

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**“DESARROLLO DE MODELO MATEMÁTICO PARA LA CARACTERIZACIÓN
DE UN VEHICULO ELÉCTRICO A BATERÍAS CLASE VI – VIII”**

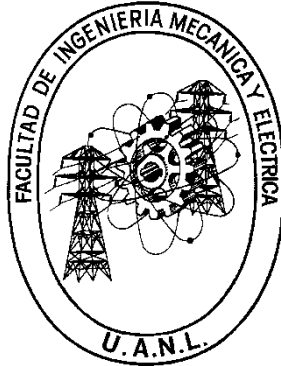
Por:
DAVID MORENO CERDA

EN OPCIÓN AL GRADO DE:
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA AUTOMOTRIZ

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN

JULIO DEL 2025

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**“DESARROLLO DE MODELO MATEMÁTICO PARA LA CARACTERIZACIÓN
DE UN VEHICULO ELÉCTRICO A BATERÍAS CLASE VI – VIII”**

Por:
DAVID MORENO CERDA

EN OPCIÓN AL GRADO DE:
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA AUTOMOTRIZ

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN

JULIO DEL 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Posgrado

Los miembros del Comité de Evaluación de Tesis recomendamos que la Tesis “Desarrollo de modelo matemático para la caracterización de un vehículo eléctrico a baterías clase VI - VIII”, realizada por el estudiante David Moreno Cerda, con número de matrícula 2081668, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería Automotriz.

El Comité de Evaluación de Tesis

Dra. Tania Paloma Berber Solano
Director

Dr. Diego Francisco Ledezma Ramírez
Co-director

Dr. Martín Castillo Morales
Revisor

Dra. Adriana Salas Zamarripa
Revisor

Dra. Natalia Andrea Navarrete Alzate
Revisor

Vo.Bo.


Dr. Simón Martínez Martínez
Subdirector de Estudios de Posgrado

Institución 190001

Programa 554502

Acta Núm. 4479

Ciudad Universitaria, a Marzo 2025.

DEDICATORIA

A Dios, a mis abuelas, a mis seres queridos y a todos los que caminaron conmigo en este proceso.

Gracias por acompañarme en este camino, construido con esfuerzo, fe y resiliencia.

AGRADECIMIENTOS

- A mis padres, a mi novia, mi hermana y mis amigos por su apoyo incondicional a lo largo de este proceso. Su amor y aliento han sido mi mayor motivación.
- Quiero agradecer especialmente a la Dra. Tania Berber Solano por su orientación, experiencia, paciencia y dedicación durante todo el proceso de desarrollo y escritura en este proyecto. Sus comentarios, sugerencias e intercambio de ideas aportaron un valor invaluable en esta Tesis.
- A la Dra. Natalia Navarrete Alzate por permitirme participar en este proyecto, su compromiso, comentarios, sugerencias y aportaciones con cada retroalimentación para aportar un mayor valor a la Tesis.
- A la Universidad Autónoma de Nuevo Leon, la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, sus docentes y compañeros de clase por la oportunidad de estudiar este programa y pertenecer a esta universidad.
- A CONACYT por el apoyo económico y la oportunidad de estudiar este programa de maestría.

índice

RESUMEN	1
CAPÍTULO I	3
1.1 Introducción	3
1.1.2 ¿Cuál es la importancia de los BEV en el futuro?	4
1.2 Antecedentes	7
1.3 Planteamiento De Problema	15
1.4 Justificación.....	16
1.5 Hipótesis	16
1.6 Objetivo General	17
1.6.1 Objetivos Específicos	17
1.7 Metodología de la Investigación.....	18
1.8 Descripción de la Tesis.....	20
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO DE LOS BEV	22
2.1 Introducción	22
2.2 Clasificación de vehículos	22
2.3 ¿Qué es un BEV?.....	23
2.4 Tren de potencia en un BEV	24
2.4.1 Cómo se conforma el tren de potencia en un vehículo BEV	25
2.4.2 Cómo se conforma el tren de potencia en un vehículo MCI.....	28
2.5 Ventajas y desventajas vehículos MCI y BEV	29
2.5.1 Diferencias entre tren de potencia MCI y BEV	30
2.6 Configuración de tren de potencia más utilizada	31
CAPÍTULO III: CONCEPTO DE MOTORES	33
3.1 Introducción	33
3.2 Motores, tipos y características – configuraciones de motores en BEV.....	33
3.2.1 Ventajas y desventajas de los motores asíncronos	36
3.2.2 Ventajas y desventajas de los motores síncronos	37
3.2.3 Motor síncrono de imanes permanentes (PMSM)	39
3.2.4 Motor asíncrono de inducción.....	40
CAPÍTULO IV: TIPOS DE TRACCIÓN Y CICLO DE CONDUCCIÓN	42
4.1 Introducción	42

4.2 Tipos de Tracción en vehículos.....	42
4.3 Ciclos de conducción	45
CAPÍTULO V: DESCRIPCIÓN MATEMÁTICA DEL MODELO	48
5.1 Introducción	48
5.2 Dinámica del vehículo	48
5.3 Cálculo de corrientes de un motor IPMSM	52
5.4 Cálculo para paquetes de batería.....	56
CAPITULO VI: METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	59
6.1 Introducción	59
6.2 Creación de los primeros códigos en Python®	61
6.3 Desarrollo de ciclo de conducción	63
6.4 Declaración de la dinámica del vehículo en Python®	64
6.5 Potencia del vehículo y tren de potencia en Python®.....	65
6.6 Corrientes, inversores y motor eléctrico en Python®	66
6.7 Cálculo de baterías eléctricas en Python®	67
6.8 Desarrollo de interfaz en Python®.....	70
6.9 Validación de modelo	72
CAPITULO VII: RESULTADOS Y DISCUSION	76
7.1 Introducción	76
7.2 Características y datos de vehículo	77
7.3 Resultados y discusión de: Torque, potencia y estado de carga de la batería	80
7.4 Caso de estudio 2: Experimentación en características y datos de vehículo...	87
CAPITULO VIII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	93
REFERENCIAS	95
ANEXOS	101
A.1.- Benchmarking plataforma numérica o software para el desarrollo del modelado	101
A.2.- Comparativas de tren de potencia para las diferentes tecnologías de tipos de vehículos (MCI, HEV, BEV)	102
A.3.- Antecedentes.....	104
A.4.- Resultados de otros autores	106

Índice de figuras

FIGURA 1.1: INVERSIÓN PRIVADA MUNDIAL EN CAMIONES Y AUTOBUSES ELÉCTRICOS - ADAPTADO DE [8].....	6
FIGURA 1.2: PRONÓSTICO A 2030 DE LA CUOTA DE MERCADO DE LAS TIPOLOGÍAS DE PROPULSIÓN DE.....	6
FIGURA 1.3: RUTAS - A) ÁREA CERRADA, B) INTERURBANO, C) ZONAS LOCALES [10].....	7
FIGURA 1.4: VEHÍCULOS Y SUS RUTAS - ADAPTADO DE [10]	8
FIGURA 1.5: CÁLCULO DE CONSUMO DE ENERGÍA EN SIMULINK MATLAB [10].....	8
FIGURA 1.6: FUERZAS ACTUANDO EN UN VEHÍCULO [10]	9
FIGURA 1.7: DIAGRAMA DE TREN DE POTENCIA DE UN VEHÍCULO HÍBRIDO EN SERIE - ADAPTADO DE [12].....	10
FIGURA 1.8: MODELO EN SIMULINK DEL VEHÍCULO GM BLAZER - ADAPTADO DE [12]	11
FIGURA 1.9: ARQUITECTURAS DE TRENES DE POTENCIA DE UN VEHÍCULO BEV [13]	12
FIGURA 1.10: CONFIGURACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO EN SIMULINK MATLAB DE UN BEV Y UN TREN DE POTENCIA CONVENCIONAL – ADAPTADO DE [13].....	13
FIGURA 1.11: COMPARACIÓN EN LA CURVA DE TORQUE Y POTENCIA - ADAPTADO DE [14]	15
FIGURA 1.12: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN PARA MODELADO MATEMÁTICO COMPUTACIONAL	19
FIGURA 2.13: CLASIFICACIÓN DE LOS VEHÍCULOS DE ACUERDO A LA FHWA - ADAPTADO DE [16]	22
FIGURA 2.14: DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE LA CONFIGURACIÓN ESTÁNDAR DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO [18].....	24
FIGURA 2.15: COMPONENTES DEL TREN DE POTENCIA DEL VEHÍCULO PETERBILT 220 EV - ADAPTADO DE [20].....	25
FIGURA 2.16: COMPONENTES DEL TREN DE POTENCIA DE UN VEHÍCULO BEV CONVENCIONAL – ADAPTADO DE [22].....	26
FIGURA 2.17: COMPONENTES DEL TREN DE POTENCIA DE UN VEHÍCULO MCI - ADAPTADO DE [22]	28
FIGURA 2.18: COMPONENTES DEL TREN DE POTENCIA DE UN VEHÍCULO MCI Y UN BEV - ADAPTADO DE [21].....	30
FIGURA 2.19: COMPONENTES DEL TREN DE POTENCIA DE UN VEHÍCULO BEV [27].....	32
FIGURA 3.20: TIPOS Y CLASIFICACIÓN DE MOTORES ELÉCTRICOS ADAPTADO DE [28]	33
FIGURA 3.21: DIFERENCIA ENTRE MOTOR SÍNCRONO Y MOTOR ASÍNCRONO [30].....	34
FIGURA 3.22: ENERGÍA APROVECHADA EN TRABAJO EN UN BEV, VEHÍCULO DE GASOLINA Y VEHÍCULO DIÉSEL [31]	35
FIGURA 3.23: PARTES MOTOR ASÍNCRONO [33]	36
FIGURA 3.24: PARTES DEL MOTOR SÍNCRONO [35]	37
FIGURA 3.25: MOTOR DE IMANES PERMANENTES: COMPONENTES Y FUNCIONAMIENTO [38]...	40
FIGURA 3.26: DIFERENCIAS ENTRE MOTOR DE IMANES PERMANENTES Y MOTOR DE INDUCCIÓN [32]	41
FIGURA 4.27: SISTEMAS DE TRACCIÓN: A) TRACCIÓN DELANTERA, B) TRACCIÓN TRASERA, C) TRACCIÓN EN LAS CUATRO RUEDAS PERMANENTE Y D) TRACCIÓN 4x4. [39]	42
FIGURA 4.28: NOMENCLATURA EN SISTEMA DE TRACCIÓN EN CAMIONES [40]	44

FIGURA 4.29: TIPOS DE TRACCIÓN, RODAJE Y CARGAS SOBRE EJES DE CAMIONES [40]	44
FIGURA 4.30: CICLOS DE CONDUCCIÓN: A) NEDC, B) WLTC, c) FTP-75 [43].....	46
FIGURA 4.31: CADENA DE MARKOV [44]	46
FIGURA 5.32: COMPONENTES DE LAS FUERZAS LATERALES DE UN VEHÍCULO [47].....	49
FIGURA 5.33: FUERZAS QUE INTERACTÚAN EN LA RESISTENCIA A LA RODADURA [47].....	50
FIGURA 6.34: DIAGRAMA PARA ELABORACIÓN DE MODELO MATEMÁTICO COMPUTACIONAL ..	59
FIGURA 6.35: DIAGRAMA DE BLOQUES DE LA CONFIGURACIÓN DE TREN DE POTENCIA TRACCIÓN TRASERA DE UN BEV CLASE VII	60
FIGURA 6.36: DECLARACIÓN DE LAS LIBRERÍAS DE PYTHON Y PARÁMETROS FIJOS COMO PRIMER PASO EN EL MODELADO DE CARACTERIZACIÓN DE VEHÍCULO CLASE VI-VIII.	61
FIGURA 6.37: CÓDIGO PYTHON PARA LA LECTURA DE LOS VALORES DE CICLOS DE CONDUCCIÓN EPA FT-75 Y NEDC EN TÉRMINOS DE SU VELOCIDAD (KM/S) Y TIEMPO (s).	63
FIGURA 6.38: CÓDIGO DE DINÁMICA DE VEHÍCULO EN EL MODELADO DE CARACTERIZACIÓN DE VEHÍCULO CLASE VI-VIII.	64
FIGURA 6.39: CÓDIGO PYTHON PARA OBTENER EL TORQUE (Nm) Y VELOCIDAD (RPM) EN EL MODELADO DE CARACTERIZACIÓN DE VEHÍCULO CLASE VI-VIII.	65
FIGURA 6.40: CÓDIGO PYTHON PARA EL CÁLCULO DE CORRIENTES DEL MOTOR ELÉCTRICO EN EL MODELADO DE CARACTERIZACIÓN DE VEHÍCULO CLASE VI-VIII.	66
FIGURA 6.41: CÓDIGO PYTHON PARA EL CÁLCULO DE PÉRDIDAS EN EL MOTOR EN EL MODELADO DE CARACTERIZACIÓN DE VEHÍCULO CLASE VI-VIII.	67
FIGURA 6.42: CÓDIGO PYTHON PARA CALCULAR EL TOTAL DE LA ENERGÍA EN LA BATERÍA EN EL MODELADO DE CARACTERIZACIÓN DE VEHÍCULO CLASE VI-VIII.	68
FIGURA 6.43: CÓDIGO PYTHON PARA EL CÁLCULO DEL PAQUETE DE BATERÍAS EN EL MODELADO DE CARACTERIZACIÓN DE VEHÍCULO CLASE VI-VIII.	69
FIGURA 6.44: CÓDIGO PYTHON PARA CALCULAR LA CANTIDAD DE CICLOS DE CONDUCCIÓN EN EL MODELADO DE CARACTERIZACIÓN DE VEHÍCULO CLASE VI-VIII.	69
FIGURA 6.45: INTERFAZ DEL MODELO NUMÉRICO EN PYTHON□	70
FIGURA 6.46: VENTANA DE RESULTADOS EN PYTHON□	71
FIGURA 6.47: PARÁMETROS MECÁNICOS Y DATOS DEL VEHÍCULO BMW i3 [A.4.]	73
FIGURA 6.48: ESTADO DE CARGA DE BMW i3 [A.4.].....	74
FIGURA 6.49: RESULTADOS OBTENIDOS POR MODELO MATEMÁTICO COMPUTACIONAL	74
FIGURA 6.50: TORQUE DE BMW i3 [A.4.].....	75
FIGURA 6.51: RESULTADO DE TORQUE POR MODELO MATEMÁTICO COMPUTACIONAL	75
FIGURA 7.52: DATOS DEL CASO DE ESTUDIO 1 DEL VEHÍCULO PETERBILT MODELO 220 EV..	79
FIGURA 7.53: RESULTADOS OBTENIDOS PARA EL CASO DE ESTUDIO 1 DEL VEHÍCULO PETERBILT MODELO 220 EV	80
FIGURA 7.54: RESULTADOS DEL TORQUE VS TIEMPO DE UN BEV PETERBILT 220	81
FIGURA 7.55: RESULTADOS DEL POTENCIA VS TIEMPO DE UN BEV PETERBILT 220	82
FIGURA 7.56: RESULTADOS DEL VELOCIDAD RPM VS TIEMPO DE UN BEV PETERBILT 220....	83
FIGURA 7.57: RESULTADOS DEL ESTADO DE CARGA DE UN BEV PETERBILT 220	84
FIGURA 7.58: RESULTADOS DEL ESTADO DE CARGA (1310s – 1400s) DE UN BEV PETERBILT 220.....	85

FIGURA 7.59: RESULTADOS DE LOS PUNTOS DE OPERACIÓN DEL MOTOR DE UN BEV PETERBILT 220	86
FIGURA 7.60: PERFIL DE TORQUE DEL VEHÍCULO PARA UN RANGO DE VELOCIDAD WLPT – ADAPTADO DE [56]	87
FIGURA 7.61: DATOS DEL CASO DE ESTUDIO 3 INTRODUCIDOS EN EL PROGRAMA	88
FIGURA 7.62: RESULTADOS OBTENIDOS DEL CASO DE ESTUDIO 3	89
FIGURA 7.63: GRÁFICA TORQUE VS TIEMPO DEL MODELO 220 EV DE PETERBILT CON CICLO DE CONDUCCIÓN NEDC	90
FIGURA 7.64: GRÁFICA DE ESTADO DE CARGA/DESCARGA DE BATERÍA DEL MODELO 220 EV DE PETERBILT CON CICLO DE CONDUCCIÓN NEDC	91
FIGURA 7.65: RESULTADOS DE LOS PUNTOS DE OPERACIÓN DEL TERCER CASO DE ESTUDIO. 92	
FIGURA A.66: CONFIGURACIONES DEL TREN DE POTENCIA DE DISTINTAS TECNOLOGÍAS DE VEHÍCULOS	102
FIGURA A.67: RESULTADOS DE TORQUE, VELOCIDAD DURANTE CICLO DE CONDUCCIÓN WLTP	107
FIGURA A.68: RESULTADOS DE SOC, VELOCIDAD Y TORQUE DE BMW i3	108

Índice de tablas

TABLA 1: DESCRIPCIÓN DE LOS TIPOS DE TREN DE POTENCIA DE BEV [13].	12
TABLA 2: GUÍA DE IDENTIFICACIÓN DEL VEHÍCULO [16]	23
TABLA 3: VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE VEHÍCULOS MCI Y BEV [24,25]	30
TABLA 4: DIFERENCIAS ENTRE VEHÍCULOS MCI Y BEV [26]	31
TABLA 5: EJEMPLOS DE VEHÍCULOS ELECTRIFICADOS EN EL MERCADO, INCLUIDA SU CONFIGURACIÓN, TECNOLOGÍA DE LA MÁQUINA Y POTENCIAS - ADAPTADO DE [37]	38
TABLA 6: CLASIFICACIÓN DE CAMIONES EN CUATRO GRUPOS: LIGEROS, MEDIOS, SEMIPESADOS Y PESADOS TRACTORAS [40]	45
TABLA 7: PARÁMETROS DE MOTOR PMSM EMPLEADO EN EL MODELADO DE CARACTERIZACIÓN DE VEHÍCULO CLASE VI - VIII	62
TABLA 8: PARÁMETROS MECÁNICOS Y DATOS DEL VEHÍCULO BMW I3 [A.4.]	72
TABLA 9: PARÁMETROS DINÁMICOS EN EL EN EL MODELADO DE CARACTERIZACIÓN DE VEHÍCULO CLASE VI-VIII.	77
TABLA 10: PARÁMETROS MECÁNICOS Y DATOS DEL VEHÍCULO PETERBILT MODELO 220 EV [20]	78
TABLA 11: VALORES DE COEFICIENTES DE LA RESISTENCIA AL RODAMIENTO	105

NOMENCLATURA

<i>BEV</i>	Vehículo de Batería Eléctrico (Battery Electric Vehicle)
<i>MCI</i>	Motor de combustión Interna
<i>FHWA</i>	Administración Federal de Carreteras (Federal Highway Administration)
<i>DC</i>	Corriente Directa
<i>AC</i>	Corriente Alterna
<i>HDS</i>	Diseño de Servicios Híbridos (Hybrid Design Services)
<i>CO</i>	Dióxido de carbono
<i>NO_x</i>	Óxidos de Nitrógeno
<i>PM</i>	Partículas
<i>WLTC</i>	Ciclos de ensayo de vehículos ligeros armonizados a escala mundial (The Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycles)
<i>NEDC</i>	Nuevo ciclo de conducción europeo (New European Driving Cycle)
<i>FTP</i>	Procedimiento de ensayo federal de la EPA (Federal Test Procedure)
<i>BMS</i>	Sistema de gestión de batería (Battery Management System)
<i>EVSE</i>	Equipos eléctricos para vehículos (Electrical Vehicle Supply Equipment)
<i>PMSM</i>	Motor sincrónico de imanes permanentes (Permanent Magnet Synchronus Motor)
<i>FWD</i>	Tracción delantera (Front Wheel Drive)
<i>RWD</i>	Tracción trasera (Rear Wheel Drive)
<i>4WD</i>	Tracción en las 4 ruedas (4 Wheel Drive)
<i>AWD</i>	Tracción total (All Wheel Drive)
<i>EPA</i>	Agencia de Protección del Medio Ambiente (Enviromental Protection Agency)
<i>Faero</i>	Fuerza a la resistencia al aire
<i>Froll</i>	Fuerza de resistencia al rodamiento

F_{grav}	Fuerza de gravedad
F_{inrt}	Fuerza de inercia
V_x	Velocidad del vehículo en la dirección “x” longitudinal
M_v	Masa del vehículo
g	Aceleración de la gravedad
α	Pendiente de la carretera
ρ	Densidad másica del aire (1.225 kg/m ³)
c_d	Coeficiente de la resistencia aerodinámica (Normalmente 0.2 < c_d < 0.4)
A_f	Area frontal del vehículo
f_r	Coeficiente de la resistencia al rodamiento
P_x	Potencia de tracción
r_w	Radio de rodadura dinámico de la rueda
ω_w	Velocidad angular de la rueda
s_x	Velocidad de deslizamiento
μ_{su}	Coeficiente de fricción longitudinal
Δh	Longitudes verticales de una pendiente
d	Longitudes horizontales de una pendiente
J_w	Inercia de la rueda
T_w	Torque del eje de la rueda
F_{rl}	Carga de la carretera que representa la suma de la resistencia a la rodadura, la pendiente y la resistencia aerodinámica.
g_{dr}	Relación de transmisión de los ejes del motor al eje de la rueda
η_{dr}	Eficacia de la transmisión
i_d	Corrientes en terminales del motor
i_q	Corrientes en terminales del motor
F_x	Fuerza de tracción

V_d	Voltajes en terminales del motor
V_q	Voltajes en terminales del motor
L_d	Valores inductancia en terminales del motor
L_q	Valores inductancia en terminales del motor
P_e	Potencia del eje del motor
P_{cu}	Perdida de cobre
P_{inv}	Perdida del inversor
P_{str}	Perdidas por desviación
P_{fe}	Perdida de hierro
C_{fe}	Coeficiente de perdida de hierro
C_{str}	Coeficiente de perdidas por dispersión
r_s	Resistencia del estator
λ_m	Flujo de imán permanente

RESUMEN

En una empresa del sector automotriz Tier 1 surgió el interés por desarrollar un modelo matemático eficiente, donde pudiera evaluar diferentes escenarios en vehículos comerciales eléctricos, mediante el uso de softwares de simulación, de procesos y análisis, permitiendo reducción de tiempos, una evaluación más rápida de datos y simplificar el largo proceso que significa desarrollar un prototipo y ejecutarlo de forma real.

El proyecto se desarrolló a través del lenguaje de programación Python, en el que se modeló un BEV clase VII con tren de potencia de tracción trasera y baterías de Iones de Litio, con el objetivo de conocer su rendimiento mediante las gráficas de estado de carga de la batería, torque del vehículo, velocidad y potencia a través de un ciclo de conducción, logrando con el análisis de estos datos poder estimar los costos en dólares de una recarga de batería durante un ciclo de conducción y recarga completa. Este modelo matemático determina parámetros como: kW/km; costo/km; autonomía, rendimiento del vehículo, etc., los cuales son útiles para el análisis y la toma de decisiones pertinentes respecto a nuevos desarrollos en diferentes plataformas con la tecnología eléctrica. De acuerdo con los resultados obtenidos, se obtiene el rendimiento del vehículo en el ciclo de conducción al que fue simulado, además de obtener valores importantes como el estado de carga de la batería. El actual trabajo de investigación concluye que es posible hacer simulaciones de vehículos comerciales clase VI – VIII y obtener valores aproximados a sus características reales mediante el programa desarrollado.

Este proyecto de tesis destaca la importancia del avance tecnológico en el sector automotriz, que tiene como objetivo en el ramo la sostenibilidad ambiental, buscando alternativas limpias y amigables con el medio ambiente, combatir el cambio climático reduciendo los gases contaminantes de un vehículo MCI e impulsando el constante desarrollo tecnológico en los vehículos para que sean eficientes, seguros y fiables.

En esta tesis se plantea el desarrollo de un modelado matemático y computacional empleando una interfaz visual a través del desarrollo del modelo en Phyton® y en el cual se muestren los resultados planteados en el apartado de objetivos para determinar la caracterización y obtención de parámetros clave en la eficiencia energética, rendimiento y autonomía de un BEV clase VI – VIII, y que permita reducir los tiempos de desarrollo de producto.

CAPÍTULO I

1.1 Introducción

Dado el progresivo aumento a las alternativas a los vehículos de Motor de Combustión Interna (MCI) ha originado la necesidad de investigar y desarrollar vehículos de distintas tecnologías como vehículos eléctricos, híbridos, solares, entre otros. Los MCI han ocasionado una serie de consecuencias ambientales ya sea por sus emisiones al medio ambiente, o por causas externas que las dañan como la obtención de combustibles fósiles [1].

Debido a esta problemática, una de las empresas del sector automotriz Tier 1 dedicada a la fabricación y comercialización de componentes y sistemas estructurales para la industria automotriz, tiene como una de sus prioridades un proyecto que se enfoca en el desarrollo de un modelo matemático y/o de simulación numérica que pueda caracterizar vehículos de batería eléctrica (por sus siglas en inglés, BEV) del tipo clase VI – VIII. Dicha caracterización estará relacionada a la obtención de información específica del vehículo como lo es: kW/km; costo/km; autonomía y rendimiento del vehículo, entre otros datos, los cuales se irán abordando a lo largo de esta tesis. Para el desarrollo del modelado se ha sugerido explorar las plataformas matemáticas y/o numéricas actualmente disponibles comercialmente como de forma gratuita en la web, tales como: Excel, Python, MATLAB, AMESim, entre otros, las cuales permitan generar los datos necesarios con orientación a los objetivos planteados para este proyecto [A.1] El desarrollo de este modelado pretende ser una herramienta útil, en la toma de decisiones para los ingenieros de diseño e innovación. De forma particular cuando se desee caracterizar algún BEV; durante el desarrollo de nuevos productos y optimización de los mismos, generando un impacto directo en los costos y tiempos de producción de la empresa.

Para el desarrollo de este modelado se establecerán algunos factores que intervienen de forma directa, como lo son: el tipo de vehículo (p.e. clase), parámetros dinámicos del vehículo (p.e. peso, coeficientes de fricción y aerodinámicos, resistencia al rodamiento, entre otros), configuración y características del tren de potencia, y los ciclos de conducción estandarizados. La integración de toda esta información en un modelo numérico se realizará mediante las fórmulas matemáticas que intervienen para cada caso y esto dará como resultado todas aquellas métricas del vehículo que son necesarias para evaluar el producto final en la empresa.

1.1.2 ¿Cuál es la importancia de los BEV en el futuro?

Actualmente en la industria automotriz se cuentan con algunas regulaciones mundiales en base al cuidado del medio ambiente, alternativas para reducciones de dióxido de carbono (CO₂) y otros gases contaminantes. Algunas de estas regulaciones más importantes son:

- Acuerdo de París (2015): Tratado firmado por 196 países para combatir el cambio climático, en el cual la industria automotriz se compromete a reducir las emisiones de carbono desde la generación de la materia prima, la producción, hasta el producto final. Apoya la transición a fuentes renovables [2].
- Protocolo de Kyoto (2005): Es un tratado internacional dedicado a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. La industria automotriz ha trabajado en la mejora en la eficiencia de los combustibles, alternativas a estos combustibles y el desarrollo de vehículos eléctricos, híbridos, entre otras tecnologías [3].
- El Pacto Mundial de las Naciones Unidas (2000): Es una iniciativa internacional que promueve la implantación de 10 principios universalmente aceptados para fomentar la responsabilidad social de las empresas en materia de derechos humanos, normativa laboral, medio ambiente [4].

La movilidad eléctrica ha sido uno de los progresos más grandes en el campo de la industria automotriz desde los años 50's, posterior a la segunda guerra mundial. Esta tecnología en los vehículos busca cambiar la economía y la forma en la que vivimos. Además, es importante resaltar lo que hemos vivido en fechas recientes, con el cambio climático [5]. La primera ha generado tormentas de nieve catastróficas en algunas partes del mundo, en el que ha impedido a las fuentes renovables de energía funcionar y la generación de energía eléctrica se ha detenido. Por otro lado, la guerra y la falta de recursos como el gas en países europeos ha traído consigo la falta de energía eléctrica, y, por lo tanto, el no poder utilizar los BEV [6].

En el año 2023 hay más opciones para carga más tecnología y con esto, la posibilidad de adquirir un vehículo BEV aumenta. Las razones que impulsan a utilizar un vehículo eléctrico son [7]:

- El avance en la tecnología de la batería, ya que esta continúa en constante desarrollo.
- Políticas de emisiones, los límites de emisiones contaminantes en manufactureras automotrices en EUA y Europa han incrementado su interés.
- El medio ambiente, debido a que estos vehículos son más limpios.
- El costo, en un principio parecen más costosos, aunque se siguen manteniendo al margen ya que el mantenimiento de estos vehículos es bajo.
- El sector de movilidad está evolucionando rápidamente.

Los anuncios de inversión privada en camiones y autobuses eléctricos tienen su mejor año en el 2018 llegando a aproximadamente 4.8 billones de dólares (ver Figura 1.1). Los camiones eléctricos lideran otras categorías de vehículos en términos de inversión anunciada, representando al menos 13.000 millones de dólares de la financiación privada registrada en el EV Hub. Tanto las empresas emergentes como los fabricantes consolidados comprometen nuevas inversiones para camiones y autobuses eléctricos en 2021 [8].

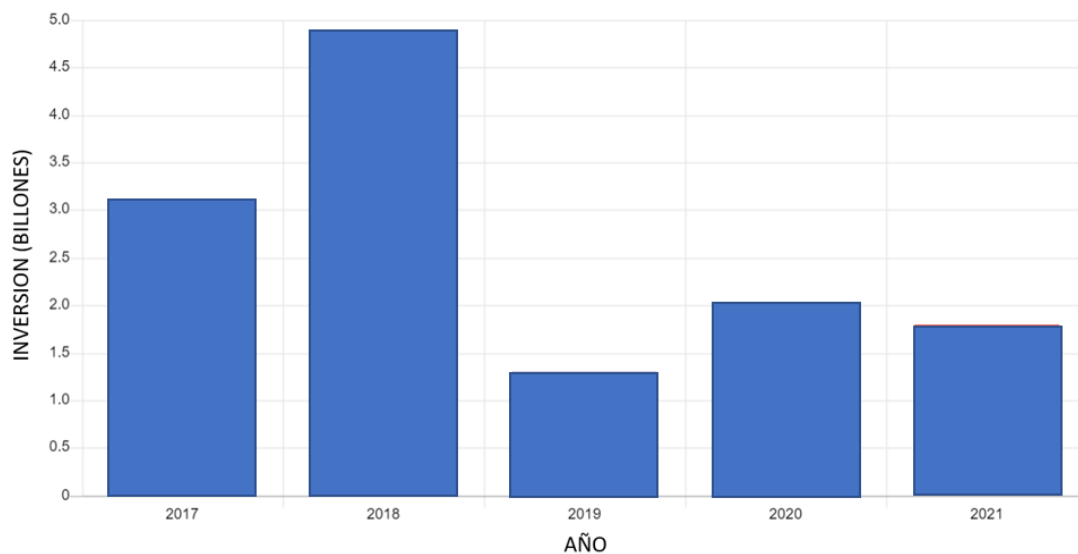


Figura 1.1: Inversión privada mundial en camiones y autobuses eléctricos - Adaptado de [8]

Para el año 2030 se espera que Europa tenga el mercado más fragmentado (ver Figura 1.2), siendo la propulsión eléctrica la líder de cero emisiones en los principales mercados, con EE.UU. reticente al cambio y con el gas natural como principal alternativa en China [9].

