



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE QUINTANA ROO

DIVISIÓN DE CIENCIAS, INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

---

# Análisis de algoritmos de control para motor- generador en vehículos eléctricos

---

TESIS  
PARA OBTENER EL GRADO DE  
**MAESTRO EN MECATRÓNICA**

PRESENTA  
**FABIÁN AGUIRRE FONSECA**

DIRECTO DE TESIS:  
Dr. GUILLERMO BECERRA NÚÑEZ

ASESORES  
DR. FREDY IGNACIO CHAN PUC  
DR. JORGE OVIDIO AGUILAR AGUILLAR  
DR. EMMANUEL TORRES MONTALVO  
DR. JESÚS DAVID AVILÉS VELÁZQUEZ



Chetumal, Quintana Roo, México 09 de junio del 2023



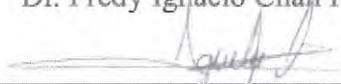
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE QUINTANA ROO

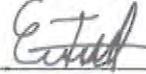
DIVISIÓN DE CIENCIAS, INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA  
TESIS ELABORADA BAJO LA SUPERVISIÓN DEL COMITÉ  
DEL PROGRAMA DE MAESTRÍA Y APROBADA COMO  
REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE:  
**MAESTRO EN MECATRÓNICA**

COMITÉ DE TESIS

DIRECTOR:   
Dr. Guillermo Becerra Núñez

ASESOR:   
Dr. Fredy Ignacio Chan Puc

ASESOR:   
Dr. Jorge Ovidio Aguilar Aguillar

ASESOR:   
Dr. Emmanuel Torres Montalvo

CODIRECTOR:   
Dr. Jesús David Avilés Velázquez



Chetumal, Quintana Roo, México 09 del 2023

# Dedicatoria

---

A mis padres, Beatriz y Fabian, por brindarme las bases necesarias y la oportunidad de seguir adelante con mis estudios, así también a mis familiares y amigos, presentes durante este proceso, quienes me han compartido grandes enseñanzas, como también, fueron una fuente de apoyo incondicional durante mis estudios y han sido en gran medida, una parte fundamental para culminar este trabajo de tesis.

## *Agradecimientos*

---

*Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por brindarme la oportunidad de continuar con mis estudios mediante el apoyo económico perteneciente a la beca de maestría destinada al Programa Nacional de Posgrados de Calidad (PNPC) durante mis estudios de Maestría en Mecatrónica en La Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo.*

*Al Dr. Guillermo Becerra Núñez, por brindar su apoyo de manera constante durante la realización de este trabajo de tesis, mediante sus enseñanzas como también por compartir su entusiasmo por la investigación.*

*A su vez, al Dr. Javier Vázquez Castillo, por compartir sus conocimientos e inspiración para culminar este trabajo.*

*A los profesores Javier Rivas y al Mtro. Jesús Orifel Álvarez por inspirarme durante la licenciatura a continuar con mis estudios.*

*A mis profesores de maestría por compartir su conocimiento y brindarme su apoyo durante el proceso de estudio y realización de este trabajo.*

*A mis amigos y familiares que estuvieron de una u otra forma involucrados en el proceso de realización de este trabajo.*

# Resumen

---

Hoy en día, los motores eléctricos representan una alternativa viable para sustituir los motores de combustión interna, principalmente en la implementación en medios de transporte particulares. Su implementación en vehículos está creciendo considerablemente debido a sus características energéticas, disponibilidad del combustible, reducción de emisión de contaminantes, así como el uso en una gran diversidad de aplicaciones.

El estudio de los motores eléctricos continúa siendo un problema abierto en líneas de investigación. Especialmente, la aplicación de novedosos algoritmos de control puede conllevar a la mejora de comportamientos de respuestas dinámicas, robustez de estabilidad ante cargas desconocidas e incertidumbres en los parámetros.

# Abstract

---

Today, electric motors represent a viable alternative to replace combustion engines, mainly in implementation in private means of transport. The implementation in vehicles is growing considerably due to its energy characteristics, fuel availability, reduction of pollutant emissions, furthermore its use in a wide variety of applications. The study of electric motors continues to be an open problem in lines of research. Particularly, the application of novel control algorithms can lead to the improvement of dynamic response behaviors, the robustness of stability in the face of unknown loads, and uncertainties in the parameters.

# Índice general

---

Índice de figuras	ix
Índice de tablas	x
<b>1. Marco Teórico</b>	<b>1</b>
1.1. Sistemas de propulsión en vehículos eléctricos . . . . .	3
1.2. Algunos sistemas de almacenamiento de energía . . . . .	5
1.2.1. Banco de baterías . . . . .	6
1.2.2. Super capacitores . . . . .	7
1.2.3. Otras tecnologías de almacenamiento . . . . .	8
1.3. Generalidades de la máquina eléctrica . . . . .	9
1.4. Control aplicado a máquinas eléctricas . . . . .	11
1.5. Vehículos conectables a la red . . . . .	12
1.6. Convertidores de potencia en vehículos eléctricos . . . . .	13
1.7. Estrategias de control no lineal . . . . .	15
<b>2. Desarrollo</b>	<b>20</b>
2.1. Modelado del vehículo eléctrico . . . . .	20
2.2. Ciclos de manejo . . . . .	23
2.3. Modelado de la Máquina Eléctrica . . . . .	24
2.4. Algoritmos de control para ME . . . . .	27
2.4.1. Control por linealización . . . . .	27
2.4.2. Control por modos deslizantes . . . . .	28
<b>3. Resultados y análisis</b>	<b>29</b>
3.1. Parámetros de simulación para la dinámica del vehículo . . . . .	29
3.2. Algoritmo de control por Linealización aplicado al modelo del PMSM	31
3.3. Resultados de regulación para velocidad mediante el algoritmo de linealización . . . . .	32
3.4. Algoritmo de control por modos deslizantes . . . . .	37
3.5. Análisis y comparación de algoritmos de control . . . . .	43
<b>4. Conclusión</b>	<b>45</b>

<b>5. Anexos</b>	<b>47</b>
5.1. Otras Tecnologías de almacenamiento . . . . .	47
5.2. Motor trifásico con señal trapezoidal . . . . .	49
5.3. Sistema Mecánico . . . . .	49
5.4. Código SVPWM para motor PMSM . . . . .	50
<b>Bibliografía</b>	<b>52</b>

# Índice de figuras

---

1.1. Diagrama conceptual sobre factores de adopción para los VE, donde se incluyen variables antecedentes, sociodemográficas, moderadoras y consecuencias variables (Autoría Propia). . . . .	2
1.2. Diagrama de bloques que describe un sistema de propulsión para un vehículo eléctrico (Adaptación de Ehsani Et.Al.,2018 y Chan Et.Al.,2001). . . . .	4
1.3. Diagrama esquemático de un vehículo eléctrico, donde se representa a través de bloques los subsistemas que lo integran y la relación entre ellos (Autoría Propia). . . . .	5
1.4. Acumulador automotriz comercial de 75 Ah (Autoría Propia). . . . .	6
1.5. Sistema de energía de reserva típico con súper capacitor (Autoría Propia). . . . .	8
1.6. Motor síncrono de imanes permanentes (PMSM) con controlador de velocidad (Testamatic Labs, 2022). . . . .	9
1.7. Circuito equivalente a un motor síncrono de imán permanente alimentado por una fuente de voltaje (Adaptación de Máquinas eléctricas, Chapman, 2012. . . . .	10
1.8. Circuito esquemático del rotor y estator (Adaptación de Maquinas Electricas, Chapman, 2012). . . . .	10
1.9. Esquema de funcionamiento: Diagrama de control orientado al Motor eléctrico de imanes permanentes (Autoría Propia). . . . .	12
1.10. Simulación de las dinámicas de modulación vectorial por ancho de pulso acoplada a una maquina eléctrica PMSM en MATLAB/SIMULINK [1]. . . . .	15
2.1. Dinámica de fuerzas correspondientes a la resistencia total perteneciente al vehículo (Autoría Propia). . . . .	21
2.2. Ciclo de manejo con las dinámicas de velocidad representativa. . . . .	23
2.3. Esquema de funcionamiento de una Máquina eléctrica (Autoría Propia). . . . .	24
3.1. Simulación de las dinámicas pertenecientes a un vehículo en MATLAB/SIMULINK (Autoría Propia). . . . .	30
3.2. Simulación de la máquina eléctrica PMSM que cuenta con la referencia de Ciclo de Manejo realizado en MATLAB/SIMULINK (Autoría Propia). . . . .	30

3.3.	Panel de configuración de MATLAB/SIMULINK, donde se observa los valores y Solver utilizados para la simulación con el algoritmo por modos deslizantes. . . . .	31
3.4.	Comparación de referencia y respuesta obtenida en la simulación de la máquina eléctrica con el Algoritmo de control PI utilizando una referencia de escalón unitario (Autoría Propia). . . . .	33
3.5.	Resultados de la comparación de la velocidad de referencia tomada de los Ciclos de manejo WLTP Class 3 con respecto a la salida del sistema, utilizando el algoritmo de control por linealización exacta (Autoría Propia). . . . .	34
3.6.	Acercamiento de los primeros 30 segundos de la comparación de la velocidad de referencia tomada de los Ciclos de manejo WLTP Class 3, en comparación con la salida del sistema utilizando el algoritmo de control por linealización exacta. . . . .	34
3.7.	Ampliación para observar el sobrepaso en el segundo 5.05 de la simulación vista en la figura 3.5 (Autoría Propia) . . . . .	35
3.8.	Gráfica de voltajes A B C ante la referencia de entrada tipo escalón unitario. . . . .	35
3.9.	Gráfica de voltajes A B C ante la referencia de entrada de ciclos de manejo con Algoritmo PI . . . . .	36
3.10.	Gráfica de voltajes A B C ante la referencia velocidad del ciclo de manejo con el algoritmo PI durante los segundos 11.5 a 15.5 . . . . .	36
3.11.	Gráfica de voltajes A B C ante la referencia velocidad del ciclo de manejo con el algoritmo PI durante los segundos 51.5 a 53. . . . .	37
3.12.	Panel de configuración de MATLAB/SIMULINK, donde se observa los valores y Solver utilizados para la simulación con el algoritmo por modos deslizantes. . . . .	37
3.13.	Respuesta obtenida en la simulación de la máquina eléctrica con el Algoritmo de Modos Deslizantes utilizando una referencia de escalón unitario. . . . .	38
3.14.	Acercamiento de la comparación de referencia y respuesta obtenida en la simulación con el Algoritmo de Modos Deslizantes de la figura 3.13. . . . .	39
3.15.	Señales de Voltaje aplicadas en la simulación de la máquina eléctrica con el Algoritmo de Modos Deslizantes utilizando una referencia de escalón unitario. . . . .	39
3.16.	Ciclo de manejo WLTP class 3 de 60 s donde se observa la respuesta de la velocidad de entrada con relación a la salida del sistema, utilizando el algoritmo de control por modos deslizantes. . . . .	40
3.17.	Ciclo de manejo WLTP class 3 de 30 s donde se observa la respuesta de la velocidad de entrada con relación a a la salida del sistema, utilizando el algoritmo de control por modos deslizantes. . . . .	40
3.18.	Ampliación de la figura MD1, donde se observa un ligero sobrepaso de la respuesta de velocidad. . . . .	41
3.19.	Voltajes ABC correspondientes al algoritmo de control por modos deslizantes con la referencia de ciclos de manejo WLTP class 3. . . . .	41

3.20. Ampliación de la gráfica de voltajes obtenida del algoritmo por modos deslizantes empleado en la ME, donde se observa el incremento de los voltajes ABC durante la aceleración del vehículo. . . . .	42
3.21. Ampliación de la gráfica de voltajes obtenida del algoritmo por modos deslizantes empleado en la ME, durante la desaceleración del vehículo. . . . .	42
3.22. Comparación de la simulación de la maquina eléctrica con el algoritmo de control por Linealización exacta y modos deslizantes tomando en cuenta las gráficas de velocidad utilizando un escalón unitario. . . . .	43
3.23. Comparación de los controladores CLE-PI y MD en la simulación de la maquina eléctrica en relación a la señal de referencia Ciclos de manejo WLTP Class 3. . . . .	44

# Índice de tablas

---

1.1. Comparación de la capacidad de baterías utilizadas en vehículos eléctricos (Adaptación del Art.Comparison of Batteries Used in Electrical Vehicles,Muslimin Et.Al.,2021). . . . .	7
3.1. Parámetros del motor . . . . .	31
3.2. Valores utilizados en las ganancias de los algoritmos de control . . . .	43

# Marco Teórico

---

Dentro de la estrategia de evolución vehicular, se aspira a diseños de transporte cada vez más sostenibles, aun hoy en día, existen barreras y desafíos tecnológicos, que con frecuencia cambian las perspectivas de las partes interesadas. Hace poco más de una década, se realizaron las primeras investigaciones para determinar las principales barreras que impedían la adopción de los VE, a través de los años, se han empleado diversas metodologías, por ejemplo, en el estudio de Graham-Rowe et al. (2012) [2], se observó una inclinación positiva de los participantes, pero se detectaron barreras como el costo y la eficiencia en comparación con los vehículos de combustión interna. En el estudio de Bülher Et.Al., donde la percepción de los participantes cambio después de la prueba de manejo se optó por definir ventajas y barreras en base a las encuestas realizadas, que en su mayoría fue una respuesta positiva después de la prueba de manejo sobre su adopción, siendo las principales inseguridades de los participantes, la falta de puntos de carga e incertidumbre en los costos de adquisición[3]. las encuestas realizadas en países de la unión europea a través de los años (2012-2020) han señalado que las tres principales barreras para la introducción en el mercado de los vehículos eléctricos eran el precio de compra, el rango de conducción y la disponibilidad de infraestructura de carga. Sin embargo, estas barreras clave han cambiado drásticamente [4].

Por otro lado, Idrovo y Loayza, 2017, realizaron un estudio comparativo de los costos operativos entre un vehículo de combustión interna y un VE realizado en la ciudad de Cuenca, donde se determino que la utilización del vehículo eléctrico Kia Soul EV AT 2017 es rentable y genera un ahorro del 24.66 % de los costos operativos en rutas céntricas y con subsidio de combustible equivalente a 3.05 centavos de dolar por kilómetro recorrido frente a un Chevrolet Grand Vitara 2.0L [5].

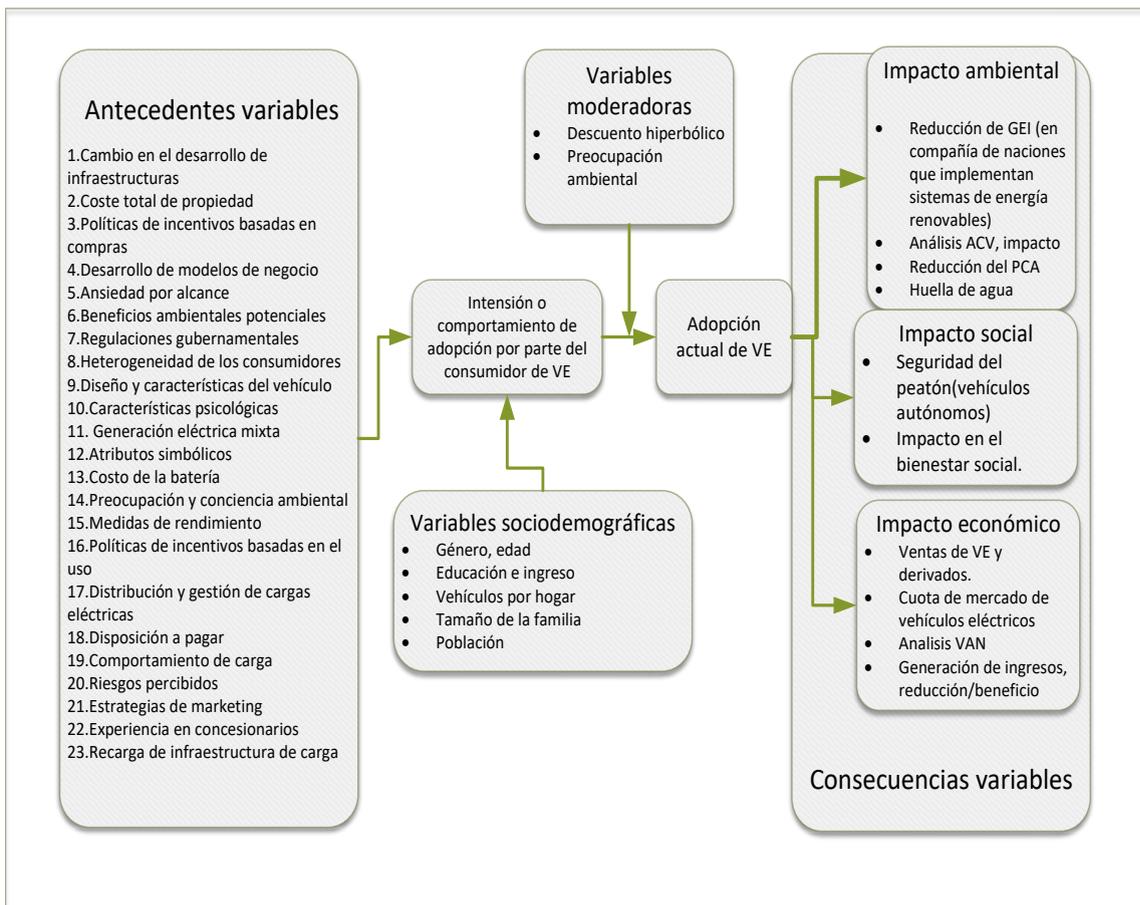
El costo de la batería, el cual es el componente más caro para un VE, se estima que ha reducido en un 90 % partiendo de la primer década del milenio al 2021 y se espera que para el año 2025, el precio en el mercado se encuentre a la par que los vehículos convencionales, por otra parte, el costo de mantenimiento es relativamente más barato en la actualidad, a su vez, el rango de conducción aumentó de 100-150 km hasta los 400 km. Sin embargo, la infraestructura pertinente para la carga de estos vehículos no se encuentra disponible en la mayoría de los países [6].

## Estado del arte

Los factores de adopción de VE, como se muestra en la siguiente figura 1.4, describe la relación entre varios factores de la literatura. Para hacer viable la adopción de vehículos eléctricos, se presentan varios modelos de negocio en diferentes países. Sin embargo, la aceptación masiva de VE plantea varias preguntas sobre su adaptabilidad en los escenarios prevalecientes.

