

DISEÑO Y MODELADO DE BATERÍA Y MOTOR ELÉCTRICO DEL PORSCHE TAYCAN

DESIGN AND MODELING OF THE BATTERY AND ELECTRIC MOTOR OF THE PORSCHE TAYCAN

Andrei Steven Chango Pailacho¹, Bryan Fernando Jumbo Jumbo²

Resumen

En este documento se encuentran detalladas las instrucciones para que los autores准备 un artículo en el formato requerido de la Revista INGENIUS y además puede emplearse como plantilla. Se presenta el formato de publicación, tamaños y tipos de fuente, contiene además las normas para presentar ecuaciones, figuras, tablas y referencias. Los autores deben seguir las instrucciones para mantener el estándar de publicación.

Esta primera sección es para generar un resumen del contenido del artículo dando una clara indicación de la justificación del tema, objetivos, metodología, y principales resultados para que los lectores puedan determinar si el texto completo será de su particular interés. Debe contener un máximo de 230 palabras, no debe incluir ecuaciones o referencias y debe estar escrito de manera impersonal. Use la fuente Times New Roman en tamaño 12. El contenido del resumen debe estar completamente justificado.

Palabras Clave: Incluya aquí las palabras claves que tienen relación con el contenido o enfoque del artículo. Las palabras clave serán hasta seis y se citarán en orden alfabético. Será valorado positivamente el uso de las palabras claves expuestas en el Thesaurus de la UNESCO.

Abstract

Redactar aquí el resumen en inglés con las mismas especificaciones del formato descrito en español.

.....

Keywords: Escriba nuevamente las palabras claves en inglés.

¹ En esta sección escriba la adscripción institucional actual en el siguiente orden: Dependencia a la que pertenece en su institución, Institución a la que pertenece, país, ORCID; como se presenta en el ejemplo siguiente.

² Laboratorio de Investigación en Sistemas Informáticos e Inteligencia Artificial , Universidad Politécnica de Valencia – España, ORCID: 0000-0002-8235-4886

1. Introducción

La transición hacia los sistemas de movilidad eléctrica constituye uno de los cambios más relevantes en la industria automotriz en la actualidad. La necesidad de reducir en su máxima cantidad las emisiones contaminantes ha impulsado el desarrollo de vehículos eléctricos, capaces de igualar o superar las prestaciones de los vehículos de combustión interna.

En este contexto, Porsche, como fabricante de vehículos de alto desempeño ha desarrollado plataformas eléctricas avanzadas que incorporan arquitecturas de alto voltaje, controles sofisticados y motores eléctricos de alta potencia.

Uno de sus principales automóviles desarrollados es el Porsche Taycan, el cual representa uno de los vehículos más tecnológicos y avanzados dentro del segmento de vehículos eléctricos deportivos, integrando una arquitectura eléctrica de 800V, motores síncronos de imanes permanentes y un sistema de almacenamiento eléctrico basado en baterías de ION-Litio de gran capacidad. Este vehículo es un caso de estudio perfecto para su análisis en el ámbito automotriz.

El presente proyecto tiene como finalidad desarrollar el modelado matemático y físico del sistema de almacenamiento energético y el motor en el entorno de MATLAB/Simulink, con un enfoque en el Porsche Taycan. Mediante la simulación del sistema completo se busca comprender la relación entre la arquitectura eléctrica de alto voltaje y la gestión energética del sistema de tracción.

2. Marco Teórico

2.1. *Movilidad eléctrica y arquitectura de alto voltaje*

La electrificación del transporte es una de las principales estrategias para la reducción de emisiones contaminantes y el aumento de la eficiencia energética en el ámbito automotriz.

Los vehículos eléctricos de batería convierten la energía almacenada directamente en energía mecánica mediante motores eléctricos, eliminando

procesos de combustión y reduciendo pérdidas térmicas inherentes a los motores convencionales.

Según Ehsani et al. [1], la eficiencia global de un tren motriz eléctrico puede superar un 80%, mientras que un motor de combustión interna apenas presenta eficiencias que alcanzan el 35%.

Uno de los aspectos más relevantes en la evolución tecnológica de nivel de tensión del sistema de alto voltaje. Tradicionalmente, la mayoría de vehículos eléctricos operaban con arquitecturas nominales de 350V-400V.

No obstante, el aumento en las demandas de potencia en vehículos de alto desempeño han impulsado la adopción de arquitecturas de 800V, tal cual lo ha realizado Porsche con su modelo Taycan.

Además de mejorar en eficiencia, esta arquitectura ofrece ventajas significativas en procesos de recarga rápida. Al operar a mayor voltaje, es posible alcanzar potencias de carga elevadas sin incrementar excesivamente la corriente, reduciendo el estrés térmico en cables y estaciones de carga.

Guzzella y Sciarretta [2], indica que el aumento del voltaje del bus DC no solo mejora la eficiencia energética, sino que también permiten reducir la sección transversal de conductores para una misma potencia, disminuyendo la masa total del sistema.

Esta reducción de masa es crítica en vehículos eléctricos, donde el peso del pack de baterías influye directamente en la autonomía y el desempeño dinámico.

2.2. *Motor síncrono de Imanes permanentes (PMSM)*

Los motores síncronos de imanes permanentes (PMSM) son una de las tecnologías de propulsión más empleadas en vehículos eléctricos de alto desempeño debido a su alta densidad de potencia, eficiencia energética y respuesta dinámica precisa.

A diferencia de los motores de inducción, los PMSM emplean imanes permanentes en el rotor, eliminando

la necesidad de inyección de corriente en éste, y reduciendo pérdidas por deslizamiento [1], [3].

En un PMSM, el flujo magnético del rotor es generado por imanes permanentes. La excitación del estator se hace mediante corrientes trifásicas, que forman un campo magnético giratorio. La sincronización entre la velocidad del campo magnético del estator y la posición del rotor permite que el motor opere sin deslizamiento.

2.3. Baterías de Ion-Litio y Modelado ECM

Las baterías de Ion-Litio constituyen actualmente la tecnología dominante en vehículos eléctricos debido a su elevada densidad energética, alta eficiencia coulombica y larga vida útil.

Según Goodenough y Kim [4], el desarrollo de materiales catódicos estables y electrolitos avanzados han permitido mejoras significativamente la capacidad específica y la estabilidad térmica de las baterías.

El funcionamiento de una celda de Ion-Litio se basa en el movimiento reversible de iones de litio entre el ánodo y cátodo a través de un electrolito durante los procesos cíclicos de carga y descarga.

Durante la descarga:

- El litio migra del ánodo hacia el cátodo (Generalmente se emplea grafito para este componente)
- Los electrones circulan por el circuito externo generando potencia eléctrica.

El voltaje de celda depende del potencial electroquímico diferencial entre los electrodos y puede expresarse como:

$$E = E_{Cátodo} - E_{ánodo}$$

El comportamiento no lineal del voltaje respecto a los estados de carga (SOC) es una característica fundamental en aplicaciones vehiculares.

2.4. Simulación Multidominio en Simscape y Modelado del Tren Motriz Eléctrico

El análisis y diseño de vehículos eléctricos modernos requiere herramienta de simulación capaces de integrar múltiples dominios físicos en un entorno computacional coherente. Los sistemas de propulsión eléctrica conllevan fenómenos eléctricos, electromagnéticos, mecánicos y térmicos que interactúan simultáneamente.

La modelación tradicional basada únicamente en ecuaciones algebráicas resulta insuficiente para representar con precisión estas interacciones dinámicas.

