

PROYECTO DE SIMULACIÓN DE SISTEMAS DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO EN MATLAB-SIMULINK

Lechón Anderson, López Selena

I. RESUMEN

ESTE TRABAJO PRESENTA EL MODELADO Y LA SIMULACIÓN DE LOS SUBSISTEMAS PRINCIPALES DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO (EV) EMPLEANDO MATLAB-SIMULINK Y HERRAMIENTAS DE SIMSCAPE. A DIFERENCIA DE ESTUDIOS BASADOS EN ARQUITECTURAS COMPLETAS GENERADAS AUTOMÁTICAMENTE, EL ENFOQUE DESARROLLADO SE CENTRA EN LA CONSTRUCCIÓN Y ANÁLISIS DETALLADO DEL SISTEMA DE BATERÍAS Y DEL MOTOR ELÉCTRICO, CON ESPECIAL ÉNFASIS EN LA EVOLUCIÓN DEL ESTADO DE CARGA (STATE OF CHARGE, SOC) Y LA RESPUESTA DINÁMICA DEL MOTOR ANTE CAMBIOS DE CARGA.

EL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA SE MODELA MEDIANTE BATTERY BUILDER, CONFIGURANDO UN ENSAMBLE DE CELDAS EN PARALELO Y SERIE QUE REPRESENTA UN PAQUETE DE BATERÍAS TIPO TESLA_MODEL3. SE ANALIZA SU COMPORTAMIENTO ELÉCTRICO BAJO UNA CORRIENTE IMPUESTA, EVALUANDO VARIABLES COMO SOC, VOLTAJE Y CORRIENTE. PARALELAMENTE, SE MODELA UN MOTOR SÍNCRONO DE IMANES PERMANENTES (PMSM) CONTROLADO MEDIANTE UNA ESTRATEGIA V/F, PERMITIENDO OBSERVAR LA RELACIÓN ENTRE LAS SEÑALES ELÉCTRICAS APLICADAS Y LA RESPUESTA MECÁNICA DEL MOTOR.

LOS RESULTADOS OBTENIDOS MUESTRAN UNA EVOLUCIÓN COHERENTE DEL SOC ANTE PROCESOS DE DESCARGA

CONTROLADA Y UNA RESPUESTA DINÁMICA DEL MOTOR CONSISTENTE CON LA TEORÍA, VALIDANDO LA UTILIDAD DE SIMULINK COMO HERRAMIENTA PARA EL ANÁLISIS PRELIMINAR Y LA COMPRENSIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE SISTEMAS DE PROPULSIÓN ELÉCTRICA.

PALABRAS CLAVE: VEHÍCULO ELÉCTRICO, MATLAB–SIMULINK, BATTERY BUILDER, SOC, PMSM, CONTROL V/F.

ABSTRACT

This work presents the modeling and simulation of the main subsystems of an electric vehicle (EV) using MATLAB–Simulink and Simscape tools. Unlike studies based on automatically generated complete architectures, the proposed approach focuses on the detailed construction and analysis of the battery system and the electric motor, with particular emphasis on the evolution of the State of Charge (SOC) and the dynamic response of the motor under load variations.

The energy storage system is modeled using the Battery Builder tool, configuring a series–parallel cell assembly that represents a Tesla Model 3–type battery pack. Its electrical behavior is analyzed under an imposed current, evaluating key variables such as SOC, voltage, and current. In parallel, a Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) is modeled and controlled using a V/f strategy, allowing the relationship between the applied electrical signals and the mechanical response of the motor to be observed.

The obtained results show a consistent SOC evolution during controlled discharge processes and a dynamic motor response in agreement with theoretical principles, validating the use of Simulink as an effective tool for preliminary analysis and for understanding the behavior of electric propulsion systems.

Keywords: Electric vehicle, MATLAB–Simulink, Battery Builder, State of Charge (SOC), PMSM, V/f control.

INTRODUCCION

El uso de herramientas de simulación como

MATLAB–Simulink se ha consolidado como un recurso fundamental en la ingeniería de vehículos eléctricos, ya que permite analizar de forma segura y flexible el comportamiento de sistemas complejos antes de su implementación física. En particular, el estudio del sistema de baterías y del motor eléctrico resulta clave, debido a que estos componentes determinan directamente la autonomía, el desempeño dinámico y la eficiencia energética del vehículo.