Específicamente, la infraestructura para recargar el automóvil y las preocupaciones relacionadas con la autonomía del vehículo, según diferentes autores son las principales barreras para la adopción de vehículos eléctricos en todos los países. Además, los beneficios económicos de estos vehículos varían en función de las políticas e incentivos específicos de los gobiernos de cada país.

El costo inicial de un VE también es un obstáculo importante para los consumidores. Uno de los factores principales del VE es el sistema de almacenamiento y su costo de reemplazo requiere importantes mejoras tecnológicas e iniciativas de reducción de precio para que sea adaptable en línea con los vehículos convencionales [7].



**Figura 1.1:** Diagrama conceptual sobre factores de adopción para los VE, donde se incluyen variables antecedentes, sociodemográficas, moderadoras y consecuencias variables (Autoría Propia).

## Vehículos eléctricos

Se define como VE a todo aquel vehículo impulsado por uno o mas motores eléctricos que utilizan la energía eléctrica almacenada y la transforman en energía mecánica para su desplazamiento, entre las principales diferencias que existen entre un VE y uno convencional, se encuentra la tracción que proviene de la máquina eléctrica, en vez del motor de combustión. La energía para movilidad es almacenada en sistemas recargables (como lo son baterías, bancos de capacitores u otros dispositivos) para su posterior uso. De este modo, también es importante aclarar que los VE pueden funcionar con corriente alterna y continua, a su vez, existen clasificaciones para definir el tipo de vehículo, como la siguiente:

- Vehículo eléctrico a baterías (VEB): Vehículo que se desplaza mediante el uso de máquinas eléctricas y cuenta con banco de baterías que se recargan principalmente con la red eléctrica.
- Vehículo eléctrico híbrido (VEH): Es aquel que cuenta tanto con motores de combustión y eléctricos para su desplazamiento. Los cuales, algunos se pueden recargar mediante la red o únicamente se recarga combustible, pero tienen mayor desempeño.
- Vehículo eléctrico de autonomía extendida (VEAE): Cuenta con un motor de combustión que funciona solamente como generador para la recarga de su sistema de almacenamiento, también es conocido como vehículo híbrido de configuración en serie.
- Vehículo eléctrico de pila de combustible de hidrógeno (VEPC): Cuenta exclusivamente con motores eléctricos, pero se diferencia ya que su sistema de almacenamiento es a base de una o más pilas de combustible que utilizan hidrógeno [8].

### 1.1. Sistemas de propulsión en vehículos eléctricos

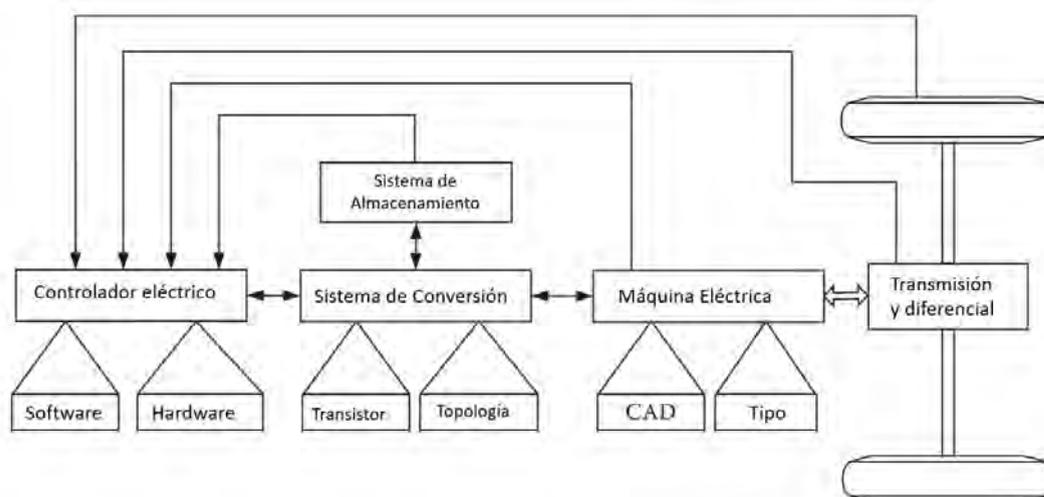
El sistema de propulsión eléctrico (SPE) está conformado por una fuente de energía - sistema de almacenamiento, maquina eléctrica, convertidor electrónico de potencia y unidad de control, como componentes principales como se observa en la figura 1.2. La integración adecuada de estos componentes es necesaria para que los vehículos eléctricos estén a la par con los vehículos convencionales basados en combustión interna [9, 10, 11].

En la actualidad, algunos desafíos principales en la configuración del SPE consisten en diseñar e implementar máquinas eléctricas y convertidores electrónicos de potencia, que sean capaces de brindar un mejor rendimiento y que puedan integrarse fácilmente en los VE de próxima generación, a su vez ésta requiere una investigación

y desarrollo sustancial desde el nivel de los componentes hasta el nivel del sistema completo [7, 11].

El avance tecnológico en los SPE se enfrentan muchos desafíos técnicos y sociales, incluido el alto costo del material de la ME, el bajo interés de los fabricantes de componentes electrónicos de potencia y las limitantes tecnológicas en los sistemas de almacenamiento. La elección de los sistemas de propulsión eléctrica para VE y VEH depende de varios factores, incluidas las expectativas del conductor, las limitaciones del vehículo y la fuente de energía.

La expectativa del conductor se define por un perfil de conducción, que incluye la aceleración, la velocidad máxima, la capacidad de ascenso, el frenado y el alcance. Las restricciones del vehículo, incluidos el volumen y el peso, dependen del tipo de vehículo, el peso del sistema de almacenamiento y la carga útil. La fuente de energía se relaciona con el sistema de almacenamiento, que pueden ser baterías, celdas de combustible, super capacitores, y varias fuentes híbridas. Por lo tanto, el proceso de identificación de las características preferidas y las opciones de paquete para la propulsión eléctrica debe llevarse a cabo a nivel del sistema. Debe examinarse la interacción de los subsistemas y los posibles efectos de los componentes del sistema [12].

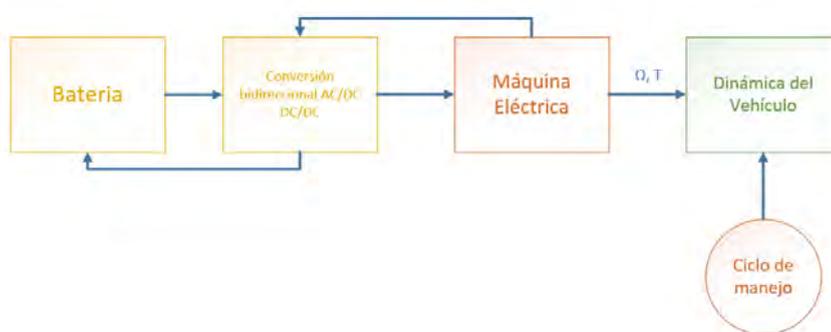


**Figura 1.2:** Diagrama de bloques que describe un sistema de propulsión para un vehículo eléctrico (Adaptación de Ehsani Et.Al.,2018 y Chan Et.Al.,2001).

Las máquinas eléctricas tienen más de un siglo de existencia, y su evolución en comparación con la electrónica e informática, ha tenido un desarrollo paulatino, sin embargo, el desarrollo de los motores se sustenta por medio de nuevos materiales, topologías sofisticadas, diseño asistido por computadora (CAD), así como del mismo desarrollo de la electrónica de potencia y microelectrónica y sus derivados [13].

El vehículo eléctrico alimentado por una o más máquinas eléctricas tiene la arquitectura más sencilla sin la necesidad de mezclar energía, con respecto al híbrido. El

diagrama visto en la figura 1.3 correspondiente a un vehículo eléctrico con sistema de almacenamiento de batería, junto con la interacción entre sus diversos componentes principales, considerado en el presente trabajo. Los cuales son: la máquina eléctrica, sistema de control en el convertidor, banco de baterías o sistema de almacenamiento y la tracción dinámica que corresponde a las dinámicas del vehículo.



**Figura 1.3:** Diagrama esquemático de un vehículo eléctrico, donde se representa a través de bloques los subsistemas que lo integran y la relación entre ellos (Autoría Propia).

De los componentes principales, preocupación y restricción en el VE, es el sistema de almacenamiento, por lo que se analizan algunas características de estos, en la siguiente sección.

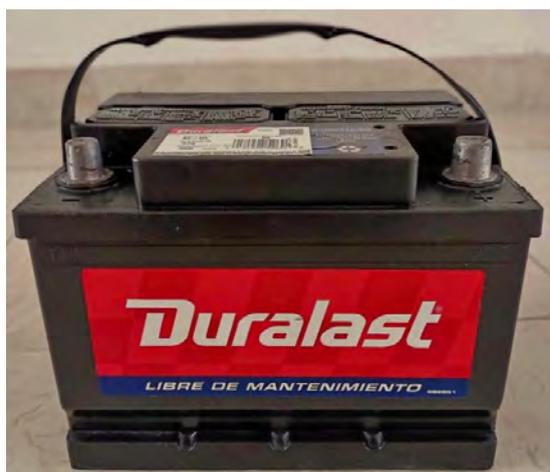
## 1.2. Algunos sistemas de almacenamiento de energía

El almacenamiento de energía es un factor principal para los sistemas de transporte, lo cual, para los vehículos convencionales el combustible como la gasolina o diésel ofrece una autonomía considerable por su densidad energética. Sin embargo, para el sistema de arranque normalmente se utiliza un motor eléctrico acoplado al acumulador o batería de plomo - ácido, de baja capacidad, masa y volumen, que a su vez, es de baja densidad energética. Si se usa como almacenamiento principal este dispositivo para el vehículo eléctrico, el peso del sistema de almacenamiento, sería muy grande con respecto a los otros dispositivos y pasajeros. Por tal motivo, se describen otros tipos de sistemas de almacenamiento para los vehículos eléctricos.

Los principales tipos de pilas de combustible son las baterías alcalinas de intercambio de protones (PEM), el metanol directo, el ácido fosfórico, el carbonato fundido y las pilas de combustible de óxido sólido. A continuación, se proporciona una breve descripción de las características relevantes en cada tipo en el contexto de aplicaciones vehiculares y estacionarias [14].

### 1.2.1. Banco de baterías

Los primeros VE dejaron de fabricarse a fines de la década de 1920. Esto debido a que los vehículos eléctricos aún no podían competir con los vehículos convencionales debido a la corta duración de la batería, el largo tiempo de recarga que requerían y la falta de estaciones de recarga. Además, las baterías de plomo ácido (como el ejemplo de la figura 1.4) y níquel-cadmio (NiCd) eran la única opción existente para los VE durante la década de 1900. Más tarde, debido a la baja energía específica (30-40 Wh / kg), baja densidad de energía (80-100 Wh / L) y rango de viaje limitado, las baterías de plomo ácido fueron sustituidas después del renacimiento de los vehículos eléctricos en la década de 1990.



**Figura 1.4:** Acumulador automotriz comercial de 75 Ah (Autoría Propia).

Sin embargo, las baterías de plomo ácido se utilizan escasamente en vehículos eléctricos de dos ruedas, como carretillas elevadoras y e-rickshaws, por lo que las baterías de iones de litio fueron introducidas en 1991, que actualmente lidera la revolución del mercado de baterías, principalmente por su alta energía específica (120-250 Wh / kg) y alta densidad de energía ( 600 Wh / L). Hoy en día, las baterías de iones de litio son las baterías más ligeras y duraderas adecuadas para vehículos eléctricos por ello, tienen ventajas obvias, como una larga vida útil, alta capacidad de energía y eficiencia [15, 16].

Las baterías como fuente de energía son muy susceptibles a las descargas y cargas rápidas, lo que afecta la vida y el estado de carga que proporcionan. Para protegerlas y reducir este efecto, en general se agregan super capacitores que proporcionan energía durante las cargas pico y demandadas por la aceleración. Estos son recargados al disminuir la velocidad del vehículo mediante la conversión de energía cinética en eléctrica (sistema regenerativo de energía al frenar) o por una celda solar, muy afín para proporcionar energía proveniente de fuentes con cero emisiones contaminante [17].

Para aplicaciones de vehículos eléctricos, la función de carga de batería integrada es una tecnología emergente para cargar el banco de baterías a bordo. Al utilizar el motor de tracción como inductor de carga y el circuito de conducción como circuito

de carga, se puede incorporar un cargador de batería, lo que reduce significativamente el costo y el peso del VE y mejora la capacidad de carga a bordo. Para aplicaciones de vehículos eléctricos, un sistema de conducción prometedor debe satisfacer los siguientes requisitos [18]: 1) Ondulación de bajo par, vibración y ruido acústico; 2) Alta densidad de potencia y bajo costo; 3) Conversión de energía flexible en la condición; 4) Múltiples funciones de carga en la condición de parada; 5) Topología de unidad modular.

En nuestros días, las baterías usuales en los vehículos eléctricos son las de polímero de litio, del tipo iones de litio Li-Ion, por que son ligeras y por su alta densidad de potencia.

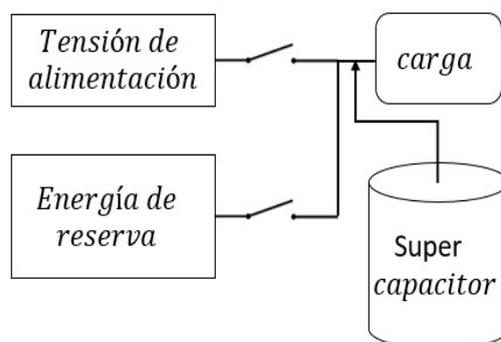
A continuación se observa en la tabla 1.1 una comparativa de la capacidad nominal de algunas baterías utilizadas en VE, siendo la batería de Plomo ácido a partir de un vehículo Golf, Níquel-Metalhidruro tomada de datos de General Motors y la batería de Iones de litio con base a un Tesla Model 3.

**Tabla 1.1:** Comparación de la capacidad de baterías utilizadas en vehículos eléctricos (Adaptación del Art.Comparison of Batteries Used in Electrical Vehicles,Muslimin Et.Al.,2021).

	<b>Eficiencia energética (%)</b>	<b>Tensión nominal (v)</b>	<b>Capacidad nominal (Ah)</b>	<b>Capacidad nominal (kWh)</b>	<b>Distancia que puede recorrer (km)</b>
<b>Plomo-ácido</b>	85	6	215	1.29	22
<b>Níquel- metalhidruro</b>	85	343	77	26.4	75-150
<b>Iones de litio</b>	90	350	158	55	250

### 1.2.2. Super capacitores

Tomando en cuenta los recientes avances técnicos en dispositivos eléctricos en términos de ciclo de vida, tiempo de carga y potencia específica, los súper capacitores (SC) se han convertido en candidatos prometedores en diversos campos que requieren alta energía rendimiento (vehículos eléctricos e híbridos) y rendimiento energético estable (automatización sensible, chips de computadora y dispositivos electrónicos portátiles)[19]. Por ello, los SC ya se pueden utilizar en sistemas de energía que requieren alta potencia, rendimiento, pero no necesariamente al nivel máximo de almacenamiento de energía, ya que no pueden almacenar el nivel máximo de energía, lo que restringe su uso en dispositivos de respaldo, por lo que usualmente se opta por una configuración híbrida como se observa en la figura 1.5 .



**Figura 1.5:** Sistema de energía de reserva típico con súper capacitor (Autoría Propia).

### 1.2.3. Otras tecnologías de almacenamiento

#### Pila de combustible alcalina

En una pila de combustible alcalina, por sus siglas en inglés (AFC), se utiliza una solución acuosa de hidróxido de potasio (KOH) como electrolito. En comparación con algunas otras pilas de combustible donde se utilizan electrolitos ácidos, el rendimiento del electrolito alcalino es tan bueno como los electrolitos ácidos, mientras que es significativamente menos corrosivo hacia los electrodos. Los AFC han estado en uso real durante mucho tiempo entregando eficiencias eléctricas de hasta el 60%. Requieren hidrógeno puro como combustible, y funcionan a bajas temperaturas (a 80°C), y por lo tanto, son adecuados para aplicaciones de vehículos. El calor residual se puede utilizar para el calentamiento, pero la temperatura de la celda no es lo suficientemente alta como para generar vapor que se pueda utilizar para la cogeneración.

#### Pila de combustible de membrana de intercambio de protones

Este tipo de pila utiliza electrolitos sólidos y funciona a bajas temperaturas (alrededor de 80°C). Estas pilas de combustible también se conocen como pilas de combustible de membrana de polímero sólido. La eficiencia eléctrica de las pilas de combustible (PEM) es menor que la de las células alcalinas (alrededor del 40%). Sin embargo, la construcción robusta y simple hace que este tipo de pilas de combustible sean muy adecuadas para aplicaciones de vehículos. La pila de combustible PEM y la AFC son los dos tipos que se están considerando actualmente para aplicaciones de vehículos. La ventaja de las células PEM es que pueden tolerar la impureza en el combustible en comparación con el hidrógeno puro necesario en comparación con las de combustible alcalino.

## Hidrógeno y pila de combustible

Durante mucho tiempo, el hidrógeno ha sido considerado como un futuro portador de energía que puede contribuir significativamente a la descarbonización del sistema energético. Su papel especial se ha visto en su posible contribución a la transición hacia un sistema de transporte limpio, libre de emisiones y, por lo tanto, considerablemente más sostenible. Sin embargo, a pesar del hecho de que el hidrógeno y las pilas de combustible tienen algunas ventajas en comparación con otros combustibles y tecnologías automotrices, actualmente siguen siendo una opción a largo plazo para la movilidad [20].

