descripción.

El desarrollo de esta tecnología de batería recargable se le atribuye al físico francés Gaston Planté en 1860, la cual consistía en un dispositivo de nueve celdas conectadas en paralelo [67].

A la actualidad, existen diversas aplicaciones para las baterías ácido plomo, que van desde el almacenamiento de energía automotriz y estacionaria hasta el almacenamiento de energía proveniente de fuentes renovables y el control de energía. Las baterías de plomo ácido constituyen el segmento más grande del mercado de baterías. La fiabilidad, disponibilidad y bajo coste son la clave para el éxito de este tipo de baterías. Desde una perspectiva ambiental, las baterías ácido-plomo se consideran “ecológicas” debido a la industria de reciclaje establecida. La capacidad de adaptar el sistema a nuevas aplicaciones y optimizar su rendimiento para satisfacer las demandas en nuevas aplicaciones ha sido un esfuerzo internacional exitoso durante 150 años y continúa generando mejores diseños de baterías y sistemas de energía para el futuro [66].

Una amplia gama de diseños y tamaños de baterías de plomo-ácido se fabrican para aplicaciones convencionales como el arranque, encendido e ignición en vehículos automotores; respaldo de energía de reserva para sistemas eléctricos, de energía nuclear y sistemas de seguridad, y la propulsión de vehículos ligeros y utilitarios [66].

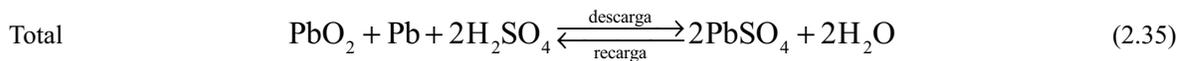
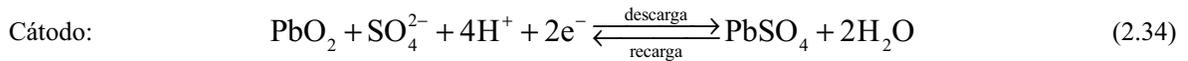
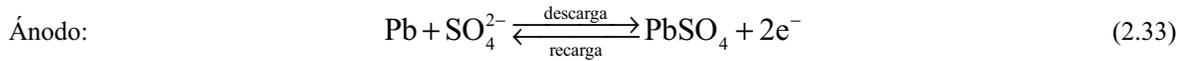
El uso creciente de baterías de plomo-ácido para almacenar energía renovable ha llevado a nuevos diseños con mayor rendimiento y tiempo de vida. Nuevos diseños de baterías de ácido-plomo para vehículos eléctricos híbridos están en desarrollo. Un reciente diseño de baterías *Ultra* de 144 V con ánodos hechos de carbono y plomo conectados en paralelo superó las 100,000 millas cuando se sustituyó la batería de hidruro metálico de níquel en un *Honda Insight* [66].

2.5.4. Modelo Eléctrico de Baterías de Ácido-Plomo

Las baterías de ácido-plomo tienen buenas características de desempeño y de ciclo de vida, además de ser más económicas que otras baterías, como las de iones de litio. Están formadas por dos placas, una positiva y otra negativa, sumergidas en una disolución de ácido sulfúrico [68].

La placa positiva, el ánodo, está hecho de dióxido de plomo (PbO_2), y la placa negativa, el cátodo, está hecha de plomo (Pb).

Las reacciones químicas en la batería, en sus procesos de recarga y descarga son las siguientes:



Las baterías operan en dos principales modos, en recarga y descarga, dependiendo del signo de la corriente.

Cuando la batería se recarga, la corriente de la batería I_B fluye a la terminal positiva, incrementando el voltaje de la batería V_B , en el caso contrario, cuando la corriente fluye a la terminal negativa, el voltaje en la batería disminuye.

Modelar la recarga y descarga puede resultar algo complejo debido a los múltiples factores que determinan el comportamiento de la batería. En un análisis inicial, una batería se puede representar como una fuente ideal de voltaje [69].

En la [Figura 2.23](#) se puede ver una fuente ideal con un voltaje a circuito abierto V_{OC} , con los electrodos representados por las terminales positiva (cátodo) y negativa (ánodo).

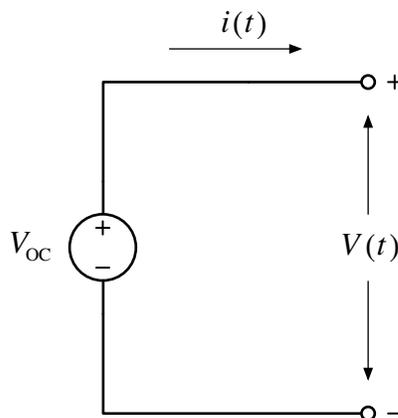


Figura 2.23 Modelo básico de una batería ideal con un voltaje de salida constante.

Se puede observar que la corriente $i(t)$ y el voltaje en terminales $V(t)$ son dependientes del tiempo, por lo que el modelo de la batería debe ser dinámico para describir con mayor detalle su desempeño.

2.5.4.1. Parámetros de desempeño de una batería

Los principales parámetros que definen el desempeño de la batería son:

- a) Capacidad nominal C_x para un rango de descarga x en horas.
- b) Tasa de carga/descarga
- c) Estado de carga (State of Charge, SOC)

a) Capacidad nominal

La capacidad nominal E_x en Wh es definida como el total de la energía almacenada que puede ser entregada por la batería para un rango x de horas de uso. Está dada por las condiciones de operación, como el tiempo de descarga y la temperatura.

$$E_x (\text{Wh}) = C_x (\text{Ah}) \cdot V_{B, \text{nom}} (\text{V}) \quad (2.36)$$

La capacidad de la batería C_x en Ah se obtiene de la tabla de especificaciones técnicas proporcionada por el fabricante y depende de cada modelo de batería específico. El voltaje $V_{B, \text{nom}}$ es el voltaje nominal de la batería.

b) Tasa de carga/descarga

Es definida como la relación entre la capacidad nominal de la batería y los valores de carga/descarga de corriente, para un intervalo de tiempo igual al rango de horas de la capacidad.

c) Estado de carga (SOC)

El estado de carga SOC es el valor de la capacidad Q liberada en un tiempo dado dividido entre la capacidad C_x de la celda.

$$SOC = 1 - \frac{Q}{C_x} \quad (2.37)$$

El *SOC* es un parámetro que determina la cantidad de energía empleada y la que se encuentra disponible del 0 al 100% total. Se puede observar que si la capacidad liberada de las baterías es igual a la capacidad máxima, el estado de carga será cero, es decir, no habrá más energía disponible en la batería.

$$0 \leq SOC \leq 1 \quad (2.38)$$

Otra forma de evaluar la energía disponible en una batería es calculando la profundidad de la descarga (*Deep of Discharge, DOD*):

$$DOD = 1 - SOC \quad (2.39)$$

La capacidad liberada durante la operación es una función del tiempo, y depende del perfil de corriente para un periodo de tiempo dado [70]:

$$Q(t) = Q(t_0) + \int_{t_0}^t I_B(t) dt \quad (2.40)$$

La capacidad inicial $Q(t_0)$ es igual a la capacidad liberada cuando no hay un flujo de corriente $I_B(t)$ a travez del circuito.

El estado de carga en función del tiempo $SOC(t) = z(t)$ se define como [69]:

$$z(t) = z(t_0) - \frac{1}{C^x} \int_{t_0}^t I_B(t) dt \quad (2.41)$$

El estado de carga inicial $z(t_0)$ es el porcentaje de carga en el momento en que inicia el análisis y se determina midiendo el voltaje en terminales de la batería o la densidad del electrolito.

La [Figura 2.24](#) describe el modelo eléctrico más simple de una batería real como una fuente de voltaje controlada V_{oc} que varía el valor del voltaje y corriente en terminales como una función del tiempo. La resistencia R_{int} en serie representa la resistencia interna de la batería.

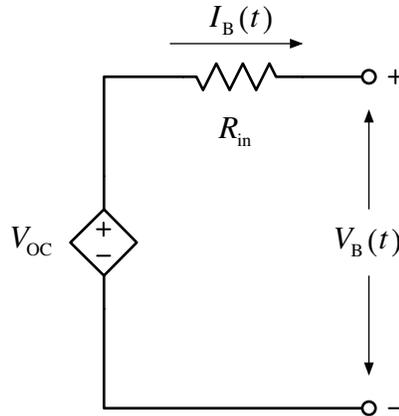


Figura 2.24 Circuito equivalente de una batería real con un voltaje de salida y resistencia interna variables respecto al estado de carga [69].

El valor del voltaje en terminales $V_B(t)$ depende directamente del estado de carga $z(t)$ y de la función de corriente $I_B(t)$ se define como:

$$V_B(t) = V_{OC}(z(t)) - I_B(t)R_{int} \quad (2.42)$$

Debido a que una batería es un arreglo de celdas (conectadas en serie o en paralelo), el voltaje de circuito abierto V_{OC} depende del voltaje de una celda individual. En el caso de una batería ácido plomo con un arreglo conectado en serie, el voltaje de circuito abierto está dado por:

$$V_{OC} = V_{cell} \cdot n_{cell} \quad (2.43)$$

La potencia P_B proporcionada por la batería es la cantidad de energía proporcionada en un tiempo dado, y es igual al voltaje medido en terminales V_B por la corriente I_B .

$$P_B = V_B \cdot I_B \quad (2.44)$$

2.6. Celdas de Combustible

Introducción

Una celda de combustible es un dispositivo electroquímico que convierte energía química directamente en energía eléctrica [18].

Al igual que las baterías, las celdas de combustible son una variedad de celda galvánica, la cual consiste en uno o más electrodos (conductores eléctricos) que están en contacto con un electrolito (conductor iónico) [71]. La diferencia entre ellas es que en una batería los reactivos están contenidos dentro de un empaque y en una celda de combustible, los reactivos son suministrados de forma externa [72].

La celda de combustible más simple consiste en dos electrodos metálicos (platino) separados y sumergidos en un electrolito acuoso como se muestra en la [Figura 2.25](#). Durante la operación de la celda, el electrodo negativo o ánodo cede electrones debido a la oxidación del combustible suministrado (generalmente hidrógeno). El electrodo positivo o cátodo gana electrones para reducir el agente oxidante (oxígeno) [71, 73].

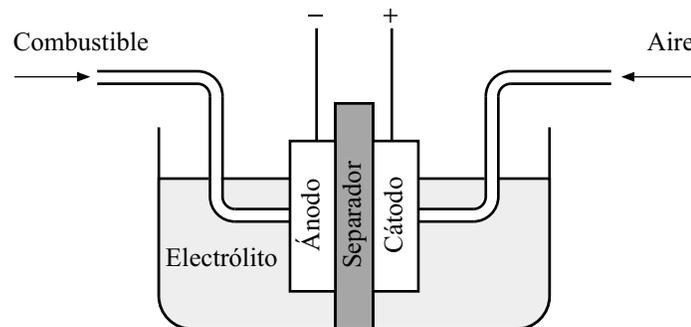


Figura 2.25 Esquema de una celda de combustible simple [71].

La generación de energía eléctrica en una celda de combustible que emplea hidrógeno puro, es considerada de “cero emisiones” in situ, debido a que, durante su operación, los residuos resultantes son vapor de agua y calor [18], y a diferencia de los motores de combustión interna, su eficiencia de operación no está limitada por el ciclo de Carnot [18, 71].

2.6.1. Aplicaciones

Las primeras aplicaciones prácticas de las celdas de combustible fueron la generación de electricidad y agua en los programas espaciales de Gemini y Apollo [18].

Sin embargo, gracias al desarrollo de nuevos materiales y soluciones técnicas de control de operación, las celdas de combustible tienen aplicaciones en sectores de transporte, generación de energía estacionaria y aplicaciones portátiles [18]. A la fecha, la mayoría de las compañías automotrices han desarrollado al menos un prototipo de vehículo basado en celdas de combustible [31, 74],.

A continuación, se listan las principales aplicaciones [75]:

- **Transporte.** Las celdas de combustible son consideradas como una de las tecnologías con mayor potencial en aplicaciones de transporte, desde vehículos ligeros y de transporte personal hasta autobuses, tractocamiones, vehículos utilitarios y trenes [31, 73, 75]. También existen ejemplos de aplicaciones de celdas de combustible en aeroplanos, botes, y submarinos, además de sus aplicaciones en la generación de energía abordo de los satélites espaciales de la NASA [31][73]. Las celdas de combustible PEM han tenido un gran desarrollo en los últimos años, ya que al ser ligeras, compactas, y operar a bajas temperaturas, son ideales en aplicaciones de vehículos de pasajeros, en donde la eficiencia de conversión y las bajas emisiones son factores importantes para el ahorro de energía y mitigación de gases de efecto invernadero (GEI) [75]. En la sección 2.6.3. se describen con mayor detalle las particularidades de las celdas de combustible PEM.
- **Generación estacionaria.** Las celdas de combustible tienen aplicaciones para la generación distribuida de potencia y respaldo de energía. Como ejemplo, en Japón y Alemania existen pequeñas plantas de generación (1-10kW) con aplicaciones residenciales [31].
- **Aplicaciones portátiles.** Muchas compañías están desarrollando celdas de combustible miniatura como reemplazos de batería para dispositivos electrónicos (teléfonos celulares, laptops). Debido a los inconvenientes de almacenar hidrógeno

en pequeña escala, la mayoría de ellos usan metanol en celdas de combustible DMFC o través de microreformadores en celdas de combustible PEM [31].

2.6.2. Tipos de celdas de combustible y sus características

Las celdas de combustible se clasifican principalmente por el tipo de electrolito que usan [18], el tipo de portador de carga y el rango de temperatura de operación [75].

En la actualidad, existen una cantidad muy amplia de tecnologías de celdas de combustible, cada una con características y aplicaciones específicas. La [Tabla 2.2](#) resume las principales características de las celdas de combustible más comunes: las celdas de combustible de membrana de intercambio protónico (PEMFC), de ácido fosfórico (PAFC), las alcalinas (AFC), de carbonatos fundidos (MCFC) y de óxidos sólidos (SOFC).

Tabla 2.2 Principales tipos de celdas de combustible comunes y sus características [16].

	PEMFC	PAFC	AFC	MCFC	SOFC
Electrolito	Membrana polimérica	H ₃ PO ₄	KOH Líquido	Carbonatos fundidos	Cerámicos
Portador de carga	H ⁺	H ⁺	OH ⁻	CO ₃ ²⁻	O ₂ ⁻
Temperatura de operación	80°C	200°C	60-220°C	650°C	600-1000°C
Catalizador	Platino	Platino	Platino	Níquel	Cerámicos
Componentes	Carbón	Carbón	Carbón	Acero Inoxidable	Cerámicos
Combustibles	H ₂ , Metanol	H ₂	H ₂	H ₂ , CH ₄	H ₂ , CH ₄ , CO

2.6.3. Celdas de combustible de membrana de intercambio protónico (PEMFC)

Las celdas de combustible PEM se caracterizan por emplear una membrana de polímero como electrolito [16]. Los electrodos están compuestos por una capa difusora de gas con una delgada capa catalítica como la interfaz entre el electrodo y el electrolito [75]. Los reactivos suministrados circulan por canales de flujo distribuidos en las caras de las placas bipolares principalmente de grafito o de acero inoxidable recubierto por metales preciosos como oro. La distribución de los principales componentes en el ensamblaje se muestra en la [Figura 2.26](#), así como las reacciones de oxidación en el ánodo y reducción en el cátodo.

Las celdas de combustible PEM han tenido un gran impulso durante las últimas décadas, debido a su gran potencial para remplazar a los sistemas de combustión interna en vehículos de pasajeros con requerimientos de potencia de 50-100 kW [75]. También han sido consideradas para aplicaciones en autobuses, trailers, sistemas de respaldo, generación estacionaria y dispositivos portátiles [31, 75].

Las principales prestaciones de las celdas de combustible PEM son:

- Compactas y ligeras.
- Operan a temperaturas relativamente bajas (80°C).
- Sensibles y responden a las variaciones de demanda de corriente.
- Tienen pocas pérdidas por resistencia y altas densidades de corriente y potencia.
- Proceso de fabricación relativamente simple.

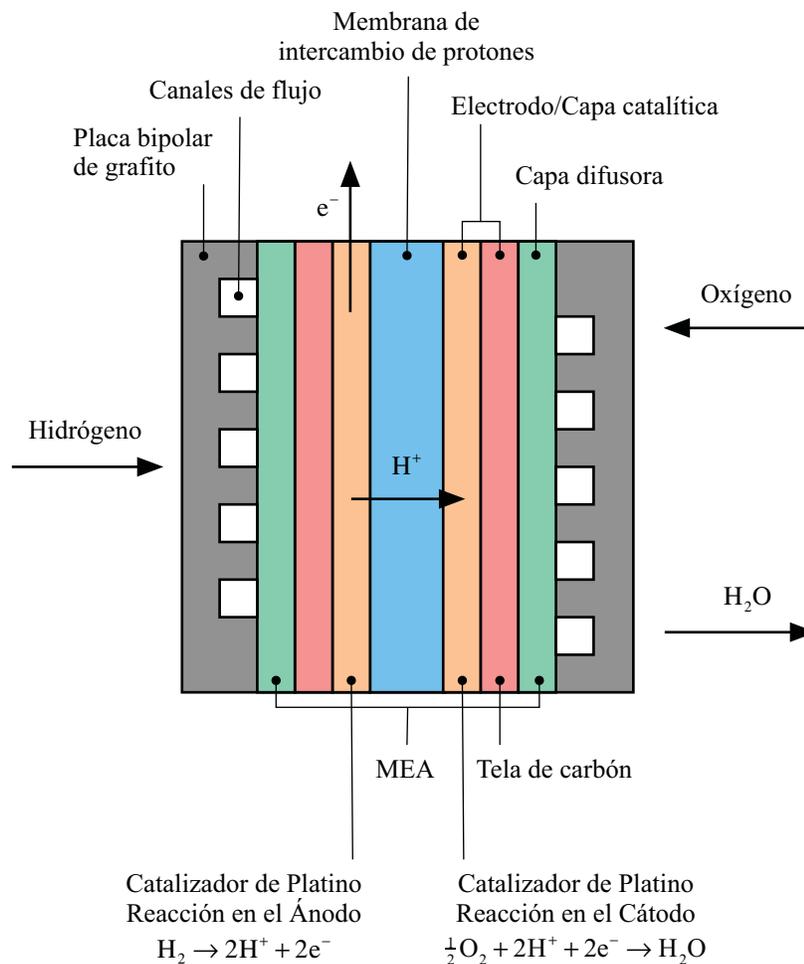
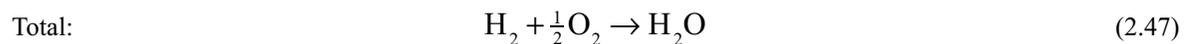
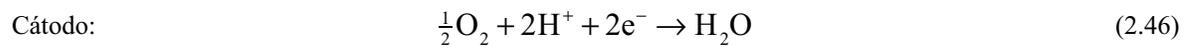


Figura 2.26 Esquema general de una celda de combustible PEM [73].

Las celdas de combustible PEM, se caracterizan por usar una delgada ($<50 \mu\text{m}$) membrana de polímero conductora de protones (generalmente un polímero de ácido perfluorosulfonado) como electrolito. El catalizador es generalmente platino soportado en carbón con concentraciones que pueden variar de 0.1 a 0.5 mg/cm^2 y la temperatura de operación de la celda es típicamente de $60 \text{ }^\circ\text{C}$ a $80 \text{ }^\circ\text{C}$ [31].

Las reacciones químicas de una celda de combustible PEM son [31, 73]:



2.6.4. Fundamentos de operación de una celda de combustible PEM

La operación de una celda de combustible se puede resumir en los siguientes cuatro pasos [16]:

1. Suministro de reactivos (hidrógeno y oxígeno) al interior de la celda.
2. Reacción electroquímica.
3. Conducción iónica a través del electrolito y conducción eléctrica a través del circuito externo.
4. Salida de trabajo eléctrico, vapor de agua y calor de proceso.

2.6.4.1. Desempeño de una celda de combustible PEM

El desempeño de una celda de combustible PEM puede ser descrito por la curva corriente-voltaje o curva de polarización.

La [Figura 2.27](#) muestra la curva de polarización característica de una celda de combustible PEM. La corriente entregada por la celda de combustible es directamente proporcional a la cantidad de combustible que consume (por cada mol de combustible proporciona n moles de electrones). La eficiencia de operación de la celda puede ser descrita por el comportamiento del voltaje [16].

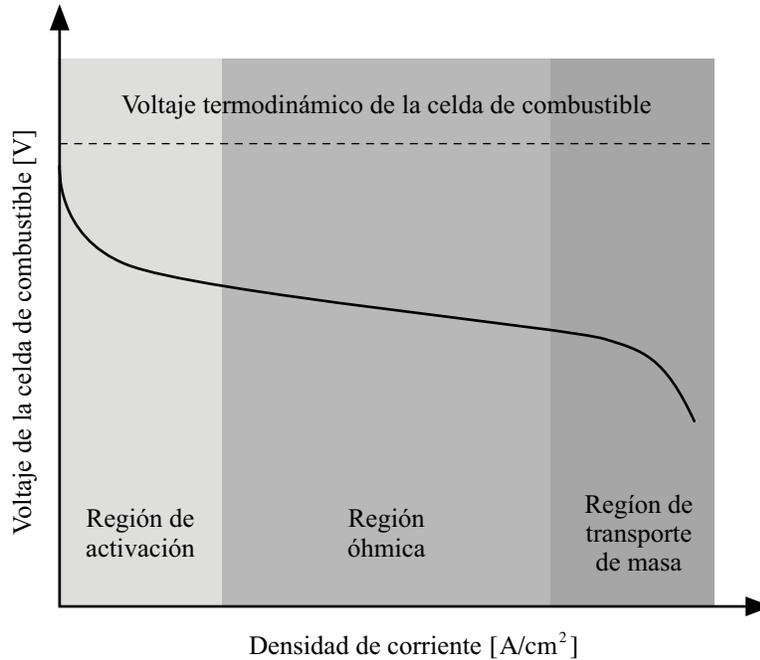


Figura 2.27 Curva característica de corriente-voltaje para una celda de combustible PEM [16].

El voltaje real de una celda es menor al voltaje termodinámico de la reacción debido a tres principales tipos de pérdidas [16]:

1. Pérdidas de activación (debidas a la cinética de las reacciones electroquímicas)
2. Pérdidas óhmicas (debidas a la conducción iónica y electrónica)
3. Pérdidas de concentración (debidas a el transporte de masa)

La salida de voltaje real en la celda puede ser determinada por el voltaje termodinámico menos las pérdidas durante la operación [16, 61]:

$$V_{FC} = E_{Nernst} - V_{Act} - V_{Ohm} - V_{Con} \quad (2.48)$$

El voltaje termodinámico E_{Nernst} está definido por la ecuación de Nernst [76] como:

$$E_{Nernst} = E + \frac{R_U T_{FC}}{2F} \ln \left(\frac{P_{H_2} \sqrt{P_{O_2}}}{P_{H_2O}} \right) \quad (2.49)$$

En donde E es la fuerza electromotriz, R_U es la constante universal de gases (8.314 J/mol·K), T_{FC} es la temperatura de la celda en grados Kelvin, F es la constante de Faraday (96485 C/mol), p_{H_2} , p_{O_2} y p_{H_2O} son las presiones parciales del hidrógeno, oxígeno y vapor de agua respectivamente.

La fuerza electromotriz E está dada por:

$$E = \frac{-\Delta G}{2F} \quad (2.50)$$

La energía libre de Gibbs ΔG es la entalpía de la reacción menos las pérdidas por generación de entropía.

El voltaje debido a las pérdidas de activación se describe por la ecuación de Tafel en donde j es la densidad de corriente de una celda y j_0 es denominada *densidad de corriente de intercambio* [76].

$$V_{Act} = A \ln\left(\frac{j}{j_0}\right) = A \ln\left(\frac{i}{i_0}\right) \quad (2.51)$$

Debido a que los términos de densidad de corriente están dados en A/cm², es posible definir el voltaje de activación en términos de la corriente de la celda de combustible.

El coeficiente de la ecuación está dado por:

$$A = \frac{R_U T_{FC}}{2\alpha F} \quad (2.52)$$

La caída de tensión por la resistencia interna o pérdidas óhmicas se determina multiplicando la corriente entregada por la celda I_{FC} multiplicada por la resistencia R_{ohm} :

$$V_{Ohm} = I_{FC} \cdot R_{ohm} \quad (2.54)$$

El voltaje causado por el transporte de masa o concentración:

$$V_{\text{con}} = -B \ln \left(1 - \frac{i}{i_{\text{max}}} \right) \quad (2.54)$$

El voltaje por concentración también puede ser expresado por la relación empírica para los parámetros n y m obtenidos experimentalmente [76]:

$$V_{\text{con}} = m \exp(n \cdot I_{\text{FC}}) \quad (2.55)$$

3. METODOLOGÍA

El modelado y simulación de componentes de un vehículo eléctrico son actividades clave para el análisis, diseño y optimización de la arquitectura del tren de potencia de un vehículo.

Un modelo permite determinar el comportamiento de un sistema y dependiendo del grado de precisión se pueden obtener parámetros de operación con menor o mayor detalle. Así el modelo del vehículo puede describirse en estado estacionario, cuasi-estacionario o dinámico [77].

El proceso de modelado básico consiste en los siguientes pasos [78]:

1. Construcción de un modelo inicial
2. Análisis del modelo inicial
3. Comparación de resultados
4. Corrección del modelo

Las principales ventajas de emplear modelos para describir un sistema son la disponibilidad para análisis, menores costos y tiempos de experimentación, implementación y pruebas, facilidad para cambiar la estructura del modelo, además de presentar de forma clara los parámetros que definen el comportamiento del sistema.

La primera etapa del proceso de modelado consiste en definir el sistema real que será objeto de estudio.

La segunda etapa consiste en proponer un modelo inicial que permita identificar las variables y condiciones necesarias para describir el comportamiento del sistema real.

En una tercera etapa se buscan verificar las hipótesis teóricas con el modelo real en un entorno de experimentación, realizando pruebas y mediciones.

La etapa de simplificación sirve para identificar los elementos teóricos que son útiles para describir el sistema real y descartar hipótesis que no concuerden con su comportamiento.

Como resultado del proceso de modelado, se obtiene un modelo básico que debe ser sometido a prueba para comparar sus resultados respecto a las pruebas realizadas en el sistema real.

Durante la etapa de simulación se emplean herramientas computacionales que permitan realizar los cálculos con precisión y velocidad.

En la [Figura 3.1](#) se puede apreciar que la modelado es un proceso iterativo, en el cual se busca refinar los resultados con el fin de obtener modelos optimizados.

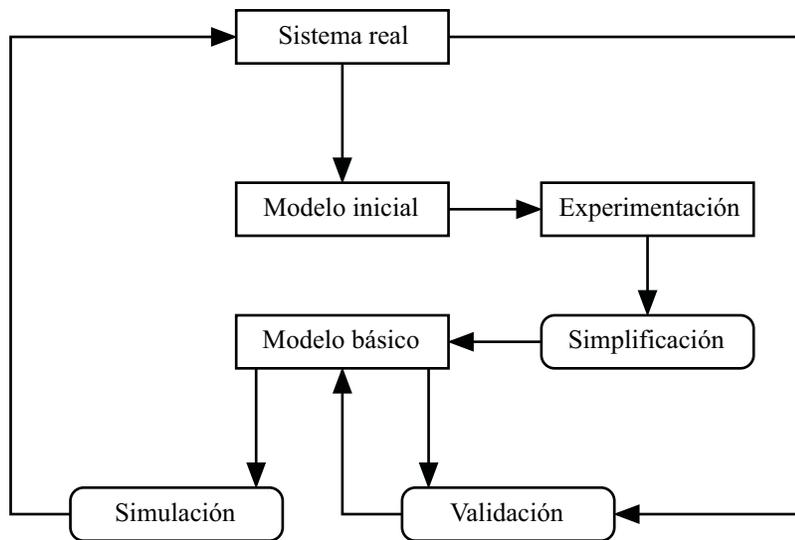


Figura 3.1 Estructura básica de la teoría de modelación [78].

La validación consiste en comparar los resultados de la simulación con el comportamiento del sistema real, con el fin de realizar ajustes en los procesos de adquisición de variables, modelo o la simulación.

3.1. Descripción del sistema real

Un carro de golf es un vehículo eléctrico ligero, de dos, cuatro o seis plazas, que es empleado para transporte de pasajeros y accesorios deportivos en un campo de césped especialmente acondicionado para la práctica de golf. Los carros de golf fueron diseñados para ser cómodos y conducirse con relativa facilidad. La [Figura 3.2](#) muestra un dibujo esquemático de un carro de golf en la que se puede apreciar los componentes más relevantes.

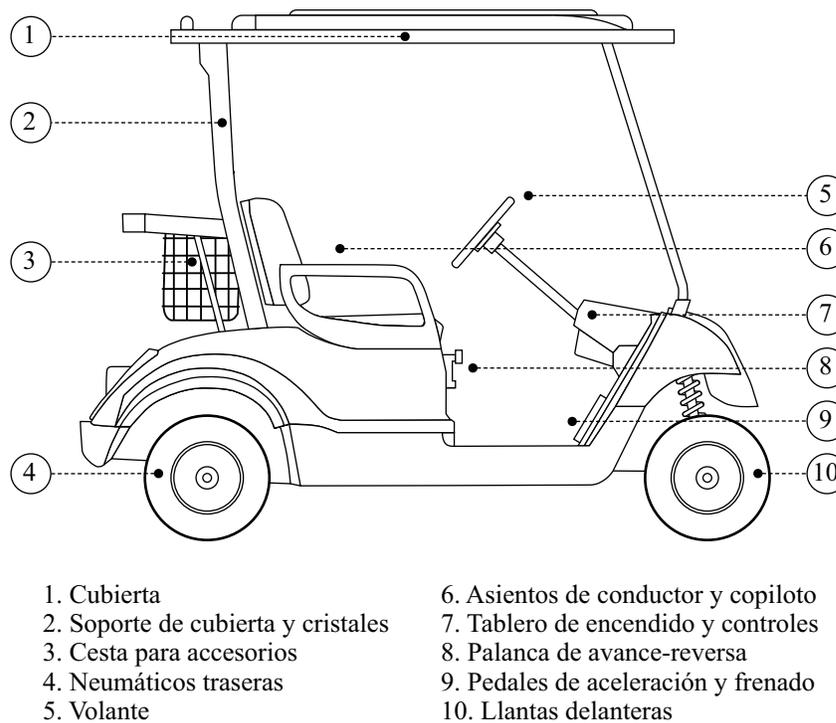


Figura 3.2 Carro de golf empleado como vehículo utilitario en actividades deportivas.

3.1.1. Características físicas del vehículo

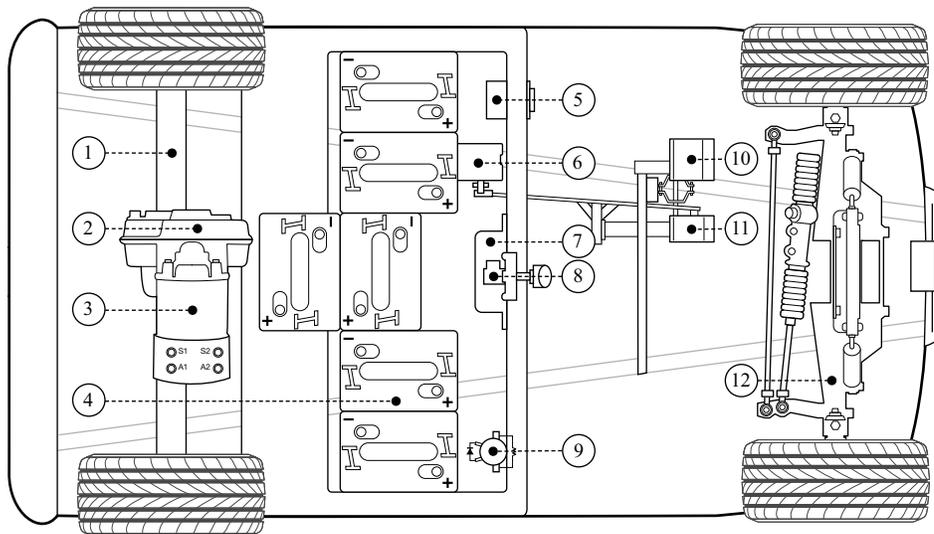
El carro de golf empleado durante las pruebas es un modelo *Yamaha Golf-Cart G-16E* (eléctrico), serie JN8-301002, de dos asientos, cuatro neumáticos, tracción trasera, avance y reversa, cubierta y cristales delanteros, con cesta y compartimiento traseros para accesorios. Se sabe que los carros de golf de la serie JN8 datan de 1999 [79], sin embargo se ignoran las condiciones de operación de este vehículo antes del año 2017, cuando fue rehabilitado para realizar pruebas de desempeño [80]. La [Tabla 3.1](#) muestra los valores aproximados de las dimensiones y masa del vehículo.

Tabla 3.1 Dimensiones físicas de un carro de golf.

Dimensión	Valor
Largo [m]	2.385
Base [m]	1.200
Alto [m]	1.929
Masa (sin baterías) [kg]	254.000
Velocidad máxima [km/h]	21.398

3.1.2. Principales componentes del sistema de tracción

Un carro de golf tiene un sistema de tracción relativamente simple, con la cantidad mínima de componentes necesarios para una operación eficiente y segura. Los principales elementos del sistema de tracción se pueden agrupar por su función en los subsistemas eléctrico y mecánico. La **Figura 3.3** muestra la distribución real de los principales componentes del tren de potencia del carro de golf.



- | | |
|---|------------------------------|
| 1. Eje de tracción | 7. Driver |
| 2. Diferencial de velocidades | 8. Control de avance-reversa |
| 3. Motor eléctrico CD devanado en serie | 9. Solenoide |
| 4. Banco de baterías ácido-plomo | 10. Freno |
| 5. Conector para recarga de baterías | 11. Acelerador |
| 6. Potenciómetro | 12. Suspensión delantera |

Figura 3.3 Principales componentes del carro de golf².

² Diagrama basado en el mostrado en “Club Car 2006 Gold Standard Vehicles Electric Owner’s Manual”.

El sistema eléctrico está conformado por un motor eléctrico, banco de baterías, convertidor de potencia, potenciómetro, control de avance-reversa, solenoide, y conector para recarga de baterías. Los elementos del sistema mecánico son el eje de tracción, diferencial mecánico, el pedal de aceleración, el freno y la suspensión delantera ([Anexo A](#)).

El motor instalado en el carro de golf es un motor de corriente directa de devanado conectado en serie, manufacturado por la compañía General Electric, de 36 V, 62 A de corriente y 1.86 kW de potencia mecánica nominal (2.5 hp) y 3300 rpm de velocidad rotacional. Los datos de la placa original del motor se muestran en la [Tabla 3.2](#).

Tabla 3.2 Datos de la placa del motor instalado.

Yamaha D-C Motor	
Model 5BC58JBS6184	
Nominal voltage	36 V
Nominal rotation speed	3300 rpm
Nominal current	52 A
Nominal power	1.86 kW
Time rating	30 min
Max. safe rpm	8000 rpm
Ambiental temperature	40°C
Wound series	
ISNL Class F	
Part No. JH7-H-1890-10	
Counter Clock Wise (CCW): Connect A2-S1, Power Across A1, S2	
Clock Wise (CW): Reverse A1, A2 Connection	
Motor Manufactured by GE Motors	
Fort Wayne, Indiana	
Made in U.S.A.	

El motor está acoplado de forma mecánica con el eje de tracción por medio de un diferencial mecánico con una relación de velocidades de 12.5:1, la cual es una relación de engranes común en los vehículos de velocidad media.

El sistema de control instalado en el carro de golf es un controlador de velocidad Curtis Instruments Inc., modelo 1204 09. Los modelos 1204/1205 son diseñados para un control suave, silencioso, eficiente y económico de torque y velocidad en una variedad vehículos eléctricos industriales [81]. Los rangos de voltaje del controlador son de 24 a 36 V con un límite de corriente de 276 A. Los datos placa del controlador se muestra en la [Tabla 3.3](#).

Tabla 3.3 Datos de placa de controlador de velocidad.

FSIP Remanufactured Motor Controller	
Model 1204 09	
Serial 467681 898-1	
Voltage Range	24-36 V
Límite de corriente	276 A
CURTIS	
Curtis Authorized Service	

El sistema de almacenamiento de energía instalado en el carro de golf es un banco de seis baterías de ácido-plomo de 6 V de tensión nominal cada una, de la marca Trojan Battery Company. Las baterías están conectadas en serie sumando un voltaje total de 36 V, sin embargo, la tensión medida en terminales oscila entre 37 y 38 V cuando se encuentran en su estado total de carga. La capacidad de las baterías es de 225 Ah para 20 h y 185 Ah para 5 h como se muestra en la [Tabla 3.4](#).

Tabla 3.4 Datos de placa de una de las seis baterías instaladas.

Trojan Battery Company	
T-105	
Deep Cycle	
Serial 467681 898-1	
Voltaje en baterías	6 V
Capacidad en baterías @ 20hr	225 Ah
Capacidad en baterías @ 5hr	185 Ah
T2 Technology	

3.1.3. Conexión eléctrica

Los componentes eléctricos están conectados mediante el cableado descrito en la [Figura 3.4](#). Los componentes ubicados a la izquierda del diagrama, corresponden a los interruptores de encendido, mientras que los ubicados en la derecha, corresponden a los componentes del tren de potencia. Se puede apreciar que el banco de baterías (8) y el motor (12) están conectados a un controlador, y el sistema de avance-reversa (13) está conectado al campo y a la armadura, con el propósito de cambiar el sentido del motor mediante un sistema de contactos maniobrados por una palanca. La velocidad del motor está controlada mediante un pedal acelerador acoplado a un potenciómetro (10) que gobierna el convertidor de potencia (11).

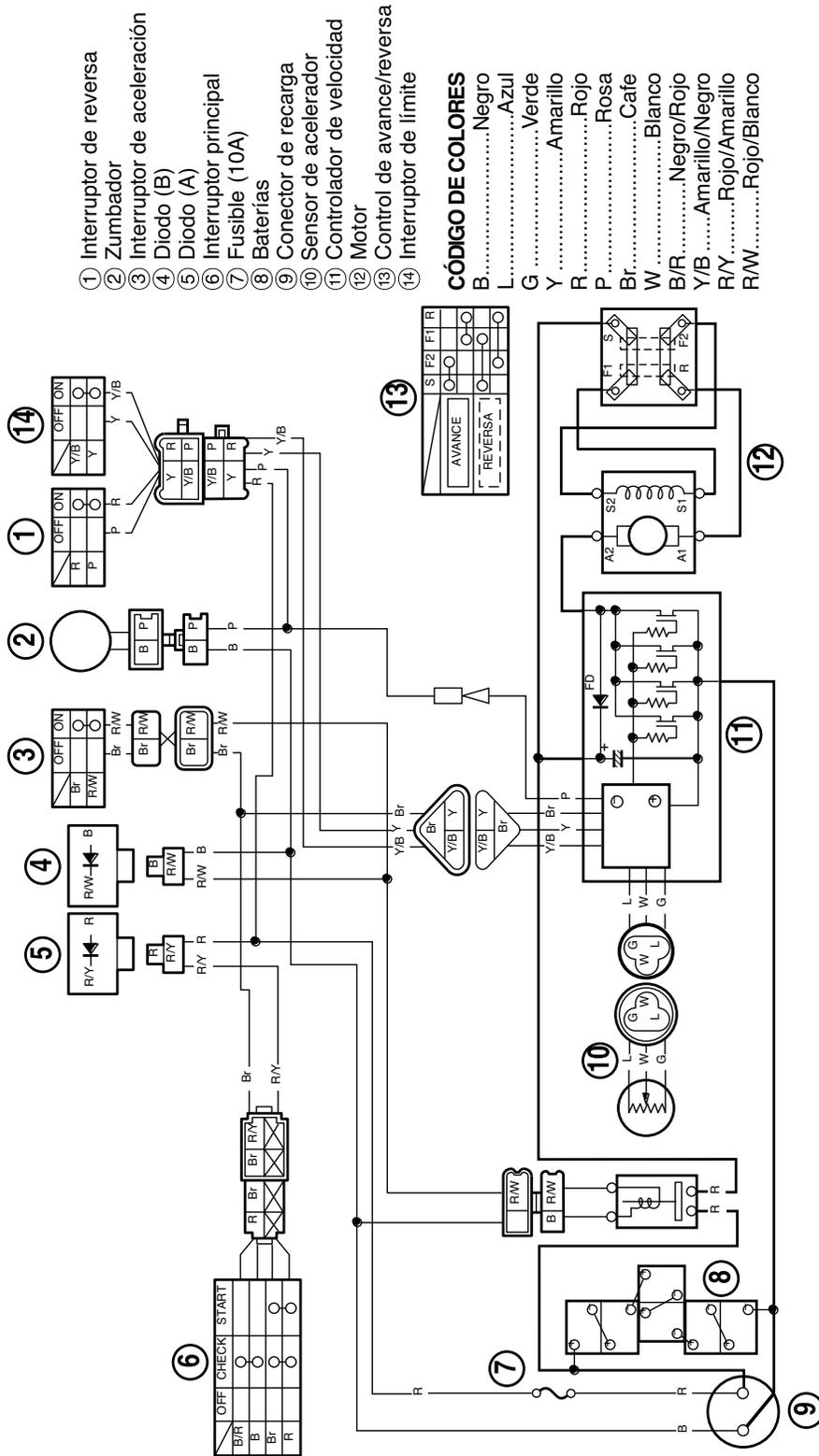


Figura 3.4 Diagrama de cableado original³ del carro de golf Yamaha G-16E [82].

³ El diagrama de cableado original se encuentra publicado en *Yamaha Golf Car Owner's/Operator Manual* disponible para su descarga pública en la [página web](#) oficial de la compañía. Se reproduce con fines académicos.

3.2. Modelo inicial del vehículo

Los principales componentes mecánicos y eléctricos del tren de potencia de un carro de golf se muestran en la [Figura 3.5](#), en donde se puede apreciar de forma general el flujo de potencia de la batería (B) al motor (M) controlado por un convertidor de potencia (C). El diferencial mecánico (GB) transmite la potencia del motor a el eje de tracción (T).

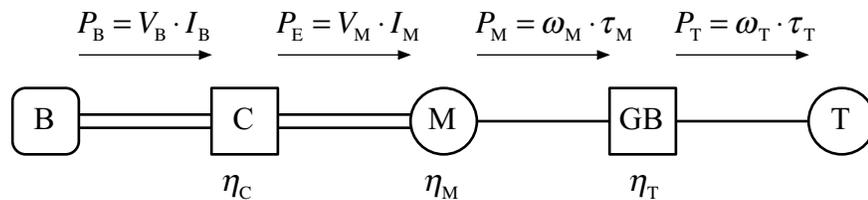


Figura 3.5 Flujo de potencia en los componentes de un carro de golf.

Las pérdidas de energía están representadas por eficiencias de operación η_C para el convertidor, η_M para el motor y η_T para el diferencial mecánico.

3.2.1. Modelo eléctrico inicial

Las conexiones de los principales elementos del tren de potencia pueden ser representadas por un circuito equivalente como se muestra en la [Figura 3.6](#). En él se puede observar que los componentes fueron conectados siguiendo el diagrama de cableado mostrado en la [Figura 3.4](#). El motor CD tiene una conexión de armadura y campo en serie, las terminales del motor están conectadas en serie con el convertidor de potencia, que a su vez está conectado en serie con el banco de seis baterías (conectadas también en serie).

Como se puede observar en la [Figura 3.6](#), el motor está acoplado a un diferencial mecánico que transmite la potencia al eje de tracción, reduciendo la velocidad y aumentando el torque. El vehículo está representado por una carga mecánica con una masa total.

El convertidor de potencia emplea un arreglo de interruptores tipo MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistors) para conmutar la señal de voltaje proveniente de la batería. Como se describe en la sección [2.4.7. Accionamiento chopper de motor CD](#), los tiempos de conmutación están gobernados por un ciclo trabajo, que a su vez están controlados con una técnica de modulación por ancho de pulso PWM.

En un modelo inicial, las baterías pueden ser consideradas como elementos ideales, que proporcionan energía de forma indefinida, con valores de tensión fijos sin importar la capacidad demandada.

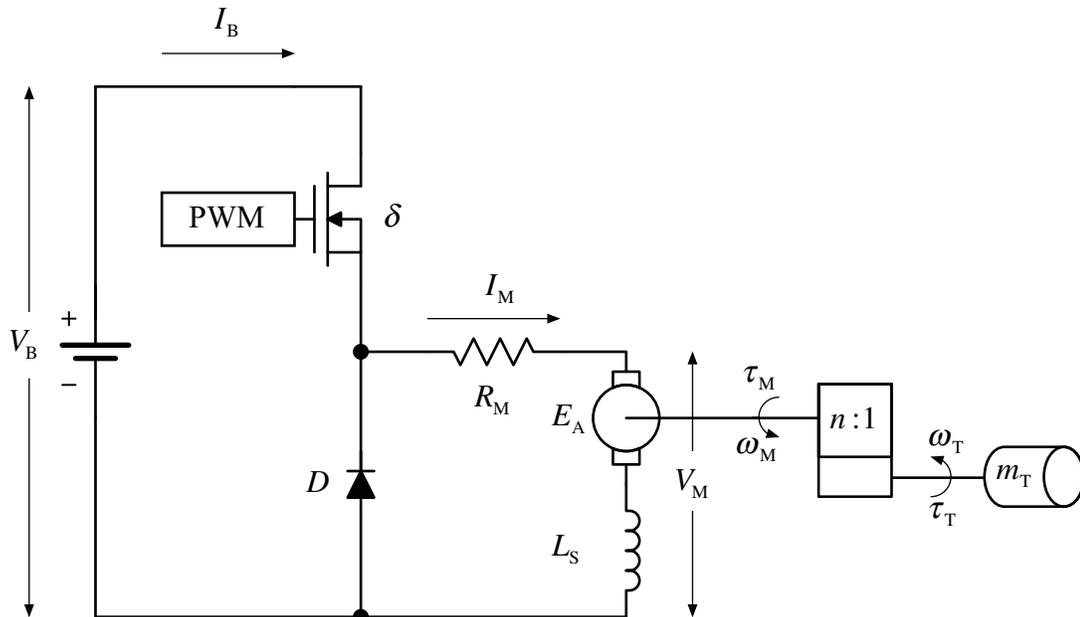


Figura 3.6 Circuito equivalente del tren de potencia de un carro de golf (modelo estacionario).

3.2.2. Modelo matemático en estado estacionario

La Figura 3.7 muestra el grupo de ecuaciones que conforman el modelo matemático inicial del tren potencia del carro de golf. Dicho modelo describe el comportamiento del vehículo en estado estacionario, cuando la velocidad del vehículo es constante. El diagrama acopla los sub-grupos de ecuaciones que describen el comportamiento de los elementos mecánicos y eléctricos descritos en el circuito equivalente descrito en la Figura 3.6. Las flechas indican la dirección de cómputo, comenzando por el cálculo de la masa total y velocidad lineal del vehículo, para concluir con el cálculo de la potencia requerida de las baterías. En el Anexo G se incluye la demostración del uso de la raíz cuadrada de la eficiencia en el motor y convertidor de potencia para calcular los valores de velocidad angular, torque, voltaje y corriente por separado.

Empleando las mismas ecuaciones del modelo es posible realizar el cómputo de manera inversa, a partir de valores de potencia en las baterías y conociendo el valor de ciclo de trabajo para calcular la velocidad y torque en el eje de tracción.

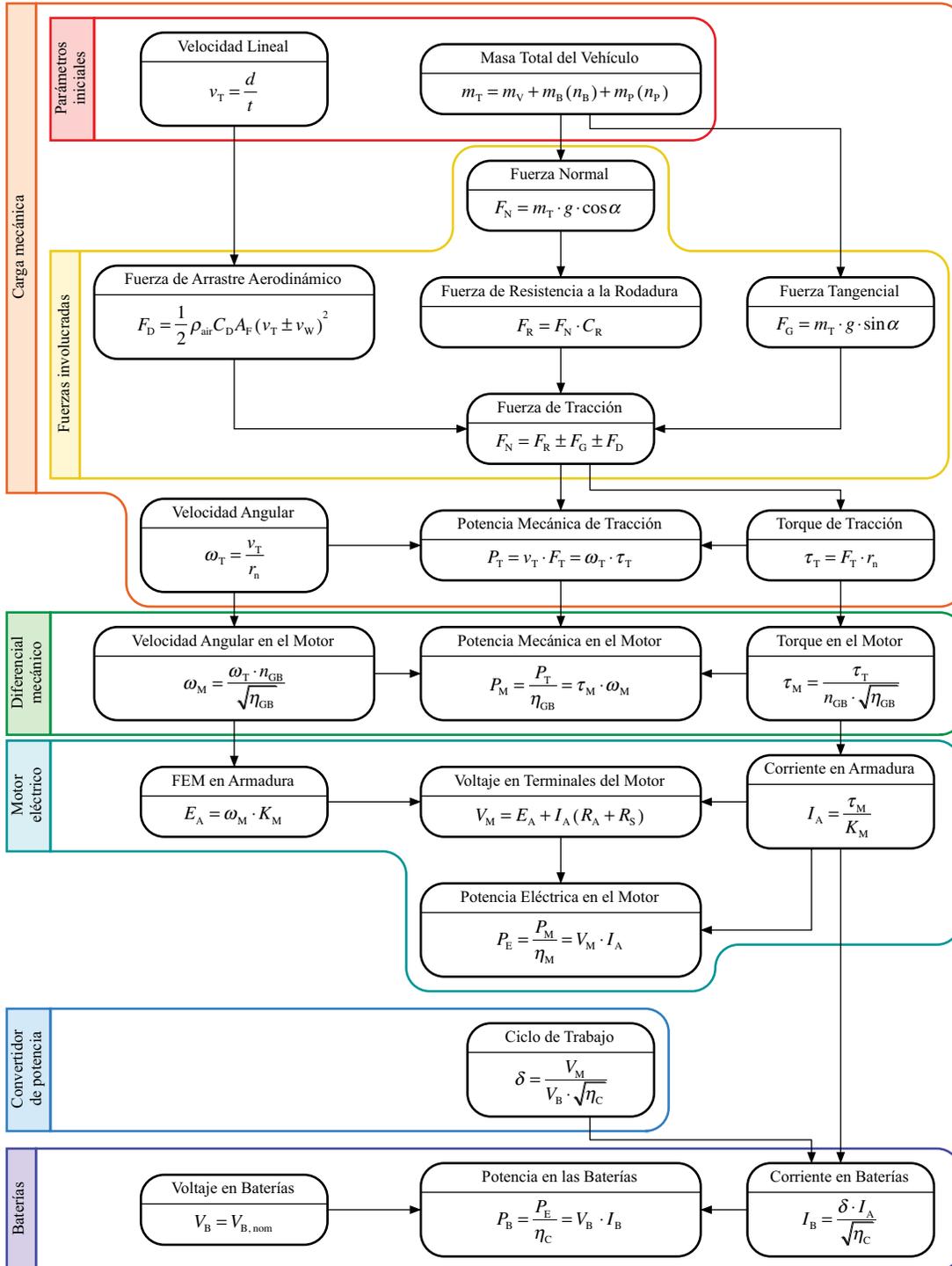


Figura 3.7 Modelo matemático inicial en estado estacionario del tren de potencia de un vehículo eléctrico ligero.

3.3. Metodología de experimentación

3.3.1. Determinación de la velocidad del vehículo

Uno de los parámetros de mayor relevancia para evaluar el desempeño de un vehículo es la velocidad. Para obtener los valores de velocidad que describan el comportamiento del sistema, se realizan pruebas de desplazamiento en condiciones de operación específicas para determinar un ciclo de manejo.

Las pruebas fueron realizadas al interior del Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL). La [Figura 3.8](#) muestra la ruta recorrida trazada en línea punteada y la cual tiene una longitud aproximada de 1.02 km.

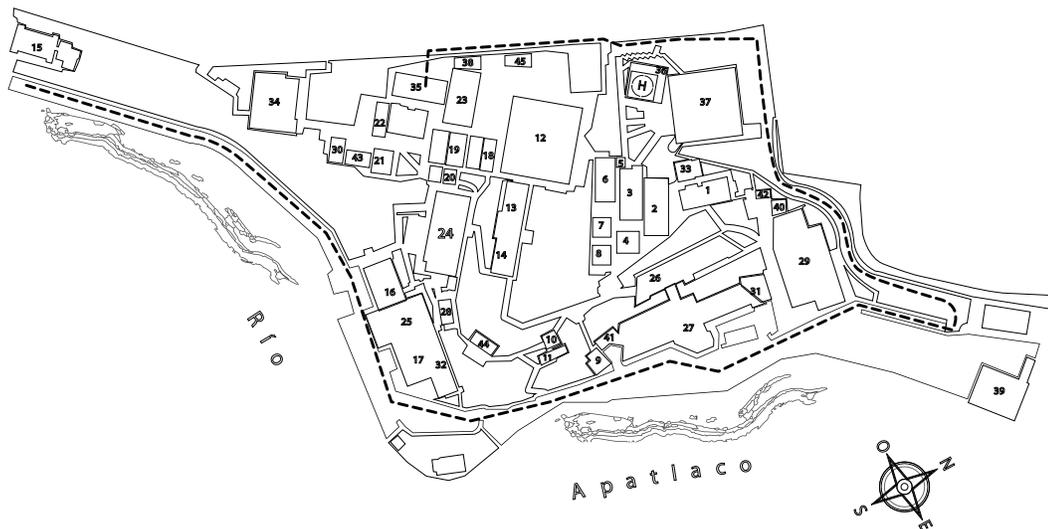


Figura 3.8 Plano de INEEL y la ruta empleada durante las pruebas al vehículo.

El comienzo de la ruta es en el edificio marcado con el número 35, que es el lugar donde se encuentra estacionado el carro de golf y termina en la entrada principal del INEEL.

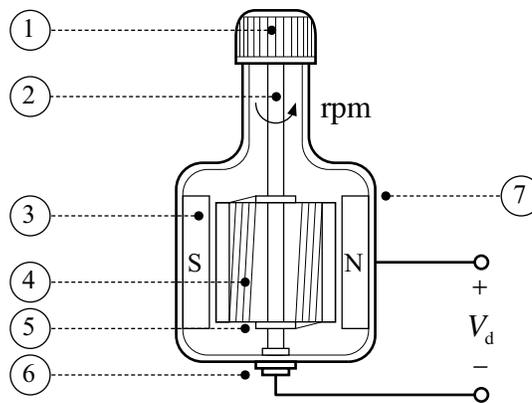
Dicho trayecto se recorrió dos veces por cada prueba, una de ida y otra de regreso. El camino es usado de forma cotidiana por vehículos de pasajeros para acceder a los distintos puntos de estacionamiento distribuidos en las instalaciones y está cubierto por asfalto regular.

Como se mencionó previamente, los carros de golf fueron diseñados para circular en terreno alfombrado con césped especial, hecho que influye en el desempeño del vehículo debido a que el césped tiene un coeficiente de resistencia a la rodadura mayor que el del asfalto. Sin embargo, las pruebas realizadas sobre asfalto son válidas debido a la creciente tendencia en E.U.A. y Canadá en usar los carros de golf como vehículos locales o de vecindario (neighbourhood golf cars) [83].

3.3.1.1. Registro de velocidad

Para registrar los valores de velocidad durante los recorridos se utilizó un dínamo. Dicho dispositivo es un generador eléctrico de corriente alterna (Figura 3.9) que se acopla de forma mecánica a la llanta trasera de una bicicleta y su función principal es alimentar una lámpara de que sirve para iluminar el camino del ciclista.

Este tipo de generador que opera de 12V y 6W nominales puede ser empleado para determinar la velocidad de giro de una rueda si se encuentra la relación entre la velocidad de rotación y el voltaje generado en sus terminales.



- | | |
|--------------------------|---------------------------------|
| 1. Rueda moleteada | 5. Muelle de contacto |
| 2. Eje | 6. Terminal de salida |
| 3. Polo fijo | 7. Terminal de carcasa metálica |
| 4. Bobina en la armadura | |

Figura 3.9 Esquema de funcionamiento de un dínamo como generador de corriente alterna.

El dínamo empleado en la medición de velocidad fue caracterizado mediante una fresadora de control numérico computarizado (CNC), que cuenta con un control preciso para conocer la velocidad de giro del rotor en revoluciones por minuto.

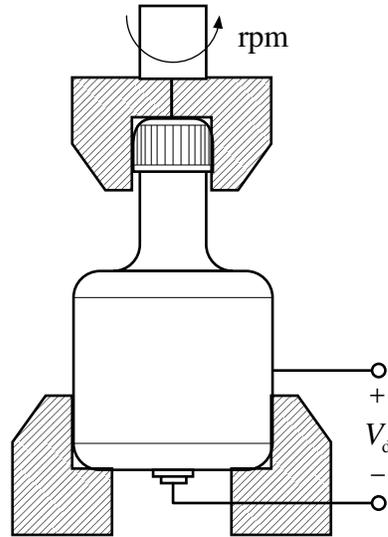
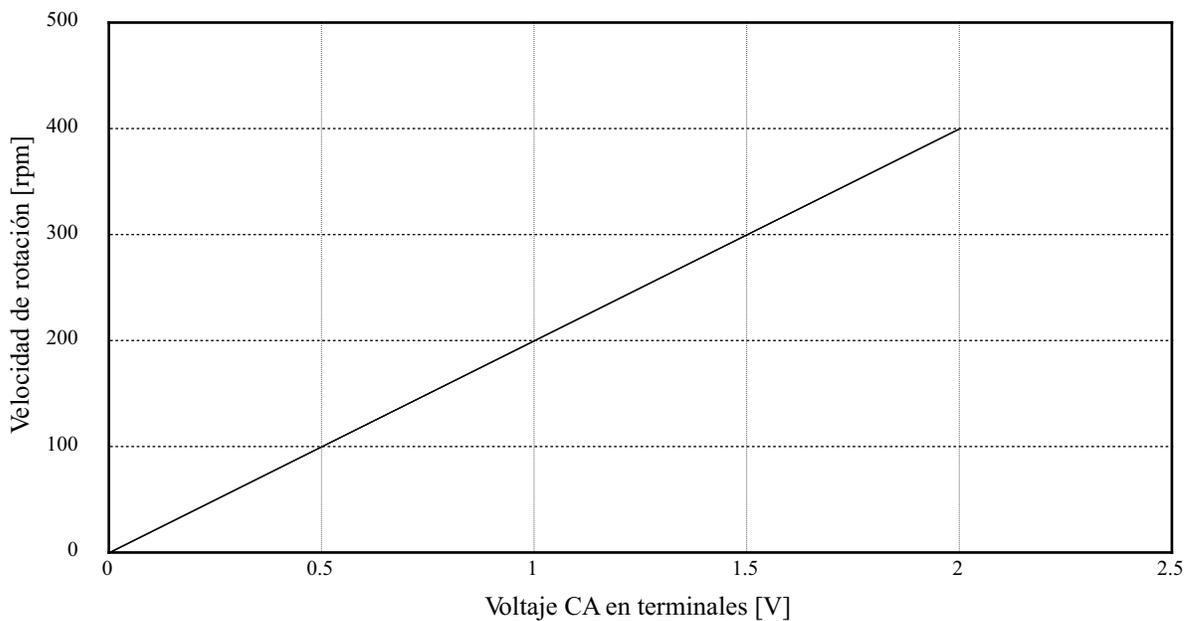


Figura 3.10 Esquema de acoplamiento del dinamo al CNC.

Al acoplar la rueda del dinamo al rotor del CNC como se muestra en la [Figura 3.10](#) y variar la velocidad del CNC en un rango de 100 a 400 rpm, se obtuvo el valor de voltaje a la salida del dinamo.



Gráfica 3.1 Caracterización del dinamo empleado para medir la velocidad en el vehículo.

La [Gráfica 3.1](#) muestra la relación de voltaje y velocidad de rotación, la cual describe un comportamiento lineal.

La relación entre la velocidad de rotación N_d y el voltaje V_d en las terminales del dinamo se expresa aproximadamente de la siguiente forma:

$$N_d = 200V_d \quad (3.1)$$

3.3.1.2. Instalación del dinamo

A partir de la velocidad de rotación N_d en rpm obtenida de la [Ecuación 3.1](#), se puede calcular la velocidad angular en la rueda del dinamo ω_d en rad/s:

$$\omega_d = \frac{2\pi}{60} N_d \quad (3.2)$$

El dinamo fue instalado en la llanta posterior del vehículo, sujetado mecánicamente mediante abrazaderas. La rueda del dinamo fue colocada para hacer contacto con el diámetro mayor del neumático de tracción.

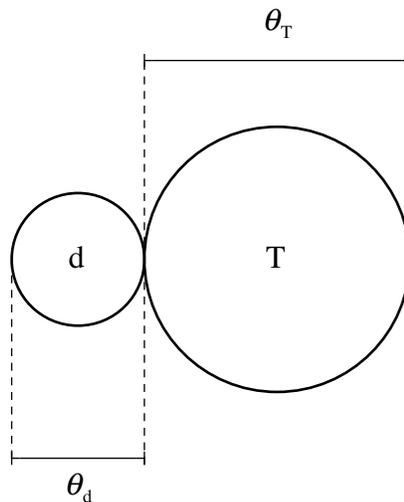


Figura 3.11 Relación entre los diámetros de la rueda del dinamo d y el neumático de tracción T .

La relación mostrada en la [Figura 3.11](#) entre las velocidades angulares en la rueda del dinamo ω_d y el neumático ω_T se da por la siguiente expresión:

$$\omega_T = \frac{\theta_d}{\theta_T} \omega_d \quad (3.3)$$

En donde θ_d y θ_T indican el diámetro de la rueda del dinamo y el neumático, respectivamente.

El valor de la relación entre el diámetro de la rueda del dinamo θ_d de 0.0213m y el de la llanta de 0.43m:

$$\frac{\theta_d}{\theta_T} = \frac{0.0213}{0.43} = 0.0495$$

El valor de la velocidad angular en el neumático T es:

$$\omega_T = 0.0495 \cdot \omega_d$$

Para un radio del neumático r_T igual a 0.215 m, la velocidad lineal en el eje de tracción en m/s se obtiene con la siguiente expresión:

$$v_T = \omega_T \cdot r_T \quad (3.4)$$

La velocidad en la llanta mientras gira fue determinada al relacionar el voltaje medido en las terminales del dinamo, como se muestra en la [Figura 3.12](#).

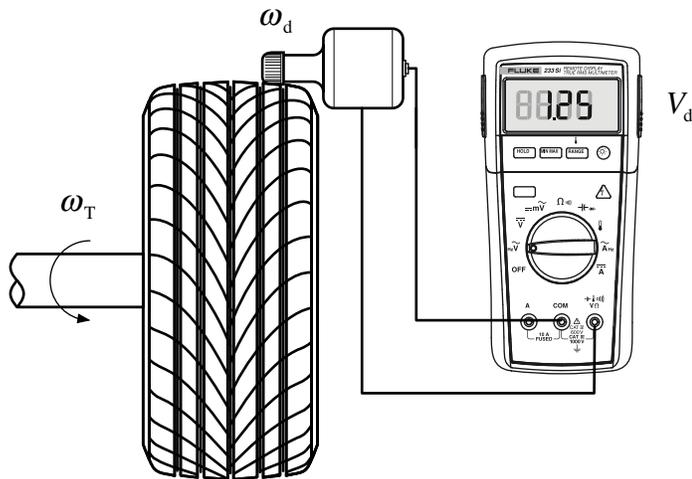


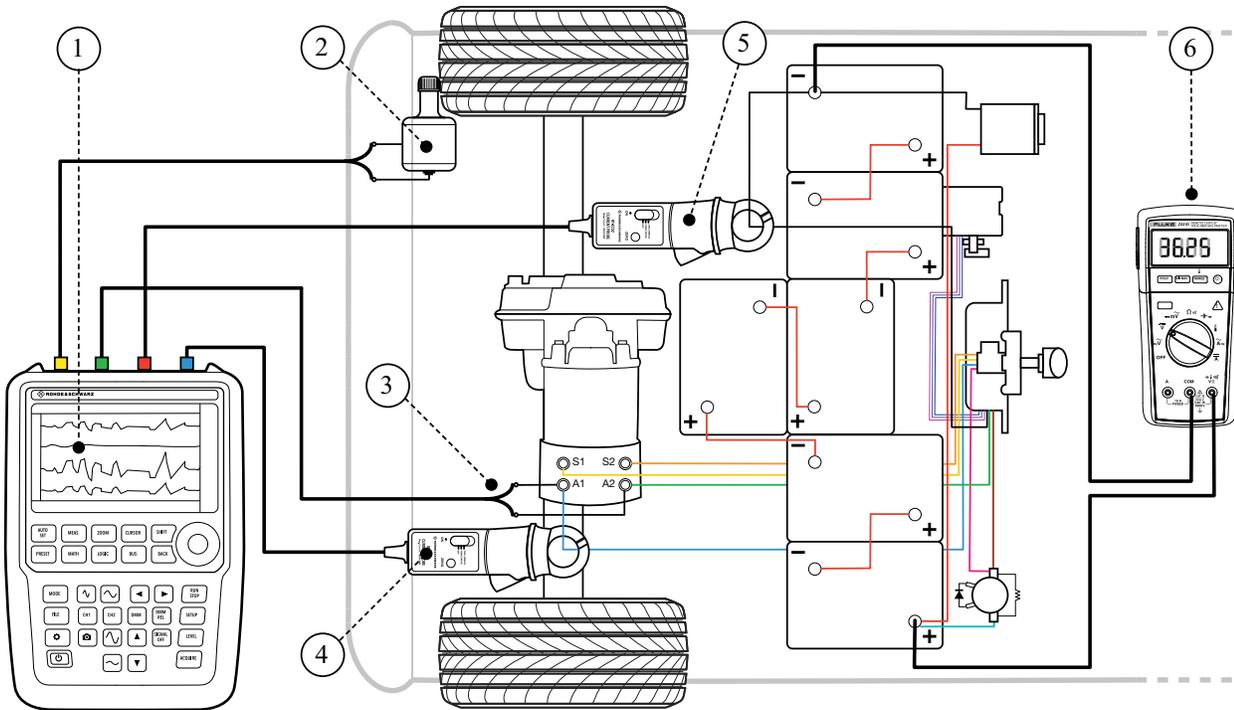
Figura 3.12 Medición de voltaje en el dinamo.

La relación directa de la velocidad de la rueda del dinamo con el voltaje CA medido en sus terminales se puede expresar como:

$$v_T = 0.071 \cdot \pi \cdot V_d \quad (3.5)$$

3.3.2. Determinación de potencia en motor y baterías

Para determinar el desempeño de los componentes del vehículo durante el desplazamiento, se registraron valores de velocidad en el sistema mecánico, así como voltajes y corrientes en el sistema eléctrico.



- | | |
|---------------------------------|-----------------------------------|
| 1. Osciloscopio | 4. Pinza de corriente en el motor |
| 2. Dinamo | 5. Pinza de corriente en baterías |
| 3. Puntas de prueba en el motor | 6. Multímetro |

Figura 3.13 Diagrama de conexión del equipo de medición en el vehículo.

La **Figura 3.13** muestra la distribución real de las conexiones del equipo de medición en los componentes del tren de potencia del vehículo durante las pruebas. El equipo empleado para medir, almacenar y graficar los valores de potencia fue un osciloscopio digital modelo RTH 1004 de la marca Rohde & Schwarz. El osciloscopio R&S es portátil y ligero, cuenta

con cuatro canales de entrada, la capacidad de medir voltaje y corriente en CA y CD. Viene equipado con puntas de prueba y sondas para medir corriente.

El cableado de medición fue conectado, sujetando y aislando los cables, pinzas y puntas de prueba para evitar problemas durante las mediciones tales como interrupción, interferencia o el riesgo de corto circuito.

En la sección [3.3.1.2. Instalación del dinamo](#) se mencionó la instalación de un dinamo para medir valores de velocidad en el eje de tracción, relacionando el voltaje en CA medido en terminales del dinamo cuando gira acoplado a la banda de rodadura del neumático. El voltaje del dinamo fue registrado en el canal 1 (amarillo) del osciloscopio, para después determinar la velocidad lineal del vehículo en función de dicho voltaje descrita en la [Ecuación 3.5](#).

El voltaje medido en las terminales A1 y A2 del motor fue registrado con puntas de prueba R&S RT-ZA20 que conectan la terminal positiva y negativa al canal 2 (verde). La corriente en baterías fue registrada con pinzas modelo RT-ZC02, con un límite de corriente RMS máximo de 1000 A, conectada al canal 3 (rojo). Con una pinza modelo RT-ZC02, un límite de corriente RMS máximo de 2000 A, se midió la corriente en el motor, registrada en el canal 4 (azul).

Debido a que ya no había más canales disponibles para registro de datos en el osciloscopio R&S, el voltaje en baterías fue monitoreado con un multímetro marca Fluke, modelo *233Si Remote Display True RMS*.

4. RESULTADOS

Los resultados obtenidos durante la etapa de experimentación y modelación se pueden clasificar en:

1. Resultados de pruebas de laboratorio
2. Resultados de pruebas de campo
3. Modelo básico del sistema real
4. Resultados de pruebas de simulación

Los resultados de pruebas de laboratorio y de campo proporcionaron los datos necesarios para corroborar las hipótesis planteadas en un modelo matemático inicial en la sección [3.2 Modelo inicial del vehículo](#), mostrando el comportamiento aislado e integrado de los componentes del vehículo.

Los resultados de las pruebas en campo ayudaron a mejorar la metodología experimental mostrada en la sección [3.3 Metodología de experimentación](#), al permitir identificar y corregir posibles errores durante la adquisición de datos.

Como resultado del proceso de simplificación de la información obtenida durante las pruebas, se obtuvo el modelo básico que describe el comportamiento dinámico del vehículo.

Los resultados de las pruebas de simulación permitieron verificar y mejorar el comportamiento del modelo en estado dinámico basado en un modelo inicial en estado estacionario y las pruebas realizadas en campo.

4.1. Resultados de mediciones preliminares

4.1.1. Verificación de voltaje en terminales y estado de carga en baterías

Las pruebas en el vehículo requieren que las baterías se encuentren en el 100% del estado de carga. El banco de baterías del carro de golf se recarga empleando un adaptador especial que acondiciona la corriente CA de la red. Al no contar con el equipo original, cada batería se fue recargada durante 4 horas empleando un cargador convencional de acumuladores, configurado a una tensión de 12 V y 10 A.

La [Tabla 4.1](#) muestra el valor de voltaje en terminales V_1 medido antes de la recarga para cada una de las seis baterías. Para verificar el valor del estado de carga, se empleó un instrumento modelo *MISCO Glycol & Battery Tester 7084VP* para medir la densidad del electrolito.

Los valores de la densidad del electrolito se muestran en la [Tabla 4.1](#), y coincidieron con el valor del estado de carga previa a la recarga de un 80%. Después de la recarga, se volvió a medir el valor de voltaje V_2 en terminales de cada batería, sin embargo, la reacción de recarga en la batería se estabilizó 24 horas después a un voltaje V_3 de 6.37 a 6.4 volts que corresponde a un 100% del estado de carga.

Tabla 4.1 Valores de voltaje antes y después de recarga a 12V/10A/4h.

Batería	V_1	Densidad	SOC_1	V_2	V_3	SOC_2
1	6.24	1.24	0.8	6.67	6.37	1
2	6.26	1.24	0.8	6.7	6.39	1
3	6.27	1.24	0.8	6.69	6.37	1
4	6.27	1.24	0.8	6.69	6.37	1
5	6.27	1.24	0.8	6.69	6.4	1
6	6.27	1.24	0.8	6.7	6.39	1

4.1.2. Verificación de presión en los neumáticos

La presión en los neumáticos es un factor importante en el desempeño del vehículo, debido al incremento de la resistencia a la rodadura cuando los neumáticos no se hallan en condiciones adecuadas de presión. La [Tabla 4.2](#) muestra los valores de presión en los neumáticos previos a las pruebas. Se inflaron empleado una bomba manual de aire y la lectura de la presión fue tomada con un manómetro análogo.

Tabla 4.2 Valores de presión en los neumáticos.