Con el entorno de modelado físico Simscape, la integración multidominio es permitida mediante ecuaciones diferenciales que describen el comportamiento energético del sistema [5].

Dentro de este enfoque multidominio, un vehículo eléctrico integra al menos cuatro dominios principales:

2.4.1. Dominio eléctrico

- Batería
- Inversor
- Convertidores DC/DC

2.4.2. Dominio electromagnético

- Motor PMSM

2.4.3. Dominio mecánico rotacional

- Eje del motor
- Transmisión

2.4.4. Dominio mecánico translacional

- Dinámica longitudinal del vehículo

2.5. Simscape Electrical

El modelado PMSM en Simscape se basa en las ecuaciones en ejes d-q, integradas numéricamente mediante solvers implícitos adecuados para sistemas rígidos.

Simscape eléctrica permite modelar:

- Fuentes dependientes
- Resistencias, Inductancias y capacitancias
- Convertidor de potencia
- Máquinas eléctricas (PMSM, Inducido)
- Controladores Integrados

Según MatWorks [6], el uso de modelado físico en lugar de bloques puramente matemáticos mejoran la estabilidad numérica y la trazabilidad energética del sistema.

2.6. Virtual Vehicle Composer

Virtual vehicle composer (VVC) pertenece a Powertrain Blockset y permite generar arquitecturas vehiculares completas mediante plantillas parametrizadas en Matlab [7].

En el caso de un vehículo eléctrico 2EM (dos motores eléctricos), el entorno permite:

- Configurar la batería de alto voltaje
- Definir motores delanteros y traseros
- Inversores Modelares
- Integrar dinámica longitudinal
- Aplicar ciclos de conducción (WLTP, FTP75)

3. Materiales y Métodos

El desarrollo del presente proyecto se realizó mediante herramientas de simulación computacional orientadas al modelado multidominio de sistemas de propulsión eléctrica.

Los recursos empleados fueron los siguientes:

3.1. Software

- Matlab R2025
- Simulink
- Simscape Electrical
- Batería Simscape
- Conjunto de bloques de tren motriz
- Compositor de Vehículos Virtuales

Estas herramientas permitieron modelar de forma integrada el sistema de almacenamiento energético, el motor eléctrico y la dinámica longitudinal del vehículo.

3.2. Datos técnicos del vehículo Referencial

El vehículo seleccionado como caso de estudio fue el Porsche Taycan turbo S, cuyas prestaciones incluyen:

- Arquitectura eléctrica nominal: ~800 V
- Capacidad de batería: ~93 kWh
- Configuración: 2 motores eléctricos (AWD)
- Tipo de motor: PMSM
- Potencia máxima combinada: ~560 kW
- Masa del vehículo: ~2295 kg
- Coeficiente aerodinámico: 0.25
- Área frontal aproximada: 2,33 m²

Estos parámetros fueron utilizados como base para la configuración del modelo el Virtual Vehicle Composer y Battery Builder.

3.3. Métodos

El procedimiento metodológico se estructuró en tres etapas principales:

- Modelado de sistema de batería
- Modelado del motor eléctrico
- Integración del sistema completo en entorno virtual

3.3.1. Modelado de sistema de batería

El sistema de almacenamiento energético fue desarrollado utilizando Battery Builder mediante una configuración jerárquica.

- Definición de celda equivalente
- Módulo
- Ensamble de Módulos
- Pack completo

Configuración electrónica

El voltaje total del pack fue determinando por:

$$V_{pack} = N_s * V_{celda}$$

Mientras que la capacidad total se definió como:

$$C_{pack} = N_p * C_{celda}$$

Se empleó un modelo de circuito equivalente (ECM) con:

- Fuente OCV dependiendo del SOC
- Resistencia Interna
- Redes RC para modelado transitorio

El estado de carga fue calculado mediante la integración de corriente:

$$SOC(t) = SOC(0) - \frac{1}{C_{nom}} * \int i(t) dt$$

El modelado permitió analizar:

- Voltaje terminal bajo carga
- Corriente de descarga
- Recuperación en frenado regenerativo
- Comportamiento dinámico del SOC

3.3.2. Modelado motor eléctrico PMSM

El motor fue modelado como un motor síncrono de imanes permanentes (PMSM) utilizando bloques de Simscape Electrical.

Se implementaron las ecuaciones dinámicas en ejes d-q:

$$\begin{aligned} v_d &= R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e L_q i_q \\ v_q &= R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_e (L_d i_d + \lambda_m) \end{aligned}$$

El torque electromagnético fue definido por:

$$T_e = \frac{3}{2} p [\lambda_m i_q + (L_d - L_q) i_d i_q]$$

La dinámica mecánica del rotor se modeló mediante:

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T_L - B \omega_m$$

Se utilizó un esquema de control vectorial (FOC) integrado para regular la velocidad y el torque del motor.

3.3.3. Integración mediante Virtual Vehicle Composer

Para modelar el sistema completo del vehículo se utilizó **Virtual Vehicle Composer (VVC)**, configurando:

- Arquitectura: Vehículo Eléctrico 2EM
- Dinámica: Longitudinal
- Parámetros de masa, aerodinámica y neumáticos reales

La ecuación de dinámica longitudinal empleada es:

$$m \frac{dv}{dt} = F_{tracción} - F_{aero} - F_{rodadura} - F_{pendiente}$$

Donde:

$$F_{aero} = \frac{1}{2} \rho C_d A v^2$$

Se simuló el comportamiento bajo condiciones de:

- Aceleración
- Descarga continua
- Frenado regenerativo

3.3.4. Variables analizadas

Durante la simulación se evaluaron las siguientes señales:

- Velocidad angular del motor (rad/s)
- Par electromagnético (Nm)
- Corriente del pack (A)
- Voltaje del pack (V)
- Estado de carga (SOC)
- Potencia eléctrica (kW)

La coherencia energética fue validada mediante el balance:

$$\begin{aligned} P_{eléctrica} &= V \cdot I \\ P_{mecánica} &= T \cdot \omega \end{aligned}$$

4. Procedimiento

- Virtual Vehicle Composer:

Matlab ofrece un apartado llamado APPS en el cual se encuentran agregados varios conjuntos, en el conjunto de “AUTOMOTIVE” se encuentra “Virtual Vehicle Composer”, en este apartado permite ingresar ciertos parámetros del vehículo y su configuración de motor, a demás de poder especificar que señales obtener del vehículo.

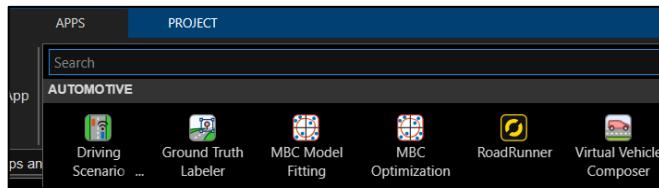


Fig. 1:Virtual Vehicle Composer

Se desplegará una nueva ventana en el cual proceder a crear un nuevo documento en “New”, consecuentemente surgirá un apartado con varias pestañas, “SETUP” permite colocar el tipo de configuración de motor del vehículo, en este caso el Porsche posee dos motores y el que cumple esta configuración es la opción Electric vehicle 2EM.