En este proyecto se desarrolla un modelo de batería y un modelo de motor eléctrico de manera independiente, con el objetivo de comprender su funcionamiento y su respuesta ante distintas condiciones de operación. El análisis se enfoca en la variación del estado de carga (SOC) bajo una corriente controlada y en la interpretación de las señales eléctricas y mecánicas del motor, sentando las bases para una futura integración completa del tren motriz.

II. MARCO TEÓRICO

A. Sistema de baterías y estado de carga (SOC)

El estado de carga (state of charge, soc) representa la fracción de energía disponible en una batería respecto a su capacidad nominal. Matemáticamente, el soc depende de la corriente que entra o sale de la batería y del tiempo de operación, por lo que su evolución es lenta y continua en comparación con variables eléctricas instantáneas como voltaje o corriente.

En un modelo de batería, el soc debe mantenerse dentro del rango físico de 0 a 1 (o 0–100 %), ya que valores fuera de este intervalo no representan condiciones reales

de operación y suelen activar protecciones o aserciones dentro del modelo.

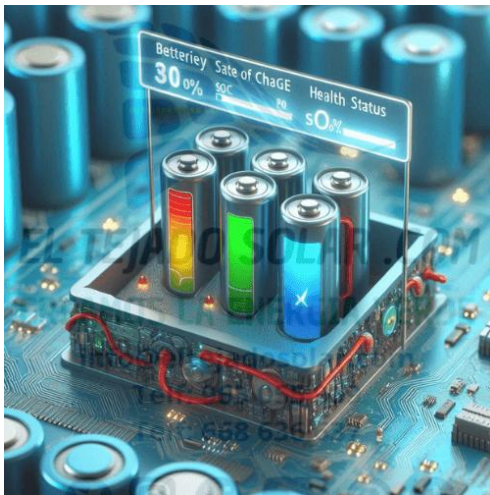


Figure 1 SOC De Baterias

B. Battery Builder

Battery Builder es una herramienta integrada en el entorno de MATLAB–Simulink que permite la construcción detallada de modelos de baterías a partir de celdas individuales, organizadas en configuraciones en serie y paralelo para representar paquetes de baterías reales. Esta herramienta facilita la definición de la arquitectura eléctrica del sistema de almacenamiento de energía, permitiendo modelar desde una sola celda hasta conjuntos complejos utilizados en vehículos eléctricos. A través de Battery Builder es posible parametrizar características fundamentales de la batería, tales como la capacidad nominal, el voltaje en circuito abierto, la resistencia interna, la eficiencia coulombica y el estado de carga inicial (State of Charge, SOC). Estos parámetros permiten reproducir de forma realista el comportamiento eléctrico de la batería bajo diferentes condiciones de operación, como procesos de carga y descarga controlada.

Adicionalmente, la herramienta permite integrar modelos térmicos y eléctricos compatibles con

Simscape, lo que posibilita analizar la interacción entre corriente, voltaje y SOC durante la simulación. Gracias a esta capacidad, Battery Builder se convierte en una herramienta adecuada para el análisis preliminar del desempeño del sistema de almacenamiento de energía, la evaluación de estrategias de control y la validación de diseños antes de su implementación física.

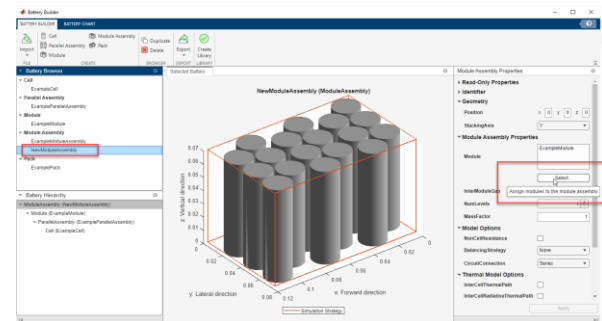


Figure 2 Battery Builder Matlab Ocupado Para Simulación De Baterias

C. Motor síncrono de imanes permanentes (PMSM)

El motor síncrono de imanes permanentes (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM) es ampliamente utilizado en aplicaciones de tracción para vehículos eléctricos debido a su elevada eficiencia energética, alta densidad de potencia y excelente respuesta dinámica. En este tipo de motor, el campo magnético del rotor es generado por imanes permanentes, lo que elimina las pérdidas asociadas a los devanados de excitación y mejora el rendimiento global del sistema.

