

Simulación y Análisis de un Vehículo Híbrido mediante MATLAB/Simulink

Resumen

En el presente trabajo se realiza la simulación y análisis del funcionamiento de un vehículo híbrido Toyota Prius utilizando las herramientas MATLAB/Simulink y Simscape. El modelo del vehículo se desarrolla mediante la arquitectura híbrida tipo Power-Split (IPS), la cual permite representar la interacción entre el motor de combustión interna, el motor eléctrico de tracción y el sistema de almacenamiento de energía. Se analizan variables fundamentales como la velocidad y el torque del motor eléctrico, la potencia eléctrica y el estado de carga de la batería, obtenidas a partir del módulo de registro de datos (Logging). Los resultados permiten visualizar el comportamiento del sistema híbrido durante distintas condiciones de operación, evidenciando la contribución del motor eléctrico en la propulsión del vehículo y la recuperación de energía mediante frenado regenerativo.

Palabras clave: Vehículo híbrido; Toyota Prius; Power-Split; MATLAB; Simulink; Simscape; Motor eléctrico

1. Introducción

Este proyecto presenta el cómo en la actualidad, los vehículos híbridos representan una solución eficiente para la reducción del consumo de combustible y emisiones contaminantes. El análisis y simulación de este tipo de sistemas permite comprender la interacción entre el motor térmico, los motores eléctricos y el sistema de almacenamiento de energía.

El presente informe tiene como objetivo modelar y analizar el funcionamiento de un vehículo híbrido Toyota Prius mediante el uso de MATLAB/Simulink y Simscape, enfocándose en el comportamiento del motor eléctrico y la gestión energética del sistema.

2. Metodología

2.1 Descripción del Vehículo Seleccionado

El vehículo seleccionado para el estudio es un Toyota Prius, el cual emplea una arquitectura híbrida tipo Power-Split (IPS).

Características generales del vehículo

- Tipo de vehículo: Híbrido eléctrico
- Arquitectura: Power-Split (IPS)

- Tracción: Delantera
- Uso principal: Conducción urbana y mixta

2.2 Arquitectura del Sistema Híbrido

El Toyota Prius utiliza un sistema híbrido de división de potencia que combina un motor de combustión interna y dos máquinas eléctricas (MG1 y MG2) mediante un engranaje planetario.

Componentes principales:

- Motor de combustión interna
- Motor eléctrico de tracción (MG2)
- Motor-generator (MG1)
- Batería de alto voltaje
- Dispositivo de división de potencia (e-CVT)

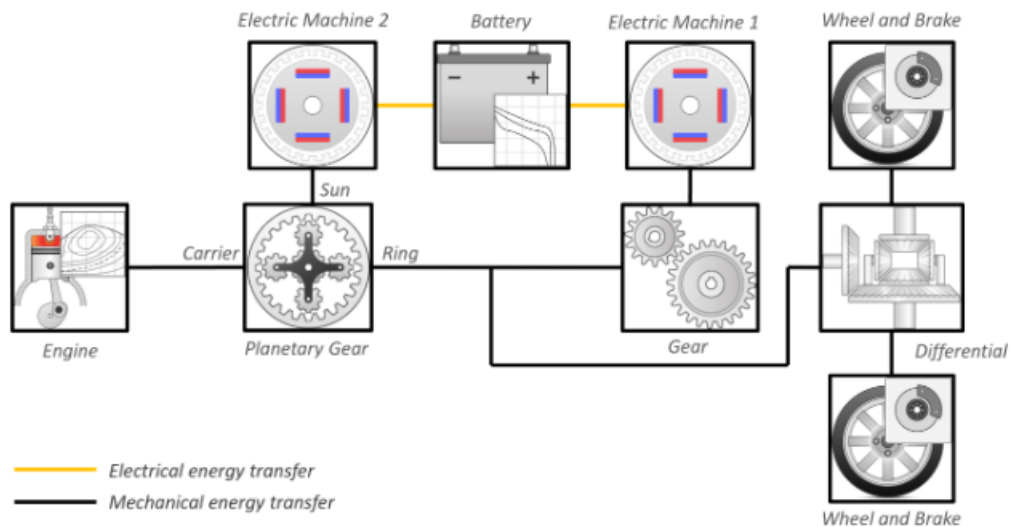


Figura 1. Arquitectura del sistema híbrido tipo Power-Split (IPS)