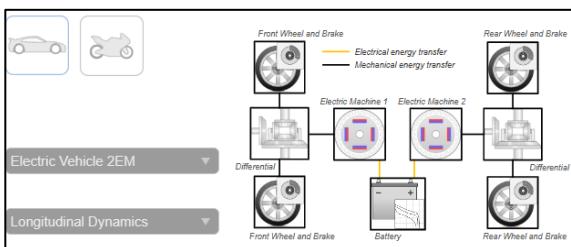


Fig. 2: Configuración de motor

Seleccionada y creada la carpeta con la configuración del motor, se desplegará una nueva ventana con una lista de parámetros modificables en el cual se pueden agregar los datos del Porsche.

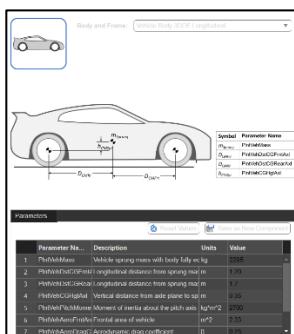


Fig. 3:Lista de parámetros modificables
Tabla 1: Parámetros de vehículo.

Parámetros	Valor
Mass	2295 kg
CG Front	1.20 m
CG Rear	1.70 m
CG Height	0.35 m
Pitch Inertia	$2700 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$
Frontal Area	2.33 m^2
Drag Coefficient	0.25

Colocado los parámetros del motor proporcionados en la ficha técnica del vehículo, proceder en la pestaña de “Logging” a seleccionar las señales que se requieran analizar.

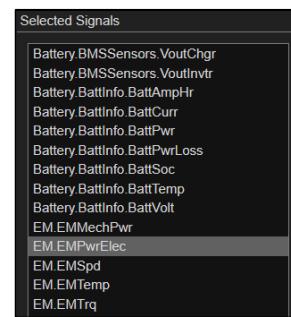


Fig. 4: Señales de motor

Una vez seleccionado las señales deseadas, proceder a simular con “Build Virtual Vehicle”.

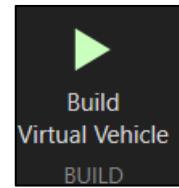


Fig. 5: Build Virtual Vehicle

El programa simulará el vehículo con los datos agregados y procederá a abrir una nueva ventana en el cual se mostrará un diagrama del vehículo.

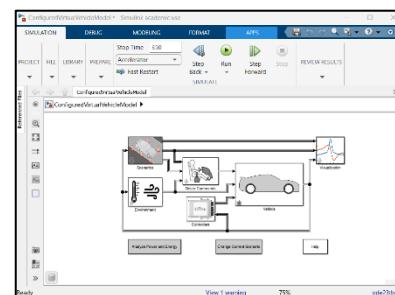


Fig. 6: Diagrama vehículo.

Cambiar el “Stop time” a 200 y proseguir a simular, luego de simularlo ingresar a “Data Inspector” de “Review result”, se desplegará una nueva ventana en el cual estarán los datos registrados de la simulación y varios apartados para realizar las gráficas de los parámetros asignados.

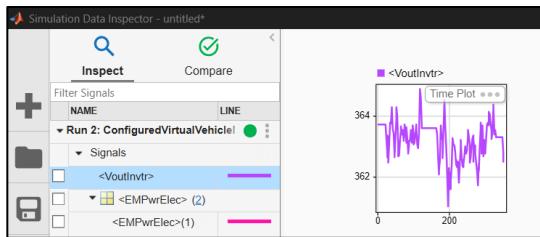


Fig. 7: Signals y oscilogramas

- **Motor inverter:**

Para el desarrollo del motor invertir se hizo uso del curso “Introduction to control motor”, en el cual nos ofrece una serie pasos a desarrollar para poder simular el funcionamiento del motor según sus especificaciones.

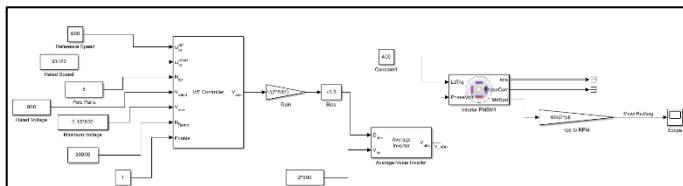


Fig. 8: Diagrama Motor invertir

Llamar el bloque “Vbif Controller” junto con 7 “block constant”, los cuales deberán ser llenados con la tabla 2 y conectados como se muestra en la Fig. 9

Tabla 2: Propiedades del motor y batería

Descripción	Valores
Reference Speed	600
Rated Speed	33422
Pole pairs	8
Rated Voltage	800
Minimum Voltaje	0.15*800
Nramp	30000

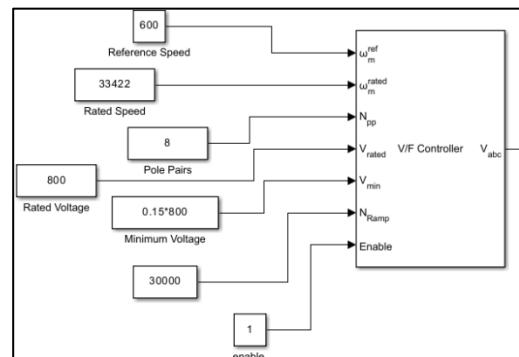


Fig. 9: Conexión VBIF Controller

A continuación, se colocan un “Gain” con la fórmula +0.5, “block Bias”, “Block Constant” y “Average-Value Inverter”, ya colocado estos apartados se procede a conectarlos como se muestra en la Fig. y se conecta el “Vabc” del “Vbif Controller” al bloque “Gain”.

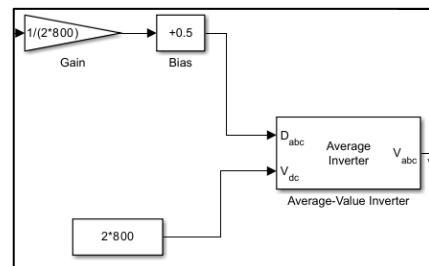


Fig. 10:Diagrama Average-Value Inverter

Conectar el “Vabc” de “Average-Value Inverter” al “PhaseVolt” del “Interior PMSM”, un bloque “Constant” al “LdTrq” con el valor de 400, “Info” y “PhaseCurr” a un “Terminator” cada uno por separado.

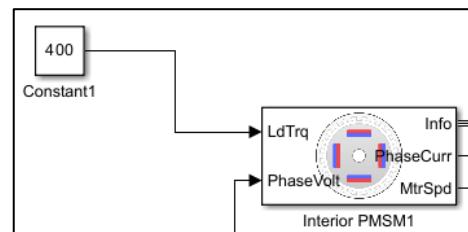


Fig. 11:Diagrama Interior PMSM

Para la representación de la señal de motor se conecta del “MtrSpd” a un bloque “Gain” con a formula $60/(2*\pi)$ y este a su vez al “Scope”.

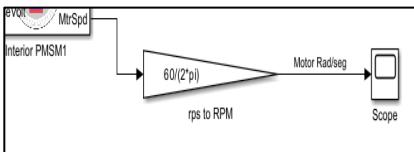


Fig. 12:Diagrama a Scope

En el bloque “Interior PMSM” dejar con los valores en default, antes de simular se deberá cambiar el “Stop Time” a 10 o 3 y proceder a simular, ya simulado la grafica se podrá visualizar en “Scope”.

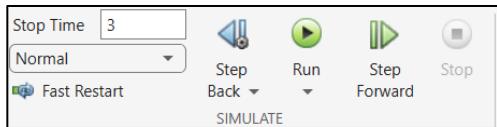


Fig. 13:Simulate

- **Battery builder**

Seleccionar “Battery Builder” del conjunto “Simscape” de la pestaña de “APPS”, una vez seleccionada se procederá a abrir una nueva ventana en el cual están los distintos apartados para simular la batería.