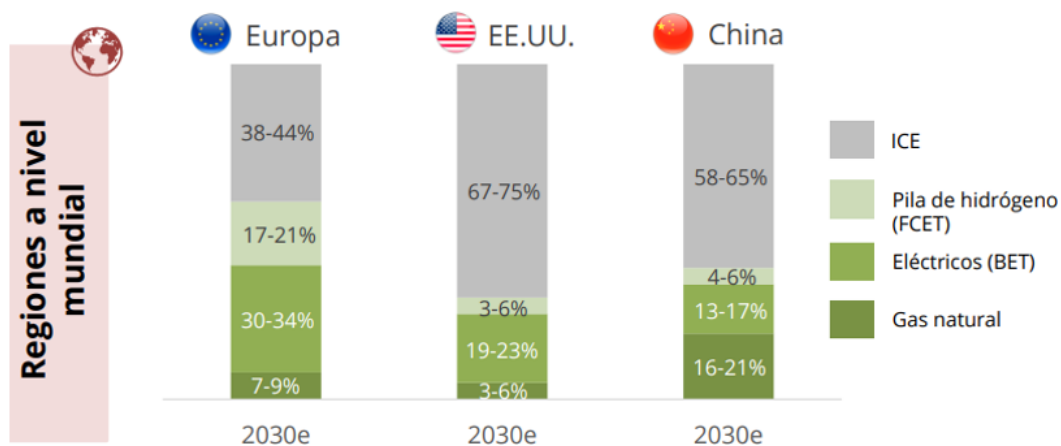


Figura 1.2: Pronóstico a 2030 de la cuota de mercado de las tipologías de propulsión de camiones por regiones [9]

1.2 Antecedentes

La constante investigación y el desarrollo en la industria automotriz en cuanto a las nuevas tecnologías ha permitido el avance en cuanto a la fabricación de vehículos eléctricos. La utilización de programas como herramientas de simulación permite el estudio y análisis de diversos sistemas en los vehículos, sin la necesidad de invertir tiempo y dinero en la construcción de amplios escenarios para realizar pruebas físicas cuando se encuentra en la etapa de desarrollo de producto y prototipo. Esto para la industria, genera una reducción significativa en costos y tiempos para comercializar un producto final desde su conceptualización.

Es por esto por lo que surgen diversos proyectos con la intención de mejorar estos avances de simulación para la mejora de los BEV. Los autores Duangsrikaew B. et al., (2012) mediante su artículo *“Battery Sizing for Electric Vehicles Based on Real Driving Patterns in Thailand”* mencionaron que “debido al incremento en la demanda de vehículos con bajo consumo de combustible y emisiones, los autos eléctricos son una alternativa para una solución limpia y eficiente de energía.” Los autores analizaron el uso y consumo de la batería en BEV a través de diferentes ciclos de conducción propuestos mediante rutas de la ciudad de Tailandia siendo estos: áreas cerradas, interurbano y zonas locales (ver Figura 1.3) [10].

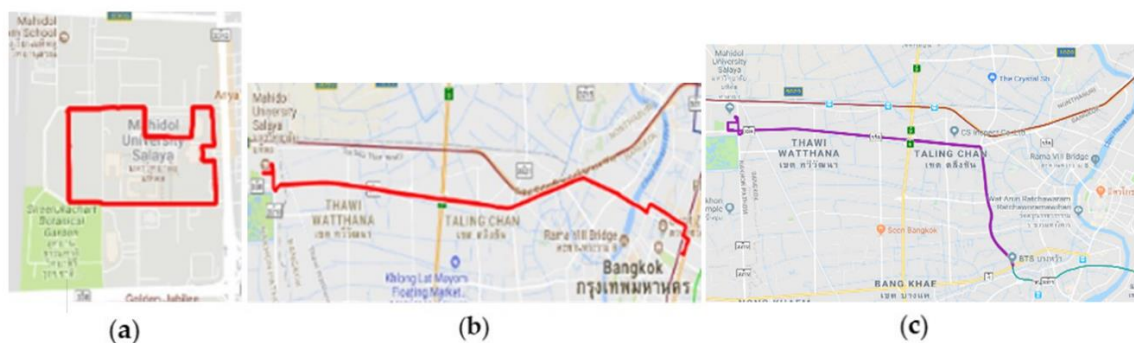


Figura 1.3: Rutas - a) Área cerrada, b) Interurbano, c) Zonas locales [10]

El objetivo fue determinar el tamaño óptimo para la capacidad de la batería basándose en los requerimientos de potencia y de conducción necesaria dentro de

Tailandia. Para fines de este análisis, se tomaron en cuenta 3 vehículos de transporte público con diferentes capacidades y a los cuales se les asignaron un sistema de posicionamiento global (GPS) con la finalidad de registrar datos importantes como su velocidad, aceleración, distancia recorrida, etc (ver Figura 1.4) [10]. Estos vehículos tenían diferentes pesos, y durante el recorrido de la ciudad se agregaron factores externos al estudio, como los semáforos, subida y bajada de peatones, etc. mismos que afectaron el tiempo de recorrido.

Tipo de ruta	Área cerrada	Interurbano	Alimentador local
Vehículos	Tranvía	Autobús de enlace	Enlace de Salaya
			

Figura 1.4: Vehículos y sus rutas - Adaptado de [10]

Los autores utilizaron el software Simulink Matlab®, implementando un modelo con diagramas de bloques (ver Figura 1.5) donde destaca el ciclo de conducción propuesto por los autores, la velocidad del vehículo y factores dinámicos como la aerodinámica y la resistencia a la rodadura a los que se les asignó a cada uno determinadas variables para calcular su potencia máxima y el consumo de energía en la batería [10].

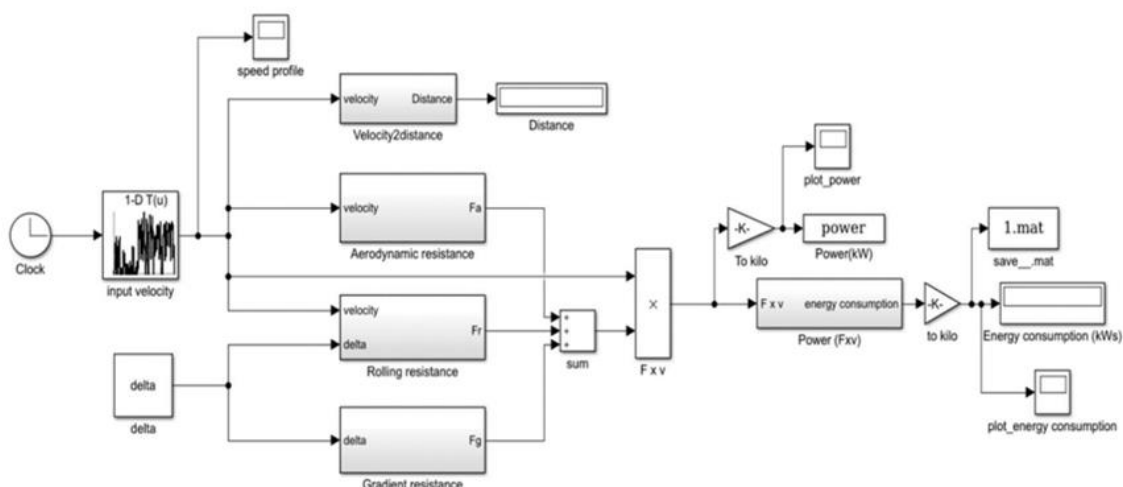


Figura 1.5: Cálculo de consumo de energía en Simulink Matlab [10]

Otro artículo en esta dirección fue publicado en 2019 del autor Anuja R. Jadhav, lleva como título: “Drive Cycle Analysis for Electric Vehicle using MATLAB”, en el cual se empleó el software Matlab® para determinar los datos acerca del rendimiento de un vehículo eléctrico solar. El autor estableció que, “debido a la demanda de combustible fósil, las altas contaminaciones que generan los autos de combustión buscan alternativas tecnológicas para reducir estos factores negativos” [11].

Este proyecto, contempla algunos aspectos importantes para el desarrollo del modelo en el análisis de los vehículos como lo son: las fuerzas que interactúan en el vehículo (p.e., el peso, ángulo de pendiente, fuerza de fricción, fuerza de tracción, fuerza de aceleración, ver Figura 1.6), además el ciclo de conducción. Estos parámetros son importantes y fundamentales, porque brindan un panorama general sobre los parámetros implementados por otros autores al desarrollar su trabajo de investigación.

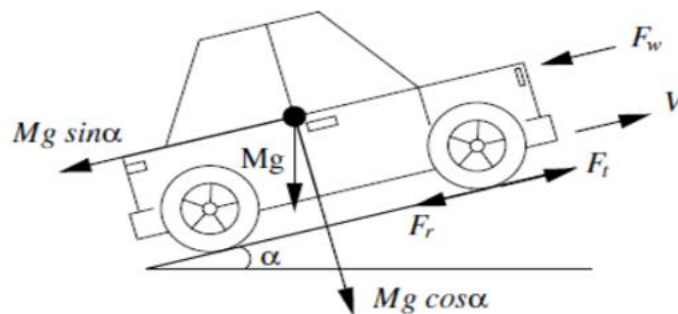


Figura 1.6: Fuerzas actuando en un vehículo [10]

El autor a través de este artículo menciona que los BEVs utilizan más comúnmente baterías de corriente directa (DC, por sus siglas en inglés), debido a que son más sencillos de configurar que los de corriente alterna (CA, por sus siglas en inglés). El autor concluyó que tener una “correcta administración de la batería” dentro del BEV es primordial en el rendimiento del vehículo y la vida útil del mismo. Depende en gran parte al ciclo de conducción aplicado en el vehículo, es cuando hay un cambio en la durabilidad de la batería debido a que el panel solar tiene un ritmo de carga lento, logrando una eficiencia de 40% [11].

Los autores Manh-Kien Tran., et al. (2020) realizaron un estudio sobre las diferentes configuraciones del tren de potencia implementados en los vehículos híbridos, donde se visualizan algunos componentes tales como un MCI, motores eléctricos, baterías, transmisiones, inversor, entre otros. El estudio fue desarrollado mediante el software Simulink Matlab® en donde se introdujeron algunos parámetros de estudio para obtener el desempeño deseado. Estos parámetros fueron: el ciclo de conducción, los controladores para el torque y la potencia del vehículo, el bloque de Simulink para simular la aceleración del piloto y las propias características del vehículo híbrido. Se tomaron en cuenta conforme a la configuración de tren de potencia al que se estuviera analizando, siendo el primero un tren de potencia conectado en serie como se muestra en la Figura 1.7 [12].

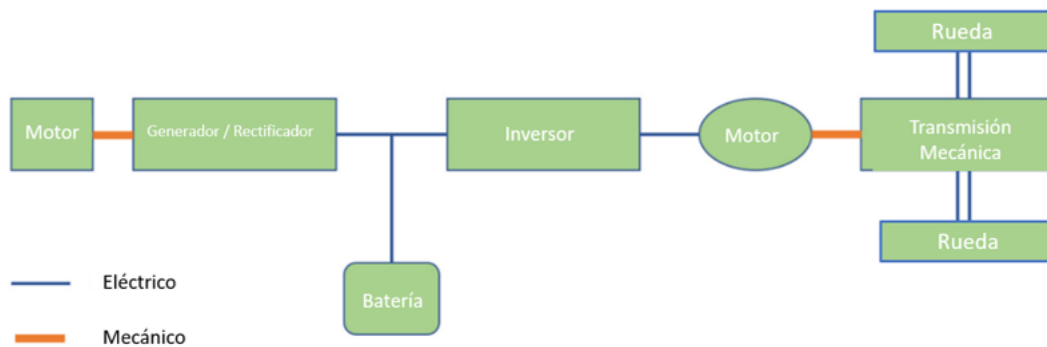


Figura 1.7: Diagrama de tren de potencia de un vehículo híbrido en serie - Adaptado de [12]

Para este tren de potencia conectado en serie, el motor no proporciona el torque necesario para impulsar el vehículo. Su función principal es convertir la energía potencial del combustible en energía mecánica que luego se convierte en energía eléctrica mediante un generador. Esta configuración permite que la velocidad del motor pueda ser controlada independientemente de la velocidad del vehículo, lo que significa que el motor puede funcionar a la velocidad óptima para minimizar las pérdidas de energía eléctrica [12]. Esta es una arquitectura del tren de potencia muy similar a la de los vehículos convencionales de tracción trasera (RWD por sus siglas en inglés), misma que sirve como base para el modelo de este proyecto de tesis.

Las características de la dinámica del vehículo híbrido modelado son de un Chevrolet Blazer 2019 (ver Figura 1.8). Este modelo ya cuenta con las características necesarias del tren de potencia, controladores y entradas del conductor. Mediante Simulink Matlab® se analizaron las gráficas correspondientes del consumo de combustible, velocidad, aceleración, distancia y emisiones de gases [12].

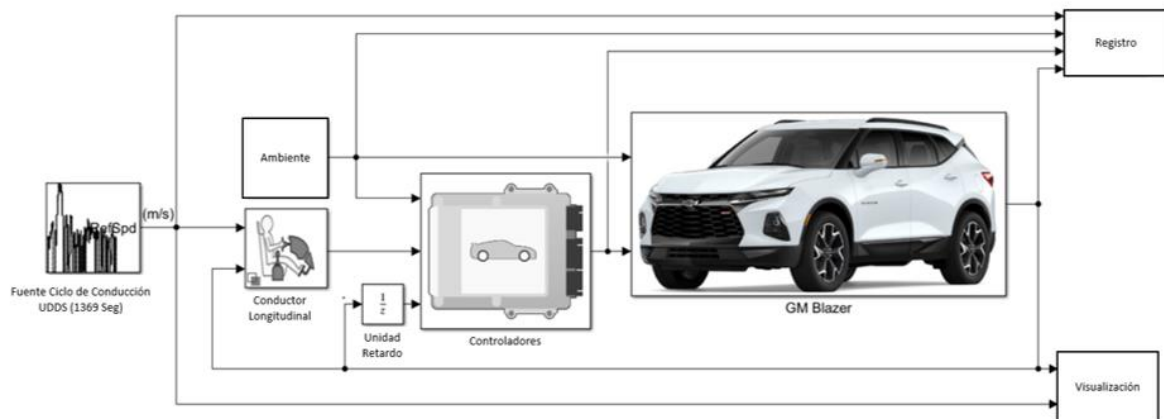


Figura 1.8: Modelo en Simulink del Vehículo GM Blazer - Adaptado de [12]

Los autores Gwangmin Park, et. al. (2014) llevaron a cabo un estudio sobre el análisis dinámico del tren de potencia de un BEV utilizando el caso convencional de los trenes de potencia que mencionan en su estudio, (ver Figura 1.9). Estos casos de trenes de potencia de la Figura 1.9, surgen debido a la experimentación y la búsqueda de aumentar el torque y potencia para aprovechar al máximo el rendimiento del motor eléctrico sin generar pérdidas en la transferencia de estas.

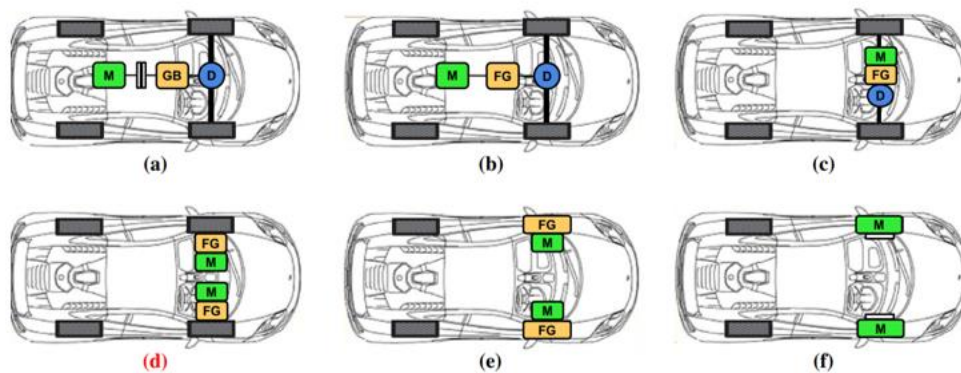


Figura 1.9: Arquitecturas de trenes de potencia de un vehículo BEV [13]

Las arquitecturas del tren de potencia son fundamentales para el entendimiento sobre la funcionalidad de un vehículo, ya que cada una tiene una característica distintiva para aprovechar dicha configuración y el lograr el mejor rendimiento del vehículo. Los autores dividieron las arquitecturas en dos secciones: Sistemas de un motor y sistemas de dos motores. En cada sección se describen cada uno de los tipos de tren de potencia los cuales se muestran a continuación en la Tabla 1:

Tabla 1: Descripción de los tipos de tren de potencia de BEV [13].

Sistemas con un motor	Sistemas con 2 motores
a) Tipo convencional: - Diferencial (D) - Caja de cambios (GB) - Embrague (C) - Motor Eléctrico (M) Se considera equivalente a la de un vehículo MCI con motor trasero y tracción delantera. b) Sin transmisión (Motor trasero y tracción delantera): Esta es una configuración con engranaje fijo (FG, por sus siglas en	d) Sin diferencial Se emplean dos motores para cada rueda con el fin de eliminar un diferencial. Los dos motores están conectados a las ruedas delanteras a través del engranaje fijo mecánico. e) Tipo de rueda con engranaje fijo Es similar al d), la diferencia es la ubicación de los motores eléctricos, estos están colocados en las ruedas.

inglés) utilizado en lugar de embrague y caja de cambios.

c) Sin transmisión (Motor delantero – rueda delantera)

El motor eléctrico, el engranaje fijo y el diferencial se colocan juntos en la parte delantera al igual que en los vehículos MCI.

f) Tipo de rueda sin engranaje fijo

Se elimina el engranaje mecánico. La velocidad del vehículo depende directamente de la velocidad del motor.

Los autores utilizaron el caso de configuración convencional de tren de potencia (ver Figura 1.9) para el desarrollo de la simulación utilizando el software Simulink MATLAB®. Se empleó un vehículo de 1450 kg, con una batería ion-litio con una capacidad de 300 V. El modelado con bloques dentro de Simulink fueron integrados de acuerdo al sistema que correspondía, ciclo de conducción, sistema mecánico, sistema eléctrico y dinámica del vehículo como se muestran en la Figura 1.10 [13]:

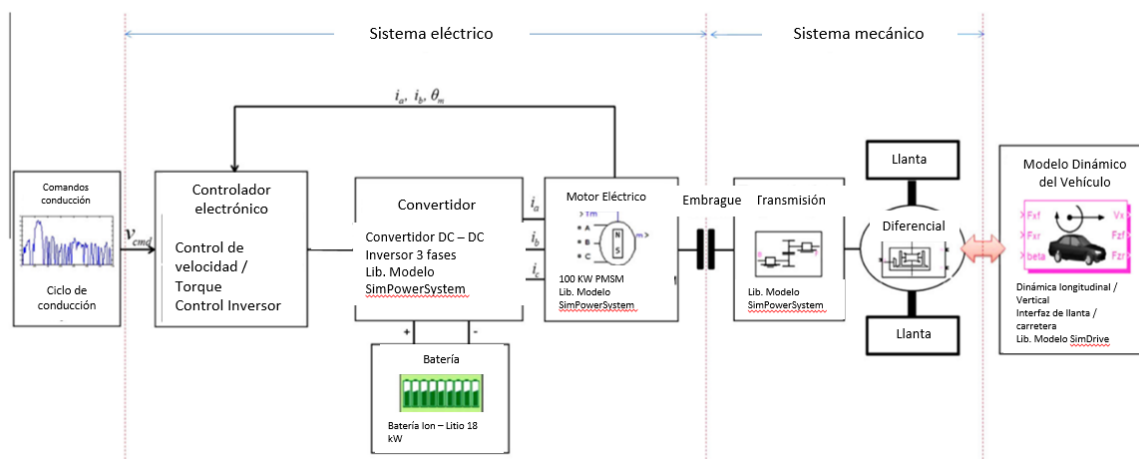


Figura 1.10: Configuración del modelo numérico en Simulink Matlab de un BEV y un tren de potencia convencional – Adaptado de [13]

En el primer bloque de la Figura 1.10 se utilizó los comandos del ciclo de conducción, siendo FTP-75 el ciclo utilizado por los autores. Para el bloque del sistema eléctrico, utilizaron inversores de corriente calculados para un ciclo y

retroalimentado por la batería eléctrica, esto para generar la energía alterna necesaria para el funcionamiento del motor eléctrico. Para el bloque del sistema mecánico, mediante cálculos matemáticos se hace la transferencia de torque del motor eléctrico directo a las ruedas, torque necesario para mover el vehículo. Y por último se hace mediante un ciclo retroalimentado los ajustes necesarios provenientes de las características del vehículo introducidos en los bloques de la dinámica del vehículo. Los resultados obtenidos fueron las respuestas del modelo mediante el ciclo de conducción estudiado, en base al torque, fuerza vertical del vehículo y la operación de las corrientes i y q a bajas y altas velocidades del propio vehículo.

Como se ha podido observar en las diferentes investigaciones expuestas arriba, uno de los sistemas más relevantes en el estudio de un BEV es su tren de potencia. En los vehículos MCI este tren de potencia está compuesto de un eje de transmisión, motor de combustión, engranes, caja de cambios, etc. Sin embargo, en los BEV esto cambia. Como mencionaron los autores Gwangmin Park, et al. existen distintos arreglos de trenes de potencia conocidos para un BEV. Además, los BEV no requieren transmisiones multivelocidad debido al motor eléctrico. Mientras que los vehículos MCI requieren de un sistema de engranajes con diferentes relaciones de salida de potencia. Otra característica importante es que los motores eléctricos llegan a producir un torque constante a cualquier RPM dada, siempre que este dentro de un rango específico (ver Figura 1.11), donde se puede visualizar la curva de torque de un Tesla cumpliendo con esta característica alcanzando un torque constante de 200 Nm hasta las 6000 RPM y el torque va disminuyendo conforme se aumentan las RPM. Por otro lado, se observa la curva de torque de un MCI de 4 cilindros en el cual su torque máximo de 150 Nm, siendo que el torque no es constante en comparación con la curva de torque del Tesla.

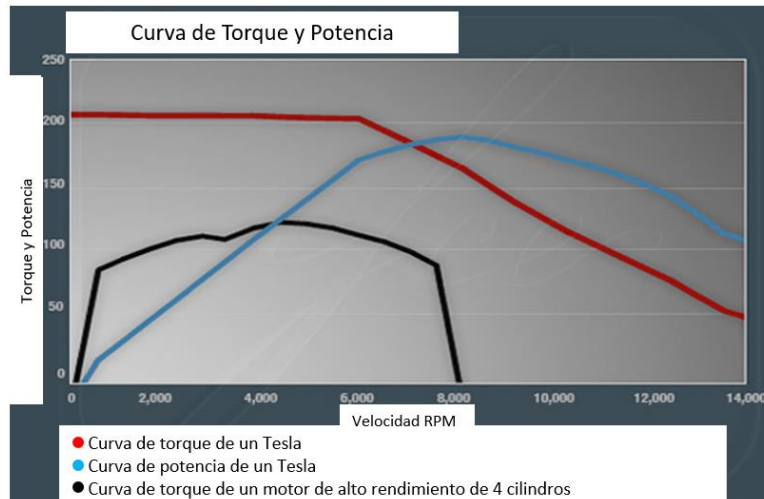


Figura 1.11: Comparación en la curva de torque y potencia - Adaptado de [14]

Los motores eléctricos entregan energía de forma instantánea, quiere decir que el proceso de acumulación de torque por medio de la aceleración como en los MCI es innecesario. Los fabricantes de automóviles incorporan relaciones de transmisión calculadas de forma precisa para maximizar la eficiencia del motor eléctrico sin necesidad de cambiar a través de los engranajes. Otra característica es que los motores eléctricos pueden funcionar a valores más altos de 10000 RPM sin problemas.

1.3 Planteamiento De Problema

Se ha planteado un proyecto de gran importancia enfocado a la caracterización en un modelado matemático de BEV clase VI-VIII, considerando el desarrollo de un modelado matemático en el cual se estudie de forma específica el tren de potencia del vehículo, componentes, condiciones de frontera, etc. Esta modelación matemática y computacional debe integrar todos los parámetros y sistemas necesarios para llevar a cabo la caracterización y análisis de un BEV dentro de la plataforma de Phyton®. Entre estos se pueden mencionar el registro del ciclo de conducción, características mecánicas del vehículo y sus subsistemas, características del sistema eléctrico (p.e. tipo de motor eléctrico y la batería), características de la dinámica del vehículo. Los resultados deseables de esta

investigación están enfocados a que el modelo desarrollado permita a los ingenieros de la empresa determinar de forma óptima el desempeño de nuevas plataformas con tecnología eléctrica en un ambiente simulado, y con esto, poder reducir los tiempos de conceptualización del producto y su desarrollo. Mediante un modelo con estas características, es posible analizar escenarios diversos y obtener los resultados necesarios que permitan tomar decisiones para lograr su optimización.

1.4 Justificación

Establecer los valores óptimos de un vehículo BEV clase VI - VIII para conocer las condiciones requeridas y configurar los parámetros necesarios que permitan mejorar su rendimiento, reducir su impacto ambiental y buscar alternativas que permitan disminuir el porcentaje del costo de fabricación. En este sentido, se busca analizar la influencia de los factores internos y externos que afectan al vehículo, a fin de conocer el consumo de energía en kWh durante un ciclo de conducción en la ciudad o carretera, establecer costos por tiempo y por distancia recorrida, entre otros parámetros.

Además, la implementación de prácticas sostenibles en la industria automotriz se está convirtiendo en una tendencia a nivel mundial. Es por esto que el desarrollo de proyectos de investigación e innovación como este apoya a la innovación y desarrollo tecnológico.

1.5 Hipótesis

Al desarrollar un modelado matemático y computacional en una plataforma como Python®, es posible caracterizar y obtener parámetros clave para el análisis del rendimiento de un BEV clase VI-VIII como: eficiencia energética, rendimiento y autonomía, con la finalidad de reducir los tiempos de desarrollo de producto.

1.6 Objetivo General

Desarrollar un modelado matemático y computacional en la plataforma de Phytón® que determine la caracterización y obtención de parámetros clave en la eficiencia energética, rendimiento y autonomía de un BEV clase VI – VIII, para reducir los tiempos de desarrollo de producto.

1.6.1 Objetivos Específicos

Establecer las fórmulas matemáticas de todos los sistemas que permitan el desarrollo del modelado matemático de un BEV clase VI-VIII; dentro de los cuales están: el ciclo de conducción, partes y subsistemas mecánicos, parámetros mecánicos del vehículo, partes y subsistemas eléctricos y la dinámica del vehículo.

Desarrollar un modelado matemático y computacional implementarlo en casos de estudio que permita al usuario:

- Verificación del modelo matemático con otros estudios científicos previamente desarrollados.
- Evaluar casos de estudio para los ciclos de conducción establecidos en la industria automotriz.
- Determinar el rendimiento en el uso de la batería (p.e. cantidad de ciclos de conducción, cantidad de kW utilizados en el ciclo de conducción).
- Determinar el consumo de potencia en kWh en la batería durante el ciclo de conducción.
- Calcular el costo que implica la recarga de batería una vez que se descargue basado en el modelo matemático.
- Desarrollar una interfaz gráfica que permita obtener resultados visuales para las curvas representativas de los BEV (p.e. gráficas de torques, gráficas de potencia, entre otros).

1.7 Metodología de la Investigación

Para esta tesis, se sigue una serie de pasos mediante la Figura 1.12 diseñado a partir del planteamiento del problema. Para lograr el desarrollo del modelo se empieza con la recopilación de información, siendo las principales fuentes de investigación libros, internet y trabajos hechos por otros autores. Para la búsqueda de información relacionada con planteamiento de problema propuesto se hace una lista de palabras clave tales como: “Ciclo de conducción, tren de potencia, motor eléctrico, batería eléctrica, vehículo eléctrico, Python, vehículos clase VII”; que sirven como punto de partida y que muestran mucha información de referencia. También se toman en cuenta otras fuentes como videos, conferencias, artículos, entre otros relacionados a vehículos eléctricos, su funcionamiento, configuraciones de tren de potencia.

Después de tener la información, se hace una investigación específica de los componentes que integran al modelo BEV, conforme se describe al planteamiento del problema y los objetivos. Primero se recopila información respecto al vehículo y la tecnología que abarcan los BEV y sus principales diferencias, ventajas y desventajas respecto a los MCI. Después se busca información respecto a los componentes del tren de potencia del vehículo BEV, los tipos de tracción que existen, etc.

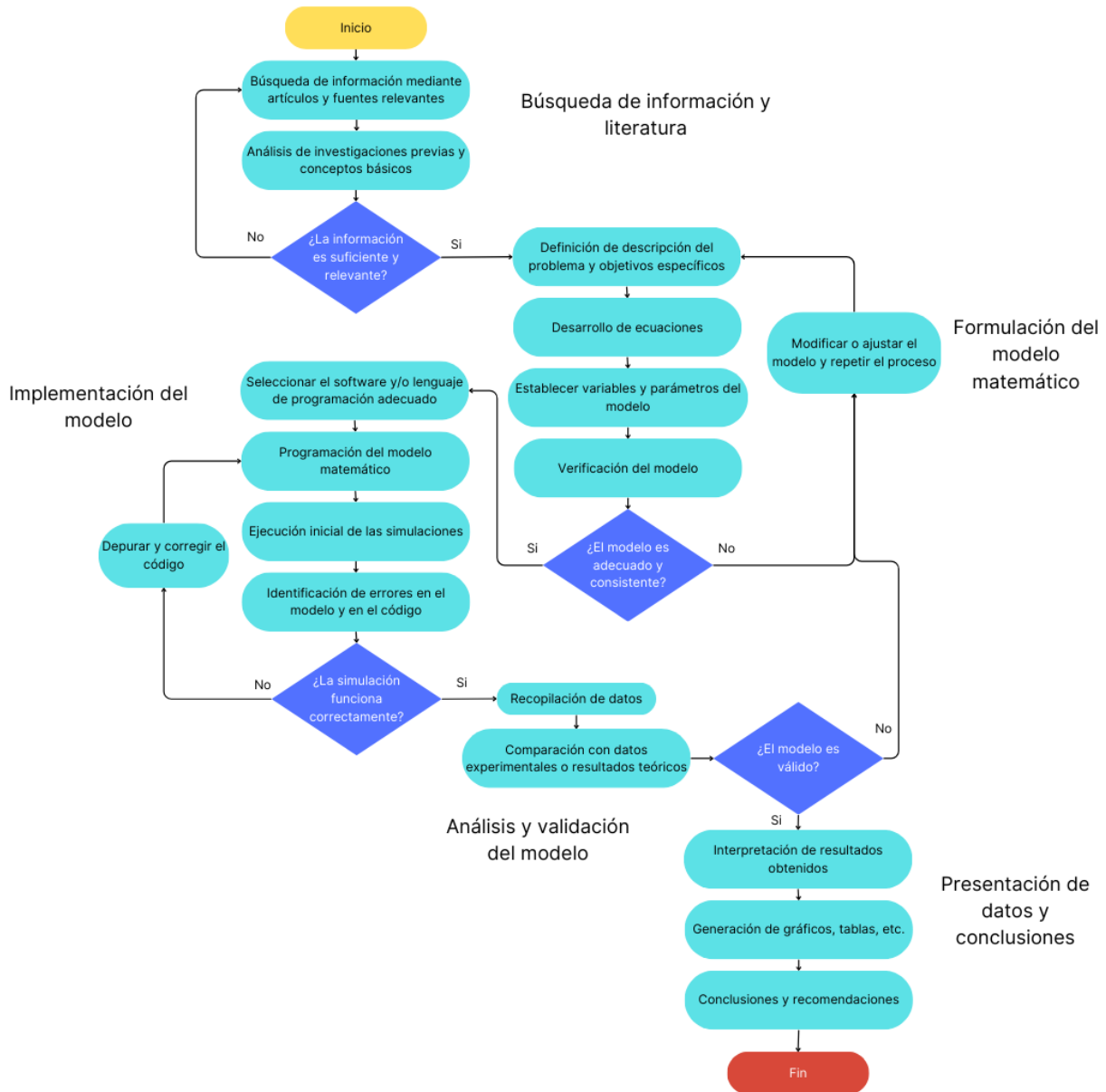


Figura 1.12: Metodología de la investigación para modelado matemático computacional

Después se analizan las fórmulas matemáticas en las que se ven involucradas las características del vehículo, y los factores externos. Se investigan los ciclos de conducción más utilizados y se obtienen los datos de cada ciclo como la velocidad en cada segundo registrado. Una vez obtenida toda la información, comienza el desarrollo del modelo mediante Python® en donde se va generando el código y donde se introducen las fórmulas analizadas y librerías necesarias para correr el

programa. Al concluir el modelo matemático, se hace una verificación del programa comparándolo con la información de otros autores introduciendo los datos del vehículo del autor y comprobando el funcionamiento del modelo matemático computacional, se realizan las simulaciones del caso de estudio con el vehículo elegido para esta tesis siendo un vehículo clase VII BEV.