### 1.3. Generalidades de la máquina eléctrica

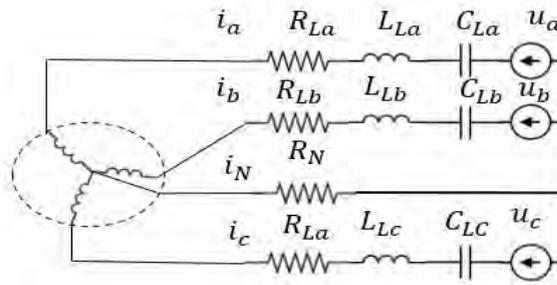
Las máquinas eléctricas han encontrado lugar en los vehículos convencionales como generador, también llamado alternador, y como motor de arranque, un ejemplo de este tipo de máquinas se muestra en la Fig. 1.6. El motor de arranque, de corriente directa con escobillas, tiene un par de arranque alto, se emplea para iniciar la marcha del motor de combustión ayudando a este desde estar detenido hasta llegar a la velocidad de ralentí. El alternador es un generador eléctrico de corriente alterna, usualmente acoplado mecánicamente al motor de combustión, genera energía eléctrica en alterna y posteriormente se transforma en corriente continua, para mantener la carga de las baterías y compensar las cargas eléctricas de otros componentes [21].



**Figura 1.6:** Motor síncrono de imanes permanentes (PMSM) con controlador de velocidad (Testamatic Labs, 2022).

Por otro lado, los motores síncronos de imán permanente son los más usados en vehículos híbridos y eléctricos, se caracterizan por su elevada relación entre el par y la potencia obtenidos y el tamaño o la masa, alta capacidad de sobrecarga de par, capacidad para trabajar en una amplia gama de velocidades de rotación, y una alta eficiencia. Los motores se describen por dos componentes del par electromagnético: uno conectado con la fuerza magnetomotriz de los imanes permanentes, y el otro como un componente conectado con la asimetría magnética de un rotor.

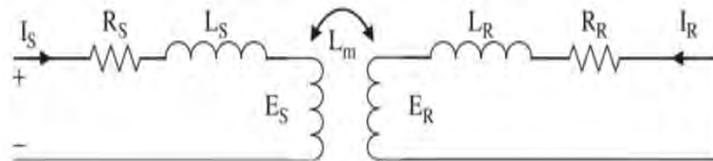
A continuación se aprecia en la figura 1.7 el circuito que describe a dicha máquina eléctrica.



**Figura 1.7:** Circuito equivalente a un motor síncrono de imán permanente alimentado por una fuente de voltaje (Adaptación de Máquinas eléctricas, Chapman, 2012).

## Dinámica eléctrica

La dinámica eléctrica de este tipo de dispositivos, se puede representar por dos circuitos, los cuales definen al estator y el rotor, además, para el presente trabajo se consideran tres fases simétricas. La idea es analizar una fase como se muestra a continuación en la figura 1.8, denotando con los subíndices  $S$  y  $R$  al estator y rotor, respectivamente. La corriente que circula por cada circuito se describe con  $I$ , mediante  $R$  se representa la resistencia, con  $L$  inductancia y  $L_m$  es la inductancia mutua que liga los circuitos, además, los voltajes en cada devanado se expresan mediante la letra  $E$ .



**Figura 1.8:** Circuito esquemático del rotor y estator (Adaptación de Maquinas Eléctricas, Chapman, 2012).

La representación de la dinámica eléctrica es de las tres fases (abc) y mediante algunas transformaciones, se pueden trasladar las tres coordenadas a dos, para simplificar y desarrollar algoritmos de control.

## Transformación de Park

En general, una de las dificultades inherentes a la descripción del comportamiento de la mayoría de las máquinas eléctricas rotativas es que las inductancias de la

máquina son una función tanto de los factores mecánicos como de los eléctricos. Para simplificar este proceso, R.H. Park [22] desarrolló una transformación que hizo que el análisis de las máquinas eléctricas más sencillo al transformar las ecuaciones del motor en un marco de referencia que gira de forma síncrona con los campos de la máquina (1929). Para las fases del devanado en el estator se utilizaran los subíndices ( $a, b, c$ ), mientras que para el devanado de campo, el subíndice  $f$ , para el devanado de amortiguamiento, el subíndice  $d$  y  $q$ , este último adelantado por  $90^\circ$ , por lo que coincide con el voltaje inducido.

Este método ampliamente difundido, tiene como principal objetivo facilitar el análisis y control de coordenadas del sistema trifásico a otro sistema de referencia  $d-q-0$ .

Una característica distintiva de esta asimetría es la renuencia significativamente mayor en el eje  $d$  del rotor que la renuencia en el eje  $q$ . Dependiendo de la construcción del rotor, el componente del eje  $q$  tiene entre un 5 % y un 30 % de contribución al par resultante realizado por el motor.

Dicha expresión se puede representar matricialmente en la ecuación 1.1 de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \\ f_0 \end{bmatrix} = [T] * \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

Por lo que, para una representación más compacta se tiene la siguiente ecuación:

$$f_{dq0} = T(f_{abc}) \quad (1.2)$$

Donde la transformación  $T(\psi)$ , es:

$$T(\psi) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\psi) & \cos(\psi + \frac{2\phi}{3}) & \cos(\psi + \frac{4\phi}{3}) \\ \sin(\psi) & \sin(\psi + \frac{2\phi}{3}) & \sin(\psi + \frac{4\phi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

Por lo que también resulta conveniente ya que es sencillo regresar a las coordenadas originales, ya que la inversa de la transformación es la transpuesta.  $P^1(\psi) = P^T(\psi)$ .

## 1.4. Control aplicado a máquinas eléctricas

Los sistemas de corriente alterna polifásicos son los más utilizados, sin embargo, el motor de imán permanente forma parte de las máquinas eléctricas más utilizadas en la industria por sus ventajas. Generalmente, se le da un uso a la velocidad constante y con los avances alcanzados en la electrónica, se han desarrollado sistemas de control de velocidad variable, para así incrementar sus campos de aplicación, como en el presente caso [23].

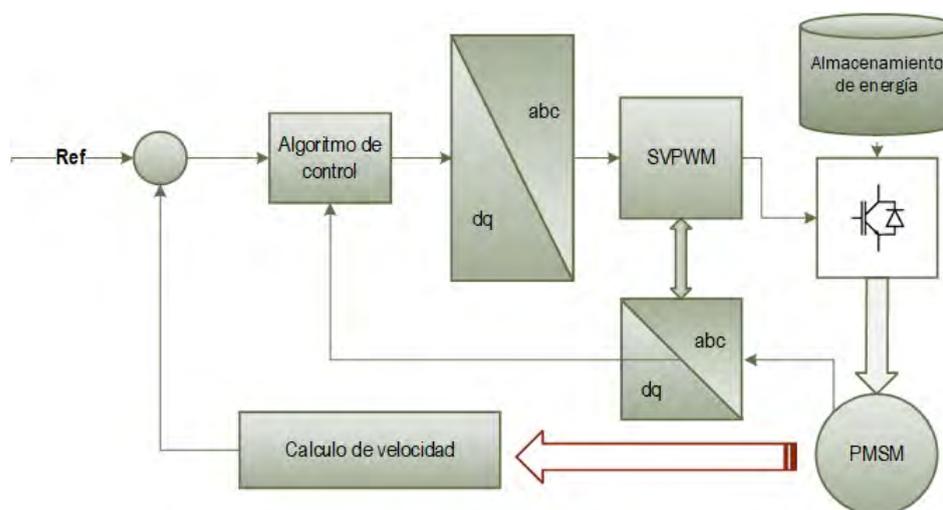
En los vehículos eléctricos híbridos, la ME es un elemento clave en el funcionamiento y usualmente es una máquina que puede operar de tres formas diferentes: (1) en modo motor, para enviar energía mecánica a la tracción, (2) en modo generador, cuando la máquina eléctrica le envía potencia mecánica para recargar las baterías y

(3) en modo generador cuando recupera energía mecánica en el modo frenado regenerativo.

Para el propósito del presente trabajo, el problema de control de la máquina eléctrica es conseguir que esta siga cierta referencia de velocidad a pesar de la carga acoplada.

Más adelante, se describe un control por linealización que integra un PID, además de cancelar los términos no lineales. El controlador actúa mediante la cancelación de los términos de las dinámicas naturales del modelo del motor, para así dejar un control virtual  $(u_d, u_q)$ , posteriormente se agregan las dinámicas deseadas para el seguimiento de velocidad, mediante las acciones del PID que dependen del error de seguimiento. A partir del modelo anterior, primero se cancelan las dinámicas  $f_1$  y  $f_2$  mediante el primer nivel de control  $v_d$  y  $v_q$ , donde en este mismo se deja el siguiente nivel de control.

A continuación en la figura 1.9 donde se observa la referencia de velocidad a la entrada, el algoritmo de control a implementar, la transformación dq/abc, la modulación por ancho de pulso vectorial y su relación con el dispositivo convertidor para el accionamiento de motor PMSM (autoria propia).



**Figura 1.9:** Esquema de funcionamiento: Diagrama de control orientado al Motor eléctrico de imanes permanentes (Autoría Propia).

## 1.5. Vehículos conectables a la red

El cargador como fuente de energía para el VE ofrece ventajas como la opción de abastecimiento energético en diferentes lugares como el hogar y áreas de estacionamiento, sin embargo, el uso de VE no garantiza una reducción de la huella de carbono por el gasto de energía del vehículo, por otra parte se podría apreciar como una antesala de ello, en combinación con el uso de energías renovables conectadas a la red. Cuando la batería del vehículo eléctrico se conecta a la red, se convierte en un elemento de almacenamiento de energía, lo que puede beneficiar a la red eléctrica otorgando una mayor tasa de abastecimiento de la electricidad, a pesar de ello, la

energía de la batería se reformula con componentes electrónicos de potencia y también regula el voltaje y la frecuencia de la red eléctrica. Teniendo en cuenta la idea del vehículo eléctrico, el subsistema de carga cobra relevancia.

El despliegue de vehículos con motor de combustión interna, está siendo moderado mediante normativas en todo el mundo debido a los grandes problemas ambientales y la escasez de fuentes de energía. La creciente adopción del vehículo eléctrico es prometedora, ya que están disminuyendo la tasa de contaminación y con ello, pueden utilizarse en compañía de fuentes de energía renovables. El desarrollo tecnológico y comercial del vehículo eléctrico se ha incrementado rápidamente en los últimos años, por lo que se convertirá en un nuevo reto energético para el abastecimiento a nivel mundial. La adopción de los vehículos eléctricos dependerá en gran medida, de trabajadores del automóvil, el precio y ventaja que ofrezcan las empresas a los consumidores, como a su vez, de las normativas ambientales y capacidad energética de las ciudades.

Si la adopción de los vehículos eléctricos aumenta, será necesario un mayor número de fuentes de energía para el abastecimiento de los mismos, entre ellas se contempla el frenado regenerativo. Esta topología aumenta la eficiencia general de la unidad de almacenamiento de energía del vehículo al contemplar el frenado regenerativo del VE como fuente secundaria de energía. [24].

## 1.6. Convertidores de potencia en vehículos eléctricos

Tomando en consideración los elementos que conforman al convertidor y su disposición relativa se obtienen las diferentes topologías, para elegir la que mejor se ajuste a los requisitos de diseño, es importante considerar los siguientes puntos:

- Si hay que elevar, reducir o elevar y reducir con la misma topología la tensión de salida del convertidor respecto de su entrada.
- La potencia del convertidor
- Si la tensión de salida presenta inversión de polaridad respecto de la entrada.
- Si existe la condición de aislamiento entre la entrada y la salida.
- Si es requerido el uso de múltiples salidas para la alimentación de los módulos.

A su vez, el costo suele ser un factor relevante, que suele influir en la topología en estos casos es necesario recurrir a un diseño que opere en una región en la que el convertidor no operaría de manera convencional, esto para satisfacer la rentabilidad de implementación [25]

Recientemente se han desarrollado convertidores DC-DC bidireccionales a gran escala como a su par, diversas tecnologías enfocadas a VE, donde se controlan los flujos de energía eléctrica entre el motor y la batería. Para lograr cero emisiones,

el vehículo sólo puede ser alimentado mediante energía eléctrica siendo necesario el uso de baterías para su autonomía. La tecnología para mejorar el rendimiento de los vehículos eléctricos será cada vez de mayor importancia debido a la adopción de los mismos. Bajo este esquema, el convertidor permite que el motor realice un intercambio de energía con la batería utilizando la energía cinética del vehículo y se realice una recarga de la batería en este modo. El uso del frenado regenerativo ha demostrado que aumenta el rango de conducción hasta un 15%. Se utiliza un convertidor bidireccional para la aplicación de vehículos eléctricos de un enlace de corriente continua. [26].

La conversión de VE tradicionales en VEH, para disminuir la utilización de combustible, ha sido considerada tanto por la academia como por la industria automotriz. La transición se realiza instalando un paquete de energía de alta capacidad o cambiando o reemplazando el paquete de baterías existente para expandir toda la autonomía eléctrica del vehículo. Para todos los casos, el paquete de baterías debe alimentarse de una toma de CA externa, así como de frenado regenerativo y se debe proporcionar el mecanismo de tracción eléctrica [27].

## Control orientado al campo

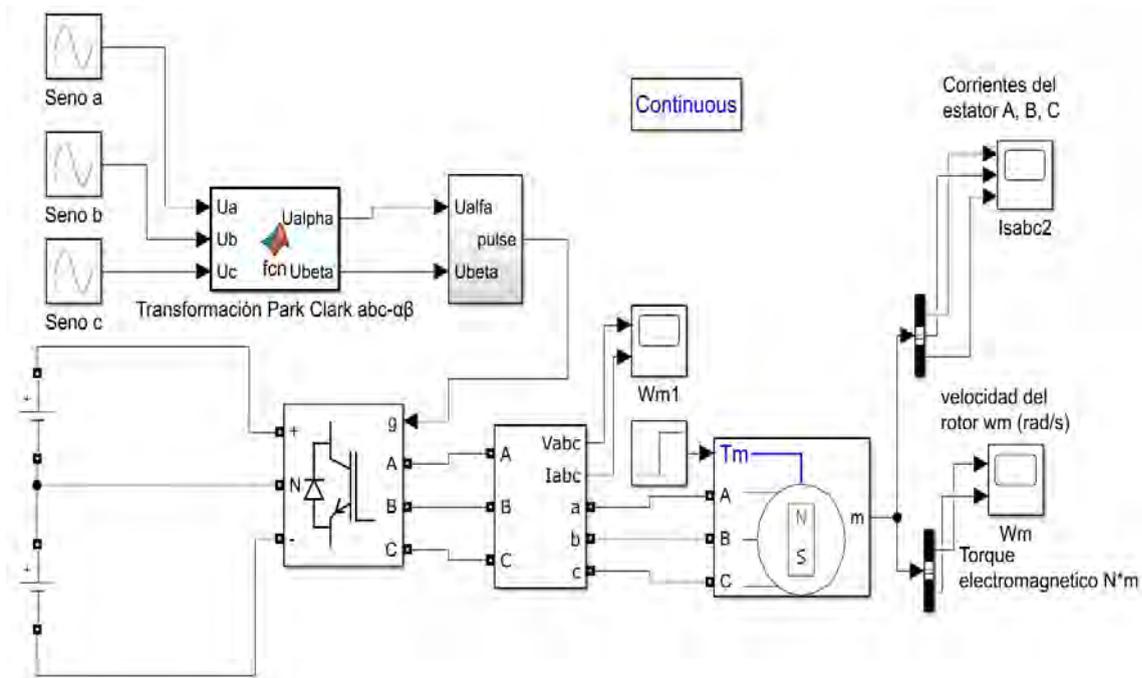
Uno de los principales métodos de control de motores síncronos de imán permanente, se llama control orientado al campo (FOC) suele ser ampliamente utilizado esto debido al menor tiempo de proceso transitorio en comparación con otros sistemas de control de vectores. Este método de control se basa en vectores, debido a la expresión geométrica de las principales variables de control, que se representan como vectores en un espacio matemático. FOC fue inventado por F. Blaschke de Siemens en Alemania y no fue cambiado con el tiempo (excepto en casos de modernización por redes neuronales y lógica difusa) [28].

## Modulación vectorial por ancho de pulso

La modulación de ancho de pulso de vector espacial (SVPWM) es un esquema de modulación utilizado para aplicar un vector de voltaje dado a un motor eléctrico trifásico (imán permanente o máquina de inducción). Es la técnica principal de generalidad utilizada para controlar el inversor de fuente de voltaje, que se utiliza para suministrar los motores de CA como el motor de inducción, debido a que el mecanismo de modulación de ancho de pulso del vector espacial genera menos THD en el VSI y utiliza el voltaje del bus de CC de manera eficiente [14].

El PWM vector de tensión espacial es diferente de la PWM sinusoidal tradicional, que está comenzando desde el efecto global de la tensión de salida de tres fases, centrándose en cómo hacer que el motor ideal cadena magnética circular. tecnología SVPWM comparación con MASP, el componente armónico de la forma de onda de corriente de devanado es pequeña, de modo que el motor de par de pulsación se

reduce, el campo magnético giratorio es más se acerca, y la utilización de la tensión de bus de CC mejora en gran medida, y más fácilmente se da cuenta digitalización.



**Figura 1.10:** Simulación de las dinámicas de modulación vectorial por ancho de pulso acoplada a una maquina eléctrica PMSM en MATLAB/SIMULINK [1].

## 1.7. Estrategias de control no lineal

Las estrategias de control no lineal se pueden aplicar a la mayoría de sistemas, de acuerdo a los objetivos planteados, como regulación, seguimiento, estimación de parámetros desconocidos, de señales y de más.

La retroalimentación en los sistemas no lineales suele presentar desafíos adicionales en comparación con los sistemas lineales. Esto implica que las técnicas de análisis y diseño de control lineal no pueden ser directamente aplicables, y por esta razón la retroalimentación en sistemas no lineales requiere una mayor comprensión de la dinámica del sistema y el uso de herramientas para lidiar con la no linealidad, entre estas se encuentran:

- Control por modos deslizantes
- Backstepping,
- Linealización,
- Pasividad,
- Observadores de estado,

- Control óptimo,
- Control Predictivo

Sin embargo, en el presente estudio se describen las características generales de las metodologías empleadas.

## Modos deslizantes

La estabilidad y el rendimiento del control están influenciados por una gran carga de inercia debido al gran requisito del par motor. Se han utilizado muchas estrategias de control avanzadas para rastrear problemas de control y lograr un rendimiento de control satisfactorio. Sin embargo, la mayoría de estos controladores están diseñados con base en diferenciaciones repetidas debido al modelo de alto orden del sistema. Cuando se tiene en cuenta la no linealidad del dispositivo de transmisión, el diseño del controlador se vuelve más complicado. Para mejorar aún más el rendimiento del control [29].