2.3 Herramientas Utilizadas

Para el desarrollo del proyecto se emplearon las siguientes herramientas:

- MATLAB
- Simulink
- Powertrain Blockset
- Simscape Battery (integrado en el modelo del sistema de potencia)

Estas herramientas permiten modelar y analizar el comportamiento dinámico y energético del vehículo híbrido.

2.4 Modelo del Vehículo en MATLAB/Simulink

El modelo del vehículo fue desarrollado utilizando Virtual Vehicle Composer, seleccionando la arquitectura Hybrid Electric Vehicle IPS, la cual representa de forma adecuada el funcionamiento del Toyota Prius.

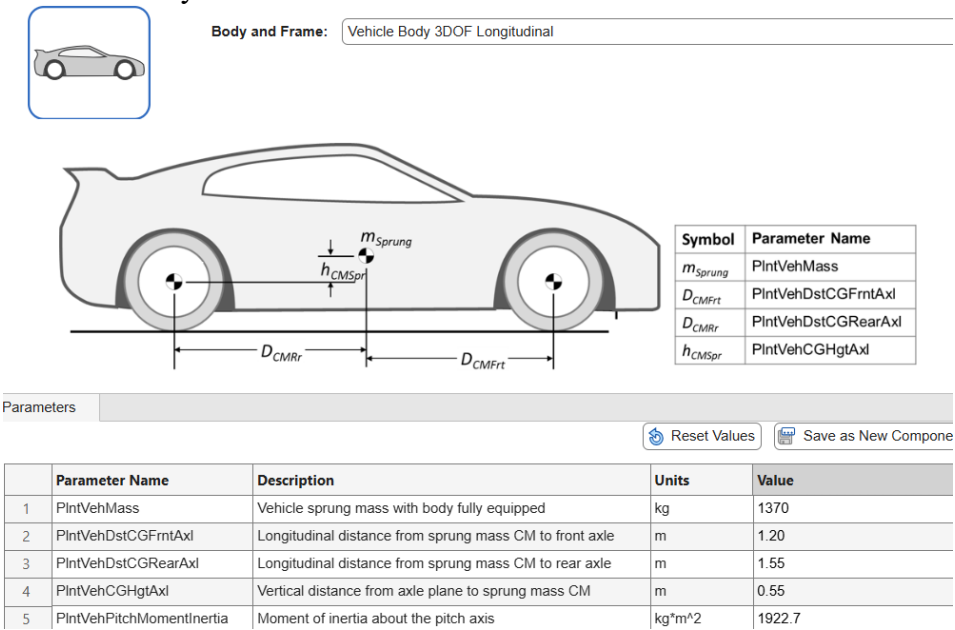


Figura 2. Datos técnicos de la ficha del Toyota Prius.