1.8 Descripción de la Tesis

En el primer capítulo se describe una introducción describiendo cómo surgió la problemática a resolver, la importancia e impacto que tiene el desarrollo de este proyecto de tesis, así como su justificación, y los antecedentes, siendo estos trabajos realizados por diferentes autores mediante diferentes alternativas de vehículos, tecnologías y modelados matemáticos y computacionales. El establecimiento de la hipótesis, los objetivos general y específicos y la metodología planteada para su alcance. Además, se explica la importancia del desarrollo de las nuevas tecnologías en los BEV, el impacto que tiene en el medio ambiente, además del posicionamiento de la industria automotriz a nivel global.

En los capítulos II, III y IV se desarrolla el marco teórico que describe cada uno de los conceptos, tipos y características para empezar en el desarrollo de este proyecto. En el capítulo II se describen que son los BEV, la clasificación de los vehículos clasificándose según el tipo de trabajo que realiza, la cantidad de llantas o ejes, los diferentes trenes de potencia y alternativas a las distintas configuraciones que puede tener un BEV que se encuentran en el mercado, además de las partes que conforman estos trenes de potencia y su función dentro del vehículo. En el capítulo III, se describen los tipos de motores más utilizados en la industria automotriz, así como sus características, las partes del motor, como funcionan y ventajas y desventajas de cada uno de los tipos de motores, siendo el motor una parte importante en la funcionalidad del vehículo. También se muestra una tabla con los distintos BEV's que existen en el mercado con su respectivo motor y el año en el que fue lanzado al mercado. Por último, en el capítulo IV se describen los tipos

de tracción en los vehículos clase VI – VIII, los tipos de tracción según la cantidad de ejes y el tipo de trabajo que realiza y el concepto de ciclos de conducción, los distintos tipos de ciclos de conducción, los más utilizados globalmente y las características que conforman dichos ciclos.

El capítulo V se explican las fórmulas matemáticas que describen los apartados de la dinámica del vehículo, las fuerzas que interactúan como la fuerza de tracción, fuerza aerodinámica, fuerza de gravedad, etc. así como la relación entre las ruedas y los ejes, el apartado mecánico - eléctrico del motor y el cálculo de corrientes del motor PMSM y los voltajes en las terminales y el cálculo para el paquete de las baterías eléctricas. Así mismo se muestra la relación de las fórmulas respecto a otras y la importancia que tiene para el desarrollo del programa.

El capítulo VI muestra la metodología del modelado matemático computacional en el que se desarrolla el programa de Python. En este punto se describe paso a paso la programación con respecto a las fórmulas matemáticas previamente vistas en el capítulo V, una explicación de la interfaz gráfica del programa, sus ventanas, funcionamiento, etc. Mediante cada paso se muestran también aspectos importantes a considerar en el momento de la realización de dicho modelado y las gráficas con la información importante para esta tesis. Otro punto importante que se muestra es la validación del modelo matemático computacional con respecto a los resultados de otros autores aplicando los mismos valores que el autor propone, comparando dos programas distintos, llegando a los mismos resultados.

El capítulo VII se visualizan los resultados obtenidos de los casos de estudio de los vehículos propuestos y la discusión de los resultados. Y por último el capítulo VIII muestra las conclusiones de la tesis.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO DE LOS BEV

2.1 Introducción

Este capítulo presenta los conceptos fundamentales sobre los BEV, los tipos de configuración de trenes de potencia, partes que los conforman, funcionalidad, y la clasificación de vehículos. Se destaca también cual es el tipo de tren de potencia más utilizado, y las principales diferencias con el tren de potencia de un MCI.

2.2 Clasificación de vehículos

Conforme a la clasificación de vehículos de la Administración Federal de Carreteras (FHWA, por sus siglas en inglés), hay distintas clases de vehículos para trabajo medio y trabajo pesado como se muestra en la Figura 2.13 [15].

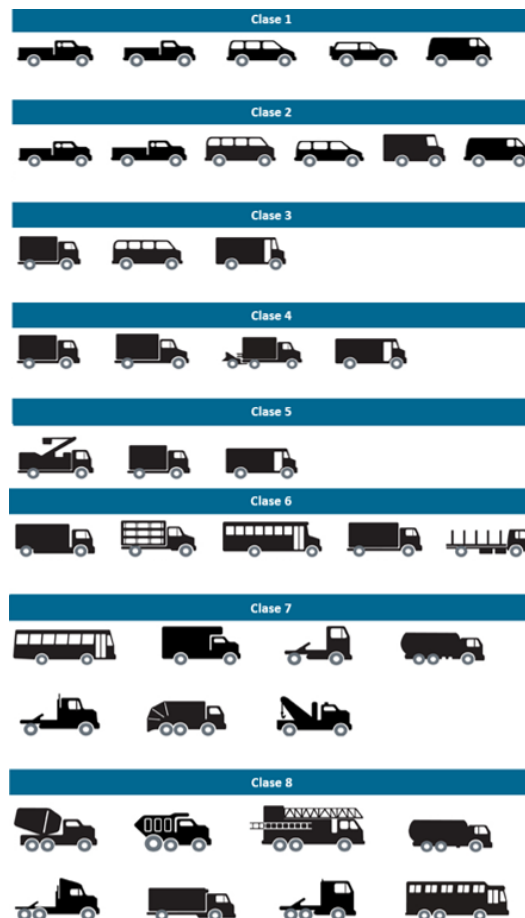


Figura 2.13: Clasificación de los vehículos de acuerdo a la FHWA - Adaptado de [16]

La FHWA define una guía de identificación de los vehículos (ver Tabla 2) ya sea por el tipo de trabajo que realizan, la cantidad de ejes que tienen y llantas que conforman el vehículo y también por el peso máximo y mínimo que soporta.

Tabla 2: Guía de identificación del vehículo [16]

Clase de vehículo	Tipo de trabajo	Ejemplos	Peso Permitido (kg)	Cantidad de llantas	Núm. de ejes
1	Ligero	Se encuentran vehículos tipo sedan, pickups, van, motocicletas.	0 - 2721	4	1 - 2
2	Ligero	Se encuentran vehículos tipo pickups, van, furgonetas.	2722 - 4536	4	1 - 2
3	Medio	Se encuentran vehículos de carga, camiones de plataforma plana, furgonetas.	4537 - 6350	6 o más	2 - 3
4	Medio	Se encuentran vehículos de carga, furgonetas, buses, vehículos de reparto.	6351 - 7257	6 o más	2 - 3
5	Medio	Se encuentran vehículos de carga como casas rodantes, vehículos blindados para transporte de valores, ambulancias.	7258 - 8845	6 o más	3 - 4
6	Medio	Se encuentran vehículos como microbuses, panel, furgón.	8846 - 11793	6 o más	3 - 4
7	Pesado	Se encuentran vehículos de carga pesada como sanitarios (vehículo especial equipado con cisternas y bombas), perforadoras, explosivos, hormigonera, mezclador.	11794 - 14968	6 o más	3 - 4
8	Pesado	Se encuentran vehículos de carga pesada como tractocamiones en sus distintas variantes de ejes con semirremolques con sus respectivos ejes, camiones de bomberos.	14969 o más	10 o más	4 o más

2.3 ¿Qué es un BEV?

Los BEV son vehículos impulsados por uno o más motores eléctricos que se alimentan de la energía almacenada en una batería eléctrica [17]. Este concepto es importante para conocer a detalle algunas piezas fundamentales del propio vehículo y que ayuda a entender mejor su funcionamiento de este, la Figura 2.14 muestra de manera esquemática la configuración estándar de los BEV.

Elementos claves

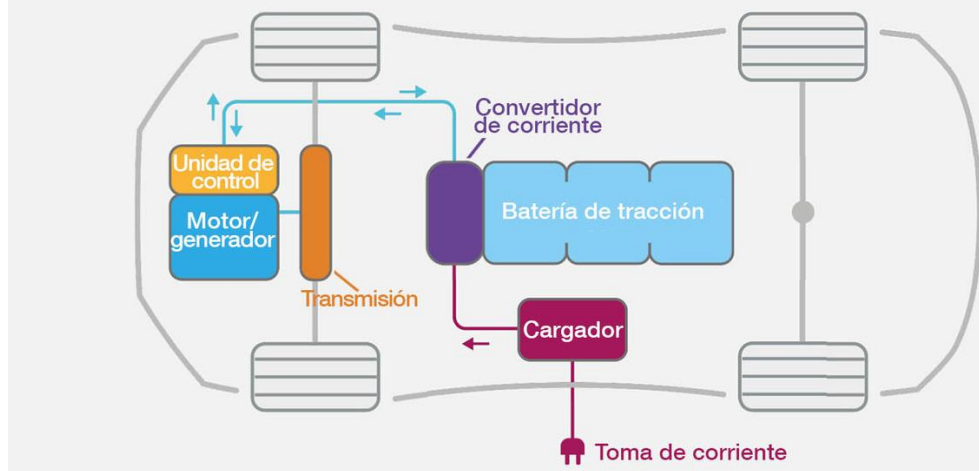


Figura 2.14: Diagrama esquemático de la configuración estándar de un vehículo eléctrico [18]

2.4 Tren de potencia en un BEV

En términos generales, un tren de potencia es un conjunto de componentes que impulsan el vehículo hacia delante. El tren de potencia del vehículo genera la potencia necesaria del motor y la entrega a las ruedas en el suelo. Hay diferentes tipos de trenes de potencia dependiendo de la tecnología que sea la que impulse el vehículo, ya sea MCI o BEV. Los componentes clave de un tren de potencia en un BEV incluyen un motor, ejes, paquete de baterías, sistemas de enfriamiento y diferencial como se muestran en la Figura 2.15 [19].

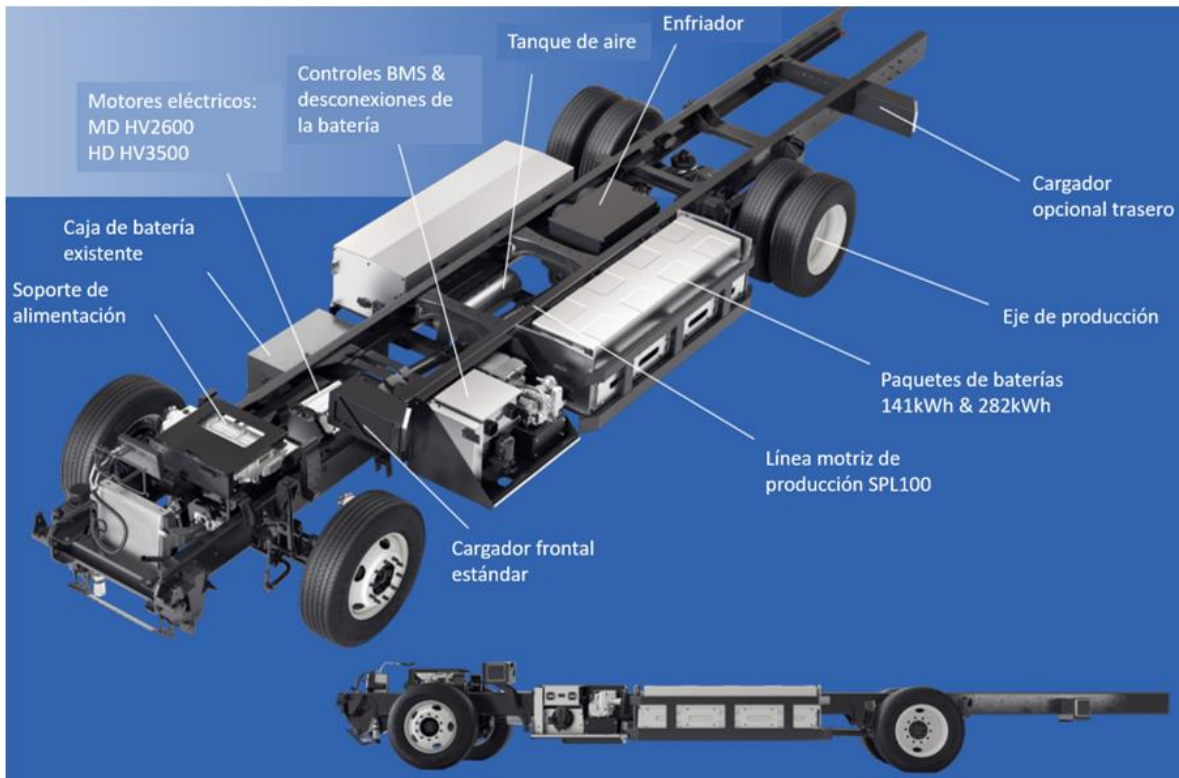


Figura 2.15: Componentes del tren de potencia del vehículo Peterbilt 220 EV - Adaptado de [20]

Del tren de potencia se obtienen las cifras de rendimiento en caballos de fuerza (HP, por sus siglas en inglés) alcanzar de 0 a– 100 km/h en segundos. Un tren de potencia ideal es la clave para un mejor rango de operación, aceleración y velocidad máxima [19].

2.4.1 Cómo se conforma el tren de potencia en un vehículo BEV

Este tren de potencia se conforma de paquete de batería, un convertidor DC-AC, un motor eléctrico, un cargador, sistema de gestión de batería, convertidor DC-DC, sistema de gestión térmico, módulo de control de cuerpo (ver Figura 2.16) [21].

Tren de potencia BEV

Motor eléctrico, sistema de batería

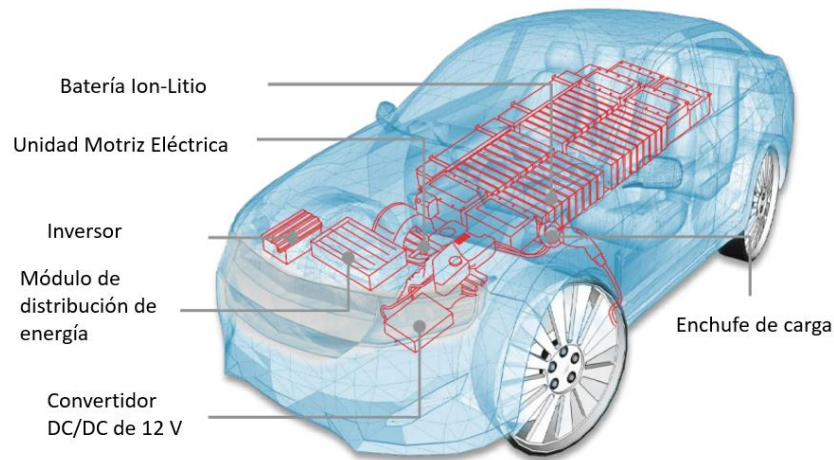


Figura 2.16: Componentes del tren de potencia de un vehículo BEV convencional – Adaptado de [22]

- **Paquete de batería:** El paquete de baterías está formado por múltiples celdas de iones de litio y almacena la energía necesaria para el funcionamiento del vehículo. Los paquetes de baterías proporcionan una salida DC.
- **Convertidor DC-AC:** La corriente continua suministrada por el paquete de baterías se convierte en corriente alterna y se suministra al motor eléctrico. Esta transferencia de potencia se gestiona mediante un sofisticado mecanismo de control del motor (también denominado unidad de control electrónico del tren de potencia) que controla la frecuencia y la magnitud de la tensión suministrada al motor eléctrico para gestionar la velocidad y la aceleración según las instrucciones del conductor comunicadas a través de la aceleración/frenos.
- **Motor eléctrico:** Convierte la energía eléctrica en energía mecánica, que se entrega a las ruedas a través de la transmisión de una sola relación.

Muchos vehículos eléctricos utilizan motores generadores que también pueden realizar la regeneración.

- Cargador a bordo: Convierte la AC recibida a través del puerto de carga en DC y controla la cantidad de corriente que fluye hacia el paquete de baterías.
- Sistema de gestión de baterías (BMS): Un BMS supervisa continuamente el estado de la batería y se encarga de tomar las medidas necesarias en caso de mal funcionamiento. El BMS se encarga de equilibrar las celdas para obtener la máxima eficiencia del paquete de baterías. Es responsable de la comunicación con otras ECUs (Unidad de Control Electrónico) y sensores, así como con los EVSEs (Estación de Carga para Vehículo Eléctrico) para controlar la entrada de carga, comprobar el estado actual de la carga y compartir datos sobre las especificaciones de la batería.
- Convertidor DC-DC: Un paquete de baterías suministra un voltaje fijo, pero el requerimiento de los diferentes sistemas accesorios (por ejemplo, limpiaparabrisas, luces, sistema de entretenimiento, control de los espejos) en el VE variaría. El convertidor DC-DC ayuda a distribuir la energía a los distintos sistemas convirtiendo la potencia de salida del paquete de baterías en el nivel esperado. Tras la conversión, la energía se suministra a las respectivas ECUs más pequeñas a través del mazo de cables.
- Sistema de gestión térmica: Responsable de mantener el rango óptimo de temperatura de funcionamiento de los componentes de la cadena cinemática.
- Módulo de control de la carrocería: Se encarga de supervisar y controlar las funciones de los accesorios electrónicos como los elevallunas, los retrovisores, la seguridad y el control de acceso al vehículo

2.4.2 Cómo se conforma el tren de potencia en un vehículo MCI

El tren de potencia de un vehículo MCI se conforma principalmente de un motor, transmisión, eje de transmisión, ejes y diferencial (ver Figura 2.17).

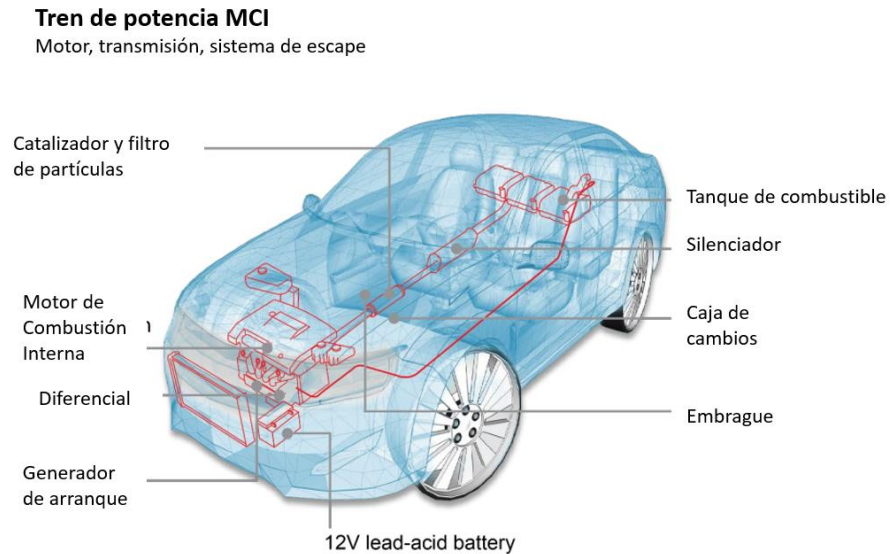


Figura 2.17: Componentes del tren de potencia de un vehículo MCI - Adaptado de [22]

- **Motor:** Genera la energía necesaria para impulsar el vehículo. El motor se conforma de pistones, que tienen un movimiento hacia arriba y abajo dentro de los cilindros y tiene un cigüeñal que convierte el movimiento alternativo en un movimiento giratorio.
- **Transmisión:** Este es un componente indispensable en el vehículo que garantiza que se transmita la cantidad de potencia adecuada a las ruedas. La transmisión toma la potencia del motor y la ajusta según las condiciones de conducción, al igual que la caja de cambios de un automóvil, y finalmente la transfiere a las ruedas.

- Eje de transmisión: Este componente transfiere el torque de la transmisión hacia las ruedas. Para esto, tiene que trabajar en diversos ángulos y modificar su longitud para adaptarse al movimiento de la suspensión.
- Ejes: Estos son una parte importante del tren de potencia. Se encuentran entre las ruedas del vehículo y tiene dos funciones: Soportar el peso del vehículo y transmitir la potencia del motor hacia las ruedas.
- Diferencial: Este es parte del eje trasero. Su función es hacer que cada rueda trasera gire a una velocidad diferente.

El sistema de encendido por compresión que utilizan los vehículos diésel, el combustible se inyecta en la cámara de combustión del motor y se enciende por las altas temperaturas que se alcanzan cuando el pistón del motor comprime el gas. A diferencia de los sistemas de control de emisiones de los vehículos de gasolina, muchos vehículos diésel tienen componentes adicionales de postratamiento que reducen las partículas y descomponen el peligroso óxido de nitrógeno (NO_x) en emisiones en nitrógeno inocuo y agua [23].

2.5 Ventajas y desventajas vehículos MCI y BEV

Existen distintos puntos positivos tanto en vehículos MCI como BEV ya sea en cuestión de rendimiento, componentes que lo conforman, funcionalidad, diseño, impacto ambiental, que se vuelve difícil a la hora de elegir una opción para comprar. Esto básicamente queda a consideración del consumidor final de acuerdo con las necesidades que se tengan en el uso personal o en industria. Es por esto, se presentan a continuación, algunas ventajas y desventajas más importantes de estos vehículos en la Tabla 3:

Tabla 3: Ventajas y desventajas de vehículos MCI y BEV [24,25]

Vehículos de Combustión Interna (Motor Diesel)		Vehículos de baterías eléctricas	
Ventajas	Desventajas	Ventajas	Desventajas
Mayor durabilidad	Mantenimiento especializado	Costos de recarga más bajos	Estaciones de carga disponibles
Mayor confiabilidad	Temperaturas frías	Reduce la contaminación	Duración de la carga
Mayor economía de marcha	Ruido	Rendimiento de alta calidad	Costos iniciales altos
Menor contaminación	Peso	Menor necesidad de mantenimiento	Rango de conducción limitado

2.5.1 Diferencias entre tren de potencia MCI y BEV

El tren de potencia de un vehículo que funciona con combustible y uno que funciona con baterías eléctricas, tienen unas cuantas diferencias en cuanto a sus componentes (ver Figura 2.18) siendo la fuente de alimentación para hacer funcionar el vehículo la primera diferencia importante.

El tren de potencia de un vehículo BEV tiene 60% menos componentes que un vehículo MCI.

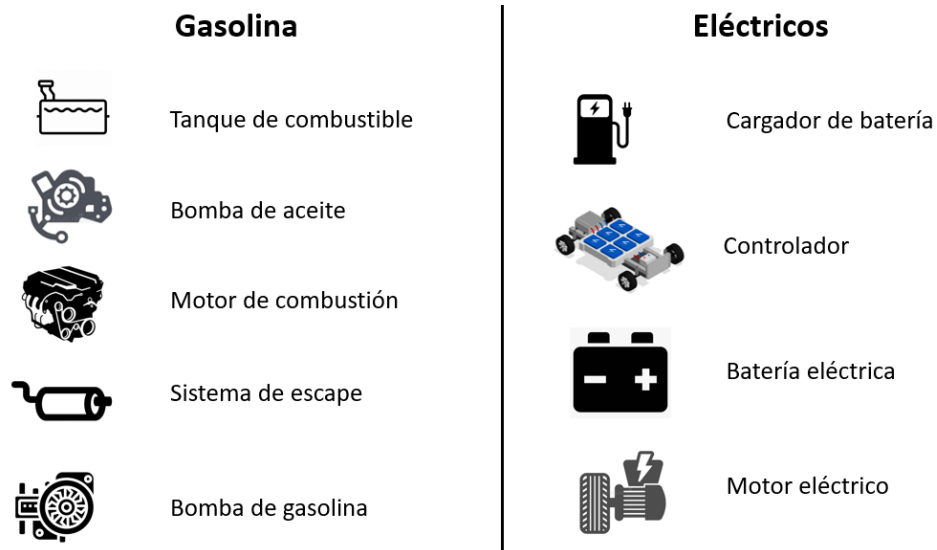


Figura 2.18: Componentes del tren de potencia de un vehículo MCI y un BEV - Adaptado de [21]

La imagen muestra que la tecnología es completamente diferente en ambos tipos de vehículos, y en gran parte, cambia mucho el diseño del tren de potencia en cada uno, con el objetivo de mejorar el rendimiento sin alterar las normas de medio ambiente. El motor es otro punto muy importante en este cambio, ya que son distintos tipos de funcionamiento, pesos, tamaños, y en cuanto a funcionalidad, puede variar el torque y potencia entre ambas tecnologías. A continuación, se muestra en la Tabla 4, una comparativa en cuanto diferencias importantes entre vehículos MCI y BEV:

Tabla 4: Diferencias entre vehículos MCI y BEV [26]

Vehículos de Combustión Interna (Motor Diesel)	Vehículos de baterías eléctricas
Emite gases de efecto invernadero	Sin emisiones
La energía del frenado no se recupera	La energía del frenado sí se recupera
Necesita un sistema de engranajes complejo	Necesita un solo engrane
Funcionamiento ruidoso	Funcionamiento silencioso
Necesita aumentar la velocidad para entregar el máximo torque	Produce el torque máximo
Utiliza solo hidrocarburos	Utiliza electricidad de muchas fuentes

2.6 Configuración de tren de potencia más utilizada

Los componentes del tren de potencia vistos anteriormente tanto de un vehículo MCI y uno BEV, son una guía para poder entender el funcionamiento y poder explorar distintas configuraciones con el fin de mejorar el rendimiento del vehículo BEV como lo es mejorar su potencia, mejorar su torque y mejorar el consumo de energía siendo más eficiente que un vehículo MCI. La Figura 2.19 muestra la configuración de tren de potencia más convencional en vehículos BEV, que consta del control del vehículo, motor eléctrico, inversor de corriente, caja de engranes incluyendo el diferencial y las baterías eléctricas.

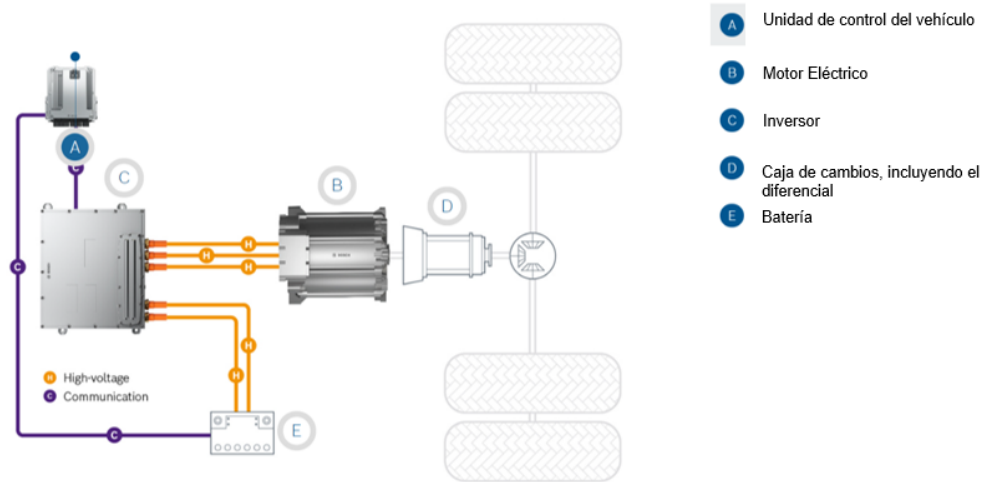


Figura 2.19: Componentes del tren de potencia de un vehículo BEV [27]

Esta configuración de tren de potencia está basada en un tipo de tracción trasera, donde el sistema eléctrico y electrónico se encuentra en la parte delantera, seguido del motor eléctrico que está conectado a la caja de cambios que incluye su diferencial para poder mover las ruedas traseras.

En conclusión, para la selección del vehículo de esta tesis, un aspecto a considerar fue la clasificación de los vehículos, que brinda los detalles generales que conforman los vehículos clase VII como el peso máximo que pueden transportar, cantidad de llantas, ejes y algunos ejemplos cotidianos. Una característica importante es el tren de potencia, el cual fue cubierto mediante este capítulo desde sus partes, tanto BEV como MCI, ventajas, desventajas y diferencias, y a su vez una visualización a uno de los trenes de potencia más utilizados de los BEV.

CAPÍTULO III: CONCEPTO DE MOTORES

3.1 Introducción

En este capítulo se discuten los diversos motores que existen en la industria automotriz, y algunos de los más utilizados en BEV. También se mencionan sus características, funcionamiento y algunas ventajas y desventajas que existen entre motores.

3.2 Motores, tipos y características – configuraciones de motores en BEV

Como se mencionó anteriormente, la parte importante del tren de potencia de cualquier tipo de vehículo es su motor. En los vehículos BEV es específicamente su motor eléctrico. Dentro de los motores eléctricos, hay una extensa variedad y cada uno tiene distintas características que es difícil saber exactamente que motor cumple con las características necesarias para la industria automotriz (ver Figura 3.20).