Cuando se desconoce el límite superior de la incertidumbre en un sistema, se requiere mayor robustez para garantizar la estabilidad, la condición de coincidencia (matching condition) establece que la dinámica interna de un subsistema, debe coincidir con la generada por el diseño del controlador, la técnica backstepping, entrelaza la función de Lyapunov con el diseño del control por retroalimentación que divide un problema de diseño para el sistema completo, en una secuencia de problemas de diseño para subsistemas de un orden inferior.

Al utilizar la flexibilidad que existe con los subsistemas escalares y de orden inferior, el backstepping puede resolver problemas de estabilización, seguimiento y control robusto en condiciones menos restrictivas que con otros métodos. Para el sistema de la máquina eléctrica, se mezcla la mencionada técnica con modos deslizantes, que se describe a continuación.

Para la técnica de control por modos deslizantes se busca generar una superficie de deslizamiento por lo que se puede utilizar en cada subsistema para lidiar con las perturbaciones.

El control por modos deslizantes se ha implementado para abordar un rango considerable de diferentes tipos de problemas de control. Se puede obtener una convergencia de tiempo finito con rendimiento de control de robustez, sin embargo, el tiempo de convergencia está relacionado con los estados iniciales del sistema, lo que conduce a un período de convergencia relativamente largo para el escenario con un gran error inicial. El tiempo de convergencia, que es independiente de los estados iniciales, puede garantizarse mediante la llamada estabilidad de tiempo fijo. El control de seguimiento de la carga accionado por motores es uno de los problemas que más se enfrentan en los sistemas de conducción de motores.

Un planteamiento teórico del libro de H. Khalil [30] resulta de considerar el siguiente sistema de segundo orden, con el vector de estados  $x^T = [x_1 \ x_2]$ ,

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= h(x) + g(x)u \end{aligned} \tag{1.3}$$

donde  $h$  y  $g$  son funciones no lineales desconocidas y  $g(x) \geq g_0 > 0$  para toda  $x$ . El objetivo es diseñar una ley de control que establezca la respuesta, suponiendo para este ejemplo que se ha diseñado una ley de control que restringe la superficie del sistema  $s = a_1x_1 + x_2 = 0$  en esta superficie el movimiento se rige por  $\dot{x}_1 = -a_1x_1$ . Al decidir que el valor de  $a_1 > 0$  se garantiza que el valor de  $x(t)$  tienda a 0 y  $t$  a infinito, siendo posible controlar la tasa de convergencia mediante  $a_1$ .

La dinámica de la superficie  $s = 0$  es independiente de  $h$  y  $g$ . Tomando en cuenta que la variable  $s$ , satisface la siguiente ecuación:

$$\dot{s} = a_1\dot{x}_1 + \dot{x}_2 = a_1x_2 + h(x) + g(x)u \quad (1.4)$$

a su vez,  $h$  y  $g$  satisfacen la desigualdad

$$\left| \frac{a_1x_2 + h(x)}{g(x)} \right| \leq \varrho(x), \forall x \in R^2 \quad (1.5)$$

Para cualquier función conocida  $\varrho(x)$ .

$$V = (1/2)s^2 \quad (1.6)$$

Como una función de Lyapunov para  $\dot{s}$ , se puede obtener que:

$$\dot{V} = s\dot{s} = s[a_1x_2 + h(x) + g(x)u] \leq g(x)|s|\varrho(x) + g(x)su \quad (1.7)$$

considerando

$$u = -\beta(x)s\text{sgn}(s) \quad (1.8)$$

Con el control  $u$  mencionado se asegura la convergencia a la superficie  $s$  descrita, que en general se plantea en términos del error, según el objetivo planteado de regulación [30].

En la siguiente sección se describe la estrategia de linealización, para la comparación y análisis del sistema.

## Linealización

Parte de la teoría de linealización se utiliza para el diseño de los lazos internos del sistema, misma que se encuentra ampliamente documentada para sistemas de múltiples entradas y salidas (MIMO). El algoritmo de control por linealización, mediante transformaciones traduce al sistema modelado a un mapeo lineal entre la salida y una entrada nueva  $u$ , considerando un sistema MIMO como se muestra en la ecuación 1.9.

$$\begin{aligned} x &= f(x) + \sum_{l=1}^m g_l(x)u_l \\ y &= [h_1(x) \dots h_m(x)]^T \end{aligned} \quad (1.9)$$

Donde el sistema cuenta con el mismo número de  $m$  entradas y salidas, el vector de estado  $x \in \mathbb{R}^n$ , la entrada  $u \in \mathbb{R}^m$ , la salida  $y \in \mathbb{R}^m$ ,  $f(x)$  y  $g_1(x) \dots, g_m(x)$  son campos vectoriales suaves y  $h_1(x) \dots h_m(x)$  son funciones suaves. De acuerdo a la teoría de linealización entrada-salida, se elige un vector de salida  $[y_1 \dots, y_m]^T$  y se

deriva la salida con respecto a los estados el número de veces que sea necesario para que aparezca la entrada de control, obteniendo una cadena de integradores  $[\rho_1, \dots, \rho_m]$  donde  $\rho$  representa el grado relativo del sistema y

$$y = \frac{\partial h(x)}{\partial x} x = L_f h(x) + L_g h(x) u. \quad (1.10)$$

En donde  $L_f h(x)$  y  $L_g h(x)$  son las derivadas de Lie y se describen por:

$$L_f h(x) = \frac{\partial h(x)}{\partial x} f(x), L_g h(x) = \frac{\partial h(x)}{\partial x} g(x) \quad (1.11)$$

Si  $L_g h(x) \neq 0$  para toda  $x$ , el sistema es de grado relativo uno ( $\rho = 1$ ). En caso adverso, si  $L_g h(x) = 0$ , se requiere derivar consecutivamente hasta que:

$$L_{g_j} L_f^{\rho_l - 1} h_l(x) \neq 0 \quad (1.12)$$

Para  $1 \leq j \leq m$ , cada entero  $\rho_l$  está asociado con el  $l$ -ésimo canal de salida ( $y_l$ ).

Por lo que si se satisface la ecuación 1.12, se obtiene un sistema con la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} y_1^{(\rho_1)} \\ \dots \\ y_m^{(\rho_m)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1^{(\rho_1)} h_1(x) \\ \dots \\ L_m^{(\rho_m)} h_m(x) \end{bmatrix} + \mathbf{E}(x) \begin{bmatrix} u_1 \\ \dots \\ u_m \end{bmatrix} \quad (1.13)$$

En donde  $\mathbf{E}(x)$  se define como:

$$E(x) = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_g L_f^{\rho_1 - 1} h_1(x) & \dots & L_{g_1} L_f^{\rho_1 - 1} h_1(x) \\ \dots & \dots & \dots \\ L_{g_1} L_f^{\rho_m - 1} h_m(x) & \dots & L_{g_m} L_f^{\rho_m - 1} h_m(x) \end{bmatrix} \quad (1.14)$$

Si se satisface la matriz característica 1.14, y 1.14 no es singular, es posible obtener

$$U(x) = -\mathbf{E}^{-1}(x) \begin{bmatrix} L_f^{(\rho_1)} h_1(x) \\ \dots \\ L_f^{(\rho_m)} h_m(x) \end{bmatrix} + \mathbf{E}^{-1}(x) \begin{bmatrix} U_1 \\ \dots \\ U_m \end{bmatrix} \quad (1.15)$$

De este modo es posible reducir

$$\begin{bmatrix} y_1^{(\rho_1)} \\ \dots \\ y_m^{(\rho_m)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_1 \\ \dots \\ U_m \end{bmatrix} \quad (1.16)$$

Donde se obtiene un vector de entrada auxiliar  $[v_1 \dots v_m]^T$ , que se puede considerar par ingresar un controlador clásico basado en el error de la señal del tipo PID, como se describe a continuación.

## Compensadores P, PI, PID

Estos son los esquemas de diseño clásicos para la regulación, conocidos como controlador proporcional (P), proporcional–integral o PI y proporcional-integral-derivativo (PID), los cuales consisten en modificar la señal de control de forma P, PI o PID, de acuerdo al error entre la señal de referencia y la salida. Son de gran importancia en la estabilización de sistemas reales que operan en la vecindad de puntos de equilibrio, prueba de ello es el uso frecuente y extenso de compensadores PID en aplicaciones industriales, donde se estima que al menos el 90% de los sistemas de control industriales en el mundo, son regulados por un control PI [31] Así mismo, las ecuaciones para distintas acciones de control ( $u(t)$ ) son, para un sistema proporcional, ec. 1.17:

$$u(t) = K_p e(t) \quad C_p(s) = K_p \quad (1.17)$$

para proporcional integral, la ec. 1.18:

$$\begin{aligned} u(t) &= K_D e(t) + \frac{K_P}{T_I} \int_0^t e(\tau) d(\tau) \\ C_{PI}(s) &= K_P \left( 1 + \frac{1}{T_I s} \right) \end{aligned} \quad (1.18)$$

y para un control PID, la ec. 1.19:

$$\begin{aligned} u(t) &= K_D e(t) + \frac{K_P}{T_I} \int_0^t e(\tau) d(\tau) + K_D T_D \frac{de(t)}{dt} \\ C_{PID}(s) &= K_P \left( 1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) \end{aligned} \quad (1.19)$$

## 2.1. Modelado del vehículo eléctrico

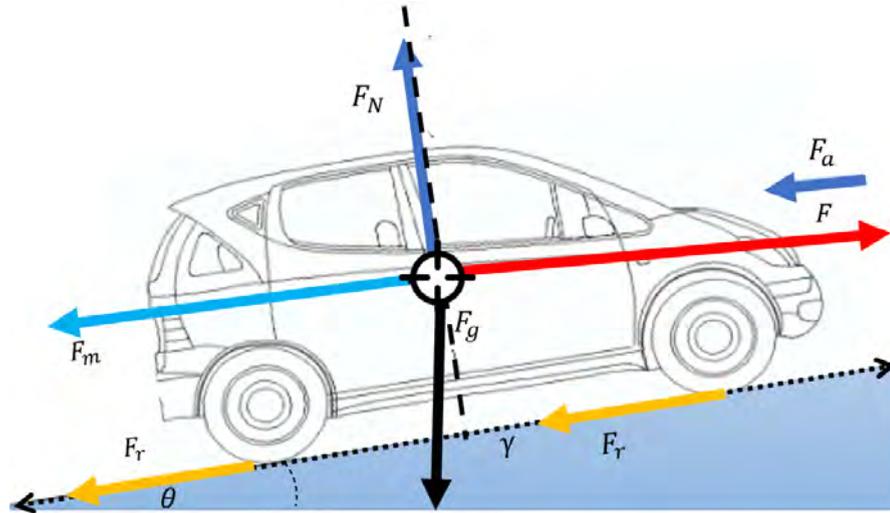
Los vehículos eléctricos constan de diversos elementos, sin embargo, las bases del diseño en los mismos, están fundamentadas en la mecánica básica. En el presente trabajo el estudio principal se enfoca en la propulsión del vehículo y se describen los modelos principales del vehículo en movimiento, así como las dinámicas que representan la máquina eléctrica.

Particularmente, el fundamento de la segunda ley del movimiento de Newton, que relaciona fuerza y aceleración, donde establece que el producto de la masa de un cuerpo por su aceleración es directamente proporcional a la magnitud de la fuerza que actúa sobre dicho cuerpo. A continuación, con relación a las dinámicas del vehículo en movimiento se utilizan modelos matemáticos que, mediante ecuaciones diferenciales ordinarias describen la respuesta dinámica del sistema, ya que el objetivo de este trabajo es comparar diversos controladores en un modelo de la máquina eléctrica acoplada al vehículo, los elementos contemplados son:

- Las fuerzas que interactúan durante el movimiento del vehículo.
- Los ciclos de manejo, donde se observa la aceleración y frenado por parte del conductor y se pueden ingresar a la dinámica de fuerzas del vehículo.
- La máquina eléctrica, que funcionará tanto en modo motor como generador, se contempla un motor trifásico síncrono de imanes permanentes,

A continuación en el presente capítulo, se abordará la dinámica de fuerzas que interactúan en un vehículo eléctrico. Después se describe la máquina eléctrica y la integración de ambas dinámicas en presencia de ciclos de manejo preestablecidos, para a su vez, describir la dinámica perteneciente al sistema de conversión bidireccional para la carga y descarga de las baterías del VE.

En la dinámica de cualquier vehículo, ya sea eléctrico, híbrido o de combustión, se consideran diferentes fuerzas en contra del movimiento, además de la fuerza de empuje, se considero para este trabajo el diagrama que a continuación se presenta que describe al vehículo con una masa en movimiento [32].



**Figura 2.1:** Dinámica de fuerzas correspondientes a la resistencia total perteneciente al vehículo (Autoría Propia).

Las fuerzas representadas que interactúan en la dinámica del VE partiendo de la segunda ley de Newton, son para este caso:

- La fuerza de tracción o de empuje  $F$ , la cual se genera a partir del tren de impulsión
- La fuerza por resistencia aerodinámica que se opone al vehículo causada por el aire sobre la superficie frontal del vehículo  $F_a$
- También se contempla la resistencia al rodamiento  $F_r$ , siendo la fuerza que se presenta por la rodadura de las llantas en la superficie del camino.
- La fuerza de gravedad  $F_g$  al conducir por superficies inclinadas.
- La inercia  $F_m$ , causada por la masa cuando el vehículo se encuentra en aceleración.
- El coeficiente de arrastre o aerodinámico de un vehículo estándar suele estar en un rango de 0.25 a 0.4. Para este caso se utilizará un valor fijo 0.3.

Por lo que, partiendo de la segunda ley de Newton, la ecuación que describe a la dinámica del movimiento del VE es:

$$F = F_a + F_r + F_g + F_m$$

$$F = \frac{1}{2}\rho_a v^2(t)C_d A_v + mgC_r \cos \gamma(t) + m \frac{dv(t)}{dt} \quad (2.1)$$

Donde:

- $\rho_a$  representa la densidad del aire en el ambiente

- $v(t)$ , la velocidad lineal del movimiento del vehículo, que en general corresponde al ciclo de manejo.
- $g$  la aceleración de la gravedad.
- $C_r$ , el coeficiente de resistencia al rodamiento del neumático.
- $C_d$  el coeficiente de arrastre, el cual para este análisis se tomará un valor fijo de 0.3.
- $A_v$  Área frontal perteneciente al vehículo.
- $\gamma$  La pendiente del camino.

Para calcular la velocidad angular representada por  $\omega_p$  y el par  $T_p$  (los cuales debe suministrar la máquina eléctrica), correspondientes al tren de impulsión, es necesario contemplar el radio de la llanta  $r_u$ , la relación de transformación del diferencial  $R_f$ , la relación de la transmisión representada como  $k_{tr}$ , a partir de las cuales se obtiene:

$$\begin{cases} \omega(t) = \frac{R_f}{r_u} k_{tr} v(t) \\ T_p(t) = \frac{r_u}{R_f k_{tr}} F(t) \end{cases} \quad (2.2)$$

A partir de la ecuación anterior y el acoplamiento de la ME como fuente mecánica, se obtiene la potencia deseada por el operador. A continuación se describe el método para obtener la velocidad lineal del vehículo.

## 2.2. Ciclos de manejo

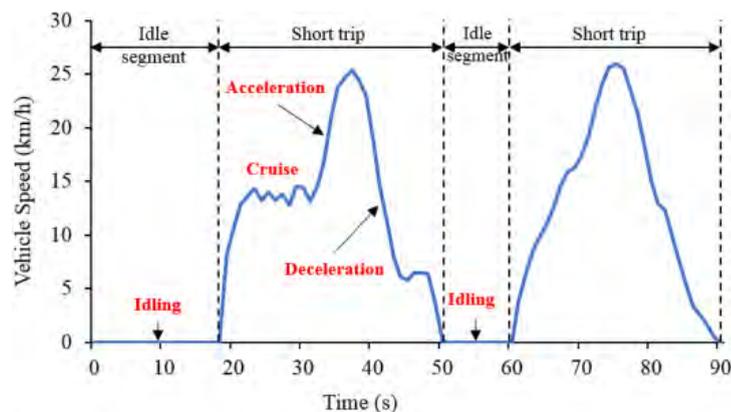
Durante los periodos de conducción, los vehículos se encuentran sometidos a diferentes condiciones, partiendo desde el operador, condiciones climatológicas, como a su vez, las características particulares de la carretera, incluyendo por su parte las condiciones geográficas y como afectan en gran medida el desempeño del vehículo.

El desarrollo urbano, por otro lado, define la cantidad de tráfico vehicular que afectará la forma en que se conduce el vehículo, teniendo mayores o menores ciclos de arranque/frenado. El ciclo de conducción es una serie temporal de velocidades presente en vehículos que representa el patrón de conducción promedio del mundo real en una región o ciudad determinada [33].

La velocidad del vehículo  $v$  puede ser calculada en función de la fuerza  $F$ . Dependiendo del valor de  $F$ , el vehículo puede operar en tres modos diferentes:

- $F > 0$ , tracción; es decir, el motor proporciona una fuerza de propulsión al vehículo
- $F < 0$ , frenado; los frenos disipan la energía cinética del vehículo, donde el motor puede desconectarse o engancharse (para considerar el corte de combustible).
- $F = 0$ , Punto muerto; el motor se desconecta y las pérdidas de resistencia de los vehículos son exactamente igualados por la disminución de su energía cinética [34].

Por ejemplo para el caso del ciclo de manejo mostrado en la figura 2.2, que muestra la dinámica de un velocidad en (km/h), donde antes de los primeros 20 segundos, el vehículo se encuentra en reposo, luego acelera hasta mantener una velocidad crucero cercana a los 15 km/h, nuevamente se acelera hasta llegar a un máximo en el tiempo cercano a 40 s, para posteriormente frenar (desacelerar hasta los 50 s), cabe mencionar que en los segmentos de frenado se puede lograr el frenado regenerativo.



**Figura 2.2:** Ciclo de manejo con las dinámicas de velocidad representativa.

[35]

El ciclo de manejo se puede interpretar como el inicio en el reposo, la aceleración del conductor, posteriormente se puede mantener la velocidad, durante un rango de tiempo, después el frenado hasta el reposo y así continuar con las dinámicas que pueden ser representativas para algunas ciudades, como en [36] donde se enfocan en la evaluación de emisiones, así como el combustible.