Neumático	Posición	Presión	Diámetro
1	Frontal izquierdo	≈ 20 psi	≈ 43cm
2	Frontal derecho	≈ 20 psi	≈ 43cm
3	Posterior izquierdo	≈ 20 psi	≈ 43cm
4	Posterior derecho	≈ 20 psi	≈ 43cm

4.2. Obtención de parámetros del motor, convertidor de potencia y baterías

4.2.1. Determinación de resistencia e inductancia en armadura y campo del motor

El motor eléctrico fue sometido a pruebas para determinar los valores de resistencia interna e inductancia empleando un analizador de impedancias *HP LF Impedance Analyzer* (5Hz-13MHz) modelo 4192 A. Los valores de impedancia Z , resistencia interna R e inductancia L para distintos valores de frecuencia en CA se muestran en la [Tabla 4.3](#).

Tabla 4.3 Parámetros del motor CD obtenidos con el analizador de impedancia.

Terminales	f [Hz]	Z [Ω]	R [Ω]	L [mH]
A1-A2	30	0.1	0.085	0.33
S1-S2	30	0.058	0.032	0.25
A1-A2	60	0.155	0.079	0.33
S1-S2	60	0.096	0.033	0.25
A1-A2	120	0.266	0.089	0.33
S1-S2	120	0.2	0.089	0.242
A1-A2	2000	4	0.62	0.31
S1-S2	2000	1.33	0.94	0.31
A1-A2	200000	0.132	0.082	0.13
S1-S2	200000	23.7	12.43	16.09 μ H

4.2.2. Determinación de valores de eficiencia del convertidor de potencia

El controlador de velocidad es uno de los elementos clave en el análisis de flujos de potencia, debido a que es el encargado de controlar el flujo de corriente entre la batería y el motor. Se sabe de forma teórica que los convertidores de potencia empleados en los controladores de velocidad de motores basados en estrategias de conmutación con transistores tienen altos rangos de eficiencia, a diferencia de controladores antiguos que empleaban la disipación de potencia en forma de calor por medio de resistencias eléctricas.

Para determinar la eficiencia del convertidor, se procedió a levantar los neumáticos del eje de tracción (eje trasero), liberando al motor de la carga mecánica. Se accionó el pedal de aceleración paulatinamente, para medir el valor de voltaje y corriente en el motor y baterías de forma simultánea.

4. Resultados

La [Tabla 4.4](#) muestra los resultados de mediciones de potencia en motor y baterías, con el fin de verificar los rangos de eficiencia de conversión, que van de 83.1% cuando la demanda en el motor es de 206 W, hasta una eficiencia de 96% cuando el convertidor opera en rangos superiores a 665.4 W.

Tabla 4.4 Valores de eficiencia del convertidor CD chopper para distintos valores de velocidad.

	Voltaje [V]	Corriente [A]	Potencia [W]	Eficiencia [%]
Motor	10.440	19.700	205.668	83.098
Baterías	37.500	6.600	247.500	
Motor	20.280	21.300	431.964	91.433
Batería	37.200	12.700	472.440	
Motor	30.060	21.300	640.278	95.607
Baterías	37.000	18.100	669.700	
Motor	32.460	20.500	665.430	95.922
Baterías	36.900	18.800	693.720	

Es posible observar la reducción de voltaje y el aumento de la corriente en las terminales del motor por los efectos de la topología del convertidor. Los resultados de la [Tabla 4.4](#) fueron útiles para corroborar la topología *DC/DC chopper* del convertidor de potencia propuesta en la sección [3.2.1 Modelo eléctrico inicial](#).

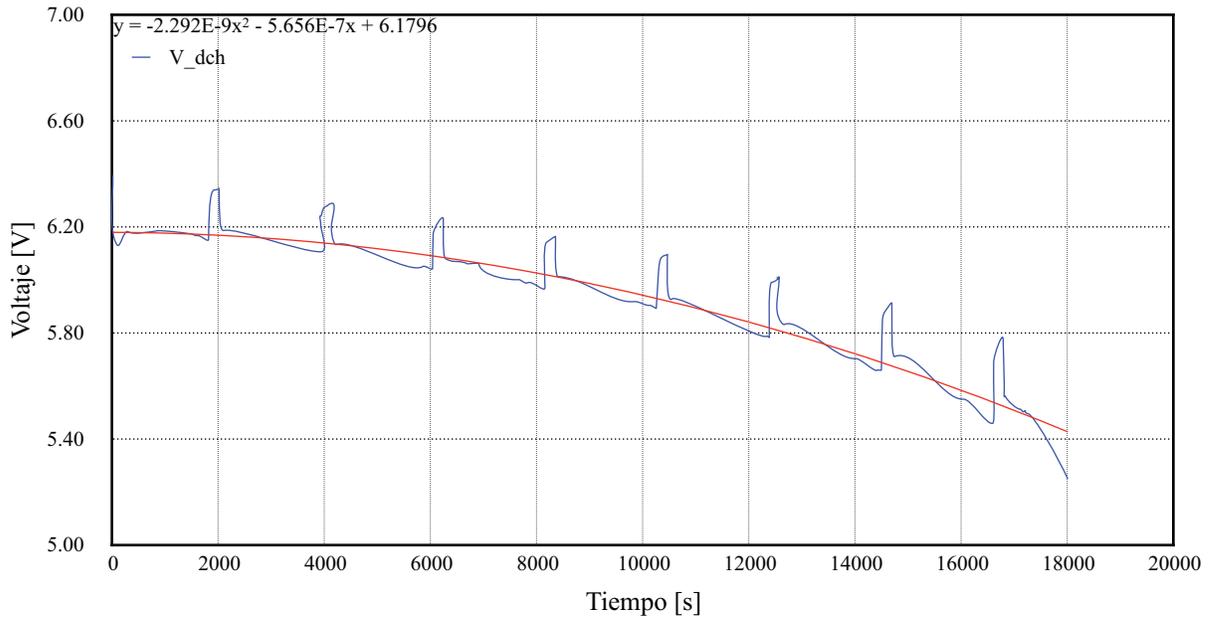
4.2.3. Determinación de curva de descarga y resistencia interna

Para determinar el valor de la resistencia interna, se sometió una de las seis baterías a un ciclo de carga-descarga empleado el equipo *Regenerative Battery Pack Test System*, modelo 17020 de la compañía Chroma ATE Inc. La prueba consistió en tres etapas:

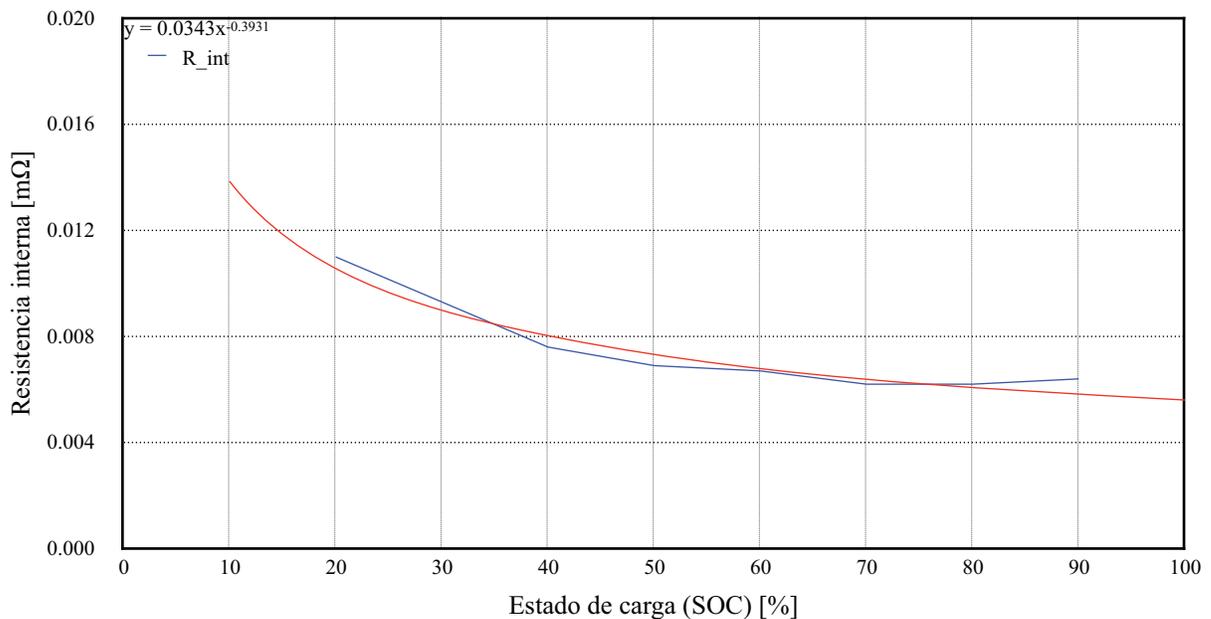
1. Descarga hasta el 10% de su estado de carga (SOC)
2. Recarga controlada a un 100% del SOC
3. Nueva descarga completa hasta el 10% del SOC con un valor de corriente constante de 36.99 A

Las etapas 1 y 2 tuvieron el objetivo de colocar la batería en condiciones nominales de operación para la descarga controlada realizada en la tercera etapa.

La **Gráfica 4.1** muestra el resultado de la descarga para una capacidad de 185 Ah, lo cual equivale a $36.99 \approx 37$ A durante 5 horas. Los picos de voltaje observados en intervalos aproximados de 30 minutos (1800 segundos) corresponden a valores de menor corriente (2.99 A) como parte de la prueba aplicada para determinar valores de resistencia interna.



Gráfica 4.1 Perfil de descarga de la batería a 37 A, 5h.

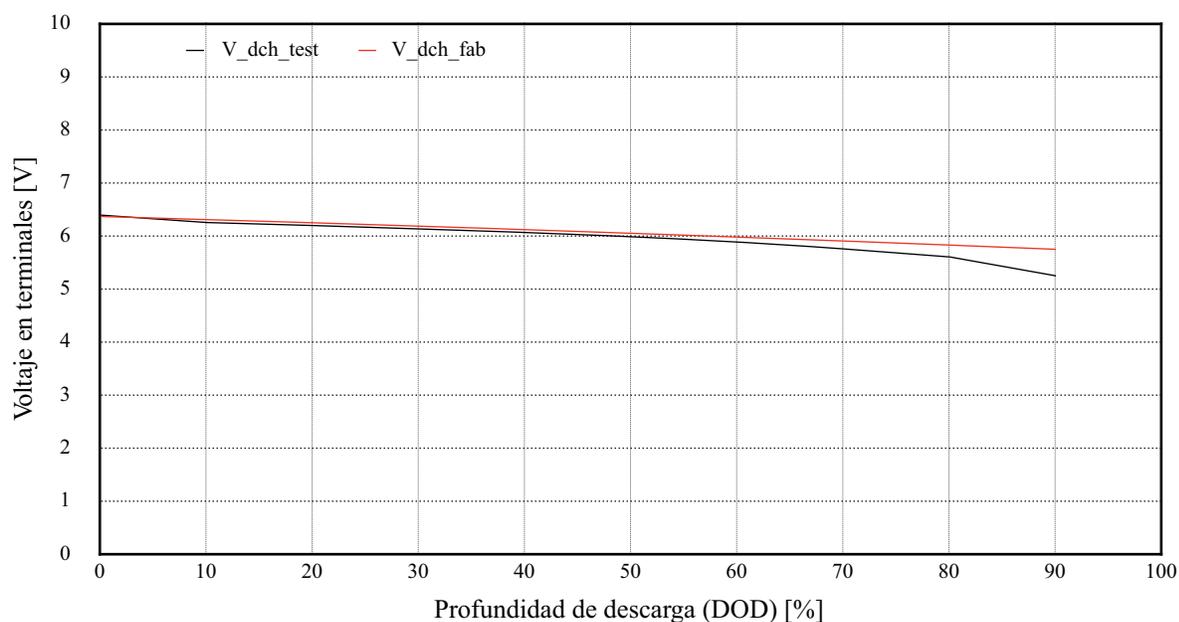


Gráfica 4.2 Valores de resistencia interna de la batería ácido-plomo en para distintos valores de SOC.

4. Resultados

La [Gráfica 4.2](#) muestra el valor de la resistencia interna de la batería que fue resultado de la prueba de descarga. En ella se puede observar que la resistencia interna aumenta de un valor de $0.0064 \text{ m}\Omega$ cuando se encuentra en el 90% del estado de carga a $0.0110 \text{ m}\Omega$ cuando se encuentra en el 20% del estado de carga.

La [Gráfica 4.3](#) muestra la curva de profundidad de descarga (DOD) obtenida durante la prueba de descarga. El patrón de comportamiento corresponde a la curva de descarga descrita por el fabricante de la batería en su hoja de especificaciones técnicas e incluida en el [Anexo K](#).



Gráfica 4.3 Curva de estado de carga determinada para una capacidad nominal de 185 Ah.

4.3. Resultados de las pruebas en campo

Se realizaron un total de dos pruebas, en la primera se realizó la verificación de conexiones e instalación de equipo de medición, y en la segunda se realizaron dos recorridos en a bordo del carro de golf en la ruta descrita en la sección 3.3.1. [Determinación de la velocidad del vehículo](#). Cada recorrido consistió en dos vueltas, una ida y otra de regreso.

A continuación, se describen de forma detallada los resultados obtenidos durante las pruebas.

4.3.1. Verificación de conexiones

Se hizo una primera prueba que tuvo como objetivo verificar la instalación correcta y segura de las conexiones mostradas en la sección 3.3.2. [Determinación de potencia en motor y baterías](#), con el fin de evitar posibles daños al vehículo, además de la configuración correcta del equipo de medición para la adquisición de datos.

4.3.2. Resultados del primer recorrido

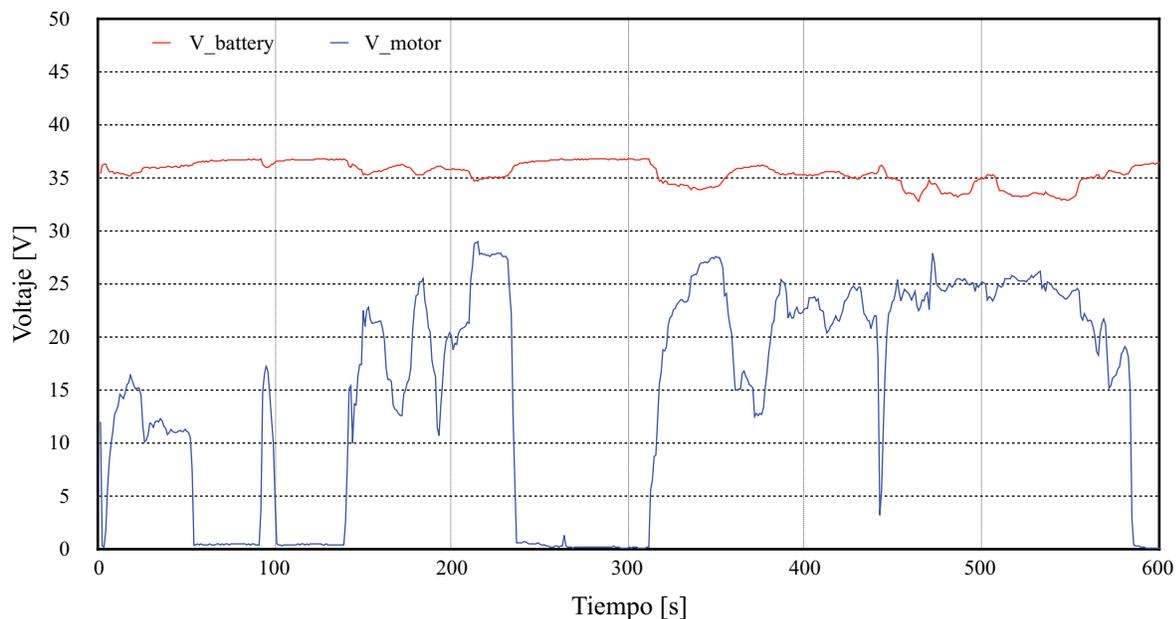
El primer recorrido de la segunda prueba tuvo como objetivo principal registrar voltajes y corrientes para estimar valores de potencia. Los resultados de las mediciones de voltaje se muestran en la [Gráficas 4.4](#) para el voltaje y en la [Gráfica 4.5](#) se muestra la corriente.

La [Gráfica 4.4](#) muestra los voltajes en las terminales del banco de baterías y el motor. Se puede observar que el voltaje en baterías comienza con un valor de estado de carga de 36.299 V y se mantiene muy cercano a su valor nominal de tensión de 36 V hasta el final de la medición.

La línea azul corresponde a los valores de voltaje en el motor con un rango máximo de 29 V. La variación de voltaje se debe a la acción de aceleración en el pedal del vehículo.

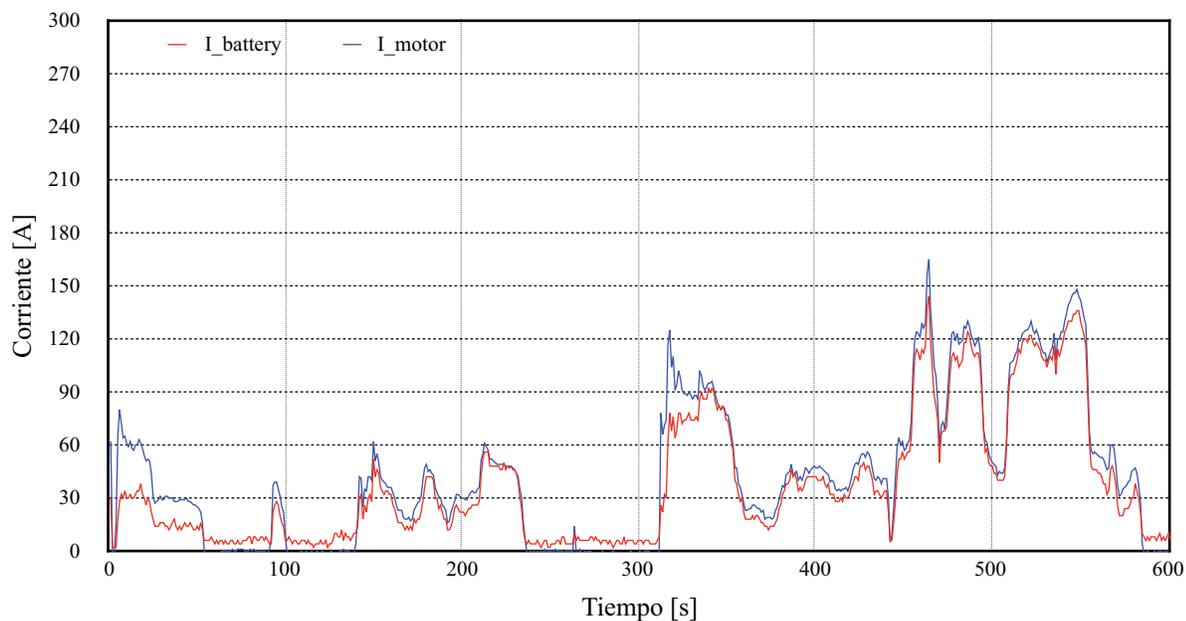
El recorrido consistió en transitar el mismo camino dos veces, uno de ida (intervalo de tiempo 0-251) y otro de regreso (301-602). Debido a que el vehículo se detuvo durante el intervalo 251-301, el valor de voltaje en el motor bajo a valores cercanos a cero mientras que el voltaje en las baterías regreso a su valor nominal.

4. Resultados



Gráfica 4.4 Voltaje medido en baterías y motor durante el primer recorrido.

La [Gráfica 4.5](#) muestra los valores de corriente medidos en las baterías y motor de forma simultánea. La línea azul corresponde a la corriente en el motor que alcanza un valor máximo de 165 A y la línea roja a la corriente medida en la batería con un máximo de 144 A. La corriente en batería y motor se encuentran dentro del límite de 276 A del controlador de velocidad.

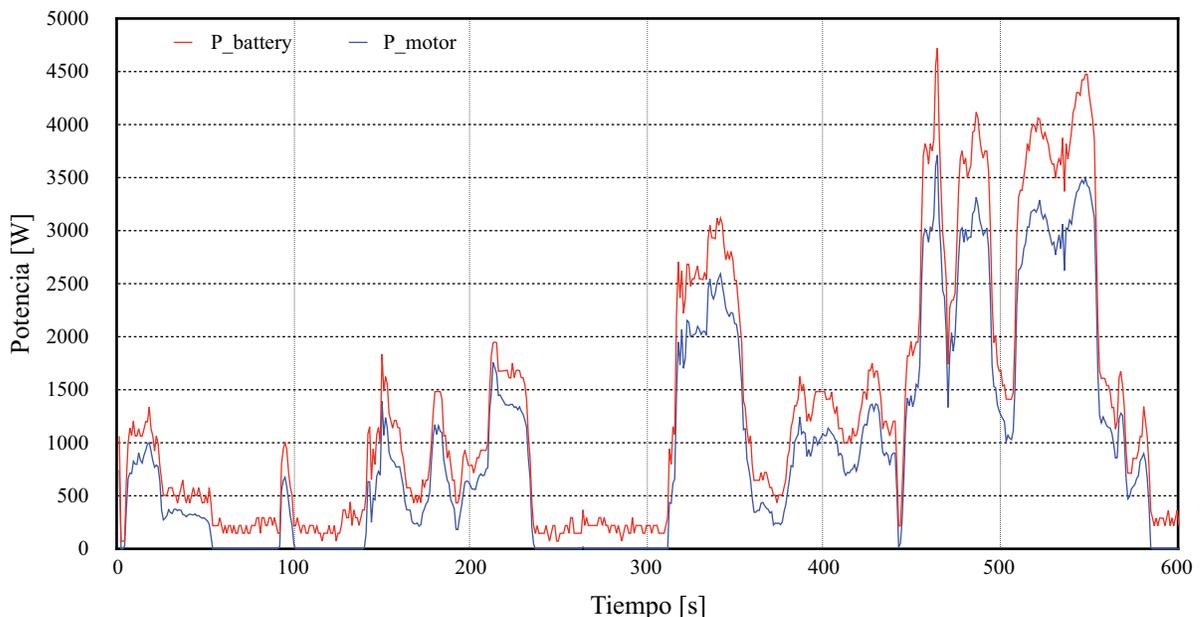


Gráfica 4.5 Corriente medida en baterías y motor durante el primer recorrido.

El comportamiento de la corriente corresponde a la variación de torque en el motor y los picos de mayor demanda corresponden a un sobreesfuerzo en el motor debido a la fuerza adicional necesaria para subir las rampas del camino.

Las gráficas 4.4 y 4.5 muestran que el voltaje en las baterías siempre mayor que el voltaje en el motor, y que la corriente en las baterías es menor que en el motor. Esta relación entre el voltaje y la corriente es debida a la topología de un convertidor *DC/DC chopper* que se encarga de controlar el flujo de potencia entre la batería y el motor.

Con los valores medidos de voltaje y corriente es posible determinar la potencia en las baterías y en el motor. Para un convertidor de potencia ideal, los valores de potencia debieran ser iguales en baterías y motor. En la [Gráfica 4.6](#) se puede observar que la potencia en motor y baterías siguen el mismo patrón, sin embargo, no coinciden debido las perdidas en el convertidor. La potencia máxima en batería fue de 4723.2 W, mientras que la potencia máxima en el motor fue de 3712.5 W, la cual supera el valor de potencia nominal del motor de 2232 W.

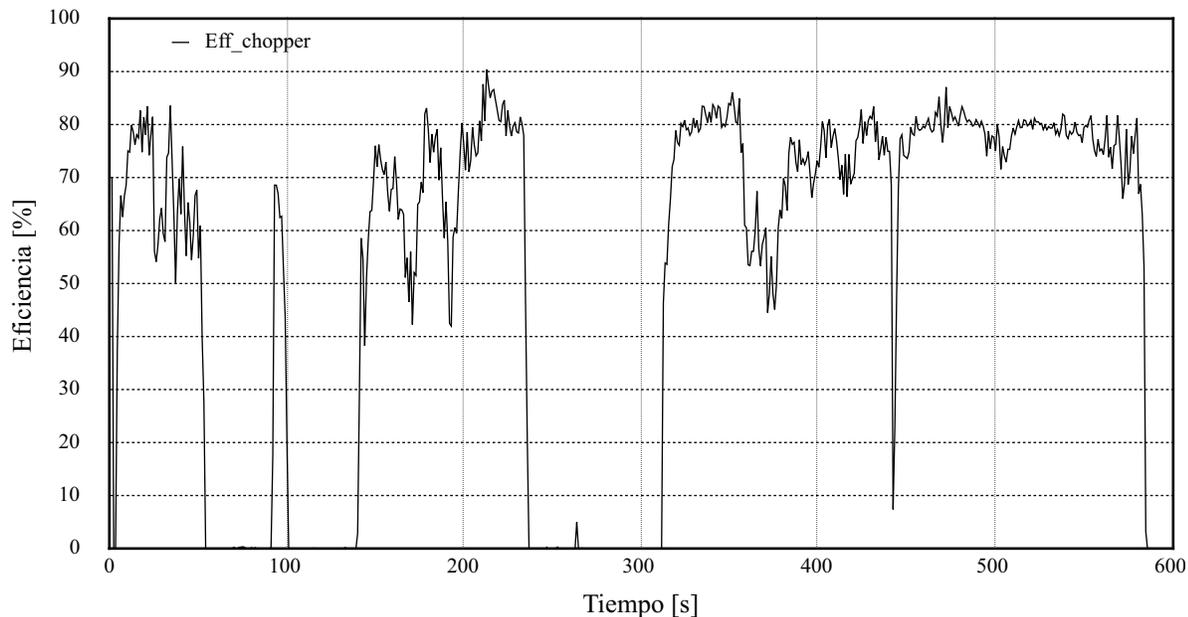


Gráfica 4.6 Potencia alcanzada en baterías y motor durante el primer recorrido.

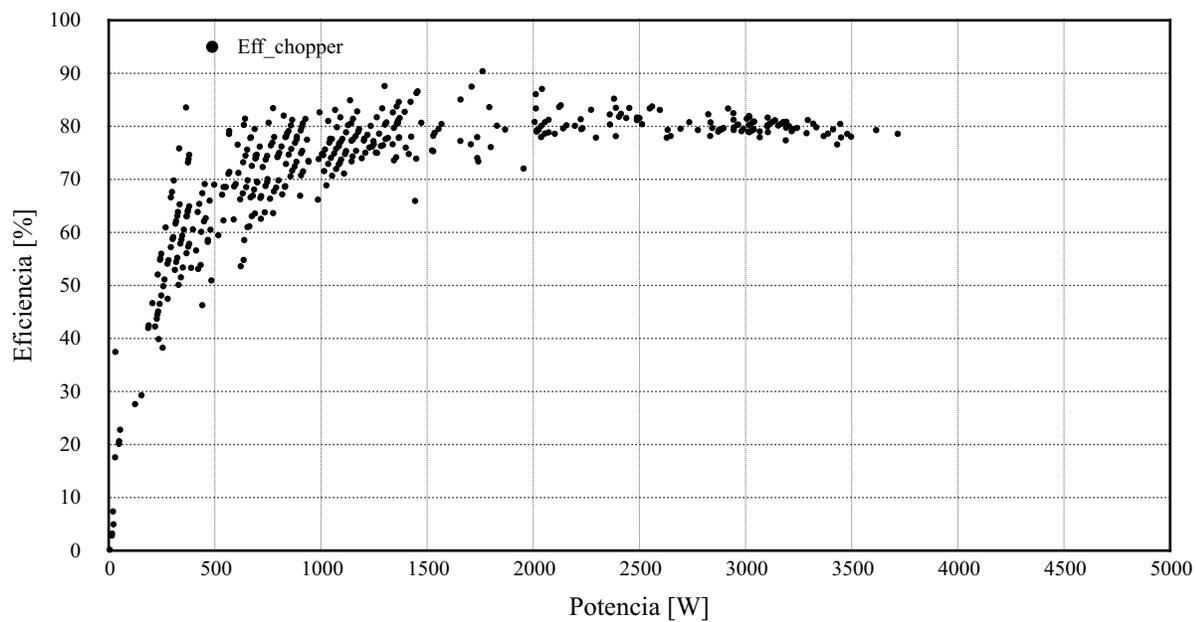
Con los valores de potencia obtenidos es posible estimar la eficiencia del convertidor. La [Gráfica 4.7](#) muestra los rangos de eficiencia del convertidor obtenidos a partir de las mediciones de corriente y voltaje en motor y baterías. El convertidor opera con valores de

4. Resultados

eficiencia cercanos a al 80% para valores de potencia eléctrica mayores a 1000 W en el motor. Dicha tendencia se puede observar en la [Gráfica 4.8](#), que muestra los valores de eficiencia del convertidor para distintos valores de potencia en el motor.



Gráfica 4.7 Rangos de eficiencia en el convertidor durante el primer recorrido.



Gráfica 4.8 Valores de eficiencia en el convertidor.

La [Tabla 4.5](#) muestra un resumen de los resultados obtenidos durante la primera prueba. En este recorrido no se tomaron valores de velocidad.

Tabla 4.5 Resumen de resultados de la primera prueba

Parámetro	Valor
Duración	602 s
Distancia aproximada	1.020 km
Velocidad máxima	No se tomaron datos
Velocidad promedio	No se tomaron datos
Voltaje inicial en baterías	38.220 V
Voltaje mínimo en baterías	32.790 V
Voltaje máximo en motor	29.000 V
Corriente máxima en motor	165.000 A
Corriente máxima en baterías	144.000 A

4.3.3. Resultados del segundo recorrido

El segundo recorrido tuvo tres objetivos principales:

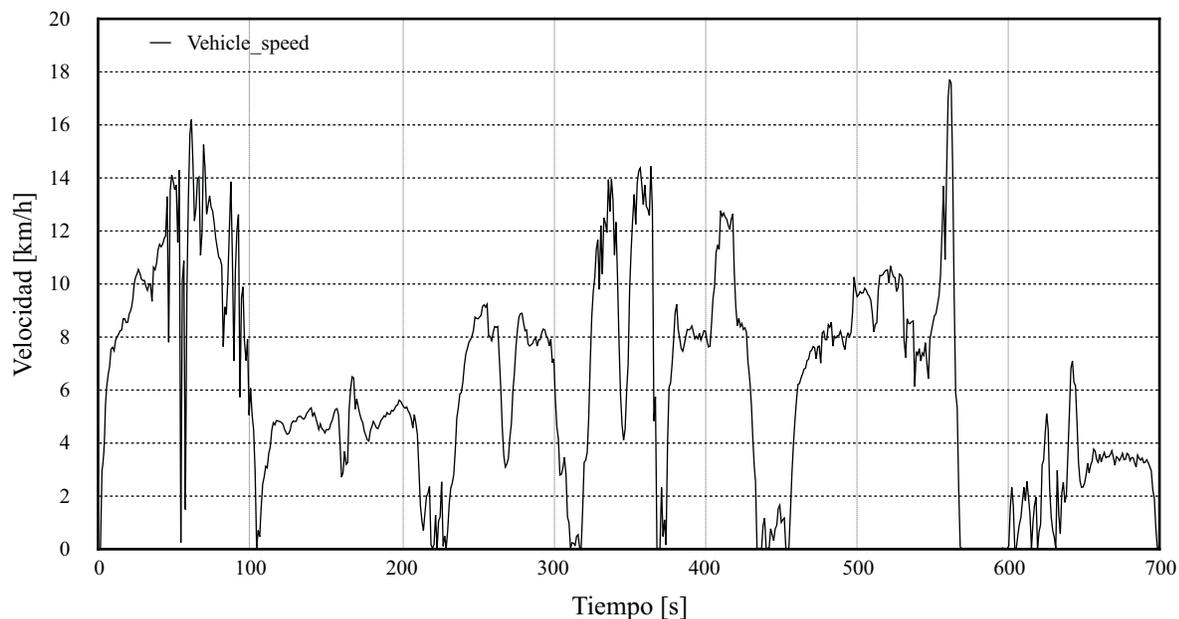
1. La verificación de operación del dispositivo para medir velocidad (dinamo).
2. La adquisición de datos de velocidad.
3. La adquisición de datos de voltaje y corriente en rangos de velocidad controlada de 5, 10 y 15 km/h).

Los datos de velocidad durante el recorrido completo se muestran en la [Gráfica 4.9](#). La velocidad máxima alcanzada fue de 17.714 km/h (en el instante 561 s), con una velocidad promedio de 6.166 km/h.

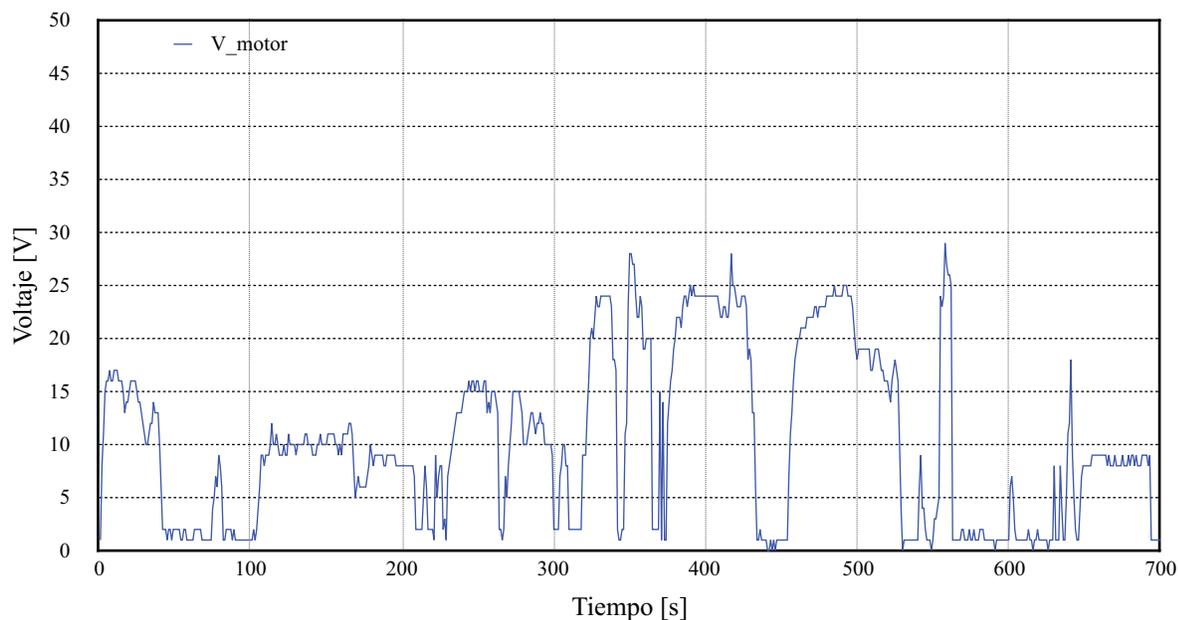
La [Gráfica 4.10](#) muestra los valores de voltaje medidos en las terminales del motor durante el recorrido completo. El valor de voltaje máximo fue de 29 V (en el instante 558).

Es importante mencionar que el primer tramo del recorrido el vehículo circuló cuesta abajo por una serie de rampas y aprovechando la inercia de la pendiente alcanzó un intervalo de 16 km/h a 0 km/h cuando se detuvo al final del tramo de la rampa. Esto se puede verificar si se compara la [Gráfica 4.9](#) de velocidad con la [Gráfica 4.10](#) de voltaje en el motor, observando que para el intervalo de tiempo 50-100 segundos, el voltaje no superó un límite de 2 V.

4. Resultados

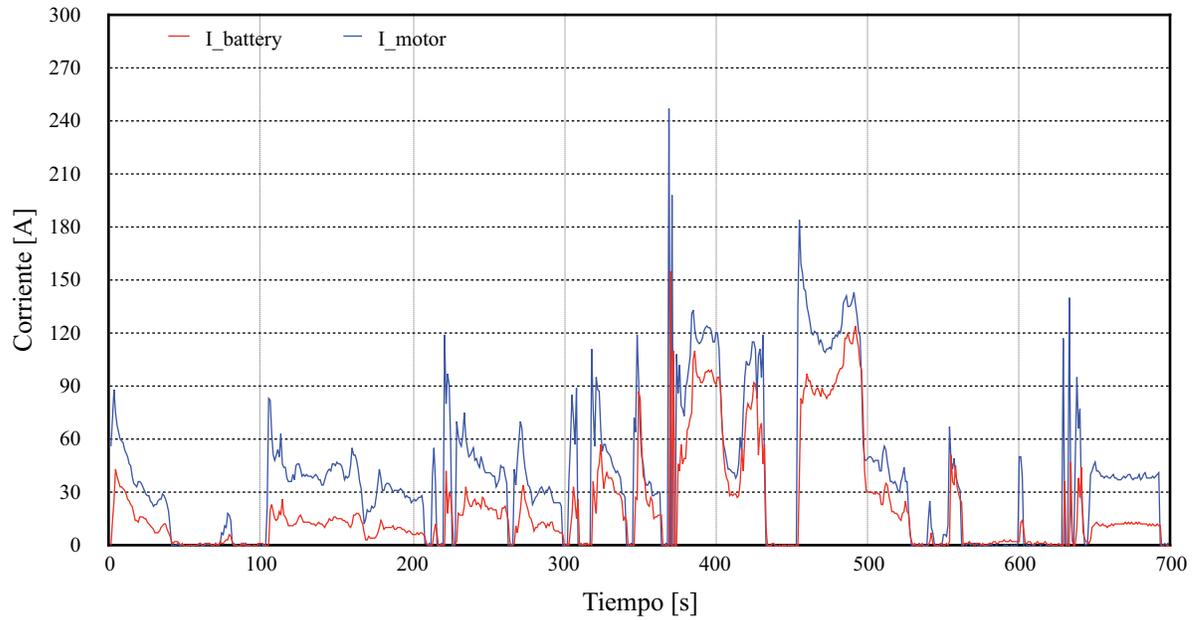


Gráfica 4.9 Velocidad medida en el neumático del eje de tracción.



Gráfica 4.10 Voltaje medido en las terminales del motor.

A partir del instante de 100 segundos, el perfil de tensión corresponde al patrón de velocidad mostrado en la Gráfica 4.9, lo que verifica la relación de voltaje en el motor con el valor de la velocidad angular en el rotor del motor. La Gráfica 4.11 muestra los valores de corriente medidos en el motor y batería. Al igual que en la Gráfica 4.5, existe una correspondencia del perfil de corriente en la batería con el patrón de corriente en motor.



Gráfica 4.11 Corriente medida en baterías y motor durante el segundo recorrido.

El valor máximo de corriente en las baterías corresponde a 155 A y en el motor a 247 A, ambos alcanzados en el mismo instante de 370 segundos. Se pueden cotejar los valores de velocidad de 0.032 km/h y voltaje de 15 V para ese mismo instante, lo que indica un sobre esfuerzo del motor para subir una rampa.

La [Tabla 4.6](#) muestra un resumen de los resultados obtenidos durante la primera prueba. En este recorrido no se tomaron valores de voltaje en baterías.

Tabla 4.6 Resumen de resultados del segundo recorrido.

Parámetro	Valor
Duración	700 s
Recorrido aproximado	—
Velocidad máxima	17.714 km/h
Velocidad promedio	6.166 km/h
Voltaje inicial en baterías	36.400 V
Voltaje mínimo en baterías	—
Voltaje máximo en motor	29.000 V
Corriente máxima en motor	247.000 A
Corriente máxima en baterías	155.000 A

4.3.3.1. Resultados parciales del segundo recorrido (tramos de velocidad constante)

Durante el segundo recorrido de la segunda prueba se realizaron tres recorridos cortos en un tramo en recto plano, con condiciones de pavimentado regular de una longitud aproximada de 60 m (0.06 km). Durante estos recorridos cortos, se buscó mantener un valor aproximado de velocidad constante, con la intención de medir valores de potencia que pudieran validar el modelo en estado estacionario mostrado en la [Figura 3.7](#) de la sección [3.2. Modelo inicial del vehículo](#).

Tabla 4.7 Resumen de resultados de los recorridos cortos.

Parámetro	5km/h	10 km/h	15 km/h
Velocidad promedio alcanzada [km/h]	4.685	8.025	13.222
Intervalo de la prueba [s]	110-159	274-298	351-364
Tiempo de la prueba [s]	49	24	13
Distancia recorrida [m]	63.768	53.500	47.740
Voltaje promedio en el motor [V]	9.980	12.000	22.500
Corriente promedio en las baterías [A]	13.700	12.32	25.214
Corriente promedio en el motor [A]	41.920	30.520	36.500

En la [Tabla 4.7](#) se resumen los resultados de los tres recorridos cortos en los que se intentó aproximar valores de velocidad constante de 5 km/h, 10 km/h y 15 km/h. Las gráficas que describen los resultados se incluyen en el [Anexo M](#).

Es importante mencionar que bajo las condiciones de a ruta elegida resulta muy difícil mantener un vehículo operando en condiciones de velocidad constante por intervalos de tiempo prolongados.

4.4. Verificación del modelo matemático en estado estacionario

Empleando los resultados obtenidos en las pruebas de campo y laboratorio es posible obtener los parámetros de operación para realizar la verificación del modelo matemático en estado estacionario mostrado en la sección 3.2.1. [Modelo eléctrico inicial](#).

El modelo matemático que describe al vehículo cuando en intervalos de velocidad constante permite que los cálculos de potencia sean realizados en dos direcciones [77]:

1. Modelo orientado hacia atrás (de la carga a la fuente)
2. Modelo orientado hacia adelante (de la fuente a la carga)

En las dos direcciones de cálculo se emplean los mismos grupos de ecuaciones descritas en la sección 3.2.2. [Modelo matemático en estado estacionario](#), pero parten de datos de operación distintos.

El modelo orientado hacia atrás (backward-facing model) permite iniciar el cálculo a partir de datos físicos del vehículo y mediciones de velocidad, con el objetivo de obtener los datos de requerimientos de potencia en las baterías.

Por el contrario, el modelo orientado hacia adelante (forward-facing model) permite iniciar el cálculo a partir de datos de potencia en baterías para determinar el valor de la velocidad y torque en el eje del rotor.

4.4.1. Parámetros de operación en estado estacionario

La verificación preliminar del modelo matemático en estado estacionario requiere de parámetros que describan las características físicas del vehículo y sus componentes, así como las condiciones de operación que afectan directamente el desempeño del vehículo.

Los parámetros empleados durante los cálculos son el resultado de la búsqueda sistemática de información en publicaciones técnicas (artículos, libros y manuales) y mediciones directas realizadas durante las pruebas en laboratorio y campo.

4. Resultados

Los valores elegidos para cada parámetro se muestran en la [Tabla 4.8](#) y representan una aproximación inicial que sirve como punto de partida para un análisis posterior más exhaustivo y detallado.

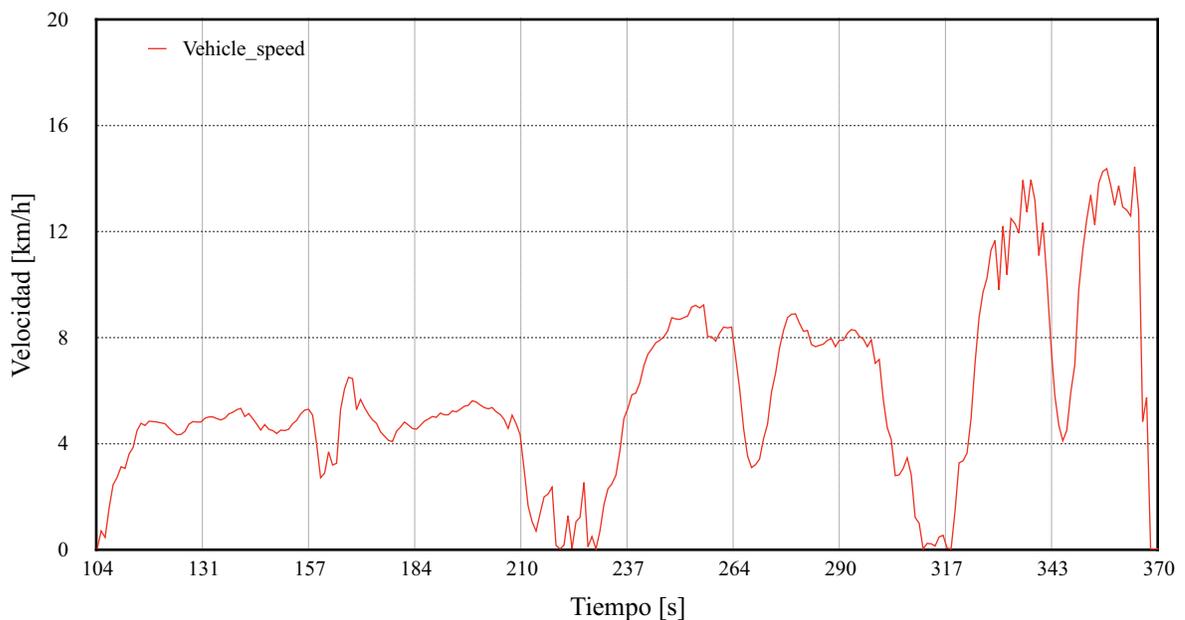
Tabla 4.8 Parámetros de operación empleados durante el cálculo del modelo en estado estacionario.

	Parámetro	Valor	Unidad
Carga mecánica			
	Masa del vehículo [82]	254	kg
	Masa de la batería [84]	28	kg
	Número de baterías	6	kg
	Masa del conductor	85	kg
	Masa del copiloto	85	kg
Fuerza de tracción			
	Constante de gravedad	9.81	m/s ²
	Ángulo de la superficie	0	grad
	Coefficiente de rodadura [4, 49]		0.02 —
	Base del vehículo [82]	1.2	m
	Alto del vehículo [82]	1.929	m
	Densidad del aire	1.225	kg/m ³
	Coefficiente de arrastre aerodinámico [39, 85]	0.2	—
	Velocidad promedio del viento [86]	≈ 2.5	m/s
	Radio del neumático	0.215	—
	Relación de caja de engranes	12.5:1	—
Convertidor de potencia			
	Frecuencia de conmutación [87]	1 - 15	kHz
Eficiencia			
	Eficiencia de transmisión mecánica	≈ 85	%
	Eficiencia del convertidor de potencia	≈ 80	%
Motor			
	Constante del motor [Anexo D]	0.083	—
	Resistencia en armadura	0.085	Ω
	Resistencia en campo	0.032	Ω
Batería			
	Estado de carga en baterías	100	%
	Voltaje nominal del banco de baterías [84]	36	V

4.4.2. Modelo orientado hacia atrás (backward-facing model)

Empleando las ecuaciones mostradas en la sección 3.2.2. **Modelo matemático en estado estacionario** y los parámetros de operación mostrados en la **Tabla 4.8**, es posible realizar la estimación de los valores de potencia en las baterías a partir de las mediciones de velocidad si se emplea la dirección de cálculo del modelo orientado hacia atrás (BFM)

La **Gráfica 4.12** presenta los valores de velocidad para un intervalo de tiempo de 104-369 segundos de la **Gráfica 4.9** mostrada en la sección 4.3.3. **Resultados del segundo recorrido**. Dicho intervalo corresponde a valores de velocidad medidos cuando el vehículo realizó recorridos en una zona en donde la superficie del pavimento es plana y regular.

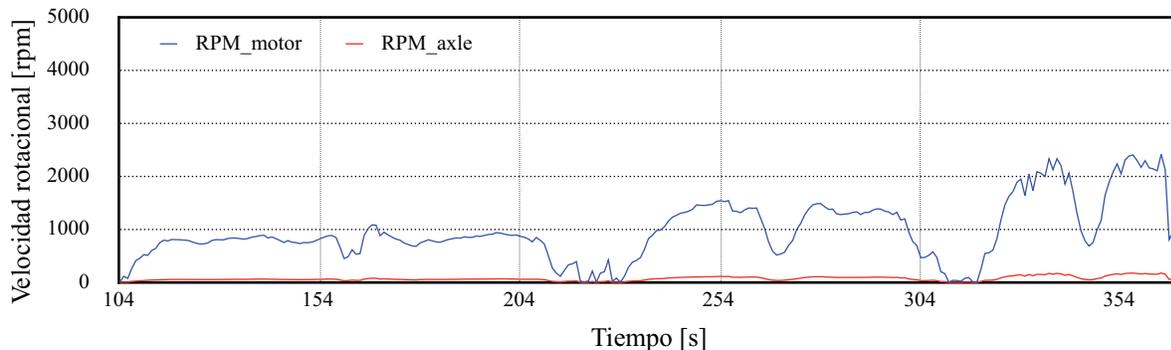


Gráfica 4.12 Velocidad lineal medida en los neumáticos del vehículo.

La **Gráfica 4.13** muestra los valores de velocidad rotacional en el motor y eje de tracción calculados empleando el modelo orientado hacia atrás (BFM). Se puede observar que la velocidad en el motor RPM_motor es mayor que la velocidad en el eje de tracción RPM_axle en una proporción cercana a la relación de la caja de engranes de 12.5:1.

Los valores de rpm en el motor se mantienen por debajo de la velocidad nominal del motor de 3300 rpm debido a que el vehículo no alcanza los rangos de mayor velocidad de 21.398 km/h.

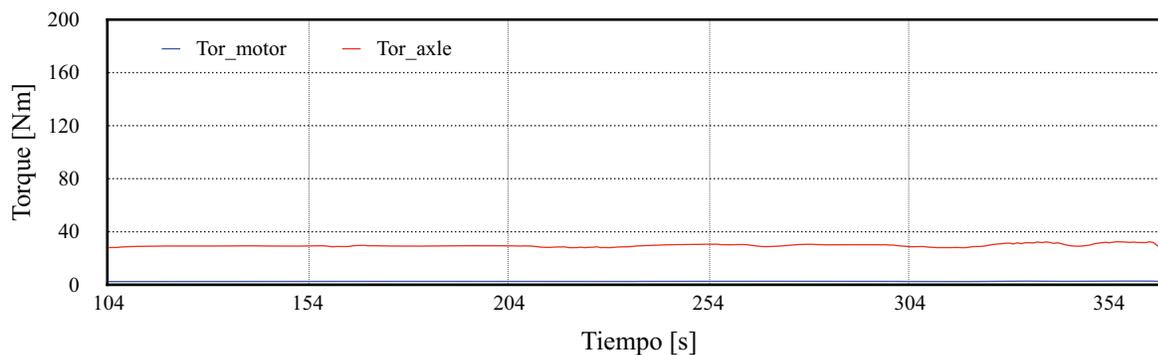
4. Resultados



Gráfica 4.13 Velocidad rotacional en el motor y el eje de tracción calculados con el BFM.

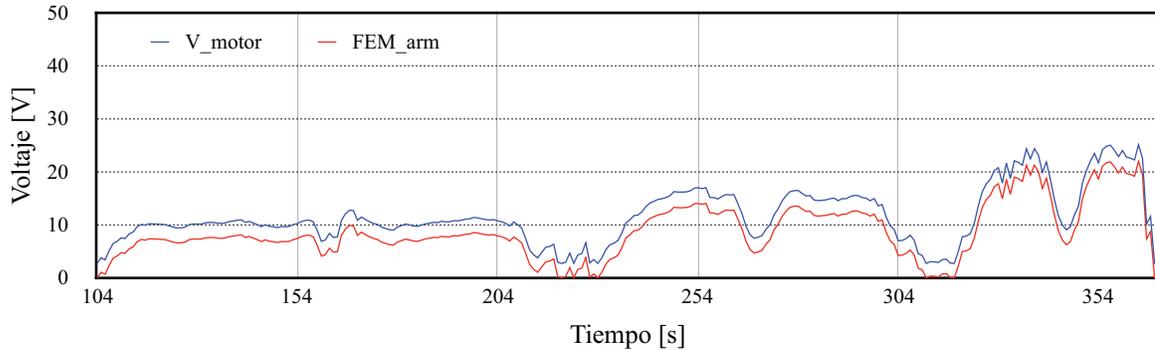
La [Gráfica 4.14](#) muestra los valores de torque en el motor y eje de tracción calculados a partir del BFM. Se puede observar que el torque en el motor es cercano a 2.5 Nm, una proporción 12.5 veces menor que el torque en el eje de tracción de 30 Nm.

Ambos permanecen en un valor constante debido a que el valor de torque es calculado a partir de la fuerza mínima necesaria para mover el vehículo, que corresponde aproximadamente a 116.15 N, sin tomar en cuenta la fuerza de arrastre aerodinámico. Debido a que el modelo opera en estado estacionario, no toma en cuenta que el valor de torque varía en función de la aceleración, y asume que es necesario un torque constante.



Gráfica 4.14 Torque en el motor y eje de tracción calculados con el BFM.

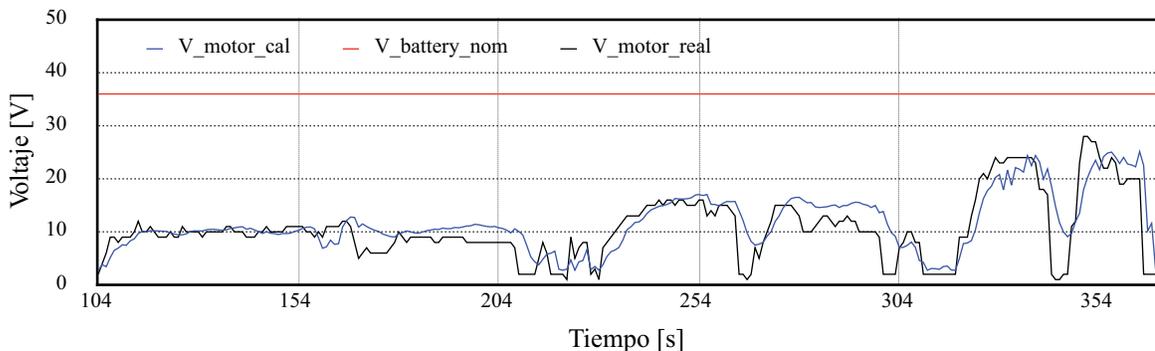
La [Gráfica 4.15](#) muestra el voltaje en terminales y la FEM en armadura calculados empleando en BFM. El voltaje en terminales es mayor a la FEM debido a que existen pérdidas asociadas a la resistencia. ambos parámetros siguen el patrón de velocidad lineal mostrado en la [Gráfica 4.12](#).



Gráfica 4.15 Voltaje en terminales y FEM en armadura calculados con el BFM.

La [Gráfica 4.16](#) muestra los valores de voltaje en el motor V_{motor_cal} calculados empleando el BFM y los compara con los valores medidos en terminales del motor V_{motor_real} . Ambos muestran un patrón de comportamiento muy parecido en intervalos de baja velocidad, como es el caso del intervalo de 104-204 segundos correspondiente a una velocidad cuasi-estacionaria de 5 km con un voltaje aproximado de 10 V.

La [Gráfica 4.16](#) también muestra que el valor de voltaje en el motor no alcanza el valor nominal de voltaje en baterías de 36 V, debido a que la velocidad del motor no alcanza los valores de velocidad nominal de 3300 rpm. Es importante recordar que debido a la topología del convertidor de potencia *DC/DC chopper*, el voltaje en el motor será menor que el voltaje en baterías.



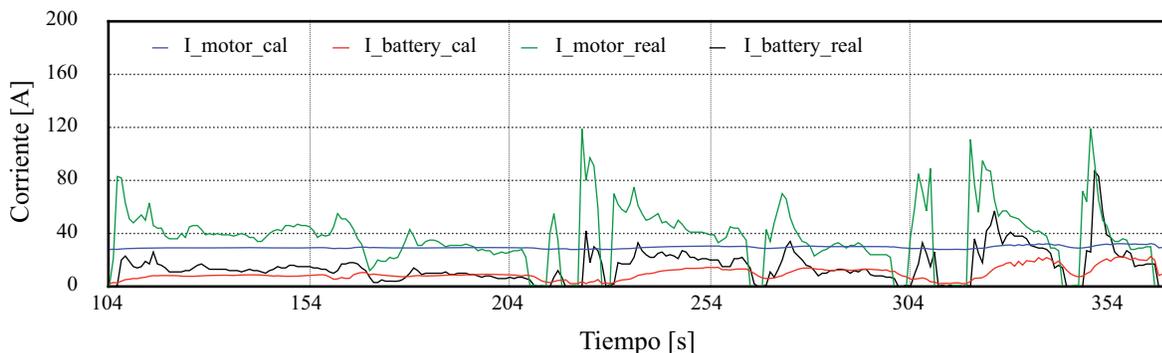
Gráfica 4.16 Comparación de voltaje real en el motor, voltaje calculado con el BFM y voltaje nominal en baterías.

La [Gráfica 4.17](#) muestra los valores de corriente en el motor y baterías calculados empleando el BFM y los compara con los valores de corriente medidos durante las pruebas. Se puede observar que la corriente medida en el motor I_{motor_real} es mayor que la

corriente medida en baterías $I_{battery_real}$, esto debido al convertidor de potencia DC/DC *chopper*. Los valores de corriente calculados siguen este patrón de comportamiento, sin embargo, no logran estimar de forma correcta el comportamiento de los valores de corriente medidos.

El caso del motor, la corriente I_{motor_real} muestra un comportamiento irregular, con picos de corriente en intervalos de tiempo muy cortos durante los intervalos de aceleración y valores cercanos a cero en intervalos de inactividad. La corriente calculada I_{motor_cal} se muestra valores aproximados de 30 A constantes durante todo el recorrido. Este comportamiento corresponde a los valores constantes de torque mostrados en la [Gráfica 4.14](#).

En el caso de las baterías, la corriente $I_{battery_real}$ muestra el mismo patrón de comportamiento irregular que la corriente medida en el motor y la corriente $I_{battery_cal}$ calculada solo logra describir los intervalos de tiempo en donde el vehículo se alcanza valores de velocidad constante.

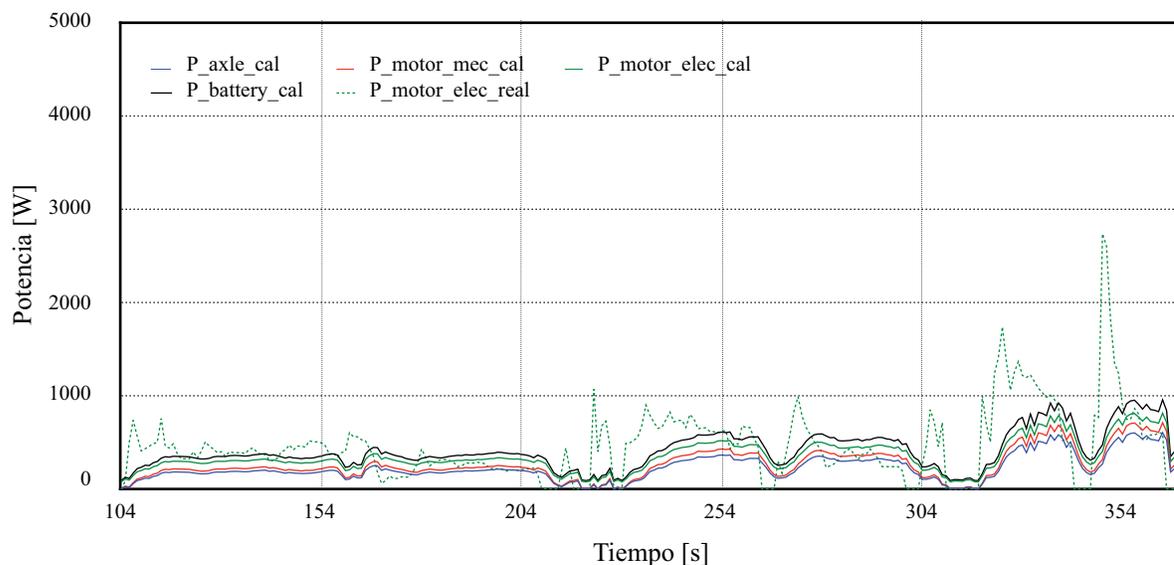


Gráfica 4.17 Datos de corriente en el motor y baterías reales comparados con los valores calculados empleando el BFM.

La [Gráfica 4.18](#) muestra la potencia en el eje de tracción, motor y baterías calculada empleando el modelo BFM y los compara con el valor de la potencia calculada a partir de la corriente y voltaje medidos en las baterías durante las pruebas. Se puede observar que las curvas de potencia calculadas siguen un mismo patrón, el cual solo describe la curva de potencia eléctrica real $P_{motor_elec_real}$ en el motor en intervalos de velocidad constante.

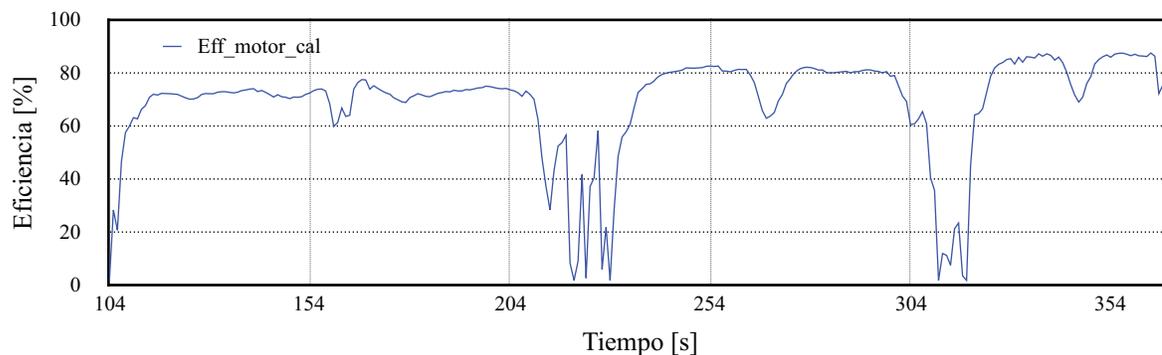
Los picos de potencia en intervalos de tiempo corresponden a los periodos de aceleración y no pueden ser descritos por un modelo en estado estacionario.

La diferencia en los valores de potencia para los distintos componentes corresponde a las pérdidas asociadas a las eficiencias de cada componente.

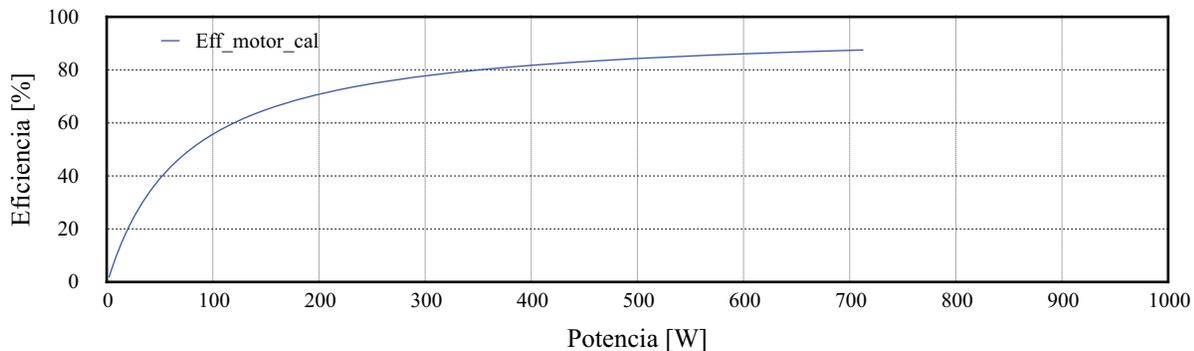


Gráfica 4.18 Potencia calculada en el eje de tracción, motor y baterías empleando el BFM comparada con la potencia eléctrica real en las terminales del motor.

A partir de los datos de potencia eléctrica y mecánica calculados es posible obtener valores de eficiencia teórica en el motor como se muestra en las gráficas 4.19 y 4.20.



Gráfica 4.19 Rangos de eficiencia en el motor calculados empleando el BFM.

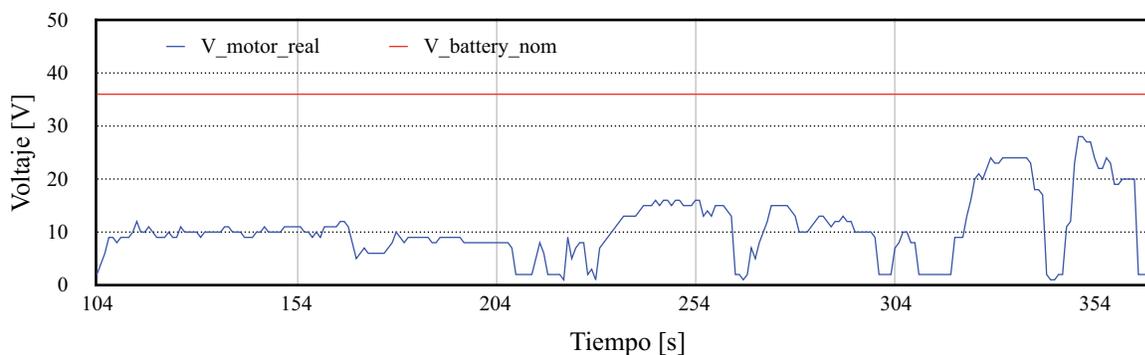


Gráfica 4.20 Curva de eficiencia teórica del motor eléctrico.

4.4.3. Modelo orientado hacia adelante (forward-facing model)

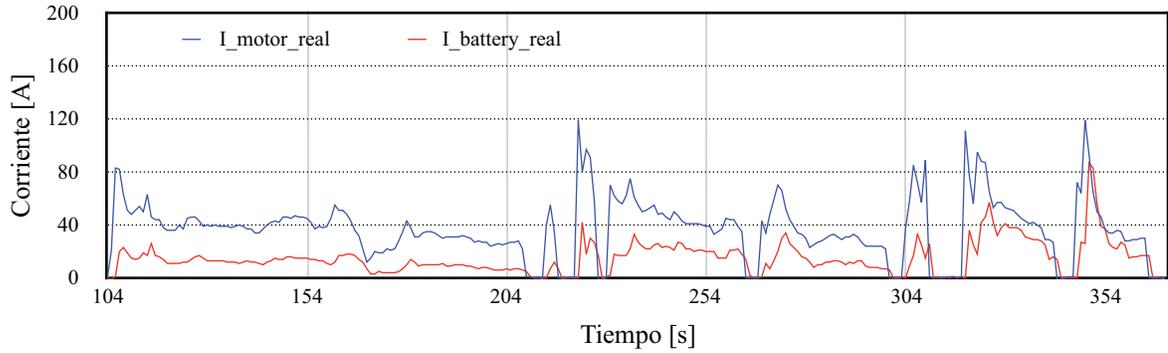
Empleando las ecuaciones mostradas en la sección 3.2.2. **Modelo matemático en estado estacionario** y los parámetros de operación mostrados en la **Tabla 4.8**, es posible realizar la estimación de los valores de velocidad lineal en el vehículo a partir de datos de voltaje y corriente en las baterías si se emplea la dirección de cálculo del modelo orientado hacia adelante (FFM).

La **Gráfica 4.21** muestra los valores de voltaje medido en las terminales del motor y el valor de voltaje nominal en baterías de 36 V elegido para un análisis inicial en estado estacionario en el mismo intervalo de velocidad presentado en la **Gráfica 4.12**.



Gráfica 4.21 Voltaje medido en las terminales del motor y el valor de voltaje nominal en baterías.

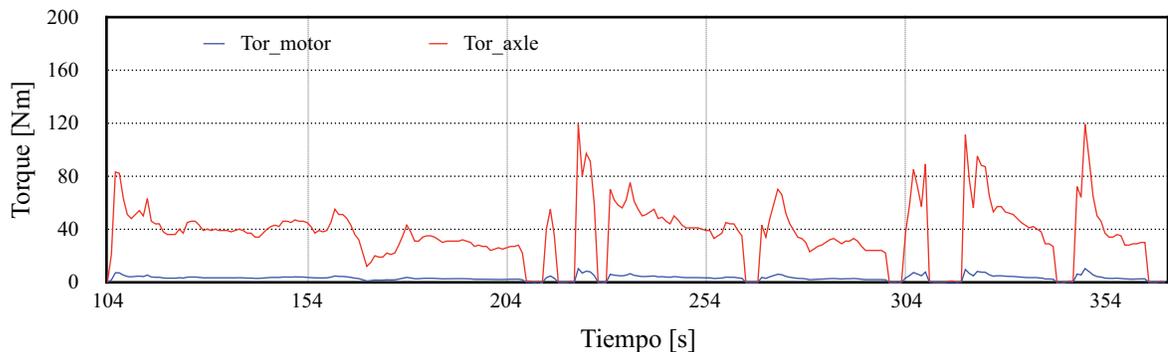
La **Gráfica 4.22** muestra los valores de corriente medida en las terminales del motor y las baterías. Los valores de corriente y voltaje medidos en el motor son empleados para calcular la potencia eléctrica necesaria a la salida de las terminales del convertidor.



Gráfica 4.22 Corriente medida en las terminales del motor y las baterías.

El modelo FFM requiere saber el ciclo de trabajo δ en el convertidor para poder determinar los valores de potencia en el motor a partir de valores de voltaje y corriente en las baterías, sin embargo, debido a las características herméticas del controlador de velocidad, no resulta práctico medir el ciclo de trabajo, por lo tanto, al emplear el FFM se deben comenzar los cálculos empleando valores de voltaje en el motor V_motor_real y corriente I_motor_real mostrados en las gráficas 4.21 y 4.22.

La Gráfica 4.23 muestra el torque el motor y eje de tracción calculados empleando el FFM. Se puede observar que el patrón que siguen las líneas corresponde con las de corriente mostradas en la Gráfica 4.22.

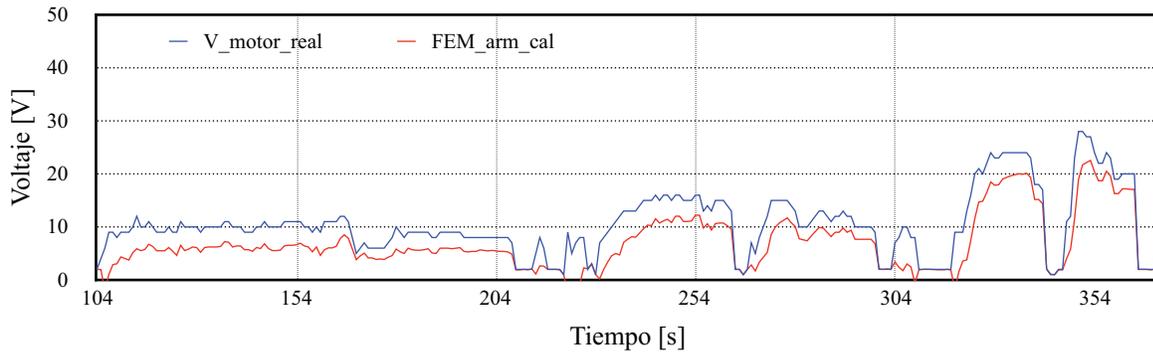


Gráfica 4.23 Torque en el motor y eje de tracción calculados con el FFM.

A diferencia de las líneas de torque mostradas en la Gráfica 4.14, el torque calculado con el FFM si muestra las variaciones asociadas a intervalos de aceleración, debido a que el cálculo es realizado a partir de valores reales de corriente..

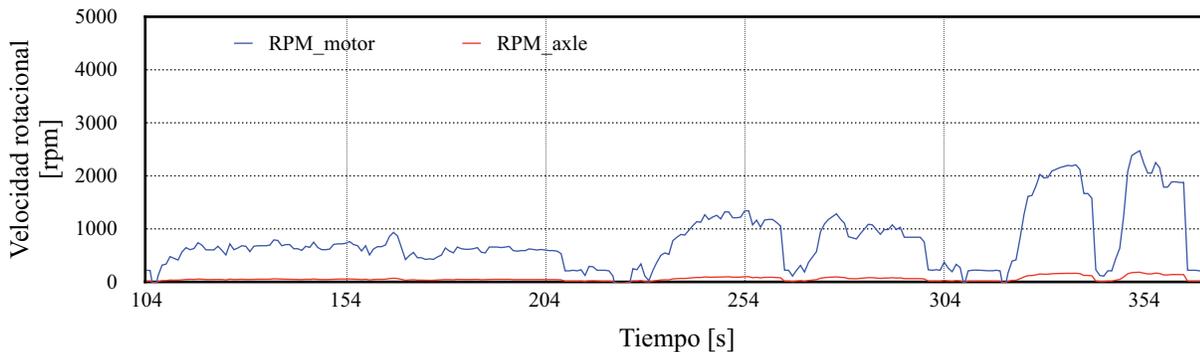
4. Resultados

La [Gráfica 4.24](#) muestra el voltaje medido en terminales del motor y la FEM en armadura calculada empleando el FFM. Si se comparan con la [Gráfica 4.15](#) en donde se muestran los mismos parámetros calculados empleando el BFM, se puede observar que la similitud de comportamiento es bastante cercana.