El comportamiento del PMSM está determinado por la interacción de diversos parámetros eléctricos, magnéticos y mecánicos. Entre los parámetros eléctricos se incluyen las resistencias e inductancias de los devanados del estator, que influyen directamente en las corrientes y pérdidas del

sistema. Los parámetros magnéticos están asociados al flujo generado por los imanes permanentes, el cual determina el par electromagnético desarrollado. Por su parte, los parámetros mecánicos, como la inercia del rotor, el coeficiente de fricción y la carga aplicada, condicionan la dinámica de aceleración, desaceleración y estabilidad del motor.

En entornos de simulación, el modelo del PMSM permite analizar la relación entre las variables eléctricas de entrada y la respuesta mecánica del sistema, facilitando la evaluación del comportamiento del motor ante variaciones de carga, cambios en la velocidad de referencia y condiciones transitorias propias de los sistemas de propulsión eléctrica.



Figure 3 Motor representativo de lo que simulo en la aplicacion Matlab

D. Control V/f

El control V/f es una estrategia de control en lazo abierto que se basa en mantener constante la relación entre el voltaje aplicado y la frecuencia de la señal trifásica que alimenta al motor. Esta relación constante permite conservar aproximadamente el flujo magnético del motor dentro de un rango adecuado de operación,

evitando la saturación del núcleo magnético o la disminución excesiva del par disponible.

Este método de control es ampliamente utilizado en aplicaciones donde se requiere simplicidad de implementación y un comportamiento estable a bajas y medias velocidades. El control V/f permite un arranque suave del motor y un incremento progresivo de la velocidad, reduciendo la aparición de sobrecorrientes y limitando los esfuerzos mecánicos durante los regímenes transitorios.

Aunque el control V/f no ofrece la precisión dinámica de estrategias más avanzadas, como el control vectorial o el control orientado al campo, resulta adecuado para análisis preliminares y simulaciones educativas. En el contexto de este proyecto, su aplicación permite observar de manera clara la relación entre las variables eléctricas de control y la respuesta mecánica del PMSM, facilitando la comprensión del funcionamiento básico del sistema de propulsión eléctrica.

III. DESARROLLO DE MODELO

A. Modelado del sistema de baterías

El sistema de baterías se construyó utilizando Battery Builder, definiendo una celda base con parámetros eléctricos representativos y configurando un ensamble en paralelo y serie que conforma el bloque **Tesla_Model3**. Se habilitó el puerto de SOC para poder monitorear directamente el estado de carga durante la simulación.

Para el análisis dinámico, la batería se conectó a una fuente de corriente controlada. Esta corriente fue definida mediante un bloque Step, el cual introduce un cambio brusco de corriente a partir de un tiempo determinado, simulando un evento de carga o descarga del paquete.

Se utilizó un bloque PS–Simulink Converter para convertir las señales físicas de Simscape a señales compatibles con Simulink, permitiendo su visualización en un Scope.

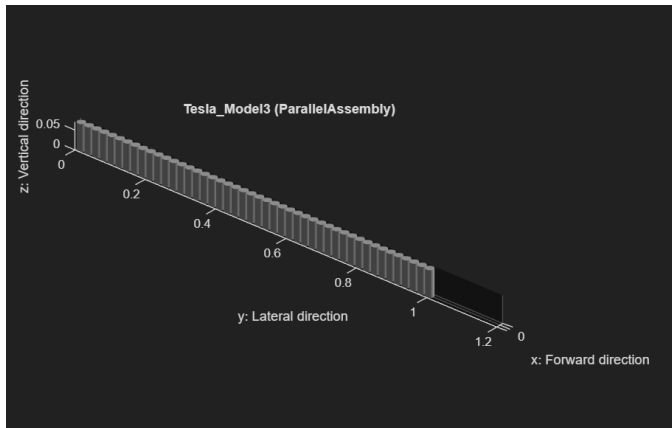


Figure 4 Diseño de batería del Tesla Model 3
Configuración de la señal de corriente

La señal de corriente aplicada a la batería se configuró de la siguiente manera:

- **Valor inicial:** 0 A (batería en reposo).
- **Tiempo de cambio:** instante en el que inicia la descarga.
- **Valor final:** corriente negativa constante, representando una descarga controlada.
- **Sample time:** heredado o continuo, coherente con el solver utilizado.