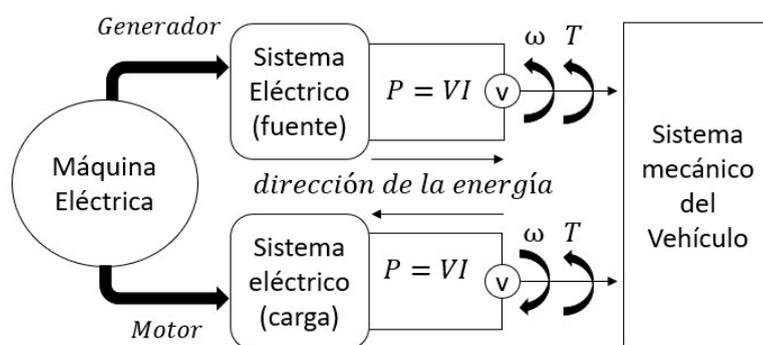
## 2.3. Modelado de la Máquina Eléctrica

Se define de este modo a todo dispositivo que transforme la energía mecánica en energía eléctrica o su configuración inversa. De esta manera, la máquina eléctrica actúa en dos formas: generador y motor respectivamente. Actualmente es utilizada en muchos ámbitos cotidianos, e incluso para las configuraciones de vehículos híbridos y eléctricos.

Las máquinas eléctricas se consideran convertidores de potencia electromecánicos, de modo que convierten la energía mecánica en eléctrica, como en los generadores, y convierten la energía eléctrica en energía mecánica, como en los motores, además de los transformadores que elevan o disminuyen el nivel de voltaje o corriente, según sea la necesidad, que en este trabajo no se estudian.

Para los generadores, se requiere una fuente de potencia mecánica para girar el eje de la máquina (motor principal), a través del par aplicado ( $T$ ), a una velocidad fija o variable ( $\omega$ ), como en el caso de los vehículos, para desarrollar una fuerza electromotriz (diferencia de voltaje) en los terminales de la máquina ( $v$ ) y viceversa para la acción del motor.

Por lo tanto, el campo eléctrico se considera el medio de acoplamiento entre la energía eléctrica y la salida mecánica del motor. Las máquinas eléctricas difieren en su tipo de fuente magnética interna, construcción y operación. En este capítulo, se discute la fuente del campo magnético en las máquinas eléctricas en general y su geometría de estator y rotor [37].



**Figura 2.3:** Esquema de funcionamiento de una Máquina eléctrica (Autoría Propia).

Idealmente, se espera que las máquinas eléctricas acopladas a VE sean de alta eficiencia, tengan un alto par nominal, alto par de arranque, amplio rango de velocidades, capacidad de sobrecarga, alta potencia a velocidades de crucero, alto rango de

velocidad de potencia constante, densidad de potencia, respuesta dinámica rápida, buena capacidad de debilitamiento del flujo a altas velocidades, alta confiabilidad y buenas características de tolerancia a fallas. Sin embargo, la topología y el principio de funcionamiento de la máquina dictan las medidas de diseño y control que se necesitan para cumplir con estos requisitos. Además, la máquina que cumple con todos estos requisitos debe tener un costo aceptable [38].

Las dinámicas de funcionamiento de la máquina eléctrica se pueden describir por el modelo matemático basado en ecuaciones diferenciales no lineales, las cuales se expresan de acuerdo a la dinámica eléctrica ec. (2.3) en las fases ( $abc$ ) y por movimiento ec. (2.4) [39].

$$V_{abc} = RI_{abc} + \frac{d}{dt}\lambda_{abc} \quad (2.3)$$

$$J\frac{d\omega_r}{dt} = T_e - T_b - T_L \quad (2.4)$$

donde  $V$  representa el voltaje,  $I$  la corriente,  $R$  la resistencia y el término  $\frac{d}{dt}\lambda$  el voltaje por inductancia, para cada fase respectivamente.  $J$  es la inercia,  $\omega_r$  la velocidad,  $T_e$  el par electromagnético,  $T_b$  el de fricción y  $T_L$  el de carga. Así mismo, las dinámicas de las corrientes  $I(t)$ , de las tres fases ( $abc$ ) y  $\omega_r$ , se pueden agrupar en el vector de estados  $x$  para que el sistema no lineal pueda ser representado de la forma,

$$\dot{x} = f(x, t) + bu(t) \quad (2.5)$$

La ec. 2.3 representa las tres fases A, B, C, de los voltajes del estator y por la fuerza electromotriz gira el rotor y produce la dinámica de la ec. 2.4, lo que produce en total cuatro ecuaciones senoidales. Sin embargo, para simplificar el modelo, es posible aplicar la transformación de tres a dos fases, conocida como transformación de Park.

Es bien sabido que, las ecuaciones que describen el comportamiento de una máquina eléctrica, se pueden convertir a una forma más simple. Dicha transformación fue desarrollada por primera vez para una máquina trifásica simétrica basada en la teoría de dos reacciones de Blondel para máquinas síncronas. Estas cantidades auxiliares produjeron una transformación de fase variable. Así, la transformación de Blondel-Park se ha utilizado de forma rutinaria y amplia desde entonces.

Los motores de imán permanente sin escobillas, en la actualidad presentan ciertas ventajas como un mayor par por inercia ante aceleración y desaceleración, que da como resultado un mejor desempeño con respecto a otros motores. El desarrollo del modelo que a continuación se describe, puede ser empleado tanto para motores de imán permanente como en motores de inducción. Sin embargo, se debe notar que la etapa de potencia requerida por el motor de imanes permanentes, es diferente ya que dicho motor alimenta sus fases por una red trifásica de tensiones.

## Aplicación de la transformada de Park

En general, una de las dificultades inherentes a la descripción del comportamiento de la mayoría de las máquinas eléctricas rotativas es que las inductancias de la máquina son una función tanto de los factores mecánicos como de los eléctricos. Para simplificar este proceso, R.H. Park desarrolló una transformación que hizo que el análisis de las máquinas eléctricas más sencillo al transformar las ecuaciones del motor en un marco de referencia que gira sincrónicamente con los campos de la máquina. Este método ampliamente difundido, tiene como principal objetivo facilitar el análisis y control de coordenadas del sistema trifásico a otro sistema de referencia  $d-q-0$ . Dicha expresión se puede representar matricialmente de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \\ f_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \left( \theta - \frac{2\phi}{3} \right) & \cos \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ -\sin \theta & -\sin \left( \theta - \frac{2\phi}{3} \right) & -\sin \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Por lo que, para una representación más compacta se tiene la siguiente ecuación:

$$f_{dq0} = T(f_{abc}) \quad (2.7)$$

Con lo anterior, es posible representar las dinámicas eléctricas en un marco de coordenadas  $dq0$ , además de la mecánica, mediante las ecuaciones siguientes

$$\begin{aligned} \frac{di_{sd}}{dt} &= -\frac{R}{L}i_{sd} + p\omega_r i_{sq} + \frac{1}{L}v_{sd} \\ &= f_1 + \frac{1}{L}v_{sd} \\ \frac{di_{sq}}{dt} &= -p\omega_r i_{sd} - \frac{R}{L}i_{sq} - \frac{p}{L}\lambda_f \omega_r + \frac{1}{L}v_{sq} \\ &= f_2 + \frac{1}{L}v_{sq} \\ \frac{d\omega_r}{dt} &= \frac{3p}{2J}\lambda_f i_{sq} - \frac{B}{J}\omega_r - \frac{1}{J}T_p \\ &= f_3 - \frac{1}{J}T_L \end{aligned} \quad (2.8)$$

donde  $i_{sd}$ ,  $i_{sq}$  representan las corrientes de estator en los ejes (d y q) respectivamente, medidas en [A],  $R$  es la resistencia en [ $\Omega$ ],  $L$  es la inductancia en [H], considerando  $L_d = L_q$ ,  $p$  es el número de pares de polos,  $\omega_r$  es la velocidad del rotor en [ $rad/s$ ], la cual corresponde a la de la ec. (2.4),  $v_{sd}$  y  $v_{sq}$  son las componentes de voltajes de estator en los ejes (d y q) respectivamente, en [V],  $\lambda_f$  es el flujo de enlace del imán permanente en [We],  $J$  es el momento de inercia en [ $kg \cdot m^2$ ],  $B$  es el coeficiente de fricción en [ $N \cdot m \cdot s$ ], y  $T_L$  es el par de carga en [N m].

Además, algunos elementos pueden ser agrupados de la forma

$$f_1 = -\frac{R}{L}i_{sd} + p\omega_r i_{sq}$$

$$f_2 = -p\omega_r i_{sd} - \frac{R}{L} i_{sq} - \frac{p}{L} \lambda_f \omega_r$$

$$f_3 = \frac{3p}{2J} \lambda_f i_{sq} - \frac{B}{J} \omega_r$$

Mediante el modelo matemático anterior, es posible diseñar algoritmos de control no lineal, para establecer las dinámicas deseadas. En la siguiente sección, se describen algunas propuestas de controladores que serán analizadas en el presente trabajo.

## 2.4. Algoritmos de control para ME

En el vehículo se busca obtener la velocidad que el operador desea, lo cual, se obtendría de la aceleración y frenado que el operador esté realizando y se obtiene con la referencia del ciclo de manejo respectivo. Para lograr obtener la velocidad, la máquina eléctrica debe conseguir la velocidad de referencia y compensar el par de carga. Lo cual, se consigue al aplicar algoritmos de control, que compensen las dinámicas no deseadas e impongan dinámicas que reduzcan error de la señal deseada.

### 2.4.1. Control por linealización

Para desarrollar el control PI, se parte por el principio de linealización, donde, para este caso, se cancelan las dinámicas no lineales  $f_1$  y  $f_2$  con el primer nivel de control, mediante  $u_d$  y  $u_q$  y dejar un siguiente nivel de control, de la forma,

$$u_d = -L(f_1 + v_d)$$

$$u_q = -L(f_2 + v_q)$$

Considerando el nuevo control virtual  $(v_d, v_q)$  donde es posible agregar la dinámica deseada, que en el presente trabajo consiste en obtener la velocidad del ciclo de manejo, mediante un algoritmo PID (que resulta de los más utilizados en la literatura), contemplando así el error de velocidad  $e_\omega = \omega_r - \omega_{ref}$ , de la forma.

$$v_d = k_{1d} e_{id}$$

$$v_q = \frac{2J}{3P\lambda_f} (k_{1q} e_\omega + k_{2q} \int e_\omega + k_{3q} \frac{e_\omega}{dt})$$

Con lo anterior, finalmente el controlador que se puede aplicar al sistema original queda de la siguiente manera:

$$u_d = -L(f_1 + k_{1d} e_{id}) \tag{2.9}$$

$$u_q = -L(f_2 + \frac{2J}{3P\lambda_f} (k_{1q} e_\omega + k_{2q} \int e_\omega + k_{3q} \frac{e_\omega}{dt})) \tag{2.10}$$

donde  $k_i$ , para  $i = 1, 2, 3$ , son las respectivas ganancias a sintonizar en el controlador, para que la respuesta sea más rápida o con menos sobrepaso.

La siguiente sección describe otro algoritmo de control, desarrollado para control robusto.

### 2.4.2. Control por modos deslizantes

Para este algoritmo de control se parte de diseñar una superficie de equilibrio  $S$ , en la cual, el sistema tenga el comportamiento deseado, donde se define el error de la señal que interesa tienda a cero.

$$S_1(i_d) = \lambda_i(i_d - i_{dr})$$

$$S_2(\omega) = \lambda_\omega(\omega_r - \omega_{ref}) + \frac{d}{dt}(\omega_r - \omega_{ref})$$

Donde:

- $\lambda_i > 0$ ,  $\lambda_\omega > 0$  son constantes.
- $i_{dr}$  es la referencia de corriente.
- $\omega_{ref}$  corresponde a representar la velocidad.

Posteriormente, partiendo de la teoría de Lyapunov, es posible verificar la convergencia de las superficies al diseñar la ley de control, de tal modo que  $S\dot{S} < 0$ . Siguiendo la dinámica de la forma de las superficies como:  $\dot{S} = E + FV_s$ , de este modo, para nuestra dinámica se puede observar que:

$$\dot{S}_1(i_d) = \lambda_i(i_d - i_{dr})$$

$$\dot{S}_2(\omega) = \lambda_\omega(\dot{\omega}_r - \dot{\omega}_{ref}) + \frac{d}{dt}(\dot{\omega}_r - \dot{\omega}_{ref})$$

$$E = \begin{cases} -(\lambda_i i_{dr}) + (\lambda_i) f_1 \\ -(\ddot{\omega}_{ref} + \lambda_\omega \dot{\omega}_{ref} - \frac{1}{J} \dot{T}_L) + (\lambda_\omega - \frac{B}{J}) f_3 + \frac{3P}{2J} \lambda_f f_2 \end{cases}$$

$$F = \begin{bmatrix} (\lambda_i) \frac{1}{L_d} & 0 \\ 0 & \frac{3P}{2J} \lambda_f \frac{1}{L_q} \end{bmatrix}; V_s = \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix}$$

Para asegurar que  $S$  es invariante, se utiliza la teoría de estabilidad de Lyapunov, donde se tiene la siguiente condición:  $S\dot{S} < 0$ , partiendo de esto es posible elegir la ley de control para aplicar los voltajes presentes en el estator, de la forma

$$V_s = -F^{-1}E - F^{-1}K_c(\text{sign}(S))$$

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = -F^{-1}E - F^{-1} \begin{bmatrix} k_{i1} & 0 \\ 0 & k_{\omega 1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \end{bmatrix}$$

Los resultados en simulación y comparativa de los algoritmos de control se muestran en el siguiente capítulo, los cuales se obtienen en la plataforma de Simulink, donde se programan las ecuaciones dinámicas de los elementos dinámicos, con respecto a la propulsión del vehículo.

## Resultados y análisis

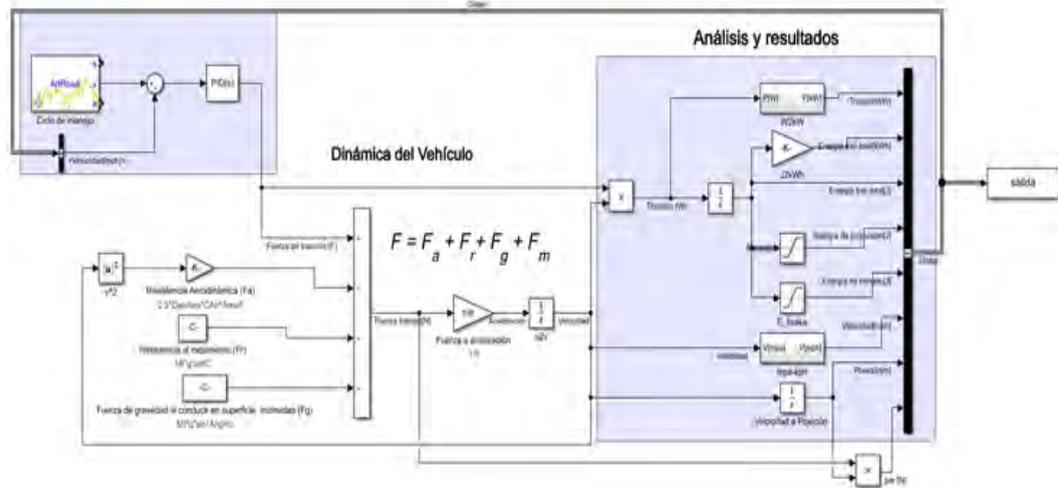
---

Para validar las teorías anteriores, se procedió a simular las dinámicas de un automóvil compacto y de una máquina eléctrica con la capacidad de acelerar el sistema. Los parámetros se describen a continuación, así como algunas figuras representativas de las principales señales de interés.

### 3.1. Parámetros de simulación para la dinámica del vehículo

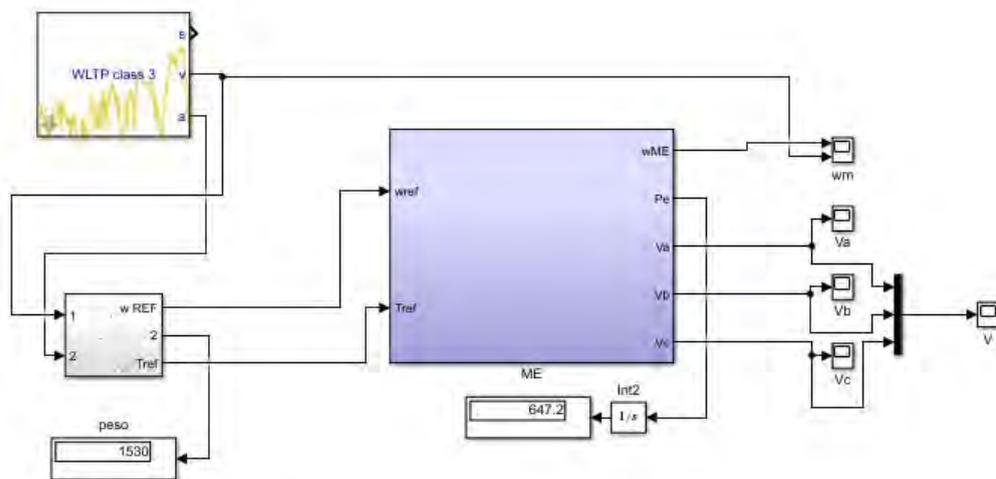
Se realizó una simulación de las dinámicas presentes en un vehículo previo a la simulación de la máquina eléctrica, donde se contemplan los siguientes parámetros para su simulación en Simulink de Matlab, ya que es un software que incluso puede interactuar con algunas tarjetas de adquisición para tiempo real:

- Una masa total de 1200 kilogramos, basándose en el peso de un Nissan Platina (vehículo compacto) incluyendo el peso adicional de los pasajeros.
- La fuerza que ejerce la gravedad con un valor de 11,760  $N$ .
- Densidad del aire equivalente a  $1.1625 \text{ kg/m}^3$  con base al Cálculo de la densidad del aire utilizando la formula del CIPM-2007 [40].
- el área frontal del vehículo estimada en  $2 \text{ m}^2$ .
- Un coeficiente aerodinámico de 0.3.
- El coeficiente de arrastre con un valor de 0.3.
- Adicionalmente, se contempla un ángulo de inclinación de 0 [41].