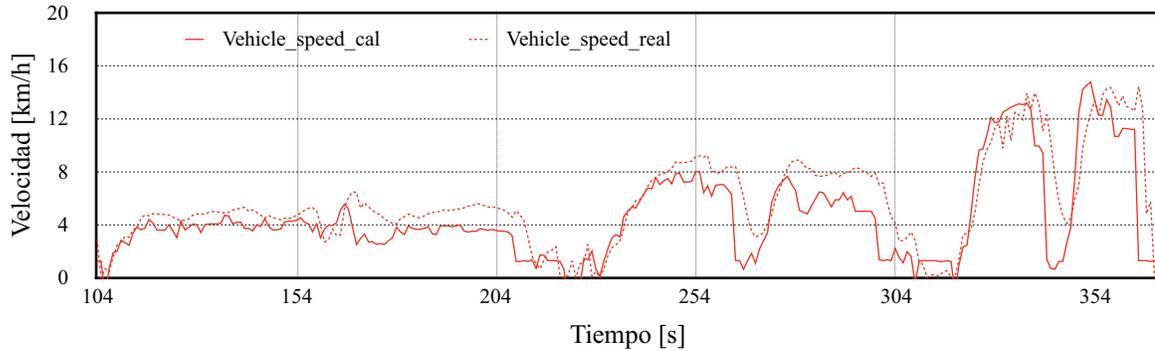
Gráfica 4.24 Voltaje medido en terminales del motor y FEM en armadura calculados con el FFM.

La [Gráfica 4.25](#) muestra los valores de velocidad rotacional en el motor y el eje de tracción calculados empleando el FFM. Comparando los mismos parámetros con los mostrados en la [Gráfica 4.13](#) calculados empleando el BFM se puede observar que la similitud de comportamiento es muy similar.



Gráfica 4.25 Velocidad rotacional en el motor y el eje de tracción calculados con el FFM.

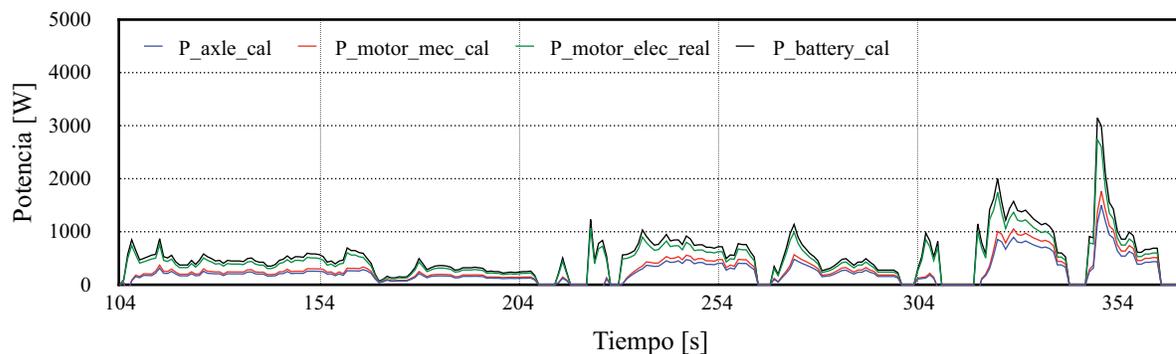
La [Gráfica 4.26](#) muestra la velocidad lineal calculada con el FFM comparada con la velocidad lineal medida en los neumáticos del vehículo. El patrón de comportamiento seguido por la velocidad en el eje de tracción calculada *Vehicle_speed_cal* es bastante cercano los valores de velocidad reales *Vehicle_speed_real*.



Gráfica 4.26 Velocidad lineal calculada con el FFM comparada con la velocidad lineal medida en los neumáticos del vehículo.

La [Gráfica 4.27](#) muestra la potencia calculada en el eje de tracción, motor y baterías empleando el FFM comparada con la potencia eléctrica real $P_{motor_elec_real}$ estimada a partir de las mediciones de voltaje V_{motor_real} y corriente I_{motor_real} medidas en las terminales del motor mostradas en las gráficas [4.21](#) y [4.22](#).

La potencia mecánica en el eje de tracción P_{axle_cal} y en el motor $P_{motor_mec_cal}$ fueron estimadas empleando los valores de torque y velocidad angular. La potencia en baterías $P_{battery_cal}$ fue estimada empleando el valor de potencia eléctrica en el motor y el valor de eficiencia en el convertidor de potencia.

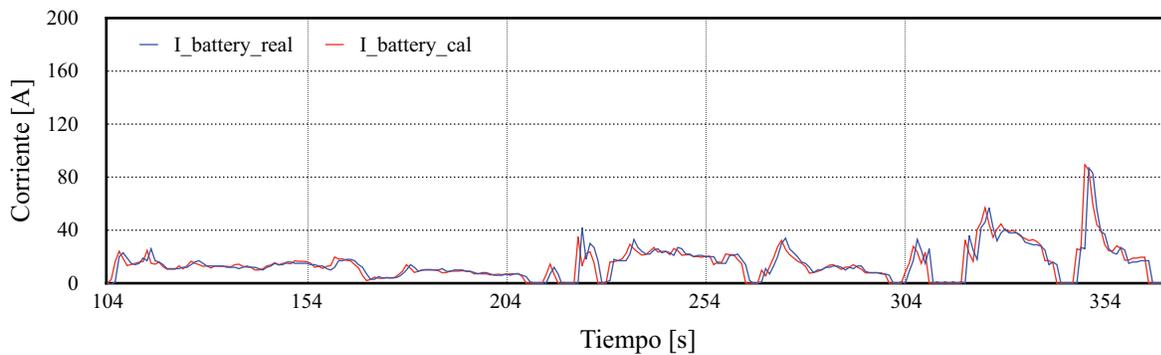


Gráfica 4.27 Potencia calculada en el eje de tracción, motor y baterías empleando el FFM comparada con la potencia eléctrica real del motor.

Al igual que las curvas presentadas en la [Gráfica 4.18](#), la diferencia entre los valores de potencia corresponde a las eficiencias de cada componente. También es posible observar como el comportamiento de las líneas obtenidas con el FFM se ajustan mejor a los valores de potencia reales.

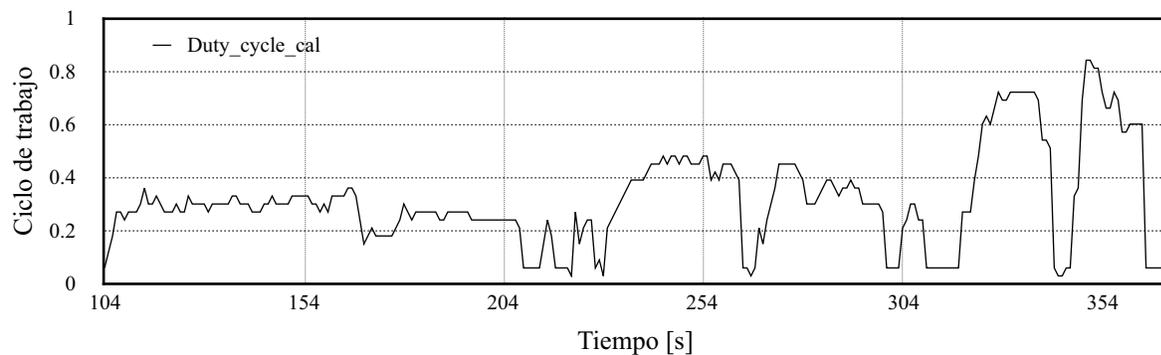
4. Resultados

La [Gráfica 4.28](#) muestra los valores de corriente real medida en baterías comparados con los calculados empleando el FFM a partir del valor de voltaje nominal 36 V y la potencia $P_{battery_cal}$ mostrada en la [Gráfica 4.27](#).



Gráfica 4.28 Corriente real y calculada con el FFM.

La [Gráfica 4.29](#) muestra los valores de ciclo de trabajo en el convertidor de potencia calculados empleando el FFM a partir de los valores de voltaje nominal, el voltaje medido en las terminales del motor y la eficiencia estimada del convertidor de potencia.



Gráfica 4.29 Valores de ciclo de trabajo en el convertidor calculados con el FFM.

Los resultados obtenidos con el modelo estacionario, ayudan a predecir el desempeño del vehículo con un nivel de precisión que varía según la dirección y datos iniciales empleados durante el cómputo. Los cálculos realizados con el modelo orientado hacia adelante FFM logran mostrar el desempeño cuasi-estacionario del vehículo, debido a que parten de datos de corriente en el motor y baterías.

4.5. Modelo básico del vehículo

El modelo matemático planteado en la sección 3.2. [Modelo inicial del vehículo](#) describe el comportamiento del vehículo cuando alcanza valores de velocidad constante (estado estacionario). Los resultados obtenidos descritos en las secciones 4.2. [Obtención de parámetros del motor, convertidor de potencia y baterías](#) y 4.3. [Resultados de las pruebas en campo](#) permitieron obtener la información necesaria para verificar el modelo inicial y añadir los elementos necesarios para plantear un modelo básico que describa el comportamiento del vehículo en estado dinámico.

4.5.1. Modelo eléctrico básico en estado dinámico

El modelo básico en estado dinámico del tren de potencia de un vehículo eléctrico ligero puede ser descrito mediante un circuito eléctrico equivalente como el que se muestra en la [Figura 4.1](#).

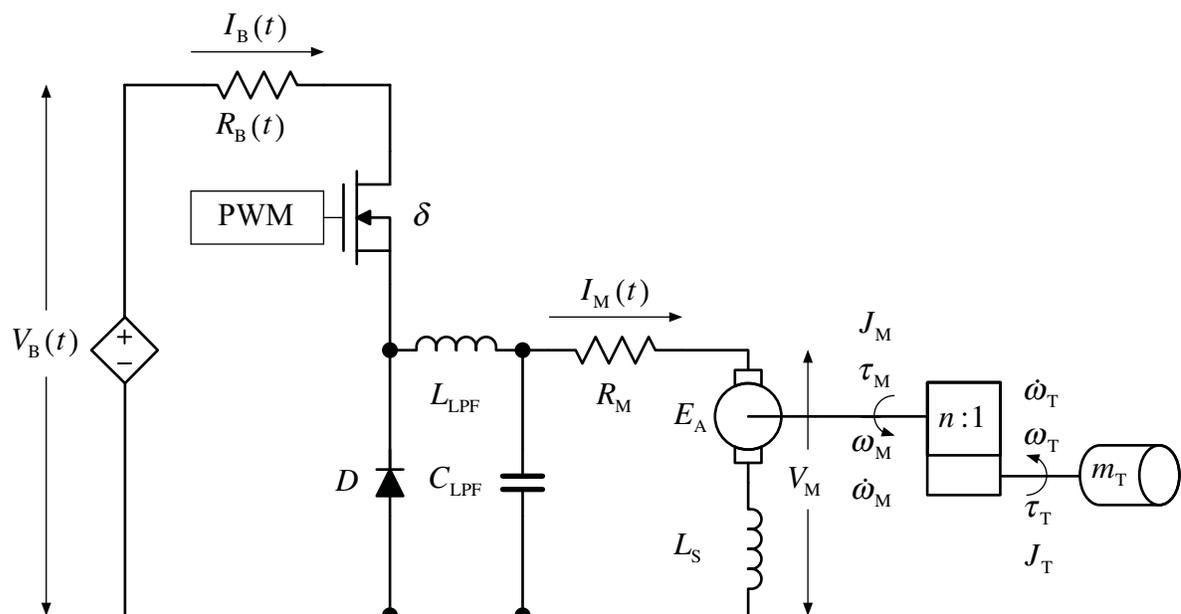


Figura 4.1 Circuito equivalente del tren de potencia de un carro de golf (modelo dinámico).

Basado en el modelo presentado en la sección 3.2.1 [Modelo eléctrico inicial](#), en el nuevo modelo se toma en cuenta que el comportamiento de los componentes tiene variaciones respecto al tiempo.

En los modelos dinámicos de la carga mecánica y el motor eléctrico se incluyen el momento de inercia y la aceleración rotacional, que afectan directamente en los requerimientos de potencia cuando el vehículo acelera y en el tiempo que tarda el vehículo para alcanzar un valor de velocidad constante. Los cambios transitorios y subtransitorios en el motor no son considerados.

El circuito del convertidor de potencia incluye un inductor en paralelo con un capacitor que constituyen un filtro pasa bajo para filtrar las señales de voltaje y corriente. El filtro es necesario debido a que la conmutación en MOSFET genera a la salida del convertidor una señal de voltaje de tipo onda cuadrada similar a la mostrada en la [Figura 2.24](#) de la sección [2.4.7. Accionamiento chopper de motor CD](#).

La fuente de voltaje ideal fue reemplazada por una fuente de voltaje controlada, conectada en serie con una resistencia dependiente para modelar el circuito de una batería real.

4.5.2. Modelo matemático básico en estado dinámico

La [Figura 4.2](#) muestra el grupo de ecuaciones que conforman el modelo matemático básico del tren de potencia del carro de golf. El modelo sirve como base para describir la operación del vehículo en estado dinámico, cuando la velocidad del vehículo varía respecto al tiempo. El diagrama acopla las ecuaciones que corresponden a los componentes del circuito equivalente mostrado en la [Figura 4.1](#). Las flechas indican la dirección de cómputo, comenzando por el cálculo de masa y velocidad del vehículo, para concluir con el cálculo de la potencia requerida de las baterías.

4.5.2.1. Aceleración en el eje de tracción

El modelo en estado dinámico incluye los efectos de la fuerza necesaria para impulsar el vehículo en los intervalos de aceleración. Cuando el vehículo se estabiliza en una velocidad constante la fuerza por aceleración disminuye. La potencia necesaria en el eje de tracción se calcula a partir de la fuerza de tracción por la velocidad. Debido a que el eje de tracción es un sistema giratorio, es conveniente emplear la potencia en términos de velocidad angular y torque. El torque en el eje de tracción es proporcional a la fuerza necesaria para mover el vehículo y aumenta en función de la aceleración angular multiplicada por el momento de inercia del eje.

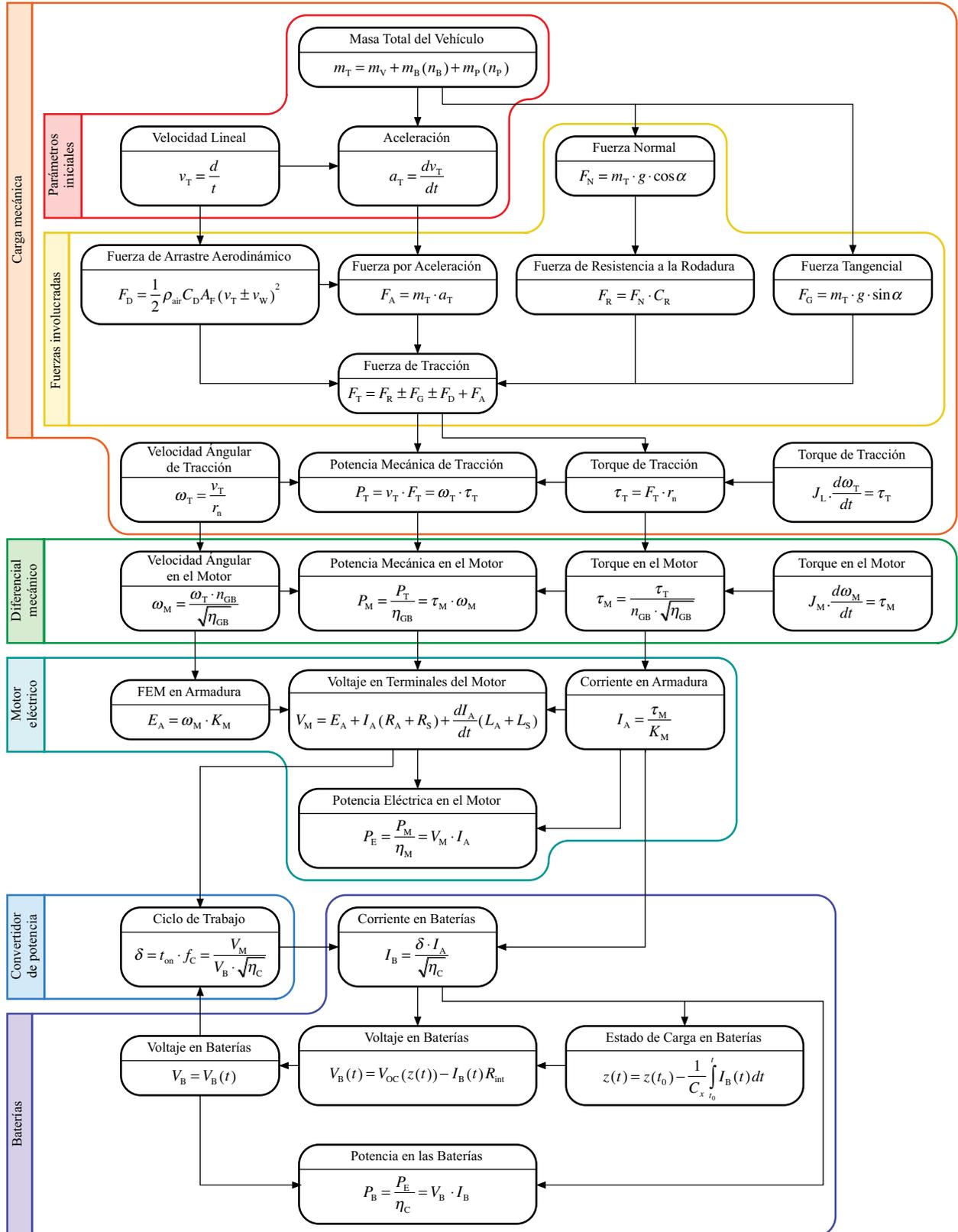


Figura 4.2 Modelo matemático básico en estado dinámico del tren de potencia de un vehículo eléctrico ligero.

4.5.2.2. Aceleración en el motor

El modelo dinámico del motor eléctrico contempla los efectos debidos al cambio de velocidad. El torque generado en el rotor aumenta cuando se requiere acelerar el vehículo. Esto implica que la corriente en el motor debe aumentar durante la aceleración generar el torque requerido. Al variar la corriente, se genera un voltaje por efectos de inducción tanto en la armadura como en el campo.

4.5.2.3. Voltaje y estado de carga en las baterías

La relación entre la corriente en el motor y las baterías esta dado por el ciclo de trabajo en el convertidor de potencia, que controla el voltaje en las terminales del motor, y por tanto la velocidad del mismo.

El modelo dinámico de las baterías muestra los efectos en el estado de carga ocasionados por la demanda y variación de corriente en las baterías. El voltaje en terminales depende del estado de carga, que a su vez depende de la corriente demandada cada intervalo de tiempo para calcular el porcentaje de energía empleado y restarlo del estado de carga anterior, para así calcular un nuevo valor de voltaje en terminales.

El modelo concluye con el cálculo de la potencia en baterías, necesario para estimar los requerimientos de energía y la autonomía del vehículo.

4.5.2.4. Requerimientos de energía y autonomía

A partir de la potencia en baterías P_B calculada, es posible determinar la energía E_T empleada durante el tiempo total del recorrido.

$$E_T = \int_{t_0}^t P_B dt \quad (4.1)$$

El cálculo de la energía empleada es fundamental para determinar los parámetros de desempeño y autonomía de un vehículo. Dependiendo de la energía y la capacidad de las baterías es posible estimar el tiempo de descarga y la distancia que puede ser recorrida, como se muestra en el [Anexo O, Autonomía de un carro de golf en condiciones de operación nominal](#).

5. SIMULACIÓN

De forma general, el proceso de simulación involucra las siguientes tres etapas [78]:

1. Desarrollo;
2. Prueba;
3. Operación.

La etapa de desarrollo implica la formulación adecuada del modelo matemático para su implementación en software mediante el uso de código computacional o de programas especializados en modelación y simulación.

Durante la etapa de pruebas o *testing* se ejecuta el programa para verificar su comportamiento bajo condiciones iniciales de operación, y validar la funcionalidad del modelo matemático y el programa implementado.

La etapa de operación implica experimentar con el modelo variando componentes y condiciones de operación que pudieran ser difíciles de implementar directamente al modelo real. Los resultados deben ser analizados para mejorar el modelo matemático y entender con mayor detalle el comportamiento del modelo, con la finalidad de implementar mejoras en el sistema real.

5.1. Implementación del modelo eléctrico en PSIM

El modelo básico del vehículo fue implementado en PSIM⁴ (Power Simulation) versión 11, un software especializado en simulación de circuitos eléctricos de la compañía americana Powersim Inc.

PSIM es un software de simulación específicamente desarrollado para el diseño y simulación electrónica de potencia, motores eléctricos y sistemas de conversión de potencia [88]. Su interfaz gráfica, gran velocidad de procesamiento y una amplia gama de componentes lo hacen ideal para diseñar sistemas complejos que requieren combinar la capacidad de circuitos eléctricos y de control.

La modelación y simulación de un sistema dinámico es posible en PSIM gracias a sus características de control de tiempo y módulos matemáticos. El control de tiempo permite definir el intervalo temporal en el que son ejecutados los cálculos y registrados los resultados. Los módulos matemáticos permiten introducir ecuaciones y funciones útiles para construir circuitos de control.

La implementación del modelo básico en PSIM consistió en emplear la interfaz gráfica del programa para colocar y conectar los componentes del circuito equivalente descrito en la sección 4.5. [Modelo básico del vehículo](#).

La [Tabla 5.1](#) es una lista de los objetos presentes en los circuitos diseñados en PSIM. Los elementos son todos aquellos componentes disponibles en las librerías para construir circuitos. Los subcircuitos son agrupaciones de circuitos que el usuario elige crear con la finalidad de mantener la jerarquía y orden en diseños complejos. Los puertos sirven para conectar subcircuitos con elementos u otros subcircuitos. Las etiquetas son empleadas para conectar elementos o subcircuitos que se encuentran alejados.

PSIM cuenta con interfaces para conectar circuitos de control con circuitos de potencia, que a su vez pueden ser conectados con elementos mecánicos. El color de las conexiones o cables varía en función del tipo de circuito. Los elementos, subcircuitos y conexiones deshabilitados están presentes en el circuito, pero no son elementos activos durante la simulación.

⁴ La licencia del software fue adquirida por el INEEL para la realización del proyecto.

Tabla 5.1 Principales elementos de un circuito en PSIM y los colores que los representan.

Nomenclatura	Objetos	Color
Elements	Elementos	
Subcircuit	Subcircuito	
Port	Puertos	
Text	Texto	
Nodes	Nodos	
Label	Etiquetas	
Control	Circuito de control	
Power	Circuito de potencia	
Mechanical	Circuito mecánico	
Disabled	Circuito deshabilitado	

De forma general, los pasos mínimos necesarios durante proceso de modelación y simulación en PSIM son:

- Paso 1.** Implementación de los componentes en el circuito.
- Paso 2.** Implementación de elementos para medir resultados.
- Paso 3.** Determinación de parámetros de simulación de cada componente.
- Paso 4.** Determinación de parámetros de control de tiempo.
- Paso 5.** Simulación del modelo.
- Paso 6.** Graficación de resultados.

5.2. Estrategias de simulación

Como se mencionó en la sección 2.1. **Conceptos básicos de vehículos eléctricos**, el tren de potencia de un vehículo es un sistema complejo integrado por varios subsistemas que a su vez se componen de subsistemas propios.

Debido a que la complejidad de la simulación aumenta conforme se incrementa el grado de detalle del modelo, fue necesario implementar ciertas estrategias que permitieran reducir los tiempos de simulación para la verificación de los resultados obtenidos, la identificación de posibles errores de modelación y su corrección.

Para verificar el comportamiento correcto de cada componente, se empleó la estrategia de simular cada subsistema por separado. Una vez verificados los resultados de la simulación se fueron añadiendo enlaces entre cada subsistema como si se trataran de eslabones de una cadena hasta integrar el sistema completo.

5.2.1. Simulación de subsistemas separados

El análisis del tren de potencia de un vehículo puede resultar complicado debido a que los subsistemas deben ser analizados desde distintas disciplinas (mecánica, eléctrica, control, fisicoquímica). Cada subsistema posee características de tipo intrínseco y extrínseco que afectan su operación, y que cuando están conectados con otros subsistemas, afectan la operación del sistema completo. Por características intrínsecas nos referimos a las cualidades físicas y operativas (dimensiones, peso, etc) de cada subsistema o dispositivo, mientras que las características extrínsecas dependen de las condiciones ambientales de operación (presión, temperatura, etc).

Para lograr modelar y simular un sistema complejo es recomendable aplicar una estrategia de simulación separada de los subsistemas. Esta estrategia tiene las siguientes ventajas:

1. Se manipulan una cantidad menor de componentes por subsistema.
2. Se trabaja con mayor orden y limpieza.
3. Se disminuyen los tiempos de simulación.
4. Es posible identificar y corregir errores con relativa facilidad.
5. Se tiene un mayor control de las versiones del modelo.

5.2.1.1. Simulación del motor

La Figura 5.1 muestra el circuito implementado en PSIM para la simulación del motor eléctrico. Fue empleado el componente *DC Machine* que PSIM incluye en su librería *Motor Drive Module*. El motor tiene una configuración en serie y es alimentado por una fuente de voltaje CD. Se pueden observar los elementos para medir el voltaje y corriente en las terminales del motor, además de los sensores de velocidad rotacional y torque. El voltaje en la armadura es medido en las terminales A1 y A2.

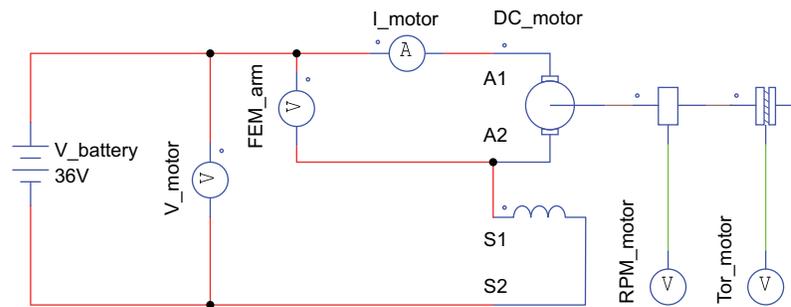


Figura 5.1 Circuito implementado en PSIM para la simulación del motor.

La Tabla 5.2 muestra los parámetros empleados para la simulación del motor. PSIM incluye un control de simulación que permite ajustar los parámetros de tiempo.

El parámetro *Time step* determina la variable de tiempo empleada en los cálculos y define la cantidad de simulaciones que se ejecutan por segundo. PSIM toma como referencia la unidad de tiempo más pequeña necesaria para simular los componentes presentes en el circuito.

La variable de tiempo es el parámetro más relevante durante el proceso de simulación, porque determina la el grado de resolución de los resultados y el tiempo total de cómputo. El valor de 0.0001 segundos fue elegido por dos razones:

1. Permite obtener el grado de resolución suficiente para observar el comportamiento transitorio durante el arranque del motor que ocurre en intervalos menores de un segundo.
2. Corresponde al tiempo de conmutación necesario para realizar cálculos cuando se emplea un generador PWM con una frecuencia de 1000 Hz en el circuito del convertidor de potencia.

El parámetro *Total time* determina el tiempo que debe transcurrir para que la simulación se detenga de forma automática. En el caso de la simulación de un motor eléctrico, el régimen permanente es alcanzado después de los primeros segundos, por lo que 5 segundos es suficiente para el análisis. El parámetro *Print step* permite controlar la cantidad de datos que son registrados durante los cálculos, a fin de poder analizarlos con mayor o menor grado de detalle.

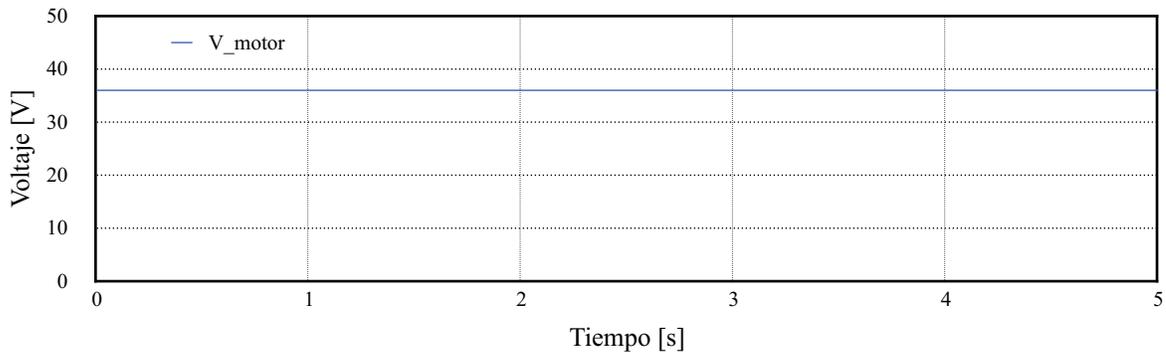
Tabla 5.2 Parámetros de simulación del motor ⁵.

	Parámetro	Valor	Unidad
Simulation Control			
	Time step	0.0001	s
	Total time	5	s
	Print time	0	—
	Print step	1	—
Battery			
	Amplitude	36	V
	Series Resistance	0	Ω
	Series Inductance	0	H
DC Machine			
	Ra (armature)	0.085	Ω
	La (armature)	0.000330	H
	Rf (field)	0.032	Ω
	Lf (field)	0.000250	H
	Moment of Inertia	0.0001	kg·m ²
	Vt (rated)	36	V
	Ia (rated)	62	A
	n (rated, in rpm)	3300	rpm
	If (rated)	62	A
	Torque Flag	1	—
	Master / Slave Flag	1	—

El parámetro de la fuente CD corresponde al voltaje nominal total de 36V del banco de seis baterías de ácido plomo conectadas en serie. Los parámetros del motor mostrados en la [Tabla 5.2](#) corresponden a los datos de placa mostrados en el [Anexo B](#) y los resultados de las pruebas mostrados en la sección [4.2.1. Determinación de resistencia e inductancia en armadura y campo del motor](#). El valor del momento de inercia fue determinado mediante aproximaciones al observar el comportamiento del motor durante las pruebas.

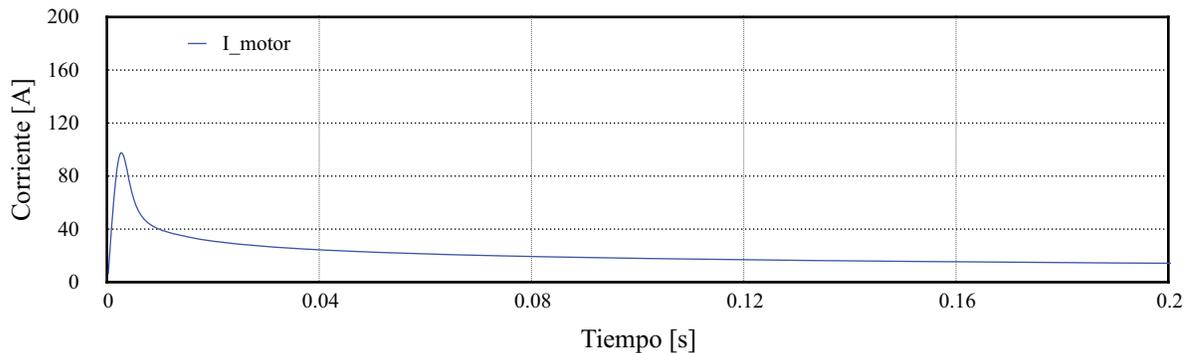
⁵ Se asignó una nomenclatura en inglés a todos los parámetros de simulación, con el objetivo de establecer un estándar entre los elementos de la librería de PSIM y los componentes de los circuitos creados.

La [Gráfica 5.1](#) muestra el voltaje constante en el motor. En la simulación de los subsistemas separados se empleó el valor de 36V para observar el comportamiento de los componentes en condiciones de operación nominales del motor y baterías.



Gráfica 5.1 Voltaje registrado durante la simulación del motor.

La [Gráfica 5.2](#) muestra los valores de corriente. Se puede observar un pico de 97.72 A durante el instante de 0.0026 segundos que corresponde a la corriente de arranque.

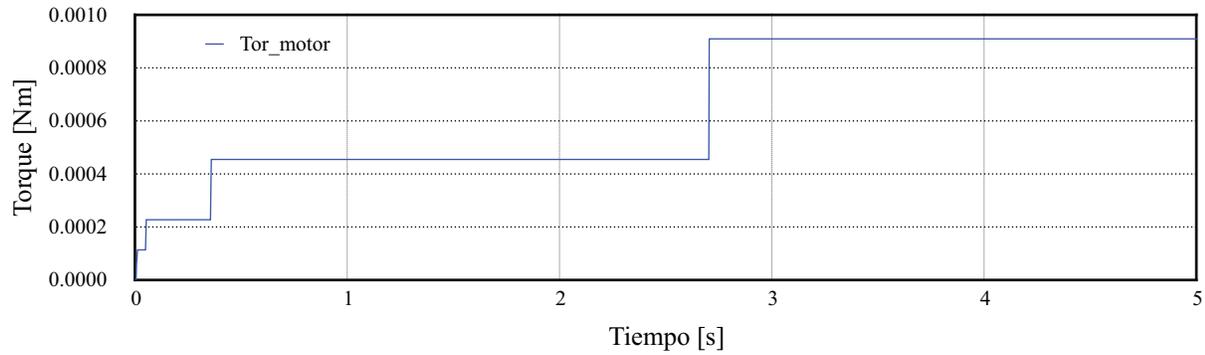


Gráfica 5.2 Corriente registrada durante la simulación del motor.

La [Gráfica 5.3](#) corresponde al torque registrado en el rotor de motor. Se pueden observar valores muy pequeños de torque, con un máximo cercano a 0.000909 Nm. En el modelo implementado no se especificó un valor mínimo de torque, por lo que se considera que el rotor del motor posee una masa muy pequeña respecto a la masa de la carga.

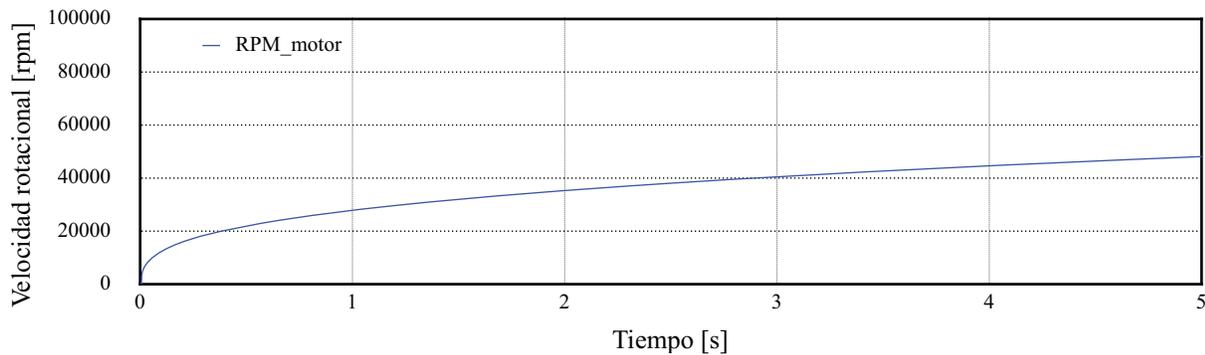
El perfil de torque corresponde a un valor de corriente muy bajo tal como se observa en la [Gráfica 5.2](#). Si hubiera una carga mecánica acoplada al rotor del motor, el torque tomaría valores más altos, correspondientes a la fuerza necesaria para mover la carga y contrarrestar los efectos de fricción en el acoplamiento mecánico.

5. Simulación



Gráfica 5.3 Torque registrado durante la simulación del motor.

La **Gráfica 5.4** muestra la velocidad rotacional registrada en el eje del rotor. Se puede observar como los valores aumentan de forma muy rápida el primer segundo, para alcanzar una velocidad de 48,134.3 rpm en los cinco segundos que dura la simulación.



Gráfica 5.4 Velocidad rotacional registrada durante la simulación del motor.

Este efecto es debido a que no hay una carga mecánica acoplada al motor y es característico de los motores CD conectados en serie. Algunos autores se refieren a este efecto como “embalamiento”, por lo que se recomienda que el motor siempre se encuentre acoplado a una carga cuando es puesto en marcha.

Tabla 5.3 Resumen de resultados de simulación del motor.

Nomenclatura	Parámetro	Valor	Unidad
T_comp	Tiempo de cómputo	1	s
V_motor	Voltaje en el motor	36	V
I_motor	Corriente en el motor	4.9	A
Tor_motor	Torque en el rotor del motor	0.000909	Nm
RPM_motor	Velocidad rotacional en rotor del motor	48134.3	rpm

5.2.1.2. Simulación del motor y caja de engranes

La Figura 5.2 muestra el circuito implementado en PSIM para la simulación del motor y la carga mecánica. Se pueden observar que al circuito mostrado en la Figura 5.1 se añade una caja de engranes para conectar una carga mecánica controlada de forma externa por una constante de torque.

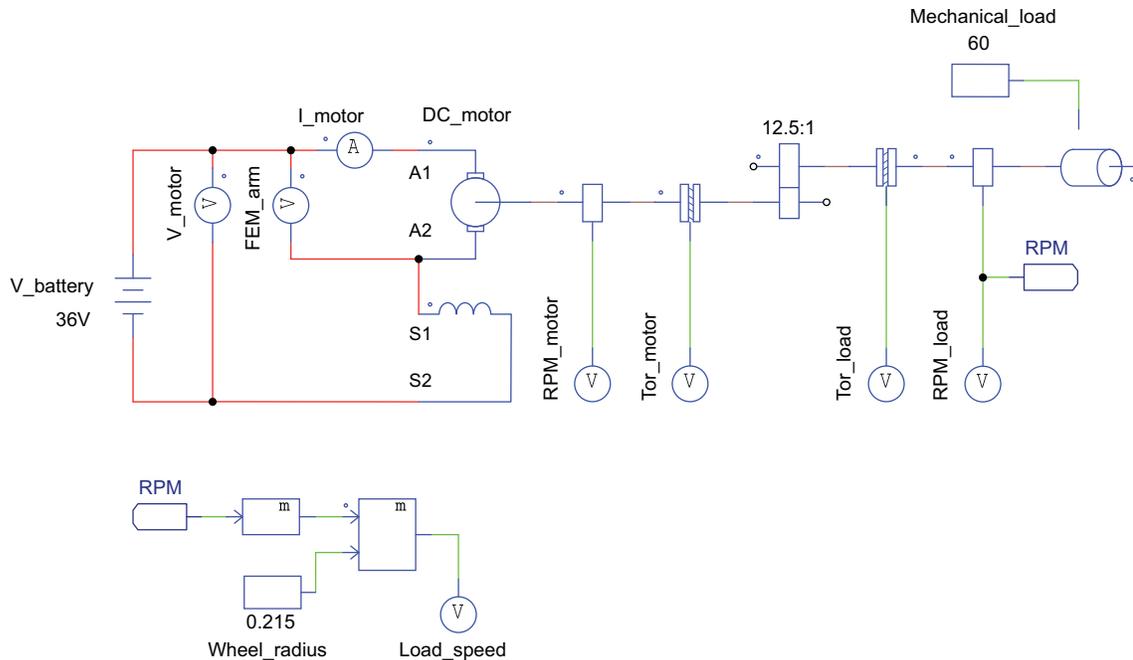


Figura 5.2 Circuito implementado en PSIM para la simulación del motor y la carga mecánica.

El componente del diferencial mecánico *Gear Box* conecta mediante enlaces mecánicos el motor con la carga mecánica *Mechanical Load*, ajustando la relación de velocidad rotacional y torque e invirtiendo la dirección de rotación.

Al igual que el circuito del motor, la carga mecánica tiene acoplados sensores para registrar los valores de velocidad rotacional y torque. Empleando los módulos matemáticos de PSIM, es posible obtener valores de velocidad lineal en kilómetros por hora a partir de los valores registrados de revoluciones por minuto.

Para el circuito del motor se emplearon los mismos parámetros de simulación mostrados en la Tabla 5.2. La Tabla 5.4 muestra los parámetros de la caja de engranes con una relación de velocidades de 12.5:1.

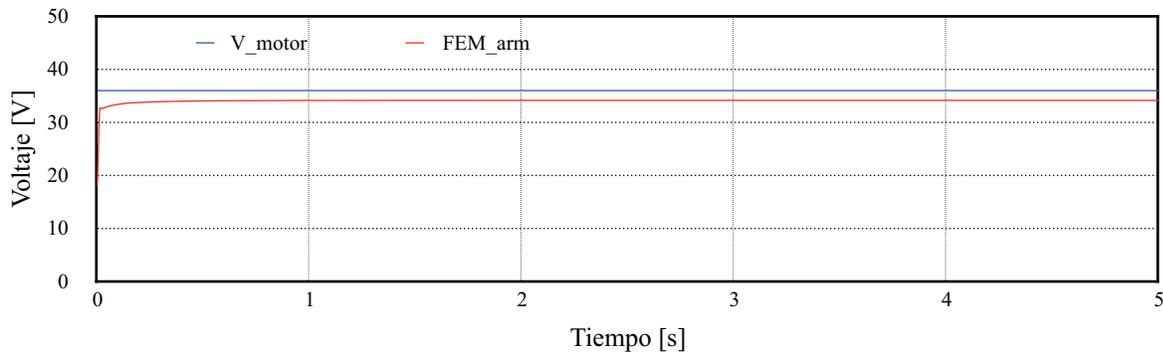
El parámetro *Shaft master/slave flag* define la dirección de acoplamiento mecánico, cuando se le asigna la posición 0, los valores de velocidad rotacional y torque provienen del motor, en cambio cuando se le asigna la posición de 1, dichos valores provienen de la caja de engranes para mover la carga mecánica.

Al igual que el motor, el momento de inercia de la carga mecánica fue determinado mediante aproximaciones. La constante de torque corresponde la fuerza necesaria para alcanzar la velocidad nominal del motor cuando se aplican 36 V en sus terminales.

Tabla 5.4 Parámetros simulación de la caja de engranes y la carga mecánica.

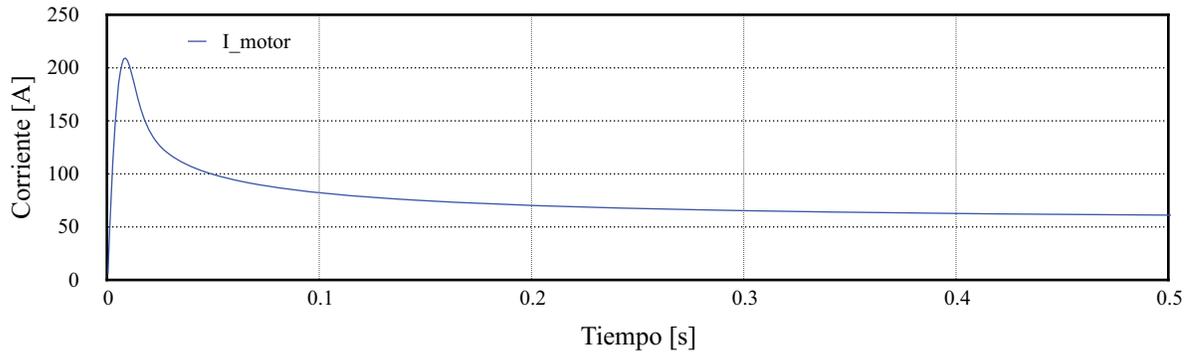
	Parámetro	Valor	Unidad
Gear Box			
	Gear ratio	12.5	—
	Shaft 1 master / slave flag	1	—
	Shaft 2 master / slave flag	0	—
Mechanical Load			
	Speed Flag	0	—
	Moment of Inertia	1	kg · m ²
	Torque	60	Nm
	Wheel radius	0.215	m

La **Gráfica 5.5** muestra la tensión en terminales y armadura registrados durante la simulación. La fuente de voltaje de 36 V que alimenta el motor es ideal y constante. La fuerza electromotriz generada en la armadura en el motor es menor que el voltaje en terminales debido a los efectos de la resistencia en campo y armadura.



Gráfica 5.5 Voltaje en terminales y armadura registrados durante la simulación del motor y la carga mecánica.

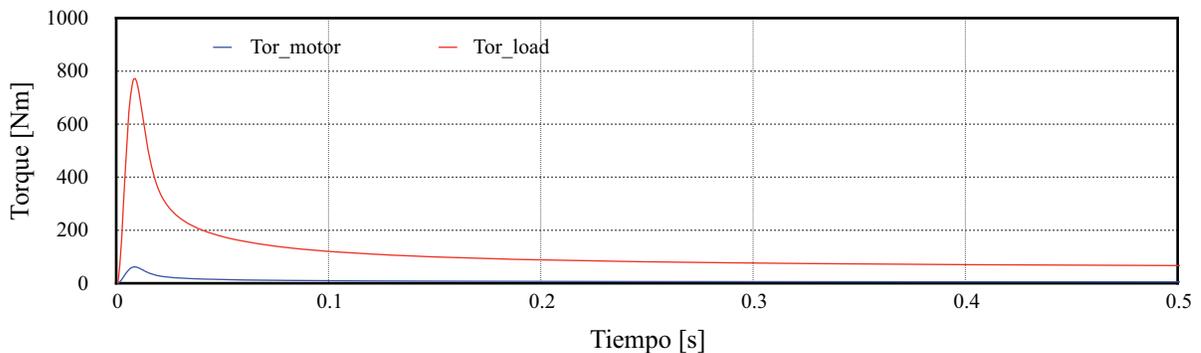
La [Gráfica 5.6](#) muestra los valores de corriente. Se puede observar un pico de 209.16 A en 0.0081 segundos, correspondiente al intervalo de arranque. El valor de corriente se estabiliza después del primer segundo, para alcanzar un valor constante de 57.85 A, cercano a los 62 A de corriente nominal especificados en la placa del motor.



Gráfica 5.6 Corriente registrada durante la simulación del motor y la carga mecánica.

La [Gráfica 5.7](#) muestra los valores de torque registrados en el motor y la carga mecánica. El pico de 772.94 Nm de torque máximo en la carga mecánica corresponde al mismo instante del pico de corriente mostrado en la [Gráfica 5.6](#).

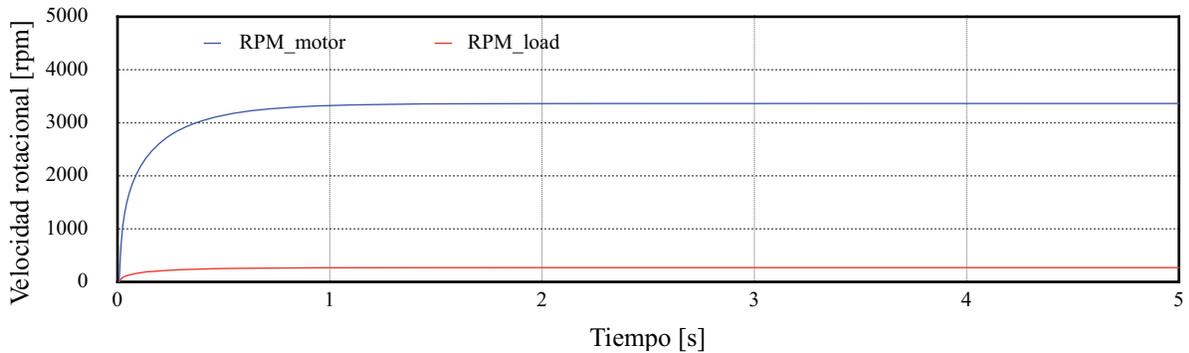
El torque se estabiliza para alcanzar un valor de 60 Nm en la carga mecánica y de 4.8 Nm en el motor, correspondientes a la relación en la caja de engranes. En el [Anexo E](#) se muestran los valores de torque en condiciones nominales de operación en el motor para distintas relaciones de velocidad de engranes comercialmente disponibles. Se puede observar que el valor de torque para una relación de engranes de 12.5:1 corresponde a 64.32 Nm, el cual es un valor cercano a 60 Nm, elegido para simular la carga mecánica.



Gráfica 5.7 Torque registrado durante la simulación del motor y carga mecánica.

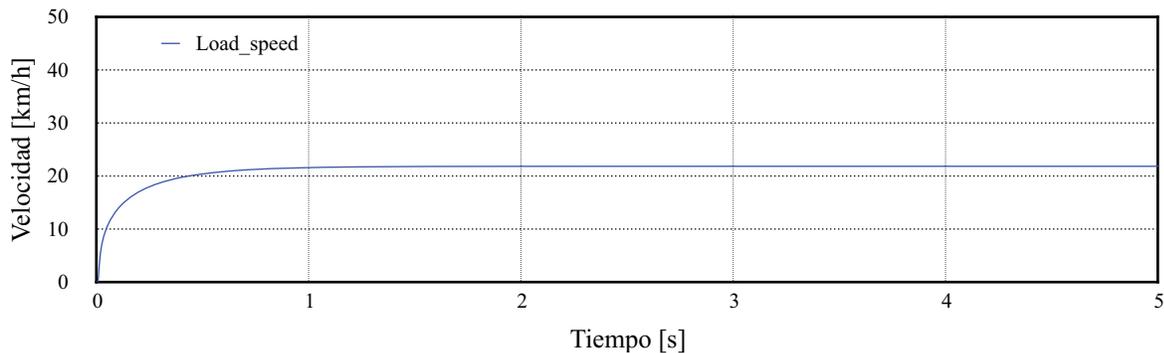
La [Gráfica 5.8](#) muestra los valores de velocidad rotacional en el motor y la carga mecánica. Se puede observar el intervalo transitorio de 2.22 segundos para alcanzar una velocidad constante de 3364 rpm en el motor, cercano a la velocidad nominal de 3300 rpm.

La velocidad rotacional en la carga mecánica se estabilizó en 1.88 segundos alcanzando un valor de 269 rpm, que corresponde a la relación de velocidades de la caja de engranes.



Gráfica 5.8 Velocidad rotacional registrada durante la simulación del motor y la carga mecánica.

La [Gráfica 5.9](#) muestra la velocidad lineal en la carga mecánica calculada a partir de los datos de velocidad rotacional mostrados en la [Gráfica 5.8](#).



Gráfica 5.9 Velocidad lineal registrada durante la simulación del motor y la carga mecánica.

Después de un intervalo transitorio, la velocidad lineal se estabiliza en 21.8 kilómetros por hora, lo que coincide con los valores mostrados en el [Anexo C](#) para valores de velocidad lineal en condiciones nominales de operación. Los resultados de la simulación se resumen en la [Tabla 5.5](#), con un tiempo real de simulación de 1 segundo.

Tabla 5.5 Resumen de resultados de simulación del motor y la carga mecánica.

Nomenclatura	Parámetro	Valor	Unidad
T_comp	Tiempo de cómputo	1	s
V_motor	Voltaje en el motor	36	V
FEM_arm	Voltaje en la armadura	34.15	V
I_motor	Corriente en el motor	57.85	A
Tor_motor	Torque en el motor	4.8	Nm
Tor_load	Torque de la carga mecánica	60	Nm
RPM_motor	Velocidad rotacional en motor	3364.2	rpm
RPM_load	Velocidad de la carga mecánica	269.14	rpm
Load_speed	Velocidad lineal del vehículo	21.83	km/h

5.2.1.3. Simulación del motor, caja de engranes y control de velocidad

La [Figura 5.3](#) muestra el circuito empleado para la simulación del motor, carga mecánica y convertidor de potencia. Se puede observar que al circuito mostrado en la [Figura 5.2](#) se añadió el circuito correspondiente al convertidor de potencia CD/CD con una topología *chopper*.

Un interruptor MOSFET regula el paso de corriente entre el motor y la fuente de CD constante que emula la batería. La conmutación del interruptor es determinada mediante un circuito de control compuesto por una fuente de voltaje de diente de sierra *Sawtooth-wave*, que se encarga de generar un señal PWM y compararla con un voltaje de control generado por una fuente de voltaje constante.

Se puede observar los elementos inductivos y capacitivos que constituyen los dos filtros *pasa-bajo*, implementados para adecuar las señales de voltaje a la entrada y salida del convertidor.

Se colocaron elementos para medir parámetros de potencia en la fuente y motor. Durante la simulación, se consideraron elementos ideales en el convertidor de potencia y sus parámetros se muestran en la [Tabla 5.6](#). Los valores de inductancia y capacitancia empleados en los filtros *pasa-bajo* fueron estimados mediante la metodología mostrada en el [Anexo J](#) y comparados con valores aceptables mostrados en publicaciones técnicas [61].

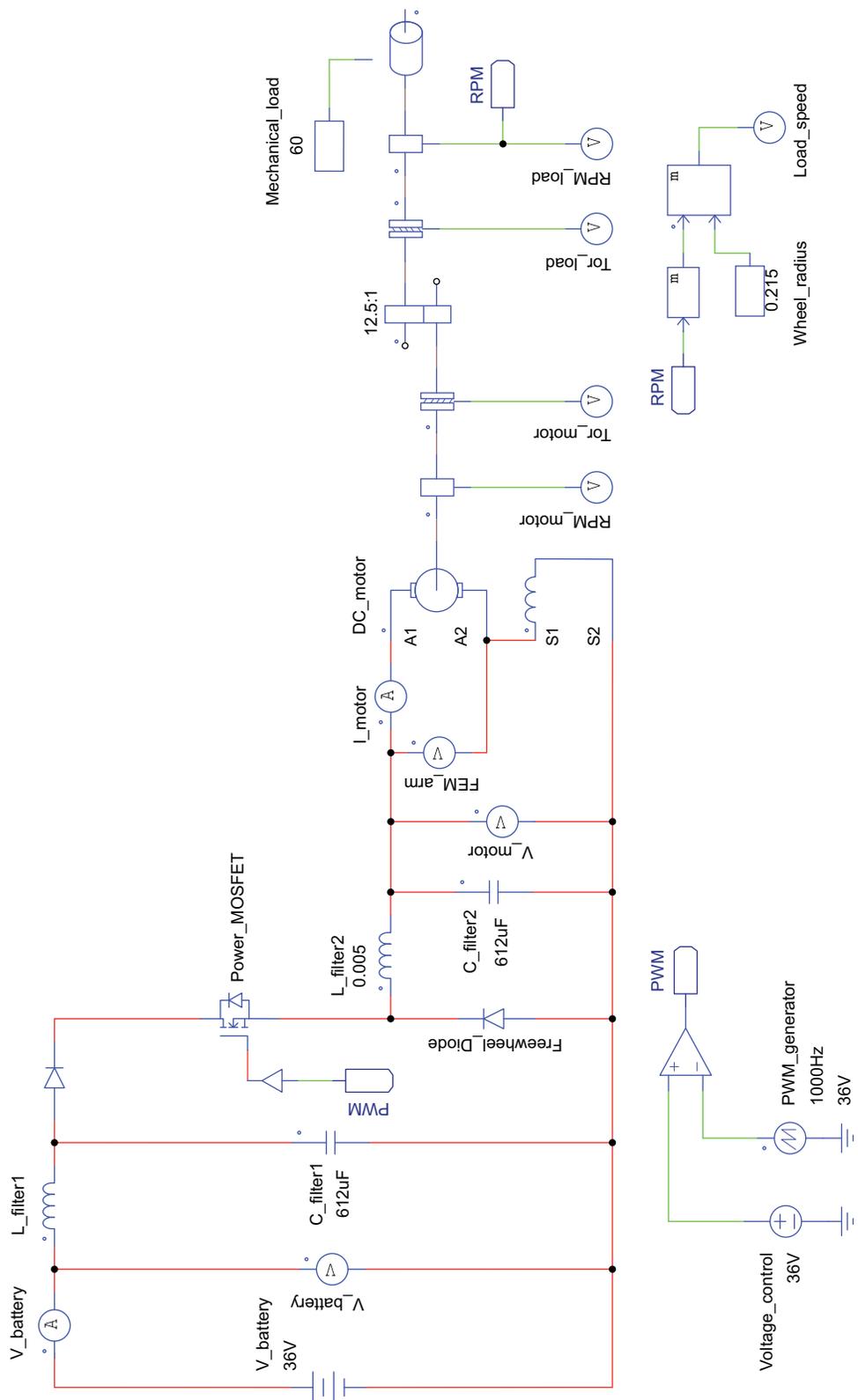


Figura 5.3 Circuito empleado para la simulación del motor, carga mecánica y convertidor de potencia.

El manual del convertidor de potencia implementado en el carro de golf especifica que el oscilador genera una señal PWM con una alta frecuencia de conmutación de 15 kHz [87]. Esto significa que es necesario establecer la variable de tiempo mostrada en la [Tabla 5.2](#) en un valor de 1×10^{-5} segundos. Al reducir la variable de tiempo, se incrementa en un orden de 10 veces más el tiempo de cómputo, lo cual no resulta práctico para ejecutar simulaciones de modelos complejos.

Para solucionar dicho problema, se optó por bajar la frecuencia del generador PWM. Mediante pruebas se puede comprobar que bajar dicha frecuencia a 1000 Hz mantiene el mismo ciclo de trabajo en el MOSFET. Por esa razón, en la simulación de los subsistemas separados fue empleado el valor de 0.0001 segundos para la variable de tiempo.

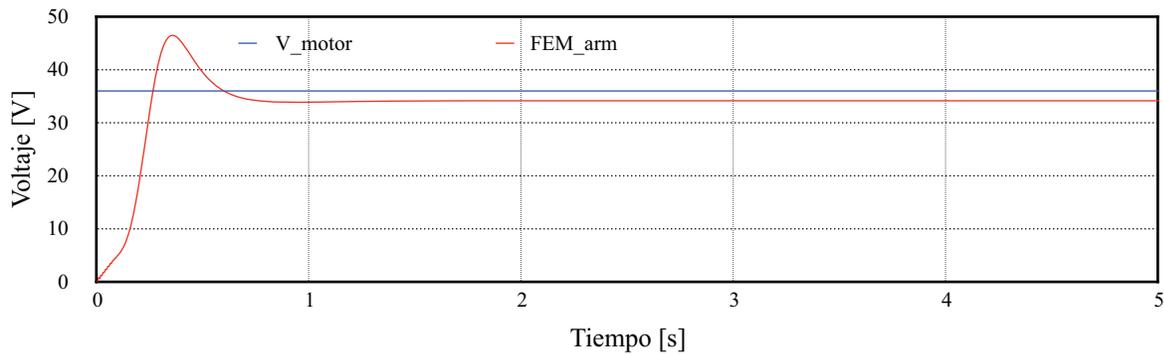
El voltaje pico V_{peak} es la máxima amplitud de la señal PWM y sirve para imponer una referencia del límite de voltaje permitido en las terminales del motor. Es posible colocar el valor máximo de la velocidad lineal que se espera alcanzar en el vehículo cuando se tiene un voltaje nominal en el motor.

El voltaje de control es un elemento que emula el pedal acelerador del vehículo. El valor elegido para el voltaje de control es comparado con el voltaje pico del generador PWM para imponer un ciclo de trabajo en el MOSFET. Variando el valor de voltaje de control en un intervalo de 0 a 36 V se puede controlar la velocidad en el motor y por lo tanto, la velocidad en la carga mecánica.

Tabla 5.6 Parámetros de simulación del convertidor de potencia y el control de velocidad.

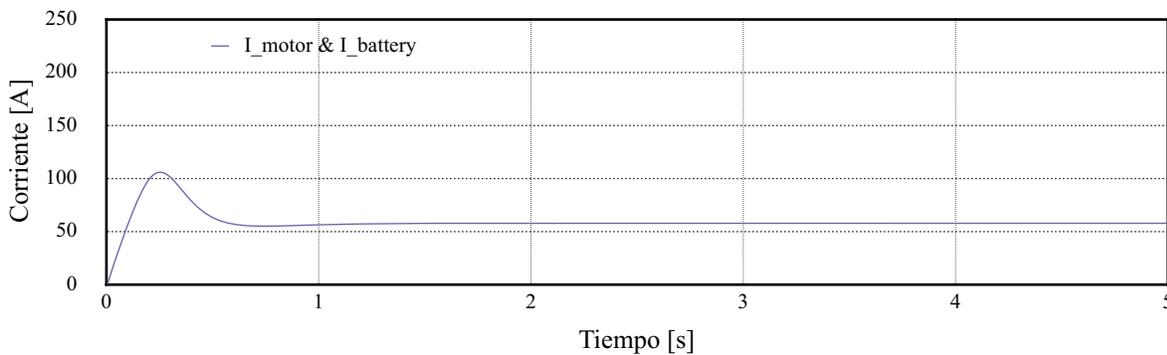
	Parámetro	Valor	Unidad
Low Pass Filter 1			
	Capacitor 1	612	uF
	Inductor 1	0.05	H
Sawtooth (PWM generator)			
	V_{peak}	36	V
	Frequency	1000	Hz
Low Pass Filter 2			
	Capacitor 2	612	uF
	Inductor 2	0.005	H
Control Voltage			
	DC Source	36	V

La [Gráfica 5.10](#) muestra la tensión en las terminales y armadura del motor. Se puede observar que el voltaje en el motor corresponde a 36 V, debido a que el ciclo de trabajo impuesto en el convertidor es tiene un valor de 1. En el intervalo transitorio la fuerza electromotriz en la armadura toma un valor máximo de 46.47 V en 0.35 segundos, para después estabilizarse en 34.14 V después del primer segundo. Este comportamiento no observado en la [Gráfica 5.5](#) puede atribuirse a la influencia de los componentes presentes en los filtros pasa-bajo. La señal lisa registrada por ambas curvas es el resultado de la implementación adecuada de filtros a la salida del convertidor.



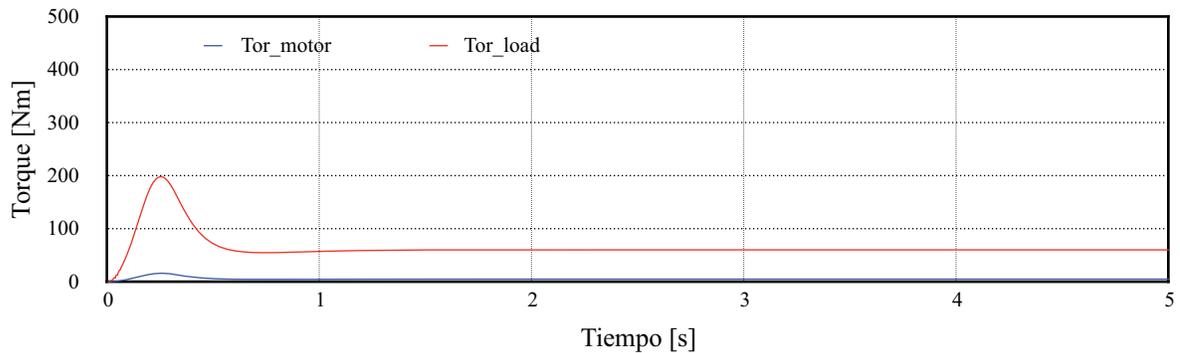
Gráfica 5.10 Voltaje en terminales y armadura registrados durante la simulación del motor, carga mecánica y convertidor de potencia.

La [Gráfica 5.11](#) muestra los valores de corriente en el motor y baterías. Ambos coinciden en valor debido a que el ciclo de trabajo impuesto en el convertidor es 1. Se puede observar que durante el régimen transitorio, los valores alcanzan un máximo de 105.72 A en 0.25 segundos, para después alcanzar un régimen estacionario de 57.85 A al igual que los valores de corriente mostrados en la [Gráfica 5.6](#).



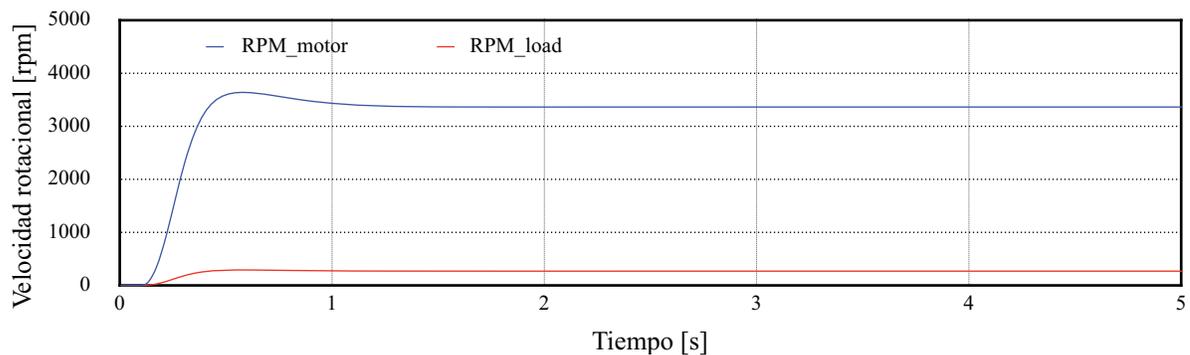
Gráfica 5.11 Corriente registrada durante la simulación del motor, carga mecánica y convertidor de potencia.

La [Gráfica 5.12](#) muestra los valores de torque registrados en el motor y carga mecánica, alcanzando un mayor máximo de 198.23 Nm en 0.25 segundos registrado en la carga mecánica durante el régimen transitorio correspondiente al arranque. Cuando el sistema alcanza el estado estacionario, el torque en la carga se estabiliza en su constante de 60 Nm y 4.8 Nm en el motor.



Gráfica 5.12 Torque registrado durante la simulación del motor, carga mecánica y convertidor de potencia.

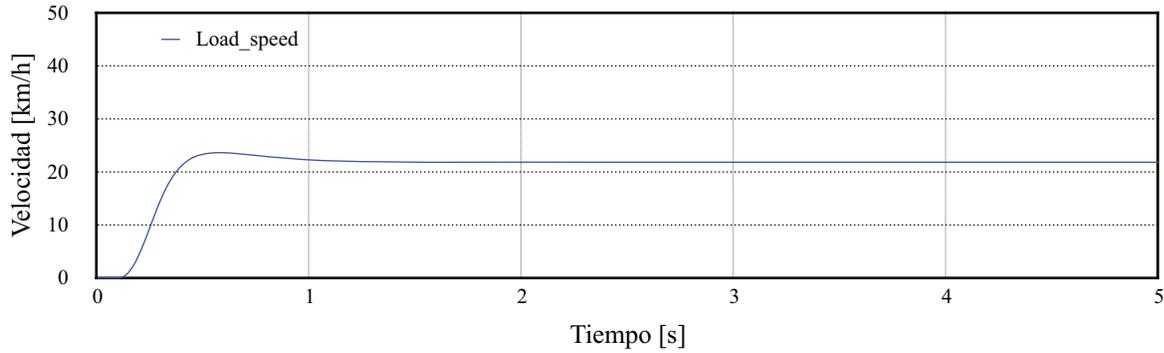
La [Gráfica 5.13](#) muestra la velocidad rotacional registrada en el motor y la carga mecánica. Se pueden observar curvas de velocidad muy similares a las mostradas en la [Gráfica 5.8](#).



Gráfica 5.13 Velocidad rotacional registrada durante la simulación del motor, carga mecánica y convertidor de potencia.

La [Gráfica 5.14](#) muestra la curva de velocidad lineal de la carga mecánica estimada a partir de los valores de velocidad rotacional mostrados en la [Gráfica 5.13](#). Posterior al intervalo transitorio, el sistema estabiliza la velocidad en 21.83 kilómetros por hora, al igual que la curva mostrada en la [Gráfica 5.9](#).

5. Simulación



Gráfica 5.14 Velocidad lineal registrada durante la simulación del motor, carga mecánica y convertidor de potencia.

La [Tabla 5.7](#) muestra el resumen de los resultados de la simulación del motor, carga mecánica y convertidor de potencia cuando el sistema alcanza el estado estacionario al finalizar una simulación de 5 segundos.

Tabla 5.7 Resumen de resultados de simulación del motor, carga mecánica y convertidor de potencia.

Nomenclatura	Parámetro	Valor	Unidad
T_comp	Tiempo de cómputo	2	s
V_motor	Voltaje en el motor	36	V
FEM_arm	Voltaje en la armadura	34.14	V
I_motor	Corriente en el motor	57.85	A
Tor_motor	Torque en el motor	4.8	Nm
Tor_load	Torque en la carga mecánica	60	Nm
RPM_motor	Velocidad rotacional en motor	3364.08	rpm
RPM_load	Velocidad rotacional de la carga mecánica	269.12	rpm
S_load	Velocidad lineal de la carga mecánica	21.83	km/h

Los resultados mostrados en la [Tabla 5.7](#) coinciden con los mostrados en la [Tabla 5.5](#) correspondientes a la simulación del motor y carga mecánica en condiciones nominales de operación sin implementar el convertidor de potencia.

5.2.1.4. Simulación de baterías

La Figura 5.4 muestra el circuito empleado para la simulación de la batería tipo ácido-plomo. El sistema está compuesto por un circuito eléctrico principal y tres circuitos que constituyen las ecuaciones que modelan la descarga de la batería.

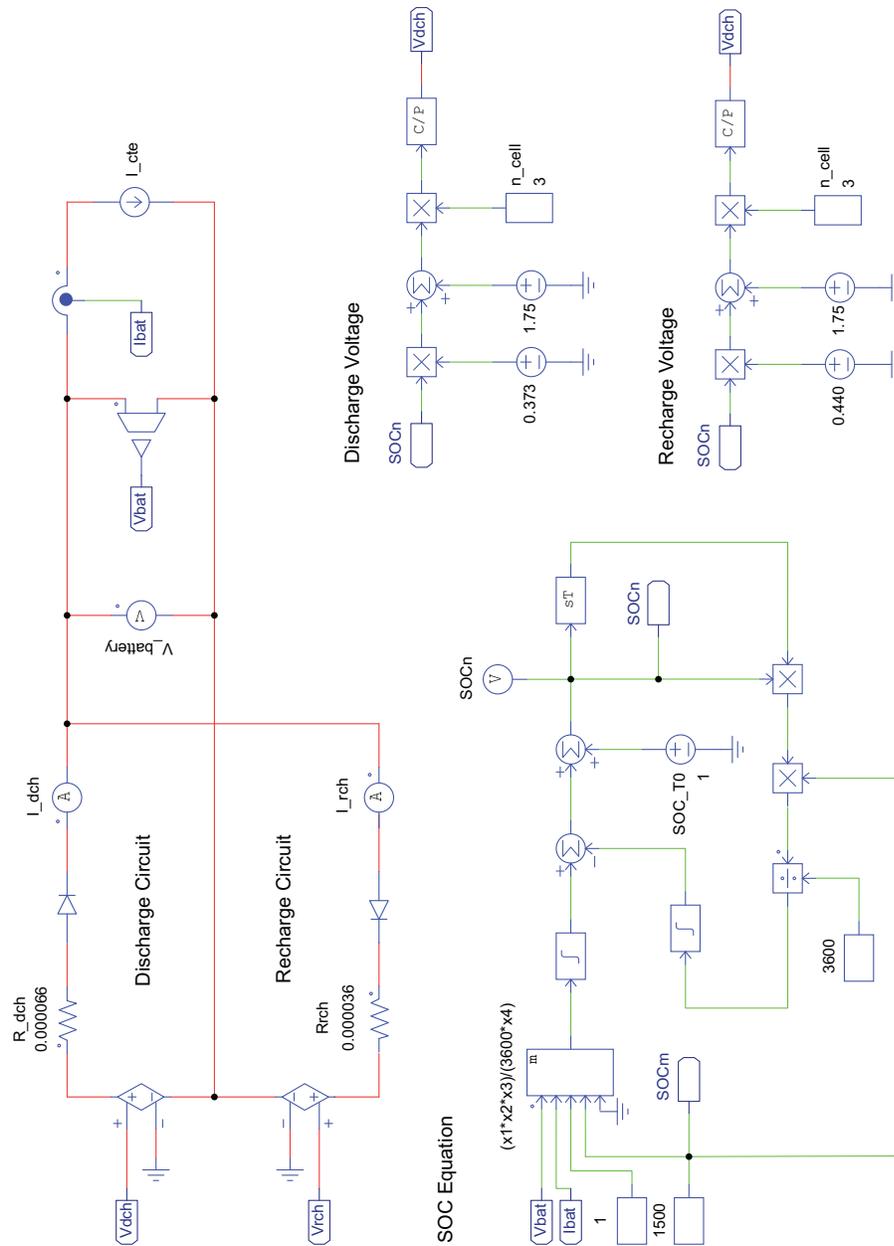


Figura 5.4 Circuito empleado para la simulación de la batería.