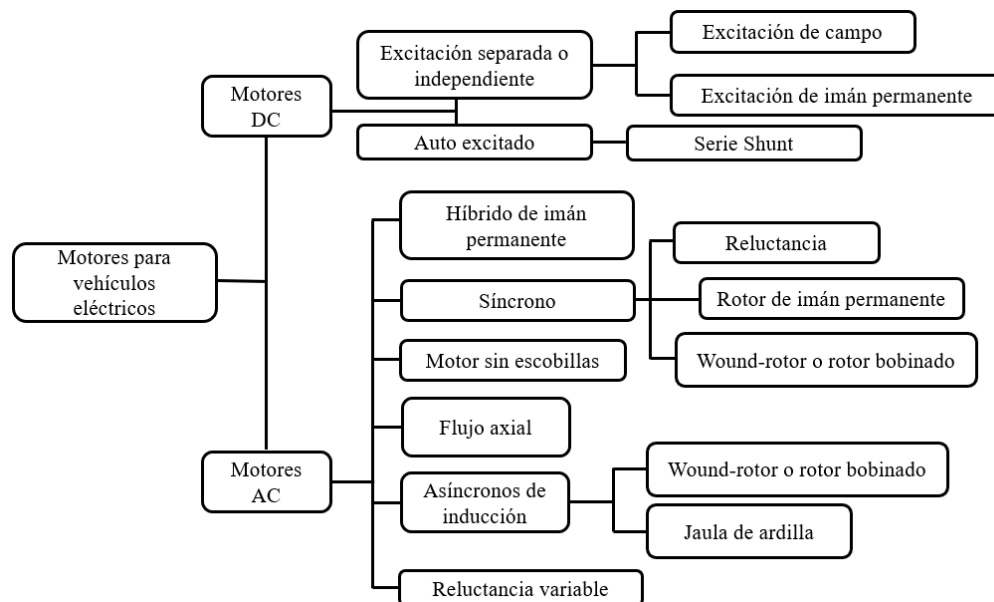


Figura 3.20: Tipos y clasificación de motores eléctricos adaptado de [28]

En la Figura 3.21 se muestran los tipos de motores eléctricos que existen en el mercado, sin embargo, muchos tienen diferentes aplicaciones (por ejemplo, motores de procesos industriales, aire lavados, elevadores, etc.) pero dentro de la industria automotriz, suelen ser los motores AC los más utilizados. Los motores DC no son tan utilizados en esta industria debido a sus características y funcionalidades orientadas en su mayoría a juguetes, electrodomésticos, y hasta grandes mecanismos como trenes de laminación de acero.

La clasificación de los motores de AC tiene dos tipos: Síncrono y asíncrono. La diferencia entre los motores síncronos y asíncronos es que, en el primer caso, el estator produce una velocidad electromagnética igual a la velocidad con que gira el rotor. El motor asíncrono se caracteriza porque el giro del rotor no corresponde a la velocidad de giro del campo magnético producido por el estator (ver Figura 3.21) [29].

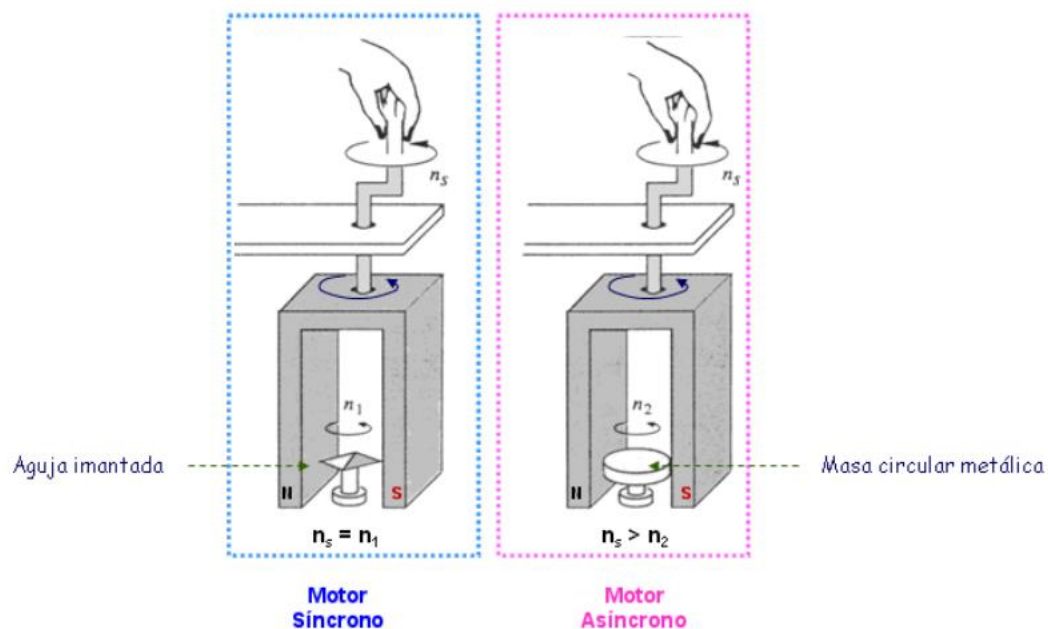


Figura 3.21: Diferencia entre motor síncrono y motor asíncrono [30]

Un motor eléctrico (en comparación con los MCI) es más sencillo de utilizar ya que no requiere una conversión del movimiento de lineal alternante a movimiento rotativo. Además, es más eficiente al traducir energía en trabajo: el motor eléctrico

llega a alcanzar el 90% de la energía aprovechada contra el 25 - 28% para el motor de gasolina y el 40% para el motor diésel (ver Figura 3.22) [31].

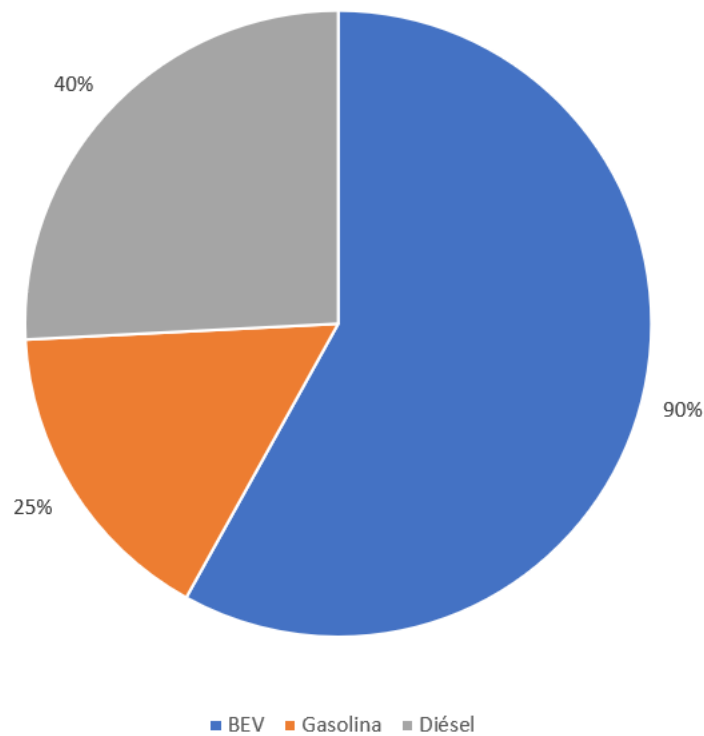


Figura 3.22: Energía aprovechada en trabajo en un BEV, vehículo de gasolina y vehículo diésel [31]

El motor eléctrico funciona directamente sin la necesidad de cambios. Esto es debido al alto torque del motor, disponible de forma inmediata y constante para casi todo el rango de operación, el motor está siempre disponible (ver Figura 1.11). Para lograr la marcha atrás, esta se obtiene invirtiendo el flujo eléctrico que circula en el motor, y de esta forma se invierte el sentido de giro del propio motor. Por último, mediante la inversión de la polaridad, se vuelve un generador eléctrico y puede recuperar la energía cinética del vehículo durante el frenado [32].

3.2.1 Ventajas y desventajas de los motores asíncronos

Los motores asíncronos AC (ver Figura 3.23) son los que la corriente eléctrica se genera por inducción electromagnética en el campo magnético de la bobina del estator con el propósito de producir la torsión del rotor. Es por esto que no necesitan una conmutación mecánica como en el caso de los motores síncronos. Estos motores se componen principalmente del rotor, que puede ser de dos tipos, de jaula de ardilla, o de bobinado, y de un estator, donde se alojan las bobinas inductoras, que son trifásicas y están desfasadas entre sí 120 grados [33].



Figura 3.23: Partes motor asíncrono [33]

Al aplicarse una AC trifásicamente en las bobinas inductoras se origina un campo magnético giratorio, denominado campo rotante, que envuelve al rotor en estado de reposo. En ese instante se produce el efecto Laplace: “todo conductor por el que circula una corriente eléctrica, inmerso en un campo magnético experimenta una fuerza que lo tiende a poner en movimiento”. Ese campo magnético que sigue el movimiento del campo del estator es lo que origina el torque del motor, y el principal de hacer que el rotor gire [33].

Los tecnología de los motores asíncronos han existido por un largo tiempo. El costo es económico, son de arranque automático, pueden soportar sobrecargas y se controlan sin problema alguno. Además, tiene una respuesta menos precisa debido

al desplazamiento anteriormente mencionado y es menos eficiente que el motor síncrono [34].

3.2.2 Ventajas y desventajas de los motores síncronos

Los motores síncronos se adaptan perfectamente al sector automotriz. Este motor es eficiente ya que el campo magnético generado por el rotor es siempre constante y no tiene devanados, que son el motivo de dispersiones y pérdidas en el motor, con esto la eficiencia puede superar el 90% [34].

El campo magnético del estator tiene un impacto inmediato en la velocidad del rotor, creando una sincronización entre los dos campos magnéticos. Todo esto favorece a tener una respuesta muy receptiva del motor (ver Figura 3.24) [34].

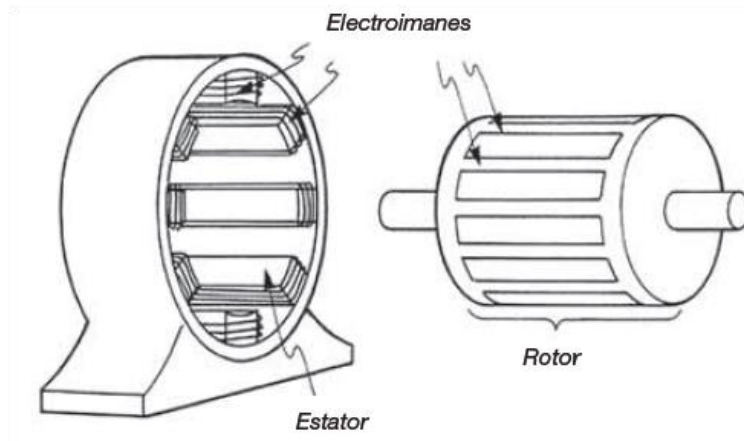


Figura 3.24: Partes del motor síncrono [35]

Existen diversos tipos de elementos que hacen que la movilidad en los vehículos sea debido a la correcta funcionalidad de estos motores eléctricos. Sin embargo, tienen una gestión de energía que es igual para todos [36].

Controladas por el conductor, estas permiten invertir la energía para crear movimiento o, en su caso, convertir la energía cinética (movimiento) en energía eléctrica para recargar la batería [36].

- Fase de aceleración. La corriente DC pasa de la batería al convertidor, siendo el encargado de modificar esta energía eléctrica de DC a AC. Después la energía llega al motor para mover el rotor que se convierte en movimiento de las ruedas.
- Fase de desaceleración. Inicia en las ruedas, estas se encuentran en movimiento tras finalizar la fase de aceleración, es decir, cuando levantamos el pie del acelerador. Después el motor eléctrico genera resistencia y convierte la energía cinética en AC, la cual repite el proceso anterior y va directamente al convertidor que la transforma en DC y, a su vez, la almacena en la batería. Este proceso ocurre también cuando se activa el frenado regenerativo en el vehículo eléctrico.

Dentro de la industria automotriz, las compañías utilizan ampliamente un solo tipo de motor, en el cual cada fabricante desarrolla su prototipo y lo va adaptando de acuerdo con sus necesidades. A continuación, en la Tabla 5 se muestra el avance de los vehículos eléctricos en el mercado de acuerdo con el uso del motor, el tipo de configuración que es el vehículo, su año y la potencia que brinda [37].

Tabla 5: Ejemplos de vehículos electrificados en el mercado, incluida su configuración, tecnología de la máquina y potencias - Adaptado de [37]

Modelo	Año	Vehículo	Configuración	Motor	Potencia (kW) Total / Eléctrico
Audi	2009	Q5 Híbrido	Híbrido	PMSM	182/40
BMW	2014	i8	Híbrido	PMSM	265/96
BYD	2008	F3DM	Híbrido Enchufable	PMSM	125/75
Honda	2009	Insight	Híbrido	PMSM	83/10
Honda	2001	Civic	Híbrido	PMSM	69/10
Audi	2009	Q5 FCEV	Celda de combustible	IM	80
Ford	2000	Ford P2000	Celda de combustible	IM	67
Honda	2008	FCX Clarity	Celda de combustible	PMSM	100
Hyundai	2013	ix35 FCEV	Celda de combustible	IM	100

Mercedes	2010	Clase B F-Cell	Celda de combustible	PMSM	100
Toyota	2015	Mirai	Celda de combustible	PM	113
BMW	2013	i3 BEV	Eléctrico	PMSM	125
BYD	2014	E6	Eléctrico	PMSM	90
Citroen	2011	C-Zero	Eléctrico	PMSM	47
Citroen	2016	E-Mhari	Eléctrico	PMSM	50
Ford	2011	Focus Electric	Eléctrico	PMSM	107
Kia	2014	Soul EV	Eléctrico	PMSM	81.4
Land Rover	2013	Defender	Eléctrico	SRM	70
Mercedes	2014	SLS AMG ED	Eléctrico	PMSM	550
Mercedes	2014	Clase B ED	Eléctrico	PMSM	132
Mitsubishi	2009	i-MIEV	Eléctrico	PMSM	47
Nissan	2010	Leaf	Eléctrico	PMSM	80
Peugeot	2010	iOn	Eléctrico	PMSM	49
Peugeot	2014	Partner Electric	Eléctrico	PMSM	49
Porsche	2020	Mission E	Eléctrico	PMSM	440
Renault	2001	Kangoo I	Eléctrico	PMSM	Desde 22 hasta 29
Renault	2011	Kangoo ZE	Eléctrico	PMSM	44
Renault	2011	Fluence ZE	Eléctrico	PMSM	70
Renault	2012	Twizy	Eléctrico	PMSM	8
Renault	2012	Zoe	Eléctrico	PMSM	65
Smart	2011	Fortwo ED	Eléctrico	PMSM	55
Tazzari	2009	EM1	Eléctrico	IM	20
Tazzari	2009	Zero Classic	Eléctrico	IM	20
Tesla	2011	Roadster	Eléctrico	IM	185
Tesla	2012	Model S	Eléctrico	IM	Desde 235 hasta 568
Tesla	2015	Model X	Eléctrico	IM	Desde 193 hasta 375
Think	2008	Think City	Eléctrico	IM	34
Toyota	2012	RAV4 EV	Eléctrico	IM	115
Volkswagen	2014	e-Golf	Eléctrico	PMSM	85
Volkswagen	2013	e-UP	Eléctrico	PMSM	60

3.2.3 Motor síncrono de imanes permanentes (PMSM)

Este motor AC (ver Figura 3.25) tiene una velocidad de giro constante y está igualada entre rotor y estator. Tiene dos tipos de variantes, con flujo radial (el más utilizado) y con flujo axial. Una diferencia se encuentra en la posición del campo magnético de la inducción. En cualquier caso, los vehículos que utilizan los motores síncronos de imanes permanentes ofrecen un rendimiento sobresaliente, ya que

entregan un máximo control de la velocidad, además de ser menos ruidosos y tienen una mínima vibración [36].

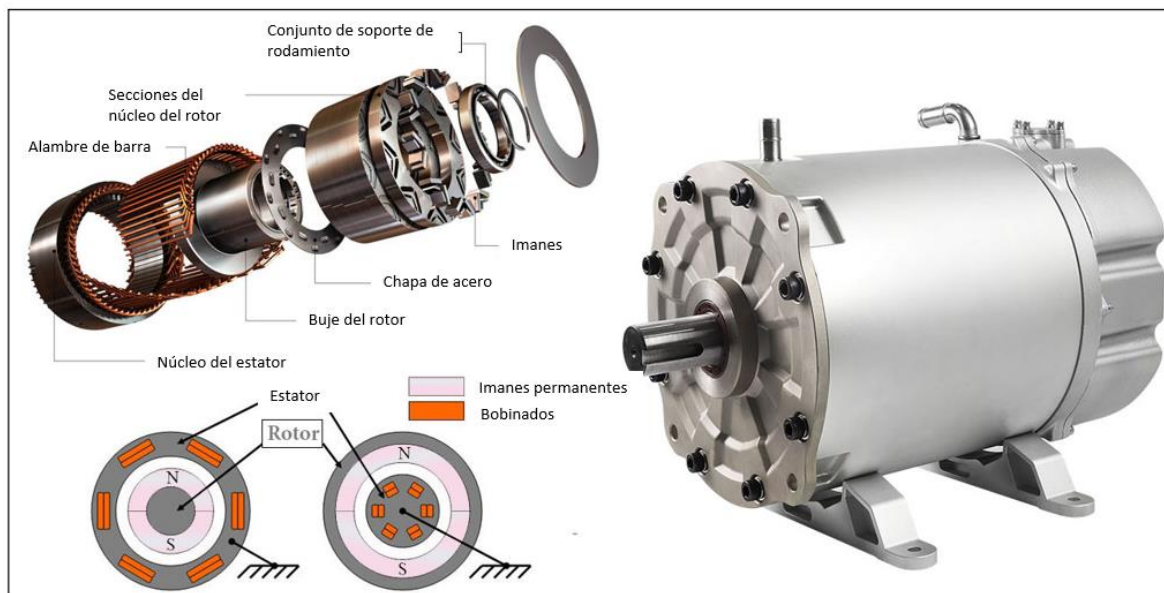


Figura 3.25: Motor de imanes permanentes: componentes y funcionamiento [38]

Este tipo de motores se encuentran mayormente en los vehículos híbridos y eléctricos. Se conforman de imanes compuestos por tierras raras que tienen incrustados en su rotor, como el disprosio (Dy), el gadolinio (Gd) o el neodimio (Nd). Estas tierras son importadas de China, siendo muy escasos, de precio elevado y muy difíciles de reciclar. Estos motores se conforman de rotor con imanes permanentes capaces de generar su propio campo magnético, son altamente eficientes y no requieren energía extra. Sin embargo, debido a los tipos de materiales que necesita el rotor son más caros y no son tan apropiados para vehículos de alto rendimiento. Este motor se encuentra en algunos modelos comerciales como Nissan Leaf (2010), Chevrolet Bolt (2010), Renault Zoe (2010), Mitsubishi I-MiEV (2009), Audi Q5 (2008) o el Tesla Model 3 (2018) [32].

3.2.4 Motor asíncrono de inducción

El otro tipo de motor que existe en el mercado es el motor asíncrono de inducción, de AC (ver Figura 3.26). Este motor tiene similitudes con el síncrono de imanes

permanentes, pero la gran diferencia radica en el rotor, que es completamente distinto. La utilización de este motor hoy es menos frecuente, ya que es menos eficiente para operar a bajas revoluciones, teniendo en promedio una eficiencia de entre 80 y 90%. Sin embargo, este es el ideal para vehículos de alto desempeño, y es por lo que el Tesla Model S (2012) utiliza en sus vehículos [32].

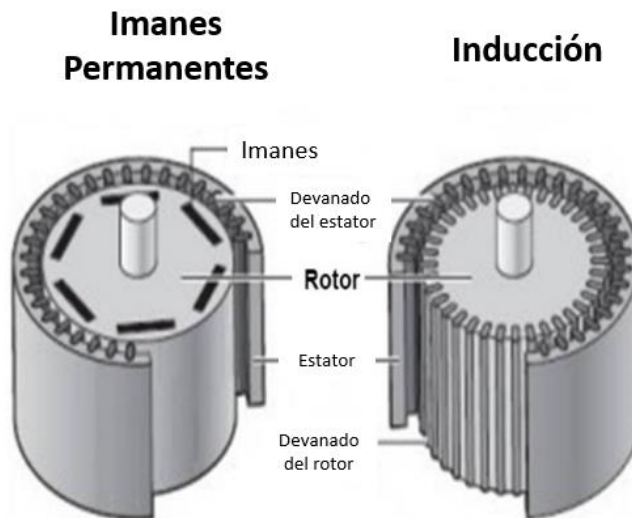


Figura 3.26: Diferencias entre motor de imanes permanentes y motor de inducción [32]

A nivel mecánico su principal diferencia al resto de los motores es que el giro del rotor no se produce a la misma velocidad que el campo magnético producido por el estator. Los BEV con motor asíncrono son más económicos, silenciosos y ofrecen una mejor eficiencia en su conducción [36].

En conclusión, de acuerdo con las investigaciones, el avance en el campo de los BEV está aumentando y para eso se utilizan principalmente dos tipos de motores: motor síncrono de imanes permanentes y motor de inducción que, a consideración de la industria automotriz, son los ideales para la propulsión de los vehículos por las características que estos brindan.

CAPÍTULO IV: TIPOS DE TRACCIÓN Y CICLO DE CONDUCCIÓN

4.1 Introducción

En este capítulo se exploran los tipos de tracción en los vehículos, además de los tipos de tracción en los vehículos clase VII. Además, se aborda una característica importante para el desarrollo de este modelo numérico de simulación, el ciclo de conducción, los ciclos más utilizados en la industria automotriz, características y su importancia relacionada con la movilidad y transporte.

4.2 Tipos de Tracción en vehículos

Una vez analizados los diferentes tipos de motores que existen en el mercado y conocer los que tienen una aplicación más amplia, en el automóvil existe otro punto importante dentro del tren de potencia como lo son los sistemas de tracción (ver Figura 4.27).

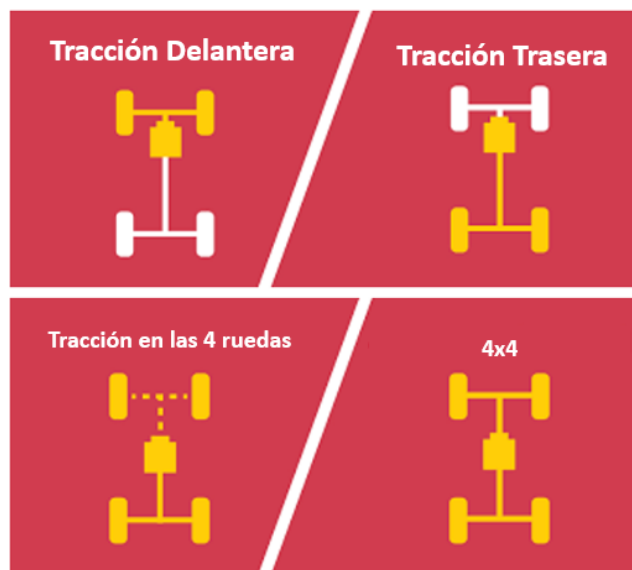


Figura 4.27: Sistemas de tracción: a) tracción delantera, b) tracción trasera, c) tracción en las cuatro ruedas permanente y d) tracción 4x4. [39]

Algunos de los siguientes sistemas de tracción son [39]:

- Tracción delantera (FWD): Este tipo de tracción es la más conocida, ya que es donde la fuerza viaja a las ruedas delanteras. Este tipo de tracción se encuentra en vehículos y camionetas que no requieren una alta potencia. A una mayor tracción, estos vehículos tienden a sufrir de subviraje en las curvas.
- Tracción trasera (RWD): Este tipo de tracción recibe la fuerza del motor en el eje de las ruedas traseras. Se puede encontrar en vehículos con mayor demanda de potencia y mayormente en vehículos de competencia. A una mayor tracción, estos vehículos tienden a sobrevirar (llantas traseras se dirigen al exterior de la curva).
- Tracción en las cuatro ruedas (4X4): En este tipo de tracción, el vehículo puede repartir la potencia a las cuatro ruedas de manera selectiva. Reparte en proporción 50 % – 50 % la fuerza del motor entre los ejes delanteros y traseros del vehículo. Es común que los vehículos 4x4 tengan una caja de transferencia que permite seleccionar entre tracción en las ruedas delanteras y traseras o 4 ruedas. Es ideal para situaciones extremas y todoterreno.
- Tracción en las cuatro ruedas permanente (AWD): Esta tracción se encuentra en las cuatro ruedas de forma total y permanente. Una vez se enciende el vehículo, las ruedas reciben la fuerza del motor. Esta tracción se utiliza comúnmente en terrenos de escasa adherencia o calles mojadas por la lluvia. Este sistema utiliza un diferencial central que tiene la función de igualar la tracción en cada rueda por separado para mantener un control total del vehículo.

Coloquialmente un vehículo 4x4 es relacionado a los “todo terreno”, es decir, a vehículos con tracción total en las 4 ruedas. En los camiones también se utiliza este tipo de nomenclatura para definir el número de ejes o ruedas de los vehículos, tal como se define a continuación (ver Figura 4.28) [40]:

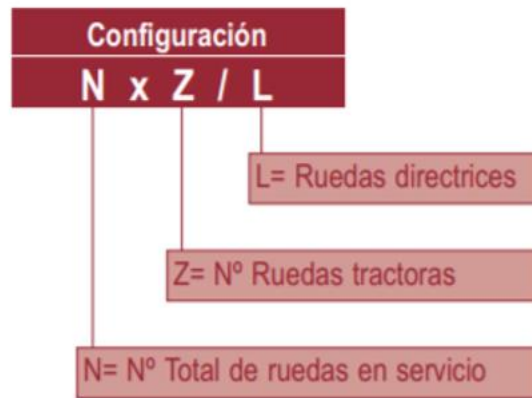


Figura 4.28: Nomenclatura en sistema de tracción en camiones [40]

En esta nomenclatura no se percibe si son ruedas dobles o gemelas, y en ocasiones, el número de ruedas direccionales o directrices se suprime para simplificar los términos. En función de esta designación generalizada para definir el tipo de tracción y rodaje, los camiones se pueden clasificar como se muestra en la Figura 4.29 [40]:

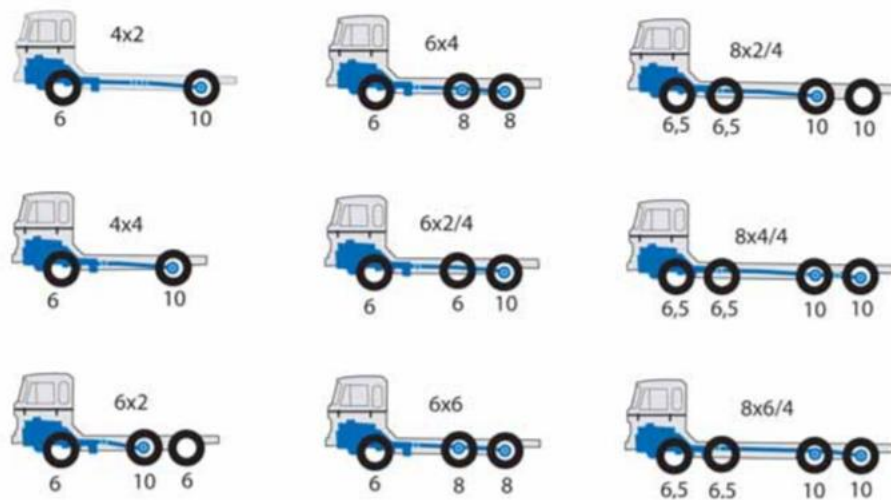


Figura 4.29: Tipos de tracción, rodaje y cargas sobre ejes de camiones [40]

En los camiones la clasificación se define en cuatro grupos o gamas como: ligeros, medios, semipesados y pesados o tractoras, ver Tabla 6 [40].

Tabla 6: Clasificación de camiones en cuatro grupos: ligeros, medios, semipesados y pesados tractoras [40]

GAMAS	LIGEROS	MEDIOS	SEMIPESADOS	PESADOS TRACTORAS
PMA (Tm)	6 a 14	6 a 14	14 a 20	20 a 38
Cilindrada (cc)	2,5 a 4	4 a 7	7 a 9	9 a 15
Potencia (cv)	75 a 110	90 a 250	150 a 300	250 a 500
Servicio	Transporte ligero	Transporte distribución	Transporte obras	Transporte internacional

4.3 Ciclos de conducción

Un ciclo de conducción es un análisis estadístico donde es monitoreado un vehículo en una ruta específica, y permite generar una relación entre velocidad y tiempo, siendo una herramienta útil para el desarrollo de vehículos en la industria automotriz [41].

Hay varios tipos de ciclos de conducción de los cuales los más utilizados son el WLTC (The Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycles ver Figura 4.30a), NEDC (New European Driving Cycle ver Figura 4.30b), y FTP-75 (EPA Federal Test Procedure ver Figura 4.30c) siendo este último el único que tiene pruebas en condiciones de zona urbana y es uno de los más usados en el mundo. La tecnología derivada del diseño del ciclo de conducción es primordial para estos ciclos estándar. Las cadenas de Markov y la optimización se emplean para diseñar un ciclo de conducción [42].

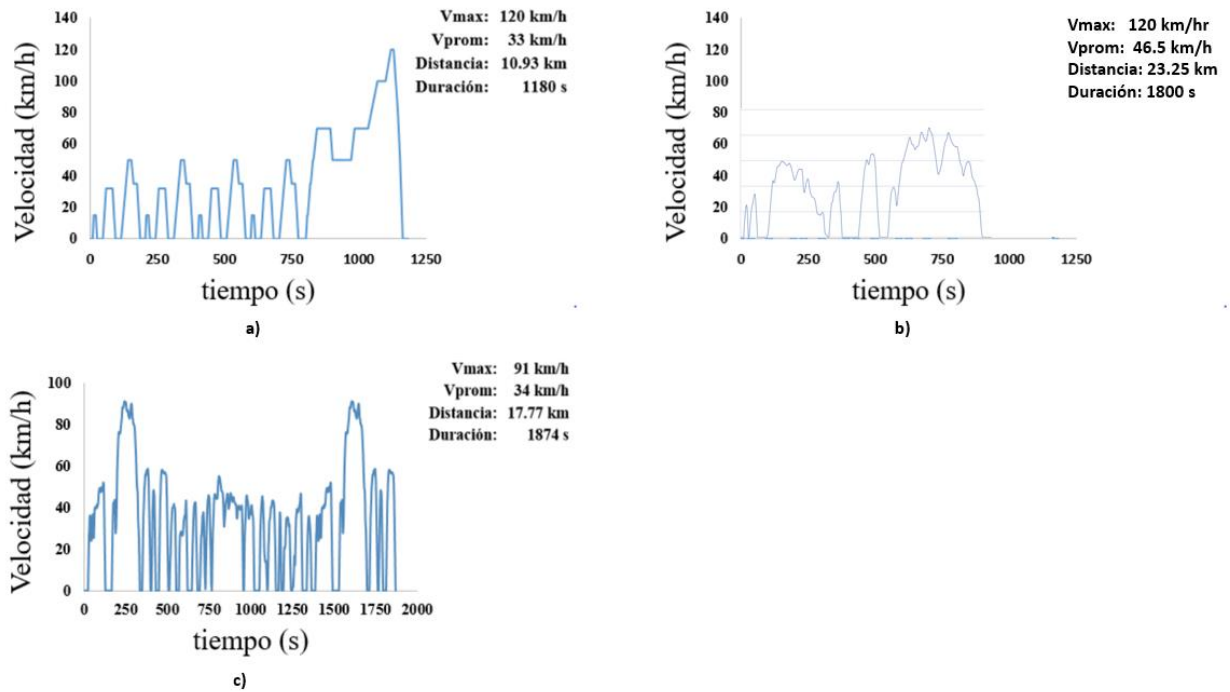


Figura 4.30: Ciclos de conducción: a) NEDC, b) WLTC, c) FTP-75 [43]

La cadena de Markov (ver Figura 4.31), también conocida como modelo de Markov o proceso de Markov, es un concepto desarrollado dentro de la teoría de la probabilidad y la estadística que establece una fuerte dependencia entre un evento y otro suceso anterior. Su principal utilidad es el análisis del comportamiento de procesos estocásticos [44].