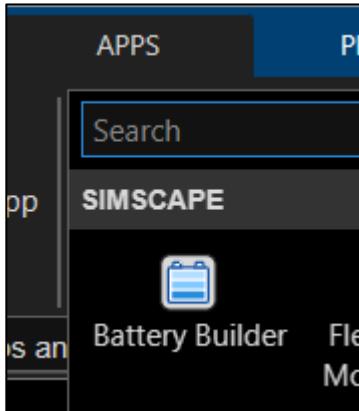


Fig. 14:Battery Builder

En la nueva ventana de battery builder, crear un nuevo Cell con el fin de agregar los parámetros de la celda de la batería del vehículo.

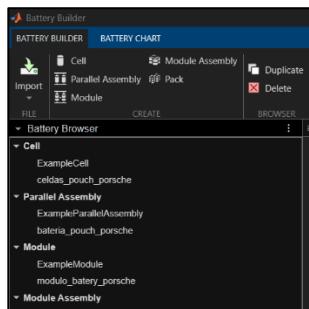


Fig. 15: Create Battery

En “cell properties” se colocarán los valores con los que trabajar la celda, colocar el nombre y los parámetros de la celda de la batería, además de en la parte inferior en “Cell model options” activar el “SOC_Port”.

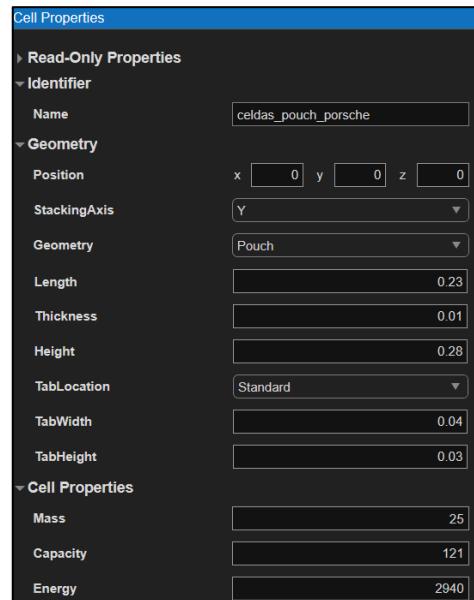


Fig. 16: Cell Properties

Crear un nuevo apartado de “Parallel Assembly”, con el fin de si la celda posera una celda adicional y el tipo de topología, nombrar la nueva carpeta creada y en “Cell” seleccionar la carpeta creada anteriormente llamada “celdas_puch_porsche”, modificar los parámetros como se muestra en la Fig. 17 y aplicarlos.

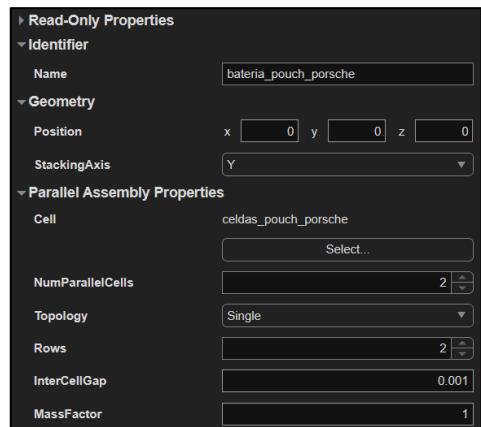


Fig. 17: Parallel Assembly

Crear un nuevo apartado de module con el fin de diseñar la cantidad de celdas por module, nombrar la carpeta y en “ParallelAssembly” seleccionar la

carpeta llamada “bateria_pouch_porsche”, modificar los parámetros como se muestra en la Fig. 18

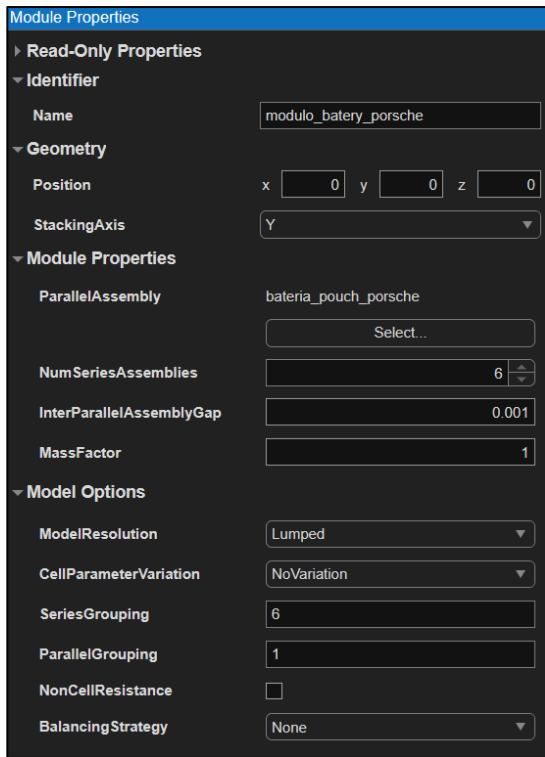


Fig. 18: Module Properties

Para crear el ensamblaje de los módulos de la batería, se puede proseguir de dos formas distintas como agregar 16 veces la carpeta creada llamada “modulo_batery_porsche” en la sección de “Module” o seleccionar 33 veces, como se muestra en la Fig. 19

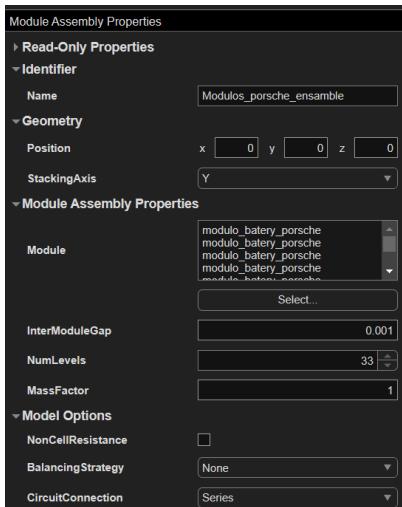


Fig. 19:Module Assembly

Por último, para crear el “Pack” de la batería se puede seleccionar 2 veces la carpeta creada “Modulos_porsche_ensamble” en “ModuleAssembly” si se seleccionaron antes 16 modulos, si en caso se seleccionaron 33 módulos en el anterior proceso de creación de carpeta, solamente será necesario llamarlo una vez.

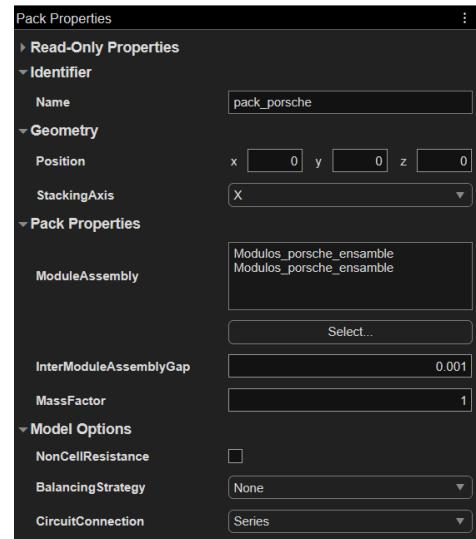


Fig. 20: Pack properties

Ya creado los 5 apartados se procederá a crear la librería y guardarla, si en caso de desearlo modificar, es necesario que exporte el documento, esto con el fin de poder modificarlo en el futuro sin necesidad de crearlo desde cero.