El circuito eléctrico principal está compuesto por una fuente de voltaje controlada conectada en serie con un elemento resistivo para emular los efectos de resistencia interna y con una fuente CD para emular el flujo de corriente en las terminales de la batería.

El modelo propuesto puede simular los procesos de recarga y descarga de la batería dependiendo de la dirección de la corriente en la fuente CD, y está basado en un circuito que modela una batería ácido-plomo genérica [61]. Para simular la recarga, la fuente CD debe ser conectada de modo que el signo de la corriente en terminales sea positivo. Para simular la descarga, la polaridad de la fuente CD debe ser invertida, de modo que el signo de la corriente sea negativo.

La magnitud y signo de la corriente son registrados mediante un sensor de corriente conectado en serie con la fuente CD. Un sensor de voltaje registra la tensión entre las terminales del circuito. Los valores de corriente y voltaje son necesarios para poder realizar los cálculos de estado de carga en la batería y simular su comportamiento dinámico.

Empleado módulos y operadores matemáticos, es posible modelar las ecuaciones que controlan el comportamiento de la fuente de voltaje. Cuando el sensor de corriente registra valores positivos, se activa el circuito que corresponde a la ecuación de voltaje de recarga, calculando un valor de tensión en la fuente de voltaje controlada correspondiente a la malla de recarga. Cuando los valores de corriente registrados tienen signo negativo, se activa el circuito que calcula el voltaje de descarga.

Los valores de voltaje de recarga y descarga son una función del estado de carga SOC. El circuito que modela la ecuación del estado de carga funciona de la siguiente forma:

1. Se establecen valores iniciales de operación de la batería.
2. Empleando la magnitud y signo de la corriente registrada en terminales, se calcula el estado de carga inicial para un intervalo de tiempo (E.g. un segundo).
3. Empleando el valor del estado de carga inicial se calcula un valor inicial de voltaje de recarga o descarga.
4. Empleando el valor de voltaje inicial y un valor de corriente para un nuevo intervalo de tiempo, se calcula un estado de carga actualizado.
5. Se repiten los pasos 3 y 4 durante el tiempo que dura la simulación.

Los valores empleados para simular el proceso de descarga de la batería se muestran en la [Tabla 5.8](#). El tiempo máximo elegido para la simulación fue de 100 horas (360000 segundos), el cual corresponde a la mayor cantidad de horas de operación referidas por el fabricante en la hoja de especificaciones técnicas. Debido a que los efectos en el régimen transitorio no son de interés para un análisis inicial del modelo básico, la variable de tiempo fue establecida en segundos.

Se estableció un estado de carga inicial del 100% para indicar que la batería se encuentra totalmente cargada. La energía máxima que puede ser entregada por la batería en un tiempo de operación de 100 horas especificada por el fabricante es de 1500 Wh. Para fines demostrativos, se asumió una eficiencia de carga/descarga del 100%

Tabla 5.8 Parámetros de simulación del convertidor de potencia y el control de velocidad.

	Parámetro	Valor	Unidad
Simulation Control			
	Time step	1	s
	Total time	360000	s
	Print time	0	—
	Print step	1000	—
SOC Equation			
	SOC	100	%
	Energy	1500	Wh
	Charge/Discharge Efficiency	100	%
Discharge Voltage			
	Number of cells	3	—
	Cell open voltage	2.1	V
	Discharge resistance	0.000011	Ω

En la hoja de datos se especifica que una batería esta conformada por 3 celdas conectadas en serie, cada una con un aproximado de 2.1 V de voltaje a circuito abierto, lo que daría un voltaje en terminales de 6.3 V. En la realidad, el valor de dicho voltaje depende de múltiples factores intrínsecos y extrínsecos (ciclos de carga/descarga, estado del electrolito, temperatura, etc). Los resultados presentados en la sección [4.1.1. Verificación de voltaje en terminales y estado de carga en baterías](#) muestran que el voltaje en terminales es un promedio de 6.37 V, dato que sirvió para ajustar los valores empleados para modelar las ecuaciones de recarga y descarga.

5. Simulación

Para mostrar el desempeño del modelo, se ejecutaron cuatro simulaciones de descarga con la finalidad de observar el comportamiento de los parámetros de potencia para distintos perfiles de demanda.

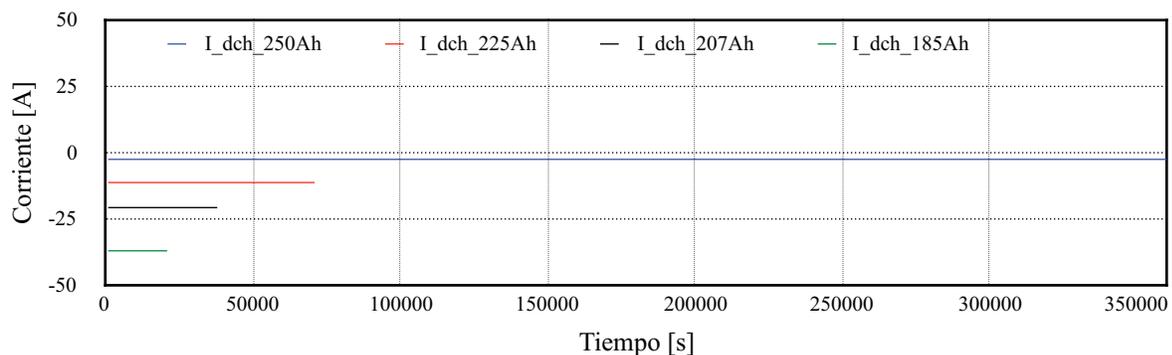
En la [Tabla 5.9](#) se muestran los datos capacidad proporcionados por el fabricante que sirvieron de referencia para la simulación del modelo de la batería. Se puede observar que la capacidad de la batería depende del valor de corriente que circule por sus terminales y que a mayor corriente se reduce la capacidad.

Tabla 5.9 Parámetros de desempeño de una batería ácido plomo tomados como referencia de la hoja de datos técnicos proporcionada por el fabricante [84].

Capacidad	Duración	Corriente	Voltaje nominal	Energía
185 Ah	5 h (18000 s)	37 A	6 V	1110 Wh
207 Ah	10 h (36000 s)	20.7 A	6 V	1242 Wh
225 Ah	20 h (72000 s)	11.25 A	6 V	1350 Wh
250 Ah	100 h (360000 s)	2.5 A	6V	1500 Wh

El tiempo necesario para descargar la batería o duración depende de la capacidad. En el [Anexo K](#) se presenta la curva de desempeño en la que se muestra que la duración de la batería se reduce de forma drástica para valores de corriente mayores a 40 A.

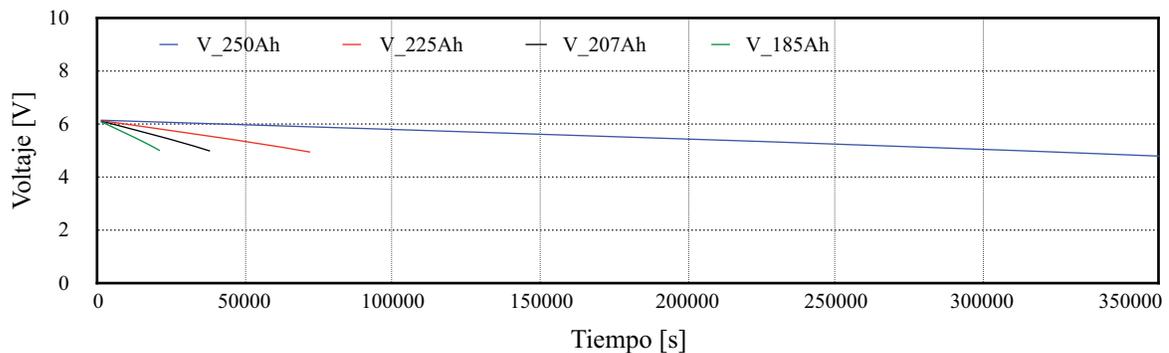
Por lo tanto, para un valor de voltaje nominal, la energía que la batería puede proporcionar disminuye conforme aumenta el valor de potencia.



Gráfica 5.15 Valores de corriente constante para distintos perfiles de capacidad empleados en la simulación del proceso de descarga en el circuito de la batería.

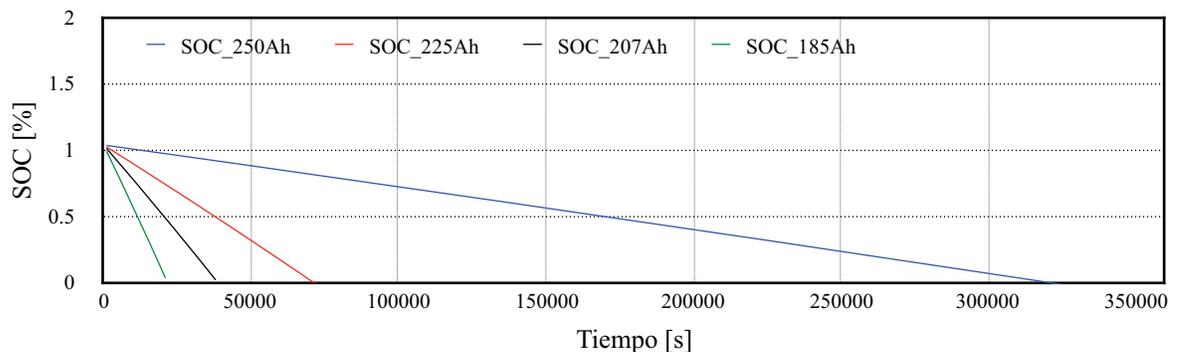
La **Gráfica 5.15** muestra los valores de corriente constante asignados a la fuente CD para simular la descarga de la batería con perfiles de capacidad de 185 Ah, 207 Ah, 225 Ah y 250 Ah.

La simulación empleando una fuente de corriente constante permite observar las curvas de descarga mostrada en las **Gráfica 5.16**. Las curvas describen como el voltaje disminuye dependiendo del perfil de capacidad aplicado conforme transcurre el tiempo de simulación.



Gráfica 5.16 Valores de voltaje en terminales para distintos perfiles de capacidad empleados en la simulación del proceso de descarga en el circuito de la batería.

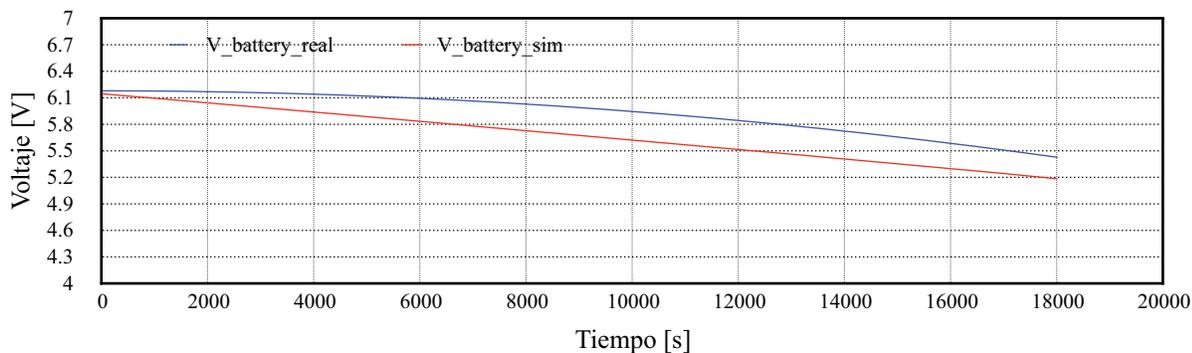
La **Gráfica 5.17** muestra las curvas de estado de carga, en donde se puede observar el efecto de reducción de voltaje mostrado en la **Gráfica 5.16**, pero expresado en un valor porcentual.



Gráfica 5.17 Curvas de estado de carga para distintos perfiles de capacidad empleados en la simulación del proceso de descarga en el circuito de la batería.

El valor del 100% del estado de carga corresponde al voltaje medido en terminales, mientras que el 0% corresponde a valores por debajo de los 5.57 V, según las especificaciones del fabricante.

La [Gráfica 5.18](#) muestra una comparación entre la curva de descarga obtenida mediante pruebas en laboratorio mostrada en la sección [4.3.3. Determinación de curva de descarga y resistencia interna](#), y la curva obtenida mediante la simulación del modelo de la batería mostrada en la [Gráfica 5.16](#). Ambas curvas muestran el proceso de descarga de la batería para un perfil de capacidad de 185 Ah. La diferencia entre los valores de descarga final es cercana a 0.24 V, debido a que la batería simulada se descarga con mayor velocidad.



Gráfica 5.18 Comparación de las curvas de descarga obtenidas en las pruebas de laboratorio y simulación.

5.2.1.5. Simulación de la carga mecánica

En la sección [5.2.1.2. Simulación de motor y caja de engranes](#) se empleó una carga mecánica con una constante de torque de 60 Nm para evaluar el desempeño del motor en condiciones de operación nominal. Sin embargo, en una carga mecánica que emule un vehículo en movimiento, el valor de torque varía en función de la velocidad del vehículo.

La [Figura 5.5](#) muestra el circuito empleado para la simulación del modelo básico de la carga mecánica para evaluar el comportamiento de un vehículo ligero en estado dinámico. Las ecuaciones para determinar la fuerza de tracción fueron implementadas mediante bloques matemáticos y están contenidas en subcircuitos para mantener organizado el esquema.

El circuito calcula el torque que debe aplicarse a la carga mecánica cuando varían las condiciones de velocidad y el ángulo de inclinación del camino. Para evaluar el desempeño de la carga mecánica, se implementaron perfiles de velocidad e inclinación variable en formato Excel mediante elementos de PSIM denominados *Lookup Table* y *Time Source*.

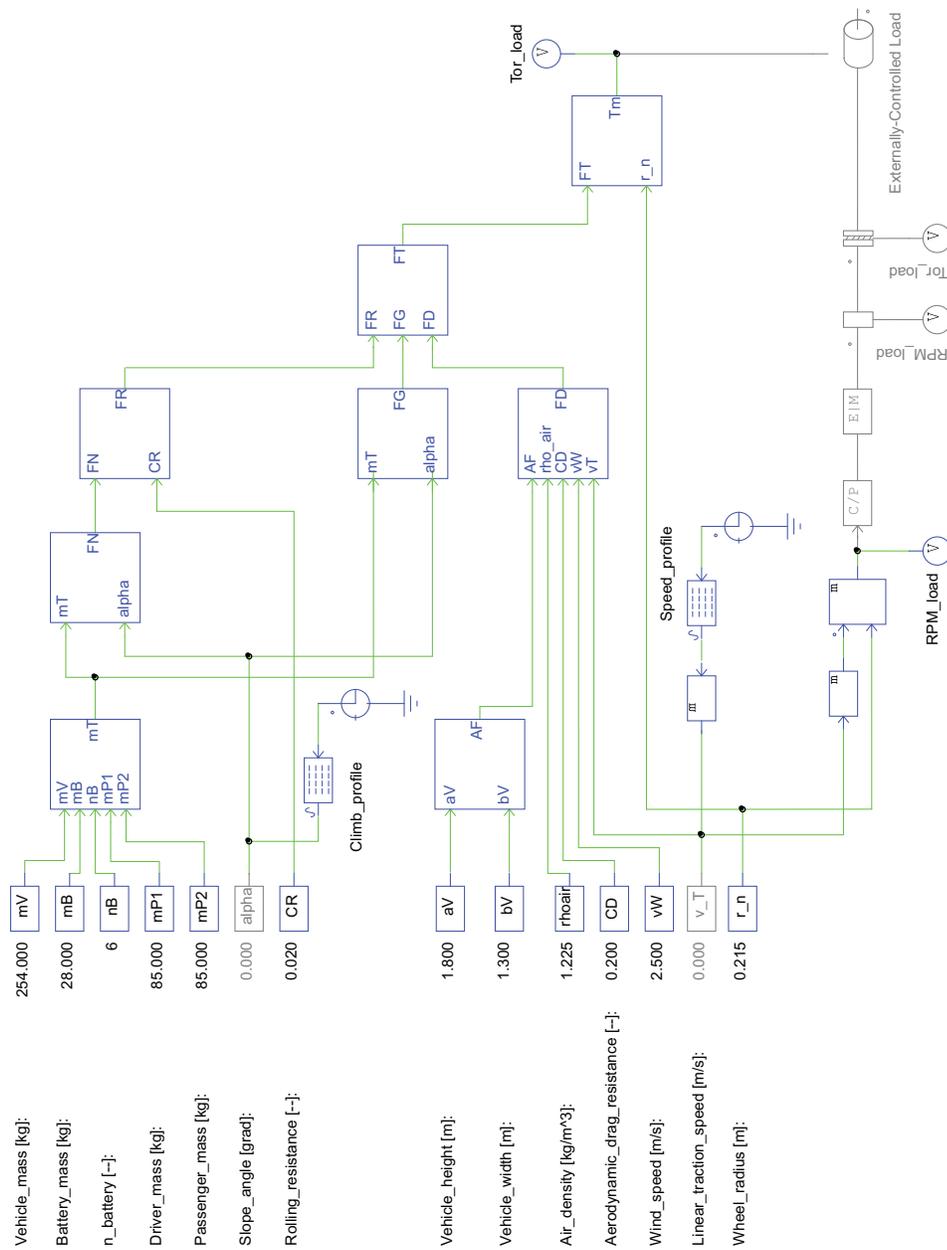


Figura 5.5 Circuito empleado para la simulación de la carga mecánica.

La Tabla 5.10 muestra los parámetros de simulación de la carga mecánica para determinar el valor de torque cuando varían las condiciones de velocidad y ángulo de inclinación. La variable de tiempo fue establecida en 1 segundo debido a no se esperan cambios en estado transitorio. El tiempo total de la simulación corresponde a 25 segundos el cual corresponde a un rango de tiempo para mostrar un valor de torque por segundo cuando se varía la velocidad desde 0 km/h hasta la velocidad máxima de 21 km/h.

Los valores de masa y dimensiones para el vehículo y las baterías fueron tomados del manual de usuario y hoja de especificaciones técnicas respectivamente. Los valores de masa del conductor y pasajeros corresponden a los valores aproximados de los dos pasajeros que realizaron las pruebas. El coeficiente de resistencia a la rodadura corresponde cuando los neumáticos circulan en concreto o asfalto.

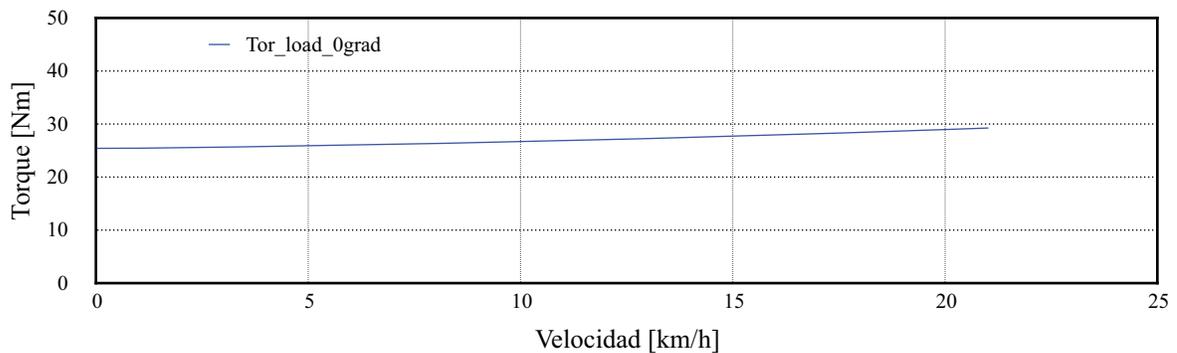
Para mostrar los efectos de la variación del ángulo de inclinación respecto a la superficie del camino, se eligió un rango de 0 a 20 grados, correspondiente a la inclinación máxima que es capaz de escalar el carro de golf, según datos del fabricante.

El coeficiente de arrastre aerodinámico corresponde a valores de referencia para vehículos eléctricos ligeros y vehículos de tipo turístico. La velocidad del viento fue tomada como referencia para la ciudad de Cuernavaca. El radio de los neumáticos del eje de tracción fue medido de forma directa, para una presión de inflado de 20 psi.

Tabla 5.10 Parámetros de simulación de la carga mecánica.

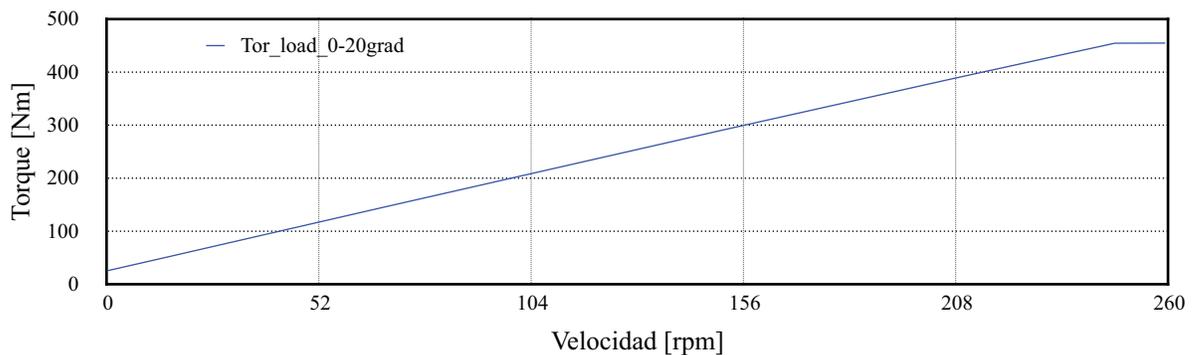
	Parámetro	Valor	Unidad
Simulation Control			
	Time step	1	s
	Total time	25	s
	Print time	0	—
	Print step	1	—
Mechanical Forces			
	Vehicle mass [82]	254	kg
	Battery mass [84]	28	kg
	Number of batteries [82]	6	—
	Driver mass	85	kg
	Passenger mass	85	kg
	Slope angle [82]	0-20	grad
	Gravity	9.81	m/s ²
	Rolling resistance [4, 49]	0.02	—
Aerodynamic Forces			
	Vehicle height [82]	1.8	m
	Vehicle width [82]	1.3	m
	Air density	1.225	kg/m ³
	Aerodynamic drag resistance [39, 85]	0.2	—
	Wind speed [86]	≈ 2.5	m/s
	Linear speed	0-21	km/h
	Wheel radius	0.215	m

Para mostrar el desempeño del modelo de carga mecánica, se hizo variar la velocidad de 0 a 21 km/h (que corresponde a la velocidad máxima cuando la caja de engranes tiene una relación de 12.5:1). La [Gráfica 5.19](#) muestra los valores de torque cuando se varía la velocidad desde el reposo hasta 21 km/h, emulando la operación del vehículo sobre una superficie plana. Se puede observar que hay un valor mínimo de 25.55 Nm necesario para mover la carga mecánica. El torque aumenta principalmente por los efectos del arrastre aerodinámico.



Gráfica 5.19 Torque necesario para mover la carga mecánica a distintos valores de velocidad constante en el eje de tracción en una superficie plana.

La [Gráfica 5.20](#) muestra el efecto de aumentar de forma simultánea la velocidad rotacional en el eje de tracción y el ángulo de inclinación máximos. El modelo estima que para llevar la carga mecánica a 259 rpm en una pendiente con un ángulo de inclinación de 20 grados, es necesario aplicar 454.798 Nm a la carga mecánica.



Gráfica 5.20 Aumento de torque debido a los efectos de la inclinación del camino.

Es importante mencionar que el modelo de carga mecánica no considera efectos de fricción en el eje de tracción ni en el acoplamiento mecánico.

5.2.2. Simulación del sistema completo

La simulación del sistema completo del vehículo se puede describir como el resultado de la modelación, simulación, verificación, simplificación e integración de cada uno de los subsistemas.

La [Figura R.1](#) presentada en el [Anexo R](#) muestra la versión final del circuito completo empleado en la simulación del tren de potencia del vehículo eléctrico ligero. Los elementos, subcircuitos y conexiones están ordenados en la dirección que fluye la potencia, y se agrupan en seis sistemas:

1. Suministro de potencia (power supply system)
2. Convertidor de potencia (power conversion system)
3. Control de velocidad (speed control system)
4. Sistema mecánico (mechanical system)
5. Acoplamiento mecánico (transmission system)
6. Eje de tracción (traction system)

El sistema encargado del suministro de potencia lo conforman un banco de baterías, medidores de voltaje y corriente, y un medidor del estado de carga. El banco de baterías esta conformado por un arreglo de seis subcircuitos de baterías de ácido plomo idénticos conectados en serie.

El sistema del convertidor de potencia esta conformado por el subcircuito del convertidor de potencia. Las terminales positiva y negativa de las baterías se conectan con el convertidor de potencia mediante un bus de 36 volts.

El sistema de control de velocidad esta conformado por un elemento potenciómetro, el cual emula la función del pedal acelerador cuando se varía porcentualmente su valor de resistencia. Dicho potenciómetro es una manera alternativa de imponer un voltaje de control, sin embargo, es poco efectiva cuando se requiere operar el sistema de acuerdo a un perfil de velocidad variable. Para simular ciclos de manejo, se emplean archivos de datos que exportan los valores de velocidad de un formato Excel para imponer voltajes de control dinámicos.

El sistema de control es la clave para simular el comportamiento del sistema en un ciclo de manejo. Dado que el sistema emula la función de un pedal acelerador, el valor de velocidad para un instante dado será traducido en una señal de voltaje de control, que servirá en el subcircuito del convertidor de potencia para indicar el ciclo de trabajo al interruptor que permite el flujo de corriente entre el sistema de suministro de potencia y el sistema mecánico.

El sistema mecánico está conformado por el motor eléctrico y los medidores de voltaje y corriente. Las terminales positiva y negativa están conectadas al convertidor de potencia.

El sistema de acoplamiento mecánico consiste en los sensores de velocidad y torque en el motor, la caja de engranes, y los sensores de velocidad y torque en la carga mecánica. El sensor de velocidad tiene un módulo matemático que permite hacer la conversión de rpm a rad/s y registrar los valores de velocidad angular necesarios para hacer el cálculo de potencia en el rotor el motor. El diferencial mecánico permite variar la relación de velocidades, la cual debe ser cambiada para alcanzar la velocidad máxima para cada ciclo de manejo.

El sistema del eje de tracción está compuesto por el subcircuito de la carga mecánica. Está acoplado mediante una conexión mecánica a la caja de engranes. El sensor de velocidad en la carga mecánica tiene modelos matemáticos que permiten hacer la conversión de rpm a rad/s para que puedan ser realizados los cálculos de fuerza de tracción en el subcircuito de la carga mecánica.

5.2.2.1. Subcircuito de la batería ácido plomo

La [Figura R.2](#) presentada en el [Anexo R](#) muestra el subcircuito de la batería de ácido-plomo empleado en la simulación del tren de potencia del vehículo eléctrico ligero.

Al igual que el diagrama mostrado en la [Figura 5.4](#), el sistema se compone por un circuito equivalente principal que permite la emulación del proceso de descarga y las ecuaciones que modelan el comportamiento dinámico de la batería. El subcircuito se conecta con el circuito principal mediante los puertos bidireccionales en las terminales positiva y negativa. Un puerto de salida permite medir el estado de carga de la batería desde el circuito principal.

5.2.2.2. Subcircuito del convertidor de potencia

La [Figura R.3](#) presentada en el [Anexo R](#) muestra el subcircuito del convertidor de potencia empleado en la simulación.

Al igual que el diagrama mostrado en la [Figura 5.3](#), el sistema se compone de un circuito equivalente a la topología del convertidor reductor *DC/DC chopper* con dos etapas de filtrado y un circuito de control correspondiente al generador de la señal PWM.

El subcircuito se conecta con el circuito principal mediante los puertos bidireccionales en la terminales positiva y negativa. La corriente fluye de izquierda a derecha, proveniente del bus de 36 volts.

El circuito de control se comunica con el potenciómetro mediante los tres puertos bidireccionales, que en el modo de control manual, varían el flujo de una fuente CD para imponer un valor de voltaje de control y ser comparado con la señal PWM. Este circuito se deshabilita cuando se ejecutan simulaciones de ciclos de manejo.

5.2.2.3. Subcircuito de la carga mecánica

La [Figura R.4](#) presentada en el [Anexo R](#) muestra el subcircuito que modela la carga mecánica.

Al igual que el diagrama mostrado en la [Figura 5.5](#), el sistema se compone por los parámetros y ecuaciones necesarios para estimar el valor de torque necesario para mover el vehículo. El circuito emplea un puerto de entrada para conectarse con el sensor de velocidad y poder realizar los cálculos de fuerza de arrastre aerodinámico. La velocidad lineal en km/h es convertida a m/s empleando un módulo matemático.

La carga es conectada al circuito principal mediante dos puertos bidireccionales. El puerto de entrada permite conectar la carga con el circuito de acoplamiento mecánico y el puerto de salida posibilita la conexión de más cargas en serie u otros elementos mecánicos.

5.3. Resultados de simulación del sistema completo

Para verificar el modelo básico en estado dinámico y mostrar el desempeño del sistema completo implementado en PSIM, se ejecutó la simulación de los datos de velocidad medidos en el eje de tracción en el intervalo de operación en el que el vehículo circuló en un camino plano de asfalto uniforme durante las pruebas mostradas en la sección 4.3.3.1. [Resultados parciales del segundo recorrido \(tramos de velocidad constante\)](#).

Los pasos para ejecutar la simulación fueron:

1. Generar un archivo de ciclo de manejo partir de los datos de velocidad (*INEEL_drive_cycle*).
2. Indicar en el sistema de control de velocidad la ubicación del archivo de ciclo de manejo y los parámetros de simulación (tiempo y velocidad).
3. Establecer el valor máximo del generador PWM en el convertidor a partir de los valores de velocidad máxima del ciclo.
4. Establecer los parámetros de control de simulación (variable de tiempo, tiempo total e intervalo de registro de datos).
5. Verificar los parámetros de simulación correspondientes a cada subsistema.
6. Ejecutar la simulación.
7. Graficar los valores obtenidos.

Los parámetros de simulación del sistema completo consisten en los parámetros de cada subsistema mostrados en las tablas 5.2, 5.4, 5.6, 5.8, y 5.10.

Los parámetros de control de simulación se muestran en la [Tabla 5.11](#). Se estableció una variable de tiempo de 0.0001 segundos correspondiente al tiempo mínimo para simular la frecuencia de 1000 Hz.

Se añadieron valores de resistencia al transistor MOSFET para emular las pérdidas en el convertidor. También se añadieron cargas mecánicas resistivas con constantes de torque para emular las pérdidas por fricción en el rotor del motor y el eje de tracción.

Los valores de momento de inercia correspondientes al motor y a la carga mecánica en el eje de tracción se ajustaron de acuerdo a los valores calculados en el [Anexo H](#).

La amplitud de la señal PWM fue ajustada al valor máximo de la velocidad alcanzada cuando la relación de velocidades en la caja de engranes es de 12.5:1.

Tabla 5.11 Parámetros de simulación del sistema completo.

	Parámetro	Valor	Unidad
Simulation Control			
	Time step	0.0001	s
	Total time	267	s
	Print time	0	—
	Print step	10000	—
MOSFET			
	On Resistance	0.08	Ω
Sawtooth (PWM generator)			
	V _{peak}	21.398	V
	Frequency	1000	Hz
DC Machine			
	Moment of Inertia	0.0079	kg·m ²
Motor Friction Losses			
	T _c	1	Nm
	K ₁	0.01	—
	Moment of Inertia	0.0001	kg·m ²
Gear Box			
	Gear Ratio	12.5	—
	Shaft 1 master/slave flag	1	—
	Shaft 2 master/slave flag	0	—
Drive Axle Friction Losses			
	T _c	1	Nm
	K ₂	0.01	—
	Moment of Inertia	1	kg·m ²
Mechanical Load			
	Speed Flag	0	—
	Moment of Inertia	9.08	kg·m ²

La [Gráfica 5.21](#) muestra la comparación de los datos de velocidad correspondientes a las mediciones en el vehículo durante las pruebas y los valores de velocidad obtenidos mediante la simulación del sistema completo.

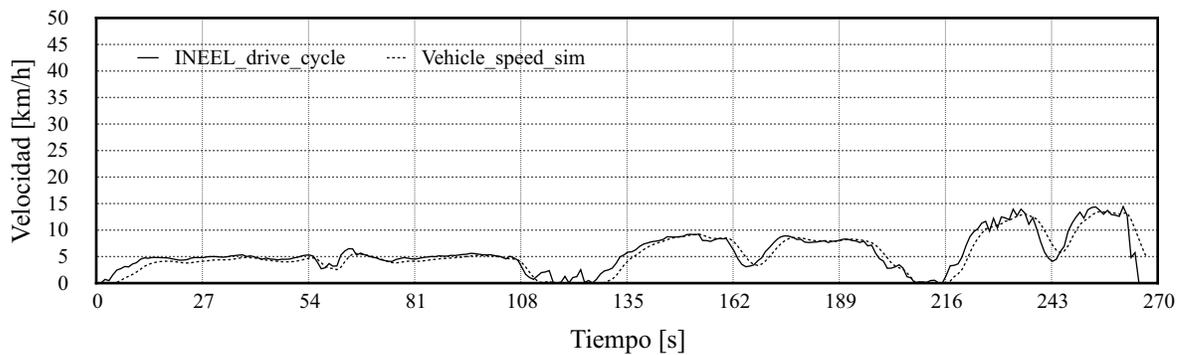
El circuito de control en el convertidor de potencia traduce los valores de velocidad del ciclo de manejo en valores de voltaje control, para compararlos con la señal PWM y así

generar el ciclo de trabajo que gobierna el interruptor MOSFET. Los datos de velocidad simulada son registrados por el sensor de rpm y convertidos valores de velocidad lineal.

De esta manera el ciclo de manejo emula la velocidad deseada por el conductor en el momento de pisar el pedal acelerador, mientras que los datos de velocidad simulados emulan la velocidad de respuesta del vehículo medida en los neumáticos del eje de tracción.

5.3.1. Velocidad lineal, distancia y aceleración

En la [Gráfica 5.21](#) se pueden observar los tres recorridos cortos o *micro-trips* a velocidades aproximadas de 5, 10 y 15 km/h.

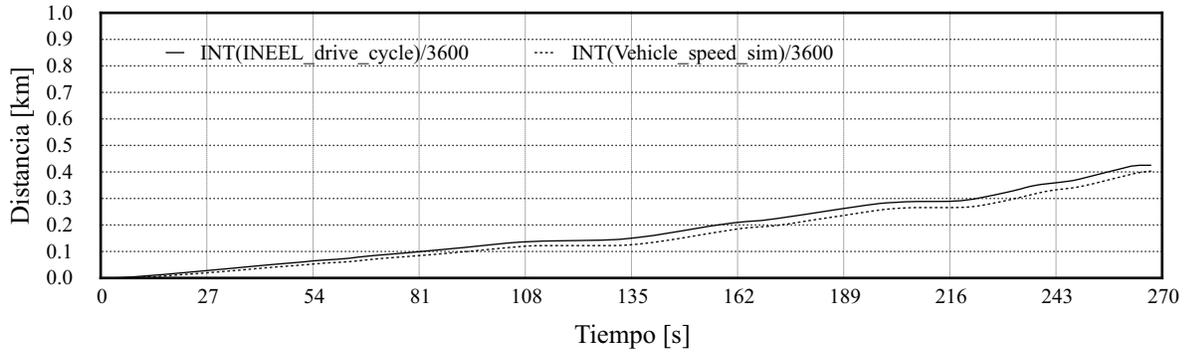


Gráfica 5.21 Comparación de los datos de velocidad del vehículo medidos en pruebas y los valores obtenidos en la simulación.

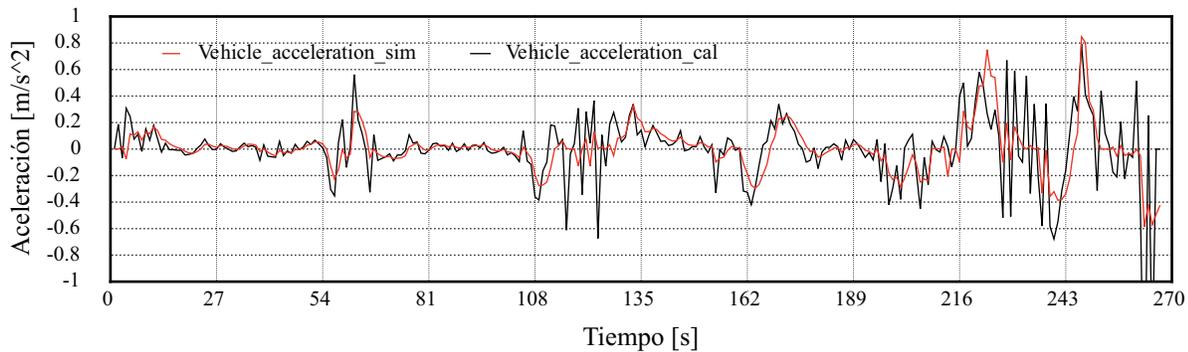
Los valores registrados en la simulación en el primer recorrido se ajustan al comportamiento de los datos reales. Existe un desfase entre ambas curvas debido a los efectos del momento de inercia.

La [Gráfica 5.22](#) muestra la distancia calculada a partir de los datos reales de velocidad y los valores obtenidos en la simulación. La distancia total recorrida por el vehículo durante la prueba fue de 0.425 km/h, mientras que la obtenida mediante simulación fue de 0.404 km/h.

La [Gráfica 5.23](#) muestra la comparación de los valores de aceleración instantánea calculados a partir de los datos velocidad y los obtenidos en la simulación. Se puede observar que para el rango de -0.6 a 0.8 m/s^2 ambas gráficas coinciden.



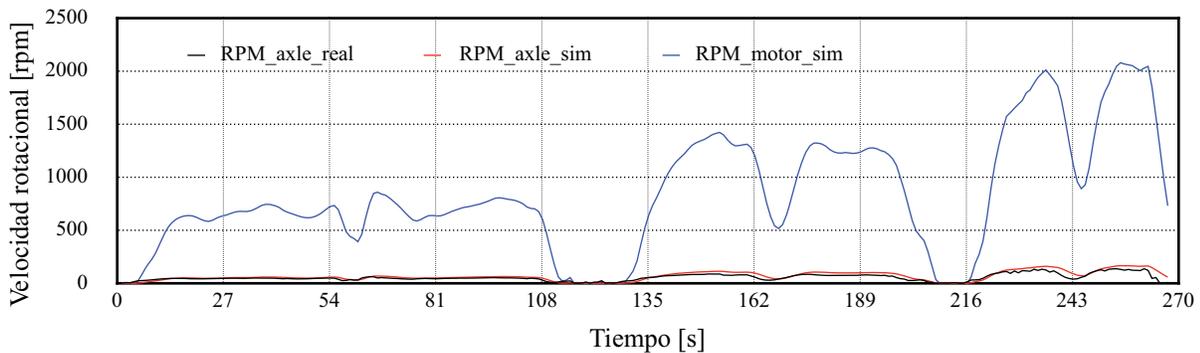
Gráfica 5.22 Distancia calculada a partir de los datos de velocidad obtenidos en la simulación.



Gráfica 5.23 Valores de aceleración instantánea calculados y los obtenidos en la simulación.

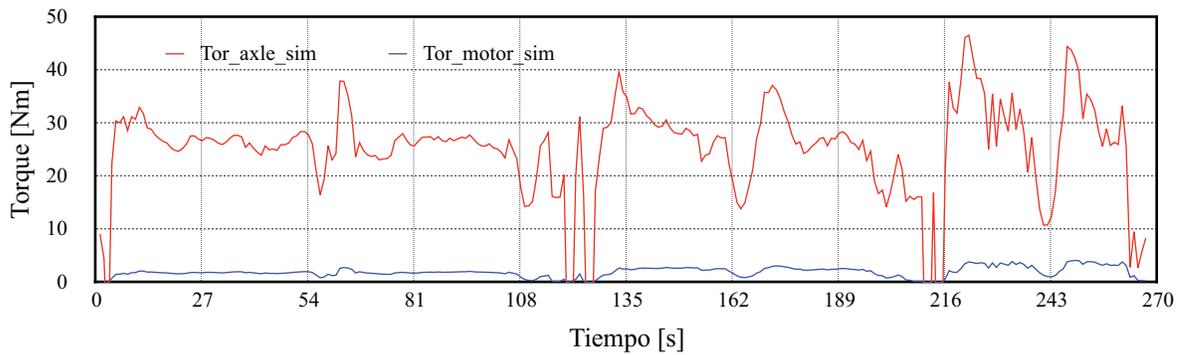
5.3.2. Velocidad rotacional y torque

La [Gráfica 5.24](#) muestra la comparación de los datos de velocidad rotacional en el vehículo y en el motor. La línea roja continua muestra las rpm reales en el eje de tracción, mientras que la línea punteada muestra las rpm obtenidas en la simulación. Los valores de rpm muestran que el motor podría alcanzar hasta 2000 rpm.



Gráfica 5.24 Comparación de valores de velocidad rotacional en el motor y eje de tracción.

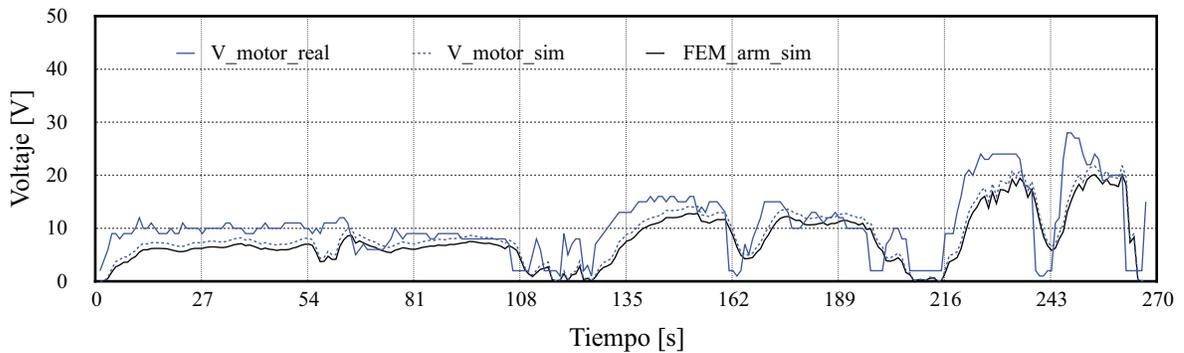
La [Gráfica 5.25](#) muestra los valores de torque en el motor y eje de tracción registrados en el sensor de torque durante la simulación. Es posible observar que el torque en el eje de tracción es 12.5 veces mayor que en el rotor del motor, lo cual corresponde a la relación de la caja de engranes. En la sección 4.4.3. [Modelo orientado hacia adelante \(forward-facing model\)](#) se presenta en la [Gráfica 4.23](#) los resultados de torque calculados a partir de los datos de velocidad. Se puede observar que el patrón de comportamiento es similar, salvo por el hecho de que en los periodos de aceleración, existen picos de toque que alcanzan valores de hasta 120 Nm.



Gráfica 5.25 Torque en el motor y eje de tracción.

5.3.3. Voltaje y corriente

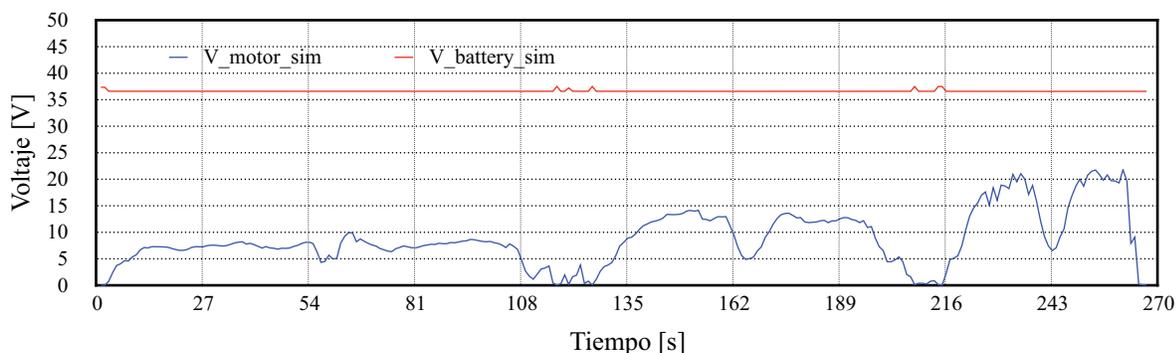
La [Gráfica 5.26](#) muestra la comparación de los datos de voltaje medidos en el motor y los valores obtenidos en la simulación. Se puede observar ambas curvas siguen un patrón y magnitud muy similares, patrón que corresponde con los perfiles de velocidad mostrados en la [Gráfica 5.21](#).



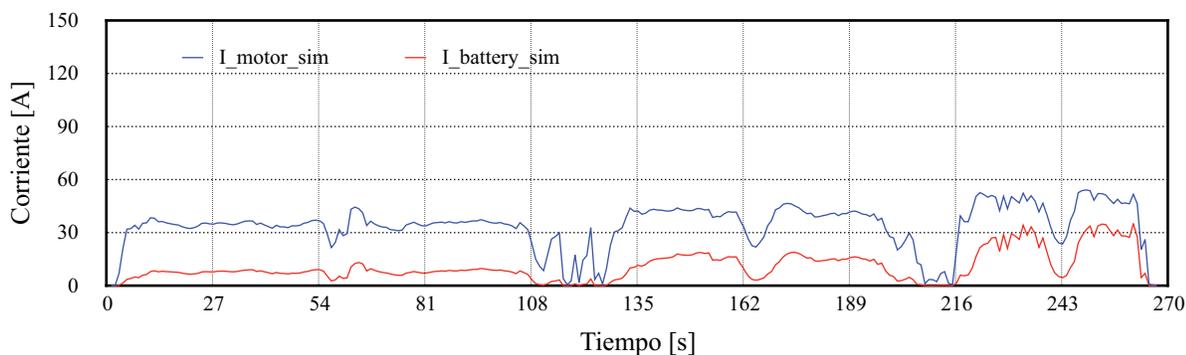
Gráfica 5.26 Comparación de datos de voltaje medido en el motor y valores obtenidos en la simulación.

La [Gráfica 5.27](#) muestra los valores de voltaje en el motor obtenidos durante la simulación. Se puede observar que la tensión inicial en las baterías es de 37.35 V y disminuye para terminar con un valor de 36.57 V. Esto muestra el efecto de la descarga de la batería conforme al mecanismo explicado en la sección [5.2.1.4. Simulación de baterías](#).

La [Gráfica 5.28](#) muestra los valores de corriente en el motor y baterías obtenidos en la simulación. El patrón de comportamiento corresponde a los valores de toque mostrados en la [Gráfica 5.25](#). Se puede observar que la corriente en el motor es 12.5 veces mayor que en la batería, lo cual también es observado en la [Gráfica 4.22](#) mostrada en la sección [4.4.3. Modelo orientado hacia adelante \(forward-facing model\)](#).

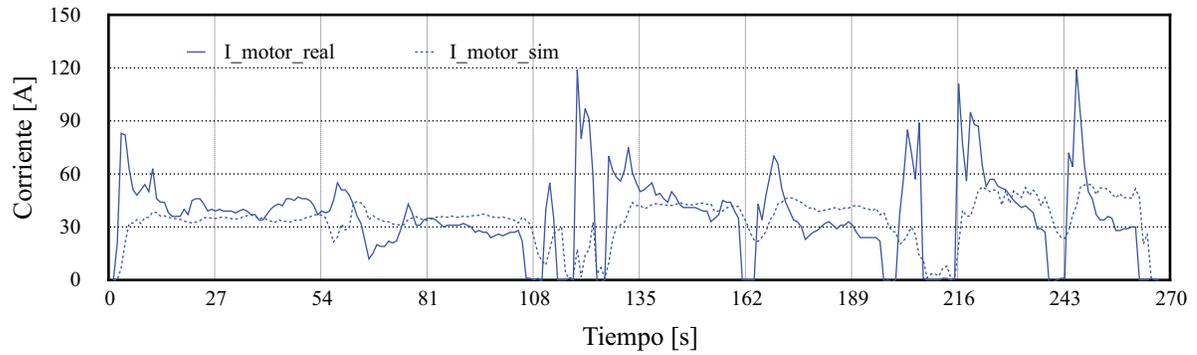


Gráfica 5.27 Valores de voltaje en motor y baterías obtenidos en la simulación.

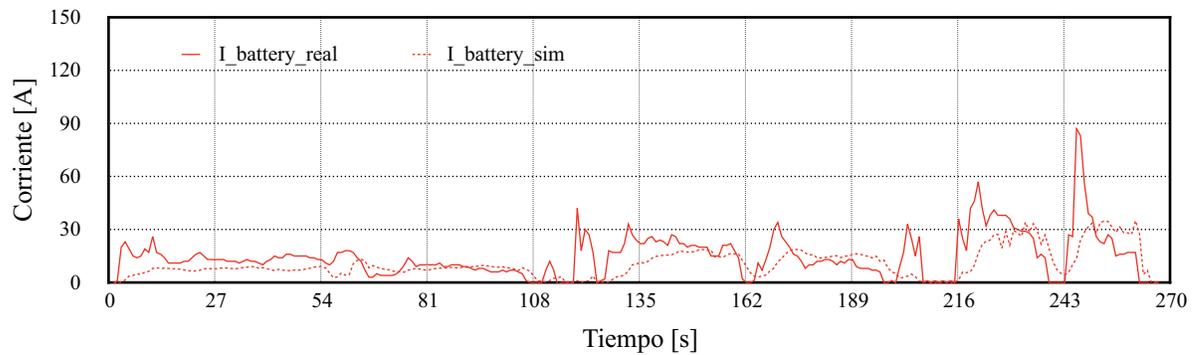


Gráfica 5.28 Valores de corriente en motor y baterías obtenidos en la simulación.

Las [gráficas 5.29 y 5.30](#) muestran la comparación entre los datos reales de corriente en el motor y baterías y los comparan con los datos obtenidos en la simulación. Se puede observar que el patrón de comportamiento de la corriente registrada en la simulación alcanza un máximo de 42.85 A en el motor.



Gráfica 5.29 Comparación entre los datos reales de corriente en el motor y los valores obtenidos en la simulación.



Gráfica 5.30 Comparación de los datos reales de corriente en las baterías y los valores obtenidos en la simulación.

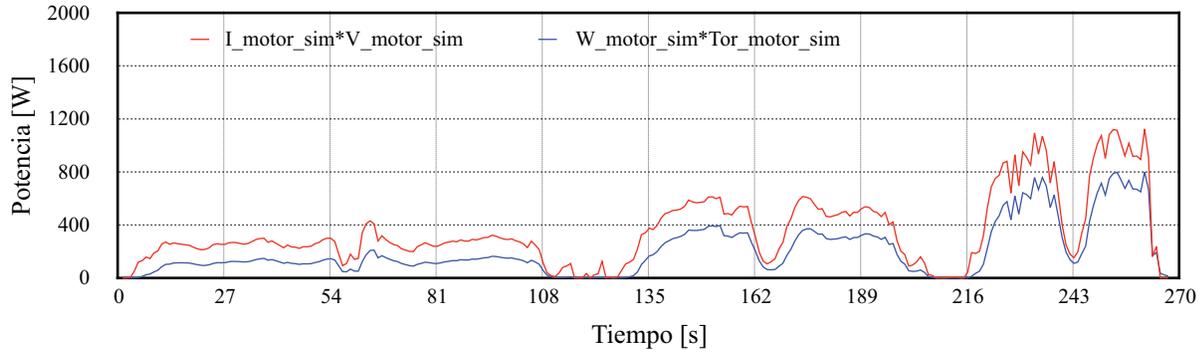
En ambos casos, el modelo no registra los picos de corriente que corresponden a los intervalos de aceleración.

5.3.4. Potencia y energía

La [Gráfica 5.31](#) muestra los valores de potencia eléctrica y mecánica en el motor calculados a partir de valores de corriente, voltaje, torque y velocidad angular registrados durante la simulación.

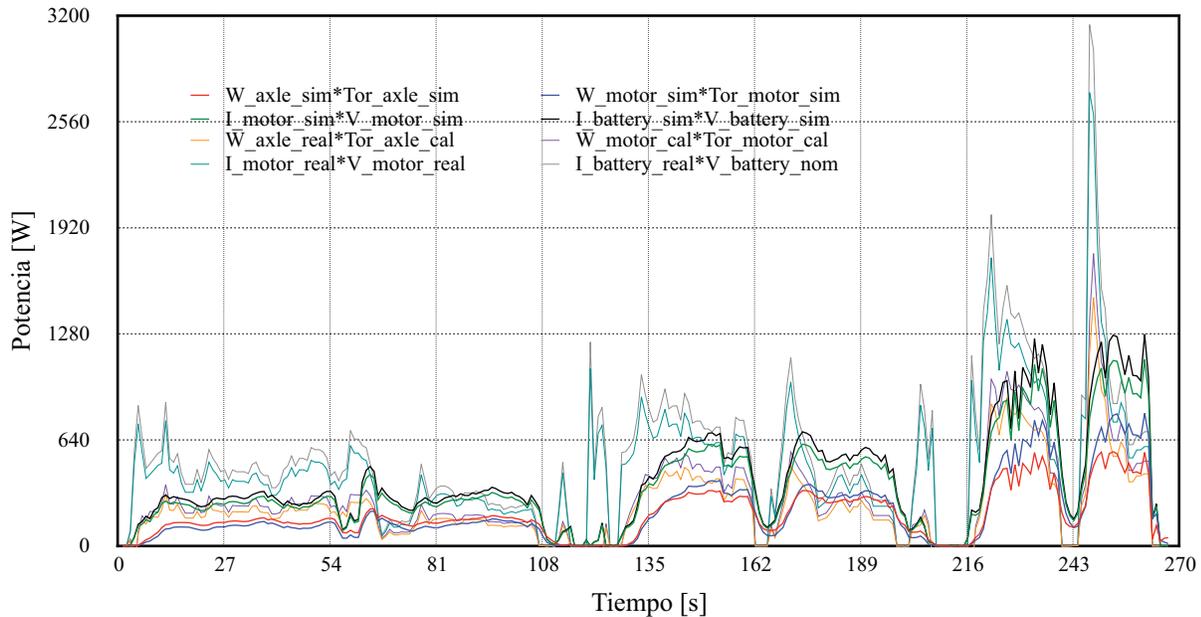
Se puede observar que la potencia máxima alcanzada en terminales es de 1124.18 W al entregar 800.38 W. Esto representa un valor aproximado de 71.19% de eficiencia de conversión en el motor para valores de velocidad altos.

5. Simulación

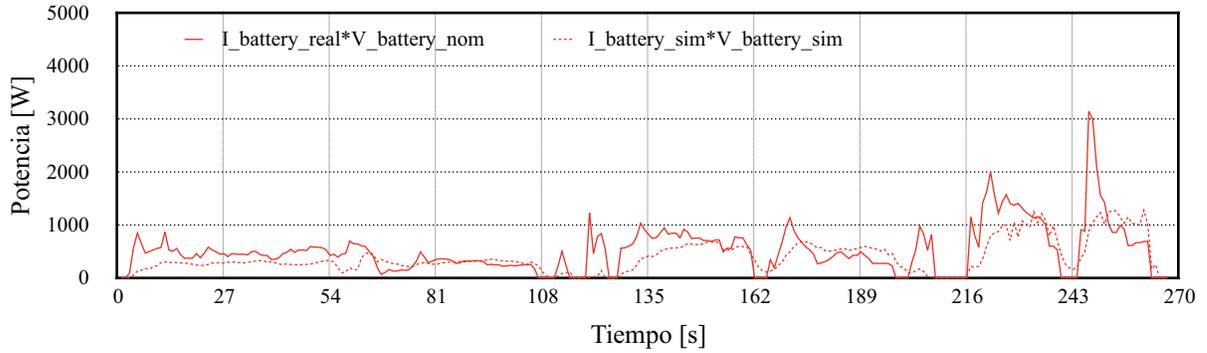


Gráfica 5.31 Potencia eléctrica y mecánica en el motor calculada a partir de los valores obtenidos durante la simulación.

La Gráfica 5.32 muestra la comparación de los valores de potencia calculados a partir de datos reales (Gráfica 4.27) y los valores obtenidos en la simulación. Se puede observar que la diferencia entre los valores de potencia en el eje de tracción, el motor y el eje de tracción se debe a los valores de eficiencia. Durante la simulación no se obtuvieron picos de potencia que corresponden a los intervalos de aceleración.



Gráfica 5.32 Comparación de potencia en baterías, motor y eje de tracción calculados a partir de datos reales y los obtenidos en la simulación.

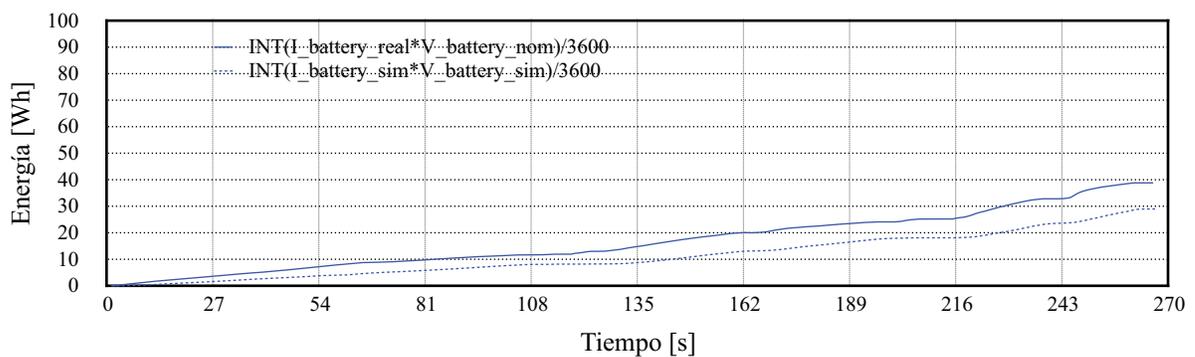


Gráfica 5.33 Potencia en baterías calculada a partir de los valores obtenidos en la simulación.

La [Gráfica 5.34](#) muestra la energía empleada durante la simulación del ciclo de manejo calculada a partir de los datos de potencia mostrados en la [Gráfica 5.33](#). Según el cálculo se requieren cerca de 28.97 Wh para operar el vehículo en las condiciones de velocidad de las pruebas realizadas.

A partir de los datos de potencia real mostrados en la [Gráfica 5.33](#) es posible mostrar que la energía real necesaria en la operación del vehículo se aproxima a 38.81 kWh. La diferencia entre la energía real y la simulada es debida a los picos de potencia en los intervalos de aceleración.

Es posible observar que la energía requerida tiene un valor muy bajo, pues corresponde a un intervalo de tiempo de operación muy corto de 267 segundos (4.45 minutos).



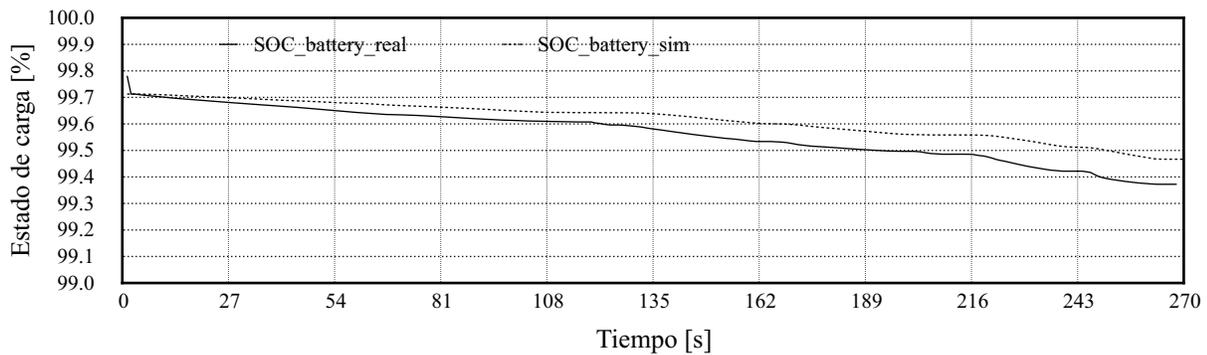
Gráfica 5.34 Comparación de la energía calculada a partir de mediciones de potencia reales y la obtenida al simular el ciclo de manejo.

5.3.5. Descarga de la batería

La [Gráfica 5.35](#) muestra como el estado de carga de las baterías se reduce conforme transcurre la simulación del ciclo de manejo. Es posible observar parte de un estado de carga de 99.72% y desciende hasta 99.46% al finalizar la simulación.

Empleando los datos de corriente medidos en las terminales de las baterías durante las pruebas, es posible implementar un perfil de descarga en el circuito descrito en la sección [5.2.1.4. Simulación de baterías](#) para simular la operación de la batería en condiciones reales. La curva del estado de carga también se muestra en la [Gráfica 5.35](#), en la que se puede ver como las baterías se descargan con mayor velocidad que en la simulación.

Es importante mencionar que los valores de energía consumida y estado de carga constituyen aproximaciones sujetas a los cálculos ejecutados empleando el modelo y parámetros de operación propuestos.



Gráfica 5.35 Estado de carga de las baterías registrado durante la simulación del ciclo de manejo.

5.3.6. Análisis de autonomía

La [Tabla 5.12](#) muestra un resumen de los datos calculados a partir de las mediciones y los resultados obtenidos en la simulación. El tiempo efectivo es el número de segundos en los que el vehículo no se encuentra en reposo y corresponde al tiempo real en el que la batería entrega potencia.

Tabla 5.12 Resultados de la simulación del sistema completo.

	Parámetro	Valor	Unidad
	Tiempo real de cómputo	51	min
Duración de la prueba			
	Segundos	267	s
	Horas	0.074	h
	Tiempo efectivo	267	s
Medición			
	Distancia recorrida	0.425	km
	Velocidad promedio	5.743	km/h
	Energía requerida	38.81	Wh
Estado de carga final	99.37	%	
Simulación			
	Distancia recorrida	0.404	km
	Velocidad promedio	5.459	km/h
	Energía requerida	28.97	Wh
	Estado de carga final	99.46	%

La [Tabla 5.13](#) muestra el cálculo del error entre los datos de medición y los resultados de la simulación.

Se puede observar que los valores obtenidos en las mediciones para distancia recorrida, y velocidad promedio son muy cercanos a los obtenidos en la simulación con un error porcentual de 4.94 %.

Los valores calculados de energía difieren en 9.840 Wh correspondientes un 25.35% de error debido a que el modelo empleado en las simulaciones no muestra picos de corriente con valores elevados que corresponden a los intervalos de aceleración, disminuyendo el valor de la potencia requerida en las baterías.

Debido a que los valores de estado de carga final fueron estimados empleando el mismo modelo, el error es de 0.09%, un valor muy pequeño si se considera el error obtenido en la energía requerida.

Tabla 5.13 Valores para el error entre las mediciones y la simulación.

	Error absoluto [89]	Error relativo	Porcentual
Distancia recorrida	0.021 m	0.049	4.941 %
Velocidad promedio	0.284 m	0.049	4.945 %
Energía requerida	9.840 Wh	0.253	25.354 %
Estado de carga final	0.09 %	0.0009	0.090 %

A partir de los parámetros de distancia y energía requerida, es posible aproximar la autonomía del vehículo si realizara el mismo recorrido hasta agotar las baterías. Sin embargo, durante la operación real, las baterías no deben agotarse o descargarse totalmente, es decir al 100%.

El fabricante recomienda una profundidad de descarga del 20% al 50%, y establece un límite recomendable de hasta el 80% de la capacidad total de la batería [90].

La [Tabla 5.14](#) muestra los parámetros de autonomía calculados para los datos reales y obtenidos en la simulación obtenidos empleando la metodología mostrada en el [Anexo O](#).

El porcentaje de descarga es la diferencia entre el estado de carga inicial y el final. A partir del límite de profundidad de descarga es posible estimar el número de veces que el vehículo puede repetir el recorrido bajo las mismas condiciones de operación.

Es posible aproximar la autonomía del vehículo multiplicando el número de recorridos por la distancia del trayecto. El tiempo de operación es el tiempo que dura el trayecto multiplicado por el número de recorridos. La duración de las baterías es el equivalente al tiempo efectivo en que entregan potencia multiplicado por el número de recorridos.

Es posible observar que el error porcentual asociado a la diferencia entre la autonomía aproximada para los valores de medición y la simulación corresponde a un 10.915%. Esto significaría una mayor precisión en los resultados de la simulación, a diferencia del error obtenido en la estimación de la energía requerida de 25.35% mostrado en la [Tabla 5.13](#). Sin embargo, es importante mencionar que los valores de porcentaje de descarga fueron estimados empleando el mismo modelo.

Tabla 5.14 Resultados del análisis de autonomía para la simulación del sistema completo.

	Parámetro	Valor	Unidad
Medición			
	Porcentaje de descarga	0.63	%
	Límite de profundidad de descarga	80	%
	Recorridos posibles	126.98	—
	Autonomía aproximada	53.96	km
	Tiempo de operación	9.54	h
	Duración de las baterías	9.54	h
Simulación			
	Porcentaje de descarga	0.54	%
	Límite de profundidad de descarga	80	%
	Recorridos posibles	148.15	—
	Autonomía aproximada	59.85	km
	Tiempo de operación	10.9	h
	Duración de las baterías	10.9	h

5.4. Simulación de ciclos de manejo

Los resultados de simulación presentados en la sección previa muestran que el circuito implementado en PSIM puede ser empleado para simular el desempeño del carro de golf ante un ciclo de manejo.

La forma estandarizada de evaluar el desempeño de un vehículo es empleando ciclos de manejo que permitan comparar diseños de vehículos en condiciones de operación controladas, como se explicó en la sección 2.1.4. [Ciclos de manejo](#). De esa forma, es posible usar el circuito del sistema completo para simular una variedad de ciclos de manejo que representen condiciones estándar de operación y realizar estimaciones de requerimientos de potencia. La mayor parte de los ciclos de manejo están enfocados a evaluar las emisiones y economía de combustible en vehículos con motores de combustión interna (ICE) cuando operan en rangos de velocidad mayores 50 km/h [44].

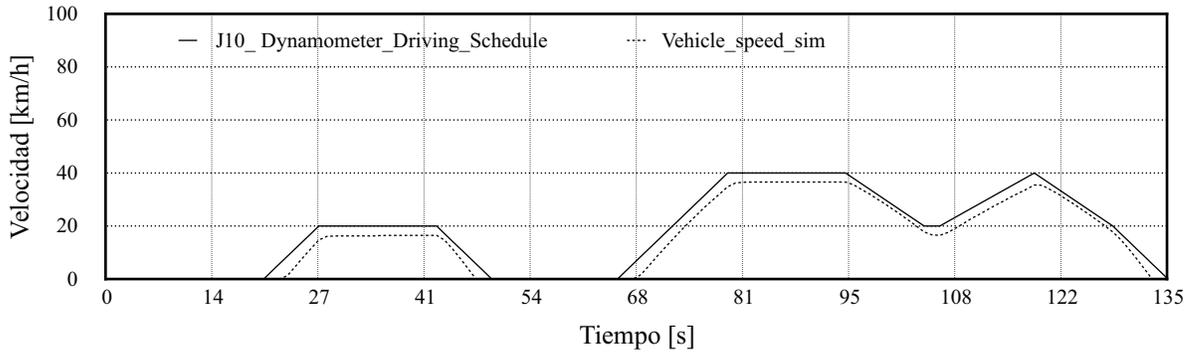
El carro de golf usado para desarrollar el modelo empleado en las simulaciones fue diseñado alcanzar una velocidad máxima teórica de 44. 579 km/h cuando el motor alcanza 3300 rpm de velocidad nominal y la relación de velocidades en la caja de engranes es de 6:1 (lo cual significa bajar el valor de torque en el motor). Bajo ese criterio, un carro de golf no puede competir en velocidad con un vehículo convencional en las mismas condiciones de operación. Sin embargo, existen ciertas aplicaciones con las condiciones de operación adecuadas para vehículos ligeros con rangos de velocidad bajos. En la [Anexo N](#) se muestran cuatro ciclos de manejo que son empleados para para evaluar el desempeño de vehículos en entornos urbanos. El valor de velocidad máxima para estos ciclos es de 50 km/h, el cual resulta un rango conveniente para la simulación de un carro de golf.

Los parámetros de emisiones y economía de combustible no pueden ser evaluadas con el modelo del vehículo eléctrico, sin embargo, parámetros de velocidad, distancia, energía consumida y estado de carga de las baterías sirven para mostrar el desempeño del vehículo y determinar rangos de autonomía. Para ejecutar las simulación de los ciclos de manejo, se emplearon los parámetros de simulación mostrados en las tablas [5.2](#), [5.4](#), [5.6](#), [5.8](#), y [5.10](#).

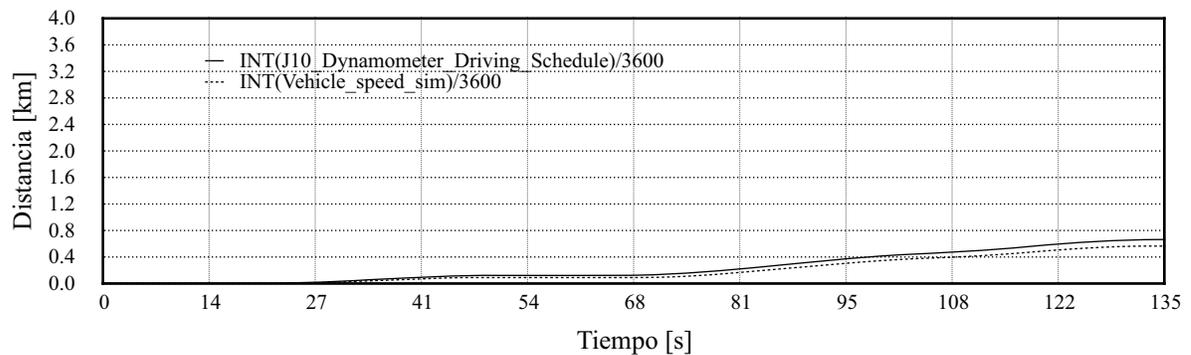
La relación de engranes fue cambiada a 6:1 para poder alcanzar valores de velocidad más altos y un ángulo de inclinación igual a 0 grados. Los parámetros de específicos a cada ciclo se muestran en el [Anexo N](#).

5.4.1. Ciclo de manejo 1: Japanese 10 Dynamometer Driving Schedule

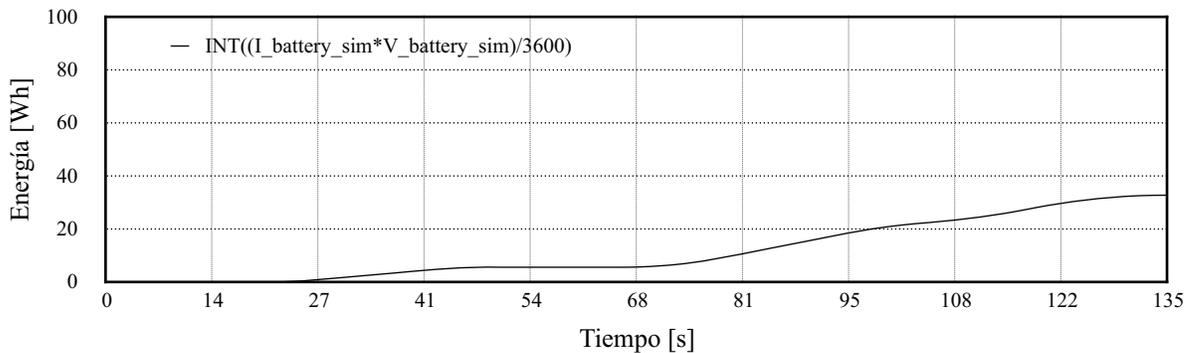
La [Gráfica 5.36](#) muestra los resultados de la simulación de la sección de baja velocidad ciclo de manejo *Japanese 10 Dynamometer Driving Schedule*.