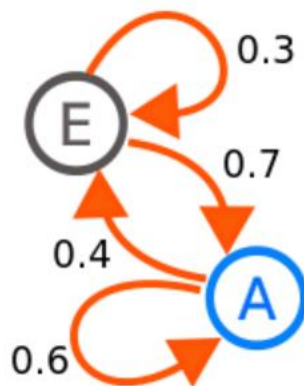


Figura 4.31: Cadena de Markov [44]

El FTP-75 (ver Figura 4.30a) y el FTP72 son dos variantes del programa de conducción con dinamómetro urbano de la EPA (UDDS). El ciclo FTP-75 se obtiene del FTP-72 contando con una tercer fase de 505 s, similar a la primera del FTP-72 pero con un encendido durante el funcionamiento. La tercera fase empieza después de que el motor se detiene durante 10-min. El ciclo FTP-75 se compone de las siguientes etapas [45]:

1. Fase de arranque, 0 – 505 s (temperatura ambiente 20 - 30 °C).
2. Fase normalizada, 506-1372 s.
3. Remojo en caliente (mínimo 540 s, máximo 660 s).
4. Fase transitoria de arranque en caliente, 0-505 s.

Todos los vehículos deben cumplir con ciertos estándares de emisiones FTP para su certificación. Desde el año 2000, los vehículos son sometidos a dos procedimientos de prueba federales suplementarios (SFTP) diseñados para mostrar las deficiencias del FTP-75 en una representación de conducción agresiva a alta velocidad (US06) y en uso del aire acondicionado (SC03). Las bases de las pruebas FTP generan los valores para la economía de combustible y a su vez se genera la clasificación de la ciudad, mientras que las pruebas HWFET generan la clasificación de las carreteras [42].

En conclusión, los tipos de tracción desempeñan un rol fundamental dentro del funcionamiento del vehículo, explorando su comportamiento en diferentes situaciones, siendo un punto importante para la seguridad del usuario y rendimiento. Por otra parte, los ciclos de conducción son indispensables para evaluar y mejorar la sostenibilidad de la movilidad, y un punto importante para el desarrollo en la industria automotriz.

CAPÍTULO V: DESCRIPCIÓN MATEMÁTICA DEL MODELO

5.1 Introducción

En este capítulo se definen las ecuaciones para el desarrollo del modelo matemático, en donde se divide en subsistemas para explicar cada componente que interviene en el cálculo y entender las ecuaciones que se utilizarán en el código.

5.2 Dinámica del vehículo

La Sociedad de Ingenieros de Automoción (SAE por sus siglas en inglés Society of Automotive Engineer) define la dinámica del vehículo como la aplicación de las leyes de la física a un vehículo en movimiento, lo que significa que, si se está conduciendo en curvas o esquivando un objeto sólido, la combinación vehículo/conductor debe operar dentro de las leyes de la física [46].

Existen cuatro componentes de la fuerza lateral (ver Figura 5.32) importantes para conocer el consumo de energía en un vehículo: la fuerza de inercia, la resistencia al aire, la resistencia a la rodadura de los neumáticos y la gravedad cuando el vehículo sube o baja una pendiente. La ecuación 5.1 muestra estos cinco componentes de la fuerza lateral, que al sumarse muestran la fuerza de tracción F_x :

$$F_x = \underbrace{m_v \frac{dV_x}{dt}}_{\text{inercia}} + \underbrace{\frac{\rho C_d A_F}{2} V_x^2}_{\text{aerodinámica}} + \underbrace{f_r m_v g \cos \alpha}_{\text{rodadura}} + \underbrace{m_v g \sin \alpha}_{\text{gravedad}} \quad (\text{ec. 5.1})$$

Donde:

La fuerza de tracción (F_x) se proporciona a través del deslizamiento entre el neumático y la carretera, y el motor eléctrico es la fuente de “energía” para generar ese deslizamiento y se calcula como (ver ecuación 5.32):

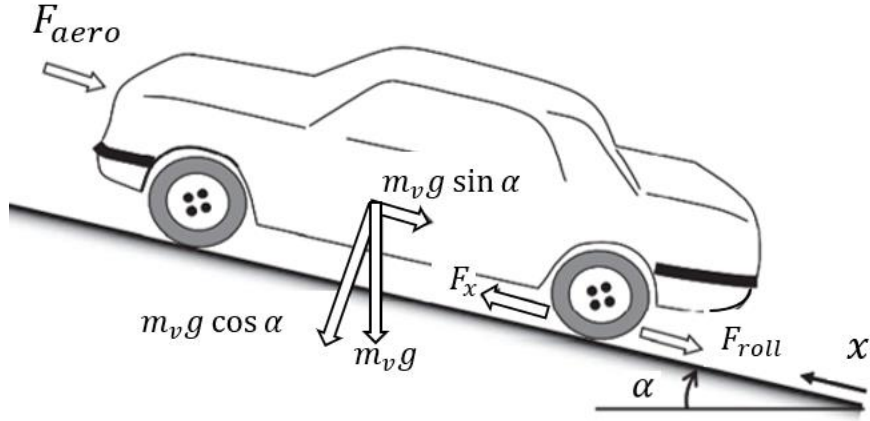


Figura 5.32: Componentes de las fuerzas laterales de un vehículo [47]

$$F_x = \mu_{s0} s_x m_v g \cos \alpha \quad ; \quad F_x = \frac{P_x}{V_x} \quad (\text{ec. 5.2})$$

La velocidad de deslizamiento (s_x) se define como la diferencia entre la velocidad circunferencial del neumático, ($r_w \omega_w$) y la velocidad del vehículo, V_x , donde r_w es el radio de rodadura dinámico de la rueda y ω_w es la velocidad angular de la rueda.

El deslizamiento normalizado se define como:

$$s_x = \frac{r_w \omega_w - V_x}{r_w \omega_w} \quad (\text{ec. 5.3})$$

La fuerza aerodinámica es cuando el viento en contra llega a una velocidad de V_{viento} hacia un vehículo en movimiento, y la fuerza de resistencia aerodinámica ejercida sobre un vehículo se calcula como (ver ecuación 5.4):

$$F_{aero} = \frac{\rho C_d A_F}{2} (V_x + V_{viento})^2 \quad (\text{ec. 5.4})$$

La resistencia a la rodadura de los neumáticos es cuando a medida que el neumático gira (ver Figura 5.2), una parte del neumático se comprime continuamente en la parte inferior, y luego se libera de nuevo a su forma original

después de salir de la región de contacto. Estos procesos de compresión y liberación no son totalmente elásticos. Es decir, debido a la acción de amortiguación, se consume energía durante los procesos de deformación y recuperación. Esta pérdida de energía en el neumático se refleja como una resistencia a la rodadura que se opone al movimiento del vehículo. Un punto importante para considerar es que la cantidad de deformación depende del peso del vehículo. Normalmente, la resistencia a la rodadura se modela como proporcional a la fuerza normal, F_z , sobre el neumático, es decir, la suma de la resistencia a la rodadura es (ver ecuación 5.33) [47]:

$$F_{roll} = f_r F_z = f_r m_v g \cos \alpha \quad (\text{ec. 5.5})$$

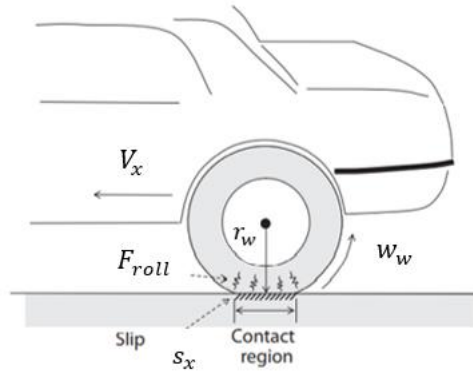


Figura 5.33: Fuerzas que interactúan en la resistencia a la rodadura [47]

La diferencia entre la suma de las cargas de la carretera y la fuerza de tracción se utiliza para acelerar o desacelerar como se muestra en la siguiente ecuación (ver ecuación 5.6):

$$m_v \frac{d}{dt} V_x = F_x - F_{aero} - F_{roll} - m_v g \sin \alpha \quad (\text{ec. 5.6})$$

Donde V_x es la velocidad del vehículo a través de una distancia x , m_v es la masa del vehículo, g la gravedad y α es el ángulo de inclinación de la carretera.

Estas son algunas de las fórmulas más importantes y generan una base para comprender mejor la dinámica de vehículos. Sin embargo, estas fórmulas pueden tener algunas otras variables adicionales que son aplicadas dependiendo de su utilidad.

Una vez conocidas las fórmulas de la dinámica del vehículo, se muestra η_f como el rendimiento total desde la potencia en el eje del motor, P_e , hasta la potencia de tracción del vehículo P_x (ver ecuación 5.7):

$$n_f = \frac{P_x}{P_e} = n_{dr}(1 - s_x) \quad (\text{ec. 5.7})$$

Es así como la eficiencia total se compone de la eficiencia de la línea motriz y la eficiencia en la conversión de fuerzas entre la superficie de la rueda y la carretera.

Entre la rueda y el eje del motor existe una línea de transmisión formada por el engranaje reductor, el engranaje diferencial y el eje de transmisión. Normalmente hay dos pasos de reducciones de velocidad: La primera está en la caja de engranajes reductores instalada delante del motor, y la segunda en la caja de engranajes diferenciales. La relación de reducción total es $1/g_{dr}$. La pérdida también se produce en el tren de potencia debido principalmente a la fricción de los engranajes.

La caída de eficiencia correspondiente se denota por η_{dr} . La relación de reducción total y la eficiencia de la línea motriz se muestran cómo (ver ecuación 5.8) [47]:

$$w_e = \frac{g_{dr}V_x}{r_w(1 - s_x)} \quad (\text{ec. 5.8})$$

$$T_e = \frac{T_w}{n_{dr}g_{dr}} \quad (\text{ec. 5.9})$$

5.3 Cálculo de corrientes de un motor IPMSM

Con el control de máximo torque por ampere (MTPA), la pérdida por cobre se reduce al mínimo. Sin embargo, la pérdida por hierro debería ser considerada para mejorar la eficiencia global. El control de minimización de pérdidas (LMC) es un método de control óptimo que minimiza la pérdida de corriente eléctrica total del motor [47]. Los métodos de control basados en tablas de consulta (LUT) son los más utilizados en la práctica.

La pérdida de corriente eléctrica total es igual a:

$$\begin{aligned}
 P_t &= P_{cu} + P_{fe} + P_{str} \\
 &= \left(\frac{3}{2} r_s + C_{str} w^2 \right) (i_d^2 + i_q^2) + C_{fe} w^\gamma (\lambda_d^2 + \lambda_q^2) \quad (\text{ec. 5.10}) \\
 &= k_1(w) i_d^2 + k_2(w) i_q^2 + k_3(w) i_d + k_4(w)
 \end{aligned}$$

Donde $\gamma = 1.5$ y sustituyendo $\lambda_d = L_d i_d + \psi_m$ y $\lambda_q = L_q i_q$ obtenemos:

$$k_1(w) = \frac{3}{2} r_s + C_{fe} w^\gamma L_d^2 + C_{str} w^2 \quad (\text{ec. 5.11})$$

$$k_2(w) = \frac{3}{2} r_s + C_{fe} w^\gamma L_q^2 + C_{str} w^2 \quad (\text{ec. 5.12})$$

$$k_3(w) = 2 C_{fe} w^\gamma L_d \psi_m \quad (\text{ec. 5.13})$$

$$k_4(w) = C_{fe} w^\gamma \psi_m \quad (\text{ec. 5.14})$$

Se utiliza una ecuación de Lagrange para encontrar una solución que minimice las pérdidas. El objetivo es encontrar el conjunto de corrientes (i_d, i_q) que minimice las pérdidas para un valor de torque T_0 y una velocidad W_e conocidos. Además, existen límites de tensión y corriente. La minimización de pérdidas se formula como:

$$P_t(i_d, i_q) = \left(\frac{3}{2}r_s + C_{str}w^2\right)(i_d^2 + i_q^2) + C_{fe}w^\gamma((L_d i_d + \psi_m)^2 + L_q^2 i_q^2) \quad (\text{ec. 15})$$

Sujeto a:

$$\frac{3P}{4}(\psi_m i_q + (L_d - L_q)i_d i_q) - T_0 = 0, \quad (\text{ec. 5.16})$$

$$(L_d i_d + \psi_m)^2 w^2 + w^2 (L_q i_q)^2 \leq V_m^2, \quad (\text{ec. 5.17})$$

$$i_d^2 + i_q^2 \leq I_m^2 \quad (\text{ec. 5.18})$$

Dado que el problema de control de minimización de pérdidas es una optimización bajo restricciones de desigualdad, puede ser necesario aplicar el teorema de Kuhn-Tucker (Extensión del teorema de Lagrange para resolver problemas de optimización condicionados tanto a restricciones de igualdad como desigualdad) [47]. Sin embargo, los casos se separan dependiendo de si la solución óptima se encuentra en la límite o en el interior de las restricciones. Primero se considera la optimización en el interior, donde se define por:

$$\mathcal{L}(i_d, i_q) = P_t(i_d, i_q) + \mu(T_e - T_0) \quad (\text{ec. 5.19})$$

Donde μ es un multiplicador de Lagrange.

Eliminando μ y reemplazando por i_q por la siguiente ecuación:

$$T_0 / \frac{3P}{4} (\psi_m + (L_d - L_q)i_d) \quad (\text{ec. 5.20})$$

Se obtiene la siguiente ecuación de cuarto orden:

$$f_w, T_0(i_d) = A i_d^4 + B i_d^3 + C i_d^2 + D i_d + E = 0 \quad (\text{ec. 5.21})$$

Donde:

$$A = \frac{27P^3}{64} (L_d - L_q)^3 (3r_s + 2C_{str}w^2 + 2C_{fe}w^\gamma L_d^2) \quad (\text{ec. 5.22})$$

$$B = \frac{27P^3}{64} \psi_m (L_d - L_q)^2 (9r_s + 6C_{str}w^2 + 6C_{fe}w^\gamma L_d^2 + 2(L_d - L_q)C_{fe}w^\gamma L_d) \quad (\text{ec. 5.23})$$

$$C = \frac{27P^3}{64} \psi_m^2 (L_d - L_q) (9r_s + 6C_{str}w^2 + 6C_{fe}w^\gamma L_d^2 + 2(L_d - L_q)C_{fe}w^\gamma L_d) \quad (\text{ec. 5.24})$$

$$D = \frac{27P^3}{64} \psi_m^3 (3r_s + 2C_{str}w^2 + 2C_{fe}w^\gamma L_d^2 + 6(L_d - L_q)C_{fe}w^\gamma L_d) \quad (\text{ec.5. 25})$$

$$E = \frac{27P^3}{32} \psi_m^4 C_{fe}w^\gamma L_d - \frac{9P}{4} (L_d - L_q) r_s T_0^2 - \frac{3P}{2} (L_d - L_q) C_{str}w^2 T_0^2 - \frac{3P}{2} (L_d - L_q) C_{fe}w^\gamma L_d^2 T_0^2 \quad (\text{ec. 5.26})$$

Asumiendo un torque constante lineal, con la ecuación 16 que combinadas con $i_d^{e2} + i_q^{e2} - I_m^2 = 0$ siendo estas corrientes de la misma magnitud, al combinarse se obtiene la siguiente ecuación cuadrática polinomial:

$$i_d^4 + A_1 i_d^3 + B_1 i_d^2 + C_1 i_d + D_1 = 0 \quad (\text{ec. 5.27})$$

Donde:

$$A_1 = \frac{2\psi_m}{(L_d - L_q)} \quad (\text{ec. 5.28})$$

$$B_1 = \frac{\psi_m^2}{(L_d - L_q)^2 - I_s^2} \quad (\text{ec. 5.29})$$

$$C_1 = \frac{2\psi_m I_s^2}{(L_d - L_q)} \quad (\text{ec. 5.30})$$

$$D_1 = \frac{1}{(L_d - L_q)^2} \left(\frac{16T_0^2}{9P^2} - I_s^2 \psi_m^2 \right) \quad (\text{ec. 5.31})$$

Lodovico y Ferrari derivaron una solución general para los polinomios cuadráticos (ver ecuación 32):

$$i_d = -\frac{A_1}{4} \pm s \frac{n_1}{2} \pm t \frac{\mu_1}{2} \quad (\text{ec. 5.32})$$

Donde:

$$\alpha_1 = \frac{1}{3}(3A_1C_1 - 12D_1 - B_1^2) \quad (\text{ec. 5.33})$$

$$\beta_1 = \frac{1}{27}(-2B_1^3 + 9A_1B_1C_1 + 72B_1D_1 - 27C_1^2 - 27A_1^2D_1) \quad (\text{ec. 5.34})$$

$$\gamma_1 = \frac{B_1}{3} + \sqrt[3]{-\frac{\beta_1}{2} + \sqrt{\frac{\beta_1^2}{4} + \frac{\alpha_1^3}{27}}} + \sqrt[3]{-\frac{\beta_1}{2} - \sqrt{\frac{\beta_1^2}{4} + \frac{\alpha_1^3}{27}}} \quad (\text{ec. 5.35})$$

$$\eta_1 = \sqrt{\frac{A_1^2}{4} - B_1 + \gamma_1} \quad (\text{ec. 5.36})$$

$$\mu_1 = \sqrt{\frac{3}{4}A_1^2 - \eta_1^2 - 2B_1 \pm s \frac{1}{4\eta_1}(4A_1B_1 - 8C_1 - A_1^3)} \quad (\text{ec. 5.37})$$

La orden de corriente máxima de torque/corriente se determina con la siguiente ecuación:

$$i_d^e = \frac{\lambda_d - \psi_m}{L_d} \quad (\text{ec. 5.38})$$

$$i_q^e = \frac{\sqrt{(V_m/w_e)^2 - \lambda_d^2}}{L_q} \quad (\text{ec. 5.39})$$

Esta es la solución de torque máximo para un voltaje dado (MTPV). El voltaje en las terminales del motor se calcula a partir del modelo del motor de forma que:

$$v_d^e = r_s i_d^e - w_e L_q i_q^e \quad (\text{ec. 5.40})$$

$$v_q^e = r_s i_q^e + w_e L_d i_d^e + w_e \psi_m \quad (\text{ec. 5.41})$$

Las pérdidas de hierro y cobre son las principales fuentes del aumento de temperatura en el motor. La proporción de ambas pérdidas varía en función de la tensión de alimentación y la velocidad de funcionamiento. En general, la pérdida por cobre es más dominante que la de por hierro.

La pérdida del cobre es igual a:

$$P_{cu} = \frac{3}{2}r_s I^2 = \frac{3}{2}r_s (i_d^2 + i_q^2) \quad (\text{ec.5.42})$$

La pérdida de hierro es igual a:

$$P_{fe} = C_{fe} w_e^\gamma (\lambda_d^2 + \lambda_q^2) = C_{fe} w_e^\gamma ((L_d i_d + \psi_m)^2 + (L_q i_q)^2) \quad (\text{ec. 5.43})$$

La pérdida por desviación es igual a:

$$P_{str} = C_{str} (2\pi f)^2 (i_d^2 + i_q^2) \quad (\text{ec. 5.44})$$

La pérdida del inversor es igual a:

$$P_{inv} = 3 \left[\frac{2V_{dc}}{\pi} I (t_r + t_f) + V_{on} \frac{2I}{\pi} t_{on} + \frac{V_{dc}}{2} I_{rr} t_{rr} \right] f_{sw} \quad (\text{ec. 5.45})$$

La suma de todas las pérdidas del motor da como resultado la potencia total hacia la batería definida por la siguiente ecuación:

$$P_{bat} = \frac{3}{2} (v_d i_d^{e*} + v_q i_q^{e*}) + \underbrace{P_{cu} + P_{fe} + P_{str}}_{=P_{motor}} + P_{inv} \quad (\text{ec. 5.46})$$

5.4 Cálculo para paquetes de batería

El paquete de baterías es una fuente importante en un BEV. El diseño de un paquete de baterías es un apartado importante en el desarrollo de un BEV y el cálculo de estas depende de varios factores de la dinámica del vehículo (máxima velocidad, peso del vehículo, aceleración, parámetros de regeneración, fuerza aerodinámica, fuerza de rodamiento) y que generalmente van combinados con las especificaciones del motor eléctrico [48].

Al seleccionar el motor, este va acompañado de un rango de distancia del vehículo que se desea recorrer, y este diseño es “el paquete de batería para un rango de ‘x’ km”.

La corriente eléctrica a el motor en la velocidad en la que se encuentra se define como:

$$AH = \frac{\text{Capacidad del motor (kW)}}{V} \quad (\text{ec. 5.47})$$

Definida la corriente consumida por el motor (AH), se considera la corriente de aceleración (AC). Esta corriente está directamente relacionada con la potencia del motor eléctrico y la capacidad de la batería. Al acelerar el motor consume más corriente y al desacelerar consume menos, así que en esta condición habrá alguna pérdida de corriente y tomamos esa pérdida como corriente de aceleración. Esta corriente es dentro de un rango de 5% – 30% dependiendo de si el vehículo circula en tráfico pesado o la velocidad del vehículo varía continuamente [48]. Algunos fabricantes de vehículos eléctricos diseñan los sistemas de propulsión para equilibrar la aceleración deseada con la eficiencia energética y la autonomía. Algunos vehículos eléctricos también ofrecen modos de conducción seleccionables, como el modo de conducción económica o el modo de conducción deportiva, que ajustan la respuesta de aceleración según las preferencias del conductor.

$$AC = AH(5 - 30)\% \quad (\text{ec. 5.48})$$

El siguiente dato es el factor de desplazamiento dado por:

$$\text{Factor de deslizamiento} = \frac{\text{Rango total (km)}}{\text{Velocidad total (km/hr)}} \quad (\text{ec. 5.49})$$

Se obtiene la potencia requerida mediante el voltaje de la batería (V) y la corriente de aceleración con la siguiente formula:

$$P = V * AC \quad (\text{ec. 5.50})$$

Una vez obtenida la potencia, se calcula la potencia total con la potencia requerida del motor y el factor de deslizamiento con la siguiente ecuación:

$$P_{tot} = P * \text{Factor de deslizamiento} \quad (\text{ec. 5.51})$$

Otro dato importante para tomar en cuenta es la eficiencia de la batería. Las baterías de iones de litio suelen tener una eficiencia de carga y descarga del 85%-93%. Finalmente, la capacidad requerida para el paquete de baterías (BP) se define como:

$$BP = \frac{P_{tot}}{\frac{C}{D} \text{ de la batería}} \quad (\text{ec. 5.52})$$

CAPITULO VI: METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

6.1 Introducción

En distintas investigaciones los autores utilizan el mismo patrón de modelo matemático para caracterizar vehículos en ambiente de simulación, ya sea para el determinar el consumo de energía de una batería, el estudio de la autonomía y el desempeño del vehículo, entre otros. Siendo vehículo híbrido uno de los más modelados y estudiados, ya sea para su versión de vehículo ligero de pasajeros o SUVs [12]. Para el caso de los vehículos eléctricos, en su versión de vehículo de pasajeros ha sido estudiado y modelado en sus componentes más básicos y tren de potencia estándar [47]. Por tal razón, la necesidad de estudiar y analizar vehículos de clase VI - VIII, el proyecto se enfoca en estudiar las investigaciones previas en esta dirección y desarrollar un modelo completo adaptado a camiones de carga pesada.

Para el desarrollo del modelo numérico, se sigue el siguiente diagrama (ver Figura 6.34):

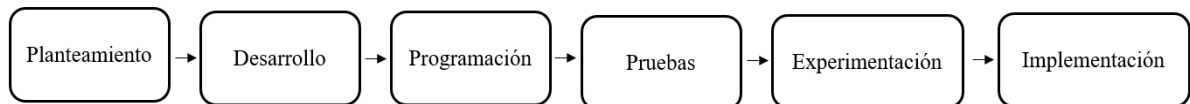


Figura 6.34: Diagrama para elaboración de modelo matemático computacional

La Figura 6.34 muestra el seguimiento para entender el problema a desarrollar, los datos que son necesarios conocer y la forma de desarrollo óptima para lograr los resultados. El capítulo I detalla el planteamiento, conociendo el problema a detalle y los resultados que se esperan. El capítulo II y III siendo el marco teórico, muestra las diferentes opciones del mercado respecto a motores, trenes de potencia, configuraciones de trenes de potencia, ciclos de conducción, y tipos de tracción. Con esta información se empieza el desarrollo del programa y los apartados a modelar mediante las fórmulas matemáticas (ver Figura 6.35).

Las ecuaciones matemáticas que han sido estudiadas en los capítulos anteriores se integrarán en el modelo a desarrollar para de esta manera obtener una caracterización de los vehículos clase VI-VIII. El diagrama de bloques de la Figura 6.35, muestra el flujo del modelo matemático, en el cual se especifican los sistemas que intervienen en el mismo con sus parámetros de entrada y salida:

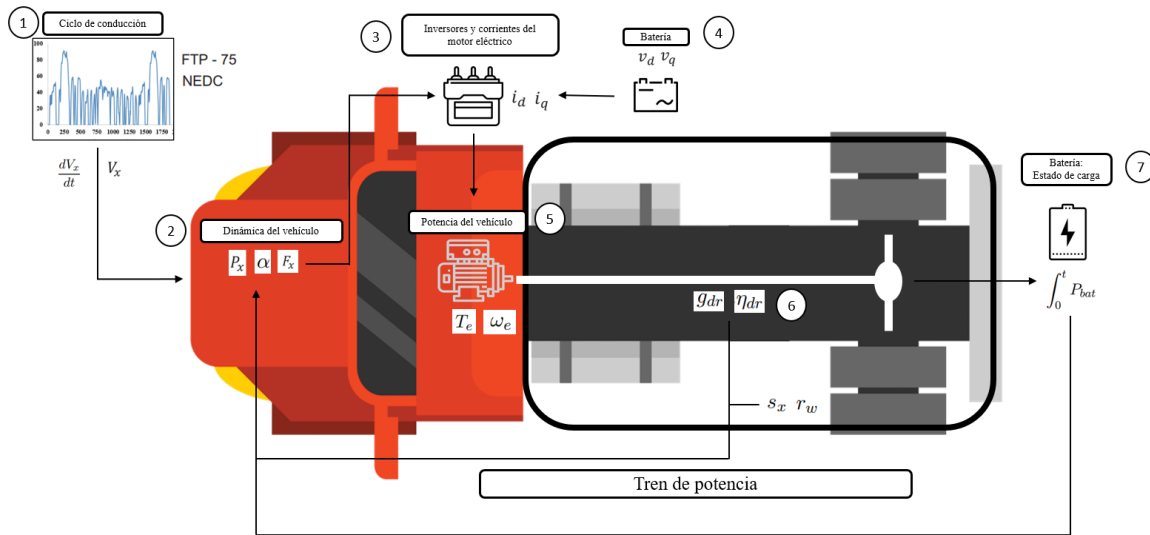


Figura 6.35: Diagrama de bloques de la configuración de tren de potencia tracción trasera de un BEV clase VII

Después se realiza la programación mediante Python, creando la interfaz de usuario, agregando las librerías para su funcionamiento, y añadiendo los apartados necesarios para obtener los resultados mediante gráficas y una segunda ventana donde se visualicen esos resultados.

Una vez realizado el código después de la programación, se realizan las pruebas mediante la validación de resultados comprobando operaciones y con resultados de otros autores. Una vez validado se empiezan los casos de estudio con los vehículos propuestos y se hacen los análisis de resultados.

Por último, es la implementación, donde se puede aplicar el programa con cualquier vehículo, distintos parámetros y se puede hacer experimentación para analizar los resultados.

6.2 Creación de los primeros códigos en Python®

Antes de empezar con el desarrollo del código del proyecto, lo primero que se hace es importar todas las librerías que se utilizaran de inicio. Estas librerías son los paquetes necesarios para que el programa Python® lea e inicie el código sin conflictos en el lenguaje de programación. Otras librerías serán integradas al modelo conforme se vaya avanzando en el desarrollo del programa. Los parámetros que son fijos para el actual modelo también deben ser declarados al inicio del programa tales como: el valor de la gravedad y la densidad del aire, entre otros. La figura 6.36, muestra el código que se desarrolló en Python® con la información arriba descrita.

```
1  from tkinter import *
2  from PIL import Image, ImageTk
3  import openpyxl
4  from openpyxl import load_workbook
5  from cmath import pi, sqrt
6  import math
7  from tkinter import messagebox, ttk
8  import matplotlib.pyplot as plt
9  import numpy as np
10 from itertools import cycle
11 import customtkinter
12 from customtkinter import CTk, CTkFrame, CTkEntry, CTkLabel, CTkButton, CTkCheckBox
13 from matplotlib.backends.backend_tkagg import FigureCanvasTkAgg
14 import pandas as pd
15
16 raiz=Tk()
17 raiz.title("Proyecto")
18 raiz.config(bg="White")
19
20
21 #----- Variables Fijas -----
22
23 g = 9.81      # Gravedad (m/s^2)
24 ad = 1.225    # Densidad del aire (kg/m^3)
25 cd = 0.3      # Coeficiente aerodinámico
26 ndr = 0.931   # Eficiencia de transmisión
27 sx = 0.08     # Deslizamiento
28 d = 0         # factor de masa
```

Figura 6.36: Declaración de las librerías de Python y parámetros fijos como primer paso en el modelado de caracterización de vehículo clase VI-VIII.

Los parámetros del motor eléctrico de un BEV clase VI-VIII son otros que deben ser declarados al inicio del programa dentro del código de Python®, para el caso

particular de este estudio son parámetros fijos (ver Tabla 7). Dichos parámetros son propuestos de la literatura, mediante investigaciones y comparaciones con los modelos de otros autores. Llegando a valores muy aproximados y estándares para algunas variables.

Tabla 7: Parámetros de motor PMSM empleado en el modelado de caracterización de vehículo clase VI - VIII

Datos	Variable	Valor
Número de polos	np	9
Back-emf const	B_{emf}	0.9841
Resistencia del estator	r_s	0.01405
Coeficiente de pérdidas por dispersión	C_{srt}	65×10^{-9}
Coeficiente de pérdida de hierro	C_{fe}	2.1
Inductancia en terminal del motor	L_d	0.00024
Inductancia en terminal del motor	L_q	0.00058
Flujo de imán permanente	γ_m	0.0984
Frecuencia de conmutación	T_{on}	0.998
Tiempo de recuperación inversa	T_b	0.00048
Tiempo de bajada	v_{on}	0.7

Los valores correspondientes a V_{on} (tiempo de bajada), t_b (tiempo de recuperación inversa), t_{on} (frecuencia de conmutación), r_s (resistencia del estator) son valores estándar de los transistores IGBT (por sus siglas en ingles Insulated Gate Bipolar Transistor) de los automóviles, siendo estos utilizados comúnmente como controladores de motores, inversores de frecuencia, fuentes de alimentación y otras aplicaciones de electrónica de potencia. Los valores L_d y L_q (valores de inductancia de las terminales del motor), γ_m (flujo de imán permanente), c_{fe} (coeficiente de pérdida de hierro), c_{srt} (coeficiente de pérdidas por dispersión) y el número de polos son valores sugeridos en [47]. En el cual fueron estudiados y evaluados diferentes tipos de motores, empleando instrumentos de medición como: dinamómetros, osciloscopios, multímetros, etc. Esto para medir directamente los valores de

inductancia, corrientes, flujos nominales, y voltajes sometiéndolo a diferentes velocidades (RPM) y a diferentes voltajes (V).