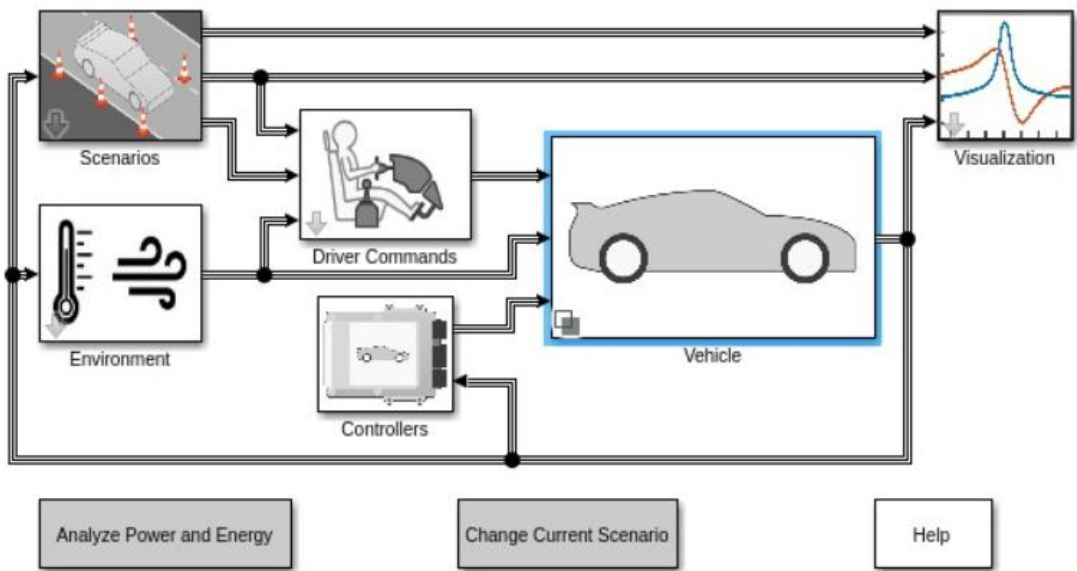


Figura 3. Modelo general del vehículo híbrido en Simulink.

2.5 Modelado del Motor Eléctrico (Simscape)

El motor eléctrico de tracción (MG2) fue modelado mediante un bloque de tipo Mapped Motor, el cual representa el comportamiento del motor eléctrico a partir de mapas de torque,

velocidad y eficiencia. Este enfoque es adecuado para el análisis del funcionamiento del sistema híbrido a nivel vehicular.

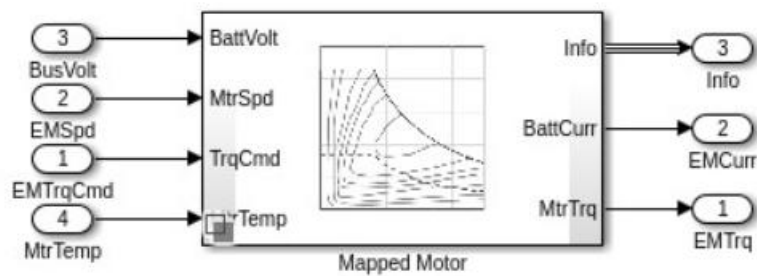


Figura 4. Bloque del motor eléctrico de tracción (Mapped Motor).

El modelo del motor eléctrico permite analizar variables fundamentales como:

- Velocidad del motor
- Torque electromagnético
- Potencia eléctrica
- Corriente de batería asociada

2.6 Variables Registradas (Logging)

Con el fin de visualizar el funcionamiento del vehículo y del sistema híbrido, se registraron las siguientes variables mediante el módulo Logging de Simulink:

Variables del vehículo

- Velocidad del vehículo
- Aceleración longitudinal

Variables del motor eléctrico

- Velocidad del motor eléctrico (EM2Spd)
- Torque del motor eléctrico (EM2Trq)
- Potencia eléctrica del motor (EM2PwrElec)

Variables de la batería

- Estado de carga (SOC)
- Corriente de batería
- Potencia de batería

3. Resultados y Pruebas

1. Creación del panel de control (Dashboard).

EngSpdOut vs EngTrq

La figura 5 muestra la evolución temporal de las variables EngSpdOut y EngTrq, las cuales permiten analizar el comportamiento dinámico del vehículo híbrido y la estrategia de control del sistema de propulsión.