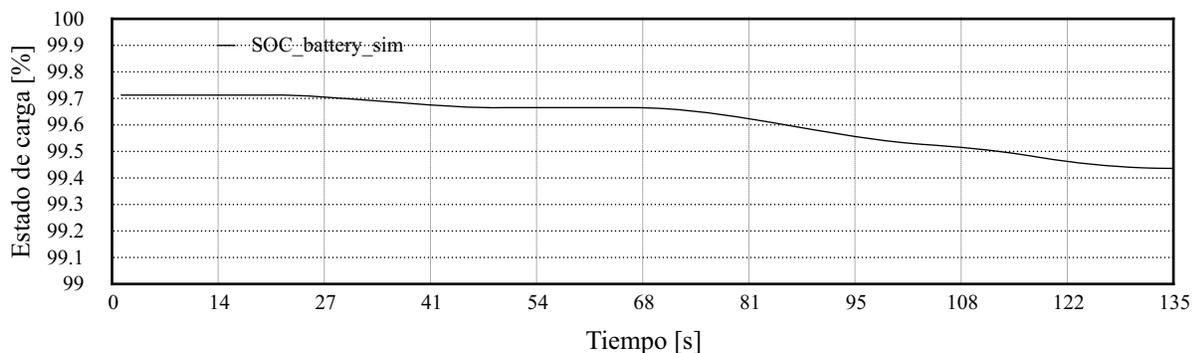
Gráfica 5.36 Comparación de los datos de velocidad del ciclo de manejo *Japanese 10 Dynamometer Driving Schedule* con los resultados de la simulación.



Gráfica 5.37 Comparación de los datos de distancia recorrida en el ciclo de manejo *Japanese 10 Dynamometer Driving Schedule* con los resultados de la simulación.



Gráfica 5.38 Requerimiento de energía para el ciclo de manejo *Japanese 10 Dynamometer Driving Schedule*, calculada a partir de los datos de potencia obtenidos en la simulación.



Gráfica 5.39 Descarga de la batería durante la simulación del ciclo de manejo *Japanese 10 Dynamometer Driving Schedule*.

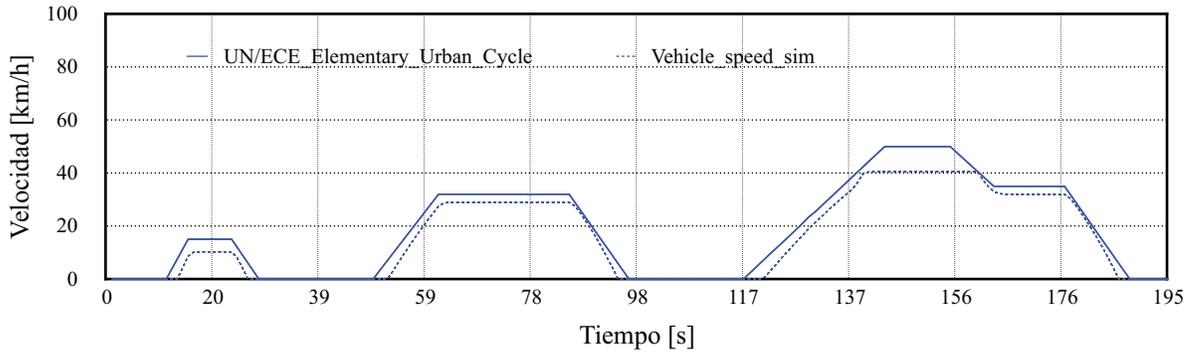
La velocidad alcanzada por el vehículo es muy cercana a la requerida, con un valor de velocidad máxima de 36.58 km/h cercano a 40 km/h necesarios para cumplir con el estándar. La distancia final en la simulación fue de 0.564 km, muy cercano de los 0.660 km que exige la prueba. El tiempo que requerido para la simulación fue de 27 minutos. La [Gráfica 5.38](#) muestra el cálculo de 32.72 Wh de energía necesaria para completar la prueba. El proceso de descarga de la batería se muestra en la [Gráfica 5.39](#). El estado de carga final es de 99.43%.

Tabla 5.15 Resumen de resultados de la simulación del ciclo de manejo *Japanese 10 Dynamometer Driving Schedule*.

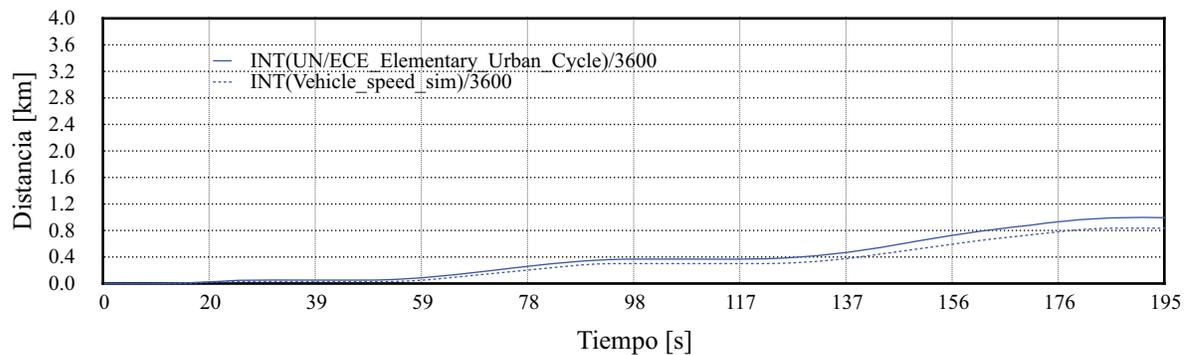
	Parámetro	Valor	Unidad
	Tiempo real de cómputo	27	min
Duración de la prueba			
	Segundos	135	s
	Horas	0.0375	h
Tiempo efectivo			
	Segundos	98	s
	Horas	0.027	h
Ciclo de manejo			
	Distancia recorrida	0.660	km
	Velocidad máxima	40.00	km/h
	Velocidad promedio	17.77	km/h
Simulación			
	Distancia recorrida	0.564	km
	Velocidad máxima	36.58	km/h
	Velocidad promedio	15.05	km/h
	Energía requerida	32.72	Wh
	Estado de carga final	99.43	%

5.4.2. Ciclo de manejo 2: UN/ECE Elementary Urban Cycle

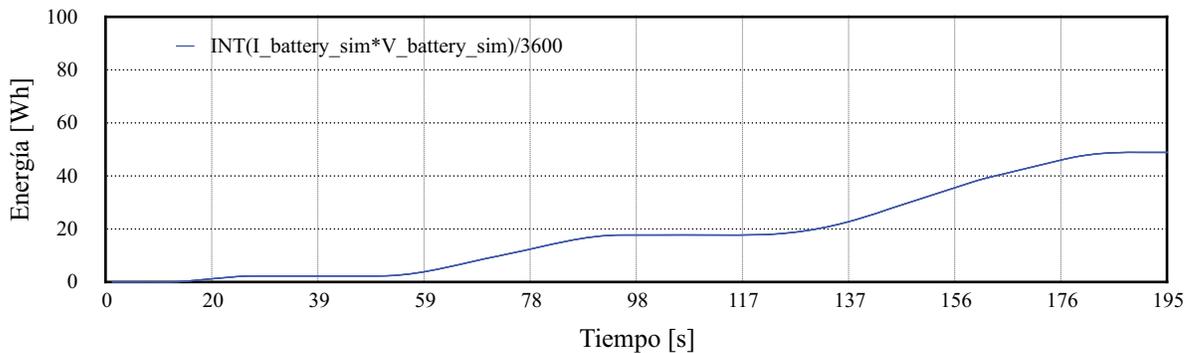
La **Gráfica 5.40** muestra los resultados de la simulación de la sección de baja velocidad ciclo de manejo *UN/ECE Elementary Urban Cycle*.



Gráfica 5.40 Comparación de los datos del ciclo de manejo *UN/ECE Elementary Urban Cycle* con los resultados de la simulación.

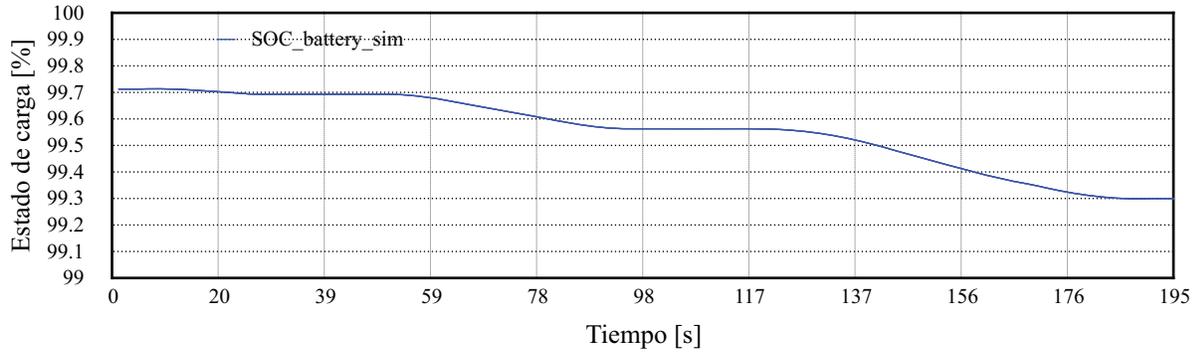


Gráfica 5.41 Comparación de los datos de distancia recorrida en el ciclo de manejo *UN/ECE Elementary Urban Cycle* con los resultados de la simulación.



Gráfica 5.42 Requerimiento de energía para el ciclo de manejo *UN/ECE Elementary Urban Cycle*, calculada a partir de los datos de potencia obtenidos en la simulación.

5. Simulación



Gráfica 5.43 Descarga de la batería durante la simulación del ciclo de manejo *UN/ECE Elementary Urban Cycle*.

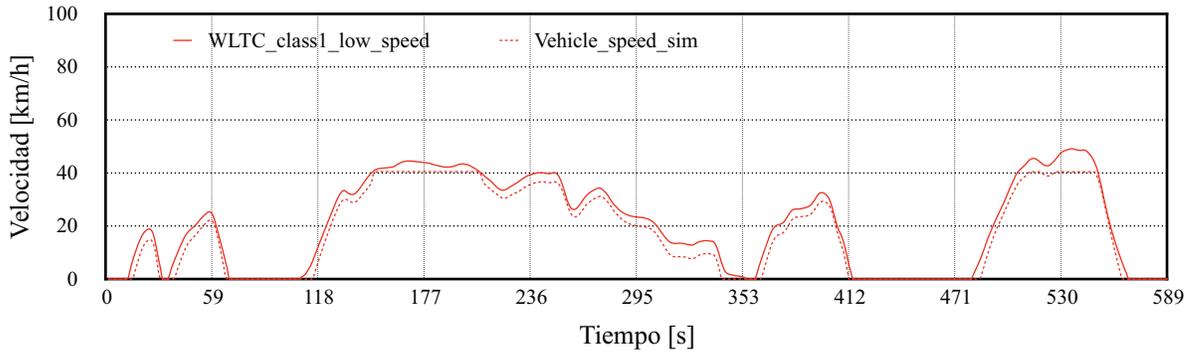
La velocidad alcanzada por el vehículo es muy cercana a la requerida, con un valor de velocidad máxima de 40.52 km/h cercano a los 50 km/h necesarios para cumplir con el estándar. La distancia final en la simulación fue de 0.835 km, muy cercano de los 0.994 km que exige la prueba. El tiempo requerido para la simulación fue de 37 minutos. La [Gráfica 5.42](#) muestra el cálculo de 48.88 Wh de energía necesaria para completar la prueba. El proceso de descarga de la batería se muestra en la [Gráfica 5.43](#). El estado de carga final es de 99.299%.

Tabla 5.16 Resumen de resultados de la simulación del ciclo de manejo *UN/ECE Elementary Urban Cycle*.

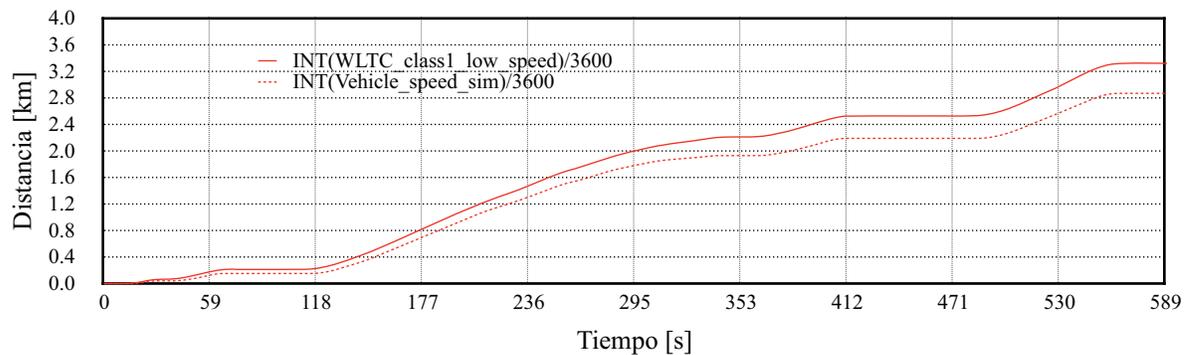
	Parámetro	Valor	Unidad
	Tiempo real de cómputo	36	min
Duración de la prueba			
	Segundos	195	s
	Horas	0.054	h
Tiempo efectivo			
	Segundos	135	s
	Horas	0.0375	h
Ciclo de manejo			
	Distancia recorrida	0.994	km
	Velocidad máxima	50.00	km/h
	Velocidad promedio	18.35	km/h
Simulación			
	Distancia recorrida	0.835	km
	Velocidad máxima	40.52	km/h
	Velocidad promedio	15.41	km/h
	Energía requerida	48.88	Wh
	Estado de carga final	99.299	%

5.4.3. Ciclo de manejo 3: WLTC class 1 (Low speed)

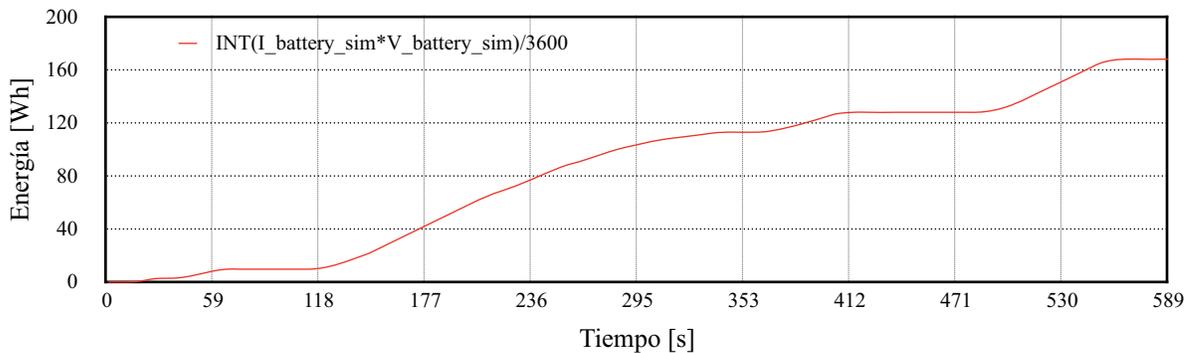
La [Gráfica 5.44](#) muestra los resultados de la simulación de la sección de baja velocidad ciclo de manejo *WLTC class 1 (Low speed)*.



Gráfica 5.44 Comparación de los datos del ciclo de manejo *WLTC class 1 (Low speed)* con los resultados de la simulación.

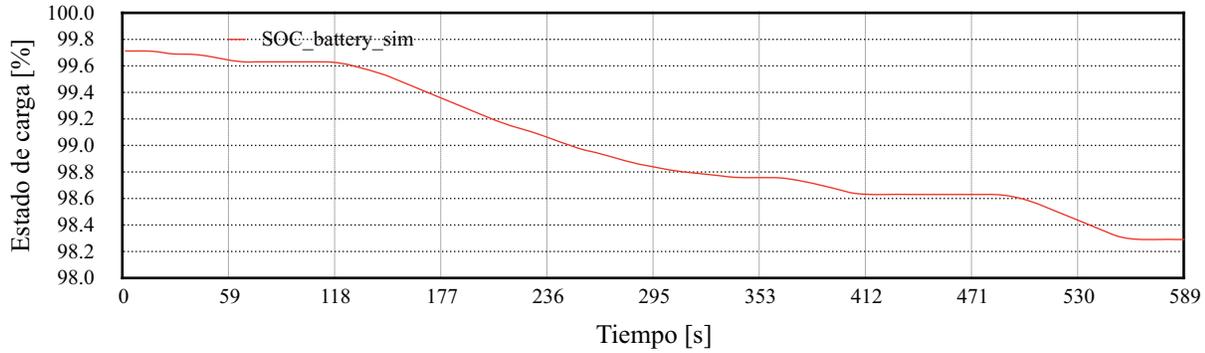


Gráfica 5.45 Comparación de los datos de distancia recorrida en el ciclo de manejo *WLTC class 1 (Low speed)* con los resultados de la simulación.



Gráfica 5.46 Requerimiento de energía para el ciclo de manejo *WLTC class 1 (Low speed)*, calculada a partir de los datos de potencia obtenidos en la simulación.

5. Simulación



Gráfica 5.47 Descarga de la batería durante la simulación del ciclo de manejo *WLTC class 1 (Low speed)*.

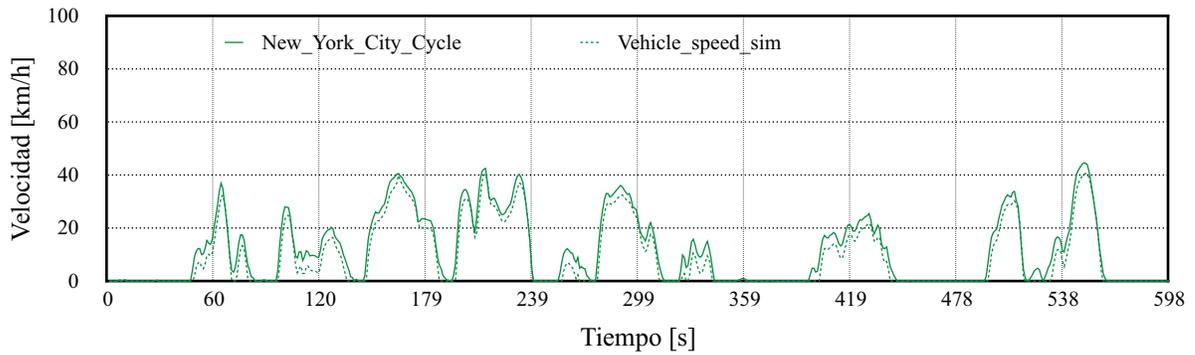
La velocidad alcanzada por el vehículo tuvo un error de 17.474% con un valor de velocidad máxima de 40.52 km/h en lugar de los 49.1 km/h necesarios para cumplir con el estándar. La distancia final en la simulación fue de 2.869 km, en lugar de los 3.324 km que exige la prueba. El tiempo que requerido para la simulación fue de 99 minutos. La [Gráfica 5.46](#) muestra el cálculo de 168.067 Wh de energía necesaria para completar la prueba. El proceso de descarga de la batería se muestra en la [Gráfica 5.47](#). El estado de carga final es de 98.29%.

Tabla 5.17 Resumen de resultados de la simulación del ciclo de manejo *WLTC class 1 (Low speed)*.

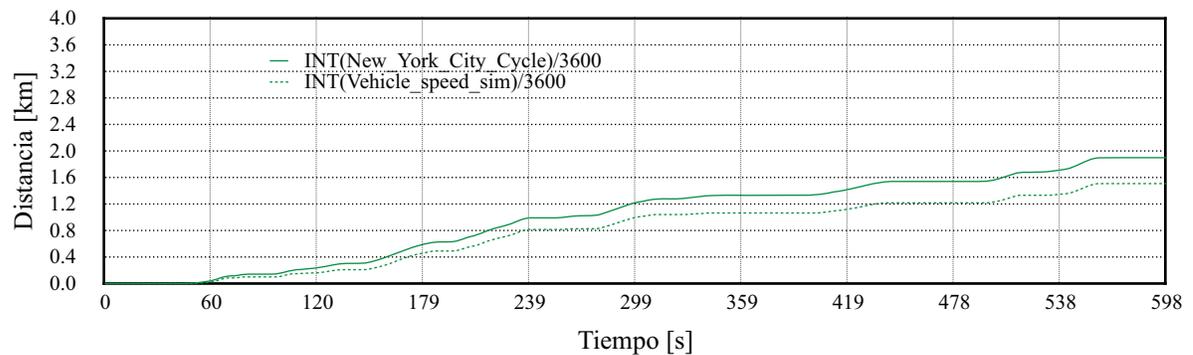
	Parámetro	Valor	Unidad
	Tiempo real de cómputo	99	min
Duración de la prueba			
	Segundos	589	s
	Horas	0.163	h
Tiempo efectivo			
	Segundos	444	s
	Horas	0.123	h
Ciclo de manejo			
	Distancia recorrida	3.324	km
	Velocidad máxima	49.10	km/h
	Velocidad promedio	20.28	km/h
Simulación			
	Distancia recorrida	2.869	km
	Velocidad máxima	40.52	km/h
	Velocidad promedio	17.53	km/h
	Energía requerida	168.067	Wh
	Estado de carga final	98.2	%

5.4.4. Ciclo de manejo 4: New York City Cycle

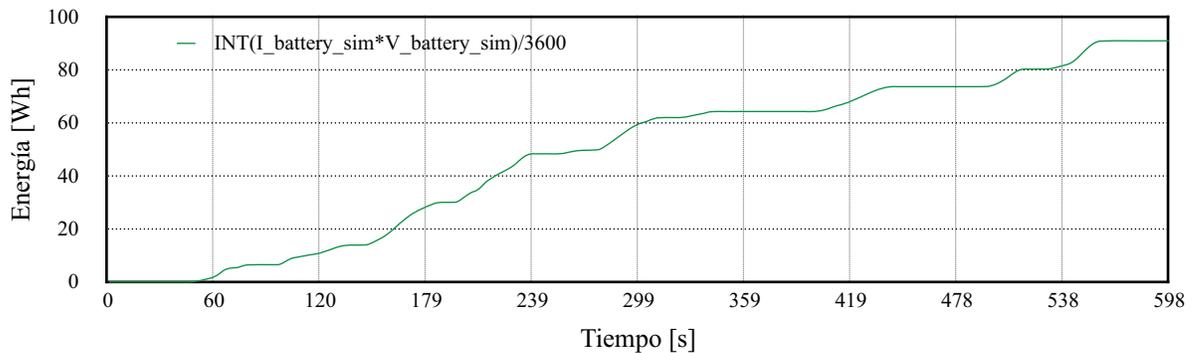
La [Gráfica 5.48](#) muestra los resultados de la simulación de la sección de baja velocidad ciclo de manejo *New York City Cycle*.



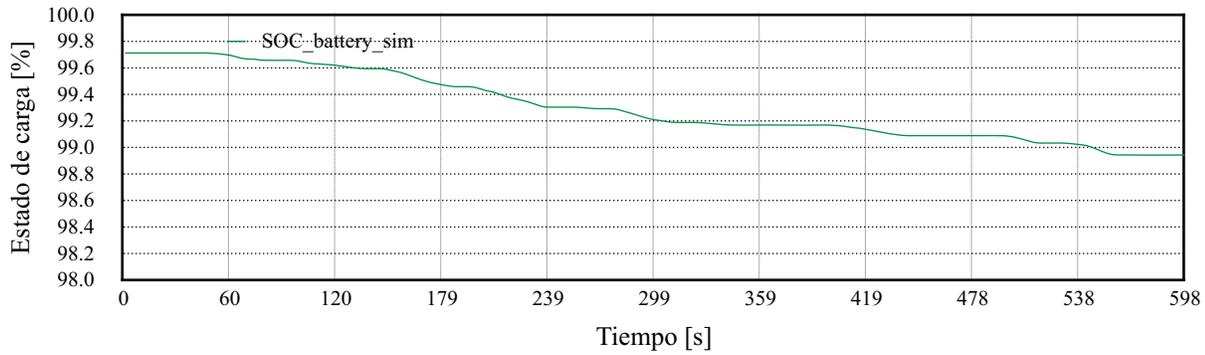
Gráfica 5.48 Comparación de los datos del ciclo de manejo *New York City Cycle* con los resultados de la simulación.



Gráfica 5.49 Comparación de los datos de distancia recorrida en el ciclo de manejo *New York City Cycle* con los resultados de la simulación.



Gráfica 5.50 Requerimiento de energía para el ciclo de manejo *New York City Cycle*, calculada a partir de los datos de potencia obtenidos en la simulación.



Gráfica 5.51 Descarga de la batería durante la simulación del ciclo de manejo *New York City Cycle*.

La velocidad alcanzada por el vehículo tuvo un error de 8.993% con una velocidad máxima de 40.57 km/h en lugar de los 44.57 km/h necesarios para cumplir con el estándar. La distancia final en la simulación fue de 1.507 km, en lugar de los 1.899 km que exige la prueba. El tiempo requerido para la simulación fue de 118 minutos. La [Gráfica 5.50](#) muestra el cálculo de 90.971 Wh de energía necesaria para completar la prueba. El proceso de descarga de la batería se muestra en la [Gráfica 5.51](#). El estado de carga final es de 98.94%.

Tabla 5.18 Resumen de resultados de la simulación del ciclo de manejo *New York City Cycle*.

	Parámetro	Valor	Unidad
	Tiempo real de cómputo	118	min
Duración de la prueba			
	Segundos	598	s
	Horas	0.166	h
Tiempo efectivo			
	Segundos	408	s
	Horas	0.113	h
Ciclo de manejo			
	Distancia recorrida	1.899	km
	Velocidad máxima	44.579	km/h
	Velocidad promedio	11.426	km/h
Simulación			
	Distancia recorrida	1.507	km
	Velocidad máxima	40.57	km/h
	Velocidad promedio	9.077	km/h
	Energía requerida	90.971	Wh
	Estado de carga final	98.94	%

5.4.5. Análisis de autonomía de los resultados de la simulación de ciclos de manejo

La [Tabla 5.19](#) muestra los resultados del análisis de autonomía para los cuatro ciclos de manejo empleando los datos obtenidos en las simulaciones y la metodología mostrada en el [Anexo O, Autonomía de un carro de golf en condiciones de velocidad variable](#).

Tabla 5.19 Resultados del análisis de autonomía para los cuatro ciclos de manejo.

Parámetro	Valor	Unidad
Ciclo 1: Japanese 10 Dynamometer Driving Schedule		
Velocidad promedio	15.05	km/h
Porcentaje de descarga	0.57	%
Límite de profundidad de descarga	80	%
Recorridos posibles	140.35	—
Autonomía aproximada	79.15	km
Tiempo de operación	5.26	h
Duración de las baterías	3.78	h
Ciclo 2: UN/ECE Elementary Urban Cycle		
Velocidad promedio	15.41	km/h
Porcentaje de descarga	0.701	%
Límite de profundidad de descarga	80	%
Recorridos posibles	114.12	—
Autonomía aproximada	95.29	km
Tiempo de operación	6.162	h
Duración de las baterías	4.27	h
Ciclo 3: WLTC class 1 (Low speed)		
Velocidad promedio	17.53	km/h
Porcentaje de descarga	1.8	%
Límite de profundidad de descarga	80	%
Recorridos posibles	44.44	—
Autonomía aproximada	127.51	km
Tiempo de operación	7.243	h
Duración de las baterías	5.47	h
Ciclo 4: New York City Cycle		
Velocidad promedio	9.077	km/h
Porcentaje de descarga	1.06	%
Límite de profundidad de descarga	80	%
Recorridos posibles	75.47	—
Autonomía aproximada	113.73	km
Tiempo de operación	12.53	h
Duración de las baterías	8.52	h

Los ciclos de manejo con menor autonomía y duración de las baterías son el ciclo 1 y el ciclo 2. Los patrones de velocidad y condiciones de operación de ambos ciclos son muy similares.

Los ciclos de manejo con mayor autonomía son el ciclo 3 y el ciclo 4. Los patrones de velocidad y condiciones de operación de ambos ciclos son distintos. El primero cubre una mayor distancia debido a que alcanza rangos de velocidad mayores. Esto se ve reflejado en la duración de las baterías, pues el requerimiento de energía en el ciclo 3 es mayor que en el 4.

El ciclo 4 tiene una mayor autonomía y duración de las baterías que los ciclos 1 y 2, debido a que sus rangos de velocidad son menores.

6. MODELO DE ARQUITECTURA HÍBRIDA DE CELDAS DE COMBUSTIBLE

Un vehículo híbrido emplea dos fuentes de energía distintas [40]. El caso más general de hibridación en un vehículo es el HEV, en donde se emplea gasolina para alimentar un motor de combustión, y electricidad para alimentar un motor eléctrico.

En el caso de un vehículo de celdas de combustible, la arquitectura se considera híbrida debido a que el vehículo emplea un motor eléctrico alimentado por la electricidad almacenada en una batería y la generada por celdas de combustible a partir de hidrógeno presurizado almacenado en un tanque.

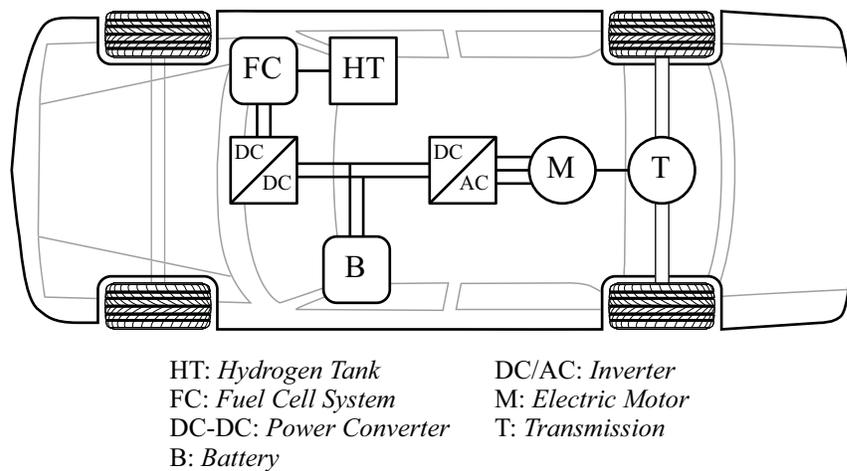


Figura 6.1 Configuración de un vehículo de celdas de combustible equipado con baterías recargables [2, 72, 91, 92].

En la Figura 6.1 se muestra la configuración de un vehículo de celdas de combustible alimentada por hidrógeno y equipada con una batería recargable. En este caso, el motor empleado para propulsión es un motor CA, por lo que es necesario un convertidor de potencia CD/CA, normalmente un inversor. Es necesario adecuar la potencia a la salida de la celda de combustible, por lo que se requiere de un convertidor CD/CD. Tanto la celda de combustible como la batería se conectan al bus de corriente directa.

Las principales razones de implementar una configuración híbrida entre celdas de combustible y baterías son:

- Disminuir el tamaño del banco de baterías, por lo tanto, la masa total del vehículo.
- Disminuir los tiempos de recarga de baterías.
- Incrementar el desempeño del vehículo, con mayores rangos de autonomía y velocidad.

Un sistema de celdas de combustible es capaz de operar en *full power mode* en donde las celdas son diseñadas para satisfacer el total de los requerimientos del vehículo, reduciendo de manera significativa el tamaño del banco de baterías [72]. De forma general, existen dos configuraciones entre la operación de una celda de combustible y un banco de baterías en un vehículo eléctrico [72]:

i) Soft hybrid

- La celda de combustible proporciona la mayor parte de la potencia requerida (aumenta el costo y complejidad del sistema).
- El tamaño del banco de baterías se reduce, (disminuye peso, tiempos de recarga y desgaste).
- Las baterías alimentan principalmente los sistemas auxiliares de la celda de combustible (reduce los picos de demanda pero permite recuperar energía por frenos regenerativos).

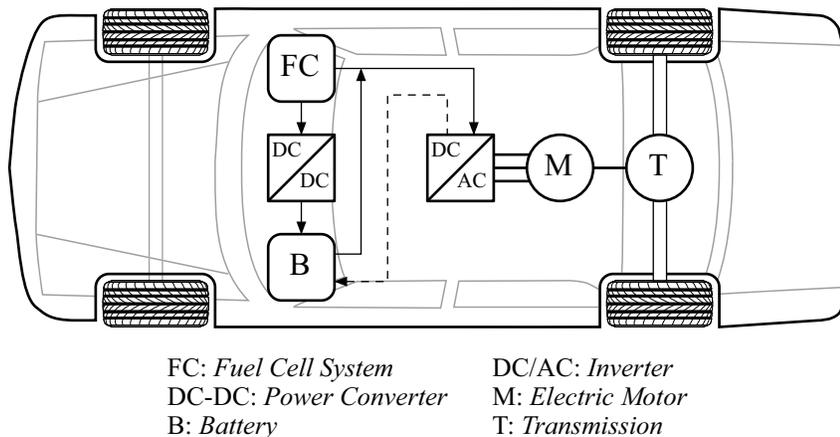


Figura 6.2 Configuración *soft hybrid* de tren de potencia de celdas de combustible y baterías [85].

ii) Hard hybrid

- La celda de combustible no opera en full power, solo en un valor base cercano a la potencia promedio requerida durante el trayecto (disminuye el costo y complejidad)
- El tamaño del banco de baterías se incrementa (aumenta el peso, tiempos de recarga y desgaste)
- Las baterías alimentan al motor de forma complementaria en intervalos dinámicos (permite satisfacer mayores picos de demanda)

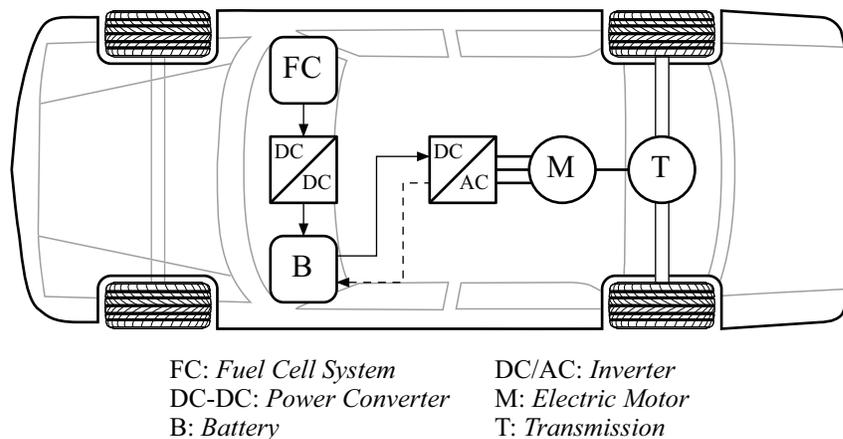


Figura 6.3 Configuración *hard hybrid* de tren de potencia de celdas de combustible y baterías [37, 85].

6.1. Simulación de la celda de combustible PEM

Las celdas de combustible tipo PEM (Proton Exchange Membrane) pueden ser modeladas a partir de una fuente de voltaje dependiente, debido a que el valor de tensión en terminales V_{FC} depende de el valor de la corriente I_{FC} . Las características de diseño propias de cada stack de celdas y condiciones de operación (temperatura y presión) definen las pérdidas de voltaje por fenómenos de activación V_{act} , por resistencia V_{ohm} y por transferencia de masa V_{con} , que restan valor al voltaje termodinámico E_{Nernst} .

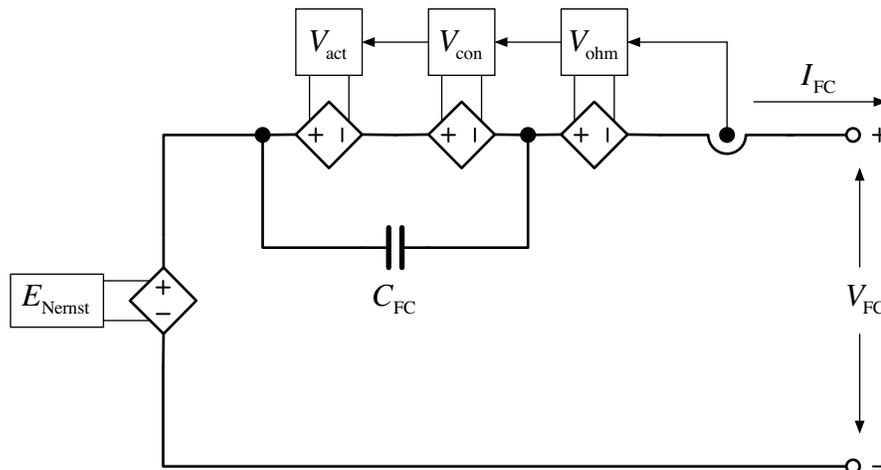


Figura 6.4 Circuito equivalente de la celda de combustible [61, 93].

La [Figura 6.4](#) muestra el circuito eléctrico equivalente de una celda de combustible PEM, que es un arreglo de fuentes de voltaje dependientes de la corriente. Se puede observar como a una fuente principal correspondiente al voltaje de Nernst, se le restan las pérdidas por voltajes de activación, resistencia y transferencia de masa. Cada bloque puede ser estimado mediante las ecuaciones mostradas en la [sección 2.6.4. Fundamentos de operación de una celda de combustible PEM](#).

Algunos autores refieren que un elemento capacitivo conectado en paralelo con las fuentes de voltaje de activación y concentración describe los aspectos dinámicos de la celda observados experimentalmente.

6.1.1. Celda de combustible empleada en la simulación

La celda de combustible empleada durante la simulación fue el modelo *2000W Fuel Cell Stack* (H2000) de la compañía *Horizon Fuel Cell Technologies*. Los datos técnicos se describen en la [Tabla 6.1](#) mostrados en el manual proporcionado por el fabricante.

Tabla 6.1 Especificaciones técnicas de una celda de combustible H2000 [94].

Horizon 2000W Fuel Cell Stack	
Type of fuel cell	PEM
Number of cells	48
Rated Power	2000 W
Performance	28.8 V @ 70 A
H2 Supply valve voltage	12 V
Purging valve voltage	12 V
Blower voltage	12 V
Reactants	Hydrogen and Air
External temperature	5 to 30 °C
Max stack temperature	65 °C
H2 Pressure	0.45-0.55 bar
Hydrogen purity	≅99.995 % dry H2
Humidification	self-humidified
Cooling	Air (integrated cooling fan)
Weight (with fan & casing)	10 kg (±200 grams)
Controller	2.5 kg (±100 grams)
Dimension	30.3 cm x 35 cm x 18.3 cm
Flow rate at max output	26 L/min
Start up time	≅30 s at ambient temperature
Efficiency of stack	40 % @ 28.8 V
Low voltage shut down	24 V
Over current shut down	90 A
Over temperature shut down	65 °C
External power supply	13 V(±1 V), 5 A~8 A

6.1.1.1. Curva de polarización de la celda de combustible H2000

La [Tabla 6.1](#) muestra que los valores de operación nominal de la celda son 28.8 V para una corriente de 70 A en terminales, proporcionando 2000 W aproximadamente. Debido a que el voltaje de la celda de combustible varía debido a la corriente, la forma directa de evaluar el desempeño de la celda es mediante la curva de polarización.

La [Ecuación 2.61](#) describe la forma general del voltaje en terminales de una celda de combustible.

$$V_{FC} = E_{Nerst} - V_{act} - V_{ohm} - V_{con} \quad (2.61)$$

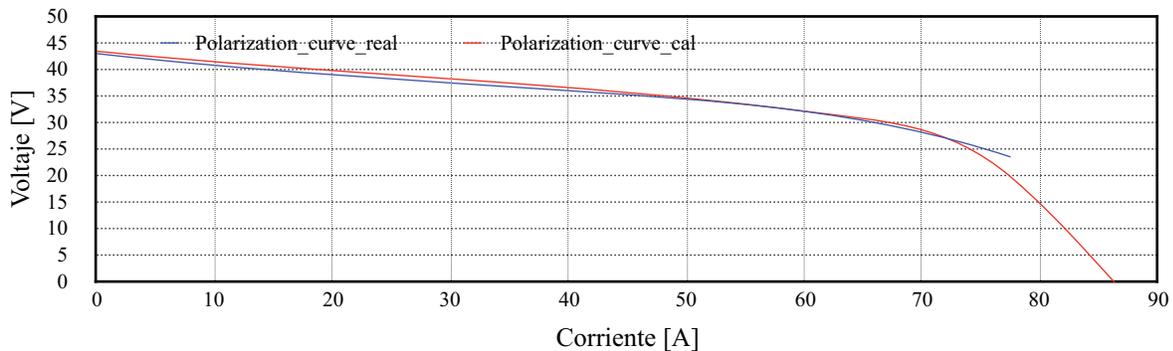
Para calcular la curva de polarización, es necesario describir la [Ecuación 2.61](#) en función de la corriente en terminales como se muestra en la [Ecuación 6.1](#):

$$V_{FC} = \frac{-\Delta\bar{g}_f}{2F} + \frac{RT}{2F} \ln\left(\frac{p_{H_2}\sqrt{p_{O_2}}}{p_{H_2O}}\right) - \frac{RT}{2\alpha F} \ln\left(\frac{I_{FC}}{I_0}\right) - (I_{FC} \cdot R_{ohm}) - (m \cdot \exp(n \cdot I_{FC})) \quad (6.1)$$

A partir de los valores de operación de la celda de la [Tabla 6.1](#), se puede describir la ecuación anterior para la celda H2000 [95]:

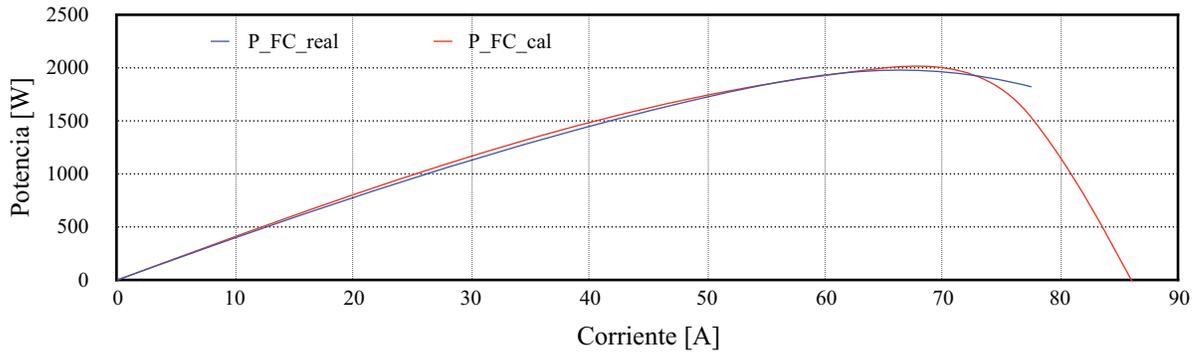
$$V_{FC} = 43.44 - 0.3463 \ln\left(\frac{I_{FC}}{1.4661}\right) - 0.1554 \cdot I_{FC} - 2.52 \times 10^{-4} \exp(0.1322 \cdot I_{FC}) \quad (6.2)$$

La [Gráfica 6.1](#) muestra la curva de polarización para la celda de combustible H2000. La curva *Polarization_curve_real* fue proporcionada por el manual de especificaciones técnicas [94]. La curva *Polarization_curve_cal* se obtiene mediante la [Ecuación 6.2](#). En la [Gráfica 6.1](#) se puede observar que conforme aumenta el valor de la corriente en terminales, el voltaje disminuye hasta los 24 V, en donde corta su operación como se describe en la [Tabla 6.1](#).



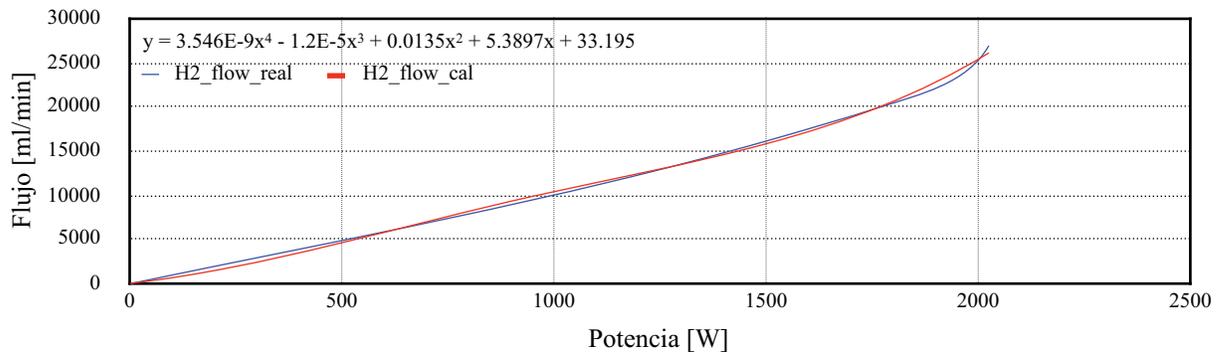
Gráfica 6.1 Curva de polarización de la celda de combustible H2000.

La **Gráfica 6.2** muestra la curva de potencia de la celda. La curva P_{FC_real} fue proporcionada por el manual de especificaciones técnicas [94]. La curva P_{FC_cal} fue obtenida mediante la **Ecuación 6.2**. Se puede observar que cuando se tiene una corriente aproximada de 70 A en terminales, la celda alcanza su valor nominal de 2000W.



Gráfica 6.2 Curva de potencia de la celda de combustible H2000.

La **Gráfica 6.3** muestra la curva de consumo de hidrógeno. La curva $H2_flow_real$ fue proporcionada por el manual de especificaciones técnicas.



Gráfica 6.3 Curva de consumo de hidrógeno en función de la potencia.

La curva sirve de referencia para estimar el flujo de hidrógeno en función de la potencia proporcionada por la celda de combustible. La curva $H2_flow_cal$ es una aproximación mediante una función polinomios de cuatro grado. La **Ecuación 6.3** describe el flujo volumétrico de hidrógeno \dot{V}_{H_2} en función de la potencia P_{FC} .

$$\dot{V}_{H_2} = 3.546 \times 10^{-9} (P_{FC}^4) - 1.2 \times 10^{-5} (P_{FC}^3) + 0.0135 (P_{FC}^2) + 5.3897 \cdot P_{FC} + 33.195 \quad (6.3)$$

6.1.2. Modelo de la celda de combustible implementada en PSIM

Para la simulación de la celda de combustible anteriormente mencionada, se emplearon como base el modelo de la celda descrita en el circuito eléctrico equivalente mostrado en la [Figura 6.4](#) y las ecuaciones que describen su comportamiento.

La [Figura 6.5](#) muestra el circuito equivalente de la celda de combustible implementado en PSIM. Una fuente de voltaje controlada emula el voltaje termodinámico, mientras que las pérdidas por activación, concentración y resistencia son emuladas por tres fuentes de voltaje controlado conectadas en serie.

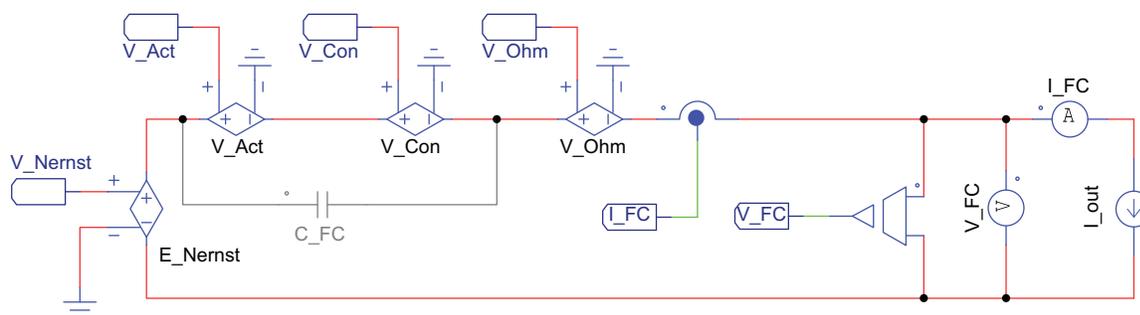


Figura 6.5 Circuito equivalente de la celda de combustible PEM implementado en PSIM.

Los sensores de corriente y voltaje registran los valores de potencia empleados en los circuitos que modelan las ecuaciones de pérdidas y consumo de hidrógeno. Una fuente CD emula la demanda de corriente en las terminales del circuito.

La [Figura 6.6](#) muestra el circuito que modela la ecuación de Nernst. Los valores correspondientes a los parámetros de operación son empleados en módulos matemáticos para calcular el valor que controla la fuente de voltaje que emula el potencial termodinámico.

Las figuras [6.7](#), [6.8](#) y [6.9](#) muestran los circuitos que modelan las ecuaciones de voltaje de activación, concentración y resistencia que controlan las fuentes de voltaje para emular las pérdidas de la celda. Los circuitos emplean el valor de corriente registrado por el sensor y los parámetros de operación descritos en la [Ecuación 6.2](#) para realizar los cálculos mediante módulos matemáticos.

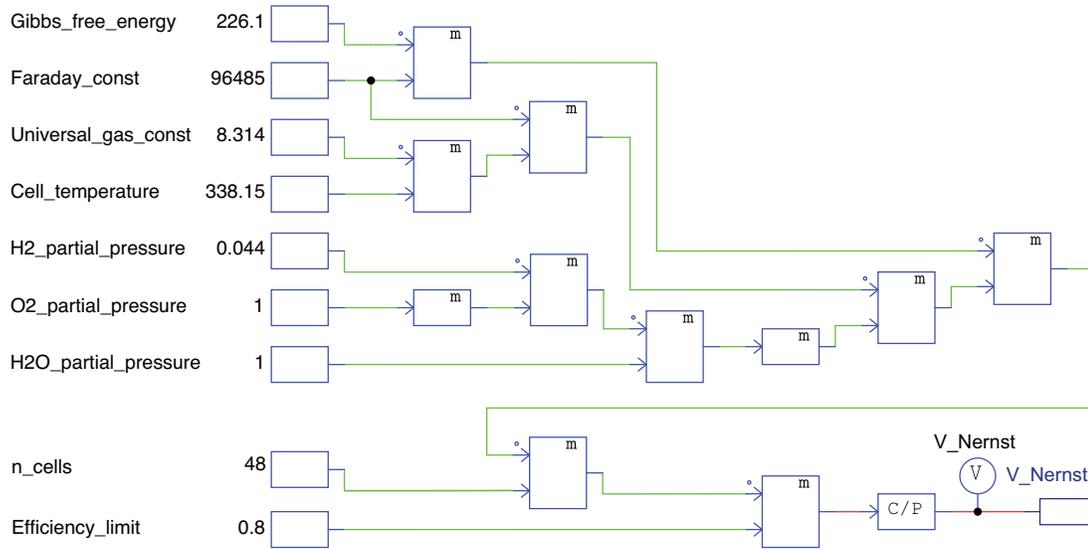


Figura 6.6 Circuito que modela la ecuación de Nernst.

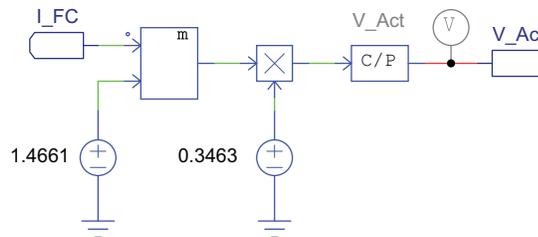


Figura 6.7 Circuito que modela la ecuación del voltaje de activación.

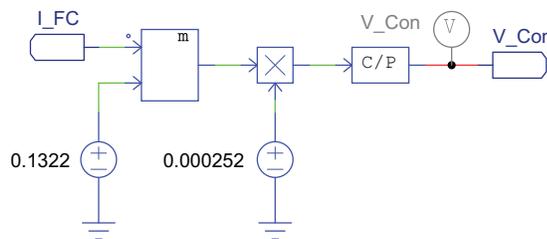


Figura 6.8 Circuito que modela la ecuación del voltaje de concentración.

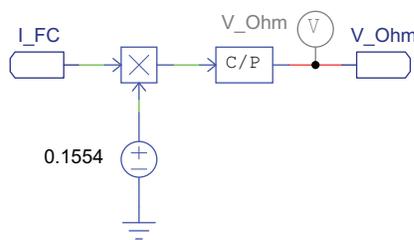


Figura 6.9 Circuito que modela la ecuación del voltaje por resistencia.

La Figura 6.10 muestra el circuito que modela la ecuación empleada para calcular el flujo de hidrógeno empleando los valores de voltaje y corriente registrados en las terminales.

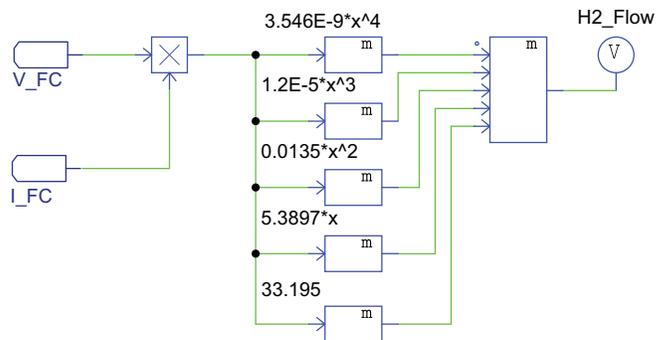


Figura 6.10 Circuito que modela la ecuación de flujo de hidrógeno.

La Tabla 6.2 muestra los parámetros empleados en la simulación del circuito de la celda de combustible. Para mostrar los efectos en el voltaje al variar la corriente, se estableció el registro de una variable de tiempo por segundo durante un tiempo total de simulación de 90 segundos. El registro de datos fue de uno por segundo.

Se establecieron valores para los parámetros de temperatura y presión equivalentes a las condiciones normales. Los valores de los parámetros de operación y constantes se tomaron de publicaciones especializadas en modelación de celdas de combustible [16, 31, 93, 96].

La temperatura de la celda se estableció en el valor máximo de operación referido en el manual de especificaciones técnicas proporcionado por el fabricante [94]. Las condiciones de presión en el hidrógeno también se tomaron de dicho manual, mientras que la presión de entrada de oxígeno y salida de vapor de agua fueron establecidas en valores de presión atmosférica.

Los valores de los parámetros de las ecuaciones para calcular las pérdidas por activación, concentración y resistencia fueron tomadas como referencia de publicaciones técnicas [93, 95].

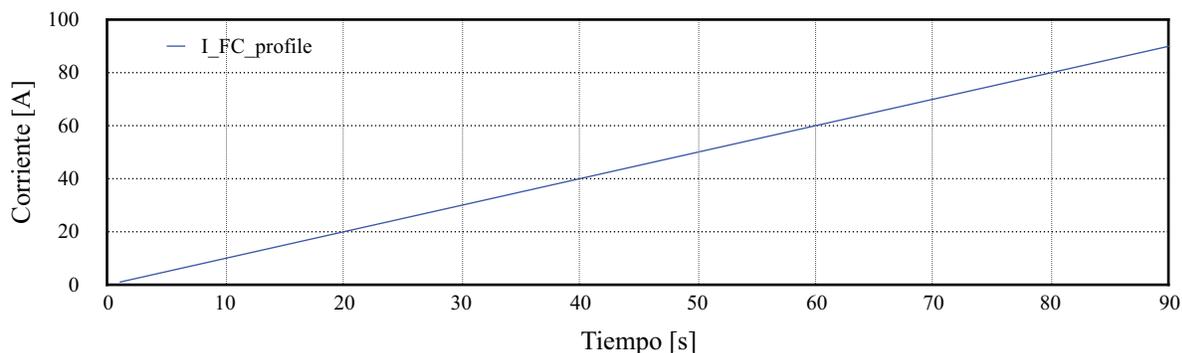
Los coeficientes empleados en la ecuación que estima el flujo de hidrógeno fueron tomadas de la Ecuación 6.3.

Tabla 6.2 Parámetros de simulación de la celda de combustible.

	Parámetro	Valor	Unidad
Simulation Control			
	Time step	1	s
	Total time	90	s
	Print time	0	—
	Print step	1	—
Ambient Conditions			
	Pressure	1	atm
	Temperature	298.15	K
Thermodynamic Potential			
	$\text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}(g)$ Gibbs Free Energy @ 80 °C [97]	226.1	kJ/mol
	Faraday Constant [97]	96485	C/mol
	Universal Gas Constant [97]	8.314	J/mol·K
	Cell Temperature [94]	338.15	K
	H_2 Partial Pressure	0.044	atm
	O_2 Partial Pressure	1	atm
	H_2O Partial Pressure [94]	1	atm
	Number of Cells [94]	48	—
	Efficiency Limit [97]	80	%
Activation Losses			
	Exchange Current [95]	1.4661	A
Ohmic Losses			
	Ohmic Resistance [95]	0.002	Ω
Concentration Losses			
	m empirical constant [95]	2.52×10^{-4}	V
	n empirical constant [95]	0.1322	1/A
Hydrogen Flow			
	A coefficient	3.546×10^{-9}	—
	B coefficient	1.2×10^{-5}	—
	C coefficient	0.0135	—
	D coefficient	5.3897	—
	H2 Flow Constant	33.195	mL/min

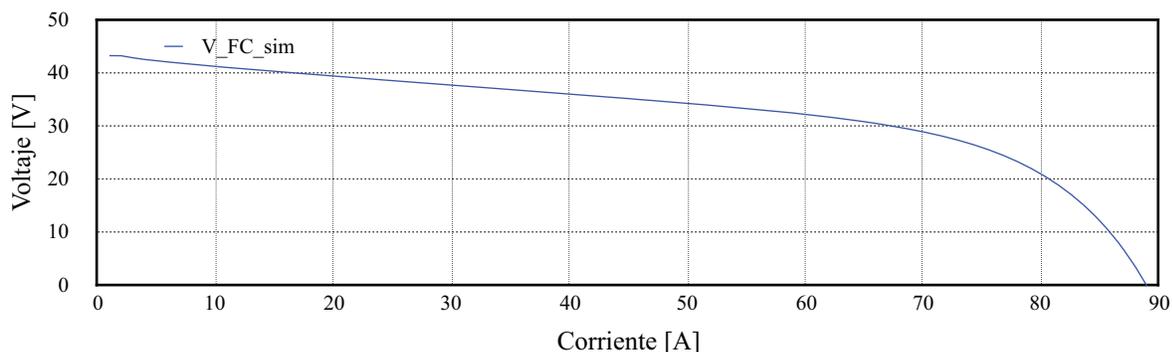
6.1.3. Resultados de la simulación de la celda de combustible H2000

Se implementó una fuente CD controlada por un perfil de corriente de 1 a 90 A mostrado en la [Gráfica 6.4](#) para obtener el comportamiento del voltaje de la celda de combustible en todo su rango de operación.



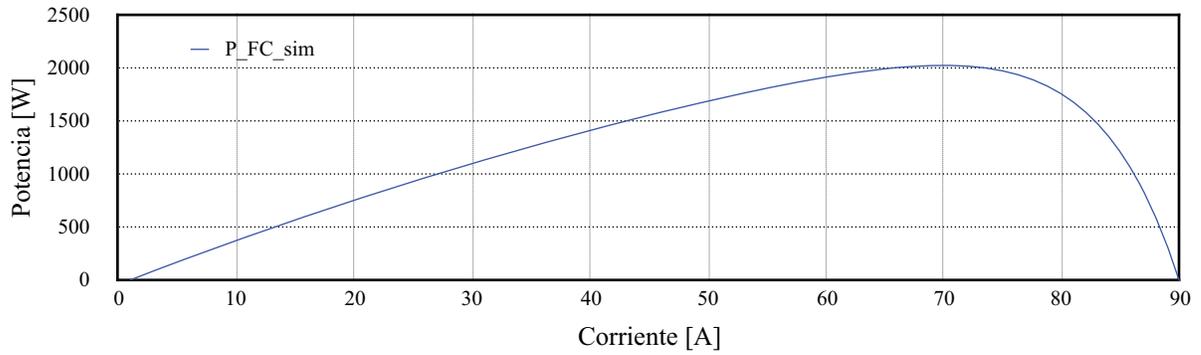
Gráfica 6.4 Perfil de corriente implementado en la fuente CD para simular la celda de combustible.

La [Gráfica 6.5](#) muestra la curva de polarización obtenida a partir de la simulación del modelo de la celda de combustible PEM H2000. Se puede observar la coincidencia de la curva con las descritas en el manual de operación [94].



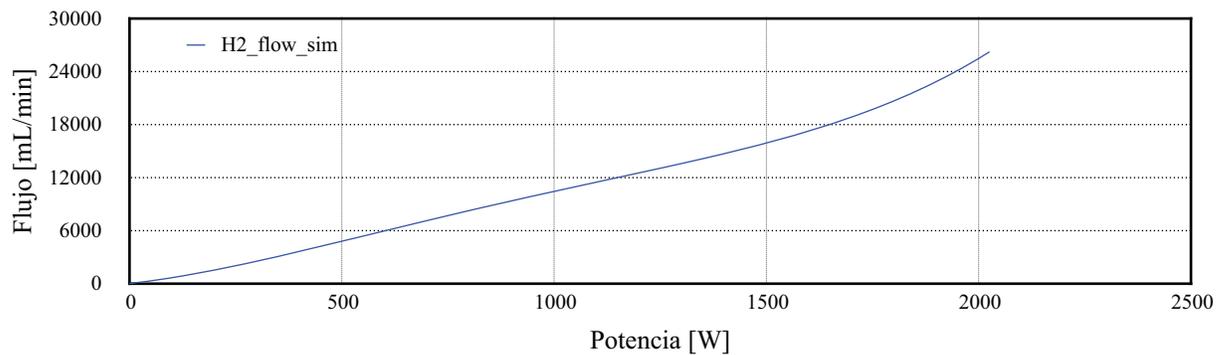
Gráfica 6.5 Curva de polarización obtenida mediante la simulación del modelo de la celda de combustible.

La [Gráfica 6.6](#) muestra la curva de potencia calculada a partir de los valores de voltaje y corriente en las terminales. También se puede observar el valor máximo de 2000 kW a 70 A, que corresponde a la potencia nominal de la celda. Se puede observar la coincidencia de la curva con las descritas en el manual de operación.



Gráfica 6.6 Curva de potencia obtenido mediante la simulación del modelo de la celda de combustible.

La [Gráfica 6.7](#) muestra la curva de consumo de hidrógeno calculada a partir del circuito mostrado en la [Figura 6.10](#). Se puede observar la coincidencia de la curva con las descrita en el manual de operación. Cuando la potencia es nominal, el flujo de hidrógeno es de aproximadamente 26 237.7 mL/min, lo cual es un valor muy cercano a 26 L/min referido en el manual de operación.



Gráfica 6.7 Curva de consumo de hidrógeno en función de la potencia obtenida en la simulación del modelo de celda de combustible.

6.2. Simulación de la configuración híbrida

Empleando el circuito que modela la celda de combustible PEM y el circuito que modela el vehículo eléctrico mostrado en la sección 5.3. [Resultados de simulación del sistema completo](#), es posible integrar un circuito para modelar un tren de potencia con una configuración híbrida.

Para integrar la celda de combustible al tren de potencia del vehículo eléctrico es necesario implementar al menos una interfase que permita adecuar la potencia generada a los requerimientos de la carga.

En el caso de una configuración híbrida como la mostrada en la [Figura 6.1](#), la celda de combustible se conecta al bus de corriente directa mediante un convertidor CD/CD, en paralelo con el banco de baterías. El convertidor CD/CD debe ser elegido o diseñado de acuerdo a los requerimientos de voltaje del controlador de velocidad del motor de 36 V y la curva de polarización de la celda de combustible mostrada en la [Gráfica 6.2](#).

6.2.1. Simulación del convertidor de potencia CD/CD reductor

La [Figura 6.11](#) muestra el circuito del convertidor de potencia empleado para conectar la celda de combustible con una carga de corriente variable. El límite de operación de la celda de combustible está indicado por la curva de polarización es de 70 A, lo que corresponde a un rango de voltaje de 27 a 43.44 V.

Para mantener un valor de tensión constante cercana a los 36 V y conectar la celda con el sistema del vehículo eléctrico, se diseñó una interfaz basada en la configuración básica de un convertidor de potencia CD/CD reductor. El sistema consiste en dos etapas de filtrado, una a la entrada y otra a la salida, un interruptor MOSFET controlado por una señal PWM y un sensor de corriente que registra los valores necesarios para calcular el ciclo de trabajo en el circuito de control.

El circuito de control limita a 40 A la corriente en terminales, que corresponden aproximadamente a un voltaje de 36.029 V, el cual es el valor requerido de tensión para operar junto con las baterías y el convertidor del vehículo.

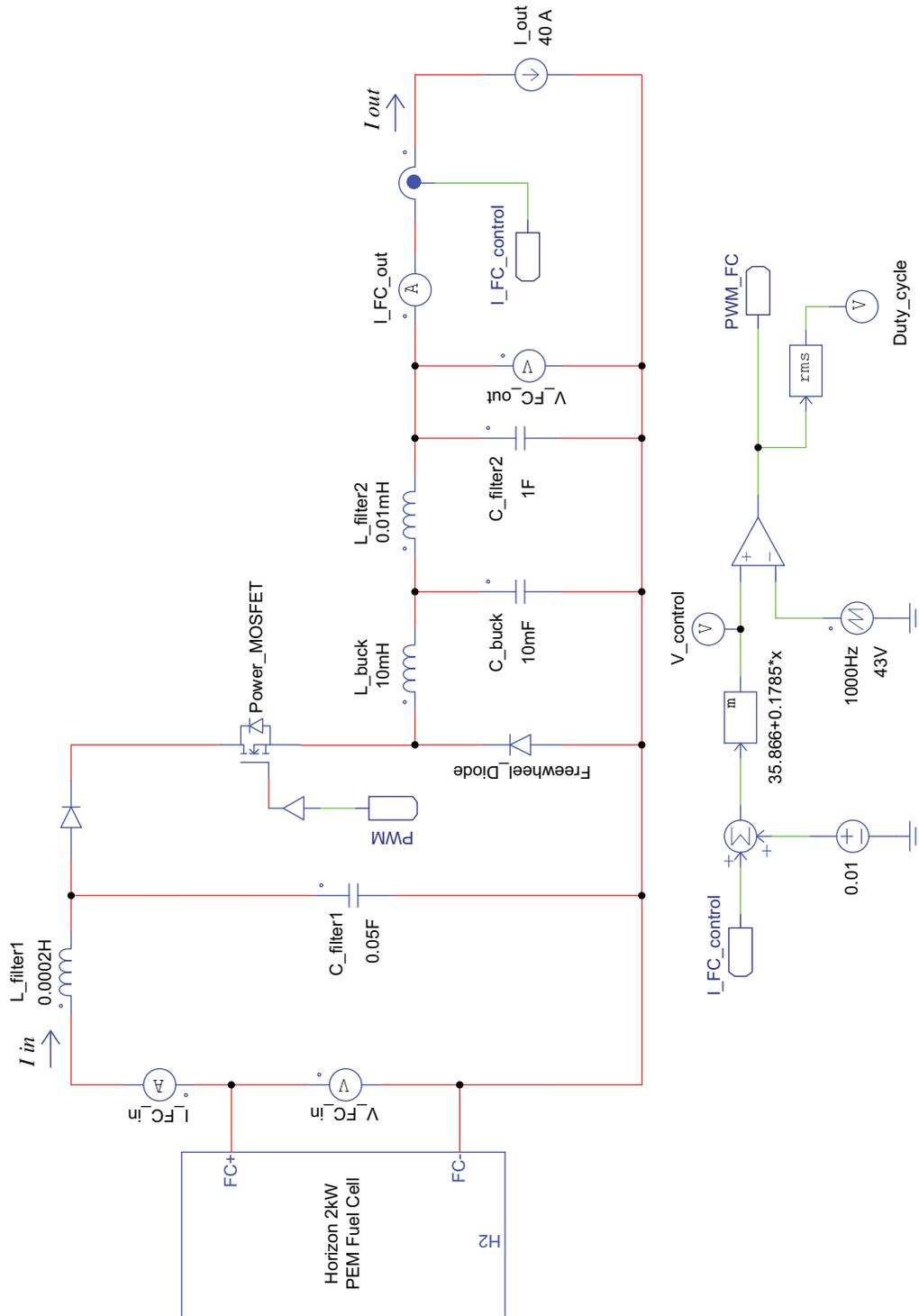


Figura 6.11 Circuito del convertidor de potencia diseñado para conectar la celda de combustible con una carga de corriente variable.

La [Tabla 6.3](#) muestra los parámetros de operación elegidos para la simulación del convertidor de potencia conectado a la celda de combustible. Se estableció un variable de

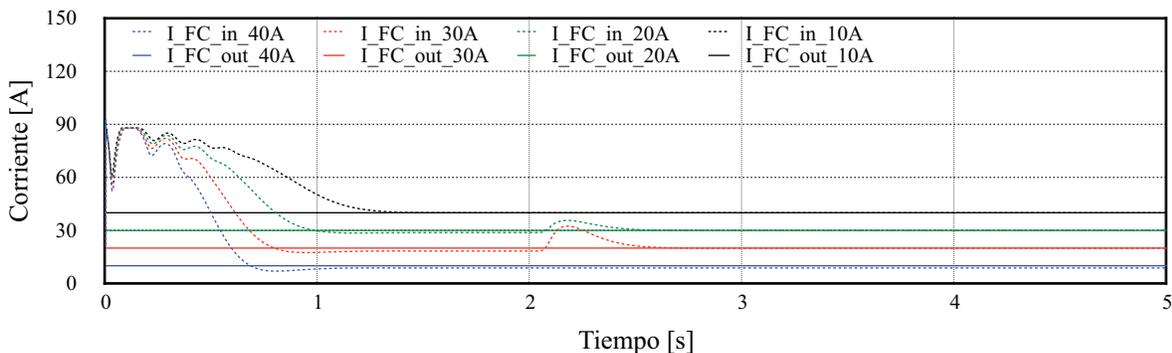
6. Modelo de Arquitectura Híbrida de Celdas de Combustible

tiempo de 0.0001 segundos para mostrar el comportamiento de las señales de entrada y salida del convertidor durante el régimen transitorio. Se estableció un tiempo total de simulación de 5 segundos para observar la estabilización de las señales hasta alcanzar el régimen estacionario.

Tabla 6.3 Parámetros de operación para la simulación del convertidor de potencia diseñado para conectar la celda de combustible con una carga de corriente variable.

	Parámetro	Valor	Unidad
Simulation Control			
	Time step	0.0001	s
	Total time	5	s
	Print time	0	—
	Print step	1	—
Low Pass Filter 1			
	Capacitor 1	0.05	F
	Inductor 1	0.0002	H
Sawtooth (PWM generator)			
	Vpeak	43	V
	Frecuency	1000	Hz
Buck Converter			
	Capacitor	10	mF
	Inductor	10	mH
Low Pass Filter 2			
	Capacitor 2	1	F
	Inductor 2	0.01	mH

La [Gráfica 6.8](#) muestra las curvas de corriente a la entrada y salida del convertidor en el intervalo de operación obtenidas mediante la simulación para valores de 10, 20, 30 y 40 A.

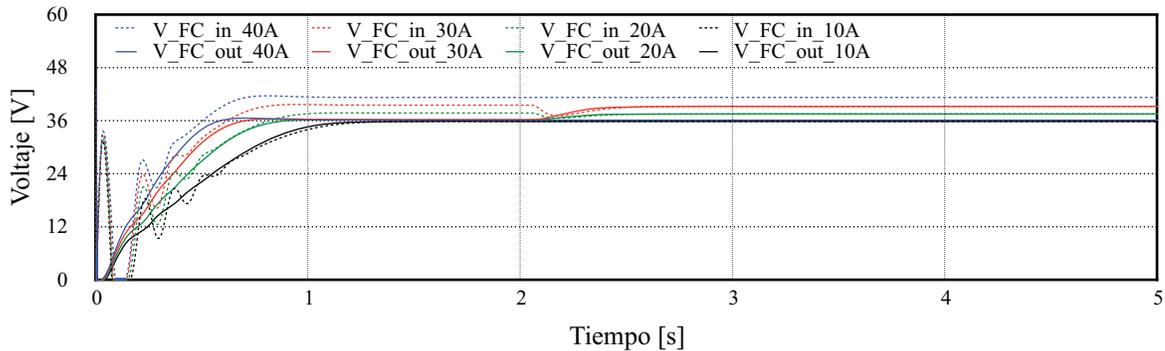


Gráfica 6.8 Curvas de corriente en la entrada y salida del convertidor en el intervalo de operación obtenidas en la simulación.