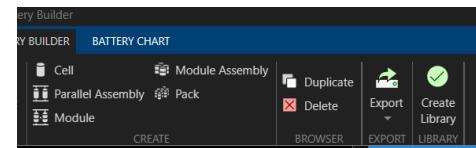


Fig. 21:Create Library

Creada la librería, se procederá a crear una nueva pestaña de simulink y abrir el documento guardado, tomar el recuadro de la batería y agregarlo a la nueva pestaña, ya agregado el recuadro realizar la conexión que se muestra en la Fig. 22

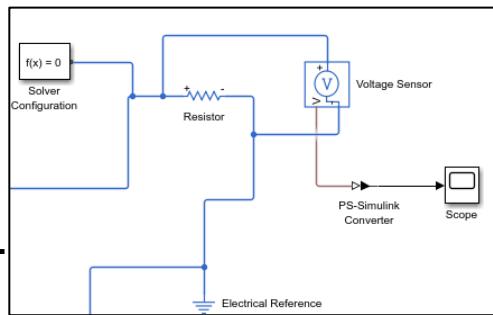


Fig. 22: Diagrama Voltaje de Descarga

Si en caso de que en el proceso se viera colocado en “Pack” solamente uno de “Modulos_porsche_ensamble”, en simulink se puede juntar dos veces el recuadro llamado “pack_porsche” en serie para obtener el voltaje deseado y su respectiva gráfica ya simulado.

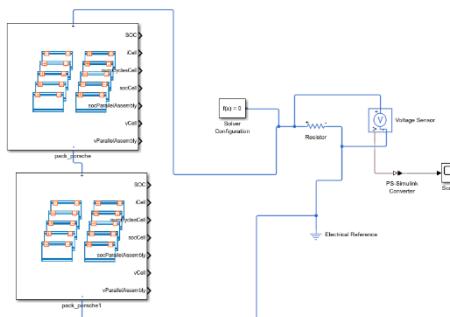


Fig. 23: Conexión en serie, Batería

Cambiar el “Stop time” a 100 o 200 y proceder a simular el trabajo y así obtener la gráfica de descarga de batería del vehículo.



Fig. 24: Simulate, Stop time 100

Ya simulado la gráfica de descarga de la batería, se procede simular el estado de carga y la corriente de carga de vehículo, para ello se procede a realizar la conexión que se muestra en la Fig.

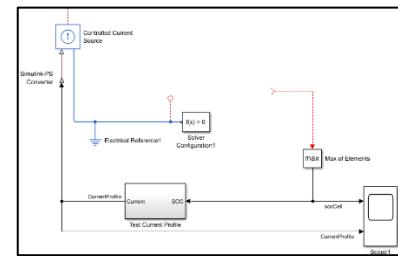


Fig. 25: Diagrama Señal de carga

Si en caso de que los casos anteriores se vieran cumplidos y es necesario el voltaje de la batería, se conecta de la misma forma para sacar la señal en el scope.

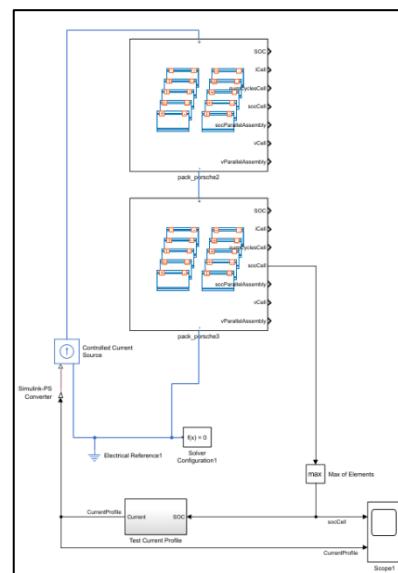


Fig. 26: Diagrama en serie señal de carga.

5. Análisis de resultados

Señales de Virtual Vehicle Composer:

- Motor invertir:

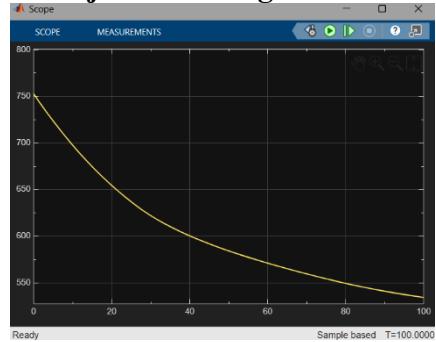
Señal de arranque en vacío



La gráfica muestra el comportamiento dinámico de la velocidad angular del motor eléctrico durante la simulación. Inicialmente se observa un transitorio corto con una pequeña oscilación, lo cual es normal al momento del arranque debido a la respuesta del inversor y del controlador del motor. Posteriormente, la velocidad aumenta de manera progresiva y casi lineal, indicando que el motor está acelerando bajo una demanda constante de torque. Finalmente, la señal se estabiliza en un valor aproximado de 600 rad/s, lo que evidencia que el sistema alcanza un régimen permanente estable, donde el motor mantiene una velocidad constante sin oscilaciones significativas. En conjunto, la respuesta indica un sistema correctamente sintonizado, con buena estabilidad y control adecuado del motor eléctrico.

- **Battery builder:**

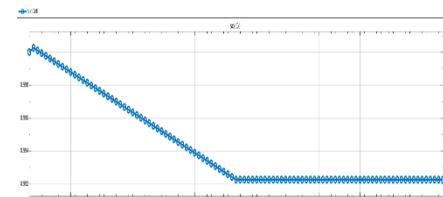
Voltaje de descarga de batería



La gráfica muestra el comportamiento del voltaje del pack de baterías durante el proceso de descarga. Se observa que el voltaje inicia en un valor cercano a los 750 V y disminuye de forma progresiva conforme transcurre el tiempo, lo cual es característico del funcionamiento normal de una batería bajo carga. La caída inicial es más pronunciada, lo que indica una respuesta inmediata al suministro de corriente hacia el motor, y posteriormente el descenso se vuelve más gradual, reflejando una descarga estable y controlada. Este comportamiento evidencia que el modelo implementado en Battery Builder está representando adecuadamente la pérdida de energía interna del sistema, así como el efecto de la resistencia interna y la variación del estado de carga. En general, la curva indica un

funcionamiento coherente del pack de baterías bajo demanda continua de potencia.

Señal de estado de carga

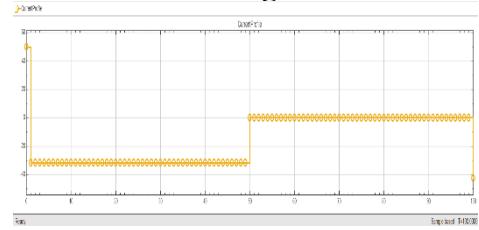


La gráfica muestra la evolución del estado de carga (SOC) de la batería durante la simulación. Se observa una disminución progresiva y prácticamente lineal en la primera parte del ensayo, lo que indica que el vehículo está consumiendo energía de manera constante para alimentar el motor.

Esta pendiente uniforme refleja una demanda estable de potencia y un comportamiento coherente del modelo de descarga. Posteriormente, la señal se estabiliza en un valor mínimo cercano al límite inferior configurado, lo que sugiere que la batería ha alcanzado un nivel de carga crítico o una condición de protección del sistema que evita una descarga más profunda.