Esta configuración permite observar una disminución progresiva del SOC, acorde con la capacidad nominal de la batería.

Modelado del motor eléctrico

El motor síncrono de imanes permanentes (PMSM) fue modelado empleando bloques pertenecientes al **Motor Control Blockset**, lo que permitió representar de manera precisa el comportamiento eléctrico y mecánico del sistema de propulsión. Este entorno proporciona modelos predefinidos que facilitan la simulación del motor bajo distintas condiciones de operación, reduciendo la complejidad matemática del modelado

manual.

En una primera etapa se definieron los **parámetros eléctricos del motor**, tales como la resistencia del estator, las inductancias en los ejes directo y en cuadratura, el flujo magnético generado por los imanes permanentes y el número de polos. Estos parámetros determinan la dinámica de las corrientes trifásicas y el par electromagnético desarrollado por el motor. De forma complementaria, se configuraron los **parámetros mecánicos**, incluyendo la inercia del rotor, el coeficiente de fricción viscosa y la velocidad inicial, los cuales influyen directamente en la respuesta dinámica del sistema ante cambios de carga o referencia de velocidad.

Para la alimentación del motor se implementó un **inversor trifásico de valor promedio**, el cual permite representar el comportamiento del convertidor electrónico de potencia sin modelar explícitamente los dispositivos de conmutación. Este enfoque reduce el tiempo de simulación y facilita el análisis del comportamiento global del sistema, manteniendo una adecuada precisión en la generación de los voltajes trifásicos aplicados al estator del motor.

El **control V/f** se utilizó como estrategia de control para regular la velocidad del motor. A partir de una referencia de velocidad angular, el controlador genera una frecuencia eléctrica proporcional, y simultáneamente ajusta la amplitud del voltaje trifásico de manera que se mantenga constante la relación V/f. Este procedimiento permite conservar el flujo magnético aproximadamente constante durante la operación del motor, asegurando un par adecuado y evitando condiciones de saturación magnética o sobrecorrientes.

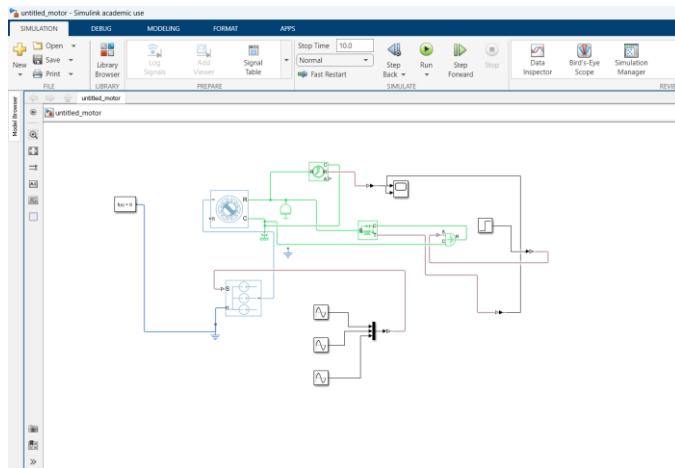


Figure 5 Motor simulado en matlab con los datos obtenidos del tipo de motor Tesla Model 3

La implementación del control V/f se realizó siguiendo los siguientes pasos:

1. **Definición de la referencia de velocidad**, expresada en rad/s o rpm, la cual representa el valor deseado de operación del motor.
2. **Conversión de la velocidad de referencia a frecuencia eléctrica**, considerando el número de pares de polos del motor.
3. **Cálculo del voltaje de referencia**, manteniendo constante la relación V/f dentro del rango de operación establecido.
4. **Generación de señales trifásicas sinusoidales**, desfasadas 120° entre sí, las cuales alimentan el inversor de valor promedio.
5. **Aplicación de los voltajes trifásicos al modelo del PMSM**, permitiendo observar la respuesta dinámica del motor.