Las curvas que indican la corriente a la entrada del convertidor alcanzan el régimen estacionario en aproximadamente 1.5 segundos. Durante el régimen transitorio, presentan una perturbación que alcanza los 90 A para después estabilizarse al valor de corriente en la salida.

La **Gráfica 6.9** muestra las curvas de corresponden al voltaje en la entrada y salida del convertidor en el intervalo de operación obtenidas mediante la simulación. Las curvas describen la respuesta del voltaje a los cambios de corriente.

Durante el régimen transitorio, la señal de voltaje a la entrada del convertidor oscila por debajo de 36 V para estabilizarse en el valor correspondiente a la corriente de acuerdo la función que describe la curva de polarización.



Gráfica 6.9 Curvas de voltaje en la entrada y salida del convertidor en el intervalo de operación obtenidas en la simulación.

Las curvas de voltaje a la salida del convertidor no presentan un perturbaciones durante el régimen transitorio y se estabilizan al alcanzar un valor de 36 V, que corresponde a la respuesta deseada en el convertidor. Posterior a los 2 segundos, las señales de tensión correspondientes a las señales de 20 y 30 A recuperan el valor de voltaje a la entrada. Solo las curvas de voltaje correspondientes a las señales de corriente de 10 y 40 mantienen la tensión de 36 V deseada a la salida del convertidor.

A pesar de que el convertidor permite conectar la celda de combustible con el bus principal a la entrada del controlador de velocidad porque siempre mantiene una tensión superior a 36 V en rangos de corriente por debajo de 40 A, es importante ajustar los parámetros del circuito del convertidor de potencia, para garantizar la operación óptima del sistema.

6.2.2. Resultados de la simulación de la configuración híbrida

Empleando el circuito del convertidor de potencia CD/CD reductor propuesto en la [Figura 6.11](#) es posible integrar el circuito de la celda de combustible PEM mostrado en la sección [6.1.2. Modelo de la celda de combustible implementada en PSIM](#) al circuito completo del tren de potencia del vehículo eléctrico ligero mostrado en la sección [5.2.2. Simulación del sistema completo](#).

La [Figura S.1](#) presentada en el [Anexo S](#) muestra la versión final del circuito completo empleado en la simulación del tren de potencia híbrido del vehículo eléctrico ligero. Los elementos, subcircuitos y conexiones están ordenados en la dirección que fluye la potencia, y se agrupan en nueve sistemas:

1. Suministro de potencia (power supply system)
2. Convertidor de potencia (power conversion system)
3. Control de velocidad (speed control system)
4. Sistema mecánico (mechanical system)
5. Acoplamiento mecánico (transmission system)
6. Eje de tracción (traction system)
7. Celda de combustible PEM (fuel cell system)
8. Convertidor de potencia de la celda de combustible (FC power conversion system)
9. Control de flujo de potencia (power control system)

Los primeros 6 sistemas corresponden al circuito del carro de golf. El sistema de la celda de combustible corresponde al subcircuito de la celda de combustible PEM presentada en la [Figura S.2](#).

El sistema del convertidor de potencia de la celda de combustible corresponde al subcircuito del convertidor de potencia CD/CD reductor presentado en la [Figura S.3](#). El sistema incluye los medidores de voltaje y corriente a la salida y entrada del convertidor.

El sistema de control de flujo de potencia consiste en dos interruptores bidireccionales que activan o desactivan los circuitos correspondientes a la celda de combustible y la batería dependiendo del valor de la corriente requerida en la entrada del convertidor.

Los interruptores están controlados por un subcircuito mostrado en la [Figura 6.12](#). La lógica del sistema activa el circuito de la celda de combustible cuando la corriente requerida por la carga es menor a 40 A. Cuando la corriente supera dicho límite, el sistema de control desactiva el circuito de la celda de combustible y activa el circuito de la batería.

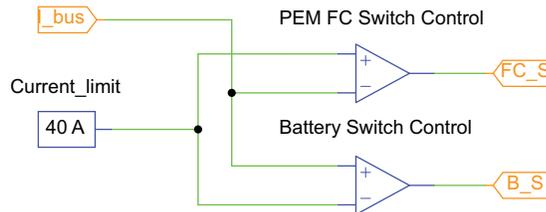


Figura 6.12 Circuito empleado para controlar el flujo de potencia de las baterías y la celda de combustible.

Los parámetros empleados para la simulación del circuito del tren de potencia híbrido corresponden a los mostrados en las tablas [5.2](#), [5.4](#), [5.6](#), [5.8](#), y [5.10](#) para los sistemas del circuito que modela el vehículo eléctrico, mientras que los parámetros empleados para la celda de combustible PEM y el convertidor de potencia corresponden a los mostrados en las tablas [6.2](#) y [6.3](#).

Para mostrar la simulación del circuito se emplearon los datos de velocidad del ciclo de manejo *New York City Cycle* presentado en el [Anexo N](#) debido a que representa mejor las condiciones de manejo de baja velocidad y paradas continuas por tránsito, características de entornos urbanos y ciudades altamente congestionadas [98].

La [Tabla 6.4](#) muestra los parámetros de simulación del sistema híbrido. Los valores de control de simulación fueron establecidos según la frecuencia de operación del circuito que genera la señal PWM y el tiempo que dura el ciclo de manejo. El tiempo total corresponde al tiempo que dura la prueba.

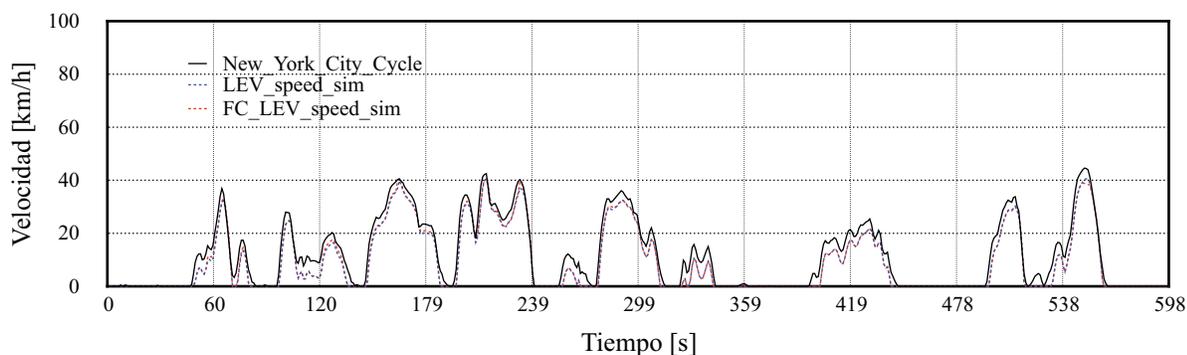
Para alcanzar valores cercanos a la velocidad máxima del ciclo de 44.579 km/h, se cambió el valor de la relación de velocidades en la caja de engranes de 12.5:1 a 6:1. Para la simulación, se consideró un tanque de hidrógeno presurizado, cuyas características se muestran en el [Anexo P](#). La masa total del vehículo (incluyendo baterías, sistema de celdas de combustible y pasajeros) es de 604.76 kg. La masa del sistema de la celda de combustible, incluyendo el tanque de hidrógeno lleno y el controlador es de aproximadamente 12.762 kg, lo cual apenas representa un 2.16 % de la masa total del vehículo.

Tabla 6.4 Parámetros de simulación del sistema híbrido.

	Parámetro	Valor	Unidad
Simulation Control			
	Time step	0.0001	s
	Total time	598	s
	Print time	0	—
	Print step	10000	—
Gear Box			
	Gear ratio	6	—
	Shaft 1 master / slave flag	1	—
	Shaft 2 master / slave flag	0	—
Total Weight			
	Vehicle mass [82]	254	kg
	Battery stack mass [84]	168	kg
	Driver mass	85	kg
	Passenger mass	85	kg
	PEM fuel cell stack mass [94]	10	kg
	PEM fuel cell controller mass [94]	2.5	kg
	Compressed hydrogen cylinder mass	0.263	kg

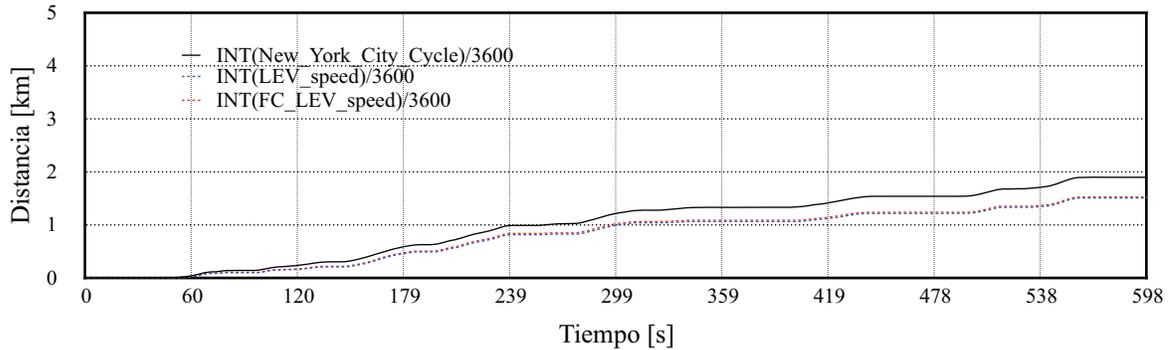
6.2.2.1. Velocidad lineal y distancia

La **Gráfica 6.10** muestra la comparación de los datos del ciclo de manejo *New_York_City_Cycle* con los resultados de la simulación del modelo de vehículo ligero *LEV* y del tren de potencia híbrido *FC_LEV*. El patrón de velocidad obtenido fue el mismo en las dos simulaciones y velocidad máxima alcanzada en el modelo híbrido fue de 40.49 km/h, sin poder alcanzar los 44.579 km/m necesarios para cumplir con el estándar.



Gráfica 6.10 Comparación de los datos de velocidad del ciclo de manejo *New_York_City_Cycle* con los resultados de la simulación del *LEV* y del *FC_LEV*.

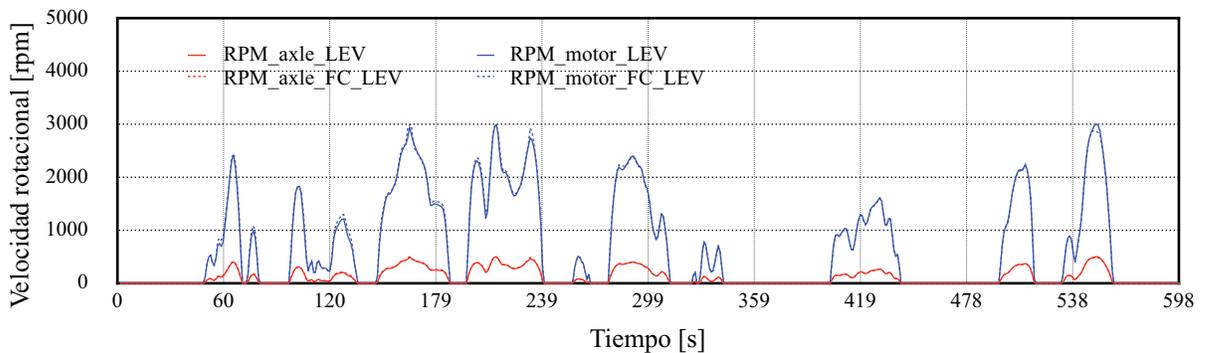
La **Gráfica 6.11** muestra la comparación entre los datos de distancia total del ciclo de manejo y los obtenidos en la simulación del *LEV* y del *FC_LEV*. En ambos casos se recorrió la misma distancia de 1.507 km, faltando 0.0.392 km para completar el recorrido de 1.899 km estipulado por el estándar.



Gráfica 6.11 Comparación de los datos de distancia del ciclo de manejo *New_York_City_Cycle* con los resultados de la simulación del *LEV* y del *FC_LEV*.

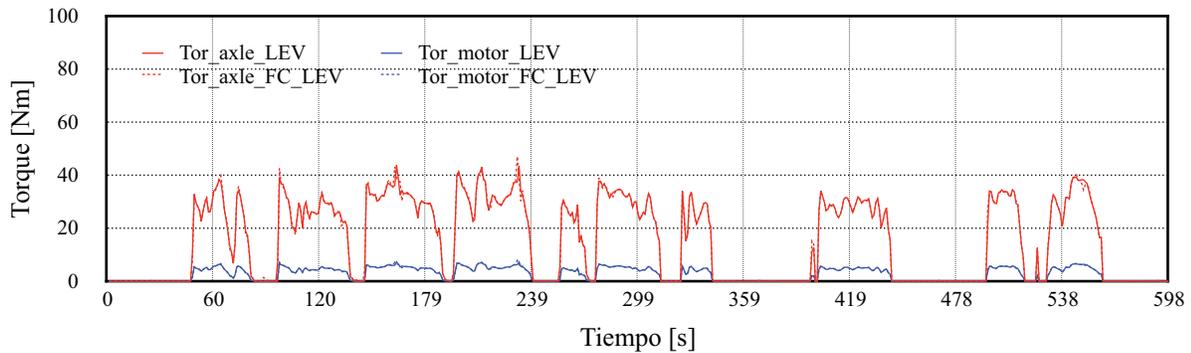
6.2.2.2. Velocidad rotacional y torque

La **Figura 6.12** muestra la comparación de los resultados de velocidad rotacional en el motor y eje de tracción obtenidos al simular el modelo normal *LEV* y del modelo de celdas de combustible híbrido *FC_LEV*. En ambos casos, la velocidad rotacional máxima alcanzada en el motor es de 3000 rpm, lo cual corresponde a un valor cercano a las 3300 rpm en condiciones de potencia nominal. Los valores máximos de 498 rpm registrados en el eje de tracción corresponden a la relación de velocidades de 6:1 en la caja de engranes reductora.



Gráfica 6.12 Comparación de los resultados de velocidad rotacional obtenidos en la simulación del *LEV* y del *FC_LEV*.

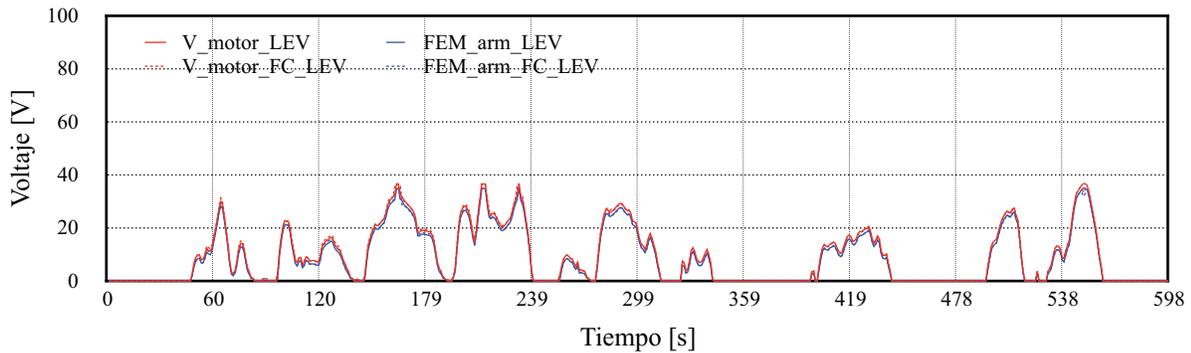
La [Gráfica 6.13](#) muestra la comparación de los resultados de torque en el motor y eje de tracción. El torque máximo alcanzado en el eje de tracción del modelo normal es de 43.744 Nm, mientras que en el modelo híbrido es de 47.086 Nm.



Gráfica 6.13 Comparación de los resultados de torque obtenidos en la simulación del *LEV* y del *FC_LEV*.

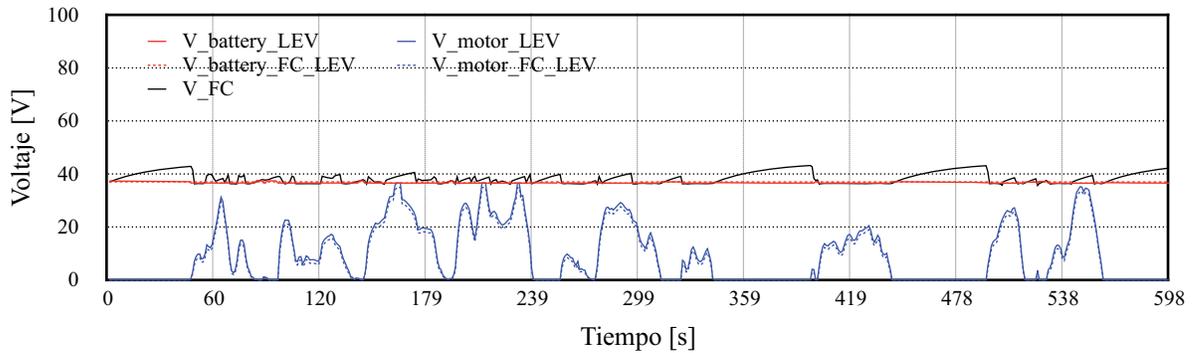
6.2.2.3. Voltaje y corriente

La [Gráfica 6.14](#) muestra los resultados del voltaje en el motor obtenidos de la simulación de los dos modelos. El patrón es el mismo en ambos casos, con un máximo de 36.711 V en las terminales del motor y 35.072 V en la armadura.



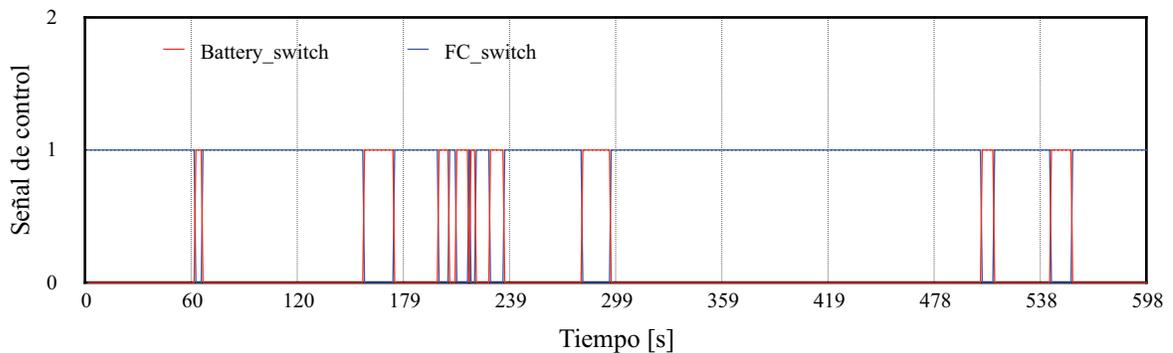
Gráfica 6.14 Comparación de los resultados de voltaje en motor obtenidos en la simulación del *LEV* y del *FC_LEV*.

La [Gráfica 6.15](#) muestra patrón de voltaje registrado en el motor y baterías en la simulación de ambos modelos, además del voltaje en la celda de combustible. Es posible observar que el comportamiento de la tensión en la celda de combustible es variable en un rango de 36.046 a 44.149 V. Para disminuir dichas variaciones, es necesario realizar un análisis más detallado para ajustar los parámetros de operación en el control PWM del convertidor CD/CD reductor mostrado en la [Gráfica 6.9](#).



Gráfica 6.15 Comparación de los resultados de voltaje en motor, baterías y celda de combustible obtenidos en la simulación del *LEV* y del *FC_LEV*.

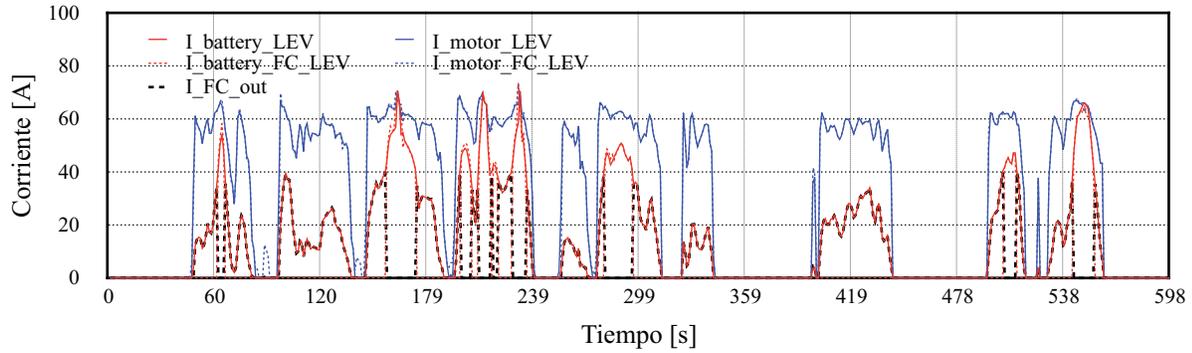
La [Gráfica 6.16](#) muestra la señal de control registrada en los interruptores de la batería y la celda de combustible. El circuito lógico que controla los interruptores mostrado en la [Figura 6.12](#) genera una señal de 0 para cerrado y 1 para abierto. Es posible observar los intervalos de tiempo en los que opera la celda de combustible, que corresponden rangos de corriente menores a 40 A y los que corresponden a la operación de la batería para rangos mayores a 40 A.



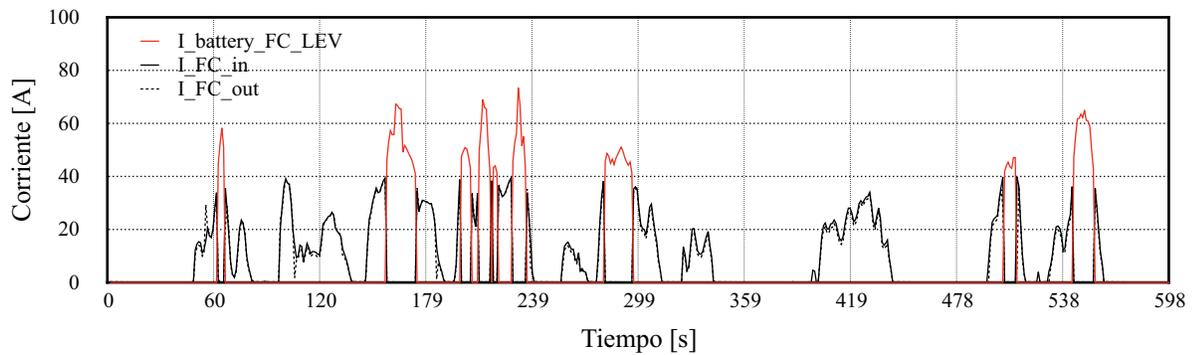
Gráfica 6.16 Señal de conmutación registrada en los interruptores para controlar el flujo de potencia en la batería y la celda de combustible.

La [Gráfica 6.17](#) muestra la comparación de los resultados de corriente en motor y baterías obtenidos en la simulación de los dos modelos. El patrón y el valor máximo de corriente alcanzada en el motor es de 70.608 A para las dos simulaciones. Es posible observar la señal de corriente proveniente de la celda de combustible a la salida del convertidor CD/CD reductor en rangos de menores a 40 A. Para la batería, la señal de corriente es observada a partir de 40 A. La [Gráfica 6.18](#) muestra de forma aislada las señales de corriente en baterías y celda de combustible. El patrón de operación de ambas fuentes de voltaje coincide con patrón de conmutación mostrado en la [Gráfica 6.16](#).

6. Modelo de Arquitectura Híbrida de Celdas de Combustible

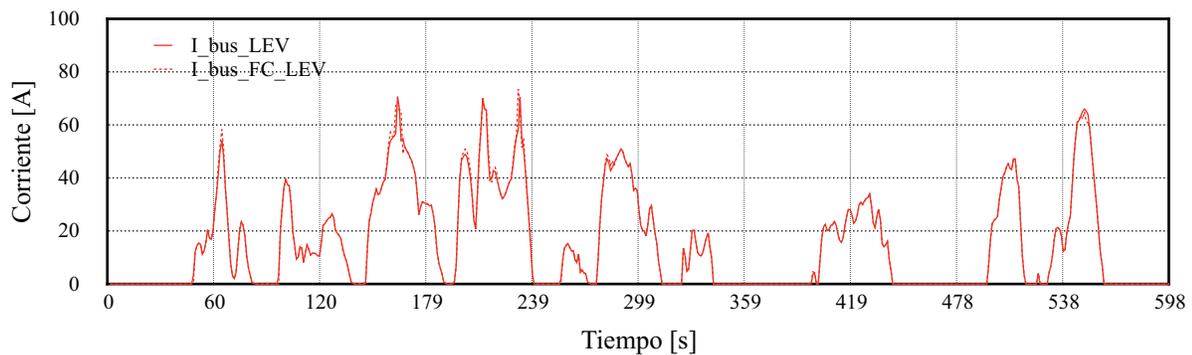


Gráfica 6.17 Comparación de los resultados de corriente en motor y baterías obtenidos en la simulación del *LEV* y del *FC_LEV*.



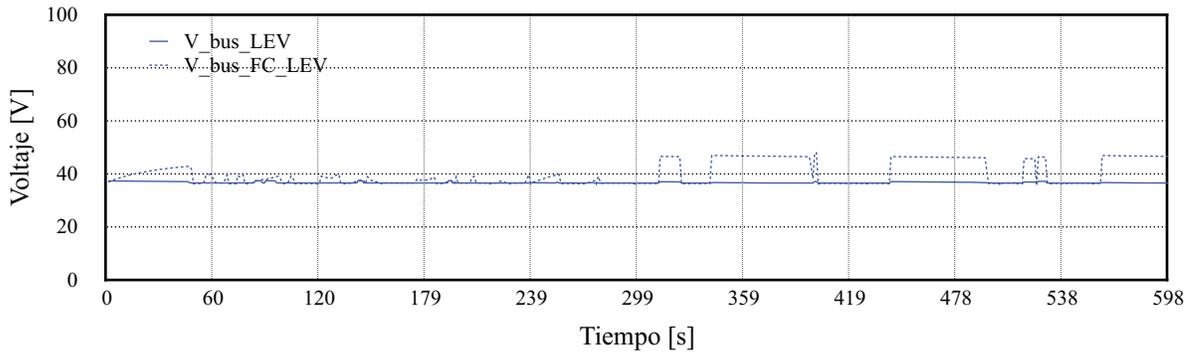
Gráfica 6.18 Corriente en baterías y celda de combustible obtenidos en la simulación del *FC_LEV*.

En la [Gráfica 6.19](#) se puede observar el patrón de corriente registrada en el bus principal a la entrada del controlador de velocidad.



Gráfica 6.19 Comparación de los resultados de corriente en el bus principal obtenidos en la simulación del *LEV* y del *FC_LEV*.

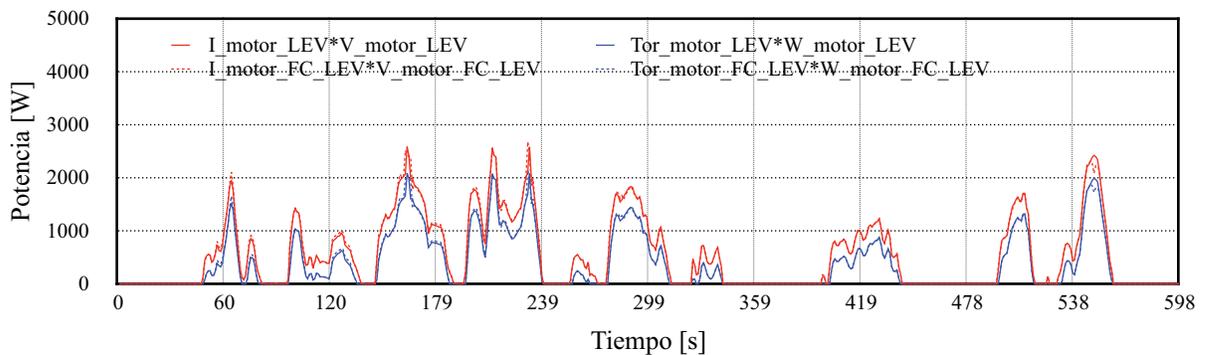
La [Gráfica 6.20](#) muestra que el voltaje en el bus principal se mantiene en valores continuos cercanos a 36 V, que corresponde al valor de tensión nominal de las baterías, convertidor *DC/DC chopper* y motor. Las perturbaciones en el voltaje son causadas por los ajustes requeridos en el diseño del convertidor de la celda de combustible.



Gráfica 6.20 Comparación de los resultados de voltaje en el bus principal obtenidos en la simulación del *LEV* y del *FC_LEV*.

6.2.2.4. Potencia y energía

La [Gráfica 6.21](#) muestra la comparación de la potencia eléctrica y mecánica en el motor calculada a partir de los valores de corriente, voltaje, torque y velocidad angular registrados durante la simulación de ambos modelos.

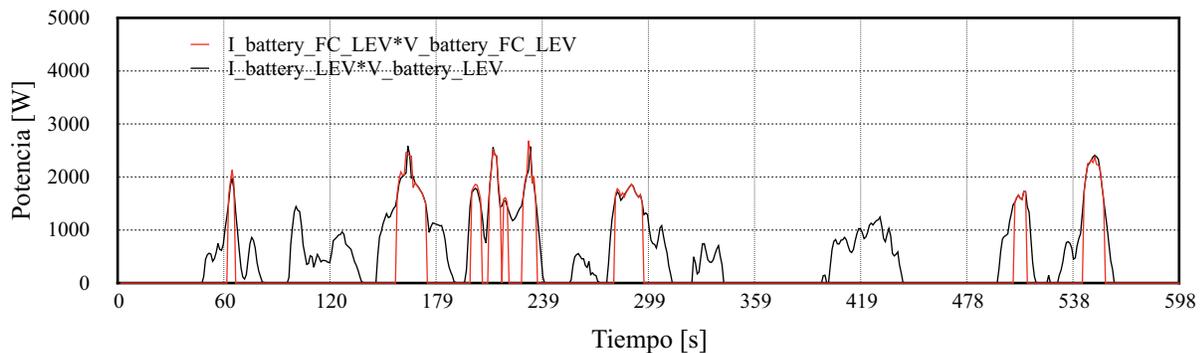


Gráfica 6.21 Comparación de la potencia eléctrica y mecánica en el motor calculada a partir de los resultados obtenidos en la simulación del *LEV* y del *FC_LEV*.

6. Modelo de Arquitectura Híbrida de Celdas de Combustible

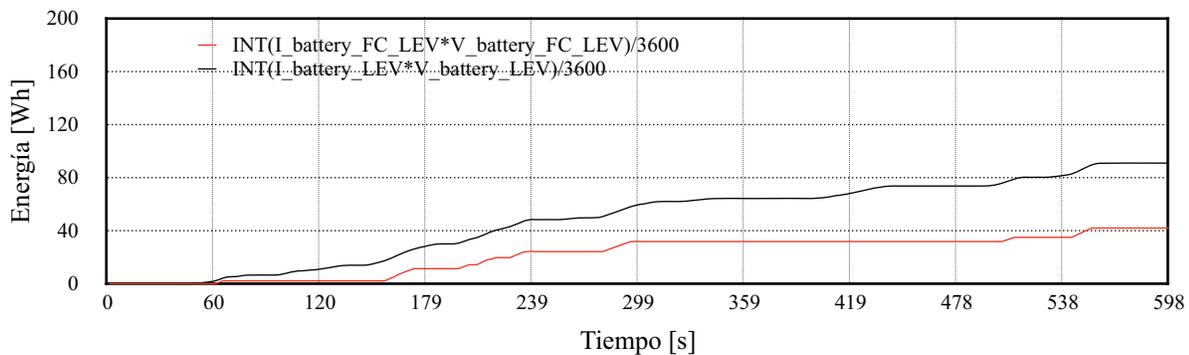
El valor de potencia eléctrica máxima registrado en las terminales de motor fue de 2678.129 W, mientras que la potencia mecánica máxima registrada en el eje del rotor fue de 2142.394 W. Para estos valores de potencia a la entrada y salida del motor, corresponde una eficiencia de 80.0%, valor que esta dentro de los rangos de desempeño mostrados en la sección 4.4.2. [Modelo orientado hacia atrás \(backward-facing model\)](#).

La [Gráfica 6.22](#) muestra la comparación entre los valores de potencia en baterías calculados a partir de los valores obtenidos en la simulación de los dos modelos. Se puede observar que en el modelo híbrido, las baterías no son requeridas durante todo el recorrido, solo en los intervalos de tiempo en donde la potencia necesaria es mayor a 1500 W y la velocidad es mayor a 20 km/h aproximadamente.



Gráfica 6.22 Comparación de la potencia en la batería calculada a partir de los resultados obtenidos en la simulación del *LEV* y del *FC_LEV*.

La [Gráfica 6.23](#) muestra el consumo total de energía aproximado, tanto por el modelo híbrido como por el modelo normal del vehículo eléctrico.

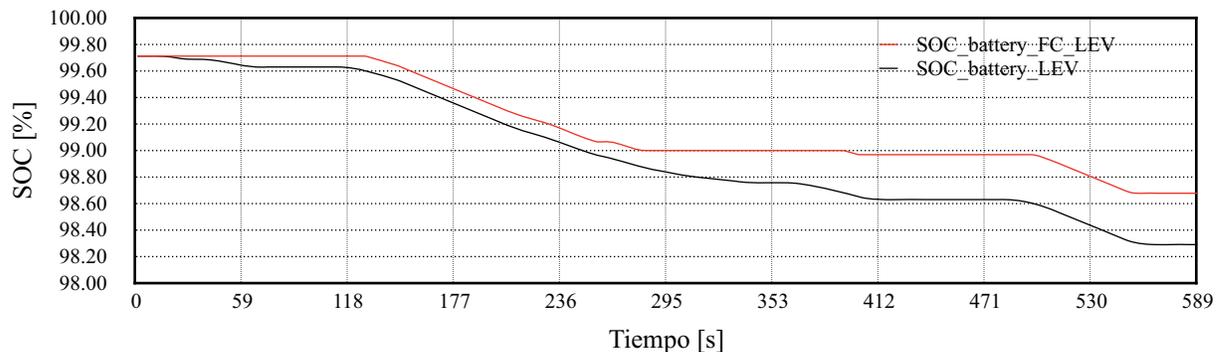


Gráfica 6.23 Comparación de la energía suministrada por las baterías calculada a partir de los resultados obtenidos en la simulación del *LEV* y del *FC_LEV*.

La energía calculada durante la simulación del modelo normal es de aproximadamente 90.971 Wh, mientras que la simulación del modelo híbrido muestran un requerimiento de 41.985 Wh. La diferencia corresponde a la energía ahorrada en la batería por la integración de las celdas de combustible

6.2.2.5. Descarga de la batería

La [Gráfica 6.24](#) muestra la comparación de las curvas de descarga en la batería obtenidas con los dos modelos. Debido al ahorro de energía mostrado en la [Gráfica 6.23](#), el estado de carga en el modelo híbrido se mantiene en un valor mayor de 99.35% respecto al 98.94% obtenido en la simulación del sistema normal.



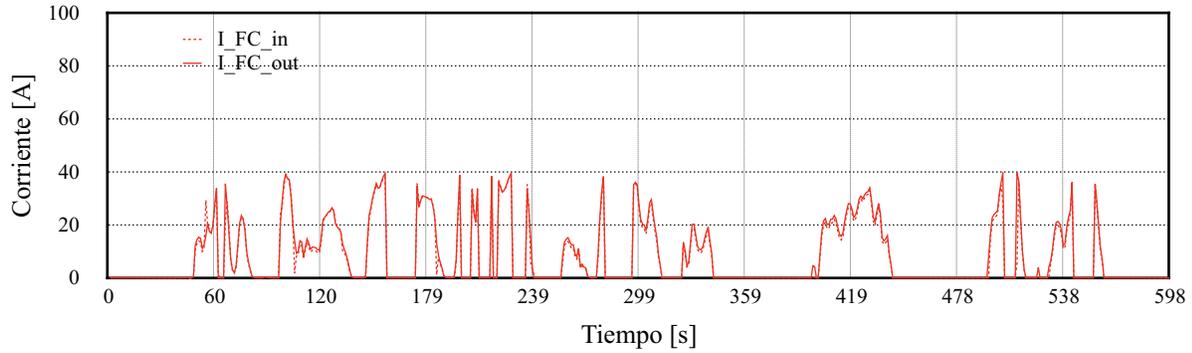
Gráfica 6.24 Comparación de las curvas de descarga obtenidas en la simulación del *LEV* y del *FC_LEV*.

6.2.2.6. Consumo de hidrógeno

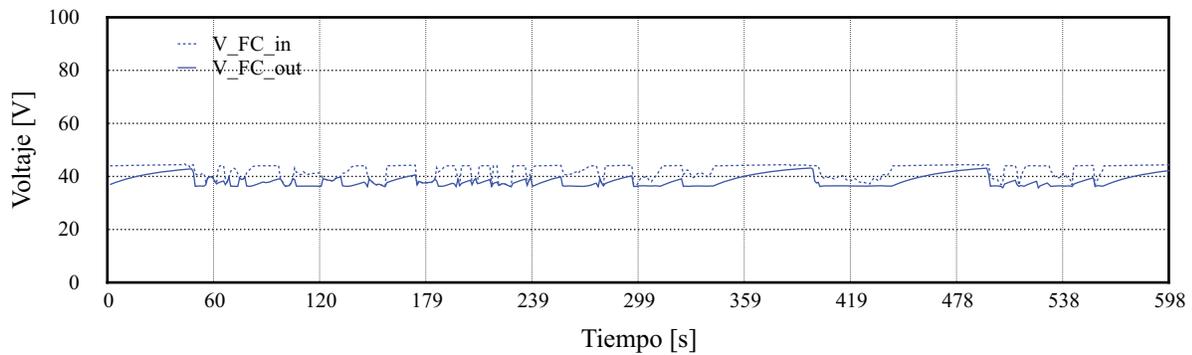
Las gráficas [6.25](#) y [6.26](#) muestran los valores de corriente y voltaje en la entrada y salida del convertidor CD/CD reductor diseñado para simular la configuración híbrida. El patrón de comportamiento en las señales de corriente es igual. Es posible observar que la celda de combustible opera solo en los intervalos de tiempo correspondientes a rangos de corriente menores a 40 A. La señales de voltaje muestran valores que oscilan en un rango de 36.046 a 44.149 V, lo cual corresponde a las fallas en el diseño del convertidor de potencia, debido a que la tensión a la salida del convertidor debiera ser una señal constante de 36 V.

La [Gráfica 6.27](#) muestra los valores calculados de potencia a la salida del convertidor CD/CD reductor. La potencia proporcionada por la celda corresponde al patrón de la corriente para intervalos de operación con un rango menor a 1500 W.

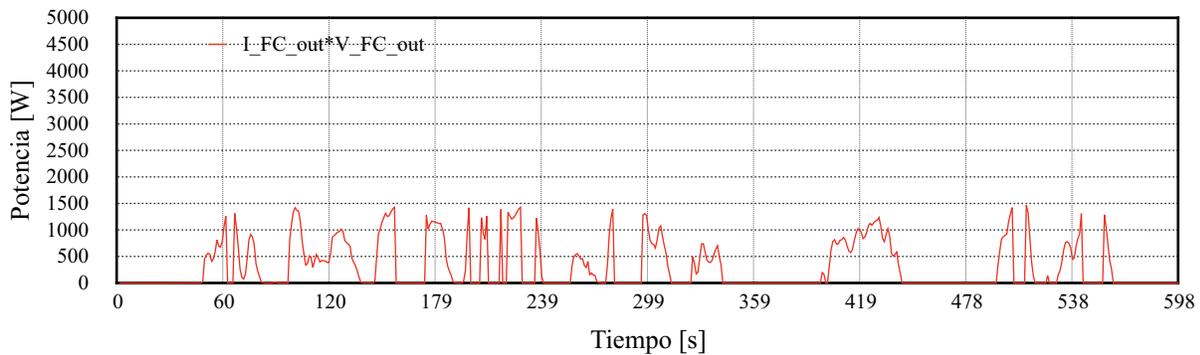
6. Modelo de Arquitectura Híbrida de Celdas de Combustible



Gráfica 6.25 Valores de corriente en la entrada y salida del convertidor CD/CD reductor de la celda de combustible obtenidas durante la simulación.

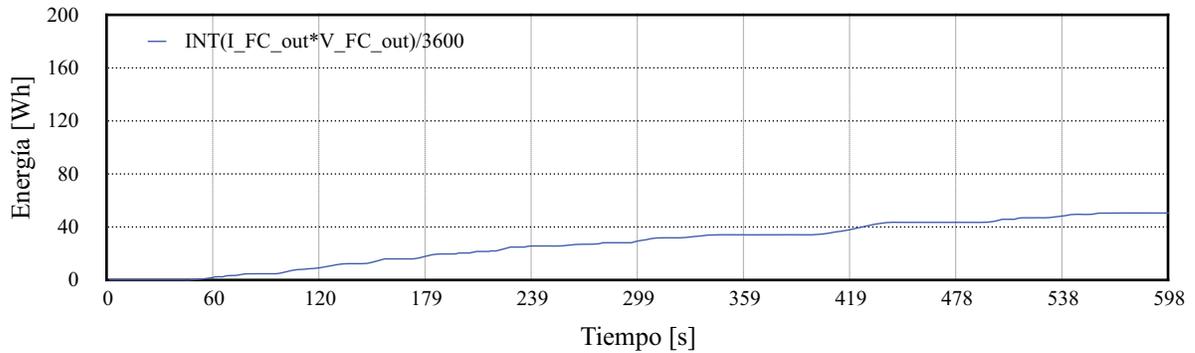


Gráfica 6.26 Valores de voltaje en la entrada y salida del convertidor CD/CD reductor de la celda de combustible obtenidas durante la simulación.



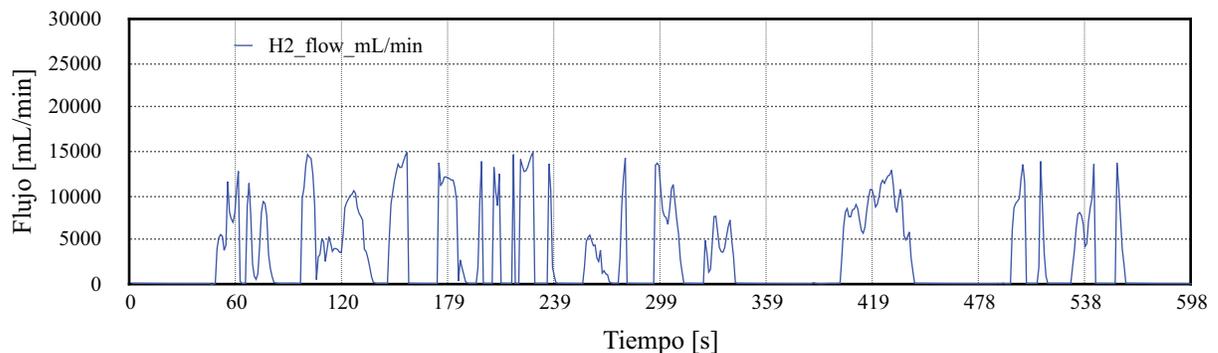
Gráfica 6.27 Potencia a la salida del convertidor CD/CD reductor de la celda de combustible calculada a partir de los valores obtenidos en la simulación.

La [Gráfica 6.28](#) muestra la energía suministrada por la celda de combustible de 50.533 Wh calculada a partir de los datos de potencia. Al sumar a la energía proporcionada por la batería de 41.985 Wh da un total de 92.518 Wh.



Gráfica 6.28 Energía suministrada por la celda de combustible calculada a partir de los datos obtenidos en la simulación.

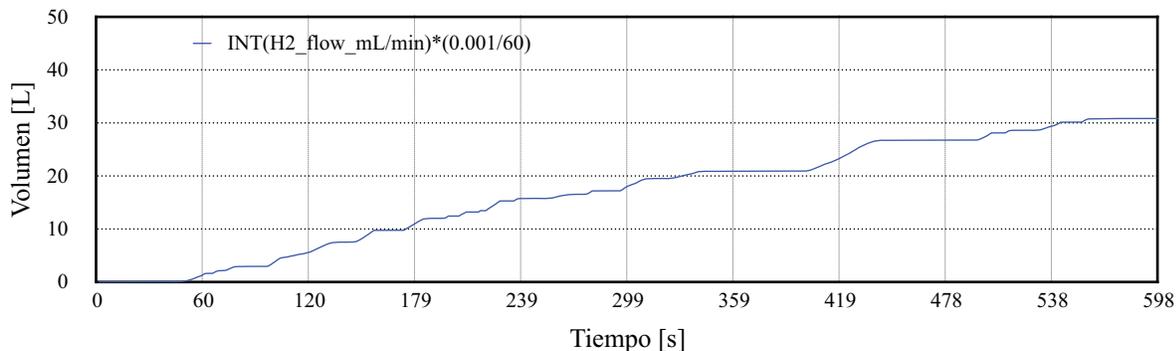
La [Gráfica 6.29](#) muestra el flujo de hidrógeno en la celda de combustible estimado a partir de los datos de potencia y la curva de consumo proporcionada por el fabricante mostrada en la [Gráfica 6.3](#). Es posible observar que el valor máximo de hidrógeno corresponde a picos de 14921.6 mL/min.



Gráfica 6.29 Flujo de hidrógeno en la celda de combustible estimado a partir de los datos de potencia.

La [Gráfica 6.30](#) muestra el volumen de hidrógeno estimado a partir de los datos de flujo. Un total de 30.835 litros de hidrógeno serían requeridos para operar la celda en las condiciones establecidas por el ciclo de manejo y el modelo con la configuración híbrida propuesta.

Para un tanque de hidrógeno presurizado con las características mostradas en el [Anexo P](#), el volumen de hidrógeno consumido correspondería al 20.556% de total de la capacidad de almacenamiento del tanque de 150 litros normales de hidrógeno.



Gráfica 6.30 Volumen de hidrógeno requerido por la celda de combustible.

6.2.2.7. Análisis de autonomía

La [Tabla 6.5](#) muestra los resultados de las simulaciones del ciclo de manejo *New York City Cycle* empleando el modelo del sistema normal (solo baterías) y del sistema híbrido (baterías y celdas de combustible).

Los valores de distancia recorrida, velocidad máxima y velocidad promedio son muy cercanos en ambos casos. La energía requerida en baterías es menor en la simulación del sistema híbrido que en el sistema normal, y la diferencia corresponde a la energía entregada por la celda de combustible.

El estado de carga final es mayor en el caso del sistema híbrido, debido a que durante el recorrido, no toda la potencia fue requerida por las baterías y se descargaron en menor medida.

El hidrógeno necesario para alimentar la celda de combustible corresponde a 30.835 litros normales, almacenados en un tanque con capacidad de 150 L.N. a una presión de 2000 psig (13.789 MPa). El volumen de hidrógeno ocupado por la celda corresponde a un aproximado de 86.7916 Wh para un valor de poder calorífico inferior (LHV) y de 102.04 Wh para un valor de poder calorífico superior (HHV) como se muestra en el [Anexo P](#).

Asumiendo que la mayor parte del agua producida durante la reacción del hidrógeno con el oxígeno es en forma de vapor, la eficiencia de conversión de la celda de combustible es de 58.223% para un poder calorífico inferior (LHV). Si la mayor parte del agua a la salida de la celda fuera líquida, el eficiencia de consumo sería de 49.522%.

Tabla 6.5 Resultados de la simulación del sistema híbrido para el ciclo de manejo *New_York_City_Cycle*.

Parámetro	Valor	Unidad
Tiempo real de cómputo	150	min
Duración de la prueba		
Segundos	598	s
Horas	0.166	h
Tiempo efectivo		
Segundos	408	s
Horas	0.113	h
Ciclo de manejo		
Distancia recorrida	1.899	km
Velocidad máxima	44.579	km/h
Velocidad promedio	11.426	km/h
Simulación del sistema normal		
Distancia recorrida	1.507	km
Velocidad máxima	40.57	km/h
Velocidad promedio	9.077	km/h
Energía requerida en baterías	90.971	Wh
Estado de carga final	98.94	%
Simulación del sistema híbrido		
Distancia recorrida	1.507	km
Velocidad máxima	40.49	km/h
Velocidad promedio	9.185	km/h
Energía requerida en baterías	41.985	Wh
Estado de carga final	99.35	%
Energía entregada por la celda de combustible	50.533	Wh
Consumo de hidrógeno	30.835	L.N.
Energía equivalente del hidrógeno (LHV)	86.7916	Wh
Energía equivalente del hidrógeno (HHV)	102.04	Wh

La [Tabla 6.6](#) muestra los resultados del análisis de autonomía a partir de los valores obtenidos en la simulación del sistema híbrido empleado el ciclo de manejo *New York City Cycle*. Se puede apreciar que los rangos de autonomía, tiempo y duración se extienden hasta un 63.3 %. El uso de celdas de combustible implica un consumo continuo de hidrógeno. Para satisfacer el consumo durante los recorridos, el volumen de hidrógeno necesario es de 3692.1 litros normales con una masa aproximada de 0.309 kg. Según publicaciones técnicas especializadas, la masa del hidrógeno representa el 5% de la masa total del tanque [31, 99, 100]. Bajo esa consideración, el peso del tanque lleno sería de aproximadamente de 6.497 kg, y almacenaría un equivalente a 10.312 kWh de energía para

6. Modelo de Arquitectura Híbrida de Celdas de Combustible

un valor de poder calorífico inferior (LVH). Añadir el sistema de celdas de combustible y el tanque de hidrógeno comprimido representa un incremento del 3.186 % en la masa total del vehículo.

Tabla 6.6 Parámetros de autonomía del sistema híbrido para el ciclo de manejo *New_York_City_Cycle*.

	Parámetro	Valor	Unidad
Ciclo de manejo	New York City Cycle		
	Límite de profundidad de descarga	80	%
Porcentaje de descarga en baterías			
	Sin celda de combustible	1.060	%
	Con celda de combustible	0.650	%
	Diferencia de descarga	0.410	%
Recorridos posibles			
	Sin celda de combustible	75.472	—
	Con celda de combustible	123.077	—
	Incremento de recorridos	47.605	—
Autonomía aproximada			
	Sin celda de combustible	113.736	km
	Con celda de combustible	185.477	km
	Porcentaje de incremento de autonomía	63.077	%
Tiempo de operación			
	Sin celda de combustible	12.537	h
	Con celda de combustible	20.444	h
	Porcentaje de incremento de tiempo	63.077	%
Duración de las baterías			
	Sin celda de combustible	8.553	h
	Con celda de combustible	13.949	h
	Porcentaje de incremento de duración	63.077	%
Hidrógeno necesario			
	Volumen en condiciones normales	3795.077	L
	Energía equivalente (LHV)	10.601	kWh
	Energía equivalente (HHV)	12.544	kWh
Masa del tanque de hidrógeno			
	Masa del hidrógeno	0.318	kg
	Porcentaje de masa total del tanque ocupada por hidrógeno	5	%
	Masa del tanque lleno de hidrógeno	6.361	kg
Masa del vehículo			
	Sin celdas de combustible	592	kg
	Con celdas de combustible	610.861	kg
	Porcentaje de incremento de masa	3.186	%

La [Tabla 6.7](#) muestra los resultados de la simulación del sistema completo para los cuatro ciclos de manejo presentados en la sección 5.4. [Simulación de ciclos de manejo](#) comparados con los resultados de la simulación del sistema híbrido de celdas de combustible. La diferencia de valores de distancia recorrida, velocidad máxima y velocidad promedio para ambos sistemas se mantienen en rangos estrechos. Esto se debe a que los patrones de voltaje y corriente en el bus principal fueron muy similares para ambos casos.

Tabla 6.7 Resultados de la simulación de los sistemas normal e híbrido para los cuatro ciclos de manejo.

	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4	
Tiempo real de cómputo	35	48	133	150	min
Duración de la prueba					
Segundos	135	195	589	598	s
Horas	0.038	0.054	0.164	0.166	h
Tiempo efectivo					
Segundos	98	135	444	408	s
Horas	0.027	0.038	0.123	0.113	h
Ciclo de manejo					
Distancia recorrida	0.660	0.994	3.324	1.899	km
Velocidad máxima	40.000	50.000	49.100	44.579	km/h
Velocidad promedio	17.770	18.350	20.280	11.426	km/h
Simulación del sistema normal					
Distancia recorrida	0.564	0.835	2.869	1.507	km
Velocidad máxima	36.580	40.520	40.520	40.570	km/h
Velocidad promedio	15.050	15.410	17.530	9.077	km/h
Energía requerida en baterías	32.720	48.880	168.067	90.971	Wh
Estado de carga final	99.430	99.299	98.067	98.940	%
Tiempo de operación de las baterías	98	135	444	408	s
Porcentaje del tiempo efectivo	100	100	100	100	%
Simulación del sistema híbrido					
Distancia recorrida	0.592	0.841	2.889	1.507	km
Velocidad máxima	40.530	40.530	40.530	40.490	km/h
Velocidad promedio	15.780	15.530	17.660	9.185	km/h
Energía requerida en baterías	21.090	37.920	122.610	41.985	Wh
Estado de carga final	99.530	99.390	98.70	99.350	%
Tiempo de operación de las baterías	37	71	209	80	s
Porcentaje del tiempo efectivo	37.755	52.592	47.072	19.607	%
Energía entregada por la celda	13.633	11.401	47.170	50.533	Wh
Tiempo de operación de la celda	61	64	235	328	s
Porcentaje del tiempo efectivo	62.244	47.407	52.927	80.392	%

En la simulación del sistema híbrido, el valor de la energía requerida en baterías disminuyó en relación del porcentaje de tiempo efectivo que la celda de combustible proporcionó potencia, lo cual se ve reflejado en el aumento del estado de carga final.

El volumen de hidrógeno consumido aumentó en relación de la energía entregada por la celda de combustible. La [Tabla 6.8](#) muestra la energía equivalente al volumen de hidrógeno para valores de poder calorífico inferior y superior. La eficiencia de conversión para un poder calorífico inferior son mayores que para un poder calorífico alto. El fabricante de la celda de combustibles indica que el valor de referencia para la eficiencia de la celda es de 40% en condiciones de operación nominal ([Tabla 6.1](#)).

Tabla 6.8 Valores de consumo de hidrógeno obtenidos en la simulación de los sistemas normal e híbrido para los cuatro ciclos de manejo.

	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4	
Consumo de hidrógeno	8.750	7.120	29.680	30.835	L.N.
Lower Heating Value (LHV)					
Energía equivalente	24.440	19.880	82.900	86.792	Wh
Eficiencia de conversión	55.769	57.344	56.899	58.223	%
Higher Heating Value (HHV)					
Energía equivalente	28.922	23.534	98.105	101.923	Wh
Eficiencia de conversión	47.126	48.440	48.081	49.579	%

La [Tabla 6.9](#) muestra una comparación de los parámetros de autonomía obtenidos en la simulación del ambos sistemas para los cuatro ciclos de manejo. El porcentaje de descarga de la batería disminuye, lo que permite un mayor número de recorridos. La autonomía del vehículo se incrementa hasta en un 63% respecto a la autonomía original para el ciclo 4, que es el que más porcentaje de tiempo efectivo mantuvo a la celda en operación. El tiempo de operación y la duración de las baterías se incrementan en la misma proporción que la autonomía.

El volumen de hidrógeno requerido en la celda de combustible aumenta en relación a la cantidad de recorridos posibles, lo que significa un incremento de la energía a bordo del vehículo, pero también significa el aumento en la masa del tanque.

Para aplicaciones en vehículos, el porcentaje de la masa total del tanque ocupado por hidrógeno también es denominado densidad de almacenamiento y equivale a la masa de gas presurizado por unidad de masa del cilindro contenedor [31].

Tabla 6.9 Resultados del análisis de autonomía de los sistemas normal e híbrido para los cuatro ciclos de manejo.

	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4	
Límite de profundidad de descarga	80	80	80	80	%
Porcentaje de descarga de la batería					
Sin celda de combustible	0.570	0.701	1.800	1.060	%
Con celda de combustible	0.470	0.610	1.330	0.650	%
Diferencia de descarga	0.100	0.091	0.470	0.410	%
Recorridos posibles					
Sin celda de combustible	140.351	114.123	44.444	75.472	—
Con celda de combustible	170.213	131.148	60.150	123.077	—
Incremento de recorridos	29.862	14.918	15.706	47.605	—
Autonomía aproximada					
Sin celda de combustible	79.158	95.292	127.511	113.736	km
Con celda de combustible	100.766	110	173.774	185.477	km
Porcentaje de incremento de autonomía	27.297	15.744	36.282	63.077	%
Tiempo de operación					
Sin celda de combustible	5.263	6.182	7.272	12.537	h
Con celda de combustible	6.383	7.104	9.841	20.444	h
Porcentaje de incremento de tiempo	21.277	14.918	35.338	63.077	%
Duración de las baterías					
Sin celda de combustible	3.821	4.280	5.481	8.553	h
Con celda de combustible	4.634	4.918	7.419	13.949	h
Porcentaje de incremento de duración	21.277	14.918	35.338	63.077	%
Hidrógeno necesario					
Volumen en condiciones normales	1489.362	933.770	1785.263	3795.077	L.N.
Energía equivalente (LHV)	4.160	2.608	4.986	10.601	kWh
Energía equivalente (HHV)	4.923	3.086	5.901	12.544	kWh
Masa del tanque de hidrógeno					
Masa del hidrógeno	0.125	0.078	0.150	0.318	kg
Porcentaje de masa total del tanque ocupada por hidrógeno [31, 99, 100]	5	5	5	5	%
Masa del tanque lleno de hidrógeno	2.621	1.643	2.992	6.361	kg
Masa del tanque y las celdas	15.121	14.142	15.492	18.861	kg
Masa del sistema híbrido					
Sin celdas de combustible	592	592	592	592	kg
Con celdas de combustible	607.121	606.143	607.492	610.861	kg
Porcentaje de incremento de masa	2.554	2.389	2.617	3.186	%

El valor de referencia de la densidad almacenamiento de hidrógeno comprimido es de $0.050 \text{ kg}_{\text{H}_2} / \text{kg}_{\text{tanque}}$, por lo que la masa del tanque lleno sería de 1.643 kg a 6.361 kg, con una capacidad de 933.770 L.N. y 3795.077 L.N. respectivamente.

El valor de la masa del tanque con hidrógeno puede parecer muy baja y una capacidad muy alta de energía equivalente. Es importante recordar que, después de los elementos empleados en la obtención de energía por fisión nuclear, el hidrógeno es el elemento con mayor densidad gravimétrica de energía (alrededor de 3 veces más energía por unidad de masa que la gasolina). La densidad gravimétrica del hidrógeno en condiciones normales es de 33.33 kWh/kg para un poder calorífico inferior (LHV) y 39.44 kWh/kg para un poder calorífico superior (HHV).

Como referencia, los tanques de hidrógeno de cuerpo de aluminio envuelto por fibra compuesta y resina epoxi empleados en vehículos comerciales con un volumen de 30 a 40 litros tienen la capacidad de almacenar de 1.3 a 1.5 kg, a una presión de 350 bar (35000 kPa). Esto significa que a temperatura ambiente de 20 °C, pueden almacenar 17 899.761 litros normales de hidrógeno, con un peso total aproximado de 31.5 kg y una energía equivalente de 49.999 kWh para un poder calorífico inferior (LHV) y 59.166 kWh para un poder calorífico superior (HHV).

El rango de incremento de masa, incluyendo la celda de combustible, el control y el tanque de hidrógeno comprimido, es de 2.554 % a 3.186 % del total del vehículo, por lo que no se espera un incremento sustancial en los requerimientos de torque y corriente en el motor al aumentar los rangos de autonomía y tiempo de operación del vehículo, así como la duración de la baterías.

Resulta difícil considerar el incremento la autonomía y tiempo de operación del vehículo aumentando el número de baterías a bordo, debido a que la energía máxima disponible del banco de seis baterías es de 9 kWh con una masa de 168 kg, lo que supondría una densidad gravimétrica de energía de 0.053 kWh/kg.

La masa extra de las baterías para cubrir los requerimientos de energía equivalente del hidrógeno sería de 58.226 kg a 200.010 kg usando como referencia el valor de poder calorífico inferior (LHV), lo que supondría un incremento de hasta 33.78 % en la masa total del vehículo, lo cual implica una mayor demanda de potencia y por lo tanto, una mayor cantidad de baterías extra para satisfacer los nuevos requerimientos de energía.

6.3. Diagrama de conexión

La Figura 6.13 muestra un diagrama de conexión de la celda al carro de golf de acuerdo a la configuración empleada para simular los ciclos de manejo mostrada en la Figura 6.1 y el diagrama de instalación de la celda de combustible mostrado en el manual de especificaciones técnicas proporcionado por el fabricante [94].

La celda de combustible incluye un controlador que regula la entrada de hidrógeno por medio de una válvula de suministro eléctrica conectada al tanque de hidrógeno comprimido y la entrada de aire a por medio de dos ventiladores. El convertidor requiere de un suministro de 13V de corriente continua, los ventiladores y válvulas requieren 12 V de corriente continua cada uno. Es posible suministrar potencia al sistema de control por medio de un convertidor reductor CD/CD conectado a la batería por medio del bus principal de 36 V. La terminal positiva de la celda de combustible está conectada al controlador, y la terminal negativa se conecta directamente al convertidor de potencia encargado de adecuar la potencia a los requerimientos del motor.

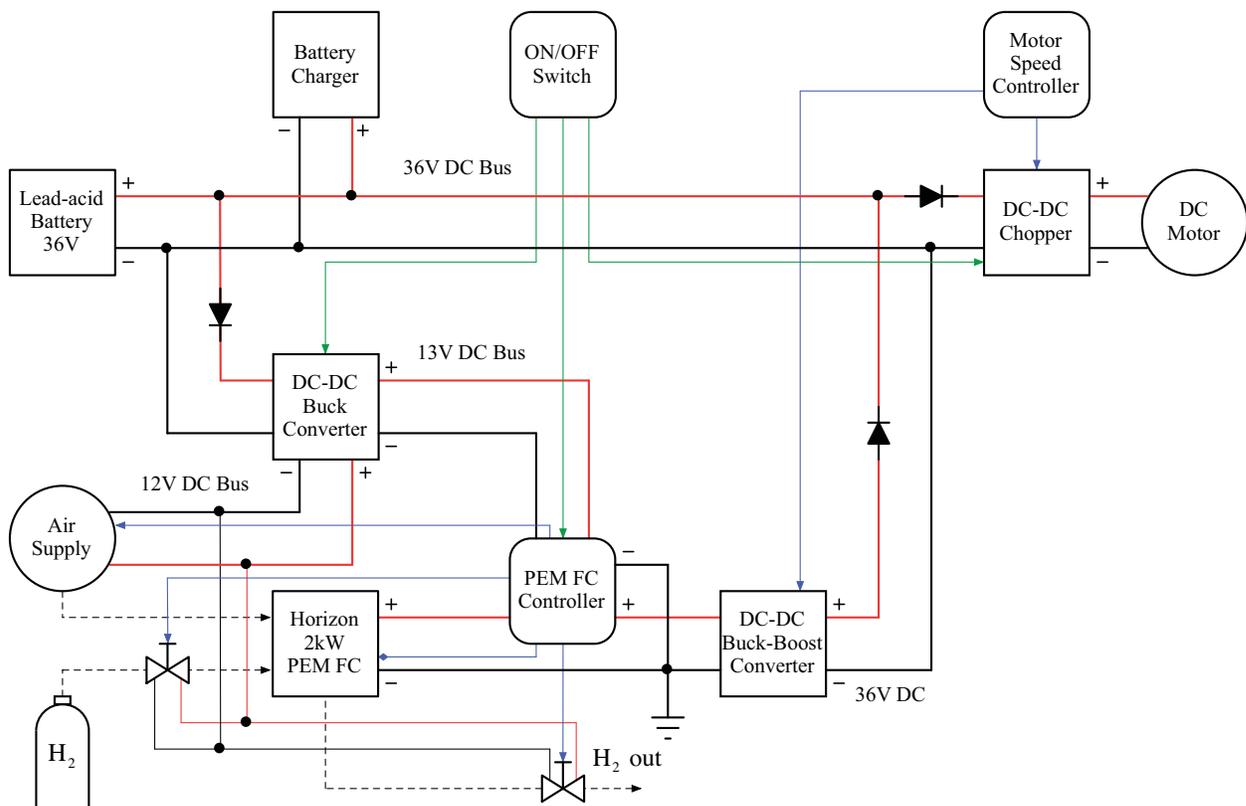


Figura 6.13 Diagrama de conexión del sistema de la celda de combustible al carro de golf.

7. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se mostró el proceso para el desarrollo de un modelo básico que describe un vehículo eléctrico ligero (carro de golf), la simulación del sistema y sus componentes.

También se muestra el proceso para el desarrollo de un modelo eléctrico de una celda de combustible PEM comercial, el diseño teórico de un convertidor de potencia y el sistema de control que permitan integrar y simular la operación de una planta de potencia con arquitectura híbrida.

7.1. Conclusiones generales

El análisis de flujos de potencia en los componentes de un vehículo eléctrico ligero se compone de cinco etapas principales:

1. Identificación del sistema real y sus condiciones de operación.
2. Formulación de un modelo básico del sistema real.
3. Experimentación y pruebas para obtener parámetros de operación.
4. Verificación y corrección del modelo básico.
5. Simulación de un modelo inicial.

Los componentes del sistema real constituyen subsistemas que deben ser analizados de forma:

- **Individual.** Cada subsistema se constituye de mecanismos, piezas o elementos que pueden ser explicados por modelos más simples.
- **Integrada.** El desempeño de un subsistema o componente influye en el desempeño del tren de potencia completo.

Los parámetros que son necesarios para describir el funcionamiento del sistema real y de cada subsistema son de tipo:

- **Intrínseco.** Aquellos parámetros que son específicos de cada componente y que no dependen directamente de las condiciones ambientales o de la variación del tiempo (dimensiones, masa, elementos de diseño, constantes de operación, materiales, sustancias químicas).
- **Extrínseco.** Son los parámetros que describen las condiciones ambientales y características del camino (temperatura, presión, volumen, velocidad y dirección del viento, tipo y rugosidad del camino, ángulo de inclinación).

7.2. Análisis de resultados

A continuación, se presentan las conclusiones a partir de los resultados obtenidos durante las etapas de experimentación, simulación y análisis de la configuración híbrida.

7.2.1. Pruebas de campo

Se aplicó una metodología efectiva de adquisición de datos, debido a que las mediciones registraron valores y patrones de velocidad, voltaje y corriente adecuados para verificar las hipótesis planteadas en el modelo inicial.

Es importante verificar el estado inicial de los componentes de vehículo (masa del vehículo, estado de carga en las baterías, presión en las llantas) con el objetivo de tener parámetros de referencia para evaluar su desempeño durante los recorridos.

Las conexiones eléctricas y mecánicas de un carro de golf son robustas, sin embargo, existe una probabilidad riesgo de dañar sus componentes y también el equipo de medición durante las pruebas si no se toman las medidas de seguridad necesarias.

La ruta elegida para las pruebas permitió observar el comportamiento de los componentes del tren de potencia del vehículo en diferentes condiciones de manejo y establecer intervalos de velocidad constante para evaluar el modelo en estado estacionario.

La máxima velocidad alcanzada en el vehículo fue de 17.714 km/h sobre un camino de grava, lo cual indica que el carro de golf puede alcanzar una velocidad de 19.728 km/h en condiciones de asfalto, debido a la diferencia entre coeficientes de resistencia a la rodadura de ambas superficies.

Las mediciones en el motor muestran que durante los intervalos de aceleración, se requieren picos de corriente cercanos a 120 A en relación con el torque necesario para mover el vehículo, lo cual significa un mayor requerimiento de potencia.

Los recorridos en superficies con pendientes implican rangos de potencia en el motor cercanos a los 5 kW, debido al esfuerzo en el motor por impulsar la carga cuesta arriba.

En la práctica, es difícil mantener intervalos de velocidad constante, por lo que es necesario considerar un promedio de la velocidad para realizar un modelo en estado estacionario o cuasi-estacionario. Se obtuvieron perfiles de velocidad cuasi-constante a 3, 5, 10 y 15 km/h que permitieron establecer parámetros de referencia para verificar los modelos matemáticos.

7.2.2. Pruebas en laboratorio al motor, convertidor y baterías

Los valores de resistencia interna 0.085Ω e inductancia de 0.33 H en armadura, así como 0.032Ω y 0.25 H en campo obtenidos en las pruebas efectuadas en el motor CD empleando el equipo analizador de impedancias resultaron aproximaciones aceptables que permitieron modelar de forma precisa el motor instalado en el vehículo.

Los valores de eficiencia de conversión del convertidor de potencia empleado no corresponden con los valores teóricos de $> 95\%$, pues dependen de los valores de potencia relacionados con la carga mecánica aplicada y la velocidad en el eje de tracción, con un valor cercano al 80 % de eficiencia.

Las pruebas realizadas a las baterías comprueban los valores de capacidad y descarga son muy cercanos a los especificados por el fabricante para baterías en condiciones de operación óptimas. Los valores de resistencia interna durante el proceso de descarga son del orden de $0.0110 \text{ m}\Omega$.

7.2.3. Verificación del modelo matemático

Los parámetros obtenidos durante las pruebas permitieron verificar el modelo inicial en estado estacionario y definir las direcciones posibles de cómputo.

La verificación del modelo inicial permitió identificar la necesidad de incluir en el análisis:

- La fuerza por aceleración en los intervalos de arranque y velocidad variable.
- Los efectos de la inductancia por variaciones en la corriente en la armadura y campo del motor.
- Los efectos de la corriente en el estado de carga de las baterías.
- La disminución de voltaje en las terminales de la batería por efectos de la descarga.

Se formuló un modelo básico que describe el comportamiento dinámico de vehículo. Dicho modelo permite extender los cálculos de los requerimientos de potencia para determinar la energía necesaria durante la operación del vehículo y el estado de carga final de la batería con el objetivo de estimar los rangos de autonomía.

7.2.4. Resultados de simulación

El tren de potencia de un vehículo es un sistema complejo integrado por varios subsistemas que a su vez se componen de subsistemas propios. Para lograr que los procesos de modelación y simulación sean eficientes, deben establecer estrategias que permitan trabajar de forma sistemática, con limpieza y claridad.

En la simulación del sistema completo empleando los datos de velocidad registrados durante las pruebas en el vehículo, se obtuvieron valores para los siguientes parámetros:

- Velocidad lineal;
- Distancia recorrida;
- Aceleración;
- Velocidad rotacional (Eje de tracción y motor);
- Torque (Eje de tracción y motor);
- Voltaje (Motor y baterías);
- Corriente (Motor y baterías);

- Potencia mecánica (Eje de tracción y motor);
- Potencia eléctrica (Motor y baterías);
- Energía requerida del sistema;
- Estado de carga final de las baterías.

La energía requerida por el carro de golf para recorrer una distancia de 0.425 km con una velocidad promedio de 5.743 km/h fue un aproximado de 38.81 Wh. Se estimó un estado de carga final de 99.37 %.

Al comparar los resultados obtenidos en la simulación con los parámetros calculados a partir de los datos medidos, se muestra un error relativo de 4.941 % a para la distancia recorrida, de un 4.941 % para la velocidad promedio, un 25.354 % en la energía requerida y un 0.090 % para el estado de carga final. La magnitud del error asociado a la energía se debe a que el modelo no muestra rangos tan altos de torque y corriente en los intervalos de arranque y aceleración, por lo que la potencia requerida disminuye considerablemente.

Es posible disminuir el porcentaje de error, tomando las siguientes medidas::

- Realizando más pruebas al vehículo para modelar con mayor precisión la carga mecánica y los efectos de la fricción en el acoplamiento mecánico.
- Implementado modelos más detallados del motor y el control de velocidad.
- Implementando un modelo de baterías de ácido-plomo que describa sus efectos capacitivos.

Un análisis simple de autonomía muestra que para un límite de profundidad de descarga en las baterías de 80 %, la autonomía aproximada del vehículo es de 53.96 km con una duración de las baterías de 9.54 h, para los parámetros de operación y perfil de velocidad obtenidos mediante pruebas y usados en la simulación. Los rangos de autonomía obtenidos son congruentes con los rangos típicos de los carros de golf.

Para evaluar el desempeño de un carro de golf en distintos escenarios de velocidad y aceleración, se eligieron cuatro ciclos de manejo para simular el modelo del sistema completo. Los resultados de las simulaciones muestran que la autonomía y duración de las baterías aumentan cuando los rangos de velocidad e intervalos de aceleración del vehículo son menores. Esto se debe a que la potencia requerida en las baterías disminuye.