**Figura 3.1:** Simulación de las dinámicas pertenecientes a un vehículo en MATLAB/-SIMULINK (Autoría Propia).

Por otro lado, se realizó la simulación de un motor de imanes permanentes al cual se le aplicaron dos algoritmos de control, en la plataforma Simulink de Matlab. El diagrama de bloques se muestra en la Figura 3.2, donde el subsistema del bloque morado contiene la programación del modelo del motor y el algoritmo de control en otro subsistema para cambiar la prueba, respectivamente. Los parámetros utilizados para analizar el desempeño de la maquina, en la simulación se muestran en la Tabla 3.1.



**Figura 3.2:** Simulación de la máquina eléctrica PMSM que cuenta con la referencia de Ciclo de Manejo realizado en MATLAB/SIMULINK (Autoría Propia).

A continuación se muestra el resultado de la simulación de un motor eléctrico de imanes permanente - PMSM al cual se le aplicó un controlador por modos deslizantes,

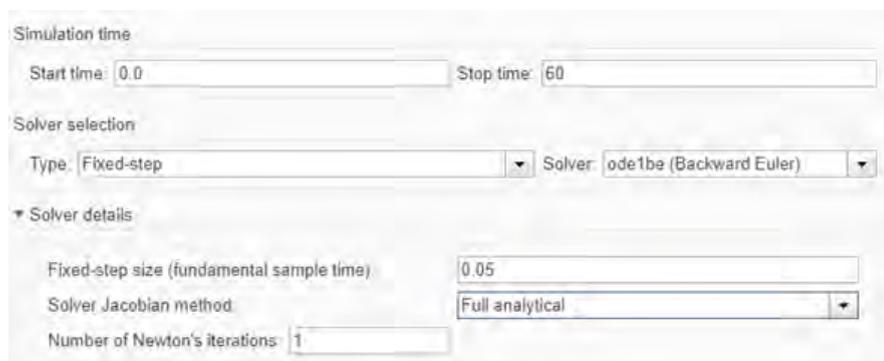
**Tabla 3.1:** Parámetros del motor

Parámetros	Valores
$R$	$0.013\omega$
$L$	$0.001H$
$\lambda_f$	$0.15[We]$
$J$	$0.0045[kg.m^2]$
$B$	$0.0008[N.m.s]$
$p$	4

donde se observa de primera mano la respuesta de velocidad a la salida, puesto que es la variable principal mediante la cual es posible observar el comportamiento del funcionamiento de la estrategia de control aplicada en el sistema.

### 3.2. Algoritmo de control por Linealización aplicado al modelo del PMSM

Por las dinámicas del modelo y el control de linealización, se configura el método de solución, como se muestra en la figura 3.3, con paso de muestreo fijo de 50 milisegundos.



**Figura 3.3:** Panel de configuración de MATLAB/SIMULINK, donde se observa los valores y Solver utilizados para la simulación con el algoritmo por modos deslizantes.

El método de solución utilizado para este control fue ode1be (Backward Euler) a paso fijo. El tiempo de muestreo fundamental usado es de 0.05, lo que implica 20 muestras por cada segundo, el muestreo se modificó hasta ese valor ya que se observan

menores cambios drásticos en la dinámica de velocidad y una mayor aproximación de la respuesta del sistema con base a la referencia.

Por otro lado, otra parte del análisis consiste en variar las ganancias utilizadas en el algoritmo de control, donde se observaron mejores resultados con los siguientes valores:

$$kd = .01;$$

$$kq1 = 100000;$$

$$kq2 = 10.$$

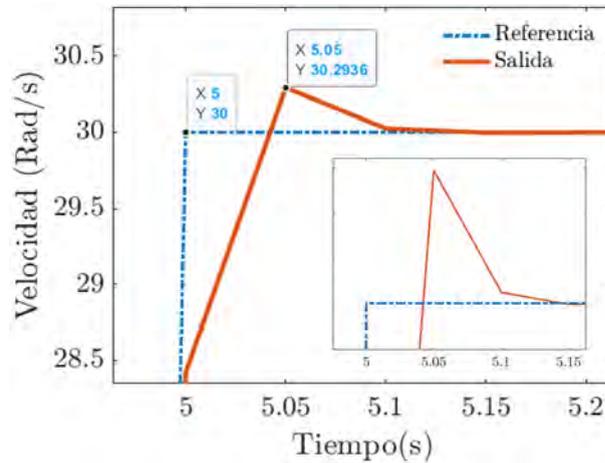
Si se reducía  $kq1$ , la oscilación de la respuesta incrementaba, de manera similar con los valores en  $kd$ . Para el caso de  $kq2$ , al incrementar o reducir el valor, incrementaba el error en la respuesta del sistema respecto a la referencia en términos de velocidad.

Es posible reducir el error a la salida respecto a la referencia de velocidad, incrementando los valores en  $kq1$  y  $kq2$ , sin embargo, esto genera incrementos repentinos de voltaje cada vez más grandes en relación con el incremento de las ganancias, con cada incremento de velocidad.

A su vez, el valor de referencia del torque, al incrementar o reducir tomando referencias fijas, crea perturbaciones a la salida de tensión, si éste no correspondía con los cambios de velocidad, para este ejemplo se utilizó la referencia de aceleración basada en los ciclos de manejo.

### 3.3. Resultados de regulación para velocidad mediante el algoritmo de linealización

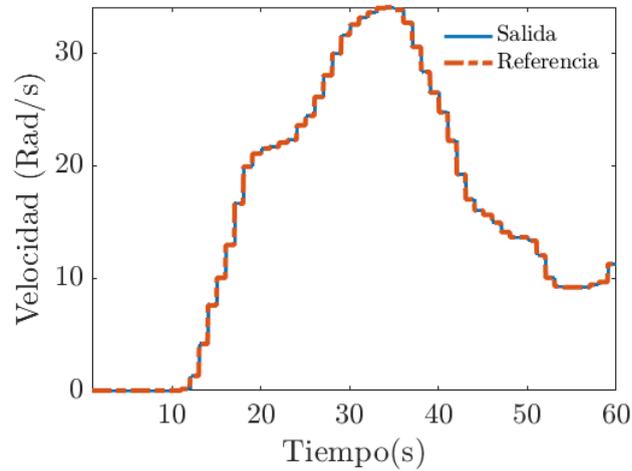
En la figura 3.4 se observa un acercamiento de la respuesta del sistema con una referencia de velocidad tipo escalón, que en el segundo 5 termina en un valor de  $30Rad/s$ , donde se puede apreciar un sobrepaso (cercano al 1%) típico en la aplicación de este tipo de señales. Es posible notar el incremento de velocidad (salida) para la máquina eléctrica, donde la referencia deseada se obtiene con el controlador de linealización aplicado al modelo de la máquina eléctrica.



**Figura 3.4:** Comparación de referencia y respuesta obtenida en la simulación de la máquina eléctrica con el Algoritmo de control PI utilizando una referencia de escalón unitario (Autoría Propia).

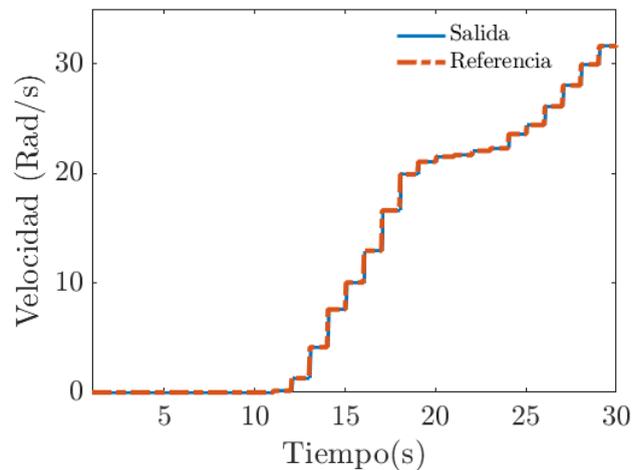
Ampliando la gráfica, es posible observar en que el sobrepaso tiene un valor de  $0.29 \text{ Rad/s}$  por encima de los 30, a su vez, un tiempo de asentamiento de 40 milisegundos y un retardo de 2 milisegundos respecto a la referencia.

Luego se realizó una simulación incorporando como referencia ciclos de manejo WLTP Class 3, ya que se considera un estándar global para determinar diferentes perfiles de consumo, de igual forma, dicho procedimiento utiliza perfiles de manejo reales, por lo que se utilizará como referencia de velocidad en este estudio. Se observa el desempeño del algoritmo de control por linealización exacta en la figura 3.5, donde se emulan 60 segundos de ciclos de manejo y se tiene una velocidad máxima de  $34.07 \text{ rad/s}$  equivalente a  $44.49 \text{ km/h}$  considerando un radio de la llanta de  $0.3628 \text{ m}$ .



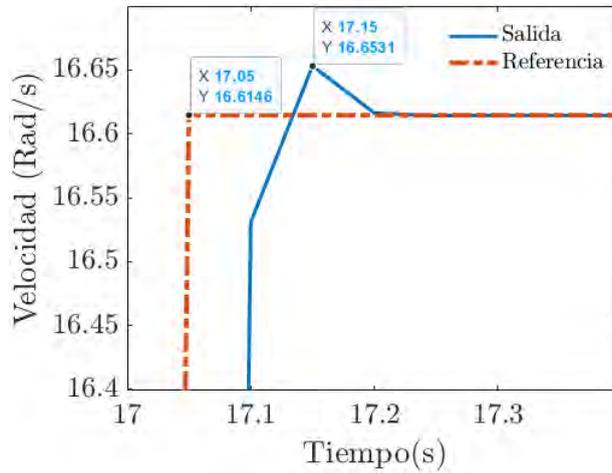
**Figura 3.5:** Resultados de la comparación de la velocidad de referencia tomada de los Ciclos de manejo WLTP Class 3 con respecto a la salida del sistema, utilizando el algoritmo de control por linealización exacta (Autoría Propia).

A los 30 segundos de simulación, se llega a una aceleración de  $34 \text{ rad/s}$  y no se aprecia diferencia alguna entre la referencia y la respuesta del sistema como se observa en 3.6.



**Figura 3.6:** Acercamiento de los primeros 30 segundos de la comparación de la velocidad de referencia tomada de los Ciclos de manejo WLTP Class 3, en comparación con la salida del sistema utilizando el algoritmo de control por linealización exacta.

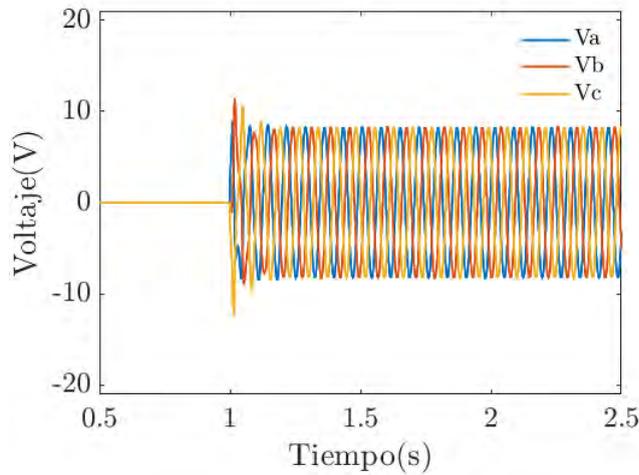
Por otro lado, al realizar una ampliación de la gráfica se hace visible un sobrepaso de 0.0385 (lo que se considera aceptable), como se observa en la figura 3.7:



**Figura 3.7:** Ampliación para observar el sobrepaso en el segundo 5.05 de la simulación vista en la figura 3.5 (Autoría Propia)

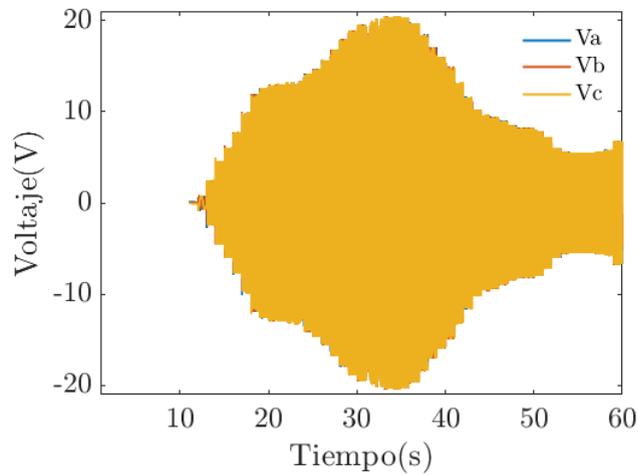
A continuación se observan las gráficas de los voltajes A B C, tanto en la simulación con referencia del Ciclo de manejo, como por escalón unitario.

En la figura 3.8, donde los voltajes A B C oscilan en  $\pm 10v$ , teniendo al inicio (en el primer segundo) un incremento correspondiente al incremento de la velocidad.



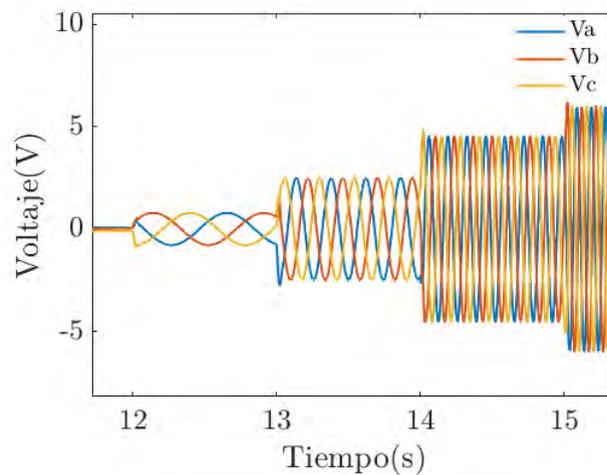
**Figura 3.8:** Gráfica de voltajes A B C ante la referencia de entrada tipo escalón unitario.

Al realizarse la simulación con el ciclo de manejo, se obtienen diferentes perfiles de aceleración y desaceleración durante el ciclo, esto puede afectar la tensión como se observa en la figura 3.9, al ser un ciclo de 60 segundos, es difícil apreciar la señal senoidal, pero se observa la variación máxima, que corresponde al seguimiento de los incrementos y decrementos de velocidad, correspondientes a la aceleración y frenado.



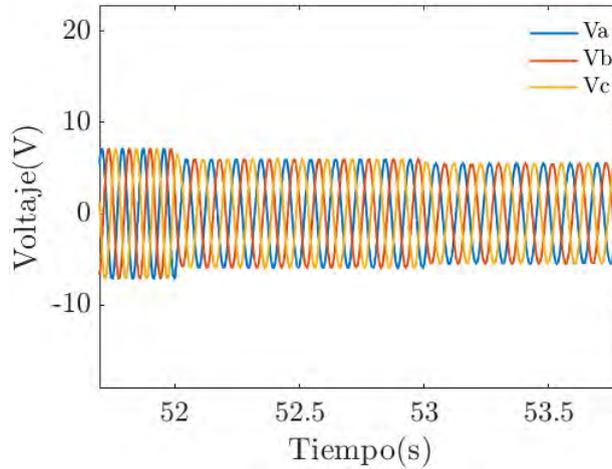
**Figura 3.9:** Gráfica de voltajes A B C ante la referencia de entrada de ciclos de manejo con Algoritmo PI

En la figura 3.10 se realiza una ampliación durante los segundos 11.5 a 15.5, donde es apreciable como afecta la aceleración o frenado del vehículo al valor máximo de voltaje para conseguir que el modelo llegue al valor de referencia.



**Figura 3.10:** Gráfica de voltajes A B C ante la referencia velocidad del ciclo de manejo con el algoritmo PI durante los segundos 11.5 a 15.5

Luego, como se puede observar en la figura 3.11, se tiene un acercamiento al periodo de desaceleración de la ME en función de los ciclos de manejo durante el periodo de 50 a 55 segundos, donde se observan los voltajes ABC.

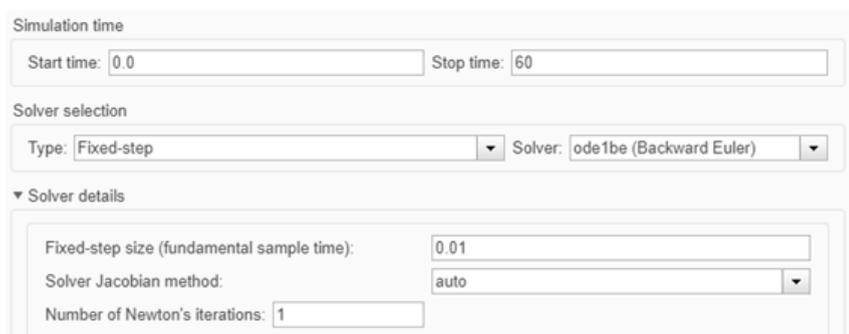


**Figura 3.11:** Gráfica de voltajes A B C ante la referencia velocidad del ciclo de manejo con el algoritmo PI durante los segundos 51.5 a 53.

En la siguiente sección, se analiza la estrategia de control por modos deslizantes en contraste con el controlador anterior.

### 3.4. Algoritmo de control por modos deslizantes

Para el buen funcionamiento de la simulación con este controlador, se utilizó la configuración mostrada en la figura 3.12 para obtener tanto una visualización como desempeño adecuado del algoritmo.



**Figura 3.12:** Panel de configuración de MATLAB/SIMULINK, donde se observa los valores y Solver utilizados para la simulación con el algoritmo por modos deslizantes.

Se utilizó el método *ode1be* (Backward Euler) a paso fijo, similar al controlador de linealización. No obstante, el tiempo de muestreo fue reducido a 0.01, lo que incrementa cinco veces más operaciones en cómputo, que el algoritmo de la sección anterior.