6.3 Desarrollo de ciclo de conducción

En este modelo se utilizan EPA FTP-75, y como segunda opción el NEDC (ver inciso 4.3) como los ciclos de conducción a poder evaluar dentro del modelo en Python. Como se mencionó anteriormente, el EPA FTP-75 es una estandarización para el tránsito urbano, y el NEDC es para ciclos en carreteras en los vehículos de clase VII, permitiendo así evaluar dos diferentes zonas de movilidad dentro del modelo. Para esto, se importan los datos del sitio oficial de la EPA a archivos de lectura de Excel Microsoft®, para obtener los datos en el programa Python como se muestra en el código de la Figura 6.37, dichos datos se encuentran en función de la velocidad en km/h y el tiempo en s [43]:

```
def dcselection():  
    if varOpciones.get()==1:  
        book = openpyxl.load_workbook('D:\David\Python\Tesis\FTP75.xlsx')  
        sheet = book.active  
        velocidades = sheet['B2' : 'B1876']  
        return velocidades  
  
    else:  
        book = openpyxl.load_workbook('D:\\David\\Python\\Tesis\\NE.xlsx')  
        sheet = book.active  
        velocidades = sheet['B2' : 'B1876']  
        return velocidades
```

Figura 6.37: Código Python para la lectura de los valores de ciclos de conducción EPA FT-75 y NEDC en términos de su velocidad (km/s) y tiempo (s).

Mediante este párrafo de código, lo que se hace es obtener la ubicación del archivo Excel en donde están guardados los datos del ciclo de conducción, y se van leyendo las filas y columnas seleccionadas, devolviendo mediante la función “velocidades” dichos valores.

6.4 Declaración de la dinámica del vehículo en Python®

De acuerdo con el diagrama de bloques de la Figura 6.35, la siguiente parte del modelo corresponde al es el apartado de la dinámica del vehículo. Es importante que el lector de este trabajo de tesis revise la información del inciso 5.2 en donde se han detallado las fórmulas de la dinámica de vehículos que se van a considerar dentro de este apartado. Para poder obtener la aceleración y la velocidad, se leen los datos fila por fila del apartado previamente descrito del ciclo de conducción (ver Figura 6.38).

```
if time >= 0 and time <= 1855:
    for i in range(time):
        for vel in lista_velocidades[i]: # Velocidad (km/hr)
            for acceleration in lista_velocidades[i-1]:
                a = -(acceleration-vel)/3.6 # Aceleración (m/s^2)

                #----- Flujo de potencia mecánica -----

                inertial = gw*a
                grav = gw*g*math.sin(srad)
                roll = fr*g*gw*math.cos(srad)
                aero = (0.5*ad*cd*fa*((vel/3.6)**2))

                fx = inertial+grav+roll+aero
                px = fx*vel/(3.6*1000)
```

Figura 6.38: Código de dinámica de vehículo en el modelado de caracterización de vehículo clase VI-VIII.

Una vez obtenida la aceleración, el código de la Figura 6.38 describe los cálculos correspondientes para obtener las fuerzas de inercia (ver ec. 5.1), gravitacional (ver ec. 5.1), de rodamiento (ver ec. 5.1) y aerodinámica (ver ec. 5.1). Una vez obteniendo estos cálculos, se pueden obtener la fuerza de tracción (F_x ver ec. 5.2) y la potencia del vehículo (P_x ver ec. 5.2).

6.5 Potencia del vehículo y tren de potencia en Python®

Para el siguiente apartado, se entra en la zona de flujo de energía eléctrica, donde se calcula la potencia del eje del motor (P_e ver ec. 5.7) utilizando la potencia del vehículo (P_x ver ec. 5.2), la eficiencia de la cadena cinemática o de transmisión (n_{dr}), y la velocidad de deslizamiento (s_x). El otro dato importante es la velocidad angular del motor (W_e) donde se utiliza la relación de transmisión (g_{dr}), la velocidad del vehículo, el radio de las llantas (r_w) y la velocidad de deslizamiento (Ver Figura 6.39).

```
#----- Flujo de potencia eléctrica -----  
  
pe = px/(ndr*(1-sx))  
we = (gdr*(vel*1000/3600))/((rw*(1-sx)))  
  
if we == 0:  
    te = 0  
else:  
    te = pe/we*1000      # Torque  
  
ms = we*60/(2*pi)      # Velocidad del motor RPM
```

Figura 6.39: Código Python para obtener el torque (Nm) y velocidad (RPM) en el modelado de caracterización de vehículo clase VI-VIII.

Una vez teniendo tanto la potencia del motor (ver ec. 5.7) como la velocidad angular del motor (ver ec. 5.8) se obtiene el torque relacionado al motor y las ruedas del propio vehículo (ver ec. 5.9). Otra característica que se puede obtener es el valor de la velocidad del motor en RPM (variable “*ms*”), siendo un dato útil en la visualización gráfica de los resultados.

6.6 Corrientes, inversores y motor eléctrico en Python®

Para el apartado eléctrico dentro del diagrama de bloques propuesto, se obtienen las corrientes y voltajes que interactúan con el motor. Por lo general, los comandos de torque y velocidad se transmiten desde la unidad de control del vehículo (VCU) al inversor. Como menciona el autor Kwang Hee Nam, el torque depende tanto de i_d^* como de i_q^* en IPMSMs [47]. Se debe seleccionar un comando de corriente óptimo, (i_d^*, i_q^*) , para cada par y velocidad, (T_e, ω_r) para maximizar la eficiencia. Mencionado en el apartado de dinámica del vehículo (ver inciso 5.2). En la Figura 6.40 se muestra el código de Python para obtener i_d^* e i_q^* (ver ec. 5.36 – 5.37):

```
#----- Cálculo de corrientes -----

beta = cfe*we2**gamma1
ldbета = 2*ld*beta

aa = (ld*(b1**3)*ldbета)+(2*r1*(b1**3))
bb = ldbета*(3*ld*a1*b1**2+bemf*b1**3)+6*r1*a1*b1**2
cc = ldbета*(3*ld*a1**2*b1+3*bemf*a1*b1**2)+(6*r1*a1**2*b1)
dd = ldbета*(a1**3*ld+3*bemf*a1**2*b1)+(2*r1*a1**3)
ee = ldbета*bemf*a1**3-2*b1*r1*te**2-2*b1*beta*(lq*teabs)**2

am = bb/aa
bm = cc/aa
cm = dd/aa
dm = ee/aa

alpha = (3*am*cm-12*dm-bm**2)/3
beta = (-2*bm**3+9*am*bm*cm+72*bm*dm-27*cm**2-27*am**2*dm)/27

root1 = (bm/3)+(-beta/2+sqrt((beta**2)/4+(alpha**3)/27))**(1/3)
root2 = (((-beta/2)-sqrt((beta**2)/4+(alpha**3)/27))**(1/3))-2

gamma2 = root1+root2
eta = sqrt(((am**2)/4)-bm+gamma2.real)
muneg = sqrt(3*am**2/4-eta**2-2*bm-(4*am*bm-8*cm-am**3)/4/eta)

iid = (-am/4)-(eta.real/2)-(muneg.real/2)
iiq = (4*teabs)/(3*polenum*(bemf+(ld-lq)*iid))

vd = (rs*iid)-(we2*lq*iiq)
vq = (rs*iiq)+(we2*ld*iid)+(we2*ym)
```

Figura 6.40: Código Python para el cálculo de corrientes del motor eléctrico en el modelado de caracterización de vehículo clase VI-VIII.

Una vez obtenidos los valores de las corrientes i_d^* e i_q^* , se pueden obtener otros valores como v_d y v_q (ver ec. 5.38 – 5.39), siendo los valores del voltaje en las terminales del motor. Una vez obtenidos estos datos se hacen los cálculos para

obtener la pérdida de energía del motor y del inversor (ver ec. 5.45) (ver Figura 6.41).

```
#----- Potencia -----

pcu = (3/2)*rs*(iid**2+iiq**2)/1000
pfe = cfe*we2**1.2*((ld*iid+ym)**2+(lq*iiq)**2)/1000
pstr = csrt*we2**2*(iid**2+iiq**2)/1000
pinv = (2*6*(1/2)*vdc*sqrt(iid**2+iiq**2)*(2/pi)*(0.09+0.16)
        *10**(-6)*8000/1000)+(6*von*(2/pi)*sqrt(iid**2+iiq**2)*ton/1000)

#----- Pontencia batería -----

pbat = ((3/2)*(vd*iid+vq*iiq)/1000)+pcu+pfe+pstr+pinv.real
```

Figura 6.41: Código Python para el cálculo de pérdidas en el motor en el modelado de caracterización de vehículo clase VI-VIII.

En esta parte se obtienen los valores de pérdida de cobre (P_{cu} ver ec. 5.42), pérdida de hierro (P_{fe} ver ec. 5.43), pérdida del inversor (P_{inv} ver ec. 5.45) y pérdidas por desviación (P_{str} ver ec. 5.44) para poder determinar el valor de la potencia requerida hacia y desde la batería mediante la ecuación 5.46:

$$P_{bat} = \frac{3}{2}(v_d i_d^e + v_q i_q^e) + \underbrace{P_{cu} + P_{fe} + P_{str}}_{=P_{motor}} + P_{inv} \quad (\text{ec.})$$

Estas son pérdidas de un transformador que son debidas a la resistencia en los circuitos magnéticos y eléctricos del transformador, producidas por efecto Joule en un conductor cuando circula una determinada corriente eléctrica, transformándose en energía térmica [49].

6.7 Cálculo de baterías eléctricas en Python®

Con estos datos la energía total requerida en la batería para completar un ciclo de conducción se puede obtener de acuerdo con el código Python en la Figura 6.42.

```

potbat+=pbat
if time == 0:
    pot2 = pbat
else:
    pot2 = pbat-pot2
pot3+=pot2 #Valor a utilizar para modelo de bateria

TotBat = pot3/3600 #Total de batería en kWh

```

$$E_{DC} = \int_0^t P_{bat} dt.$$

Figura 6.42: Código Python para calcular el total de la energía en la batería en el modelado de caracterización de vehículo clase VI-VIII.

$$E_{DC} = \int_0^t P_{bat} dt \quad (\text{ec. 6.1})$$

La ecuación 6.1 es la relación de la energía acumulada con la cantidad total de energía proporcionada o absorbida por el dispositivo a través del tiempo. Esta ecuación es utilizada mediante la ecuación 5.46 para calcular la potencia proporcionada o absorbida en el motor.

Para el cálculo del paquete de baterías, se define el código Python tal como se ve en la Figura 6.43. Sendo éste otro punto importante en los cálculos de la batería, para esto se utilizan los valores de la batería, los valores del motor, el promedio de velocidad y la distancia total (Estos éstos últimos dos puntos se toman de referencia de los ciclos de conducción en km/s y km respectivamente. Además de poder elegir la eficiencia de carga y descarga de la batería y la corriente de aceleración (ésta depende de la conducción que se realice, ya sea en tráfico pesado, que es cuando la velocidad varía o es constante) tal como se mencionó en el apartado 5.4.

```
#----- Cálculos para paquete de batería -----

Ah = mpm/vdc
tf = tr/ts
ac = Ah*((caa/100)+1)
ps = vdc*ac
pt = tf*ps
totp = pt/1000

BPCr = totp/(CDe/100) # Capacidad del paquete de baterías requerido para el vehículo
```

Figura 6.43: Código Python para el cálculo del paquete de baterías en el modelado de caracterización de vehículo clase VI-VIII.

Una vez calculada la capacidad del paquete de baterías que se requiere para el vehículo, se puede obtener la cantidad de ciclos de conducción aproximados que puede hacer el vehículo hasta que la carga de la batería se agote (ver Figura 6.44).

```
#----- Calcular cantidad de ciclos de conducción --

cdcc = BPCr/TotBat
cpcc = pkwh*cdcc

batterycapacity.set(round(BPCr,2))
cciclos.set(round(cdcc))
preciociclo.set(round(cpcc,2))
```

Figura 6.44: Código Python para calcular la cantidad de ciclos de conducción en el modelado de caracterización de vehículo clase VI-VIII.

En este cálculo se utilizan los valores de potencia total de la batería durante el ciclo de conducción y la capacidad del paquete de baterías requerido para el vehículo. Por último, se agrega el apartado para calcular los precios por ciclo de conducción, utilizando así el precio por kWh y la cantidad de ciclos de conducción, obteniendo el precio por la cantidad de ciclos que la batería del vehículo soporta antes de volver a recargarse.

6.8 Desarrollo de interfaz en Python®

Mediante Python® y la librería de Tkinter, se diseña la interfaz que ayuda al usuario a seleccionar de manera rápida el tipo de ciclo de conducción a elegir, introducir los parámetros de vehículo como: el peso del vehículo, el ángulo de la carretera, el radio de las llantas, etc. Además de los datos correspondientes a la batería como lo son: el voltaje de la batería, la potencia máxima del motor, la eficiencia en la carga y descarga, etc. A continuación, se muestra la interfaz del modelo de caracterización de vehículo clase VI-VIII (ver Figura 6.45):

Modelo Matematico

Seleccione el ciclo de conducción:

☐ FTP-75

☐ NEDC

Datos del vehículo

Peso al vacío (kg)	Cantidad de pasajeros	Ángulo de la carretera	Resistencia al rodamiento
Peso del pasajero (kg)	Radio de la llanta (m)	Relación de transmisión	Área frontal (m ²)

Datos de la batería

Potencia máxima del motor (watts)	Corriente de aceleración (5% - 30%)	Precio del kWh en USD
Promedio de velocidad (km/hr)	Eficiencia de carga / descarga (85% - 93%)	Voltaje de batería

Figura 6.45: Interfaz del modelo numérico en Python®

La primera ventana muestra una interfaz sencilla donde se elige el ciclo de conducción, se introducen los datos del vehículo, y los datos de la propia batería que se requiere analizar dentro del modelo desarrollado en este trabajo de tesis. Dentro de esta primera interfaz a la que tendrá acceso el usuario se han dispuesto

dos opciones: el primero correspondiente a un botón que borra la información de los cuadros de texto y un segundo botón que permite enviar la orden al código en Python® de iniciar el proceso de cálculo, solución y visualización de los resultados.

La ventana principal muestra 3 grupos donde cada uno aborda información importante para hacer los cálculos. El primer grupo es el del ciclo de conducción, en donde el usuario puede elegir entre los dos ciclos de conducción que son propuestos en la tesis. El segundo grupo muestra los datos del vehículo, siendo estos datos de entrada, en donde se ingresan los valores del propio vehículo como su peso, radio de la llanta, cantidad de pasajeros, el ángulo de la carretera, la relación de transmisión del vehículo, resistencia al rodamiento y área frontal del vehículo. El tercer grupo son los datos de la batería y del motor eléctrico, en donde se ingresa el voltaje de la batería, corriente de aceleración y desaceleración, la potencia máxima del motor, el precio por un kWh en usd, y la eficiencia de carga y descarga de la batería. También se muestran dos botones, uno para hacer los cálculos y otro para borrar los datos de la primera ventana y las gráficas.



Figura 6.46: Ventana de resultados en Python®

En la figura 6.46 se muestra la segunda ventana que aparece del programa, después de presionar el botón de calcular. Esta interfaz muestra los resultados relevantes del caso de estudio como el precio total por ciclo de conducción, la cantidad de ciclos de conducción que puede recorrer el vehículo con los datos

ingresados, y la capacidad requerida que necesitan los paquetes de batería del vehículo. Se muestra un botón para ver las gráficas con los resultados para su análisis como torque, potencia, estado de carga de la batería, velocidad, y aceleración.

6.9 Validación de modelo

En esta sección se compara el modelo desarrollado en esta tesis con los resultados de los modelos de otros autores para comprobación y validación de resultados. Para este análisis de comprobación se evalúa con el artículo “Sensitivity Analysis of Electric Energy Consumption in Battery Electric Vehicles with Different Electric Motors” del autor Mavlonov J., et. al. [A.4] cuyo objetivo fue evaluar diferentes motores de BEV en ambientes controlados mediante una simulación de MATLAB y así obtener los resultados de consumo de energía mediante un ciclo de conducción UDDS. Para fines de validación del modelo matemático que se está proponiendo en este trabajo de tesis, se utiliza el vehículo propuesto por el autor Mavlonov en el modelo desarrollado en esta tesis y cuyos valores se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 8: Parámetros mecánicos y datos del vehículo BMW i3 [A.4.]

Datos	Variable	Valor	Unidad
Peso bruto	GW	1443.3	Kg
Área Frontal	fa	2.38	m ²
Radio Llanta (150/60 R20)	rw	0.33	m
Transmisión		4x2	
Relación de transmisión	gdr	9.71	
Resistencia a la rodadura	fr	0.013	
Coefficiente de resistencia	cd	0.3	
Eficiencia de la transmisión	ndr	0.931	
Deslizamiento	Sx	0.08	
Grado de la carretera	i	0	
Batería	V	355.2	Volts
Coefficiente aerodinámico	cd	0.3	

Densidad del aire (20° C)	r	1.225	Kg/m ³
---------------------------	-----	-------	-------------------

Se introducen los valores de la tabla 8 en el modelo desarrollado tal como se muestra en la Figura 6.47. Para este caso de verificación, se adapta el ciclo de conducción UDDS, siendo este el utilizado por el autor en su investigación y el cual se replica en este modelo para obtener resultados comparables.

Modelo Matematico

Seleccione el ciclo de conducción:

☐ FTP-75

☒ UDDS

Datos del vehículo

Peso al vacío (kg)	Cantidad de pasajeros	Ángulo de la carretera	Resistencia al rodamiento
1443.3	1	0	0.013
Peso del pasajero (kg)	Radio de la llanta (m)	Relación de transmisión	Área frontal (m²)
75	0.33	9.71	2.38

Datos de la batería

Potencia máxima del motor (watts)	Corriente de aceleración (5% - 30%)	Precio del kWh en USD
125000	30	0.73
Promedio de velocidad (km/hr)	Eficiencia de carga / descarga (85% - 93%)	Voltaje de batería
34.12	91.8	355.2

Calcular

Borrar

Figura 6.47: Parámetros mecánicos y datos del vehículo BMW i3 [A.4.]

Una vez introducidos los valores, se hacen los cálculos correspondientes para obtener las gráficas de comparación. La Figura 6.48 muestra el estado de carga de la batería del BMW 3i de la referencia anterior [A.4], en donde su eficiencia de inicio propuesta fue del 91.8% y que muestra un descenso hasta 86.7%.

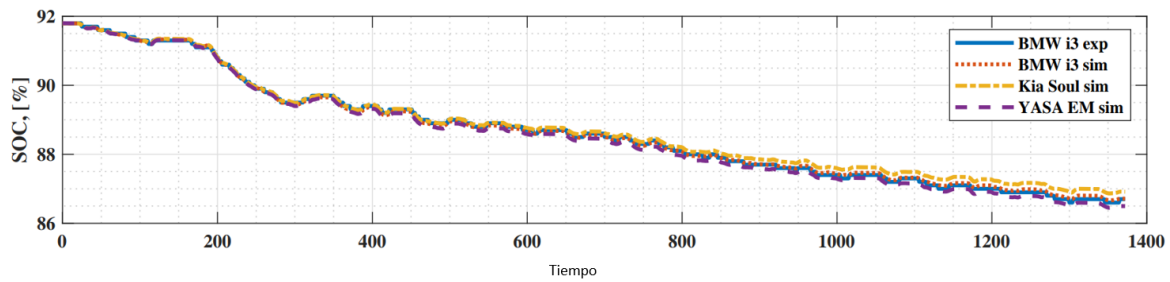


Figura 6.48: Estado de carga de BMW i3 [A.4.]

En la Figura 6.49 se muestra la gráfica obtenida por el modelo matemático y en el cual se observa una similitud en cuanto a la forma y descenso de la batería durante el ciclo de conducción, iniciando en 91.8% como se propuso y teniendo un descenso hasta aproximadamente 86.5% después de los 1000 s del ciclo de conducción.

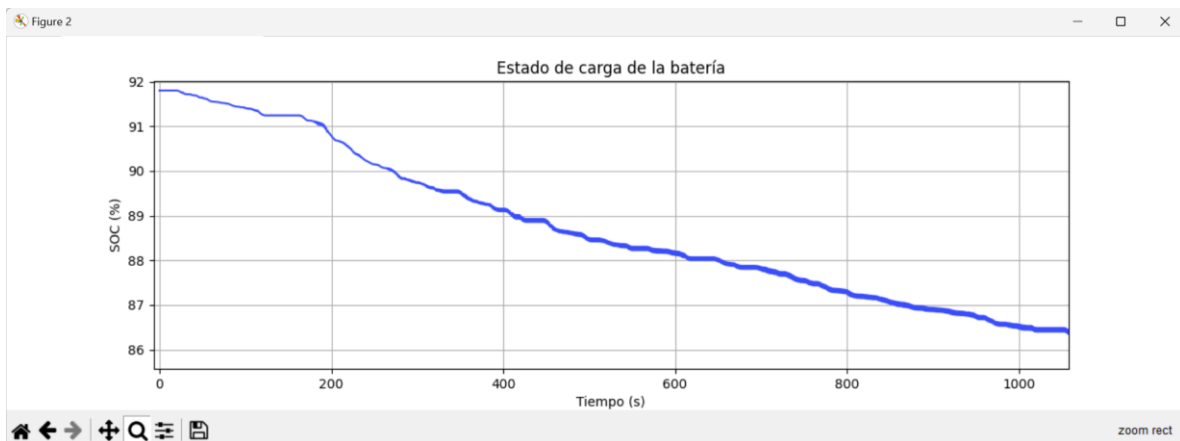


Figura 6.49: Resultados obtenidos por modelo matemático computacional

La Figura 6.50 muestra los resultados de torque del vehículo BMW 3i del autor durante el tiempo del ciclo de conducción, mostrando valores en un rango entre -100 Nm y 100 Nm durante un tiempo de 1400 s. Además, se muestra una constante entre aproximadamente -25 y 25 Nm en los segundos 800 y 950 aproximadamente.

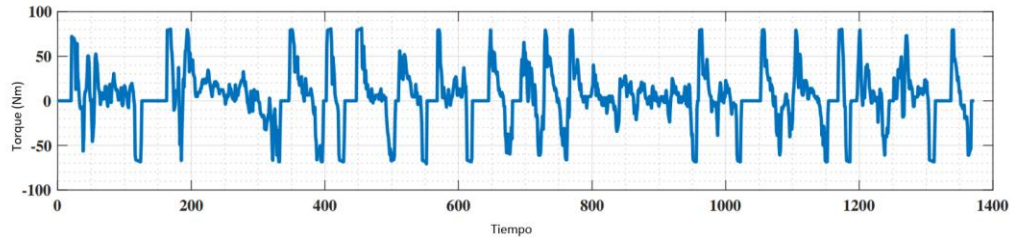


Figura 6.50: Torque de BMW i3 [A.4.]

La Figura 6.51 muestra los resultados de torque obtenidos por el modelo matemático durante el ciclo de conducción UDDS. En esta gráfica se muestra una similitud en cuanto a los rangos de torque, siendo también entre -100 Nm y 100 Nm y se logra visualizar también el rango constante en los segundos 800 y 950, mostrando también un torque entre -25 y 25 Nm.

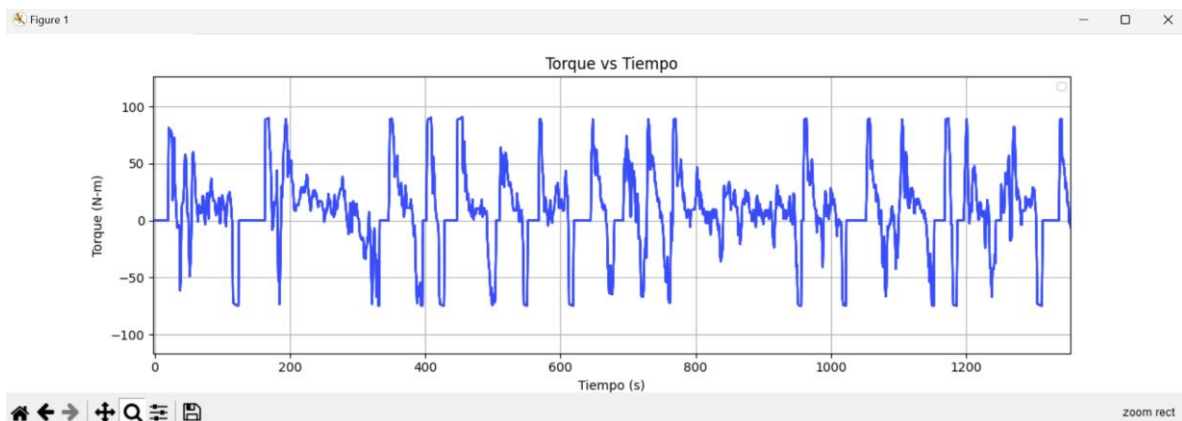


Figura 6.51: Resultado de Torque por modelo matemático computacional

Para este apartado de validación se utilizaron la mayor parte de los datos compartidos por el autor para poder introducir en el modelo desarrollado en esta Tesis. Sin embargo, para la comparación de los resultados se debe considerar el software utilizado por el Autor (MATLAB) y el software de esta Tesis (Python), que además de ser distintos programas, la estructura, desarrollo y parámetros de la forma de calcular los valores y las variables que busca el autor son distintos, es por esto que los resultados a pesar de ser aproximados demuestran validez para esta Tesis logrando similitudes en las gráficas y un porcentaje de error mínimo.

CAPITULO VII: RESULTADOS Y DISCUSION

7.1 Introducción

Para este proyecto se evalúa el caso de estudio de un BEV de trabajo medio encuentra dentro de la clase VI – VIII, según la clasificación de vehículos que se mencionó en el capítulo II. Para el cual se han encontrado información de arquitectura de tren de potencia, así, como de especificaciones mecánicas del propio vehículo, como; el peso, área frontal, radio de llanta, entre otros.

El casos de estudio corresponde al vehículo Peterbilt Model 220 EV clase VII, el cual cuenta con un tren de potencia convencional (ver Figura 2.3), 4x2 de tracción trasera (ver Figura 4.1).

La tracción trasera se considera beneficiosa en términos de rendimiento, especialmente en vehículos con alta potencia y torque. Proporciona una mejor distribución del peso y una mayor capacidad de tracción en situaciones donde se requiere un mayor control, como al acelerar desde una posición en reposo o al enfrentar terrenos irregulares.

Otro factor importante, es que la tracción trasera permite un diseño más eficiente del tren de potencia y un aprovechamiento óptimo del espacio disponible en el vehículo. Al ubicar el motor y otros componentes principales en la parte trasera, se logra una mejor distribución del peso y una mayor capacidad para acomodar las baterías, lo que contribuye al equilibrio del vehículo y a una mayor autonomía.

Es importante mencionar que si bien, en este trabajo de tesis se seleccionó el modelado y estudio sobre el tren de potencia convencional con tracción trasera, en las recomendaciones a futuro sobre investigaciones en esta misma dirección se recomienda modificar estos parámetros mediante ajustes en las fórmulas y el código

del programa. De esta manera, los usuarios podrían realizar una selección del tipo de tren de potencia a modelar y cualquiera de los tipos de tracción sea trasera, delantera o incluso tracción en las cuatro ruedas, según las necesidades específicas del vehículo.

Los datos como la resistencia al rodamiento, la eficiencia de la transmisión, y de deslizamiento, fueron propuestos de acuerdo con los trabajos de Park [13] y Saurabh [A.3.], donde se especifica mediante tablas, los valores para ciertas condiciones de carretera (p.e. el factor de resistencia a la rodadura, cuando el vehículo es conducido en carretera, terreno con arena, nieve, entre otras). Sin embargo, estos valores se pueden proponer en base a los rangos de cada factor [50]; en esta tesis se toma el valor para las carreteras siendo éste de 0.010. El valor de deslizamiento se considera estándar, con un valor de 0.8 en la mayor parte de los casos (ver Tabla 9).

Tabla 9: Parámetros dinámicos en el en el modelado de caracterización de vehículo clase VI-VIII.

Datos	Variable	Valor
Eficiencia de transmisión	η_{dr}	0.931
Deslizamiento	S_x	0.8
Resistencia al rodamiento	f_r	0.010

7.2 Características y datos de vehículo

Para el BEV de clase VII el Peterbilt Modelo 220 EV, la Tabla 10 muestra los parámetros mecánicos y datos del vehículo que son requeridas dentro del modelo.

Tabla 10: Parámetros mecánicos y datos del vehículo Peterbilt Modelo 220 EV [20]

Datos	Variable	Valor	Unidad
Peso bruto	GW	14968.548	Kg
Área Frontal	fa	3.10134	m ²
Radio Llanta (Bridgestone 11R - 19.5")	r_w	0.4953	m
Transmisión		4x2	
Potencia del motor		350	kW
Relación de transmisión	g_{dr}	6.5	
Resistencia a la rodadura	f_r	0.010	
Coeficiente de resistencia	cd	0.3	
Eficiencia de la transmisión	n_{dr}	0.931	
Deslizamiento	S_x	0.08	
Grado de la carretera	i	0	
Almacenamiento de la batería		282	kWh
Batería	V	618	Volts
Coeficiente aerodinámico	cd	0.3	
Densidad del aire (20° C)	r	1.225	Kg/m ³

Los parámetros mecánicos y datos de la Tabla 10 fueron obtenidos en la página oficial de Peterbilt [20] dentro de la hoja de especificaciones. Estos parámetros se introducen en la interfaz del modelo como se muestra en la Figura 7.52.

Proyecto

Modelo Matematico

Seleccione el ciclo de conducción:

☐ FTP-75

☒ NEDC

Datos del vehículo

Peso al vacío (kg) 14968.548	Cantidad de pasajeros 1	Ángulo de la carretera 0	Resistencia al rodamiento 0.010
Peso del pasajero (kg) 75	Radio de la llanta (m) 0.4953	Relación de transmisión 6.5	Área frontal (m^2) 3.10134

Datos de la batería

Potencia máxima del motor (watts) 350000	Corriente de aceleración (5% - 30%) 30	Precio del kWh en USD 0.73
Promedio de velocidad (km/hr) 32.14	Eficiencia de carga / descarga (85% - 93%) 90	Voltaje de batería 618

Calcular

Borrar

Figura 7.52: Datos del caso de estudio 1 del vehículo Peterbilt Modelo 220 EV.

Después se presiona el botón de “Calcular” en la interfaz de la Figura 7.52, para que el código de Python realice los cálculos y muestre los resultados como: el costo en dólares por ciclo de conducción, el rendimiento y autonomía en número de ciclos de conducción (ver Figura 7.53).