La carga mecánica del sistema se representó mediante la aplicación de un par constante al eje del motor. Este par simula el efecto de la resistencia mecánica asociada a la tracción del vehículo eléctrico, permitiendo evaluar el comportamiento del motor ante condiciones de carga y analizar su capacidad de mantener la velocidad deseada. Para el análisis de resultados se utilizaron bloques Scope, los cuales permitieron visualizar en el dominio

del tiempo las principales variables del sistema. En particular, se emplearon scopes para monitorear la velocidad del motor, el par electromagnético, las corrientes trifásicas del estator y la respuesta transitoria ante cambios en la referencia de velocidad o en la carga aplicada

El uso del Scope se realizó de la siguiente manera:

- Se conectaron las salidas de las variables de interés (velocidad, par y corrientes) a entradas independientes del bloque Scope.
- Se configuró el rango de tiempo de simulación y la escala vertical para facilitar la interpretación de las señales.
- Se habilitó la visualización simultánea de múltiples señales, permitiendo comparar la respuesta del sistema bajo distintas condiciones de operación.
- Se analizaron los transitorios de arranque, aceleración y régimen permanente, verificando la estabilidad del motor y la coherencia de los resultados con el comportamiento teórico esperado.

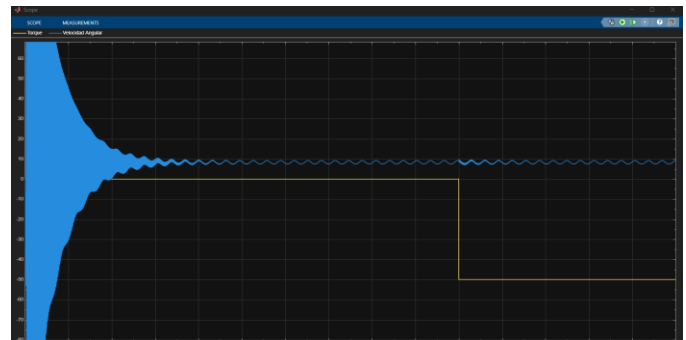


Figure 6 Oscilograma obtenido en scope de funcionamiento del motor

Dashboards de simulación

Se realizó una simulación de un vehículo eléctrico (Tesla Model 3) que dispone de un motor eléctrico de donde se ingresaron estos datos para una simulación mas real y se ciclos de conducción

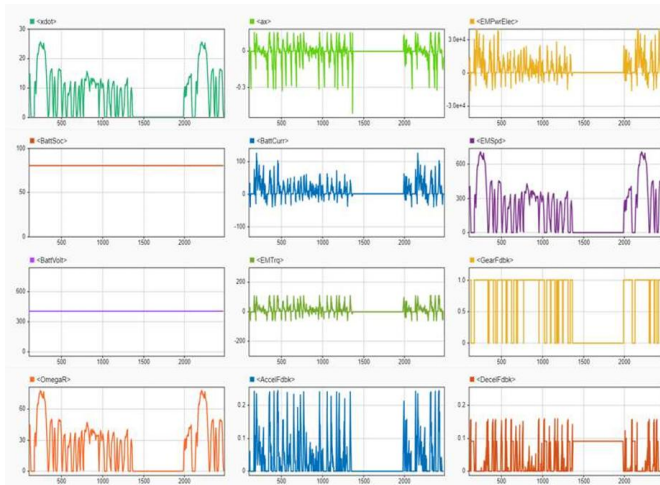


Figure 7 Graficas dashboard obtenido en un ciclo de conducción normal

1. xdot (velocidad del vehículo)

Sube y baja muchas veces: paradas y arranques típico urbano.

Hay una zona larga con valores bajos/casi nulos en medio coherente con pausa o tramo sin movimiento. Al final vuelve a haber picos altos segundo segmento más rápido.

2. ax (aceleración longitudinal)

Picos negativos fuertes = frenadas.

Picos positivos = arranques / aceleraciones.

3. EMPwrElec (potencia eléctrica del motor)

Potencia alterna entre valores positivos y negativos.

Positiva cuando el motor entrega potencia para mover el carro.

Negativa cuando hay regeneración (si está habilitada) o cuando el control reduce potencia.

En el tramo medio casi se va a cero: no hay demanda.

4. BattSoc (SOC batería)

Estás viendo un SOC de “pack” inicial fijo o un SOC que no está siendo actualizado como esperas (por configuración/tiempo/corriente pequeña).