Los valores de las ganancias fueron ajustados para observar una mejor respuesta a la salida del sistema donde se tiene que, para la primera sintonización se opto por los siguientes valores:

$$\begin{aligned}kd &= 1; \\kq1 &= 350; \\kq2 &= 1000.\end{aligned}$$

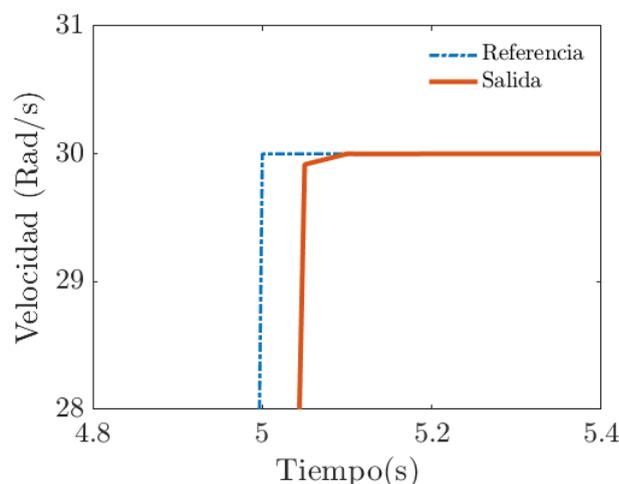
Sin embargo, se obtuvo una notoria mejoría al utilizar la siguiente sintonización:

$$\begin{aligned}kd &= 13; \\kq1 &= 100; \\kq2 &= 1000000.\end{aligned}$$

Al incrementar el valor de  $kq2$ , es posible observar una notoria reducción del error de la respuesta de velocidad, sin embargo, esto provoca mayores variaciones en la tensión de salida, caso contrario en la reducción de dicho valor donde se observa correspondientemente un incremento del error de velocidad.

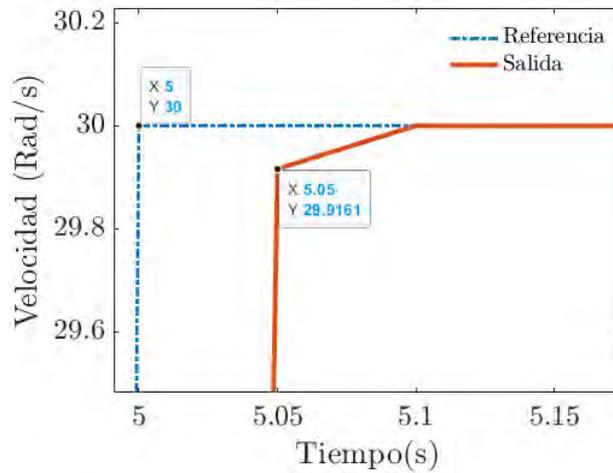
El valor en  $kd$  disminuye en menor medida la distancia de los picos del error de velocidad en la señal de salida del sistema con su incremento. Para este caso, al incrementar o reducir el torque de referencia del motor, no se observó variación en la respuesta de velocidad o tensión.

En la figura 3.13 se puede apreciar un retardo de 0.05 segundos de la respuesta en comparación con la referencia, sin mostrar oscilaciones en la respuesta.



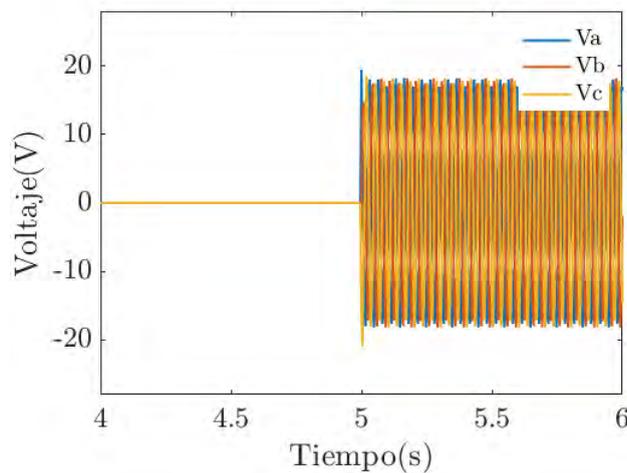
**Figura 3.13:** Respuesta obtenida en la simulación de la máquina eléctrica con el Algoritmo de Modos Deslizantes utilizando una referencia de escalón unitario.

Otro acercamiento se puede apreciar en la figura 3.14 donde la respuesta del sistema converge con la referencia en el segundo 5.1, que es muy cercano al valor del algoritmo por linealización, solo que en este no se tiene sobrepaso.



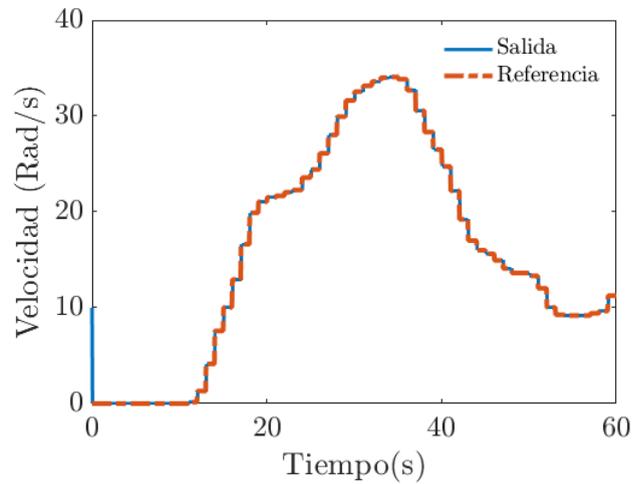
**Figura 3.14:** Acercamiento de la comparación de referencia y respuesta obtenida en la simulación con el Algoritmo de Modos Deslizantes de la figura 3.13.

A su vez, la máquina eléctrica tiene pequeños picos de voltaje como se observa en la figura 3.15 inferior a 2 voltios durante un tiempo inferior a 0.01 segundos, donde después se normaliza en relación a la carga.



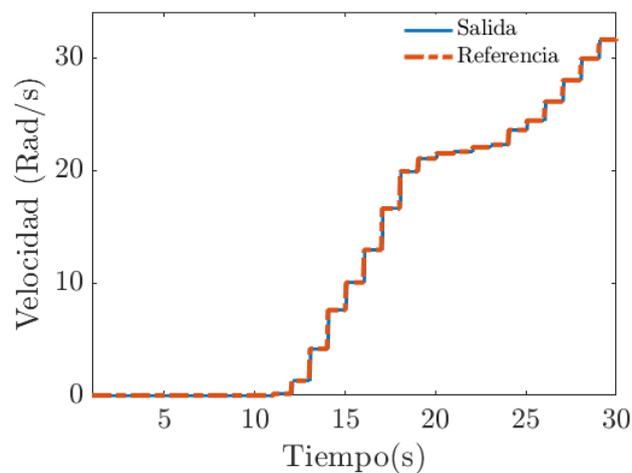
**Figura 3.15:** Señales de Voltaje aplicadas en la simulación de la máquina eléctrica con el Algoritmo de Modos Deslizantes utilizando una referencia de escalón unitario.

Para el caso de la simulación ante la referencia del ciclo de manejo el comportamiento que se observó fue muy similar como la figura 3.16, ya que no se observan diferencias notorias entre la señal de referencia y la respuesta obtenida en relación velocidad/tiempo.



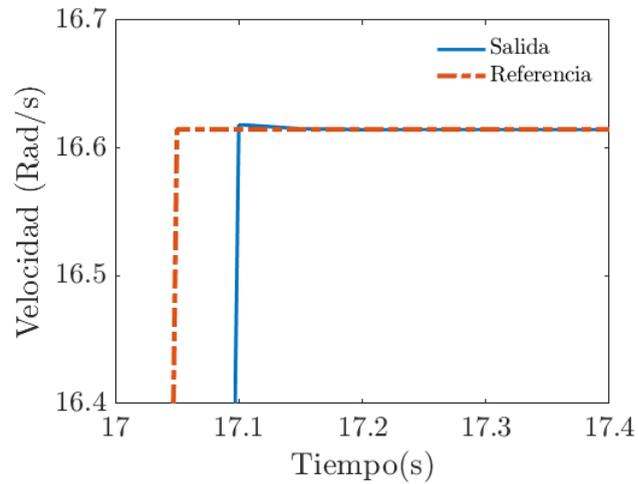
**Figura 3.16:** Ciclo de manejo WLTP class 3 de 60 s donde se observa la respuesta de la velocidad de entrada con relación a la salida del sistema, utilizando el algoritmo de control por modos deslizantes.

A su vez, en la sección de aceleración, tampoco se observaron cambios importantes debido al incremento irregular de la carga, como se puede apreciar en la figura [3.17](#)



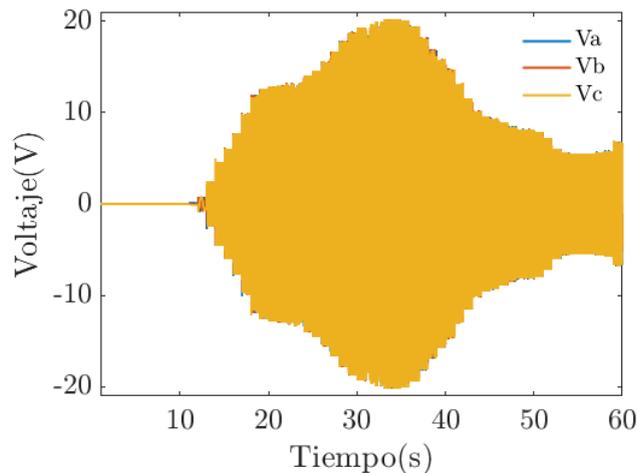
**Figura 3.17:** Ciclo de manejo WLTP class 3 de 30 s donde se observa la respuesta de la velocidad de entrada con relación a a la salida del sistema, utilizando el algoritmo de control por modos deslizantes.

En la figura [3.18](#) se observa una ampliación en el segundo diecisiete de la simulación del algoritmo por modos deslizantes, donde es posible notar un sobresalto con un valor inferior a un milésimo que converge en cinco milisegundos con la referencia de velocidad.



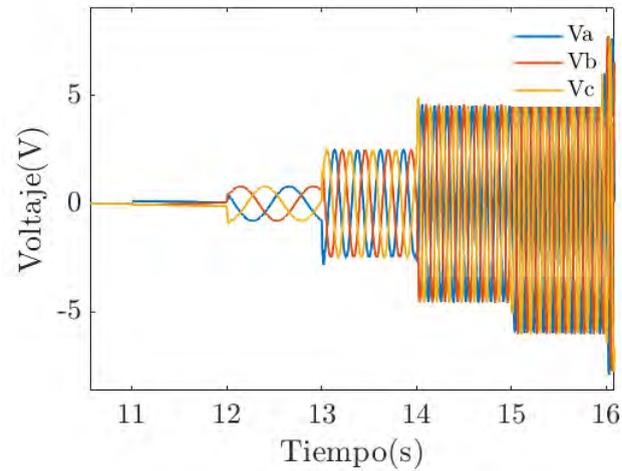
**Figura 3.18:** Ampliación de la figura MD1, donde se observa un ligero sobrepaso de la respuesta de velocidad.

Del mismo modo que se observa el comportamiento de las fases de voltaje ABC (señales de control) utilizando el algoritmo por linealización, en la figura 3.19 se tiene el comportamiento correspondiente al algoritmo de modos deslizantes, con la dinámica de ciclos de manejo WLTP class 3 a sesenta segundos de simulación, se observa el incremento y decremento de tensión en las fases por la aceleración y desaceleración de la máquina eléctrica.



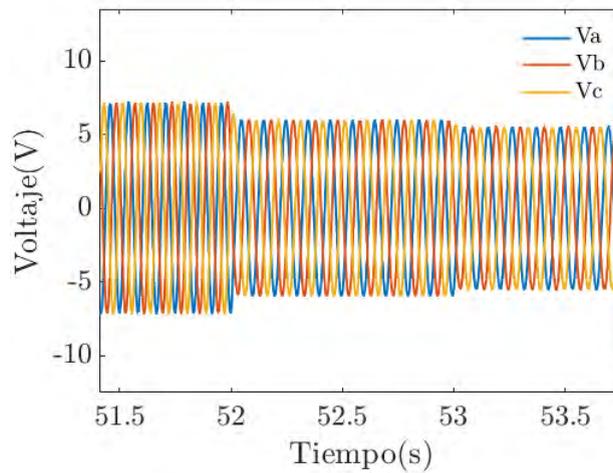
**Figura 3.19:** Voltajes ABC correspondientes al algoritmo de control por modos deslizantes con la referencia de ciclos de manejo WLTP class 3.

En la figura 3.20 se aprecian las señales de control como parte del ciclo de aceleración, donde se notan pequeños incrementos y ligeros picos de voltaje ante el cambio de velocidad en la máquina eléctrica.



**Figura 3.20:** Ampliación de la gráfica de voltajes obtenida del algoritmo por modos deslizantes empleado en la ME, donde se observa el incremento de los voltajes ABC durante la aceleración del vehículo.

Por otro lado, con respecto a la disminución de velocidad correspondiente al frenado, en la figura 3.20 no se aprecian cambios significativos.



**Figura 3.21:** Ampliación de la gráfica de voltajes obtenida del algoritmo por modos deslizantes empleado en la ME, durante la desaceleración del vehículo.

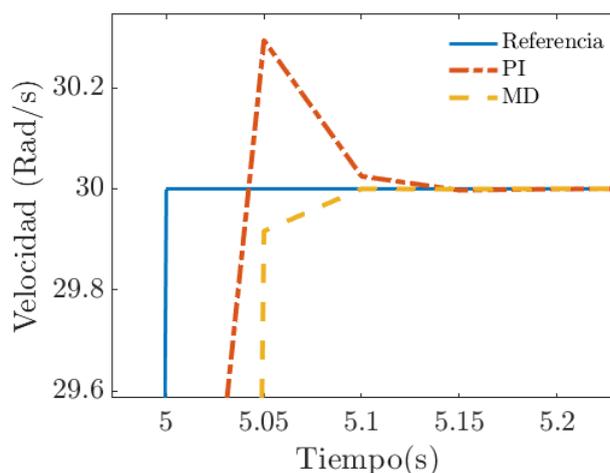
### 3.5. Análisis y comparación de algoritmos de control

Para cada algoritmo de control se aplicaron diferentes valores en la sintonización de las ganancias, considerando los siguientes valores (tabla 3.2) los cuales tuvieron mejores resultados en simulación:

CLE-PI	CMD
$k_d = 13$	$k_1 = 10$
$k_q = 100$	$k_\omega = 1000$
$k_{q2} = 1000000$	$k_{i1} = 9$
$k_{q3} = 1600$	$k_{\omega1} = 2377000$

**Tabla 3.2:** Valores utilizados en las ganancias de los algoritmos de control

Por ello se realizó la comparación de ambos algoritmos para observar su desempeño ante una referencia de velocidad, para la cual se utilizó una señal tipo escalón como se observa en la figura 3.22 donde es notoria la diferencia que ofrece cada uno, siendo para la respuesta del algoritmo CLE-PI un notorio sobrepaso, mientras que el algoritmo por modos deslizantes se observa críticamente amortiguado en relación a la referencia.

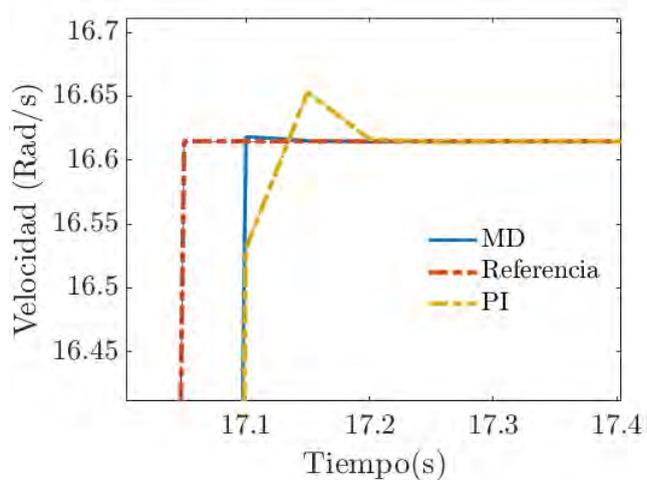


**Figura 3.22:** Comparación de la simulación de la maquina eléctrica con el algoritmo de control por Linealización exacta y modos deslizantes tomando en cuenta las gráficas de velocidad utilizando un escalón unitario.

Cabe destacar que a pesar de que ambos tienen una respuesta muy rápida en

tiempo, el algoritmo de control MD tiende a llegar antes al valor final de la referencia, como se observa en la figura 3.22 donde ambas respuestas en el tiempo cercano a cinco segundos comienzan a estabilizarse siendo el algoritmo MD el primero en llegar al valor deseado por tan solo cinco centisegundos de diferencia en comparación con CLE-PI.

Por otro lado, en un segmento del ciclo de manejo (figura 3.23), se logró analizar que con la sintonización de los controladores el desempeño puede ser muy similar, sin embargo, el algoritmo de MD logra una mejora con respecto al controlador CLE-PI, en cuanto al tiempo de asentamiento y reducción de sobre paso.



**Figura 3.23:** Comparación de los controladores CLE-PI y MD en la simulación de la maquina eléctrica en relación a la señal de referencia Ciclos de manejo WLTP Class 3.

## Conclusión

---

Durante el presente estudio se logró analizar más afondo la complejidad de los VE y las dinámicas que rigen su funcionamiento, con especial énfasis en el modelado, los algoritmos de control, la simulación de la máquina eléctrica y la importancia del acoplamiento entre los subsistemas que interactúan entre si para modificar o mejorar alguno de los que influyen en el desempeño final.

Hoy en día los vehículos eléctricos se pueden considerar sistemas mecatrónicos puesto que se combina la ingeniería mecánica, la electrónica y la informática, para diseñar, analizar el funcionamiento y controlar los distintos subsistemas que lo integran, por ello, la ingeniería en mecatrónica juega un papel fundamental para el estudio y análisis del VE ya que contribuye a las propuestas de mejoras del automóvil. Durante este trabajo se realizaron simulaciones de las dinámicas presentes en el vehículo eléctrico partiendo del modelado físico del vehículo y la dinámica de la máquina eléctrica propuesta PMSM y el análisis de este con respecto a ciclos de manejo.

Se describieron dos algoritmos de control no lineal basados en las teorías de modos deslizantes y linealización para analizar el desempeño de una máquina eléctrica a partir de su modelo matemático, mediante la transformada de Park. En ambos algoritmos se realizaron diferentes ajustes de los parámetros de controlador, para obtener la sintonización de las ganancias correspondientes. Con ello, obtener mejores resultados en las simulaciones, así como también se observaron diferencias en el tiempo transcurrido para alcanzar la referencia en su perfil de velocidad.