Los valores para los rangos de autonomía obtenidos son estimaciones razonables, sin embargo, es importante tomar en cuenta que existe un error relativo de 0.253 asociado al cálculo de la energía requerida.

7.2.5. Configuración híbrida

En la configuración básica de un vehículo híbrido de celdas de combustible PEM se emplean dos fuentes de energía: un banco de baterías y el hidrógeno almacenado en forma de gas presurizado en un tanque.

Los principales motivos para implementar una configuración híbrida en un vehículo eléctrico son:

1. Aumentar los rangos de autonomía y velocidad sin incrementar sustancialmente la masa total del vehículo.
2. Reducir la profundidad de descarga y aumentar el tiempo de operación de las baterías.
3. Reducir tiempos de recarga en las baterías y aumentar el desempeño del vehículo.

En general, existen dos formas que clasificar la conexión de los componentes de una configuración básica de un vehículo híbrido de celdas de combustible:

- **Soft hybrid.** La celda de combustible es la fuente principal.
- **Hard hybrid.** La batería es la fuente principal.

Para la modelación de una configuración híbrida, se obtuvo un modelo que describe el comportamiento eléctrico de una celda de combustible PEM de 2 kW, empleado los procedimientos mostrados en publicaciones técnicas especializadas y los parámetros proporcionados por el fabricante.

Los resultados de la simulación de la celda de combustible PEM muestran que el modelo implementado ajusta las curvas de polarización, potencia y consumo de hidrógeno a las curvas de operación proporcionadas por el fabricante.

De acuerdo a las características del vehículo y los parámetros de operación de la celda de combustible, se eligió una configuración *hard hybrid* como punto de partida para integrar el modelo de la celda al modelo del vehículo.

Para integrar el modelo de la celda de combustible PEM, se diseñó un modelo de convertidor de potencia basado en la topología de CD/CD reductor, para adecuar la salida de potencia de la celda a las necesidades de la carga impuestas por el control de velocidad.

Se estableció un límite de 40 A de operación que corresponden a un voltaje máximo de 36 V en terminales de la celda de combustible. Esta limitación permite que la celda proporcione valores potencia máximos de 1440 W, lo cual que protege al sistema de rebasar sus valores de potencia nominal de 2000 W.

Para controlar los flujos de potencia entre las batería y la celda, se diseñó un modelo de control que conecta el sistema de la celda de combustible y mantiene desconectadas las baterías cuando los requerimientos de corriente son menores a 40 A. Cuando la corriente requerida es mayor a 40 A, el control desconecta las celdas y conecta el sistema de las baterías para alimentar el motor.

Los parámetros de autonomía estimados varían dependiendo de los intervalos de aceleración y valores velocidad máxima de cada ciclo de manejo, por lo que la configuración y parámetros de operación propuesta son efectivos en condiciones de manejo de baja velocidad y paradas continuas, similares a los perfiles de manejo en entornos urbanos y ciudades con tránsito vehicular lento.

Para mostrar el funcionamiento del sistema híbrido propuesto, se simularon nuevamente los cuatro ciclos de manejo correspondientes a distintos perfiles de velocidad. Los resultados muestran que la estrategia de hibridación implementada logra aumento máximo en la autonomía de 113.73 a 185.477 km, en el tiempo de operación de 12.537 a 20.444 h y una a duración en las baterías de 8.553 a 13.949 h, lo que representa un incremento del 67.077 % respecto al modelo del sistema sin las celdas.

Al añadir la masa de las celdas de combustible, su controlador y el tanque de hidrógeno necesarios para aumentar los rangos de autonomía, el vehículo aumenta su masa total en un máximo de 3.186 % de su valor original, lo cual no representaría un incremento sustancial en la fuerza necesaria para impulsar el vehículo y mantener sus rangos de velocidad.

7.3. Trabajo futuro

El presente trabajo constituye un primer acercamiento al proceso de modelación y simulación de trenes de potencia de vehículos eléctricos. Así mismo, la configuración propuesta de tren de potencia híbrido eléctrico de celdas de combustible (FCEV) y su modelo inicial deben servir como punto de partida para trabajos futuros que continúen el proceso iterativo con el fin de obtener modelos optimizados.

Con la intención de mejorar los resultados obtenidos, se proponen las siguientes recomendaciones.

- Realizar pruebas al carro de golf en rutas rectas con superficie plana que permitan establecer condiciones de operación de velocidad constante. Las mediciones de voltaje y corriente en el motor y baterías permitirán obtener parámetros de operación que mejoren el modelo en estado estacionario del vehículo.
- Realizar pruebas al motor CD del carro de golf empleando un banco de pruebas con el fin de obtener las curvas de torque-velocidad, el valor del momento de inercia y la curva de eficiencia.
- Realizar ciclos de carga y descarga a la batería con el fin de obtener valores para la capacitancia que permita implementar un modelo dinámico.
- Corroborar el modelo teórico de la celda de combustible PEM elegida para la modelación del sistema híbrido realizando pruebas de laboratorio.
- Profundizar en el diseño de un convertidor CD/CD necesario para conectar la celda de combustible PEM al bus principal.
- Evaluar la opción de dimensionar un banco de supercapacitores, así como su sistema de control, para satisfacer los picos de corriente del motor en los intervalos de aceleración.
- Considerar los efectos del frenado mecánico en la simulación del modelo dinámico.

Página en blanco

ANEXOS

Anexo A	
Diagrama de elementos mecánicos y eléctricos del vehículo	209
Anexo B	
Placas de componentes instalados del carro de golf	211
Anexo C	
Cálculo de la velocidad máxima en el eje de tracción de un carro de golf	213
Anexo D	
Cálculo de constante del motor	215
Anexo E	
Cálculo de torque máximo en el eje de tracción de un carro de golf	216
Anexo F	
Cálculo de potencia mecánica nominal en el rotor del motor	217
Anexo G	
Cálculo de velocidad y torque en el eje de tracción para un valor de eficiencia de transmisión	218
Anexo H	
Cálculo del momento de inercia de la carga mecánica y el motor	221
Anexo I	
Cálculo de ciclo de trabajo en el convertidor CD/CD chopper	226
Anexo J	
Filtro pasa-bajos en el convertidor de potencia CD/CD chopper	228
Anexo K	
Curvas de operación de la batería	229
Anexo L	
Determinación de estado de carga SOC de una batería como una función del tiempo	231
Anexo M	
Perfil de velocidad controlada de aproximadamente 5 km/h	233
Perfil de velocidad controlada de aproximadamente 10 km/h	234
Perfil de velocidad controlada de aproximadamente 15 km/h	236
Anexo N	
Ciclos de manejo de baja velocidad	238
Ciclo de manejo 1: Japanese 10 Dynamometer Driving Schedule	238

Ciclo de manejo 2: UN/ECE Elementary Urban Cycle	239
Ciclo de manejo 3: WLTC class 1 (Low speed).....	240
Ciclo de manejo 4: New York City Cycle	241
Anexo O	
Autonomía de un carro de golf en condiciones de operación nominal	242
Autonomía de un carro de golf en condiciones de velocidad variable	247
Anexo P	
Cálculo del volumen del tanque de hidrógeno presurizado	249
Cálculo de la masa del tanque de hidrógeno presurizado	251
Cálculo de la energía almacenada en el tanque	252
Anexo Q	
Cálculo del voltaje termodinámico de una celda de combustible PEM.....	253
Anexo R	
Circuitos del tren de potencia.....	255
Anexo S	
Circuitos del tren de potencia eléctrico híbrido	261

Anexo A

Diagrama de elementos mecánicos y eléctricos del vehículo

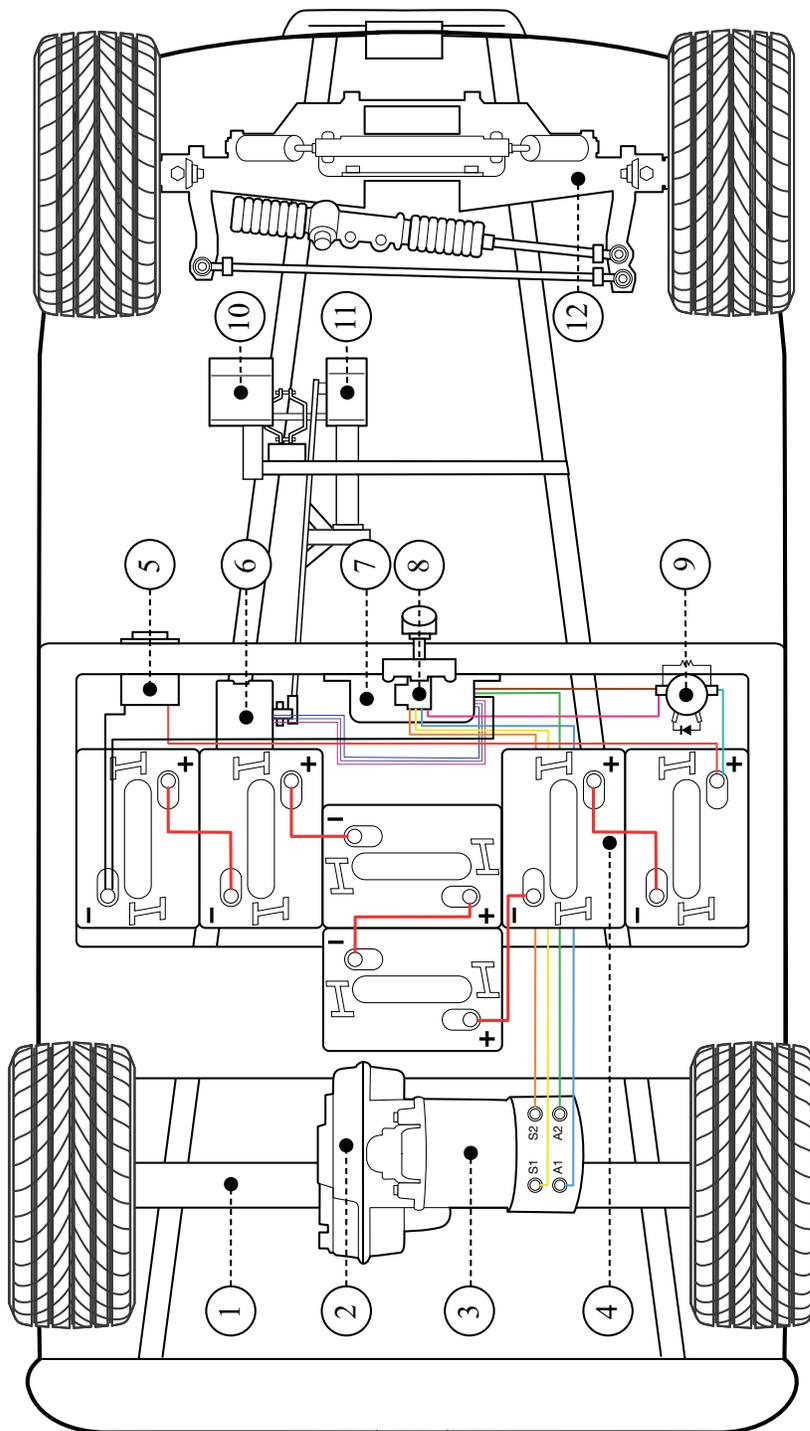


Figura A.1 Diagrama de conexiones eléctricas y mecánicas reales en el carro de golf.

Tabla A.1 Principales componentes y conexiones del sistema de tracción de un carro de golf.

Componente		Conexión	
Eje de tracción	1	(B+) Batería — (B-) Batería	■
Diferencial de velocidades	2	(B-) Baterías — (B-) Driver	■
Motor eléctrico CD	3	(B+) Baterías — (B+) Cargador	■
Banco de baterías	4	(B-) Baterías — (B-) Cargador	■
Conector para recarga de baterías	5	(A1) Motor — (A1) Avance/reversa	■
Potenciómetro	6	(A2) Motor — (A2) Avance/reversa	■
Controlador de velocidad (Driver)	7	(S1) Motor — (S1) Avance/reversa	■
Control avance/reversa	8	(S2) Motor — (S2) Avance/reversa	■
Solenóide	9	(S2) Motor — (S2) Solenóide	■
Freno	10	(S2) Solenóide — (S2) Driver	■
Acelerador	11	(B+) Baterías — (B+) Solenóide	■
Suspensión delantera	12	(L) Potenciómetro — (L) Driver	■
		(W) Potenciómetro — (W) Driver	■
		(G) Potenciómetro — (G) Driver	■

Tabla A.2 Dimensiones del vehículo [101].

Dimensión	Valor
Longitud total	2.385 m
Ancho total	1.200 m
Altura total (altura del volante)	1.190 m
Altura del suelo	0.300 m
Base de los neumáticos	1.629 m

Anexo B

Placas de componentes instalados del carro de golf

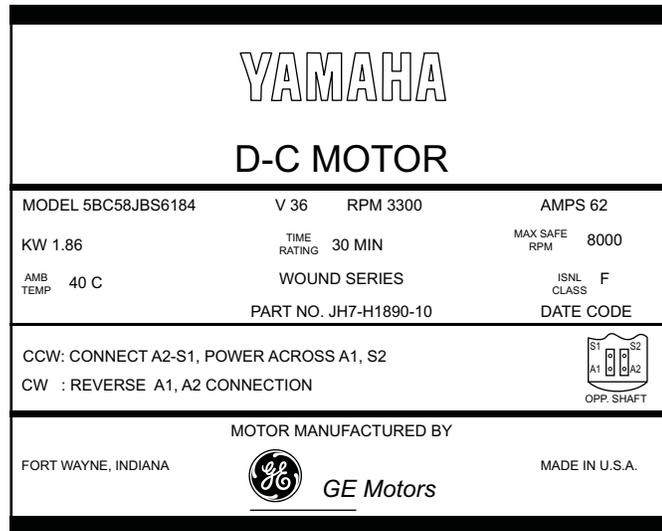


Figura B.1 Placa del motor CD instalado en el carro de golf.

Tabla B.1 Datos de la placa del motor instalado.

Yamaha D-C Motor	
Model 5BC58JBS6184	
Nominal voltage	36 V
Nominal rotation speed	3300 rpm
Nominal current	52 A
Nominal power	1.86 kW
Time rating	30 min
Max. safe rpm	8000 rpm
Ambiental temperature	40°C
Wound series	
ISNL Class F	
Part No. JH7-H-1890-10	
Counter Clock Wise (CCW): Connect A2-S1, Power Across A1, S2	
Clock Wise (CW): Reverse A1, A2 Connection	
Motor Manufactured by GE Motors	
Fort Wayne, Indiana	
Made in U.S.A.	

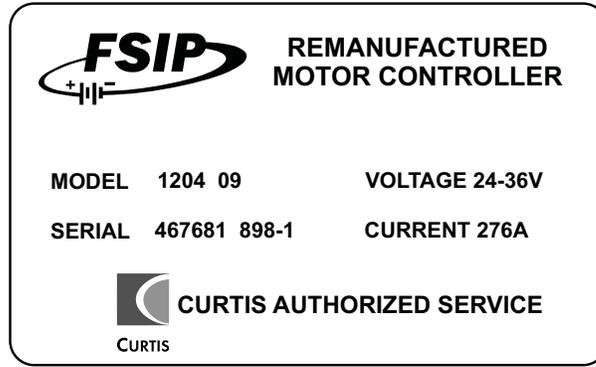


Figura B.2 Placa del controlador de velocidad instalado en el carro de golf.

Tabla B.2 Datos de placa del controlador de velocidad.

FSIP Remanufactured Motor Controller	
Model 1204 09	
Serial 467681 898-1	
Voltage Range	24-36 V
Límite de corriente	276 A
CURTIS Curtis Authorized Service	

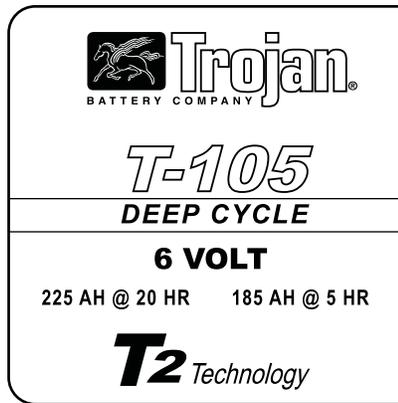


Figura B.3 Placa de una batería ácido-plomo instalada en el carro de golf.

Tabla B.3 Datos de placa de una batería ácido-plomo.

Trojan Battery Company	
T-105	
Deep Cycle	
Serial 467681 898-1	
Voltaje en baterías	6 V
Capacidad en baterías @ 20hr	225 Ah
Capacidad en baterías @ 5hr	185 Ah
T2 Technology	

Anexo C

Cálculo de la velocidad máxima en el eje de tracción de un carro de golf

La velocidad máxima del vehículo se estima en función del valor de velocidad nominal en el motor y la relación de engranes la caja reductora de velocidad.

Velocidad angular en el rotor del motor para una velocidad rotacional nominal:

$$\omega_M = \frac{2\pi}{60} N_{M, \text{nom}} \quad (\text{C.1})$$

$$\omega_M = \frac{2\pi}{60} (3300 \text{ rpm})$$

$$\omega_M = 345.575 \text{ rad/s}$$

Velocidad angular en el eje de tracción para una relación de caja de engranes reductora:

$$\omega_T = \frac{\omega_M}{n_{GB}} \quad (\text{C.2})$$

$$\omega_T = \frac{345.575 \text{ rad/s}}{12.5}$$

$$\omega_T = 27.646 \text{ rad/s}$$

Velocidad lineal máxima en el eje de tracción para un radio de neumático:

$$v_{T, \text{max}} = \omega_T \cdot r_n \quad (\text{C.3})$$

$$v_{T, \text{max}} = (27.646 \text{ rad/s}) 0.215 \text{ m}$$

$$v_{T, \text{max}} = 5.944 \text{ m/s}$$

$$v_{T, \max} = (3.6)5.944 \text{ m/s} = 21.398 \text{ km/h}$$

$$v_{T, \max} = (0.621)21.398 \text{ km/h} = 13.296 \text{ mph}$$

La [Tabla C.1](#) muestra los valores de velocidad máxima calculada para las relaciones de engranes disponibles comercialmente [102].

Tabla C.1 Velocidad máxima en el eje de tracción para condiciones de potencia nominal en el motor.

Relación de caja de engranes (diferencial mecánico)	km/h	mph
12.5:1	21.398	13.296
8:1	33.434	20.775
6:1	44.579	27.7

Anexo D

Cálculo de constante del motor

La constante del motor CD relaciona los valores de voltaje y corriente en armadura con la velocidad y torque en el rotor. El análisis se hace en estado estacionario para una velocidad nominal constante.

La FEM en armadura se puede estimar para los valores nominales del motor:

$$E_A = V_M - I_A (R_A + R_S) \quad (\text{D.1})$$

$$E_A = 36 \text{ V} - (62 \text{ A})(0.085 \Omega + 0.032 \Omega)$$

$$E_A = 28.746 \text{ V}$$

Velocidad angular en el rotor del motor para una velocidad rotacional nominal:

$$\omega_M = \frac{2\pi}{60} N_{M, \text{nom}} \quad (\text{D.2})$$

$$\omega_M = \frac{2\pi}{60} (3300 \text{ rpm})$$

$$\omega_M = 345.575 \text{ rad/s}$$

La constante del motor para valores nominales:

$$K_M = \frac{E_A}{\omega_M} \quad (\text{D.3})$$

$$K_M = \frac{28.746 \text{ V}}{345.575 \text{ rad/s}}$$

$$K_M = 0.083 \text{ Vs/rad} = 0.083 \text{ Nm/A}$$

Anexo E

Cálculo de torque máximo en el eje de tracción de un carro de golf

El valor de torque máximo en el eje de tracción se estima en relación de la corriente en armadura nominal y la relación de engranes la caja reductora de velocidad.

Para el valor nominal de corriente en armadura y la constante del motor:

$$\tau_M = I_A \cdot K_M \quad (\text{E.1})$$

$$\tau_M = (62 \text{ A})(0.083 \text{ Nm/A})$$

$$\tau_M = 5.146 \text{ Nm}$$

Para el valor de torque en el motor y relación de engranes en la caja reductora:

$$\tau_T = \tau_M \cdot n_{GB} \quad (\text{E.2})$$

$$\tau_T = (5.146 \text{ Nm})(12.5)$$

$$\tau_T = 64.325 \text{ Nm}$$

La [Tabla E.1](#) muestra los valores de torque máximo para las relaciones de engranes disponibles comercialmente [102].

Tabla E.1 Torque máximo en el eje de tracción para condiciones de potencia nominal en el motor.

Relación de caja de engranes (diferencial mecánico)	Nm
12.5:1	64.325
13:1	66.898
15:1	77.19

Anexo F

Cálculo de potencia mecánica nominal en el rotor del motor

La potencia mecánica nominal en el motor se puede estimar en relación de la velocidad y torque máximos.

$$P_M = \omega_M \cdot \tau_M \quad (F.1)$$

$$P_M = (345.575 \text{ rad/s})(5.146 \text{ Nm})$$

$$P_M = 1778.32 \text{ W} = 1.778 \text{ kW}$$

El valor de potencia calculada es cercano en magnitud con el valor de la potencia nominal de la placa del motor de 1860 kW.

Anexo G

Cálculo de velocidad y torque en el eje de tracción para un valor de eficiencia de transmisión

En un sistema ideal de transmisión mecánica, la potencia transferida del rotor del motor al eje de tracción por medio de una caja reductora de velocidad está dada por:

$$P_T = P_M \quad (G.1)$$

En un sistema real de transmisión mecánica, la potencia en el rotor del motor será mayor que la transmitida al eje de tracción debido a las pérdidas por fricción.

La potencia en el eje de tracción para un valor de eficiencia de transmisión en el diferencial mecánico:

$$P_T = P_M \cdot \eta_{GB} \quad (G.2)$$

Un valor aceptable de eficiencia de transmisión mecánica es de 0.85. Para valores de potencia nominal en el motor, el valor de la potencia en el eje de tracción es:

$$P_T = (1778.329 \text{ W})(0.85)$$

$$P_T = 1511.578 \text{ W} \approx 1.512 \text{ kW}$$

También es posible estimar de forma separada los valores de velocidad angular y torque en el eje de tracción a partir de dichos parámetros en el motor mediante el siguiente procedimiento:

$$\omega_T \cdot \tau_T = (\omega_M \cdot \tau_M) \eta_{GB} \quad (G.3)$$

El valor de la potencia de tracción está dado por:

$$P_T = (\omega_M \cdot \tau_M) \eta_{GB} \quad (G.4)$$

Para la expresión anterior, se puede separar la eficiencia como:

$$(\omega_M \cdot \tau_M) \eta_{GB} = (\omega_M \cdot \tau_M) \sqrt{\eta_{GB}^2} = (\omega_M \cdot \tau_M) \sqrt{\eta_{GB}} \cdot \sqrt{\eta_{GB}} \quad (G.5)$$

La expresión anterior se puede asociar a la relación de engranes de la caja reductora de velocidad:

$$(\omega_M \cdot \tau_M) \sqrt{\eta_{GB}} \cdot \sqrt{\eta_{GB}} = (\omega_M \cdot \tau_M) \sqrt{\eta_{GB}} \cdot \sqrt{\eta_{GB}} \left(\frac{n_{GB}}{n_{GB}} \right)$$

Se acomodan los términos para separar la velocidad angular y torque en el eje de tracción:

$$\left(\frac{\sqrt{\eta_{GB}} \cdot \omega_M}{n_{GB}} \right) (\sqrt{\eta_{GB}} \cdot \tau_M \cdot n_{GB}) = (\omega_M \cdot \tau_M) \eta_{GB} \quad (G.6)$$

$$\omega_T \cdot \tau_T = (\omega_M \cdot \tau_M) \eta_{GB} \quad (G.7)$$

Por lo tanto, se tienen los dos términos independientes en relación de la eficiencia de transmisión mecánica:

$$\omega_T = \frac{\sqrt{\eta_{GB}} \cdot \omega_M}{n_{GB}} \quad (G.8)$$

$$\tau_T = \sqrt{\eta_{GB}} \cdot \tau_M \cdot n_{GB} \quad (G.9)$$

Se estiman dichos parámetros en condiciones de operación nominal en el motor:

$$\omega_T = \frac{\sqrt{0.85} (345.575 \text{ rad/s})}{12.5}$$

$$\omega_T = 25.48 \text{ rad/s}$$

$$\tau_T = \sqrt{0.85} (5.146 \text{ Nm})(12.5)$$

$$\tau_T = 59.305 \text{ Nm}$$

Con los valores de velocidad angular y torque en eje de tracción se puede verificar el valor de la potencia calculada al principio:

$$P_T = \omega_T \cdot \tau_T$$

$$P_T = (25.48 \text{ rad/s}) 59.305 \text{ Nm}$$

$$P_T = 1511.578 \text{ W} \approx 1.512 \text{ kW}$$

Anexo H

Cálculo del momento de inercia de la carga mecánica y el motor

El torque ejercido en un sistema rotacional sin tomar en cuenta las pérdidas por efectos de fricción y gravedad esta definido como:

$$\tau = J \cdot \dot{\omega} = J \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (\text{H.1})$$

La aceleración angular puede expresarse en términos de la aceleración lineal como:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{dv}{dt} \left(\frac{1}{r} \right)$$

Por lo que el torque se puede expresar como:

$$\tau = J \cdot \frac{dv}{dt} \left(\frac{1}{r} \right) = J \cdot \frac{a}{r} \quad (\text{H.2})$$

El torque también puede expresarse como la fuerza ejercida multiplicada por el radio del eje.

$$\tau = F \cdot r = m \cdot a \cdot r \quad (\text{H.3})$$

Combinando las ecuaciones [H.1](#) y [H.3](#) se obtiene:

$$\tau = J \cdot \frac{dv}{dt} \left(\frac{1}{r} \right) = F \cdot r$$

$$\tau = J \cdot \frac{a}{r} = m \cdot a \cdot r$$

A partir de la expresión anterior, es posible despejar el momento de inercia.

$$J = m \cdot r^2 \quad (\text{H.4})$$

Para determinar correctamente el momento de inercia en el eje de tracción, es necesario saber el valor de la masa que recae sobre dicho eje.

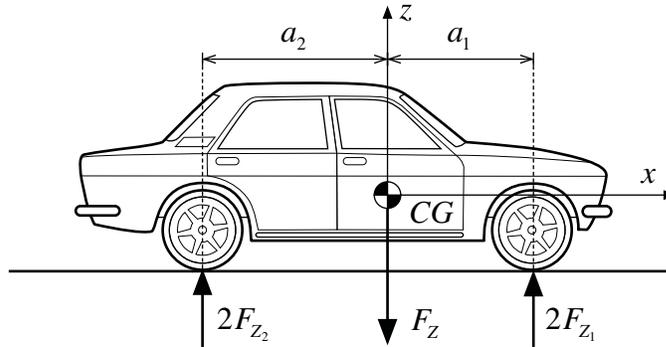


Figura H.1 Distribución de fuerzas en un vehículo de dos ejes [42].

La fuerza que actúa sobre un vehículo a lo largo de la dirección vertical y perpendicular a la superficie del camino está dada por:

$$F_z = m_v \cdot g \quad (\text{H.5})$$

Dicha fuerza se distribuye en los ejes del vehículo a partir del centro de gravedad CG por lo que las fuerzas que actúan en los neumáticos está dada por:

$$F_{z_1} = \frac{1}{2} m_v \cdot g \left(\frac{a_2}{a_1 + a_2} \right) \quad (\text{H.6})$$

$$F_{z_2} = \frac{1}{2} m_v \cdot g \left(\frac{a_1}{a_1 + a_2} \right) \quad (\text{H.7})$$

Tomando las dimensiones del carro de golf proporcionadas por el fabricante [101] mostradas en la [Tabla A.2](#), es posible calcular la fuerza ejercida sobre el eje de tracción (eje trasero) para un centro de masas aproximado [103] para una masa total del vehículo (incluyendo baterías, conductor y copiloto).

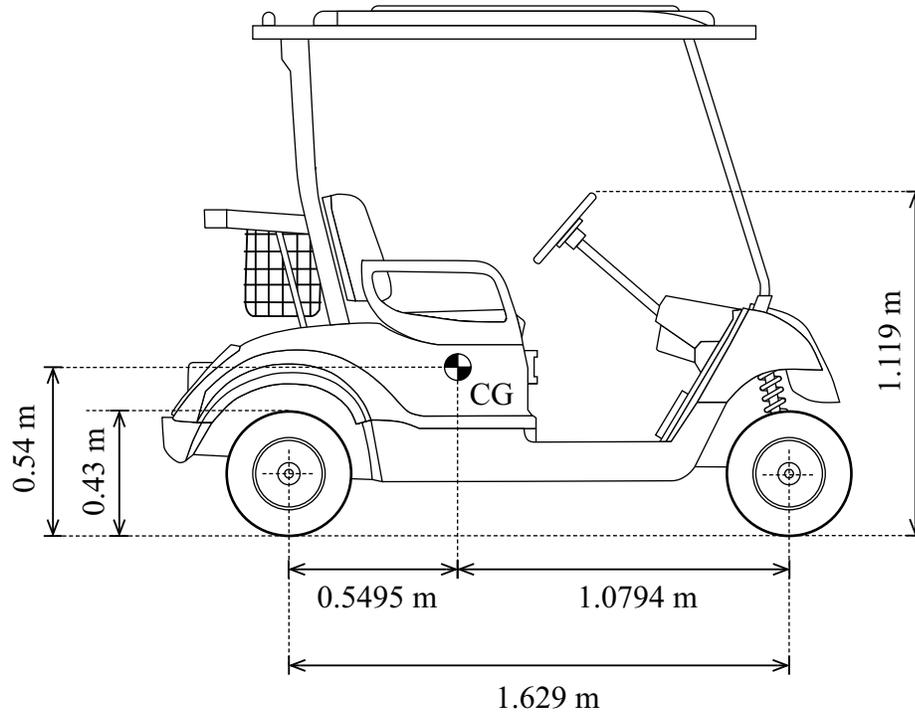


Figura H.2 Dimensiones del carro de golf empleadas para aproximar el centro de gravedad.

La fuerza aproximada aplicada en el eje de trasero es:

$$F_{Z_2} = \frac{1}{2}(592 \text{ kg})(9.81 \text{ m/s}^2) \left(\frac{1.0794}{1.0794 + 0.5495} \right)$$

$$F_{Z_2} = 1928 \text{ N}$$

La masa que soporta en eje de tracción es:

$$m_T = \frac{F_{Z_2}}{g}$$

$$m_T = \frac{1928 \text{ N}}{9.81 \text{ m/s}^2} = 196.59 \text{ kg}$$

Empleando la [Ecuación H.4](#), es posible proponer un valor de momento de inercia para el valor del radio de los neumáticos en el eje de tracción.

$$J_L = m_T \cdot r_T^2$$

$$J_L = 196.59 \text{ kg}(0.215 \text{ m})^2$$

$$J_L = 9.08 \text{ kg/m}^2$$

Es posible aproximar el valor de momento de inercia del rotor del motor si se considera como un cilindro macizo.

Se calcula el volumen del rotor para dimensiones aproximadas:

$$V_{\text{shaft}} = \pi \cdot r_{\text{shaft}}^2 \cdot h_{\text{shaft}} \quad (\text{H.5})$$

$$V_{\text{shaft}} = \pi (0.05 \text{ m})^2 (0.3 \text{ m})$$

$$V_{\text{shaft}} = 0.0023 \text{ m}^3$$

Asumiendo que el rotor del motor es un cilindro macizo fabricado con aluminio, es posible estimar el peso del rotor:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{H.6})$$

$$m_{\text{shaft}} = \rho_{\text{Al}} \cdot V_{\text{shaft}}$$

$$m_{\text{shaft}} = 2698.4 \text{ kg/m}^3 (0.005 \text{ m}^3)$$

$$m_{\text{shaft}} = 6.358 \text{ kg}$$

Se calcula el valor aproximado de momento de inercia del motor:

$$J_M = \frac{m_{\text{shaft}} \cdot r_{\text{shaft}}^2}{2} \quad (\text{H.7})$$

$$J_M = \frac{6.358 \text{ kg}(0.05 \text{ m})^2}{2}$$

$$J_M = 0.0079 \text{ kg/m}^2$$

Anexo I

Cálculo de ciclo de trabajo en el convertidor CD/CD *chopper*

El ciclo de trabajo describe la relación de la tensión en baterías y motor cuando el convertidor es ideal y no tiene pérdidas.

$$V_M = \delta \cdot V_B \quad (I.1)$$

Para un convertidor real, la potencia en el motor está dada por:

$$P_M = \eta_C \cdot P_B \quad (I.2)$$

$$V_M \cdot I_M = \eta_C (V_B \cdot I_B)$$

La expresión que describe la relación la tensión de baterías y motor cuando el convertidor es ideal está dada por:

$$V_M = \delta \cdot V_B \cdot \sqrt{\eta_C} \quad (I.3)$$

La relación de la corriente en baterías es:

$$I_M = \frac{I_B \cdot \sqrt{\eta_C}}{\delta} \quad (I.4)$$

Para el valor de tensión total en baterías con un estado de carga (SOC) del 100%, es posible estimar el ciclo de trabajo necesario para tener el voltaje nominal en las terminales del motor:

$$\delta = \frac{V_M}{V_B \cdot \sqrt{\eta_C}}$$

$$\delta = \frac{36 \text{ V}}{38.22 \text{ V} \sqrt{0.95}} = 0.966$$

Para el valor del ciclo de trabajo en condiciones de operación nominal en el motor es posible estimar la corriente en las baterías:

$$I_B = \frac{\delta \cdot I_M}{\sqrt{\eta_c}}$$

$$I_B = \frac{(0.966)62 \text{ A}}{\sqrt{0.95}}$$

$$I_B = 61.472 \text{ A}$$

La relación de potencia entre la batería y el motor se puede verificar como:

$$(36 \text{ V})(62 \text{ A}) = 0.95(38.22 \text{ V})(61.472 \text{ A})$$

$$2232 \text{ W} = 2232 \text{ W}$$

El tiempo de encendido para una frecuencia de conmutación se puede calcular con:

$$t_{\text{on}} = \delta \cdot T = \frac{\delta}{f_c} \quad (I.5)$$

$$t_{\text{on}} = \frac{1}{15000 \text{ Hz}}$$

$$t_{\text{on}} = 0.0000666 \text{ s}$$

Anexo J

Filtro pasa-bajos en el convertidor de potencia CD/CD *chopper*

Se calcula el rizado de corriente en el inductor para el valor de corriente máxima del convertidor $I_{out, max}$ empleando un porcentaje de estimación de rizado (20% a 40%) [104]

$$\Delta I_L = x \cdot I_{out, max} \quad (J.1)$$

$$\Delta I_L = 0.6(276 \text{ A})$$

$$\Delta I_L = 165.6 \text{ A}$$

Para valores de operación del convertidor y una frecuencia de conmutación de 1000 Hz se calcula el valor para el inductor del convertidor.

$$L = \frac{V_{C, out} (V_{C, in} - V_{C, out})}{\Delta I_L \cdot f_C \cdot V_{C, in}} \quad (J.2)$$

$$L = \frac{36 \text{ V}(38 \text{ V} - 36 \text{ V})}{165.6 \text{ A}(1000\text{Hz})(38 \text{ V})}$$

$$L = 0.000011 \text{ H}$$

Para valores de operación del convertidor se calcula el capacitor

$$C = \frac{\Delta I_L}{8 \cdot f_s \cdot \Delta V_{out}} \quad (J.3)$$

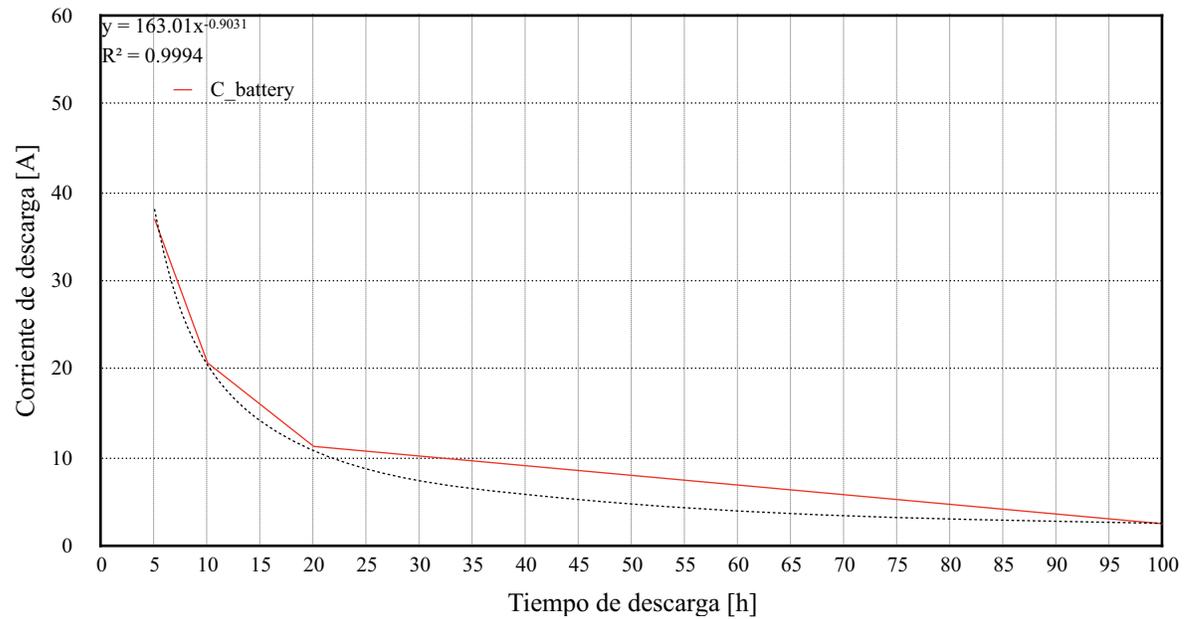
$$C = \frac{165 \text{ A}}{8(1000 \text{ Hz})(36 \text{ V})}$$

$$C = 0.000575 \text{ F}$$

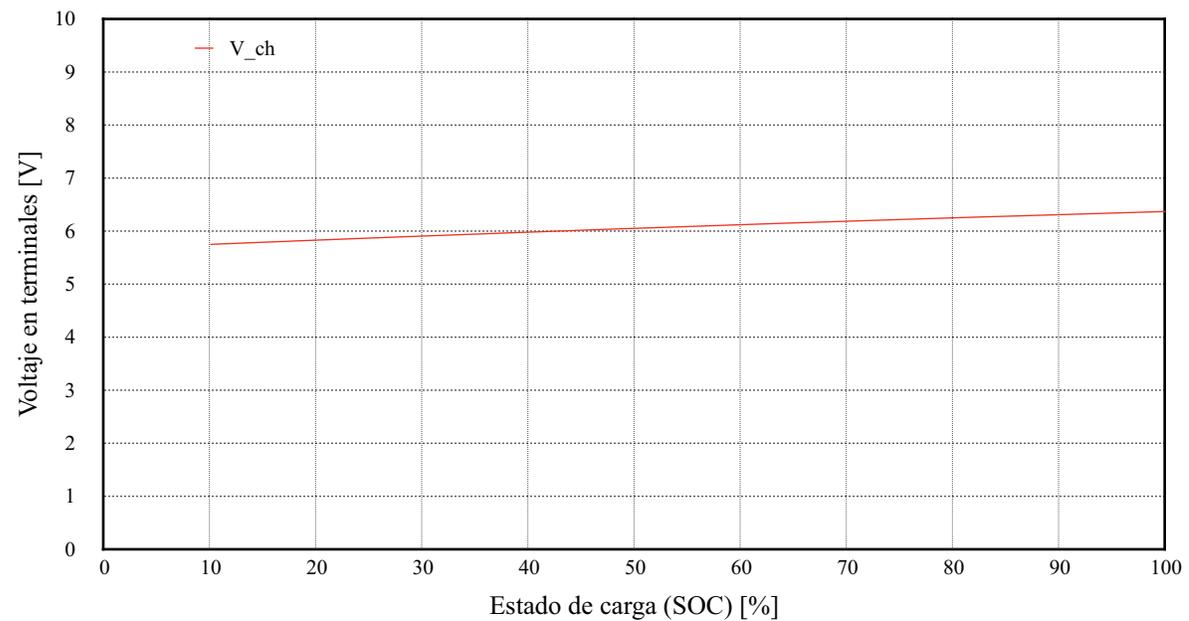
$$C = 0.000575 \text{ F}$$

Anexo K

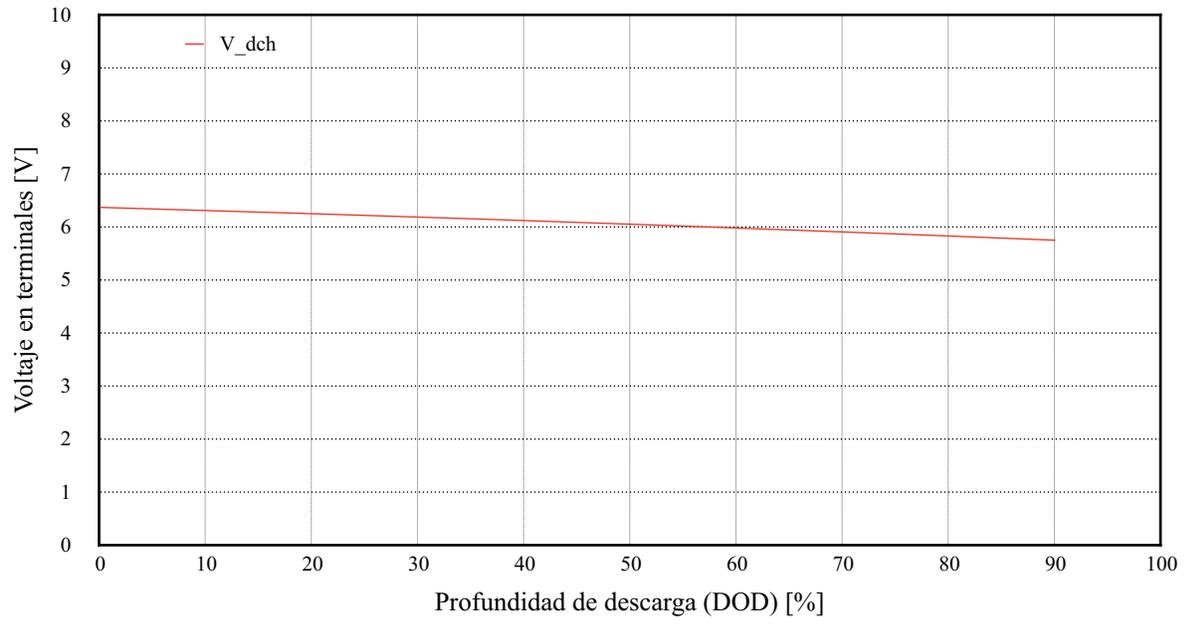
Curvas de operación de la batería



Gráfica K.1 Curva de desempeño de la batería.



Gráfica K.2 Curva de estado de carga de la batería según datos del fabricante.



Gráfica K.3 Curva de profundidad de descarga según datos del fabricante.

Anexo L

Determinación de estado de carga *SOC* de una batería como una función del tiempo

El estado de carga de una batería esta determinado por la capacidad máxima C_x y la capacidad liberada Q durante la operación:

$$SOC = 1 - \frac{Q}{C_x} \quad (L.1)$$

La capacidad liberada Q está definida como la cantidad de corriente circulando de la batería hacia la carga (signo positivo).

$$Q = I_B \cdot t \quad (L.2)$$

La capacidad liberada se expresa en función del tiempo como:

$$Q(t) = Q(t_0) + \int_{t_0}^t I_B(t) dt \quad (L.3)$$

El estado de carga en función del tiempo:

$$SOC(t) = 1 - \frac{Q(t)}{C_x} = \frac{C_x - Q(t)}{C_x}$$

$$SOC(t) = \frac{C_x - \left(Q(t_0) + \int_{t_0}^t I_B(t) dt \right)}{C_x}$$

$$SOC(t) = 1 - \frac{Q(t_0)}{C_x} - \frac{\int_{t_0}^t I_B(t) dt}{C_x} \quad (L.4)$$

Cuando el estado de carga inicial está dado por:

$$SOC(t_0) = 1 - \frac{Q(t_0)}{C_x}$$

La forma de expresar el estado de carga en función del tiempo para un valor inicial de carga (de 0 a 100%) es:

$$SOC(t) = SOC(t_0) - \frac{1}{C_x} \int_{t_0}^t I_B(t) dt \quad (L.5)$$

La energía máxima de la batería para un número de horas x de operación está determinada por:

$$E_x (\text{Wh}) = C_x (\text{Ah}) \cdot V_B \quad (L.6)$$

Se puede expresar el estado de carga como:

$$SOC(t) = SOC(t_0) - \frac{1}{E_x} \int_{t_0}^t \frac{I_B(t) \cdot V_B(t)}{3600} dt \quad (L.7)$$

Para una batería real, la cantidad de energía obtenida durante la descarga será menor a la empleada durante la recarga.

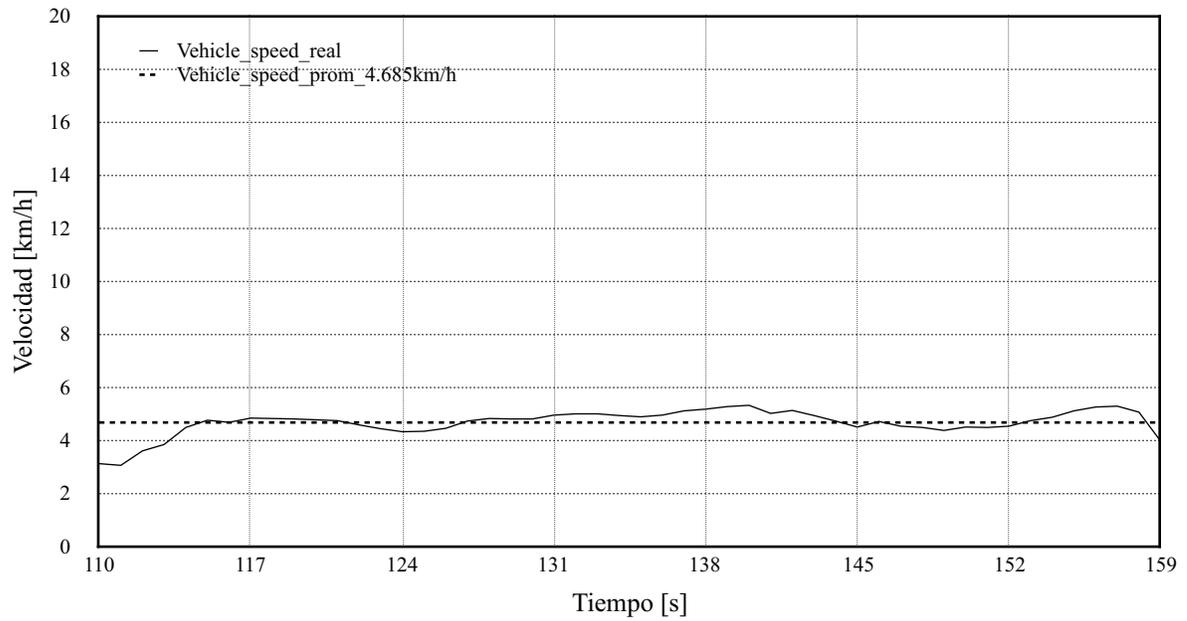
$$P_{B, \text{dch}} = \eta_B \cdot P_{B, \text{rch}} \quad (L.8)$$

Para un proceso de descarga real, el estado de carga puede escribirse como:

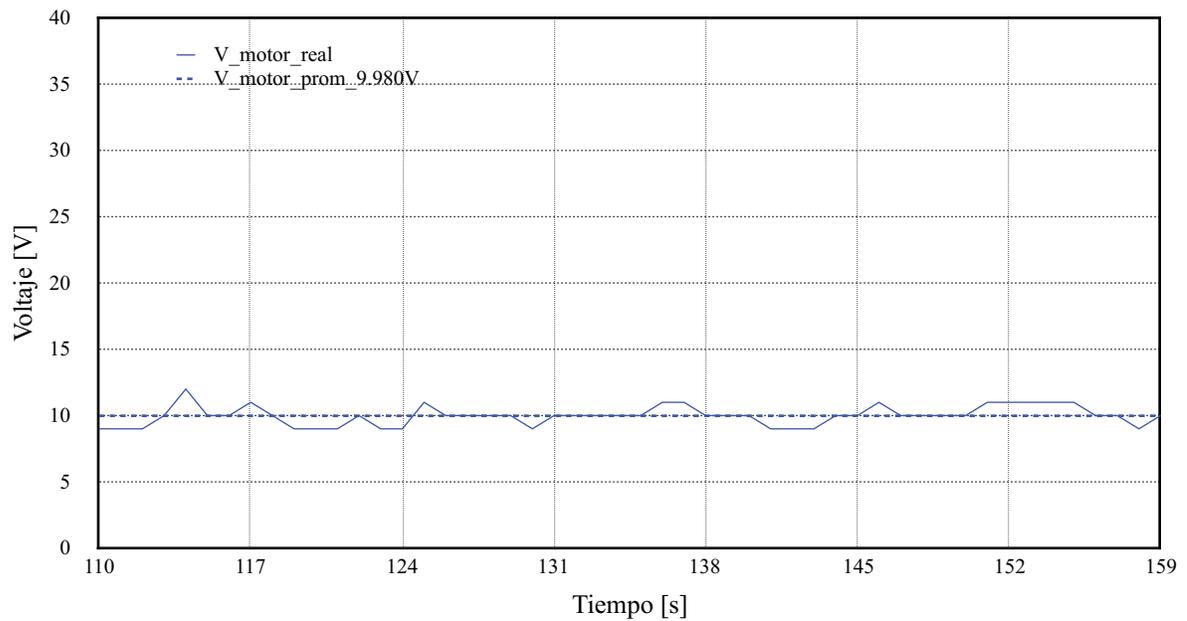
$$SOC(t) = SOC(t_0) - \frac{1}{E_x} \int_{t_0}^t \frac{\eta_B \cdot I_B(t) \cdot V_B(t)}{3600} dt \quad (L.9)$$

Anexo M

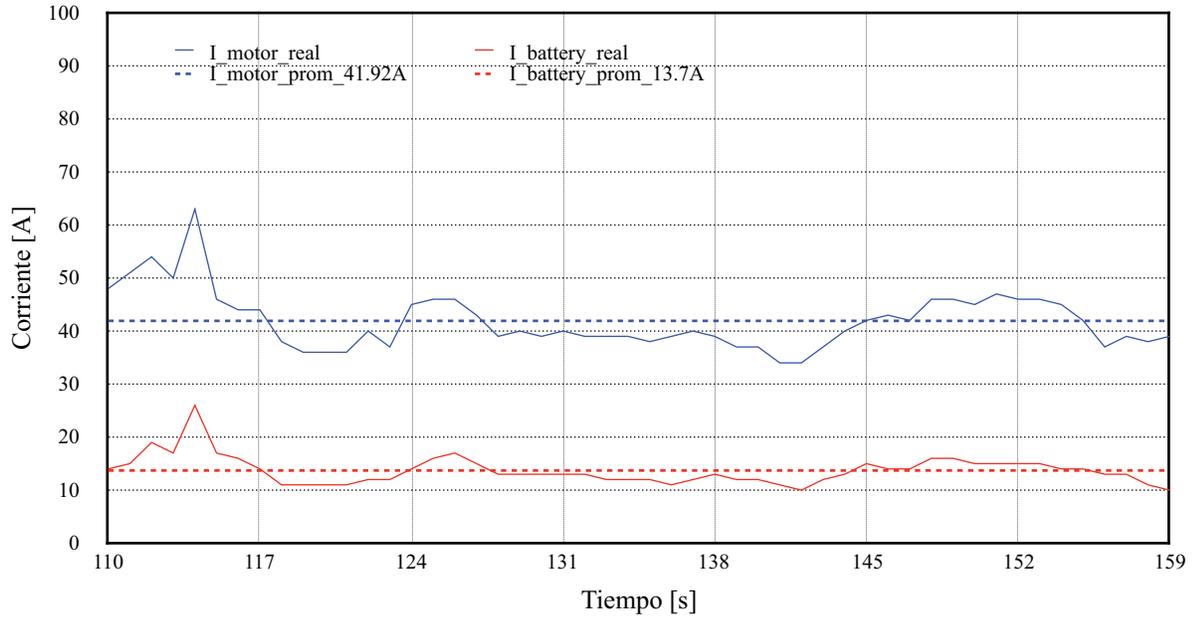
Perfil de velocidad controlada de aproximadamente 5 km/h



Gráfica M.1 Velocidad del vehículo controlada a 5 km/h.

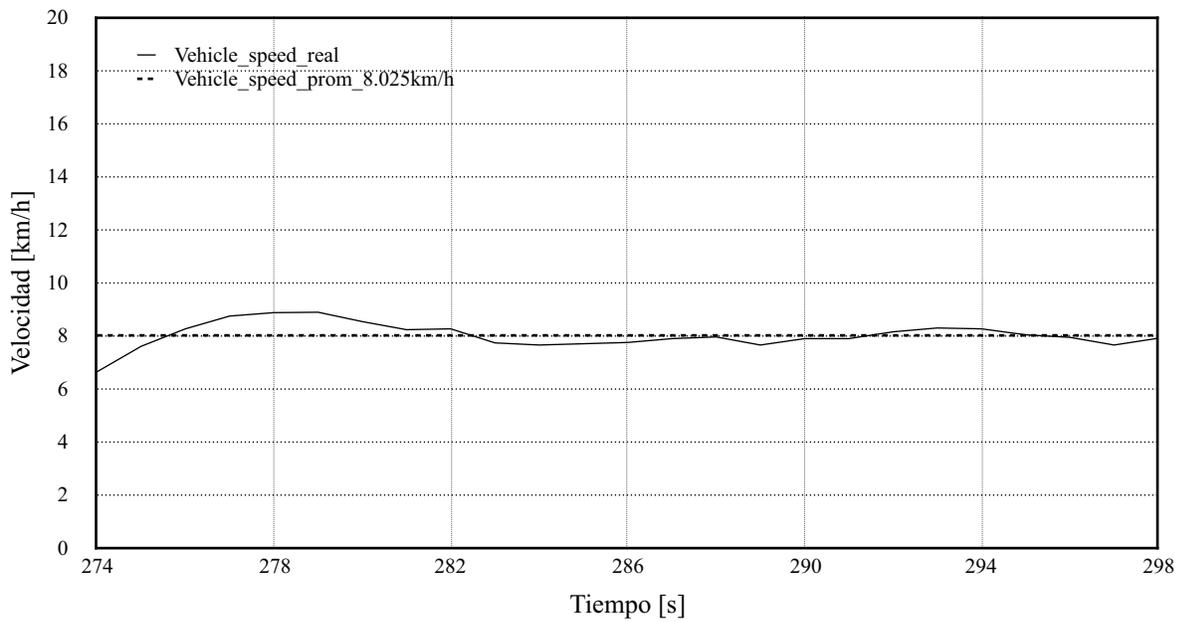


Gráfica M.2 Voltaje en las terminales del motor para un perfil de velocidad controlada de 5 km/h.

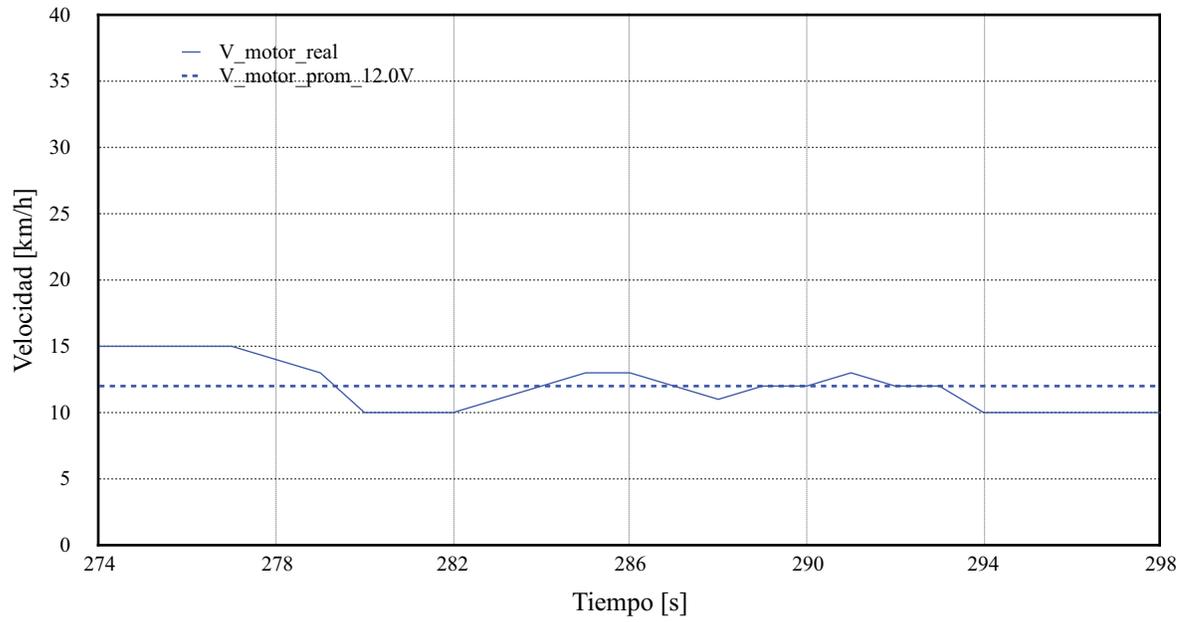


Gráfica M.3 Corriente en las terminales del motor para un perfil de velocidad controlada de 5 km/h.

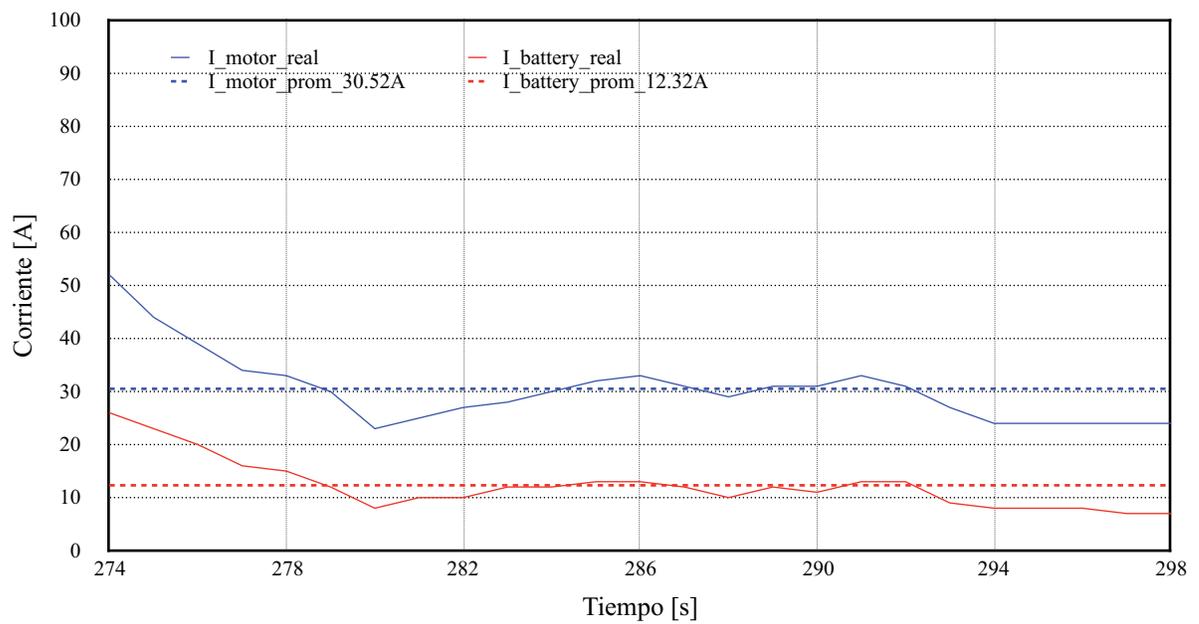
Perfil de velocidad controlada de aproximadamente 10 km/h



Gráfica M.4 Velocidad del vehículo controlada a 10 km/h.

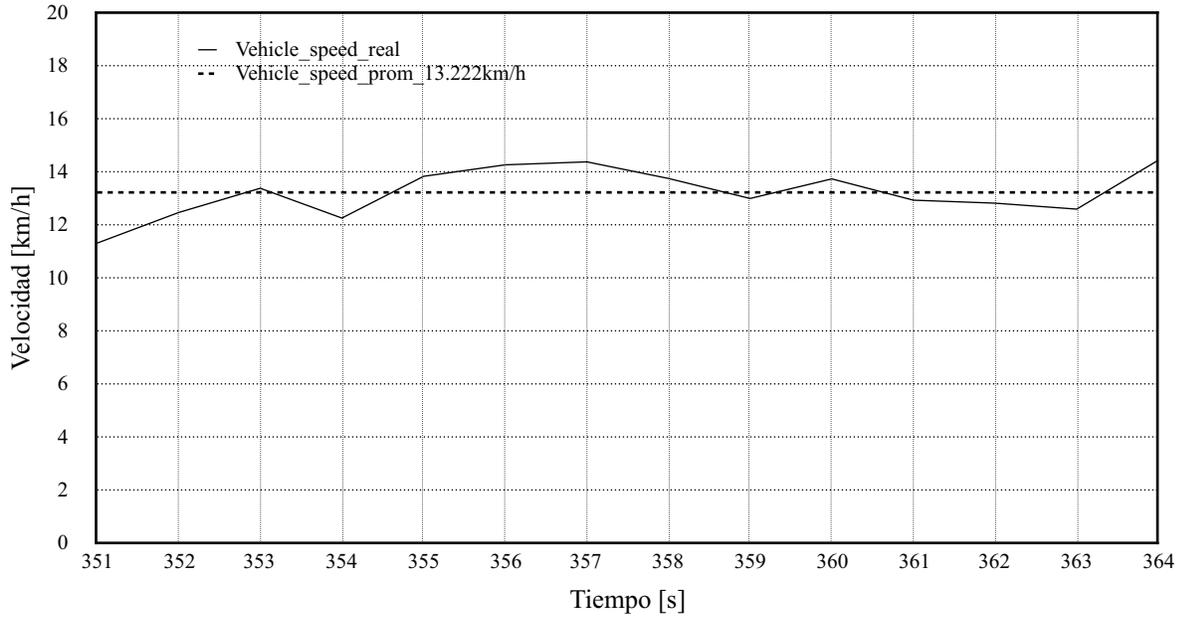


Gráfica M.5 Voltaje en las terminales del motor para un perfil de velocidad controlada de 10 km/h.

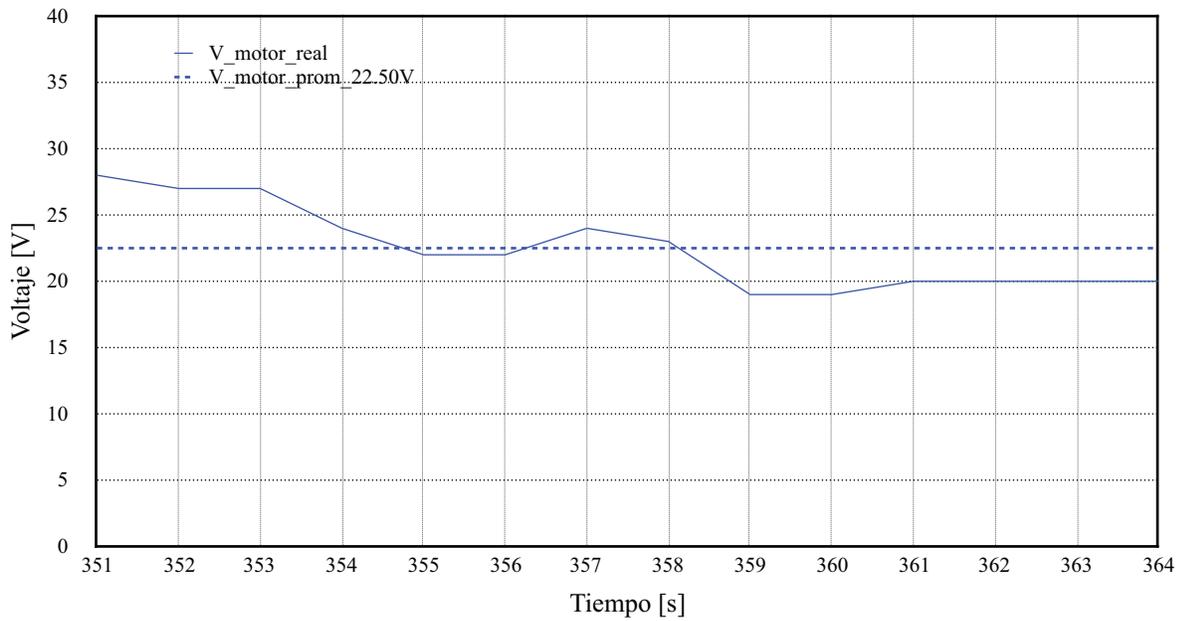


Gráfica M.6 Corriente en las terminales del motor para un perfil de velocidad controlada de 10 km/h.

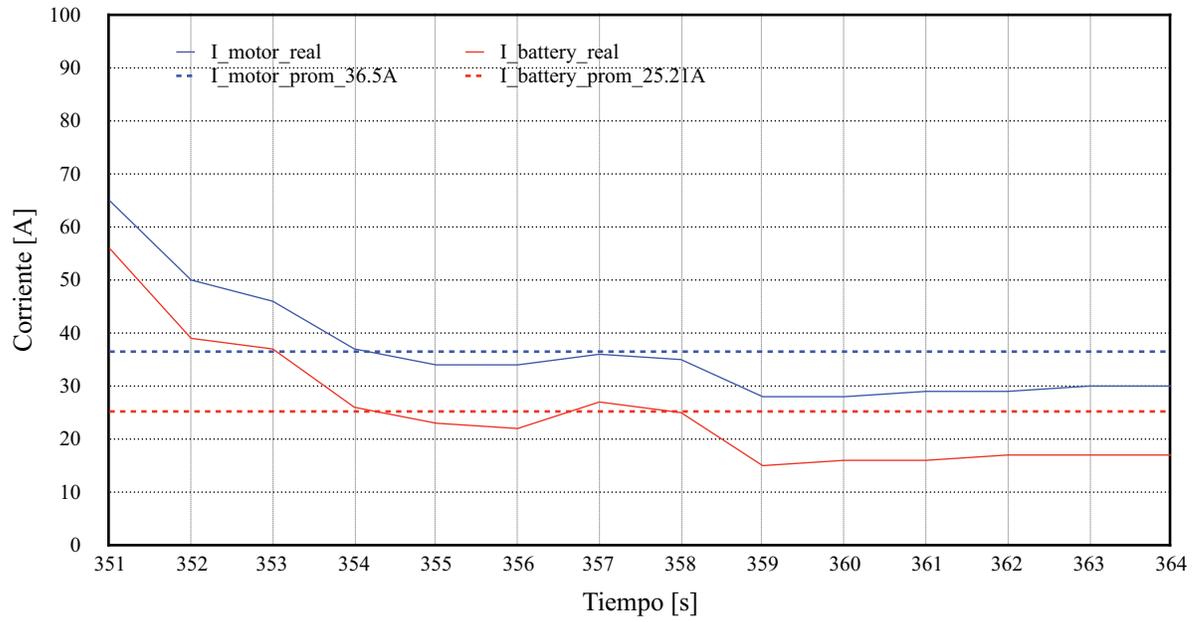
Perfil de velocidad controlada de aproximadamente 15 km/h



Gráfica M.7 Velocidad del vehículo controlada a 15 km/h.



Gráfica M.8 Voltaje en las terminales del motor para un perfil de velocidad controlada de 15 km/h.



Gráfica M.9 Corriente en las terminales del motor para un perfil de velocidad controlada de 15 km/h.

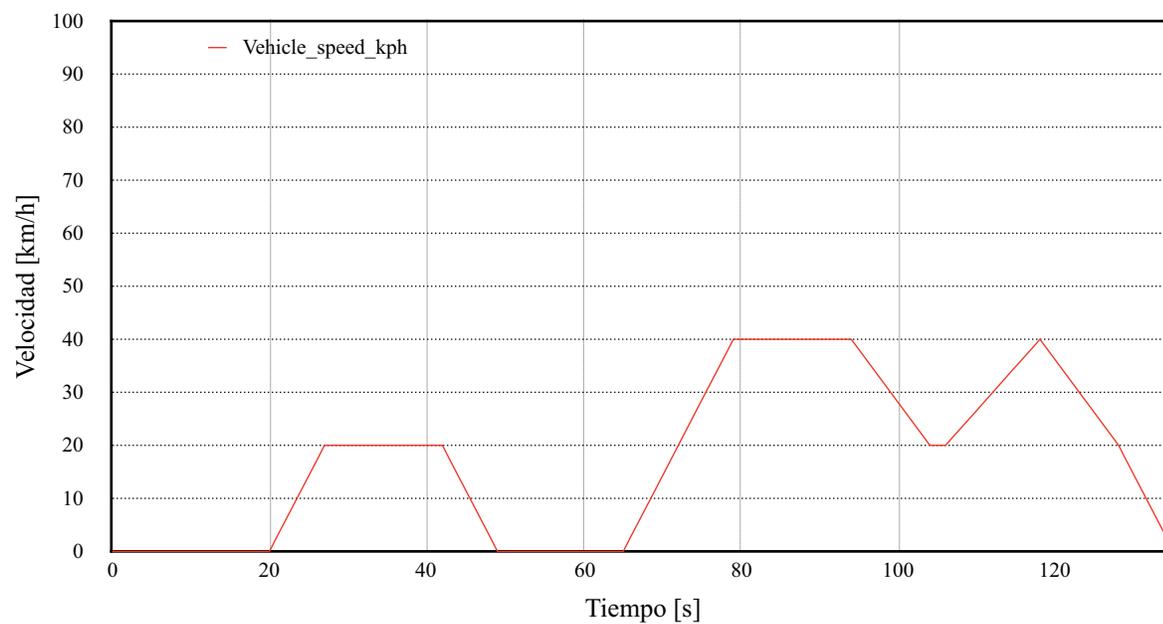
Anexo N

Ciclos de manejo de baja velocidad

Ciclo de manejo 1: Japanese 10 Dynamometer Driving Schedule

Tabla N.1 Parámetros del ciclo de manejo *Japanese 10 Dynamometer Driving Schedule*.

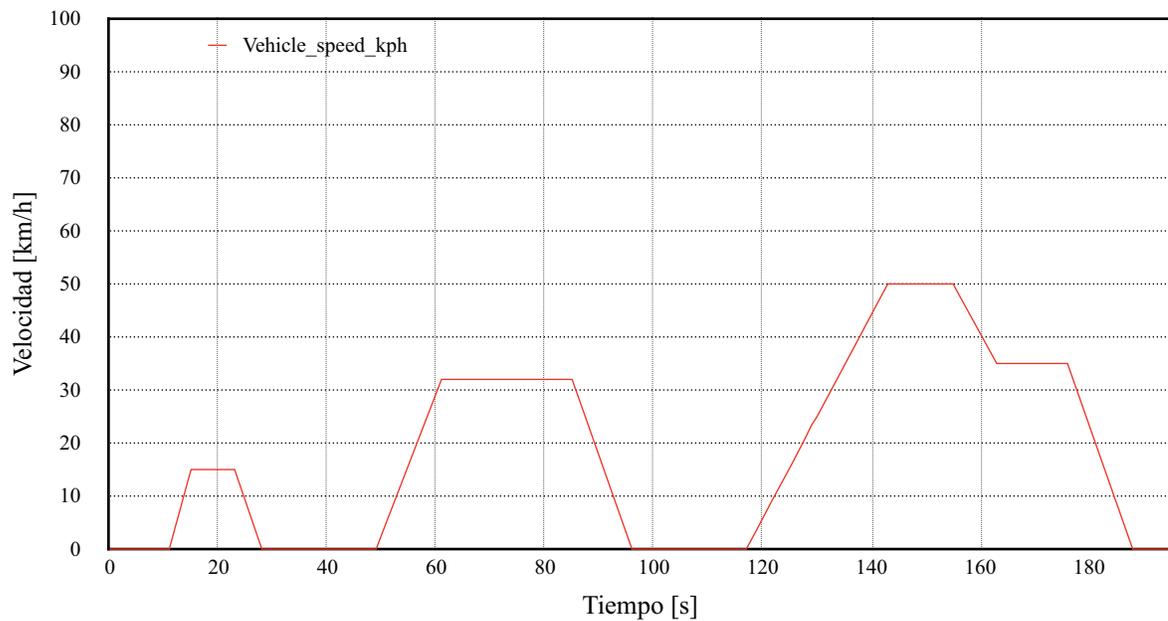
Parámetros	Valor
Duración	135 s
Distancia	0.660 km
Velocidad promedio	17.7 km/h
Velocidad máxima	40.0 km/h



Gráfica N.1 Ciclo de manejo *Japanese 10 Dynamometer Driving Schedule*.