BattCurr (corriente batería)

Señal con picos altos en el tramo activo, y casi cero en la pausa.

Picos positivos/negativos según convención:

Si positiva es descarga: picos positivos = aceleración.

Si negativa es descarga: picos negativos = aceleración.

En desaceleración suele invertirse por regeneración.

5. EMSpd (velocidad del motor eléctrico)

Sigue el patrón de velocidad del vehículo pero

“amplificado” por la relación de transmisión.

Picos grandes cuando el vehículo va rápido.

Tramos en cero cuando el vehículo se detiene.

6. BattVolt (voltaje batería)

Se ve casi constante (línea estable).

Esto es normal si:

el pack es grande, y el modelo es tipo equivalente con

OCV relativamente plana,

o la corriente promedio no provoca caída notable.

7. EMTrq (torque del motor)

Muchos cambios de signo:

Torque positivo = tracción (acelera)

Torque negativo = regeneración / frenado motor

Cae cerca de cero en cruce o pausa.

8. GearFdbk (relación / modo de transmisión)

Se ve “saltando” entre niveles (0/1 o varias posiciones).

En la pausa se queda fijo.

Interpretación: el modelo está usando lógica de

relación/engranaje (o un selector de rango) durante el ciclo.

9. AccelFdbk (feedback del acelerador)

Muchos pulsos = el ciclo está pidiendo aceleración constantemente.

En la pausa queda casi en cero.

10. DecelFdbk (feedback del freno)

Pulsos también frecuentes, a veces se mantiene en un valor fijo en el tramo medio.

Si aparece un tramo constante, puede ser:

un “hold” de frenado suave,

o una parte del ciclo donde se fuerza desaceleración.

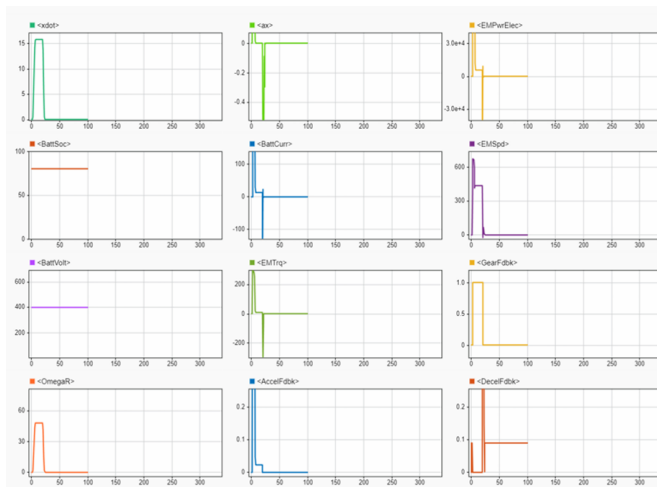


Figure 8 Graficas obtenidas del segundo ciclo de conducción del simulador matlab

Al inicio del ciclo se evidencia una aceleración brusca del vehículo, reflejada en un incremento rápido de la velocidad y un pico elevado de aceleración. Desde los primeros instantes se observa la activación inmediata del sistema de tracción, lo que indica que el vehículo responde de manera directa a la demanda impuesta. Este comportamiento ocurre debido a que el ensayo WOT (Wide Open Throttle) no aplica el acelerador de forma progresiva, sino que solicita la máxima potencia desde el arranque, generando una respuesta intensa en las variables dinámicas del sistema.

Durante esta fase inicial, el motor eléctrico presenta una respuesta característica de este tipo de máquinas. Se observa la entrega de un alto torque desde bajas revoluciones, acompañado de un aumento rápido de la velocidad del motor. Como consecuencia, la potencia eléctrica demandada crece de forma abrupta. Este comportamiento es coherente con la teoría de los motores eléctricos, los cuales son capaces de proporcionar su par máximo prácticamente desde el arranque y responder de manera casi instantánea ante cambios en la señal de aceleración.

En cuanto al comportamiento de la batería, las gráficas muestran una entrega de corriente elevada en un intervalo de tiempo muy corto, mientras que el estado de

carga (SOC) apenas presenta variación. Este fenómeno es completamente normal en este tipo de ensayos, ya que el evento WOT tiene una duración limitada. Aunque la potencia instantánea demandada es alta, la energía total consumida durante el evento es relativamente baja, lo que se traduce en un gran esfuerzo instantáneo para la batería, pero con un impacto mínimo sobre el SOC.