En el intervalo aproximado entre 0 y 400 en el eje horizontal, se observa la activación inicial del motor de combustión, evidenciada por el incremento de EngSpdOut acompañado de valores bajos a moderados de EngTrq, es decir se está dando la fase de arranque y aceleración suave, donde el motor térmico comienza a participar progresivamente en la tracción, mientras el sistema híbrido regula el par para evitar consumos elevados.

Entre 400 y 1400, se identifican fases de aceleración, desaceleración y estabilización, donde los aumentos simultáneos de EngSpdOut y EngTrq corresponden a demandas de potencia más elevadas. Asimismo, se observan tramos donde el motor gira a un régimen relativamente alto con par reducido, lo que indica un modo de operación orientado a la eficiencia o a la recarga del sistema eléctrico, típico de la gestión energética en vehículos híbridos.

En el intervalo comprendido aproximadamente entre 1400 y 2000, ambas variables permanecen cercanas a cero, lo que evidencia la desactivación del motor de combustión, lo cual activa el modo eléctrico puro

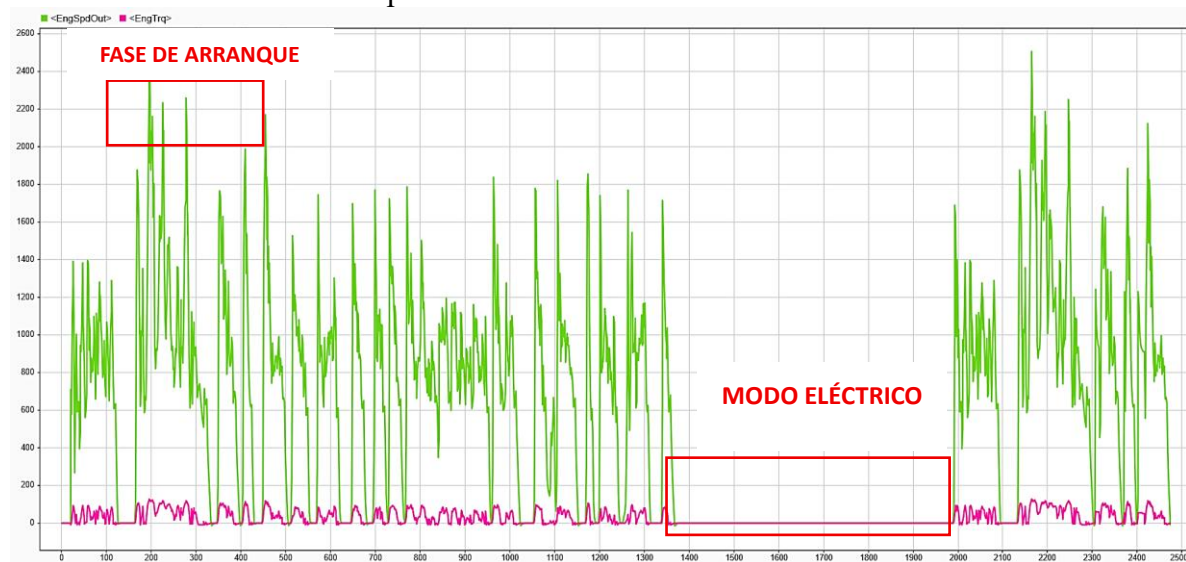


Figura 5. EngSpdOut vs EngTrq

EMSpd vs EMTrq

Para ver si el torque cae a medida que suben las RPM, en el intervalo aproximado entre 0 y 300, se observa un incremento progresivo de EMSpd, acompañado por valores positivos de EMTrq, el motor eléctrico proporciona par directo a las ruedas, lo que permite una respuesta rápida del vehículo y reduce la necesidad de activar el motor de combustión. Entre 300 y 900, se identifican múltiples picos de EMTrq, alternando entre valores positivos y negativos, la presencia de par negativo indica fases de frenado regenerativo, donde el motor eléctrico actúa como generador.