Figura 7.53: Resultados obtenidos para el caso de estudio 1 del vehículo Peterbilt Modelo 220 EV

Una vez obtenidos los resultados, podemos observar que el valor de paquete de baterías calculado por el modelo numérico es de 278.42 kWh, siendo aproximadamente cercano al valor de 282 kWh de la tabla de especificaciones del vehículo Peterbilt [20]. Con un porcentaje de diferencia entre resultados de aproximadamente 1.27%. Otro resultado obtenido para este caso de estudio es el total de la batería con un valor de 22.27 kWh, siendo un valor aproximado a la cantidad de energía que el vehículo requiere para poder completar el ciclo de conducción de acuerdo con [20]. Siendo doce el número de ciclos de conducción EPA FTP-75 que el vehículo puede recorrer antes de la siguiente recarga de energía.

7.3 Resultados y discusión de: Torque, potencia y estado de carga de la batería

Se puede observar en la figura 7.54, los resultados de la gráfica de torque (Nm) contra el tiempo (s) del motor aplicado en el ciclo de conducción. La gráfica muestra curvas con valores máximos de aproximadamente 2000 Nm positivos y aproximadamente de 1800 Nm negativos. En la gráfica se pueden visualizar valores de torque que están dentro del rango de los 600 Nm a los -500 Nm en ciertos periodos de tiempo, siendo uno de estos entre los segundos 750 y 900s, si se

visualiza este periodo dentro del ciclo de conducción EPA FTP-75 se puede identificar una zona constante de velocidad dentro del mismo.

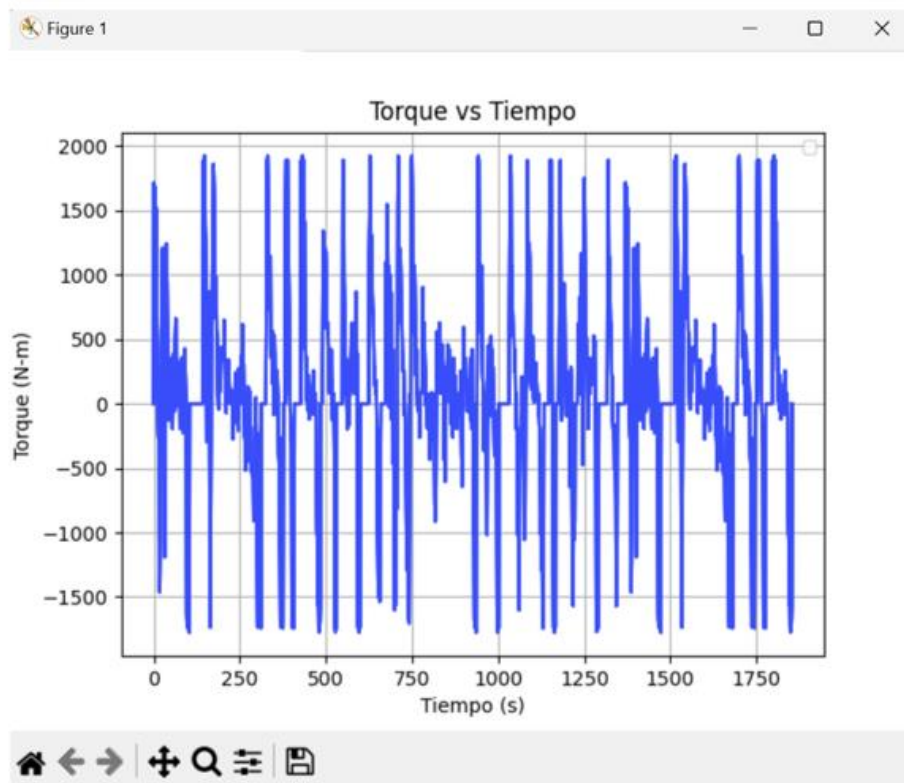


Figura 7.54: Resultados del torque vs tiempo de un BEV Peterbilt 220

Estos valores (ver Figura 7.54) muestran el torque que requiere el vehículo para moverse en determinado tiempo del ciclo de conducción. Los valores negativos en el torque se deben a los periodos de deceleración durante el ciclo de conducción, esto debido a factores como semáforos, cruces peatonales, imprevistos tanto de clima como de accidentes, etc. mismos factores que son mencionados en el apartado 4.2. Para comprender el análisis, el torque es el objetivo principal de los motores eléctricos. Los atributos deseados del motor son una alta densidad de torque y linealidad frente a la magnitud de la corriente. Sin embargo, los motores en la práctica incluyen muchos atributos no ideales, como armónicos de corriente, armónicos de campo, saturación del núcleo, etc. El resultado son ondulaciones de torque, torque de arrastre, ruido y vibraciones [47].

La figura 7.55 muestra la potencia requerida por la batería durante cada punto del ciclo de conducción de los BEV estudiados. El pico más alto se visualiza en el segundo 170, donde se muestra un valor de 500 kW y el punto mínimo se encuentra en el segundo 910 con un valor de 25 kW. En promedio, el vehículo tiene un valor en el rango de los 200 – 350 kW.

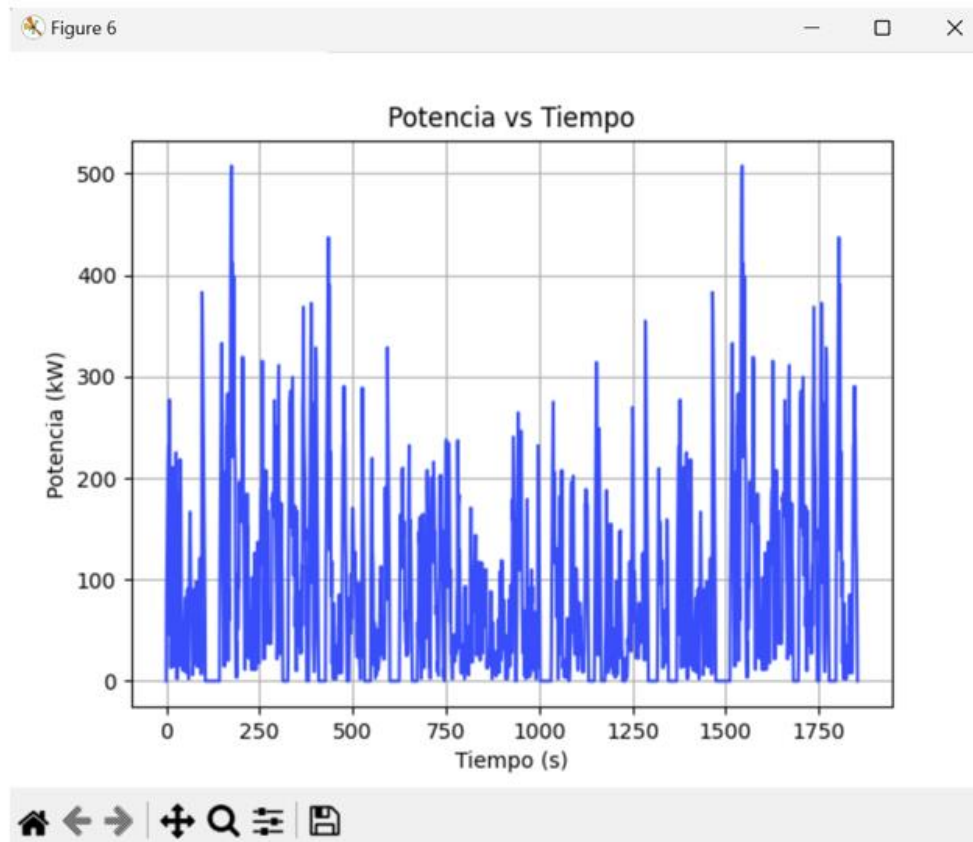


Figura 7.55: Resultados del potencia vs tiempo de un BEV Peterbilt 220

Durante los periodos de deceleración, puede generarse potencia negativa. Si el vehículo está bajando una pendiente, la rueda genera continuamente potencia negativa. Sin embargo, toda la potencia negativa no se puede recuperar en la batería. Si la batería está completamente cargada, la batería no puede recibir la potencia de frenado.

Otra razón para no recuperar la potencia es que el freno mecánico es más fiable que el frenado eléctrico. Por término medio, en los BEV se recupera un 20 ~ 30%

de la potencia negativa [47]. En la gráfica de la figura 7.55 no se aprecia la potencia negativa debido a que se visualiza la potencia requerida por el vehículo en cada punto del ciclo de conducción.

Otra gráfica que se puede visualizar es la correspondiente a la velocidad (RPM) contra tiempo (s) (ver Figura 7.56), en donde se puede observar en la figura 7.56 el valor pico es 3400 RPM, siendo este un valor típico en los motores PMSM para vehículos clase VII, tal como el motor de la marca Dana, siendo este el motor TM4 SUMO HD, en el cual en su tabla de especificaciones nos muestra un valor pico de 3400 RPM y una potencia máxima de 370 kW [51], con lo que al comparar con los resultados obtenidos, son aproximadamente iguales a los de la marca. Se observa una constante en la velocidad en un rango entre 1400 – 2200 RPM.

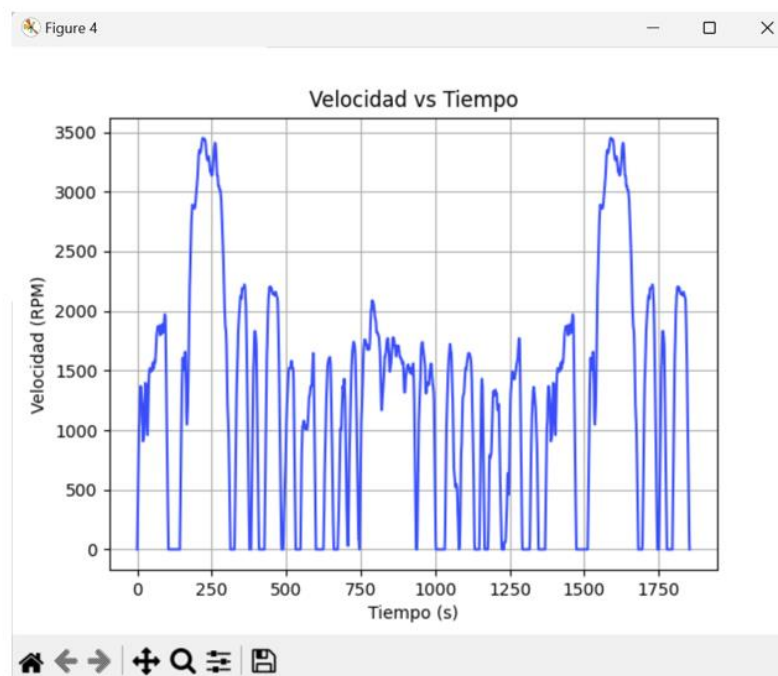


Figura 56: Resultados del velocidad RPM vs tiempo de un BEV Peterbilt 220

Estos valores muestran la velocidad RPM a la que opera este motor en cada segundo del ciclo de conducción. Los valores pico muestran el rango máximo al que opera el motor PMSM en el ciclo de conducción, generalmente relacionado a la velocidad a la que va el vehículo, siendo entre 70 - 90 km/hr.

Una gráfica importante que se muestra es el estado de carga de la batería (ver Figura 7.57) durante el ciclo de conducción. Inicialmente en el segundo 0 se encuentra la batería al 80% y conforme se va recorriendo el ciclo va bajando la carga de esta y a su vez, con el aprovechamiento de la energía en los momentos donde el vehículo se encuentra inmóvil, vuelve a subir el valor de la carga. Para el final del ciclo de conducción, la batería tiene un estado de aproximadamente 57%.

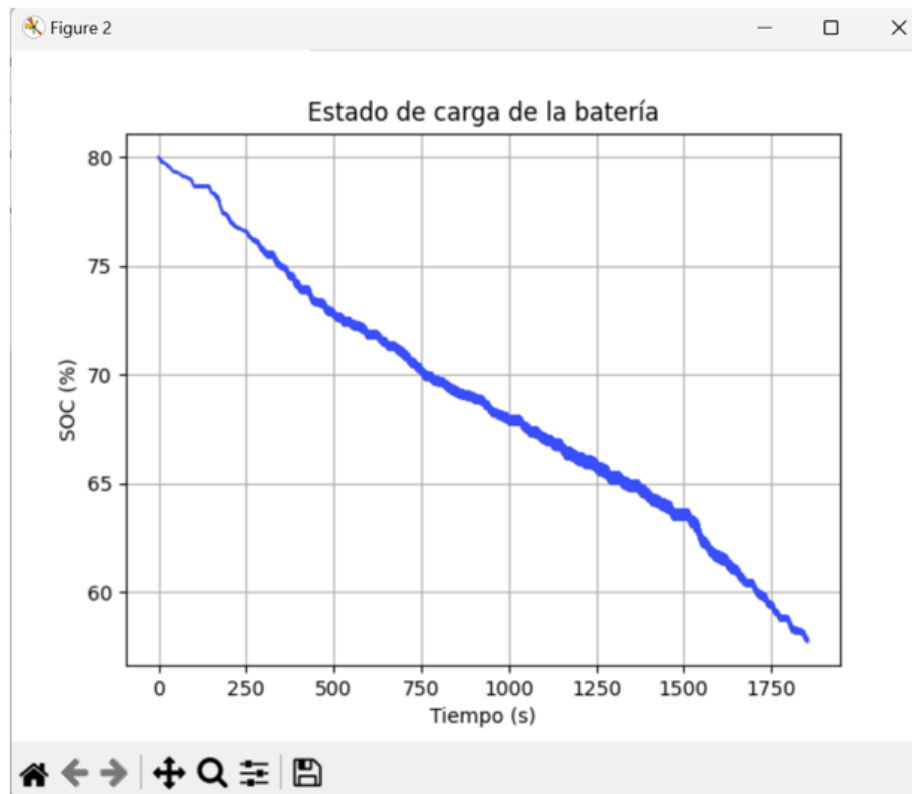


Figura 7.57: Resultados del estado de carga de un BEV Peterbilt 220

Ninguna batería es 100% eficiente, ya que la energía se pierde en el almacenamiento, la carga y la descarga. Su eficiencia es una medida de la pérdida de energía en todo ciclo de carga/descarga. Es por esto que el modelo muestra un inicio del 80%. Las baterías de iones de litio se pueden descargar hasta alrededor del 80% de su capacidad nominal sin que ello afecte significativamente a su vida útil [52].

En la figura 7.58 se muestran subidas y bajadas en el porcentaje del estado de carga de la batería. En los segundos 1310 – 1320 con valores entre 65% y 65.5. Se puede observar una diferencia considerable en la cantidad de subidas y bajadas en el porcentaje.

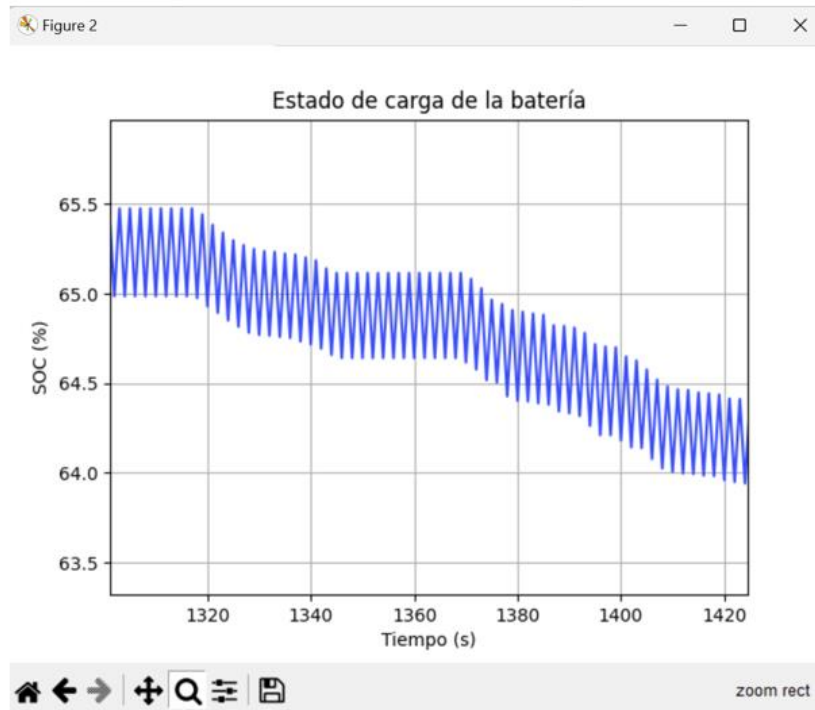


Figura 7.58: Resultados del estado de carga (1310s – 1400s) de un BEV Peterbilt 220

El estado de carga es una medida relativa de la cantidad de energía almacenada en una batería, definida como la relación entre la cantidad de carga extraíble de la celda en un momento específico del tiempo y la capacidad total. Estimar con precisión el estado de carga es importante, porque los sistemas de gestión de baterías utilizan la estimación del estado de carga para informar al usuario sobre la capacidad de uso esperada hasta la siguiente recarga, mantener la batería dentro del umbral de funcionamiento seguro, implementar estrategias de control y, a largo plazo, prolongar la vida de la batería [53].

Normalmente, estos observadores (ver Figura 7.58) incluyen un modelo de batería no lineal, que utiliza la corriente y la tensión medidas en la celda como

entradas, así como un algoritmo recursivo que calcula los estados internos del sistema, incluido el estado de carga. Para esto se pueden utilizar filtros de Kalman para encontrar esas estimaciones del estado de carga de la batería.

El filtro de Kalman es un método que permite estimar variables de estado no observables a partir de variables observables que pueden contener algún error de medición [54].

En la figura 7.59, se muestra el torque a ciertas revoluciones del propio vehículo durante el ciclo de conducción. Se puede observar una concentración entre las 1000 y 2000 RPM con valores de torque entre -450 y 600 Nm. Hay otra concentración de puntos de operación dispersos entre 2700 y 3400 RPM.

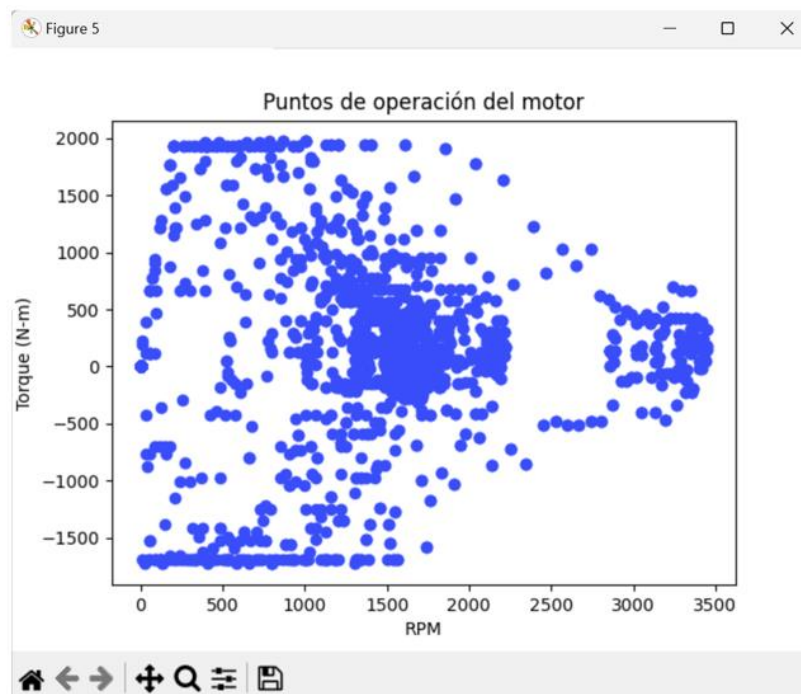


Figura 7.59: Resultados de los puntos de operación del motor de un BEV Peterbilt 220

Estos resultados muestran la forma en la que opera el motor al determinar el torque necesario a ciertas RPM, confirmando un principio en los motores, donde a menor magnitud en RPM, mayor será el torque entregado, y a su vez, a mayor magnitud en RPM, menor será el torque [55]. La Figura 7.59 muestra los puntos en donde

opera el motor a ciertas RPM de forma detallada, mismo método que han utilizado otros autores (ver anexos resultados de otros autores) para conocer más la operación de estos motores y la distribución de la energía durante el ciclo de conducción (ver Figura 7.60).

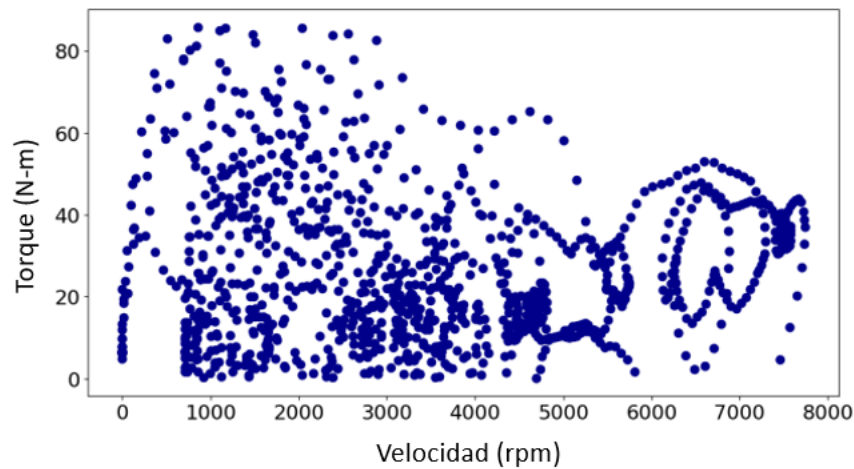


Figura 7.60: Perfil de torque del vehículo para un rango de velocidad WLPT – Adaptado de [56]

Con esta gráfica se muestra la región de eficiencia más frecuente en un ciclo de conducción. Estos resultados pueden ser importantes para la selección de los motores en función de su aplicación.

7.4 Caso de estudio 2: Experimentación en características y datos de vehículo

Una ventaja de este modelo numérico es la opción de intercambiar entre ciclos de conducción, además de cambiar valores en los datos de la batería y datos dinámicos del vehículo. Para este caso de estudio, se van a modificar los siguientes parámetros como se muestra en la figura 7.61.

Se introducen los valores del vehículo del modelo 220 EV de Peterbilt, se selecciona el ciclo de conducción NEDC y se modifican los parámetros del ángulo de la carretera al subir 10° simulando una pendiente. A los datos de la batería, se modifica

la eficiencia de carga/descarga de la batería seleccionando un 88%, una potencia máxima del motor de 300 kW y se sube el valor del voltaje a 650 V.

The screenshot shows a web application window titled 'Proyecto' with a 'Modelo Matematico' section. It includes a driving cycle selector, vehicle data fields, battery data fields, and calculation buttons.

Seleccione el ciclo de conducción:

- ☐ FTP-75
- ☒ NEDC

Datos del vehículo

Peso al vacío (kg)	Cantidad de pasajeros	Ángulo de la carretera	Resistencia al rodamiento
14968.548	1	10	0.010

Peso del pasajero (kg)	Radio de la llanta (m)	Relación de transmisión	Área frontal (m ²)
75	0.4963	6.5	3.10134

Datos de la batería

Potencia máxima del motor (watts)	Corriente de aceleración (5% - 30%)	Precio del kWh en USD
300000	20	0.73

Promedio de velocidad (km/hr)	Eficiencia de carga / descarga (85% - 93%)	Voltaje de batería
25	88	650

Botones: Calcular Borrar

Figura 7.61: Datos del caso de estudio 3 introducidos en el programa

Se agregan se agregaron los valores propuestos en el modelo y se oprime el boton calcular para ver los resultados correspondientes (ver Figura 7.62).



Figura 7.62: Resultados obtenidos del caso de estudio 3

Los resultados muestran una capacidad de paquete de baterías de 180 kWh, en el que, al completar un ciclo de conducción, la potencia total requerida por el vehículo es de 68.98 kWh, dando un estimado de 3 ciclos de conducción.

Los cambios propuestos provocan un cambio drástico en el sistema como puede observarse en gráfica de torque vs tiempo (ver Figura 7.63).

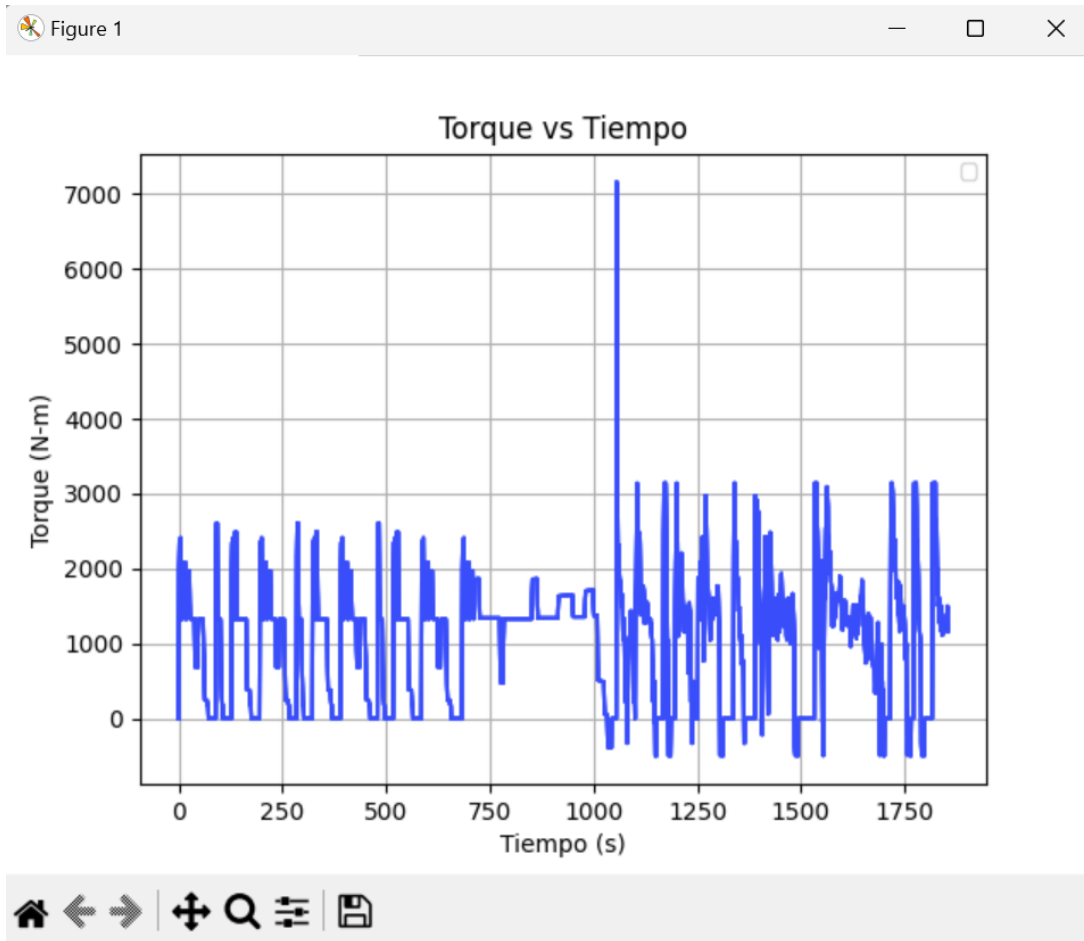


Figura 7.63: Gráfica Torque vs tiempo del modelo 220 EV de Peterbilt con ciclo de conducción NEDC

En esta gráfica se observa que el rango del torque requerido por vehículo en este ciclo es entre 3000 Nm y -550 Nm, siendo valores constantes en casi todo el ciclo a excepción de los 1100 segundos, donde a partir de ese tiempo, el vehículo entra en un constante incremento de torque. Al inicio de la simulación se agregaron 10° a la pendiente, por lo que ese parámetro influye para que el motor trabaje más entregando más torque para poder subir el vehículo por la pendiente. Este facto de la pendiente puede explicar el sobre esfuerzo en el motor al requerir 7000 Nm de torque en el segundo 1080.

Otra gráfica importante para analizar es el estado de carga/descarga de la batería (ver Figura 7.64):

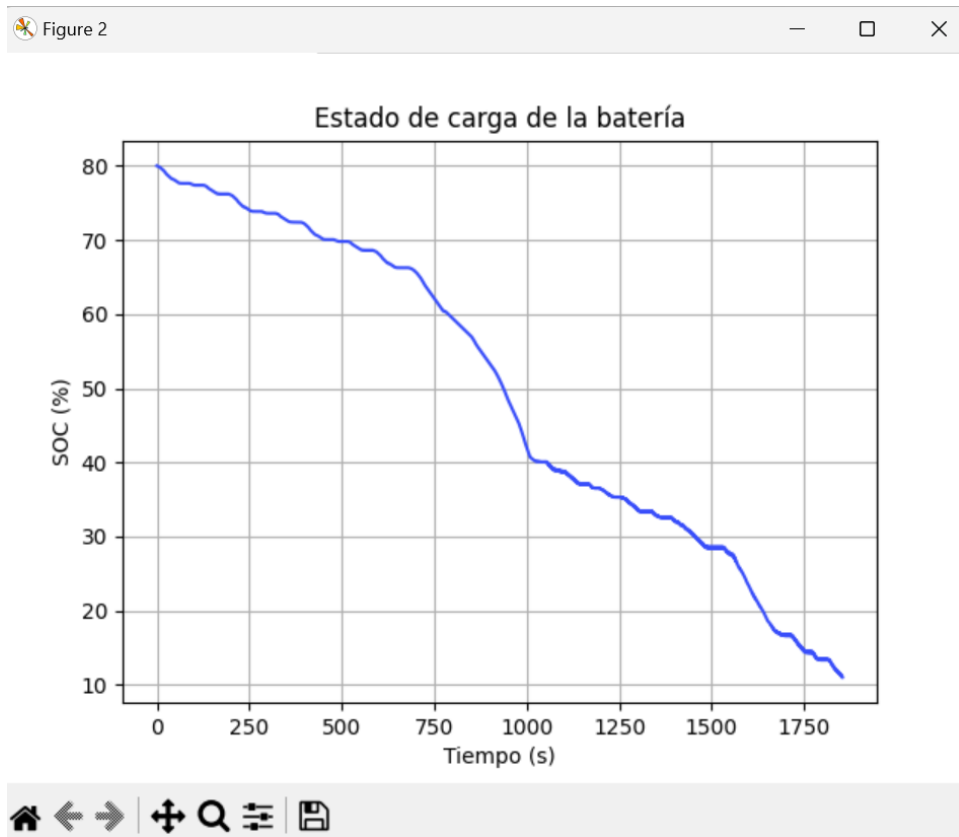


Figura 7.64: Gráfica de estado de carga/descarga de batería del modelo 220 EV de Peterbilt con ciclo de conducción NEDC

El estado de carga de la figura 7.64, muestra un consumo de energía conforme transcurre el ciclo de conducción, iniciando con 80% y terminando el ciclo con aproximadamente 12% de la carga. Esto se debe a los factores modificados en el programa, ya sea el ciclo de conducción o el esfuerzo por parte del vehículo al subir la pendiente.