Posteriormente, una vez superado el pico inicial de aceleración, se observa una disminución progresiva de la aceleración y del torque entregado por el motor. El sistema entra en una zona más estable o el ciclo finaliza, dependiendo de la duración configurada del ensayo. Este comportamiento se explica porque el vehículo alcanza su límite de aceleración bajo las condiciones impuestas, y el controlador reduce el torque con el objetivo de evitar sobreesfuerzos eléctricos y mecánicos. Además, el ciclo WOT no está diseñado para mantener una condición prolongada de operación, sino para evaluar un evento puntual de máxima demanda.

El hecho de que varias señales presenten actividad únicamente durante los primeros segundos del ciclo y luego se estabilicen o se aproximen a valores bajos se debe a la naturaleza del ensayo WOT. Este tipo de ciclo no representa una conducción urbana ni de carretera, ya que no incluye fases prolongadas de velocidad constante o variaciones suaves de carga. Su objetivo principal es analizar el comportamiento del sistema ante una demanda extrema de potencia, por lo que la mayor parte de la actividad dinámica se concentra en el inicio del evento.

En el contexto del proyecto, este ciclo permite demostrar que el modelo del vehículo eléctrico responde de manera coherente ante condiciones exigentes. Las gráficas evidencian que el motor eléctrico es capaz de entregar alto torque de forma instantánea, que la batería puede suministrar corrientes elevadas sin colapsar y que el

sistema de control mantiene un comportamiento estable y consistente con el de un vehículo eléctrico real. A diferencia de los ciclos normales de conducción, orientados al análisis de eficiencia y consumo energético, el ciclo WOT se enfoca exclusivamente en la evaluación del desempeño máximo del sistema de propulsión.

IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Comportamiento del estado de carga (SOC)

Los resultados obtenidos a partir de la simulación del sistema de baterías muestran que el estado de carga (SOC) presenta una disminución progresiva, lenta y prácticamente lineal cuando se somete a una corriente de descarga constante. Este comportamiento es consistente con el modelo teórico del SOC, el cual se basa en la integración temporal de la corriente en función de la capacidad nominal de la batería. La pendiente de la curva de SOC depende directamente del valor de la corriente aplicada y del tiempo de simulación, lo que valida la correcta parametrización del modelo de batería.

Durante simulaciones con corrientes elevadas o con tiempos de descarga prolongados, el modelo activa mecanismos de protección al detectar valores de SOC fuera del rango físico permitido (0–1). Este comportamiento confirma que el modelo implementa correctamente las restricciones físicas del sistema de almacenamiento de energía, evitando resultados que no representen condiciones reales de operación. La activación de estas protecciones también evidencia la importancia de una adecuada selección de parámetros iniciales y condiciones de simulación.

En los ciclos de conducción simulados, el SOC presenta variaciones pequeñas, incluso cuando se observan picos elevados de corriente. Esto se debe a que los eventos de alta demanda de potencia, como el ciclo WOT, tienen una duración corta, por lo que el consumo energético total es reducido. En consecuencia, la batería experimenta un esfuerzo instantáneo significativo, pero sin un impacto considerable sobre su estado de carga global.

Respuesta dinámica del motor eléctrico (PMSM)

El análisis de las señales obtenidas en el oscilograma del motor PMSM evidencia un comportamiento dinámico coherente con la teoría de los motores eléctricos controlados mediante una estrategia V/f. Durante el arranque, se observan transitorios iniciales caracterizados por picos en las variables eléctricas y mecánicas, los cuales corresponden al proceso de establecimiento del flujo magnético y al aumento progresivo de la velocidad del motor.

Posteriormente, el sistema alcanza un régimen permanente estable, donde las señales se estabilizan y el motor mantiene una velocidad acorde a la referencia impuesta. La variable observada en la curva azul del oscilograma, asociada a una magnitud eléctrica interna del motor (corriente o señal de control), presenta un pico inicial seguido de una estabilización, lo cual es característico de un control V/f en lazo abierto.