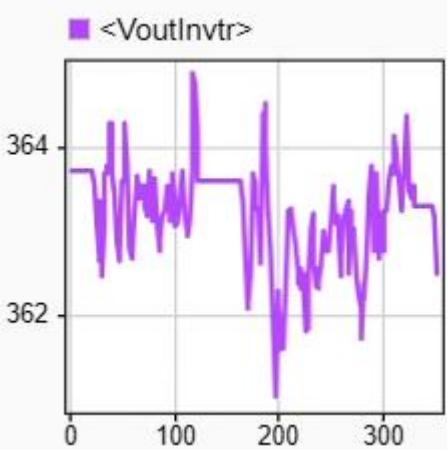
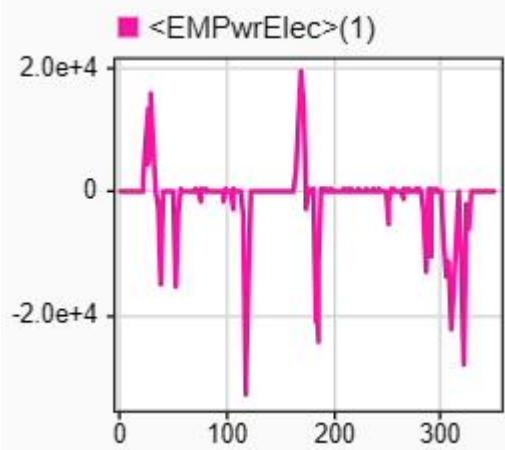
En conjunto, la curva confirma que el modelo implementado representa adecuadamente la relación entre consumo energético y reducción del estado de carga durante la operación del vehículo.

Señal de corriente de carga de batería.



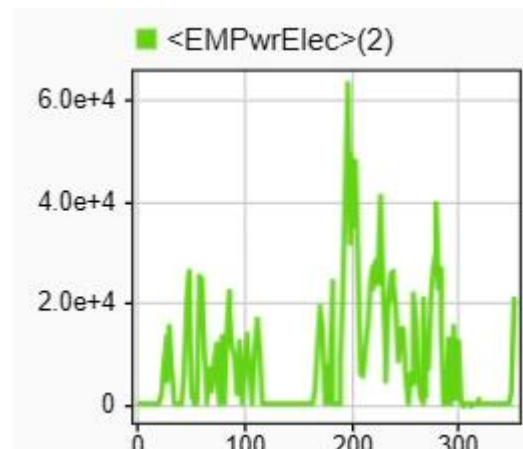
La gráfica corresponde a la señal de corriente de la batería durante la simulación. En la primera etapa se observa un valor negativo casi constante, lo que indica que la batería está entregando energía al sistema, es decir, se encuentra en modo de descarga para alimentar el motor eléctrico. Posteriormente, alrededor de la mitad del tiempo

de simulación, la corriente cambia de nivel y se vuelve positiva, lo que representa un proceso de carga, probablemente asociado a frenado regenerativo o a una condición de recuperación de energía. Las pequeñas oscilaciones visibles en la señal se deben al comportamiento dinámico del sistema de control y del modelo eléctrico del inversor. En conjunto, la gráfica confirma el funcionamiento bidireccional del sistema energético, mostrando claramente las etapas de descarga y carga de la batería dentro del modelo implementado.



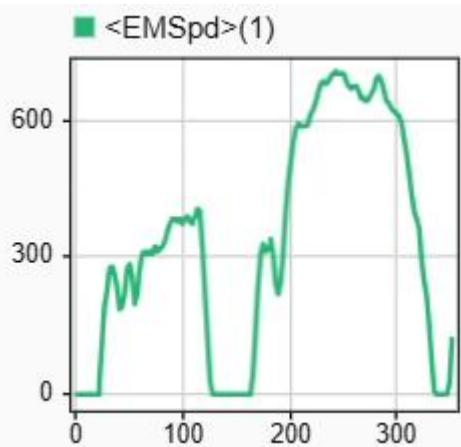
La gráfica muestra la señal de voltaje del inversor (VoutInvtr) durante la operación del sistema. Se observa que el voltaje se mantiene alrededor de un valor medio cercano a los 363–364 V, presentando pequeñas fluctuaciones a lo largo del tiempo. Estas variaciones son normales en sistemas con electrónica de potencia, ya que el inversor modula continuamente la señal para controlar la velocidad y el torque del motor eléctrico. Las oscilaciones reflejan el comportamiento del control PWM y la respuesta dinámica ante cambios de carga o demanda del motor. En general, la señal indica un funcionamiento estable del inversor, manteniendo el voltaje dentro de un rango controlado sin caídas bruscas ni inestabilidades significativas.

La gráfica corresponde a la potencia eléctrica del motor (EMPwrElec) y muestra un comportamiento claramente dinámico con cambios de signo a lo largo del tiempo. Los valores positivos indican momentos en los que el motor está consumiendo energía de la batería para generar movimiento (modo tracción), mientras que los valores negativos representan fases en las que el sistema está devolviendo energía al pack, es decir, funcionando en modo regenerativo. Se observan picos pronunciados tanto positivos como negativos, lo que sugiere transiciones rápidas entre aceleración y recuperación de energía, típicas en maniobras dinámicas o cambios de carga. Las variaciones abruptas reflejan la respuesta del inversor y del control del motor ante cambios de demanda. En general, la señal confirma el carácter bidireccional del flujo de potencia en el sistema eléctrico del vehículo, validando el correcto funcionamiento del modelo de propulsión y regeneración energética.

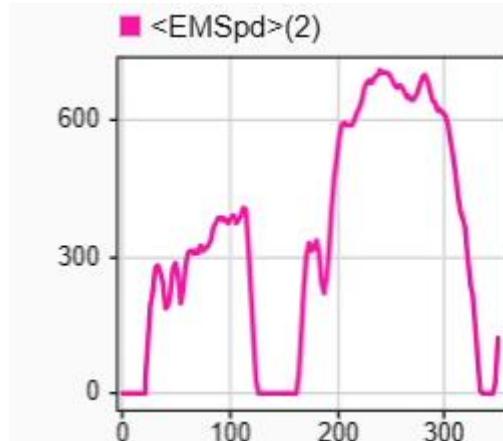


La gráfica corresponde a la potencia eléctrica del segundo motor ($\text{EMPwrElec}(2)$), evidenciando un comportamiento predominantemente positivo a lo largo

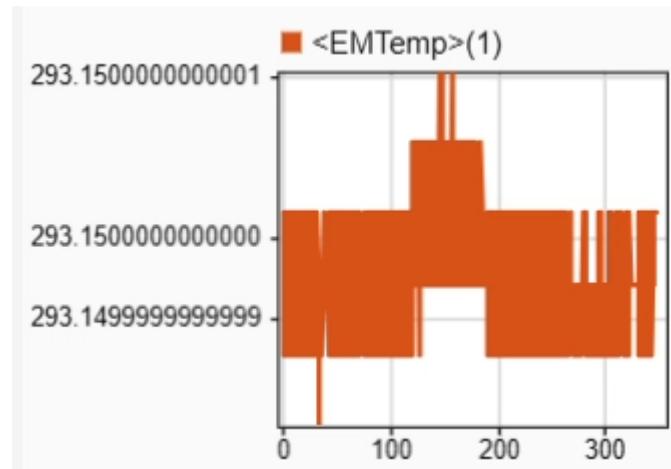
del tiempo. Esto indica que este motor está operando principalmente en modo tracción, consumiendo energía de la batería para generar movimiento. Se observan incrementos significativos de potencia, especialmente en la parte central de la simulación, donde los valores alcanzan picos elevados, lo que sugiere fases de aceleración intensa o mayor demanda de torque. A diferencia de la gráfica anterior, no se aprecian valores negativos marcados, lo que implica que este motor participa menos en procesos regenerativos o que su contribución está más orientada al impulso del vehículo. En conjunto, la señal muestra una participación activa y variable del segundo motor dentro de la arquitectura de propulsión eléctrica, coherente con un sistema de doble motor donde la distribución de potencia puede variar según la condición de conducción.