Para analizar también el vehículo, se utilizaron ciclos de manejo WLTP Class 3, donde se observó la variación de los voltajes de acuerdo con el desempeño requerido. Dentro del presente trabajo destaca la sintonización de los controladores para conseguir un valor de referencia de velocidad y compensar el par de carga en una máquina eléctrica, además fue posible modificar los valores de ganancias en los controladores y con ello obtener diferentes velocidades de llegada al valor de referencia donde se optó por elegir las sintonizaciones que en ambos algoritmos de control demostraban un mayor rendimiento.

Se nota una relación entre la velocidad de llegada a la referencia con la sintonización de los parámetros, y esto a su vez, tiene una relación directa con el consumo de energía. Por otro lado, se consideró un segmento de ciclo de manejo y con ello la variación de voltajes abc, de acuerdo con el cambio de velocidad. Las ganancias

---

de los controladores se incrementaron para obtener una respuesta rápida, evitando el sobrepaso, como se muestra en el análisis y comparación de los algoritmos de control, esto debido a que el sobrepaso modifica los valores de consumo de energía de forma significativa, lo cual cae fuera del presente estudio, a su vez, el análisis de los algoritmos de control ante la variación en los parámetros iniciales y considerar la comparación con otros algoritmos de control.

## 5.1. Otras Tecnologías de almacenamiento

### Gas natural comprimido

Hasta la fecha, en algunos países, los vehículos comerciales a base de gas natural clasificados como monocombustible todavía implican un pequeño tanque de gasolina adicional con una capacidad inferior a 14 L para la reserva de combustible y el rango del vehículo. Si bien un vehículo bicomcombustible tiene dos sistemas de combustible independientes que pueden funcionar alternativamente, se podrían lograr mejores rendimientos si los motores se optimizaran para el uso de solo gas natural. [20]

### Hythane

También conocido como HCNG20, es un nombre comercial para una mezcla de hidrógeno al 20 % de volumen y gas natural al 80 %. En lo que respecta al vehículo impulsado por hythane, puede considerarse casi idéntico a un vehículo de gas natural. Este vehículo quema hidrógeno y aire en una chispa de encendido. Una de las principales ventajas del hythane radica en la posibilidad técnica de transportar hidrógeno a través de la red de gas natural, sin necesidad de separar los dos combustibles antes de su uso.

### combustible H<sub>2</sub>-Gasolina

El vehículo de gasolina de hidrógeno es similar a un automóvil convencional a gasolina con la adición de un sistema de combustible separado dedicado al hidrógeno puro. El hidrógeno se inyecta en el motor en pequeñas cantidades en cada ciclo de funcionamiento, directamente (en el cilindro) o indirectamente (en el colector de admisión de aire), junto con la inyección de gasolina convencional. Por lo tanto, una parte de la gasolina se reemplaza con hidrógeno.

## Pila de combustible de metanol directo

La pila de combustible de metanol directo es el resultado de la investigación sobre el uso de metanol como combustible que pueden llevarse a bordo de un vehículo y reformarse para suministrar hidrógeno a la pila de combustible. Funciona según el mismo principio que el PEM, excepto que la temperatura se incrementa al rango de 90°C–120°C, de modo que es posible la reforma interna del metanol en hidrógeno. La eficiencia eléctrica es bastante baja, alrededor del 30%. Este tipo de pila de combustible aún se encuentra en las etapas de diseño, ya que la búsqueda de un buen electro-catalizador tanto para reformar el metanol de manera eficiente como para reducir el oxígeno en presencia de metanol está en curso.

## Pila de combustible de ácido fosfórico

La pila de combustible de ácido fosfórico es el tipo más antiguo cuyo origen se remonta a la creación del concepto de pila de combustible. El electrolito utilizado es ácido fosfórico y la temperatura de funcionamiento de la celda es aproximadamente 200°C, lo que hace posible cierta cogeneración. La eficiencia eléctrica de esta célula es razonable alrededor del 40%. Estos tipos de pilas de combustible se consideran demasiado voluminosas para aplicaciones de transporte, mientras que existen diseños de mayor eficiencia para aplicaciones estacionarias. [42]

## Pila de combustible de carbonato fundido

La pila de combustible de carbonato fundido desarrollada originalmente para operar directamente a partir de carbón, funciona a 600°C y requiere  $CO$  o  $CO_2$  en el lado del cátodo e hidrógeno en el ánodo. Las células utilizan carbonato como electrolito y la eficiencia eléctrica de estas pilas de combustible es alta (aproximadamente el 50%), pero el exceso de calor se puede utilizar para la cogeneración para mejorar la eficiencia. Las altas temperaturas requeridas hacen que estas celdas de combustible no sean particularmente adecuadas para aplicaciones vehiculares, pero se pueden usar para la generación de energía estacionaria.

## Pila de combustible de óxido sólido

Utiliza un conductor iónico sólido como electrolito en lugar de una solución o un polímero, lo que reduce los problemas de corrosión. Sin embargo, para lograr una conductividad iónica adecuada en una cerámica de este tipo, el sistema debe funcionar a temperaturas muy altas [42].

## 5.2. Motor trifásico con señal trapezoidal

$$\frac{d}{dt}i_a = \frac{1}{3L_s} (2v_{ab} + v_{bc} - 3R_s i_a + \lambda p \omega_m (-2\Phi'_a + \Phi'_b + \Phi'_c))$$

$$\frac{d}{dt}i_b = \frac{1}{3L_s} (-v_{ab} + v_{bc} - 3R_s i_b + \lambda p \omega_m (\Phi'_a - 2\Phi'_b + \Phi'_c))$$

$$\frac{d}{dt}i_c = \left( \frac{d}{dt}i_a + \frac{d}{dt}i_b \right)$$

$$T_e = p\lambda (\Phi_a \cdot i_a + \Phi'_b \cdot i_b + \Phi'_c \cdot i_c)$$

abreviatura	significado.
$L_s$	Inductancia del estator.
$R$	Resistencia del estator.
$i_a, i_b, i_c$	corrientes de fase a, b c.
$\Phi_a, \Phi_b, \Phi_c$	Fuerzas electromotrices de las fases a, b y c.
$V_{ab}, V_{bc}$	ab y bc voltaje de fase a fase.
$\omega_m$	velocidad angular del motor.
$\lambda$	Amplitud del flujo inducido por los imanes permanentes.
$p$	Número de pares de polos.
$T_e$	Par electromagnético (torque)

## 5.3. Sistema Mecánico

$$\frac{d}{dt}\omega_m = \frac{1}{J} (T_e - T_f - F\omega_m - T_m)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_m$$

$J$	Inercia combinada de rotor y carga
$F$	Fricción viscosa combinada del rotor y la carga
$\theta$	Posición angular del rotor
$T_m$	Par mecánico del eje
$T_f$	Par de fricción estática del eje
$\omega_m$	Velocidad angular del rotor (velocidad mecánica)

## 5.4. Código SVPWM para motor PMSM

```
#define carrierFrequency 5000
#define samplingTime 1/carrierFrequency
#define pi 3.14159
int i;
int sinTable[360];
void setup() {
    // Inicializar la tabla de valores de seno
    for (i = 0; i < 360; i++) {
        sinTable[i] = sin(i * pi / 180) * 255;
    }
    // Pines para controlar el motor
    pinMode(3, OUTPUT);
    pinMode(4, OUTPUT);
}

void loop() {
    // Valores de los ángulos de conducción
    int alpha = 45;
    int beta = 120;
    // Calcular los tiempos de conducción y de reposo
    int T1 = (sinTable[alpha] - sinTable[beta] + 255) / 2;
    int T2 = (255 - sinTable[beta]) - T1;
    // Realizar la conducción durante el tiempo T1
    digitalWrite(3, HIGH);
    digitalWrite(4, LOW);
    delay(T1 * samplingTime);
    // Realizar el reposo durante el tiempo T2
    digitalWrite(3, LOW);
    digitalWrite(4, LOW);
}
```

```
delay(T2 * samplingTime);  
// Realizar la conducción durante el tiempo restante  
digitalWrite(3, LOW);  
digitalWrite(4, HIGH);  
delay((255 - T1 - T2) * samplingTime);  
}
```

# Bibliografía

---

- [1] ELLA GRAHAM-ROWE, BENJAMIN GARDNER, CHARLES ABRAHAM, STEPHEN SKIP-PON, HELGA DITTMAR, REBECCA HUTCHINS, AND JENNY STANNARD. **Mainstream consumers driving plug-in battery-electric and plug-in hybrid electric cars: A qualitative analysis of responses and evaluations.** *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, **46**(1):140–153, 2012.
- [2] FRANZISKA BÜHLER, PETER COCRON, ISABEL NEUMANN, THOMAS FRANKE, AND JOSEF F KREMS. **Is EV experience related to EV acceptance? Results from a German field study.** *Transportation Research Part F: traffic psychology and behaviour*, **25**:34–49, 2014.
- [3] MARCO GIAN SOLDATI, ADRIANA MONTE, AND MARIANGELA SCORRANO. **Barriers to the adoption of electric cars: Evidence from an Italian survey.** *Energy Policy*, **146**:111812, 2020.
- [4] DAVID RAMCES IDROVO PULLA AND CRISTHIAN SANTIAGO LOAYZA FLORES. *Análisis comparativo de los costos operativos entre un vehículo de combustión interna y un vehículo eléctrico en la ciudad de Cuenca*. B.S. thesis, 2017.
- [5] JOERI VAN MIERLO, MAITANE BERE CIBAR, MOHAMED EL BAGHDADI, CEDRIC DE CAUWER, MAARTEN MESSAGIE, THIERRY COOSEMANS, VALÉRY ANN JACOBS, AND OMAR HEGAZY. **Beyond the State of the Art of Electric Vehicles: A Fact-Based Paper of the Current and Prospective Electric Vehicle Technologies.** *World Electric Vehicle Journal*, **12**(1):20, 2021.
- [6] RAJEEV RANJAN KUMAR AND KUMAR ALOK. **Adoption of electric vehicle: A literature review and prospects for sustainability.** *Journal of Cleaner Production*, **253**:119911, 2020.

- [7] JESÚS TRASHORRAS MONTECELOS. *Vehículos eléctricos*. Ediciones Paraninfo, SA, 2019.
- [8] MEHRDAD EHSANI, KRISHNA VEER SINGH, HARI OM BANSAL, AND RAMIN TAFAZZOLI MEHRJARDI. **State of the art and trends in electric and hybrid electric vehicles**. *Proceedings of the IEEE*, **109**(6):967–984, 2021.
- [9] CHRIS MI AND M ABUL MASRUR. *Hybrid electric vehicles: principles and applications with practical perspectives*. John Wiley & Sons, 2017.
- [10] LALIT KUMAR AND SHAILENDRA JAIN. **Electric propulsion system for electric vehicular technology: A review**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **29**:924–940, 2014.
- [11] MEHRDAD EHSANI, YIMIN GAO, STEFANO LONGO, AND KAMBIZ M EBRAHIMI. *Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles*. CRC press, 2018.
- [12] CC CHAN, KT CHAU, ET AL. *Modern electric vehicle technology*, **47**. **Oxford University Press on Demand, 2001**.
- [13] VIACHESLAV ZAKHAROV AND TATIANA MINAV. **Analysis of Field Oriented Control of Permanent Magnet Synchronous Motor for a Valveless Pump-Controlled Actuator**. In *Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings*, **64**, page **19**, 2020.
- [14] RODRIGO GARCIA-VALLE AND JOÃO A PEÇAS LOPES. *Electric vehicle integration into modern power networks*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [15] SELAMAT MUSLIMIN, ZAINUDDIN NAWAWI, BHAKTI YUDHO SUPRAPTO, AND TRESNA DEWI. **Comparison of Batteries Used in Electrical Vehicles**. In *Proceedings of the 5th FIRST T1 T2 2021 International Conference (FIRST-T1-T2 2021)*, pages **421–425**. Atlantis Press, 2022.
- [16] HECTOR ALEJANDRO TREJO MANDUJANO, ELSA GABRIELA ORDOÑEZ CASANOVA, AND GUILLERMO MEJÍA CISNEROS. **Tecnologías en los sistemas de propulsión híbridos: revisión de literatura**. *Instituto de Ingeniería y Tecnología*, 2021.

- [17] ANXING LIU AND HAISHENG YU. **Smooth-switching control of robot-based permanent-magnet synchronous motors via port-controlled Hamiltonian and feedback linearization.** *Energies*, 13(21):5731, 2020.
- [18] WASEEM RAZA, FAIZAN ALI, NADEEM RAZA, YIWEI LUO, KI-HYUN KIM, JIANHUA YANG, SANDEEP KUMAR, ANDLEEB MEHMOOD, AND EILHANN E KWON. **Recent advancements in supercapacitor technology.** *Nano Energy*, 52:441–473, 2018.
- [19] DANIELE CANDELARESI, ANTONIO VALENTE, DIEGO IRIBARREN, JAVIER DUFOUR, AND GIUSEPPE SPAZZAFUMO. **Comparative life cycle assessment of hydrogen-fuelled passenger cars.** *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021.
- [20] JESUS SAGREDO GONZALEZ AND VICTORIA ABAD SAN MARTÍN. **Motores síncronos de imanes permanentes para vehículos híbridos. El Toyota Prius.** *Dyna*, 89(6):603–607, 2014.
- [21] ROBERT H PARK. **Two-reaction theory of synchronous machines generalized method of analysis-part I.** *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 48(3):716–727, 1929.
- [22] PRIYANKA MALLA. **Sliding Mode Speed Control of Induction Motor Using SVPWM Technique for Hybrid Electric Vehicles.** *simulation*, 8(1):1–7, 2022.
- [23] NOORIYA SHAHUL AND SIDDHARTH SHELLY. **A Charger for AC to DC and DC to AC Conversion for Electric Vehicle.** In *2020 International Conference on Futuristic Technologies in Control Systems & Renewable Energy (ICFCR)*, pages 1–6. IEEE, 2020.
- [24] MARÍA JESUS GODOY DURBAN. **Diseño y Estudio de Peor Caso de una Fuente de Alimentación Auxiliar en Convertidores de Potencia para Vehículos Eléctricos.** 2019.
- [25] AMIT TANAJI WAGHE AND SK PATIL. **A bidirectional DC-DC converter fed separately excited DC motor electric vehicle application.** In *2020 International Conference on Emerging Trends in Information Technology and Engineering (ic-ETITE)*, pages 1–5. IEEE, 2020.

- [26] RISHABH KUMAR RAI, ABHINAV DIXIT, SURAJ PUNDIR, AND JOSEPH PETER. **Advanced Integrated Bidirectional AC/DC and DC/DC Converter for Plug-In Hybrid Electric Vehicles.** In *2020 International Conference on Futuristic Technologies in Control Systems & Renewable Energy (ICFCR)*, pages 1–6. IEEE, 2020.
- [27] GUNER TATAR, HAYRIYE KORKMAZ, N. FÜSUN OYMAN SERTELLER, AND KENAN TOKER. **LabVIEW FPGA Based BLDC Motor Control by Using Field Oriented Control Algorithm.** In *2020 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)*, pages 1–6, 2020.
- [28] SILVA MALLA. <https://la.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/35844-svpwm-based-speed-control-of-pmsm-with-3-level-inverter>, 03 de junio del 2022. 15
- [29] TIANYI ZENG, XUEMEI REN, AND YAO ZHANG. **Fixed-time sliding mode control and high-gain nonlinearity compensation for dual-motor driving system.** *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 16(6):4090–4098, 2019.
- [30] HASSAN K. KHALIL. *Nonlinear systems*. Prentice Hall, 3rd ed edition, 2002.
- [31] HEBERTT SIRA-RAMIREZ, RICHARD MÁRQUEZ, F RIVAS-ECHEVERRIA, AND ORESTES LLANES-SANTIAGO. *Control de sistemas no lineales: Linealización aproximada, extendida, exacta*. Pearson Prentice Hall, 2005.
- [32] GUILLERMO BECERRA, LUIS ALVAREZ-ICAZA, IDALIA FLORES DE LA MOTA, AND JOSE LUIS MENDOZA-SOTO. **Simulation and optimization applied to power flow in hybrid vehicles.** *Applied Simulation and Optimization 2: New Applications in Logistics, Industrial and Aeronautical Practice*, pages 185–224, 2017.
- [33] LUIS F QUIRAMA, MICHAEL GIRALDO, JOSÉ I HUERTAS, JUAN E TIBAQUIRÁ, AND DANIEL CORDERO-MORENO. **Main characteristic parameters to describe driving patterns and construct driving cycles.** *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 97:102959, 2021.

- [34] ZHIBIN CHEN, WEI LIU, AND YAFENG YIN. **Deployment of stationary and dynamic charging infrastructure for electric vehicles along traffic corridors.** *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 77:185–206, 2017.
- [35] HAI LIU, JINGYU ZHAO, TONG QING, XIAOYU LI, AND ZAIZHOU WANG. **Energy consumption analysis of a parallel PHEV with different configurations based on a typical driving cycle.** *Energy Reports*, 7:254–265, 2021.
- [36] M. ANDRE, R. JOUMARD, R. VIDON, AND ET AL. **Real-world European driving cycles, for measuring pollutant emissions from high and low-powered cars.** *Atmos. Environ.*, 40:5944–5953, 2006.
- [37] AHMAD S AL-ADSANI AND OMID BEIK. **Multiphase Hybrid Electric Machines.** *Machines*, 2020.
- [38] EMMANUEL AGAMLOH, ANNETTE VON JOUANNE, AND ALEXANDRE YOKOCHI. **An overview of electric machine trends in modern electric vehicles.** *Machines*, 8(2):20, 2020.
- [39] S.J. CHAPMAN AND S.S. ORTEGA. *Máquinas eléctricas.* McGraw-Hill / Interamericana de España, S.A., 2012.
- [40] ALAIN PICARD, RS DAVIS, M GLÄSER, AND K FUJII. **Revised formula for the density of moist air (CIPM-2007).** *Metrologia*, 45(2):149, 2008.
- [41] NITI KAMMUANG-LUE AND JIRAWAT BOONJUN. **Energy consumption of battery electric bus simulated from international driving cycles compared to real-world driving cycle in Chiang Mai.** *Energy Reports*, 7:3267–3272, 2021.
- [42] IQBAL HUSAIN. *Electric and hybrid vehicles: design fundamentals.* CRC press, 2021.