En los ciclos de conducción urbanos, el motor responde de forma inmediata a los cambios en la señal de aceleración, entregando torque positivo durante las fases de arranque y aceleración, y torque negativo durante las fases de desaceleración, lo que indica la posibilidad de operación regenerativa. En el ciclo WOT, el motor entrega un par elevado desde bajas revoluciones, confirmando una de las principales ventajas de los motores eléctricos en aplicaciones de tracción.

Análisis del comportamiento del sistema en ciclos de conducción

El análisis de los dashboards de simulación muestra que la velocidad del vehículo presenta múltiples arranques y paradas durante el ciclo urbano, lo cual es representativo de condiciones reales de conducción en ciudad. La aceleración longitudinal exhibe picos positivos durante los arranques y picos negativos durante las frenadas, mientras que la potencia eléctrica del motor alterna entre valores positivos y negativos, evidenciando tanto tracción como posibles fases de regeneración.

La corriente de la batería presenta picos elevados durante las aceleraciones y valores cercanos a cero durante las pausas, mientras que el voltaje del paquete de baterías permanece

prácticamente constante. Este comportamiento es coherente con un modelo de batería de gran capacidad, donde las variaciones de voltaje son pequeñas frente a cambios instantáneos de corriente.

En el ciclo WOT, la mayoría de las variables dinámicas presentan actividad significativa únicamente en los primeros segundos. Esto se debe a que este tipo de ensayo está diseñado para evaluar el desempeño máximo del sistema y no la eficiencia energética. Una vez alcanzado el límite de aceleración, el controlador reduce el torque aplicado, estabilizando el sistema y finalizando el evento de máxima demanda.

V. CONCLUSIONES

El modelado del sistema de baterías mediante la herramienta Battery Builder permitió analizar de forma clara y coherente la evolución del estado de carga bajo condiciones de descarga controlada, verificando que el SOC responde conforme a los principios físicos y a las restricciones propias de un sistema real de almacenamiento de energía.

La implementación del motor síncrono de imanes permanentes (PMSM) utilizando bloques del Motor Control Blockset permitió reproducir adecuadamente la dinámica eléctrica y mecánica del motor, evidenciando transitorios de arranque y un régimen permanente estable, acordes con la teoría y con el tipo de control empleado.

El uso de la estrategia de control V/f demostró ser adecuado para un análisis preliminar del comportamiento del motor eléctrico, permitiendo observar la relación entre voltaje, frecuencia, torque y velocidad, sin la complejidad asociada a estrategias de control más avanzadas.

Las simulaciones de ciclos de conducción urbano y WOT permitieron evaluar el comportamiento del sistema bajo condiciones normales y extremas, respectivamente. Los resultados obtenidos muestran que el modelo

responde de manera coherente ante demandas variables de potencia, manteniendo estabilidad eléctrica y mecánica.

MATLAB–Simulink se consolidó como una herramienta eficaz para el estudio y comprensión de los subsistemas principales de un vehículo eléctrico, permitiendo analizar de forma independiente el sistema de baterías y el motor eléctrico, sentando las bases para una futura integración completa del tren motriz.

REFERENCIAS

- [1] C. C. Chan, "The state of the art of electric, hybrid, and fuel cell vehicles," *Proceedings of the IEEE*, vol. 95, no. 4, pp. 704–718, 2007.
- [2] J. Larminie and J. Lowry, *Electric Vehicle Technology Explained*, 2nd ed. Chichester, UK: Wiley, 2012.
- [3] M. Ehsani, Y. Gao, S. Longo, and K. Ebrahimi, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles*, 3rd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2018.
- [4] R. Krishnan, *Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2010.
- [5] MathWorks, "Battery Builder Documentation," MATLAB & Simulink, 2024. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/physmod/simscape-battery/>
- [6] MathWorks, "Permanent Magnet Synchronous Motor," Motor Control Blockset, 2024. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/mcb/>
- [7] J. Dixon and M. Ortúzar, "Electric vehicle technology," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 4, no. 2, pp. 6–14, 2010.
- [8] A. Emadi, *Advanced Electric Drive Vehicles*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2014.
- [9] S. Piller, M. Perrin, and A. Jossen, "Methods for state-of-charge determination and their applications," *Journal of Power Sources*, vol. 96, no. 1, pp. 113–120, 2001.
- [10] T. M. Jahns, "Torque production in permanent-magnet synchronous motor drives," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 23, no. 4, pp. 681–688, 1987.