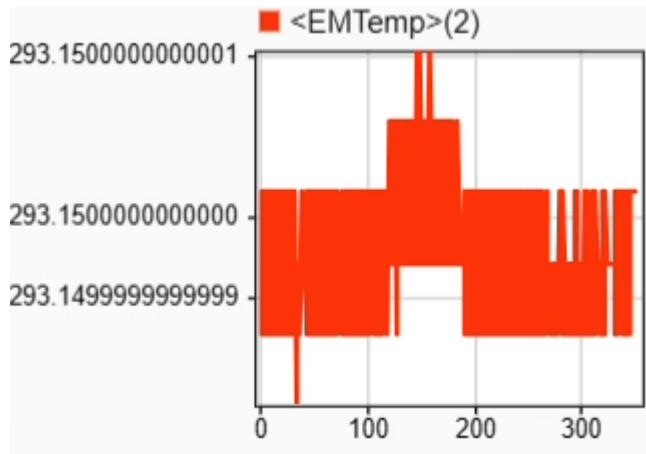
La gráfica corresponde a la velocidad del primer motor (<EMSpd>(1)) y muestra un comportamiento claramente variable a lo largo del tiempo. Inicialmente se observa un incremento progresivo de la velocidad, lo que indica una fase de aceleración del vehículo. Posteriormente aparecen descensos bruscos hasta valores cercanos a cero, lo que sugiere desaceleraciones o momentos en los que el motor reduce significativamente su participación en la tracción. En la parte media de la simulación se aprecia un aumento más pronunciado, alcanzando valores elevados de velocidad angular, lo que corresponde a una etapa de mayor demanda de potencia. Finalmente, la señal vuelve a disminuir, reflejando una reducción en la velocidad o una condición de frenado. En conjunto, la gráfica evidencia un comportamiento dinámico coherente con un ciclo de conducción variable, donde el motor responde adecuadamente a cambios en la demanda de aceleración y desaceleración del vehículo.



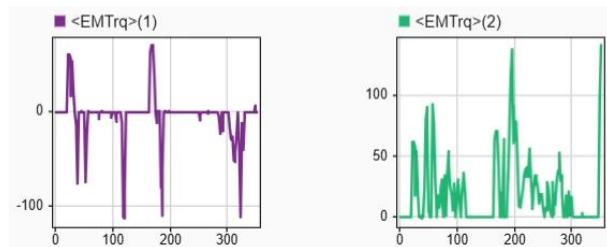
La gráfica corresponde a la velocidad del segundo motor (<EMSpd>(2)) y presenta un comportamiento muy similar al observado en el primer motor, lo que indica una operación coordinada entre ambos dentro del sistema de tracción eléctrica. Se aprecia un aumento progresivo de la velocidad en las primeras etapas, seguido de reducciones hasta valores cercanos a cero, lo que sugiere fases de desaceleración o cambios en la demanda de potencia. En la parte central de la simulación se alcanza la mayor velocidad angular, reflejando un periodo de alta exigencia del sistema, posiblemente asociado a una aceleración intensa o velocidad de crucero elevada. Finalmente, la señal desciende nuevamente, lo que es coherente con una reducción de velocidad o frenado. En general, la gráfica confirma que el segundo motor responde de manera dinámica y sincronizada con el primero, contribuyendo activamente al desempeño del vehículo bajo distintas condiciones de conducción.



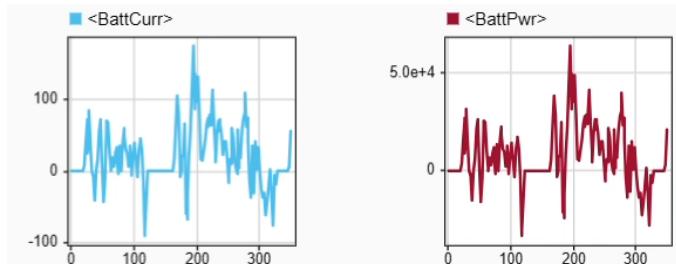
La gráfica corresponde a la temperatura del primer motor ($<\text{EMTemp}>(1)$) y muestra un comportamiento prácticamente constante durante toda la simulación, con valores cercanos a los 293 K (aproximadamente 20 °C). Las pequeñas variaciones observadas son mínimas y no representan incrementos térmicos significativos. Esto indica que el modelo no está considerando efectos térmicos dinámicos detallados o que la simulación se realizó en un intervalo de tiempo corto donde el calentamiento del motor no alcanza a manifestarse de forma apreciable. En términos físicos, el sistema se mantiene dentro de condiciones térmicas estables, sin sobrecalentamiento ni acumulación de pérdidas térmicas relevantes. Este comportamiento es coherente con una simulación principalmente eléctrica y mecánica, donde el modelo térmico no está completamente activado o está configurado en estado ideal.



La gráfica corresponde a la temperatura del segundo motor ($<\text{EMTemp}>(2)$) y presenta un comportamiento prácticamente constante, con valores cercanos a 293 K (aproximadamente 20 °C). Las pequeñas fluctuaciones observadas son mínimas y no representan variaciones térmicas significativas durante la simulación. Esto indica que el modelo térmico del motor no está experimentando un incremento de temperatura apreciable, ya sea porque el tiempo de simulación es corto o porque el modelo térmico está configurado en condiciones ideales sin pérdidas térmicas detalladas. En términos físicos, el sistema opera dentro de un rango térmico estable, sin evidencia de sobrecalentamiento ni acumulación progresiva de calor, lo cual es coherente con una simulación enfocada principalmente en el comportamiento eléctrico y dinámico del vehículo.



Las gráficas muestran el comportamiento del torque de ambos motores eléctricos durante la simulación. En el primer motor ($<\text{EMTrq}>(1)$) se observan valores tanto positivos como negativos, lo que indica que participa activamente en tracción y en frenado regenerativo. Los picos negativos evidencian fases donde el motor actúa como generador, devolviendo energía a la batería. En contraste, el segundo motor ($<\text{EMTrq}>(2)$) presenta mayormente valores positivos y con variaciones menos pronunciadas en sentido negativo, lo que sugiere que su función principal está orientada a la tracción del vehículo. Esta diferencia en el comportamiento de ambos motores refleja una distribución dinámica de torque propia de una arquitectura de doble motor, donde uno puede asumir mayor participación en la recuperación de energía mientras el otro mantiene la propulsión, optimizando así la eficiencia y estabilidad del sistema.



Las gráficas muestran el comportamiento de la corriente de la batería ($<\text{BattCurr}>$) y la potencia del pack ($<\text{BattPwr}>$) durante la simulación. En la señal de corriente se observan valores positivos y negativos, lo que indica un flujo bidireccional de energía: cuando la corriente es positiva, la batería está entregando energía al sistema (modo tracción), y cuando es negativa, se está produciendo recuperación de energía mediante frenado regenerativo. La gráfica de potencia presenta el mismo comportamiento dinámico, con picos positivos asociados a demandas elevadas de aceleración y valores negativos correspondientes a fases regenerativas. Los cambios abruptos reflejan variaciones en la carga del motor y en las condiciones de conducción. En conjunto, ambas señales confirman un funcionamiento coherente del sistema eléctrico, mostrando interacción directa entre

batería y motores y validando el modelo energético implementado en la simulación.