Ciclo de manejo 2: UN/ECE Elementary Urban Cycle**Tabla N.2** Parámetros del ciclo de manejo *UN/ECE Elementary Urban Cycle*.

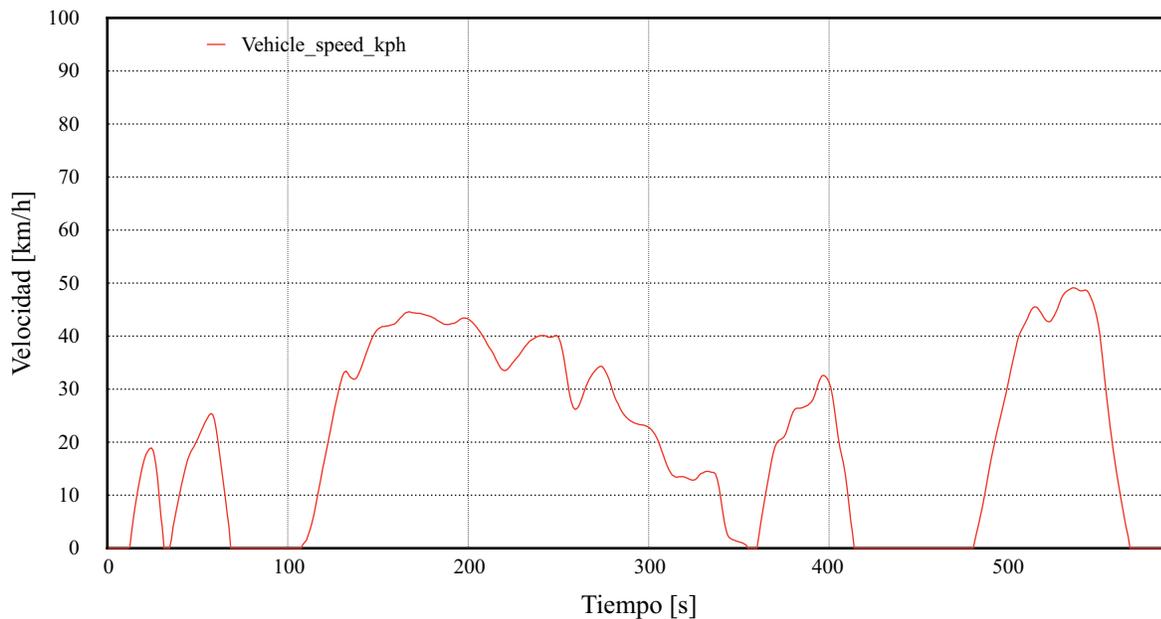
Parámetros	Valor
Duración	195 s
Distancia	0.994 km
Velocidad promedio	18.35 km/h
Velocidad máxima	50.0 km/h

**Gráfica N.2** Ciclo de manejo *UN/ECE Elementary Urban Cycle*.

Ciclo de manejo 3: WLTC class 1 (Low speed)

Tabla N.3 Parámetros del ciclo de manejo *WLTC class 1 (Low speed)*.

Parámetros	Valor
Duración	589 s
Distancia	3.324 km
Velocidad promedio	20.281 km/h
Velocidad máxima	49.1 km/h



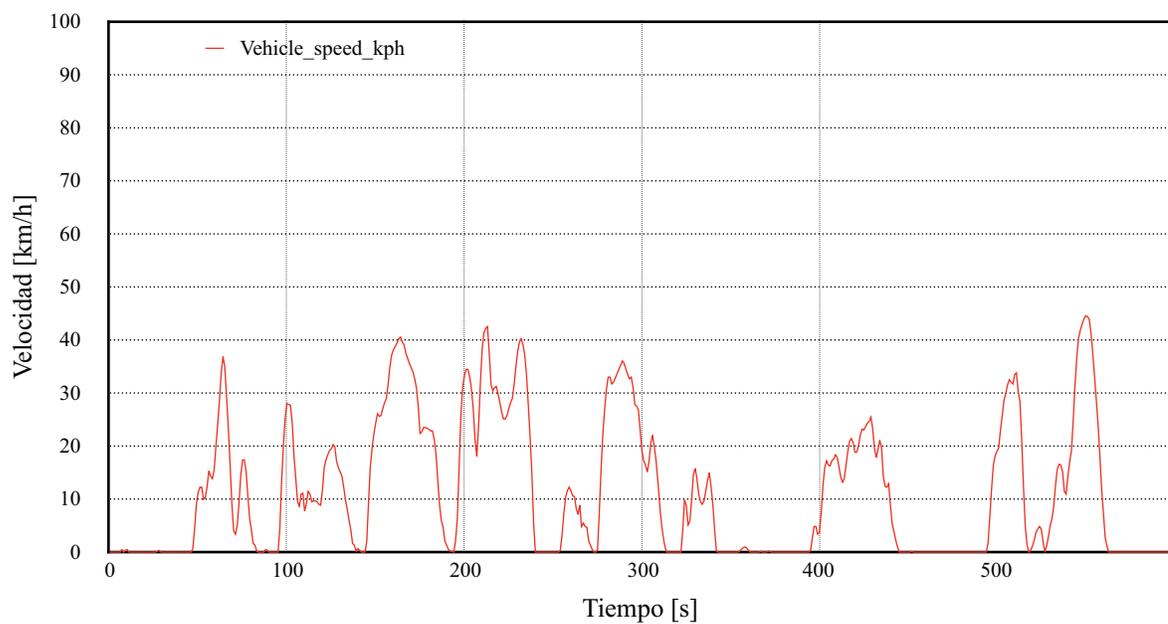
Gráfica N.3 Ciclo de manejo *WLTC class 1 (Low speed)*.

El ciclo de manejo WLTC class 1 (Low speed) corresponde al segmento 1 de 3 del *Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure* empleado para evaluar el desempeño a bajas velocidades de vehículos eléctrico ligero en entornos urbanos. La condición para aplicar el test es que la relación potencia-masa (power-weight ratio) del vehículo sea menor a 22 kW/ton.

La potencia mecánica nominal del motor CD del carro de golf es de 1.86kW y la masa aproximada del vehículo (incluyendo baterías, celda de combustible y pasajeros) es de aproximadamente 604.751 kg. La relación potencia-masa del vehículo es de 3.079 kW/ton, lo que permite implementar el ciclo de manejo *WLTC class 1 (Low speed)* para evaluar su desempeño.

Ciclo de manejo 4: New York City Cycle**Tabla N.4** Parámetros del ciclo de manejo *New York City Cycle*.

Parámetros	Valor
Duración	598 s
Distancia	1.899 km
Velocidad promedio	11.426 km/h
Velocidad máxima	44.579 km/h

**Gráfica N.4** Ciclo de manejo *New York City Cycle*.

Anexo O

Autonomía de un carro de golf en condiciones de operación nominal

Para condiciones de operación nominal en el motor (Tabla B.1), es posible calcular la potencia eléctrica nominal.

$$P_E = V_M \cdot I_M \quad (O.1)$$

$$P_{E, \text{nom}} = 36 \text{ V} \cdot 62 \text{ A}$$

$$P_{E, \text{nom}} = 2232 \text{ W}$$

La eficiencia del motor se calcula a partir de valores de potencia nominal mecánica.

$$P_{M, \text{nom}} = \eta_M \cdot P_{E, \text{nom}} \quad (O.2)$$

$$\eta_M = \frac{P_{M, \text{nom}}}{P_{E, \text{nom}}} = \frac{1860 \text{ W}}{2232 \text{ W}}$$

$$\eta_M = 0.8333 = 83.33\%$$

Para valores de velocidad rotacional del motor, es posible calcular la velocidad angular.

$$\omega_M = \frac{2\pi}{60} N_{\text{nom}} \quad (O.3)$$

$$\omega_M = \frac{2\pi}{60} (3300 \text{ rpm})$$

$$\omega_M = 345.575 \text{ rad/s}$$

A partir de la potencia nominal y la velocidad nominal es posible determinar el torque máximo desarrollado en el motor.

$$\tau_M = \frac{P_{M,nom}}{\omega_M} \quad (0.4)$$

$$\tau_M = \frac{1860 \text{ W}}{345.575 \text{ rad/s}}$$

$$\tau_M = 5.38 \text{ Nm}$$

Para un valor de eficiencia de transmisión en la caja de engranes, es posible calcular la potencia en el eje de tracción.

$$P_T = \eta_{GB} \cdot P_{M,nom} \quad (0.5)$$

$$P_T = 0.85(1860 \text{ W})$$

$$P_T = 1581 \text{ W}$$

A partir de la relación de velocidades y eficiencia de transmisión en la caja de engranes, es posible obtener los valores de velocidad angular y torque en el eje de tracción.

$$\tau_T = \tau_M \cdot n_{GB} \cdot \sqrt{\eta_{GB}} \quad (0.6)$$

$$\tau_T = 5.38 \text{ Nm}(12.5)(\sqrt{0.85}) = 62.02 \text{ Nm}$$

$$\omega_T = \frac{\omega_M \cdot \sqrt{\eta_{GB}}}{n_{GB}} \quad (0.7)$$

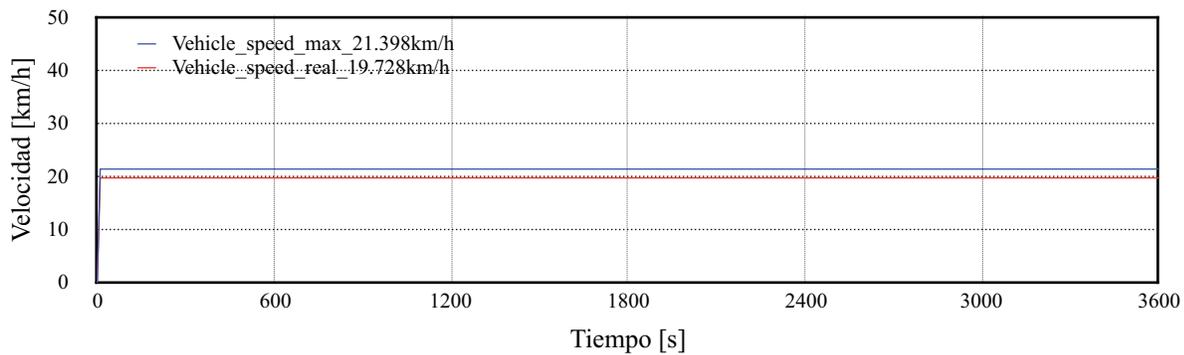
$$\omega_T = \frac{345.575 \text{ rad/s}(\sqrt{0.85})}{12.5} = 25.48 \text{ rad/s}$$

Se calcula la velocidad lineal en el eje de tracción para condiciones de operación nominal en el motor.

$$v_T = \omega_T \cdot r_n \quad (O.8)$$

$$v_T = 25.48 \text{ rad/s}(0.215 \text{ m})$$

$$v_T = 5.4782 \text{ m/s} = 19.728 \text{ km/h}$$



Gráfica O.1 Velocidad lineal máxima teórica y real de un carro de golf con una relación de 12.5:1 en la caja reductora.

La [Gráfica O.1](#) describe el recorrido de un vehículo durante una hora a una velocidad constante correspondiente a condiciones de operación nominal del motor. Se puede observar que la velocidad real calculada difiere de la velocidad máxima mostrada en la [Tabla C.1](#).

Para una eficiencia en el controlador de velocidad, es posible estimar la potencia en las baterías.

$$P_B = \eta_C \cdot P_E \quad (O.9)$$

$$P_B = 0.85(2232 \text{ W})$$

$$P_B = 2625.882 \text{ W}$$

Se calcula la energía necesaria durante el trayecto:

$$E = P \cdot t \quad (O.10)$$

$$E_T = (2625.882 \text{ W})(1\text{h}) = 2625.882 \text{ Wh}$$

Para un valor de voltaje nominal en el banco de baterías, es posible estimar la corriente a la entrada del control de velocidad:

$$P = V \cdot I$$

$$I_B = \frac{P_B}{V_{B, \text{nom}}} \quad (O.11)$$

$$I_B = \frac{2625.882 \text{ W}}{36 \text{ V}}$$

$$I_B = 72.941 \text{ A}$$

A partir de la corriente en el banco de baterías es posible estimar el tiempo de descarga de una batería empleando la [Gráfica K.1](#) para calcular la capacidad de la batería.

$$C_B = I_B \cdot t \quad (O.12)$$

$$C_{B@72.94A} = 72.941 \text{ A}(2.437 \text{ h}) = 177.75 \text{ Ah}$$

Para un valor de voltaje nominal del banco de baterías, se calcula la energía máxima disponible en las baterías para la corriente a la entrada del controlador de velocidad.

$$E_{B@72.94A} = C_{B@72.94A} \times V_{B, \text{nom}} \quad (O.13)$$

$$E_{B@72.94A} = 177.75 \text{ Ah}(36 \text{ V})$$

$$E_{B, \text{max}} = 6399.17 \text{ Wh}$$

El límite de profundidad de descarga recomendado por el fabricante es de 80% [90], por lo que la energía máxima efectiva esta dada por:

$$E_{B,lim} = 6399.17 \text{ Wh} \times 0.8$$

$$E_{B,lim} = 5119.336 \text{ Wh}$$

Es posible determinar los parámetros de autonomía del carro de golf si se divide la energía disponible en el banco de baterías entre la energía necesaria requerida.

$$\text{Número de recorridos} = \frac{E_{B,lim}}{E_T} = \frac{5119.336 \text{ Wh}}{2625.882 \text{ Wh}} = 1.95 \text{ recorridos de una hora}$$

Para el valor de la velocidad máxima en condiciones de operación nominal del motor, se determina la distancia máxima que puede recorrer el vehículo.

$$v = \frac{d}{t} \tag{O.14}$$

$$d = v \cdot t$$

$$d = 19.728 \text{ km/h}(1.95 \text{ h})$$

$$d = 38.462 \text{ km}$$

Autonomía de un carro de golf en condiciones de velocidad variable

La profundidad de descarga DOD describe la energía disponible en una batería como un porcentaje del total de la carga:

$$DOD = 1 - SOC \quad (O.15)$$

$$DOD_{\%} = 100\% - SOC_{\%} \quad (O.16)$$

Existe un límite de profundidad de descarga DOD_{lim} recomendado por el fabricante de la batería. Esto significa que para mantener la batería en condiciones óptimas de operación y prolongar su vida útil, no se debe descargar al 100%, sino a un valor límite SOC_{lim} de estado de carga:

$$DOD_{lim} = 100\% - SOC_{lim} \quad (O.17)$$

Se puede considerar el porcentaje de descarga como un equivalente de la energía entregada por la batería en un recorrido y se calcula restando el estado de carga final medido en terminales al estado de carga inicial:

$$POD = SOC_{in} - SOC_{fin} \quad (O.18)$$

Al dividir el límite de profundidad de descarga DOD_{lim} entre el porcentaje de descarga POD se puede estimar el número de veces que se puede repetir el recorrido y descargar la batería hasta el límite de estado de carga:

$$n_{trip} = \frac{DOD_{lim}}{POD} \quad (O.20)$$

Para aproximar el valor de la autonomía que el vehículo puede recorrer si repitiera el mismo trayecto, se multiplica el número de recorridos n_{trip} por la distancia alcanzada en un recorrido:

$$d_{max} = n_{trip} \cdot d_{trip} \quad (O.21)$$

Para calcular el tiempo de operación se multiplica el número de recorridos por el tiempo que dura la el trayecto:

$$t_{\max} = n_{\text{trip}} \cdot t_{\text{trip}} \quad (\text{O.22})$$

Se puede considerar el tiempo efectivo como la suma de los intervalos en los que la velocidad del vehículo es mayor a cero y consume energía. Es posible aproximar la duración de la batería multiplicando el número de recorridos por el tiempo efectivo:

$$t_{\text{B, max}} = n_{\text{trip}} \cdot t_{\text{eff}} \quad (\text{O.23})$$

Anexo P

Cálculo del volumen del tanque de hidrógeno presurizado

El volumen de un tanque se puede aproximar a un cilindro con una semiesfera en la parte superior (Figura P.1).

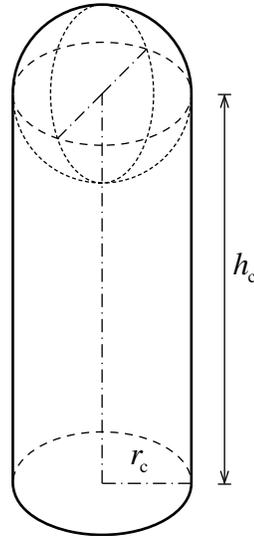


Figura P.1 Volumen del tanque de hidrógeno.

El volumen del cilindro se calcula para valores de radio y altura aproximados:

$$V_c = \pi \cdot r_c^2 \cdot h_c \quad (\text{P.1})$$

$$V_c = \pi \cdot (1.5 \text{ in})^2 (11 \text{ in}) = \pi (0.0381 \text{ m})^2 (0.279 \text{ m})$$

$$V_c = 0.0012 \text{ m}^3$$

Se calcula el volumen de la semiesfera:

$$V_{se} = \frac{3}{8} \pi \cdot r^2 \quad (P.2)$$

$$V_{se} = \frac{3}{8} \pi (0.0381 \text{ m})^3$$

$$V_{se} = 0.000065 \text{ m}^3$$

Se calcula el volumen total del tanque:

$$V_{\text{tank}} = V_c + V_{es} \quad (P.3)$$

$$V_{\text{tank}} = 0.001265 \text{ m}^3 = 1.265 \text{ L}$$

Cálculo de la masa del tanque de hidrógeno presurizado

Tabla P.1 Datos del tanque de hidrógeno presurizado proporcionados por el fabricante.

Linde Compressed Hydrogen Cylinder	
Linde Gas (www.lindegas.com)	
Hydrogen UN1049	
Hydrogen UPH	
02499H6070DE	
123272 MAT#17608	
Concentration	99.999 %
Volume	150 liters
Pressure	2000 psig
Linde Gas	

A partir de los datos mostrados en la etiqueta del tanque de hidrógeno es posible calcular la masa aproximada del hidrógeno contenido.

Se calcula el volumen de hidrógeno que se puede almacenar en el tanque a condiciones de presión y temperatura normal:

$$V_{\text{H}_2} = 150 \text{ L.N} = 0.15 \text{ m}^3$$

Se calcula la masa del hidrógeno a 20° C:

$$m_{\text{H}_2} = \rho_{\text{H}@20^\circ\text{C}} \cdot V_{\text{H}_2} \quad (\text{P.4})$$

$$m_{\text{H}_2} = 0.083 \text{ kg/m}^3 (0.15 \text{ m}^3) = 0.01245 \text{ kg}$$

Según los estándares actuales, la masa del hidrógeno comprimido representa un aproximado del 5% de la masa total del tanque [31, 100, 105].

$$m_{\text{tank}} = \frac{m_{\text{H}_2}}{0.05} = \frac{0.01245 \text{ kg}}{0.05}$$

$$m_{\text{tank}} = 0.249 \text{ kg}$$

Cálculo de la energía almacenada en el tanque

La [Tabla P.2](#) muestra los valores de la densidad gravimétrica de energía del hidrógeno.

Tabla P.2 Densidad gravimétrica de energía del hidrógeno [31, 106, 107].

Parámetro	Valor	Unidad
Lower Heating Value (LHV)		
Joules	≈ 119.9	MJ/kg
Watt - hour	33.33	kWh/kg
Higher Heating Value (HHV)		
Joules	≈ 141.9	MJ/kg
Watt - hour	39.44	kWh/kg

Se puede calcular la energía contenida en un tanque de 150 L.N de hidrógeno comprimido a 2000 psig para los valores de densidad gravimétrica de energía con un valor de poder calorífico inferior (LHV) y un valor de poder calorífico superior (HHV).

$$E_{LHV} = \varepsilon_{LHV} \cdot m_{H_2} \quad (P.5)$$

$$E_{LHV} = 33.33 \text{ kWh/kg} (0.01245 \text{ kg})$$

$$E_{LHV} = 0.4149 \text{ kWh} = 414.958 \text{ Wh}$$

$$E_{HHV} = \varepsilon_{HHV} \cdot m_{H_2} \quad (P.6)$$

$$E_{HHV} = 39.44 \text{ kWh/kg} (0.01245 \text{ kg})$$

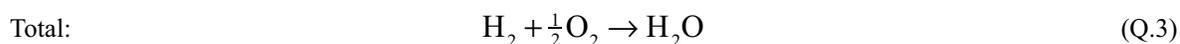
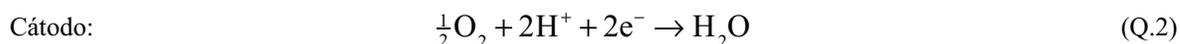
$$E_{HHV} = 0.4910 \text{ kWh} = 491.028 \text{ Wh}$$

El poder calorífico superior (HHV) es usado cuando el agua producida por la reacción en la celda resulta líquida (25°C) [107]. El poder calorífico inferior (LHV) es usado cuando el producto es vapor de agua (150°C). La diferencia entre los valores de poder calorífico inferior y superior corresponde al calor por condensación del agua producida y debido a que los productos de la reacción de hidrógeno con oxígeno en la celda de combustible pueden ser una combinación de líquido y vapor, es correcto emplear ambos valores [31].

Anexo Q

Cálculo del voltaje termodinámico de una celda de combustible PEM

Las reacciones químicas de una celda de combustible PEM son:



De la reacción total, la energía que puede ser convertida en potencial eléctrico corresponde a la energía libre de Gibbs, que es la entalpía de la reacción ΔH menos las pérdidas por generación de entropía [31].

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (\text{Q.4})$$

La entalpía de formación es calculada para condiciones normales de presión y temperatura (25°C y 1 atm) a partir de valores de tablas de propiedades termodinámicas [16].

$$\Delta H = (h_f)_{\text{H}_2\text{O}} - (h_f)_{\text{H}_2} - \frac{1}{2}(h_f)_{\text{O}_2} \quad (\text{Q.5})$$

$$\Delta H = -285.83 - 0 - 0 = -285.83 \text{ kJ/kgmol}$$

La entropía generada también se calcula a partir de datos de tablas de propiedades termodinámicas.

$$\Delta S = (s_f)_{\text{H}_2\text{O}} - (s_f)_{\text{H}_2} - \frac{1}{2}(s_f)_{\text{O}_2} \quad (\text{Q.6})$$

$$\Delta S = 0.069 - 0.130 - 0.1025 = -0.163 \text{ kJ/kmol} \cdot \text{K}$$

A partir de la entalpía de la reacción y la entropía generada, es posible calcular la energía que puede ser aprovechada en la celda.

$$\Delta G = -285.83 \text{ kJ/kmol} - (298.15 \text{ K}(-0.163 \text{ kJ/kmol} \cdot \text{K})) \quad (\text{Q.7})$$

$$\Delta G = -237.11 \text{ kJ/kmol}$$

El trabajo eléctrico está definido de forma general como el producto de la carga eléctrica por el potencial [31].

$$W_E = q \cdot E \quad (\text{Q.8})$$

La carga total involucrada en la reacción de la celda de combustible PEM esta dada por el número de electrones por molécula de H_2 , el número de moléculas por mol (número de Avogadro) y la carga del electrón.

$$q = n_e \cdot N_{\text{Avg}} \cdot q_e = n_e \cdot F \quad (\text{Q.9})$$

El producto de la carga eléctrica del electrón y el número de Avogadro es conocida como la constante de Faraday.

El trabajo eléctrico es igual a la energía libre de Gibbs.

$$W_E = n \cdot F \cdot E = -\Delta G \quad (\text{Q.10})$$

De esa forma es posible estimar el voltaje teórico de la celda de combustible.

$$E = \frac{-\Delta G}{nF} \quad (\text{Q.11})$$

$$E = \frac{-237110 \text{ J/mol}}{2(96485 \text{ A} \cdot \text{s/mol})}$$

$$E = 1.23 \text{ V}$$

Anexo R

Circuitos del tren de potencia

Figura R.1 Circuito completo del tren de potencia del vehículo eléctrico ligero.

Figura R.2 Subcircuito de la batería ácido-plomo.

Figura R.3 Subcircuito del convertidor de potencia.

Figura R.4 Subcircuito de la carga mecánica.

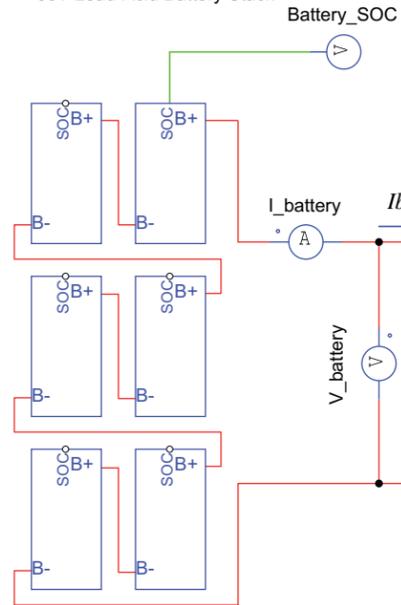
Página en blanco

Figura R.1 Circuito completo del tren de potencia del vehículo eléctrico ligero.

Simulation Control
 Time step: 0.0001 sec
 Frequency: 1000Hz

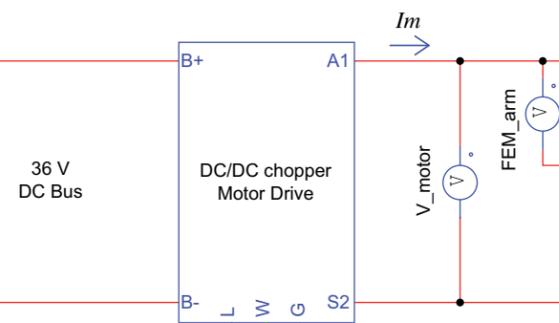
1. Power Supply System

36V Lead-Acid Battery Stack
 Battery_SOC



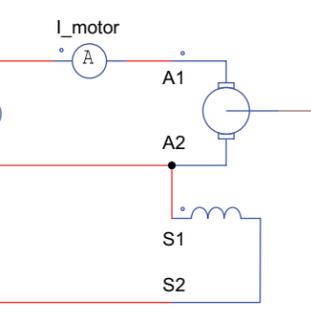
2. Power Conversion System

DC/DC Power Converter



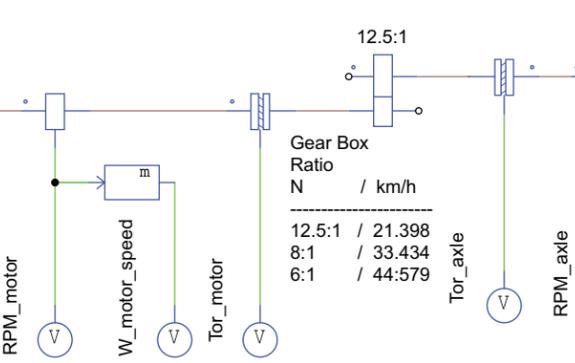
4. Mechanical System

DC Motor Wound Field



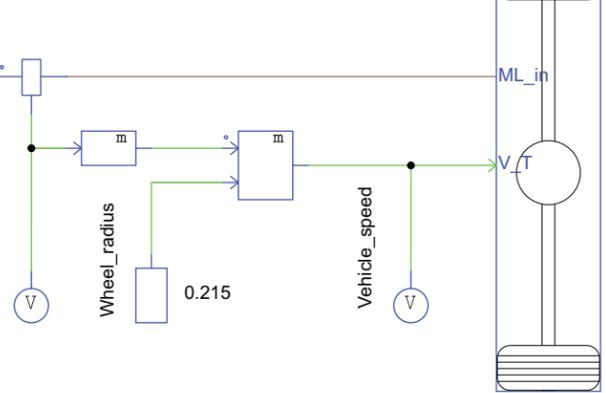
5. Transmission System

Drive axle gearbox



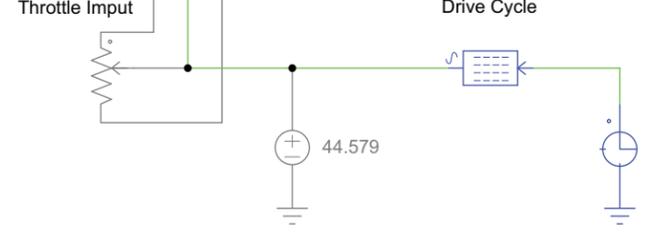
6. Traction System

Drive Axle

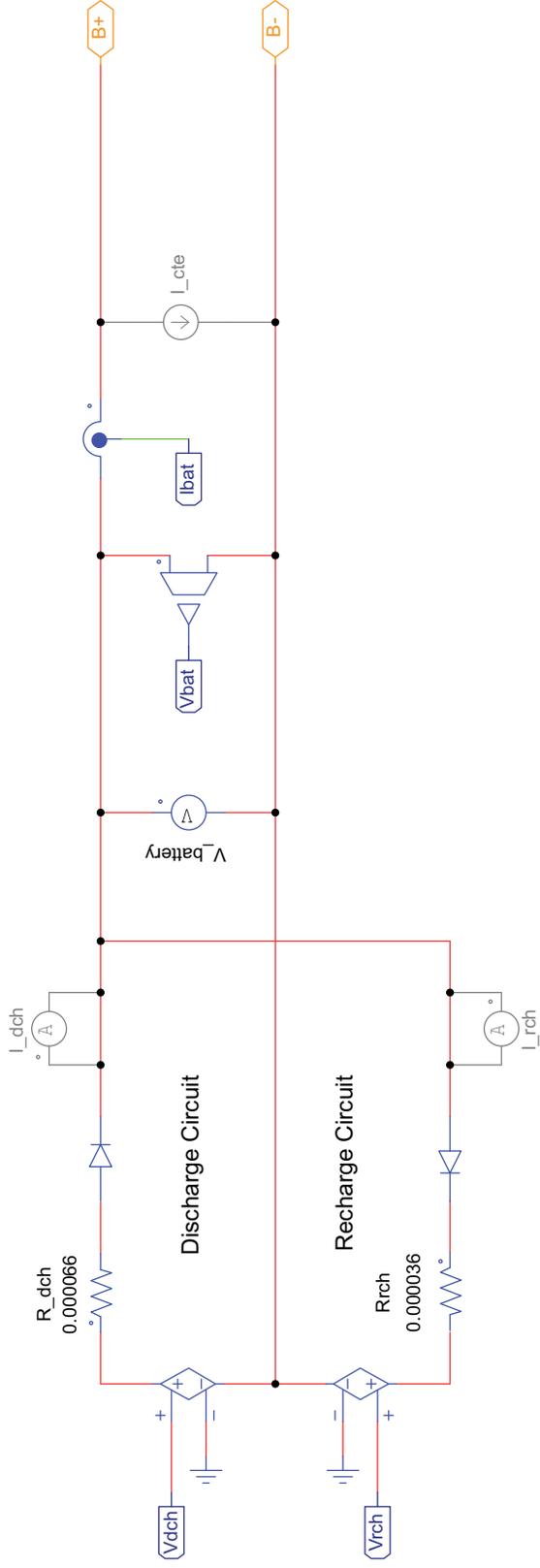


3. Speed Control System

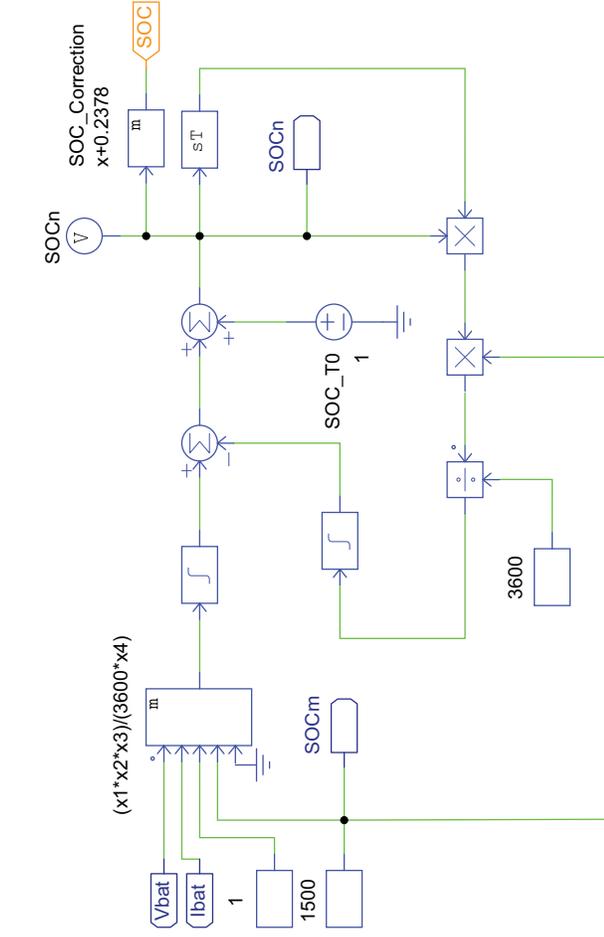
Drive Cycle



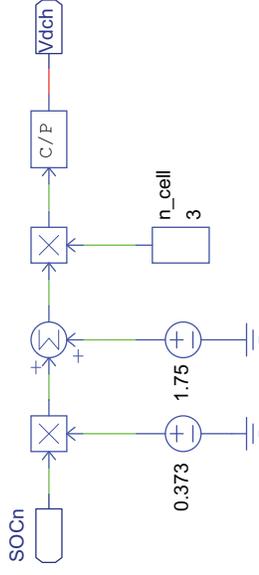
Battery Equivalent Circuit



State of Charge (SOC) Equation



Discharge Voltage Equation



Recharge Voltage Equation

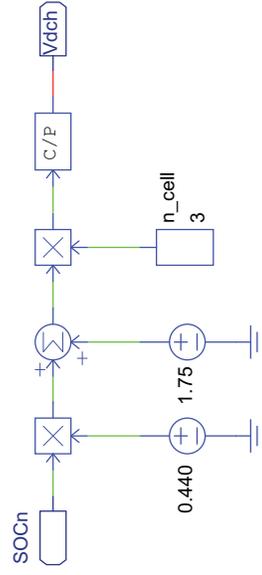
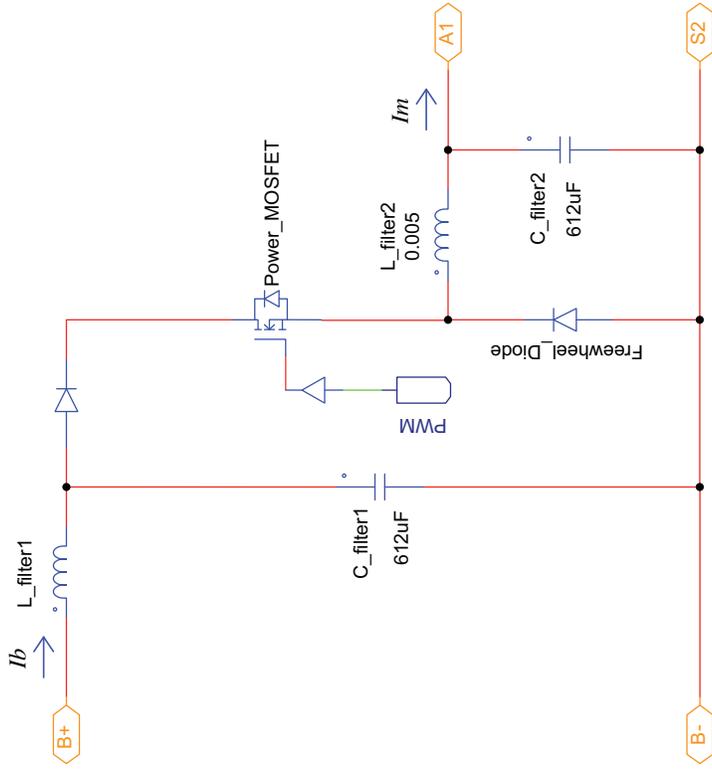


Figura R.2 Subcircuito de la batería ácido-plomo.

Lead-Acid Battery Version 6.4

Autor: Salvador Vidal Bravo, IER-JUNAM
Director: Dr. Javier de la Cruz, INEEL

DC/DC Power Converter



PWM Switch Speed Controller

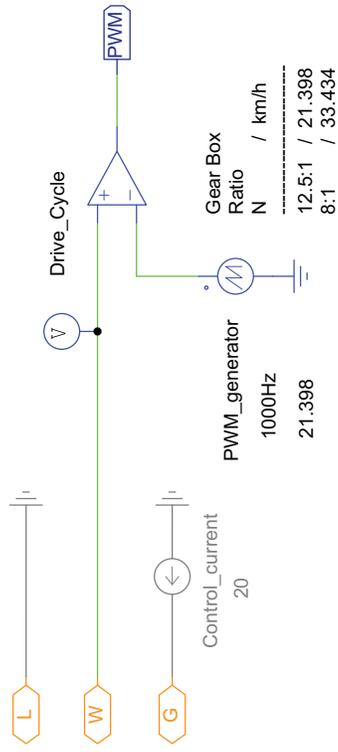
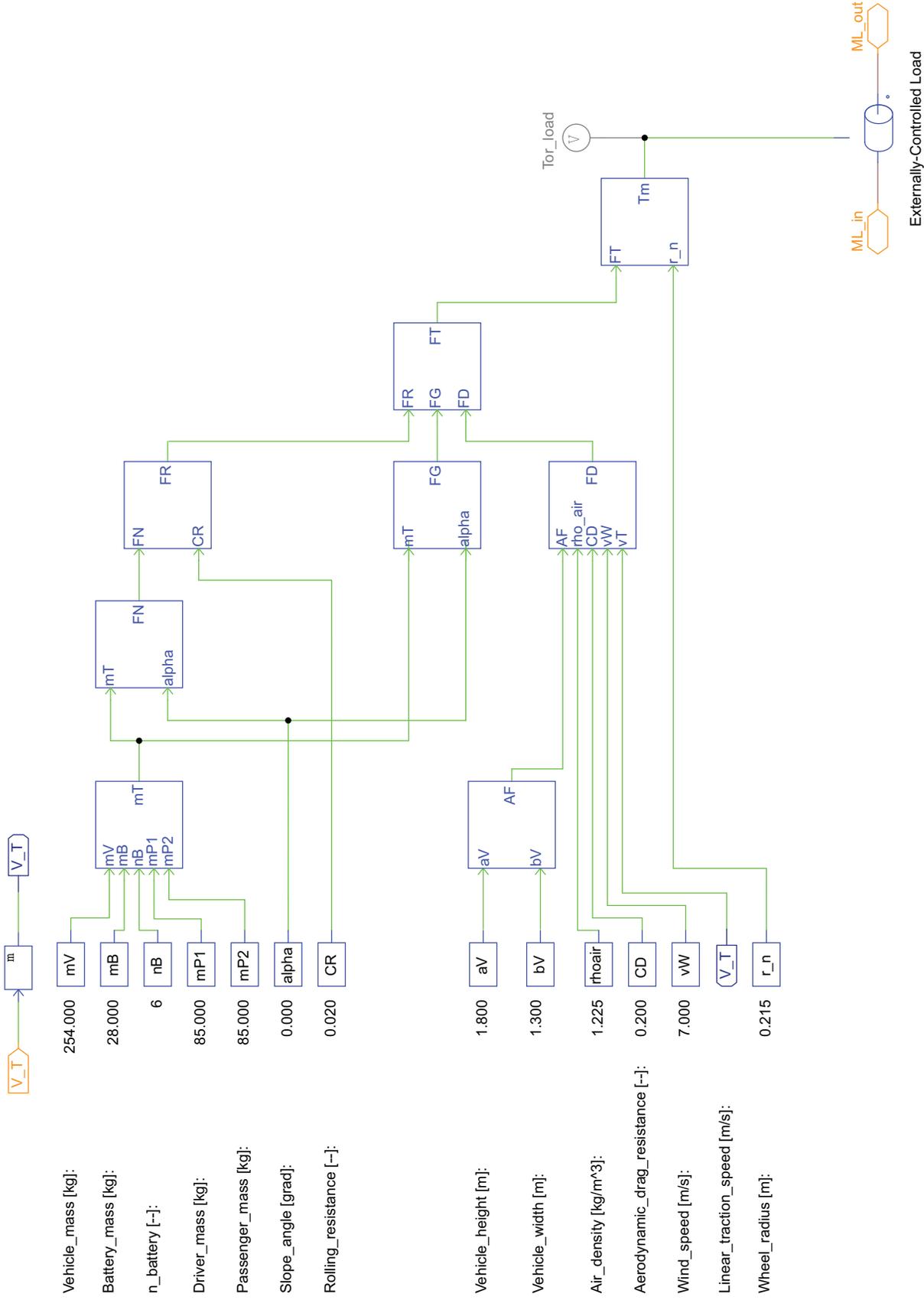


Figura R.3 Subcircuito del convertidor de potencia.



Mechanical Load Mathematical Model

Version 7.2

Autor: Salvador Vidal Bravo, IER-UNAM
 Director: Dr. Javier de la Cruz, INEEL

Figura R.4 Subcircuito de la carga mecánica.

Anexo S

Circuitos del tren de potencia eléctrico híbrido

Figura S.1 Circuito completo del tren de potencia híbrido del vehículo eléctrico ligero.

Figura S.2 Subcircuito de la celda de combustible.

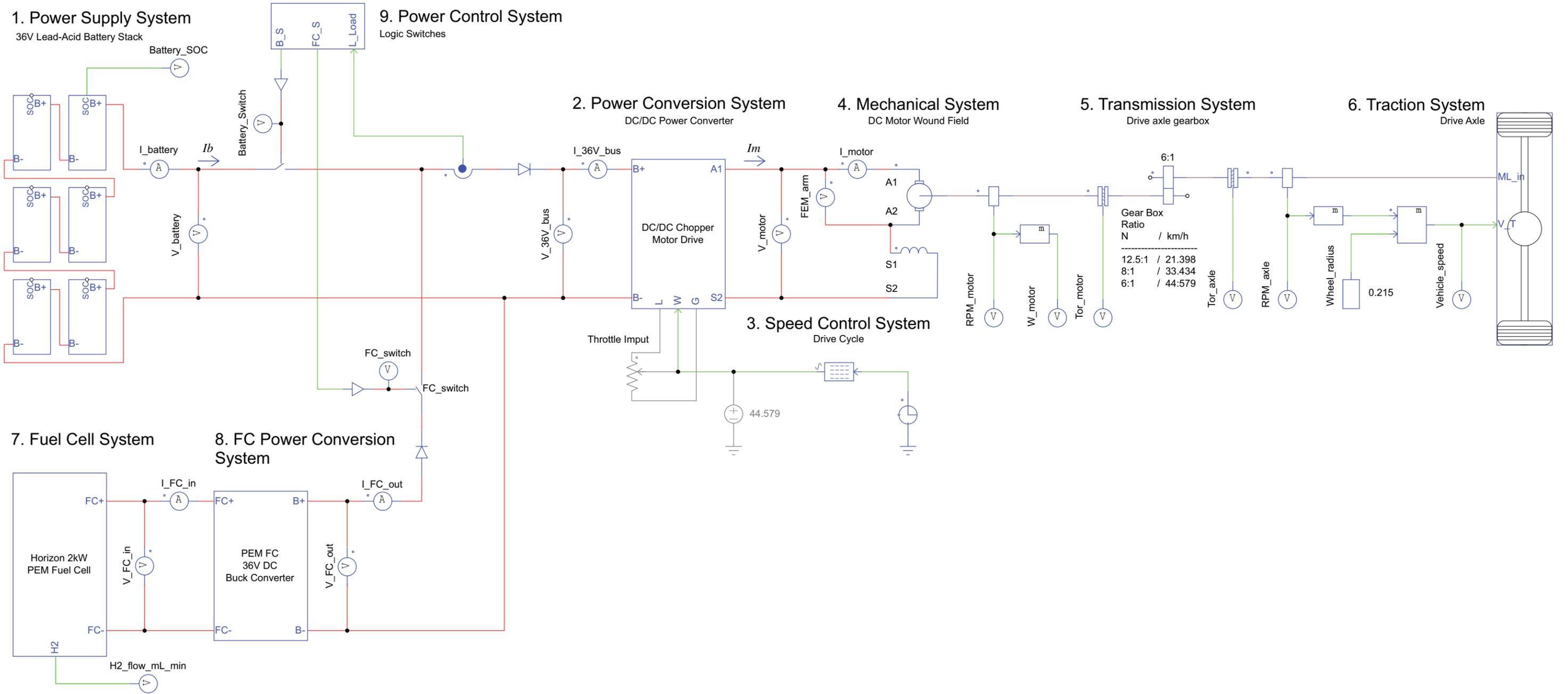
Figura S.3 Subcircuito del convertidor de potencia diseñado para conectar la celda de combustible.

Página en blanco

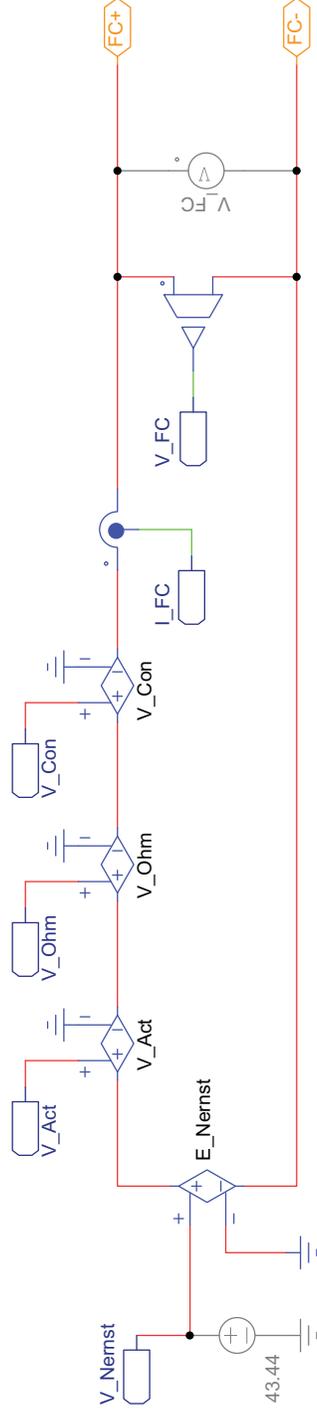
Figura S.1 Circuito completo del tren de potencia híbrido del vehículo eléctrico ligero.



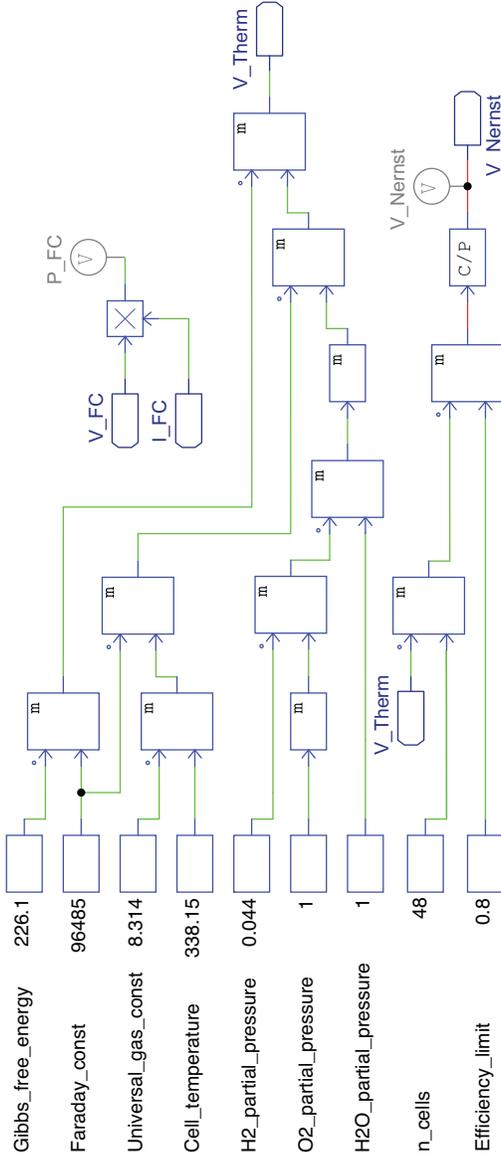
Simulation Control
 Time step: 0.0001 sec
 Frequency: 1000Hz



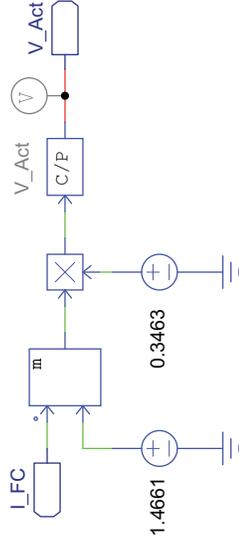
Fuel Cell Equivalent Circuit



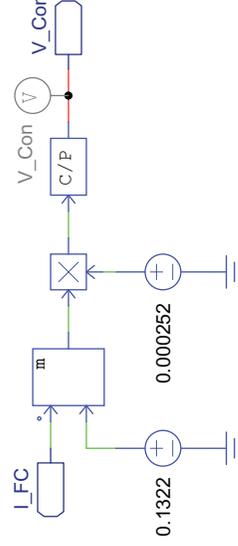
Thermodynamic Voltage Equation



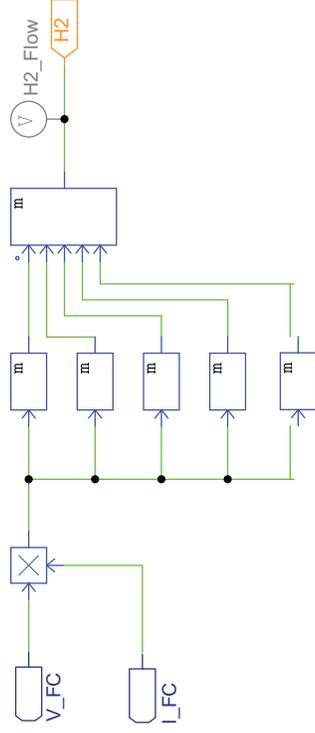
Activation Losses Equation



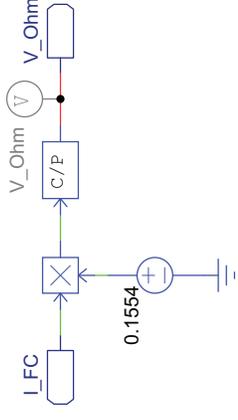
Concentration Losses Equation



Hydrogen Flow Equation



Ohmic Losses Equation



PEM Fuel Cell

Version 7.0

Autor: Salvador Vidal Bravo, IER-UNAM
Director: Dr. Javier de la Cruz, INEEL

Figura S.2 Subcircuito de la celda de combustible.

DC/DC Buck Converter

PWM Control

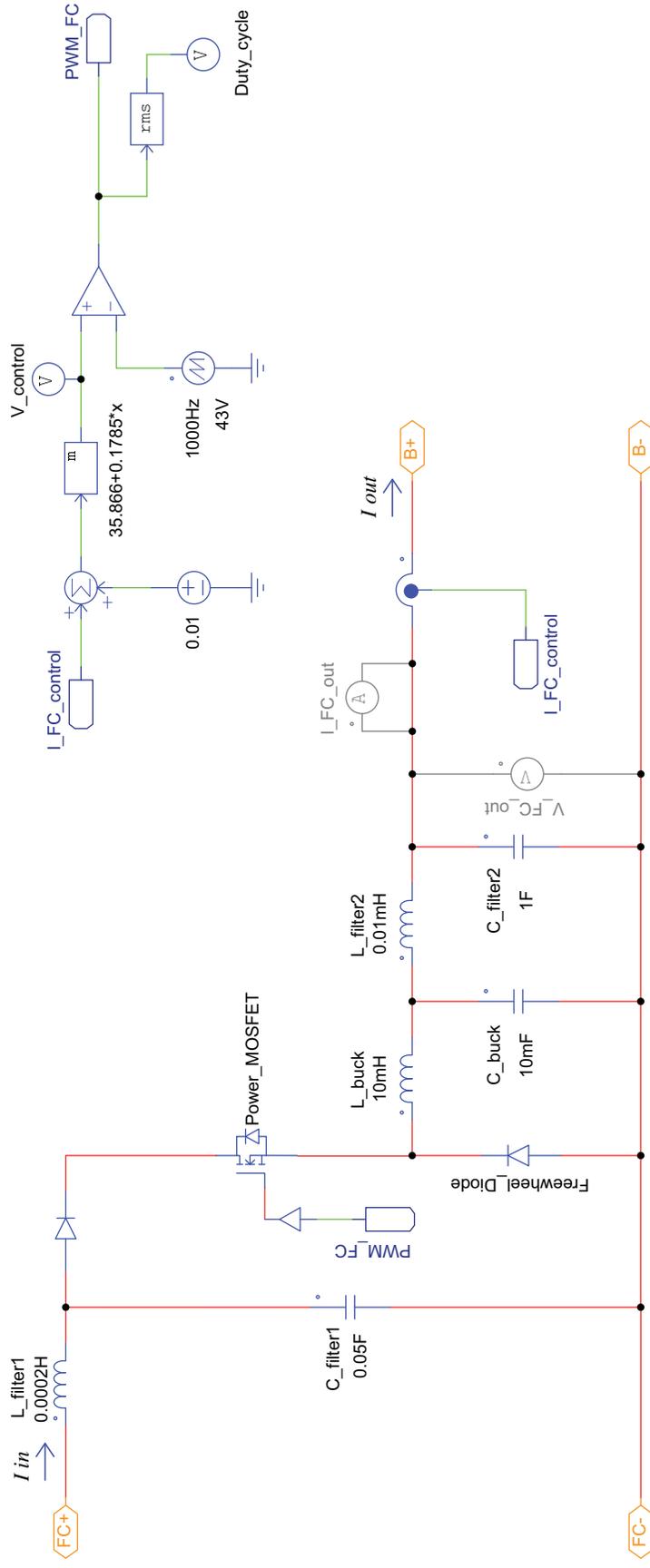


Figura S.3 Subcircuito del convertidor de potencia diseñado para conectar la celda de combustible.

Fuel Cell DC/DC Buck Converter Version 5.2

Autor: Salvador Vidal Bravo, IER-JUNAM
Director: Dr. Javier de la Cruz, INEEL

Página en blanco

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Nigel Burton, *History of electric cars*. The Crowood Press Ltd, 2013.
- [2] Ali Emadi, *Advanced electric drive vehicles*. CRC Press, 2014.
- [3] International Energy Agency, "Global EV Outlook 2017," France, 2017, Disponible en: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/GlobalEVOutlook2017.pdf>
- [4] Mehrdad Ehsani, Yimin Gao, and Ali Emadi, *Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: fundamentals, theory, and design*. CRC press, 2009.
- [5] International Energy Agency, "CO2 Emissions From Fuel Combustion 2017," Francia, 2017, Disponible en: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/CO2EmissionsFromFuelCombustion2017Overview.pdf>
- [6] Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, "Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero," 2014, Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/162807/CGCCDBC_2016_Tabla_inventario_nacional_GEyCEI_2014_Energia.pdf
- [7] International Energy Agency, "World Energy Balances 2017," 2017, Disponible en: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WorldEnergyBalances2017Overview.pdf>
- [8] Sistema de Información Energética. (2017). *Sector Eléctrico, Generación bruta de energía por tecnología*. Disponible en: <http://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=cuadro&cvecua=IIIA1C05>, Revisado en: 17 diciembre 2017.
- [9] Secretaría de Energía, "Balance Nacional de Energía," México, 2016, Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/284340/Balance_Nacional_de_Energ_a_2016.pdf
- [10] Secretaría de Energía, "Prospectiva de Energías Renovables 2016-2030," México, 2016, Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/177622/Prospectiva_de_Energ_as_Renovables_2016-2030.pdf

- [11] Secretaría de Energía, "Programa de Redes Eléctricas Inteligentes," 2016, Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/90007/Programa_de_Red_El_ctricas_Inteligentes_09_05_16.pdf
- [12] Bent Sørensen, Renewable energy conversion, transmission, and storage. Academic press, 2007.
- [13] Robert Huggins, Energy storage: fundamentals, materials and applications. Springer, 2015.
- [14] U.S. Department of Energy. (2017). *Alternative Fuels Data Center*. Disponible en: <https://www.afdc.energy.gov/>, Revisado en: 2017.
- [15] U.S. Department Of Energy. (2017). *Hydrogen Benefits and Considerations, Alternative Fuels Data Center*. Disponible en: https://www.afdc.energy.gov/fuels/hydrogen_benefits.html, Revisado en: 2017.
- [16] Ryan O'hayre, Suk-Won Cha, Fritz B Prinz, and Whitney Colella, *Fuel cell fundamentals*. John Wiley & Sons, 2016.
- [17] Salvador Vidal, Félix Loyola, and Ulises Cano, "Review of the global delivery pathways of hydrogen fueling stations for fuel cell electric vehicles and their potential application in México," *XVII International Congress of the Mexican Hydrogen Society BOOK OF PROCEEDINGS*, 2017.
- [18] Gregor Hoogers, Fuel cell technology handbook. CRC press, 2002.
- [19] Toyota, "2018 Mirai," 2018, Disponible en: https://ssl.toyota.com/mirai/assets/modules/carpaghowitworks/Docs/MY18_Mirai_eBrochure_FuelCellTech.pdf
- [20] Nikola Corporation. (2018). *Nikola Electric-Semitrucks, Nikola Two*. Disponible en: <https://nikolamotor.com/two>, Revisado en: 2018.
- [21] Raymond Handling Concepts Corporation. (2015). *Definition: What is a Utility Vehicle?* Disponible en: <https://raymondhandling.com/dictionary/utility-vehicle/>, Revisado en: 2018.
- [22] Plug Power Inc. (2018). *Gendrive Fuel Cells*. Disponible en: <http://www.plugpower.com/products/gendrive/>, Revisado en: 2018.

- [23] Plug Power Inc. (2018). *Hydrogen Fuel Cells Rock the Supply Chain*. Disponible en: <http://www.plugpower.com/2018/03/hydrogen-fuel-cells-rock-the-supply-chain/>, Revisado en: 2018.
- [24] Popular Mechanics Magazine. (1932) Golfer follows ball in car run by electricity. Available: https://books.google.com/books?id=5uEDAAAAMBAJ&pg=PA801&dq=popular+mechanics+1932+May,1932&hl=en&ei=MRsPTEKDFofInAfj-8nLDg&sa=X&oi=book_result&ct=result&resnum=3&ved=0CC4Q6AEwAg#v=onepage&q=popular%20mechanics%201932%20May%2C1932&f=true
- [25] Thomas Bartman. (2015). *The Future of Electric Vehicles Is Golf Carts, Not Tesla*. Disponible en: <https://hbr.org/2015/05/the-future-of-electric-vehicles-is-golf-carts-not-tesla>, Revisado en: 2018.
- [26] RE Bobbett, JB McCormick, DK Lynn, WJ Kerwin, CR Derouin, and PH Salazar, "Fuel-cell-powered golf cart," Los Alamos Scientific Lab., NM (USA), 1980,
- [27] Ivan Tolj, Mykhaylo V Lototsky, Moegamat Wafeeq Davids, Sivakumar Pasupathi, Gerhard Swart, and Bruno G Pollet, "Fuel cell-battery hybrid powered light electric vehicle (golf cart): influence of fuel cell on the driving performance," *international journal of hydrogen energy*, vol. 38, no. 25, pp. 10630-10639, 2013.
- [28] Jingming Liang and Qifei Jian, "Simulation and test of a fuel cell hybrid golf cart," *Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 2014, p. 17, 2014.
- [29] Z. Qi, "APPLICATIONS – TRANSPORTATION | Light Traction: Fuel Cells A2 - Garche, Jürgen," in *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources* Amsterdam: Elsevier, 2009, pp. 302-312.
- [30] Rebecca L Busby, *Hydrogen and fuel cells: a comprehensive guide*. Pennwell Books, 2005.
- [31] Frano Barbir, *PEM fuel cells: theory and practice*. Academic Press, 2012.
- [32] Tokio Ohta and T Nejat Veziroglu, *Energy carriers and conversion systems with emphasis on hydrogen*. Eolss Publishers Company Limited, 2009.
- [33] Schatz Energy Research Center, "Fuel Cells Vehicle Fact Sheet," 1990, Disponible en: http://www.schatzlab.org/docs/fcvfaq_web.pdf

- [34] Heliocentris Academia GmbH, "Oakland University Builds a Hybrid Battery Fuel Cell Golf Cart," ed, 2014.
- [35] Oakland University. (2014). *Engineering students build hydrogen-powered golf cart*. Disponible en: <https://oakland.edu/ouinc/news/engineering-students-build-hydrogen-powered-golf-cart>, Revisado en: 2017.
- [36] Iqbal Husain, *Electric and hybrid vehicles: design fundamentals*. CRC press, 2011.
- [37] John G Hayes and G Abas Goodarzi, *Electric Powertrain: Energy Systems, Power Electronics and Drives for Hybrid, Electric and Fuel Cell Vehicles*. John Wiley & Sons, 2017.
- [38] Massimo Guarnieri, "Looking back to electric cars," in *History of Electro-technology Conference (HISTELCON), 2012 Third IEEE, 2012*, pp. 1-6: IEEE.
- [39] James Larminie and John Lowry, *Electric vehicle technology explained*. John Wiley & Sons, 2012.
- [40] Allen Fuhs, *Hybrid vehicles: and the future of personal transportation*. CRC Press, 2008.
- [41] Curtis D Anderson and Judy Anderson, *Electric and hybrid cars: A history*. McFarland, 2010.
- [42] Reza N Jazar, *Vehicle dynamics: theory and application*. Springer, 2017.
- [43] Amir Khajepour, M Saber Fallah, and Avesta Goodarzi, *Electric and Hybrid Vehicles: Technologies, Modeling and Control-A Mechatronic Approach*. John Wiley & Sons, 2014.
- [44] Tim J BARLOW, S Latham, IS McCrae, and PG Boulter, "A reference book of driving cycles for use in the measurement of road vehicle emissions," *TRL Published Project Report*, 2009.
- [45] Evangelos G Giakoumis, *Driving and engine cycles*. Springer, 2017.
- [46] John M Miller, *Propulsion systems for hybrid vehicles*. Iet, 2004.
- [47] Thomas D Gillespie, "Vehicle dynamics," *Warren dale*, 1997.
- [48] Konrad Reif, *Brakes, Brake control and driver assistance systems*. Springer, 2014.

-
- [49] Wuwei Chen, Hansong Xiao, Qidong Wang, Linfeng Zhao, and Maofei Zhu, *Integrated vehicle dynamics and control*. John Wiley & Sons, 2016.
- [50] Godfrey Onwubolu, *Mechatronics: principles and applications*. Elsevier, 2005.
- [51] Austin Hughes and William Drury, *Electric motors and drives: fundamentals, types and applications*. Newnes, 2013.
- [52] Eric Roberts Laithwaite, *A history of linear electric motors*. Springer, 1987.
- [53] Hamid A Toliyat and Gerald B Kliman, *Handbook of electric motors*. CRC press, 2004.
- [54] Fouad Giri, *AC electric motors control: Advanced design techniques and applications*. John Wiley & Sons, 2013.
- [55] Duane C Hanselman, *Brushless permanent magnet motor design*. The Writers' Collective, 2003.
- [56] Massimo Ceraolo and Davide Poli, *Fundamentals of electric power engineering: from electromagnetics to power systems*. John Wiley & Sons, 2014.
- [57] Antoni Szumanowski, *Hybrid Electric Power Train Engineering and Technology: Modeling, Control, and Simulation: Modeling, Control, and Simulation*. IGI Global, 2013.
- [58] CC Chan and KT Chau, *Modern electric vehicle technology*. Oxford University Press on Demand, 2001.
- [59] Stephen J Chapman, *Máquinas eléctricas (5a)*. McGraw Hill Mexico, 2012.
- [60] Ned Mohan, Tore M Robbins Undeland, P William, M Undeland Tore, and P Robbins William, *Electronica de potenciaconvertidores, aplicaciones y diseno* (no. 621.317). e-libro, Corp., 2003.
- [61] Hernán E. Fernández, *Convertidores de potencia, Aplicaciones y Análisis con el PSIM*. Amazon Kindle, 2016.
- [62] Stephen J. Chapman. (2018). *Electric Machine Fundamentals, Power Electronics*. Disponible en: http://higher.ed.mheducation.com/sites/0073529540/student_view0/power_electronics.html, Revisado en: 2017.

- [63] Muhammad H Rashid, *Power electronics handbook: devices, circuits and applications*. Academic press, 2010.
- [64] MD Singh, *Power electronics*. Tata McGraw-Hill Education, 2008.
- [65] David Linden, "Handbook of batteries and fuel cells," New York, McGraw-Hill Book Co., 1984, 1075 p. No individual items are abstracted in this volume., 1984.
- [66] Ralph J. Brodd, "Batteries for sustainability," 2013.
- [67] Detchko Pavlov, "Chapter 2 - Fundamentals of Lead–Acid Batteries," in *Lead-Acid Batteries: Science and Technology (Second Edition)* Amsterdam: Elsevier, 2017, pp. 33-129.
- [68] Luis Castaner and Santiago Silvestre, *Modelling photovoltaic systems using PSpice*. John Wiley and Sons, 2002.
- [69] Gregory L Plett, *Battery management systems, Volume I: Battery Modelling*. Artech House, 2015.
- [70] M Godoy Simões and Felix A Farret, *Modeling Power Electronics and Interfacing Energy Conversion Systems*. John Wiley & Sons, 2016.
- [71] Vladimir S Bagotsky, Alexander M Skundin, and Yuriy M Volkovich, *Electrochemical power sources: batteries, fuel cells, and supercapacitors*. John Wiley & Sons, 2015.
- [72] Pasquale Corbo, Fortunato Migliardini, and Ottorino Veneri, *Hydrogen fuel cells for road vehicles*. Springer Science & Business Media, 2011.
- [73] Colleen Spiegel, *Designing and building fuel cells*. Citeseer, 2007.
- [74] H2 Mobility. (2017). *Timeline of all Hydrogen Vehicles Worldwide*. Disponible en: <https://www.netinform.net/h2/H2Mobility/Default.aspx>, Revisado en: 17 de diciembre 2017.
- [75] Shripad T Revankar and Pradip Majumdar, *Fuel cells: principles, design, and analysis*. CRC press, 2014.
- [76] L James and D Andrew, "Fuel Cell Systems Explained 2nd," ed: UK, 2003.

-
- [77] Chris Mi and M Abul Masrur, *Hybrid electric vehicles: principles and applications with practical perspectives*. John Wiley & Sons, 2017.
- [78] Bogdan Ovidiu Varga, Florin Mariasiu, Dan Moldovanu, and Calin Iclodean, *Electric and Plug-In Hybrid Vehicles*. Springer, 2016.
- [79] Everything Carts, "What Year Is Your YAMAHA?," ed, 2017.
- [80] Carlos Alberto Reynoso Galvan, "Informe Técnico, 1ra Etapa: Rehabilitación de Vehículo Eléctrico, para la integración de una de una planta de potencia eléctrica híbrida en un carro de Golf," ed, 2017.
- [81] Inc. Curtis Instruments, "Motor Controllers Manual Model 1204/5," ed, 2011.
- [82] Yamaha Motor Manufacturing Corporation of America, "G16A, G16E OWNER'S/ OPERATOR'S MANUAL," ed, 2000.
- [83] British Columbia, "Neighbourhood Golf Carts, Overview," 2018, Disponible en: <https://www2.gov.bc.ca/gov/content/transportation/driving-and-cycling/road-safety-rules-and-consequences/neighbourhood-golf-carts>
- [84] Trojan Battery Company, "T-105 DATA SHEET," 2016, Disponible en: https://www.trojanbattery.com/pdf/datasheets/T105_Trojan_Data_Sheets.pdf
- [85] Z. Qi, *Proton Exchange Membrane Fuel Cells*. Taylor & Francis, 2013.
- [86] Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias. (2018). *Mapas de potencial eólico*. Disponible en: <http://sag01.iie.org.mx/sig/>, Revisado en: 2018.
- [87] Inc. Curtis Instruments, "Model 1204/5 Motor Controllers Manual," ed, 2011.
- [88] Powersim Inc., "PSIM User's Manual Version 11.0," ed: January, 2016.
- [89] Universidad Autónoma Metropolitana. (2018). *Metódos Numéricos, Errores*. Disponible en: <http://test.cua.uam.mx/MN/errores.php>, Revisado en: 2018.
- [90] Trojan Battery Company. (2018). *Frequently Asked Questions*. Disponible en: <https://www.trojanbattery.com/tech-support/faq/>, Revisado en: 2018.
- [91] Bei Gou, Woon Ki Na, and Bill Diong, "Fuel Cells: Modeling," *Control and Applications (CRC/Taylor & Francis Group, 2010)*, 2010.

- [92] Mehrdad Ehsani, Yimin Gao, Stefano Longo, and Kambiz Ebrahimi, *Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles*. CRC press, 2018.
- [93] Bei Gou, Woonki Na, and Bill Diong, *Fuel cells: dynamic modeling and control with power electronics applications*. CRC press, 2016.
- [94] Horizon Fuel Cells Technologies, "2000W Fuel Cell Stack User Manual," 2013, Disponible en: https://docs.wixstatic.com/ugd/047f54_95455ec965efe85c17e1e6243c9eb6a7.pdf
- [95] GUILHERME HF Fuzato, CRD Aguiar, RICARDO Q Machado, AMILCAR FQ GonÇalves, and RENAN F Bastos, "Emulador de celulas a combustivel utilizando um conversor buck de multiplas fases," in *Anais do XX Congresso Brasileiro de Automatica, Belo Horizonte*, 2014, pp. 492-498.
- [96] Larminie James and Dicks Andrew, *Fuel Cell Systems Explained*. Wiley & Sons, 2003.
- [97] Larminie James and Dicks Andrew, "Fuel cell systems explained," *Chichster: John Wiley & Sons Ltd*, 2003.
- [98] United States Environmental Protection Agency (EPA), "Vehicle and Fuel Emissions Testing, Dynamometer Drive Schedules," ed, 2017.
- [99] Toyota, "Outline of the Mirai," 2014, Disponible en: https://www.toyota-europe.com/download/cms/euen/Toyota%20Mirai%20FCV_Posters_LR_tcm-11-564265.pdf
- [100] U.S. Department of Energy (DOE). (2018). *Physical Hydrogen Storage*. Disponible en: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/physical-hydrogen-storage>, Revisado en: 2018.
- [101] Yamaha Motor Manufacturing Corporation of America, "G16A, G16E Owner's/ Operators's Manual," 2000,
- [102] Golf Car Catalog. (2018). *Performance Gears*. Disponible en: <https://www.golfcarcatalog.com/categories.php?category=Motors%2C-Controllers%2C-%26-Performance-Parts/Performance-Parts/Performance-Gears>, Revisado en: 2017.

- [103] Kristopher J Seluga, Lowell L Baker, and Irving U Ojalvo, "A parametric study of golf car and personal transport vehicle braking stability and their deficiencies," *Accident Analysis & Prevention*, vol. 41, no. 4, pp. 839-848, 2009.
- [104] Hauke Brigitte, "Basic calculation of a buck converter's power stage," *Texas Instruments, Dallas, Texas, Tech. Rep. SLVA477*, 2011.
- [105] Toyota, "Outline of the Mirai," ed, 2014.
- [106] Michelle Fung. (2005). *Energy Density of Hydrogen*. Disponible en: <https://hypertextbook.com/facts/2005/MichelleFung.shtml>, Revisado en: 2018.
- [107] DOE Office of Energy Efficiency and Renewable Energy's Fuel Cell Technologies Office Pacific Northwest National Laboratory. (2018). *Lower and Higher Heating Values of Fuels*. Disponible en: <https://h2tools.org/hyarc/calculator-tools/lower-and-higher-heating-values-fuels>, Revisado en: 2018.