Como se vio en la figura 7.64 con el torque, la modificación de los datos influye en el comportamiento el vehículo, mostrando un mayor esfuerzo y trabajo. La figura 7.65 muestra los puntos de operación del motor del tercer caso de estudio donde se visualiza una concentración entre 1000 y 2200 RPM, para valores de torque entre 500 y 2300 Nm. Otro aspecto que destacar es el torque constante a partir de los 2800 RPM hasta los 4800 RPM, siendo el torque constante entre 1700 y 1900 Nm,

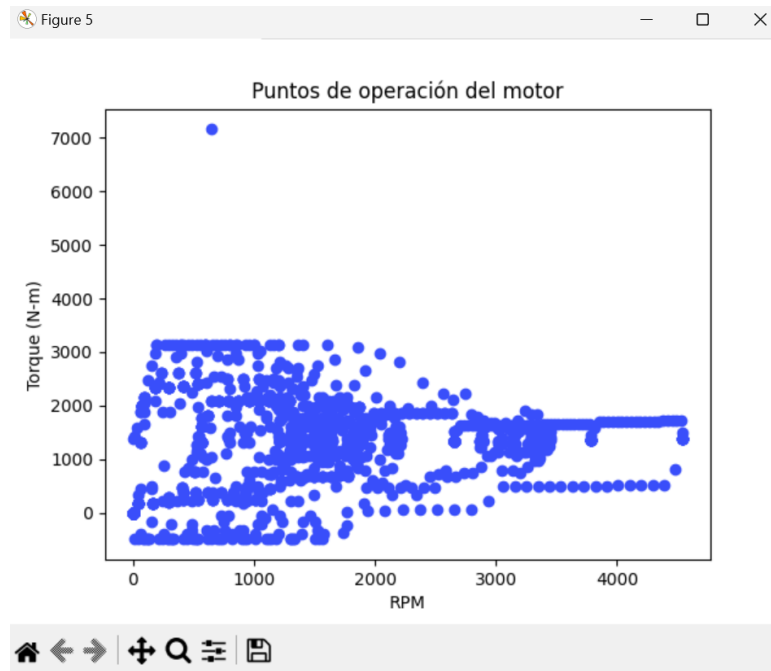


Figura 7.65: Resultados de los puntos de operación del tercer caso de estudio

CAPITULO VIII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A lo largo de este estudio, se han abordado aspectos fundamentales de los BEV destacando la importancia de su innovación y los retos que conlleva actualmente. Es por esto que el diseño y elaboración del modelo numérico a través del lenguaje de programación como Python, es capaz de obtener la cantidad aproximada de ciclos de conducción necesarios para un vehículo clase VII, además de la capacidad requerida de un paquete baterías para este tipo de vehículos. Durante todo el proyecto se investigaron diversas fuentes donde la mayor parte de la información era para vehículos pequeños o de uso personal, por lo que el reto principal de este proyecto de tesis fue la adaptación de la información para aplicarse a vehículos comerciales clase VI – VIII.

Este proyecto, muestra un avance significativo que brinda resultados tal cual se planteó en los objetivos al inicio de esta tesis. En el análisis de los resultados se puede concluir que, si bien es una aproximación a los datos reales de los fabricantes de vehículos, el modelo cuenta con una base sólida para la continuación en su desarrollo. Los resultados mostrados nos dan información detallada de cómo se comporta el vehículo al ir modificando, aunque sean detalles mínimos como lo pueden ser las propias llantas del vehículo, ángulo de la carretera, potencia máxima del motor o el voltaje propuesto en la batería. Las gráficas mostradas de torque y velocidad en RPM del vehículo, nos muestra el cómo interactúa el motor para poder recorrer el ciclo de conducción seleccionado y además el análisis de cada una de las gráficas, nos da un panorama sobre lo que está ocurriendo en el vehículo al someterse a simulaciones. Las gráficas obtenidas llegan a ser muy similares a las mostradas por algunos de los autores citados en esta tesis.

Este proyecto de tesis puede continuar su desarrollo en el futuro, pudiendo implementar nuevas ideas dependiendo del nuevo enfoque que se le quiera dar y

en base a las necesidades del proyecto al que se aplica. Algunas recomendaciones que se pueden implementar en este programa son:

- Flexibilidad del modelo: Agregar funciones adaptables a diferentes configuraciones de tren de potencia de BEV y cambios en los componentes del sistema, apartados para poder seleccionar el tipo de batería dependiendo de su química, el tipo de tracción del vehículo.
- Optimización automatizada: Agregar algoritmos o aplicar machine Learning para ajustar los parámetros del sistema y obtener el mejor rendimiento posibles.
- Simulación en tiempo real: Interacciones durante la simulación como cambios en la carga de la batería durante la conducción y modificaciones en el vehículo como su velocidad, aceleración, tiempos de frenado, etc.
- Frenado regenerativo: Utilizar el frenado regenerativo para cargar las celdas de baterías del vehículo y el análisis del rendimiento del vehículo con esta nueva función.

REFERENCIAS

- [1] Cunanan, C. (04/2021). A Review of Heavy-Duty Vehicle Powertrain Technologies: Diesel Engine Vehicles, Battery Electric Vehicles, and Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicles
- [2] United Nations Climate Change. (s.f.). The Paris Agreement. What is the Paris Agreement? Recuperado de: https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement?gclid=Cj0KCQjwmN2iBhCrARIsAG_G2i4RKfdZHL8pZzRZtd8V39t4Bqa6ZEI9dDnpk7jVVwVL5Ih-i1M_wwAaAnhoEALw_wcB
- [3] United Nations Climate Change. (s.f.). ¿Qué es el protocolo de Kyoto? Recuperado de: https://unfccc.int/es/kyoto_protocol
- [4] CIE Automotive. (s.f.). Global Compact. Recuperado de: <https://cieautomotive.com/en/global-compact>
- [5] Infobae. (12/2022). El cambio climático es responsable de las intensas nevadas históricas en EEUU. Recuperado de: <https://www.infobae.com/america/ciencia-america/2022/12/27/el-cambio-climatico-es-responsable-de-las-intensas-nevadas-historicas-en-eeuu/>
- [6] The New York times. (02/2023). Guerra en Ucrania: 6 Consecuencias que ha traído en el mundo. Recuperado de: <https://www.nytimes.com/es/2023/02/28/espanol/guerra-ucrania-impacto.html>
- [7] Stafford M., Shepherd D., Mahony S. (04/2021). E-Mobility. [Video]. Disponible en: <https://www.mainforum.org/2021-ed-content>
- [8] EV Hub. (04/2022). Medium and Heavy-duty Vehicle Electrification. Recuperado de: <https://www.atlasevhub.com/materials/medium-and-heavy-duty-vehicle-electrification/>
- [9] Grupo SPRI. (11/2022). Nuevo informe sobre la electrificación de vehículos pesados. Recuperado de: <https://www.spri.eus/es/internacionalizacion-comunicacion/nuevo-informe-sobre-la-electrificacion-de-vehiculos-pesados/>
- [10] Duangsrikaew, B. (06/2019). Battery Sizing for Electric Vehicles Based on Real Driving Patterns in Thailand. World Electric Vehicle Journal. Recuperado de: <https://www.mdpi.com/2032-6653/10/2/43>

[22] McKinsey & Company. (05/2021). Electromobility's impact on powertrain machinery. Recuperado de:

<https://www.mckinsey.com/~/media/mckinsey/industries/automotive%20and%20assembly/our%20insights/electromobilitys%20impact%20on%20powertrain%20machinery/electromobilitys-impact-on-powertrain-machinery-vf.pdf>

[23] U.S. Department of Energy. (s.f.). How Do Diesel Vehicles Work? Recuperado de: <https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-diesel-cars-work>

[24] Ubícalo. (08/2020). ¿Cuáles son las ventajas y desventajas de los motores Diesel? Recuperado de: <https://www.ubicalo.com.mx/blog/ventajas-y-desventajas-del-motor-diesel/>

[25] Kavak. (05/2021). Autos eléctricos en México. Todas las ventajas y desventajas. Recuperado de: <https://www.kavak.com/blog/ventajas-y-desventajas-de-los-autos-electricos-en-mexico>

[26] Elasto Proxy. (03/2022). Vehículos ICE vs Vehículos Eléctricos. Recuperado de: <https://www.elastoproxy.com/ice-vehicles-vs-electric-vehicles/>

[27] Bosch. (s.f.). Electric Motors for Commercial Vehicles. Recuperado de: <https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/solutions/electric-motors/electric-motors-for-commercial-vehicles/>

[28] Miño Montaña Fernando. (s.f.) Análisis de moteres en vehículos eléctricos. Recuperado de:

[https://repositorio.uisek.edu.ec/bitstream/123456789/2164/1/Tesis%20\(Recuperado%203\).pdf](https://repositorio.uisek.edu.ec/bitstream/123456789/2164/1/Tesis%20(Recuperado%203).pdf)

[29] Autonocion. (07/2019). Motor asíncrono. Todo lo que debes saber. Recuperado de: <https://www.autonocion.com/motor-asincrono-funcionamiento/>

[30] Ramos Keybis, (2016). Análisis del mantenimiento preventivo en un motor eléctrico asíncrono por temperatura de trabajo. Universidad Tecnológica de Pereira. Tesis de grado. Recuperado de:

<https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/dacef5d4-997b-44a2-8691-d91c4dbd7b96/content>

[31] Tecnología e industria. (09/2021). Motor eléctrico: ¿Asíncrono o síncrono? ¿Delantero o trasero? Recuperado de:

<https://www.e-volt.es/motor-electrico-asincrono-o-sincrono-delantero-o-trasero/>

- [32] Motor 1. (10/2019). Todo sobre motores eléctricos. Recuperado de:
<https://ar.motor1.com/news/479393/todo-lo-que-siempre-quisiste-saber-sobre-motores-electricos-y-nunca-te-atreviste-a-preguntar/#:~:text=2.,hoy%20en%20la%20industria%20automotriz>.
- [33] Motor Blogs Mapfre. (06/2022). Motor asíncrono: ¿Qué es y cómo funciona?
Recuperado de: <https://www.motor.mapfre.es/coches/noticias-coches/motor-asincrono/>
- [34] Evolt. (09/2021). Motor eléctrico: ¿asíncrono o síncrono? ¿Delantero o trasero?
Recuperado de: <https://www.e-volt.es/motor-electrico-asincrono-o-sincrono-delantero-o-trasero/>
- [35] Automatismo industrial. (s.f.). Motores Síncronos. Recuperado de:
<https://automatismoindustrial.com/curso-carnet-instalador-baja-tension/motores/motores-sincronos/>
- [36] adslzone. (07/2021). ¿Como funcionan los motores eléctricos en vehículos? Recuperado de:
<https://www.adslzone.net/e-movilidad/tecnologia/funcionamiento-motores-electricos-coches/>
- [37] Lopez I., Ibarra E., Matallana A., Andreu J., Kortabarria I. (2019). Next generation electric drives for HEV/EV propulsion systems: Technology, trends and challenges.
Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032119305441>
- [38] Engineering Solutions. (s.f.). Permanent Magnet Synchronous Motor. Recuperado de:
<https://en.engineering-solutions.ru/motorcontrol/pmsm/>
- [39] Repsa. (09/2019). Tipos de tracción automotriz. Recuperado de:
<https://repsaautocentro.com/tipos-de-traccion/>
- [40] Jose Angel Rodrigo. (12/2007). Camiones y tractoras. Tipos de tracción y rodaje.
Recuperado de: http://www.centro-zaragoza.com:8080/web/sala_prensa/revista_tecnica/hemeroteca/articulos/R34_A5.pdf
- [41] Hurtado, G. A. (2014). Desarrollo de ciclos de conducción para el área metropolitana centro occidente – AMCO. Proyecto de grado, Universidad Tecnológica de Pereira (UTP). pp. 09.
<http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/6149/62925H967.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [42] Wikipedia. (s.f.). Driving Cycle. Recuperado de:

https://en.wikipedia.org/wiki/Driving_cycle#:~:text=The%20most%20common%20driving%20cycles,to%20design%20a%20driving%20cycle

[43] U.S. EPA. (10/2022). Dynamometer Drive Schedules. Recuperado de:

<https://www.epa.gov/vehicle-and-fuel-emissions-testing/dynamometer-drive-schedules>

[44] Economipedia. (05/2020). Cadena de Markov. Recuperado de:

<https://economipedia.com/definiciones/cadena-de-markov.html>

[45] Transport Policy. (s.f.). US: Light-Duty: FTP-75. Recuperado de:

<https://www.transportpolicy.net/standard/us-light-duty-ftp-75/>

[46] Policedriver. (10/2017). Defining Vehicle Dynamics. Recuperado de:

<https://policedriver.com/defining-vehicle-dynamics/#:~:text=The%20Society%20of%20Automotive%20Engineers,within%20the%20laws%20of%20physics.>

[47] Kwang Hee Nam. (2019). AC Motor Control and Electrical Vehicle Applications, Second Edition.

[48] Wheelsatev. (09/2020). Battery pack capacity calculation for EVs as per our required range. Recuperado de: <https://www.wheelsatev.com/2020/09/battery-pack-capacity-calculation-for.html>

[49] Schneider Electric. (05/2020). ¿Que son las pérdidas en el cobre y en el hierro en un transformador de distribución? Recuperado de:

<https://www.se.com/es/es/faqs/FA408451/>

[50] Chauhan S. (08/2015). Motor Torque Calculations For Electric Vehicle. Recuperado de: <https://www.ijstr.org/final-print/aug2015/Motor-Torque-Calculations-For-Electric-Vehicle.pdf>

[51] DANA. (s.f.). TM4 SUMO HD Motor / Inverter system. Recuperado de: [TM4-SUMO-HD Dana-TM4-accessories-web.pdf \(danatm4.com\)](https://www.dana.com/na/products/sumo-hd/tm4-accessories-web.pdf)

[52] Wind&sun. (s.f.). Battery lifetime, efficiency and care. Recuperado de:

<https://www.windandsun.co.uk/information/batteries/battery-lifetime,-efficiency-and-care.aspx>

[53] Mathworks. (s.f.). Estado de carga de una batería. Recuperado de:

<https://la.mathworks.com/solutions/electrification/battery-state-of-charge.html>

- [54] QuantDare. (03/2014). El filtro de Kalman. Recuperado de:
<https://quantdare.com/filtro-kalman/>
- [55] Karvi. (06/2022). ¿Cuál es la diferencia entre el torque y la potencia del motor?
Recuperado de: <https://www.karvi.com.ar/blog/cual-es-la-diferencia-entre-el-torque-y-la-potencia-del-motor/>
- [56] Pastellides, S. (02/2022). Evaluation of Drive Cycle-Based Traction Motor Design Strategies Using Gradient Optimisation. Recuperado de: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/3/1095>
- [57] International. (s.f.). International eMV Series. Recuperado de:
https://www.internationaltrucks.com/-/media/Project/International-Trucks/International-Trucks/USA/Models/eMV-Series/Brochures/eMV_SpecSheet.pdf

ANEXOS

A.1.- Benchmarking plataforma numérica o software para el desarrollo del modelado

Para la selección de la plataforma numérica o software para el desarrollo del modelado, se realizó un estudio de benchmarking con la finalidad de evaluar distintas características tales como el costo, accesibilidad al usuario, intuitividad, etc. tal como se muestra en la Tabla 7:

Tabla A.1: Comparación de softwares de simulación

Software de simulación	Accesibilidad de la interfaz	Librerías disponibles	Intuitividad	Costo
MATLAB	Interfaz intuitiva y fácil de usar.	Amplia variedad de librerías específicas para diferentes campos.	Intuitivo para cálculos numéricos y simulaciones.	Tienen un costo para licencias comerciales que van desde los 500 USD (MATLAB) – 1000 USD (MATLAB + Simulink) costo anual. Existen versiones estudiantiles y de prueba.
AMESim	Interfaz gráfica intuitiva y amigable.	Ofrece una gama completa de librerías para diferentes sistemas y dominios.	La interfaz visual facilita la creación y configuración de modelos.	AMESim es un software comercial, tiene un costo entre 500 - 1200 USD.
Python	Interfaz basada en código, pero con entornos de desarrollo integrados (IDE) amigables como Anaconda, PyCharm, VS Code etc.	Amplia colección de librerías científicas y de simulación, como NumPy, SciPy, SimPy, etc.	Requiere un conocimiento de programación, pero ofrece flexibilidad y personalización.	Python es de código abierto y gratuito.
Excel	Interfaz basada en hojas de cálculo, familiar y fácil de entender.	Si bien no está especializado en simulación, ofrece algunas funcionalidades y librerías adicionales para cálculos numéricos y optimización.	Interfaz intuitiva para usuarios familiarizados con Excel.	Excel es ampliamente utilizado y generalmente está disponible en la mayoría de los sistemas. El costo varía según la licencia.

De acuerdo a las características que han sido evaluadas la plataforma numérica que tiene las mejores características para el desarrollo de esta tesis es PythonÒ. Ya que es un software libre, es de fácil acceso a las personas que quieran desarrollar más en este proyecto sin necesidad de pagar por una licencia. Otra característica es que Python permite crear una interfaz para el usuario y pueda utilizarse como una aplicación donde a simple vista pueda visualizar los resultados de una forma más sencilla e intuitiva.

A.2.- Comparativas de tren de potencia para las diferentes tecnologías de tipos de vehículos (MCI, HEV, BEV)

Para poder comprender las investigaciones anteriores y ante la constante investigación y desarrollo que hay en el mundo de los vehículos eléctricos, se han desarrollado distintas tecnologías dentro de las configuraciones de tren de potencia, baterías, motores eléctricos y sus componentes se van adaptando de acuerdo con las necesidades del vehículo o la función que este va a desempeñar. Tales son los casos de los diferentes tipos de vehículos EV que muestran sus siguientes configuraciones (ver figura 49):

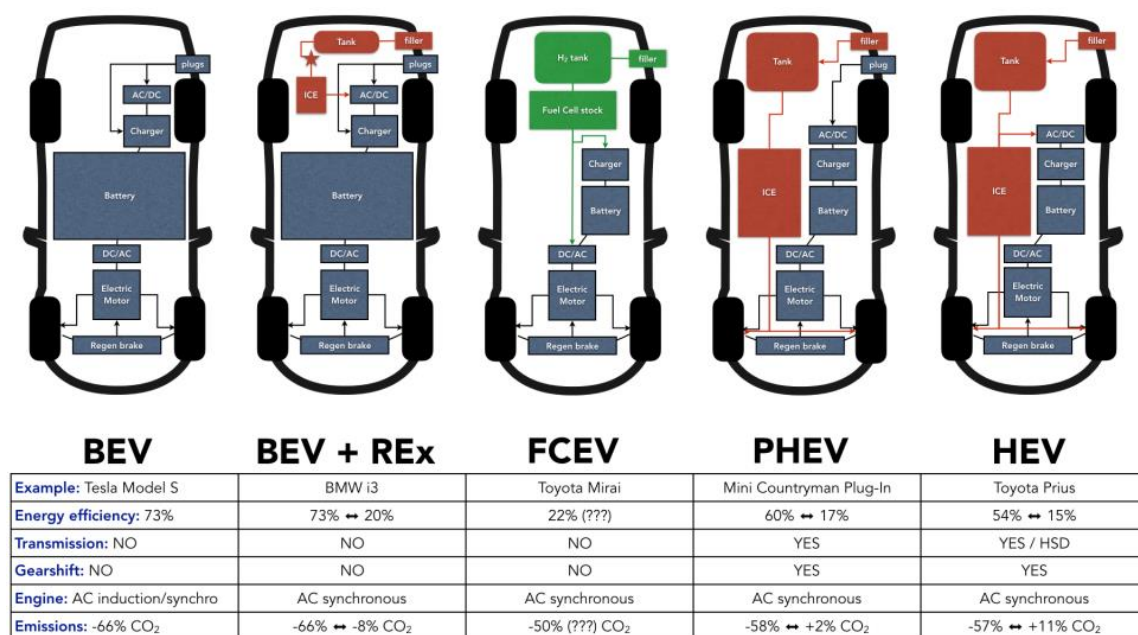


Figura A.66: Configuraciones del tren de potencia de distintas tecnologías de vehículos

- BEV (Vehículo Eléctrico de Batería)

En esta configuración, la energía eléctrica entra en el vehículo como corriente alterna (pasando por un convertidor AC/DC) o corriente continua, según el tipo de cargador que conecte: el cargador interno carga un gran (decenas o, pronto, cientos de kilovatios-hora). De aquí pasa por un inversor para alimentar el motor eléctrico, típicamente síncrono de CA o de inducción). Las ruedas también están conectadas a un generador para la recuperación de energía al frenar.

- BEV + REx (Vehículo Eléctrico de Batería + Extensor de Autonomía)

Este vehículo está diseñado exactamente igual que un BEV con la adición de un pequeño generador de gasolina para cargar la batería cuando sea necesario. Sin embargo, a diferencia de la configuración HEV, este generador no se enciende automáticamente y las capacidades del generador y del depósito adjunto son muy limitadas. Además, el generador no es capaz de mover las ruedas: su única función es cargar una batería agotada.

- FCEV (Fuel Cell Electric Vehicle)

Este vehículo sólo tiene un sistema de propulsión eléctrica, con la energía eléctrica procedente de la pila de combustible donde se oxida el hidrógeno; dicha energía puede alimentar directamente el motor eléctrico o la pequeña batería.

- PHEV (Plug-in Hybrid Electric Vehicle):

Esta configuración ha sustituido casi universalmente el esquema HEV del que deriva, sustituyendo su carga de batería interna por una carga basada en la red, normalmente sólo en CA.

- HEV (Hybrid Electric Vehicle)

En las configuraciones híbridas, el vehículo lleva tanto un sistema de combustión interna como uno de propulsión eléctrica: por razones de espacio y peso, este último utiliza una batería pequeña (unos pocos kWh); ambos son capaces de mover el coche, y la electrónica de control decide cuál interviene, siendo también posible una conducción mixta. En este tipo de ciclo cerrado, la batería se carga únicamente con el motor MCI o con la frenada regenerativa.

A.3.- Antecedentes

Los autores Tak R. et al., (2017) a través de su artículo *“Speed Control Schemes of Four Quadrant Operating PMSM Drive for Electric Vehicles Applications”* mencionan las características de los motores PMSM y su aplicación en vehículos eléctricos y se discuten las diferentes técnicas de control de velocidad para motores PMSM, incluyendo el control vectorial, el control directo de par y el control de modulación de ancho de pulso (PWM). Se discute la importancia de la estimación de la velocidad del motor para el control vectorial, y se presentan diferentes métodos para llevar a cabo esta estimación.

En la sección de control directo de par, se describe cómo se puede controlar directamente el par del motor PMSM utilizando el flujo de corriente del motor y la resistencia de la fase del motor.

En este artículo se menciona una de las fórmulas más importantes en cuanto a motores eléctricos, y que otros autores anteriormente citados como Gwangmin Park han utilizado, y que da una breve explicación de su funcionamiento y como es que calcula el torque mediante las corrientes es la expresión del torque electromagnético:

$$T_e = \frac{3P}{2} [\lambda_{af} + (L_d - L_q) I_{ds}^r] I_{qs}^r \quad (\text{ec. 53})$$

Esta fórmula está relacionada directamente a los motores síncronos de imanes permanentes y las corrientes de entrada en el sistema de referencia abc pueden transformarse en el sistema de referencia d_q.

Finalmente, en la sección de control PWM, se explica cómo se pueden controlar la velocidad y el par del motor PMSM utilizando técnicas de modulación de ancho de pulso. Se presentan diferentes métodos de modulación de ancho de pulso, incluyendo la modulación de ancho de pulso sinusoidal y la modulación de ancho de pulso espacio vectorial.

La autora Saurabh Chauhan (2015) a través de su artículo "*Motor Torque Calculations For Electric Vehicle*" se enfoca en las fórmulas y cálculos necesarios para determinar el par de motor requerido para un vehículo eléctrico y se discute la importancia de la eficiencia del motor en el cálculo del par.

La autora menciona cómo se pueden utilizar las ecuaciones de torque del motor para determinar la relación de transmisión necesaria para el sistema de transmisión del vehículo eléctrico a través de las siguientes formulas:

$$TTE = RR + GR + FA$$

$$TTE = \text{Total tractive effort} \quad \tau_{\max} = (\mu \times GVW \times f \times r_{\text{wheel}}) / 2 \quad (\text{ec. 54 y 55})$$

Un punto importante del artículo es que se mencionan los diferentes valores del coeficiente de la resistencia a la rodadura para distintos tipos de camino:

Tabla 11: Valores de coeficientes de la resistencia al rodamiento

Superficie de contacto	Crr
Concreto (Bueno/Justo/Pobre)	0.010/0.015/0.020
Asfalto (Bueno/Justo/Pobre)	0.012/0.017/0.022
Macadán (Bueno/Justo/Pobre)	0.015/0.022/0.037
Nieve (2 in / 4 in)	0.025/0.037

Suciedad (Suave/arena)	0.025/0.037
Barro (Firme/Medio/Suave)	0.037/0.090/0.150
Hierba (Firme/Suave)	0.055/0.075
Arena (Firme/Suave/Duna)	0.060/0.150/0.300

A.4.- Resultados de otros autores

Los autores Pastellides S. et. al. mediante su artículo "Evaluation of Drive Cycle-Based Traction Motor Design Strategies Using Gradient Optimization" se centraron en la evaluación y optimización de diferentes estrategias de diseño de motores de tracción. Estas estrategias fueron orientadas a cumplir los requisitos de torque y potencia establecidos por los ciclos de conducción utilizados.

En ellas muestran los resultados de torque, velocidad y tiempo durante el ciclo de conducción WLTP. Sus resultados son relevantes para este proyecto de tesis ya que permite comparar resultados y obtener un mejor panorama en cuanto al comportamiento del vehículo.

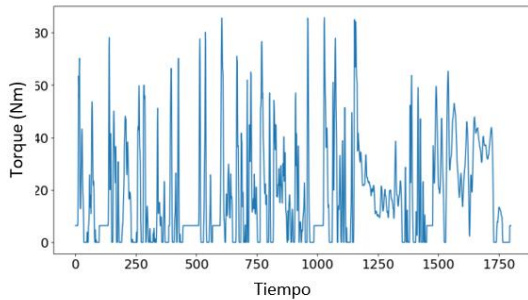


Figura 1: Torque del motor en el ciclo WLTP

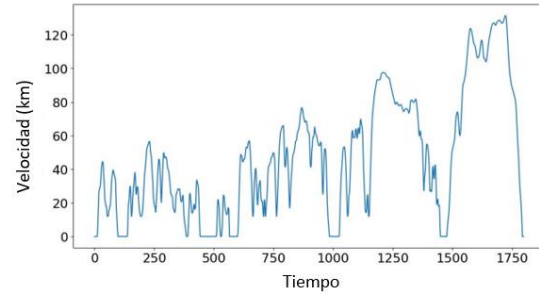


Figura 2: Velocidad del motor en el ciclo WLTP

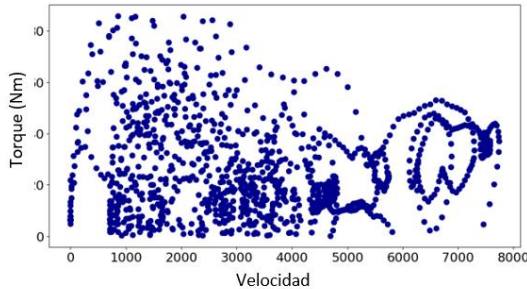


Figura 3: Torque del vehículo en el ciclo WLTP

Figura A.67: Resultados de torque, velocidad durante ciclo de conducción WLTP

Otro artículo de interés es el de los autores Mavlonov J. et.al. en el cual mediante su artículo “Sensitivity Analysis of Electric Energy Consumption in Battery Electric Vehicles with Different Electric Motors” analizaron el consumo de un vehículo eléctrico y evaluaron los principales factores de influencia. El análisis bibliográfico revela que el tamaño del motor eléctrico, su eficiencia y las condiciones de conducción influyen considerablemente en la energía eléctrica almacenada en el vehículo. Este artículo estudió el grado de sensibilidad del consumo de energía al tamaño del motor eléctrico y a su eficiencia características del mapa. Para ello, se utilizaron vehículos con motores eléctricos cuyos parámetros son de potencia y velocidad con diferentes mapas de eficiencia.

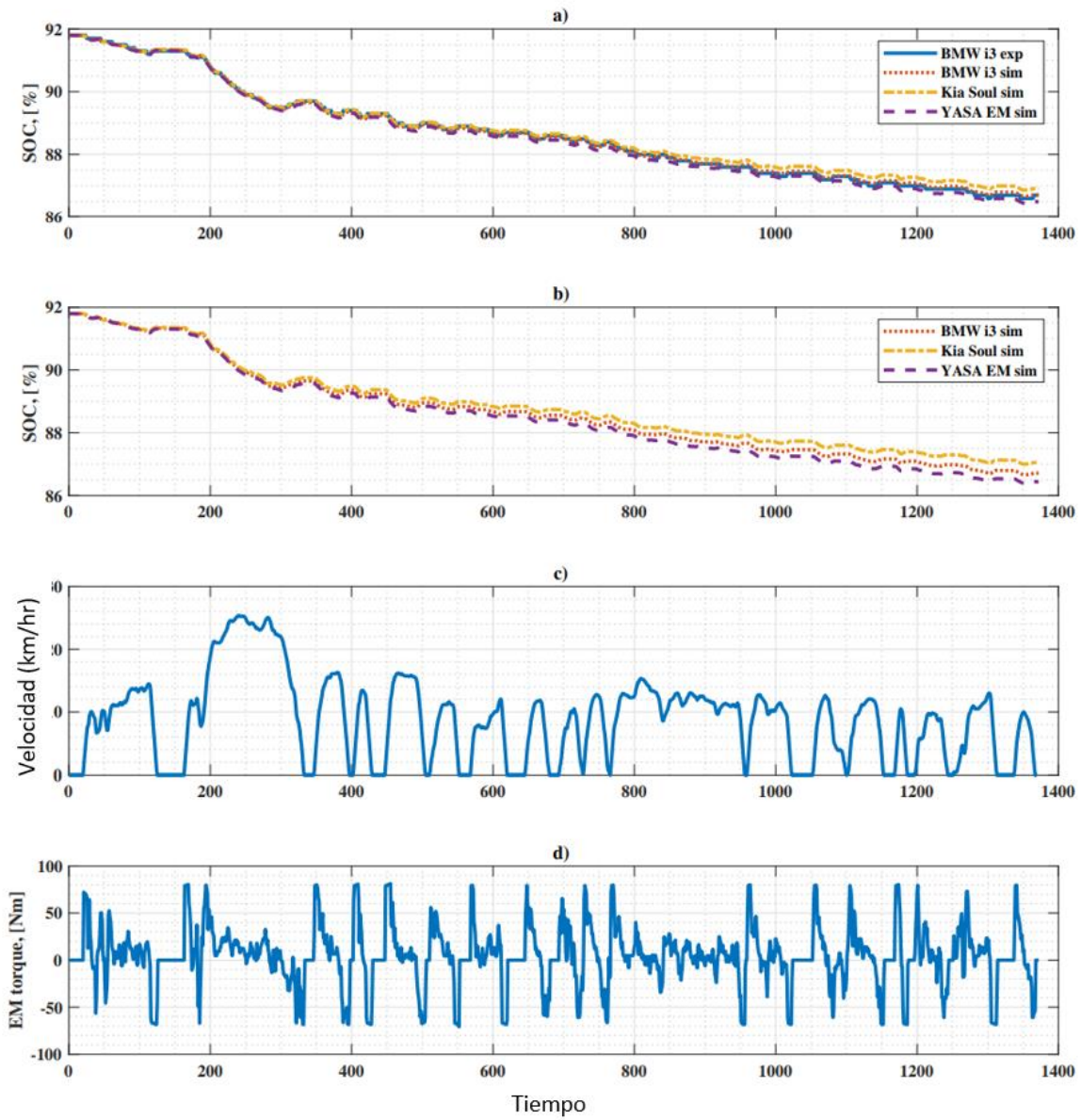


Figura A.68: Resultados de SOC, velocidad y torque de BMW i3