6. Resultados y Discusión

Los resultados obtenidos mediante la simulación en MATLAB/Simulink utilizando Simscape Electrical, Battery Builder y Virtual Vehicle Composer permitieron evaluar el comportamiento dinámico, energético y electromecánico del sistema de propulsión del Porsche Taycan bajo distintas condiciones de operación.

En primer lugar, el análisis del motor síncrono de imanes permanentes (PMSM) evidenció una respuesta dinámica estable ante el arranque y cambios de carga. La señal de velocidad angular mostró un transitorio corto con oscilaciones amortiguadas, alcanzando posteriormente un régimen permanente cercano al valor de referencia configurado. Este comportamiento confirma una adecuada sintonización del control vectorial (FOC), garantizando estabilidad, rápida respuesta y mínima oscilación en estado estacionario. La estabilidad observada valida la correcta implementación del modelo en ejes d-q y su integración con el inversor de valor promedio.

En cuanto al comportamiento del inversor, el voltaje de salida presentó pequeñas fluctuaciones alrededor de un valor medio constante, lo cual es característico de sistemas modulados por PWM. Estas variaciones reflejan el proceso continuo de control del torque y velocidad del motor. No se evidenciaron inestabilidades ni caídas abruptas de tensión, lo que confirma la coherencia eléctrica del modelo implementado.

Respecto al sistema de almacenamiento energético, el modelo de batería basado en circuito equivalente (ECM) reprodujo adecuadamente el comportamiento típico de una batería de ion-litio bajo descarga. El voltaje del pack mostró una disminución progresiva desde aproximadamente 750 V, con una caída inicial más pronunciada asociada al efecto de la resistencia interna y posterior estabilización en una pendiente más suave. Este comportamiento es consistente con la dinámica electroquímica real de este tipo de baterías.

El estado de carga (SOC) presentó una disminución prácticamente lineal durante la etapa de descarga

continua, lo cual indica una demanda de potencia relativamente estable. La posterior estabilización en un valor mínimo sugiere la presencia de límites de protección configurados en el modelo, evitando descargas profundas que podrían comprometer la integridad del sistema.

La señal de corriente del pack evidenció claramente el flujo bidireccional de energía. Durante la fase de tracción, la corriente fue positiva (entrega de energía), mientras que en las fases regenerativas adoptó valores negativos, indicando recuperación energética. Esta característica confirma la correcta integración entre batería, inversores y motores, así como la adecuada simulación del frenado regenerativo.

El análisis de potencia eléctrica en ambos motores mostró diferencias en la distribución energética. El primer motor presentó valores tanto positivos como negativos, participando activamente en tracción y regeneración. En contraste, el segundo motor operó predominantemente en modo tracción. Este comportamiento sugiere una estrategia de reparto dinámico de torque propia de arquitecturas AWD (All-Wheel Drive), donde la gestión energética optimiza estabilidad y eficiencia.

Las velocidades de ambos motores mostraron comportamientos sincronizados y coherentes con un ciclo dinámico de aceleración y desaceleración. Los picos de velocidad se correspondieron con incrementos de potencia y torque, validando la relación física entre variables mecánicas y eléctricas.

Finalmente, las señales térmicas de ambos motores permanecieron prácticamente constantes alrededor de 293 K. Esto indica que el modelo térmico no fue desarrollado en detalle o que el tiempo de simulación no permitió observar efectos significativos de calentamiento. Desde el punto de vista metodológico, esto representa una limitación del estudio, ya que en aplicaciones reales el análisis térmico es fundamental para la validación del desempeño continuo del sistema.

En conjunto, los resultados demuestran coherencia energética, estabilidad dinámica y correcta interacción entre los dominios eléctrico, electromagnético y mecánico, validando el enfoque multidominio implementado en Simscape.

7. Conclusiones

El modelado y simulación del sistema de batería y motor eléctrico del Porsche Taycan permitió analizar de manera integral el comportamiento dinámico y energético de un vehículo eléctrico de arquitectura de 800 V bajo distintas condiciones de operación.

Se comprobó que el modelo del motor PMSM, implementado en ejes d-q con control vectorial, presenta estabilidad dinámica, rápida respuesta transitoria y adecuado seguimiento de velocidad, evidenciando la eficiencia del control FOC en aplicaciones de alto desempeño.

El modelo de batería basado en circuito equivalente permitió representar de forma realista la variación del voltaje bajo carga, la evolución del estado de carga y el flujo bidireccional de corriente asociado al frenado regenerativo. Esto valida la utilidad del enfoque ECM para estudios de desempeño energético en vehículos eléctricos.

La integración del sistema completo mediante Virtual Vehicle Composer permitió observar la interacción coordinada de los dos motores eléctricos, evidenciando una distribución dinámica de torque coherente con arquitecturas AWD. Asimismo, se verificó el balance energético entre potencia demandada por los motores y potencia suministrada por el pack de baterías.

Desde el punto de vista metodológico, el uso de herramientas multidominio como Simscape demostró ser adecuado para representar fenómenos eléctricos y mecánicos de manera acoplada, mejorando la trazabilidad energética y la estabilidad numérica frente a modelos puramente algebraicos.

Como limitación del estudio, se identifica la ausencia de un modelado térmico detallado y la simulación bajo un ciclo de conducción estandarizado (WLTP o FTP75), lo cual podría incorporarse en trabajos futuros para obtener resultados más representativos de condiciones reales de operación.

En conclusión, el proyecto permitió validar mediante simulación computacional el desempeño del sistema de propulsión eléctrica del Porsche Taycan, demostrando la viabilidad del modelado matemático y físico como herramienta de análisis en el diseño y evaluación de vehículos eléctricos de alto rendimiento.

Referencias

- [1] L. Prasad, «Modern Electric, Hybrid Electric & Fuel Cell Vehicles - Mehrdad Ehsani», Accedido: 12 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.academia.edu/35232211/Modern_Electric_Hybrid_Electric_and_Fuel_Cell_Vehicles_Mehrdad_Ehsani
- [2] L. Guzzella y A. Sciarretta, *Vehicle Propulsion Systems: Introduction to Modeling and Optimization*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013. doi: 10.1007/978-3-642-35913-2.
- [3] «Motores de Imanes Permanentes: Tipos y Usos | PDF | Componentes eléctricos | Máquinas», Scribd. Accedido: 12 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/396176138/Motor-de-Imanes-Permanentes>
- [4] J. B. Goodenough y Y. Kim, «Challenges for Rechargeable Li Batteries», *Chem. Mater.*, vol. 22, n.º 3, pp. 587-603, feb. 2010, doi: 10.1021/cm901452z.
- [5] «Simscape». Accedido: 12 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/help/simscape/electrical/index.html>
- [6] «Simscape». Accedido: 12 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/help/simscape/electrical/index.html>
- [7] «Virtual Vehicle Composer - Configure, build, and analyze a virtual automotive vehicle - MATLAB». Accedido: 12 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/help/autoblks/ref/virtualvehiclecomposer-app.html>
- [8] Robin E. Bentley, *Handbook of Temperature Measurement: Theory and practice of thermoelectric*. Mexico City: Pearson.