Entre 900 y 1400, la velocidad del motor eléctrico se mantiene en valores moderados, mientras que el par presenta fluctuaciones de menor magnitud, donde el motor eléctrico cumple un rol de apoyo parcial al sistema de propulsión o de regulación de la velocidad, sin requerir grandes aportes de par. Finalmente, entre 2000 y 2500, se observa una nueva activación significativa del motor eléctrico, con incrementos pronunciados en EMSpd y picos repetitivos de EMTrq. Este comportamiento está asociado a fases de aceleración y desaceleración más exigentes, donde el motor eléctrico vuelve a aportar par para mejorar la respuesta dinámica del vehículo y apoyar al motor térmico.

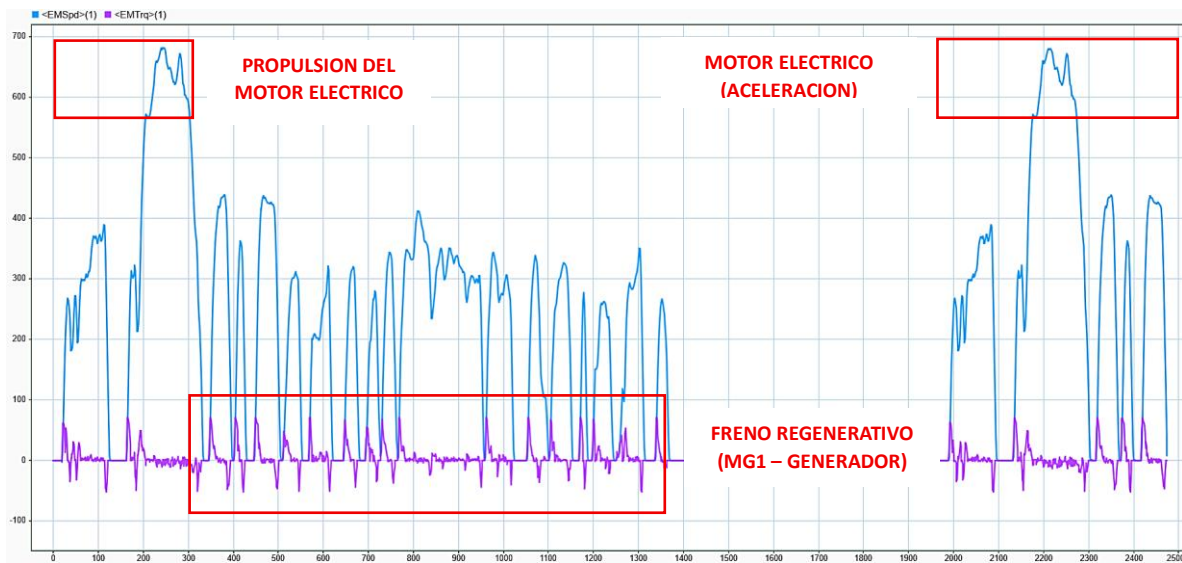


Figura 6. EMSpd vs EMTrq

BattPwr vs BattSoc

La Figura 7 muestra la relación entre la potencia de la batería (BattPwr) y el estado de carga (BattSoc), variables fundamentales para evaluar la gestión energética del vehículo híbrido. La representación del BattSoc en una escala normalizada (0–1).

En el intervalo 0 – 300, se observa un BattSoc elevado, acompañado de picos positivos de BattPwr, lo que indica una descarga inicial de la batería para alimentar el sistema de propulsión eléctrica durante el arranque y las primeras aceleraciones. Esta descarga se refleja en una disminución progresiva del estado de carga. Entre 300 y 900, la potencia de la batería presenta alternancia entre valores positivos y negativos, asociada a fases de asistencia eléctrica y frenado regenerativo. Durante este intervalo, el BattSoc desciende hasta valores cercanos a 0.4, estabilizándose posteriormente, lo que evidencia un balance entre los procesos de carga y descarga.

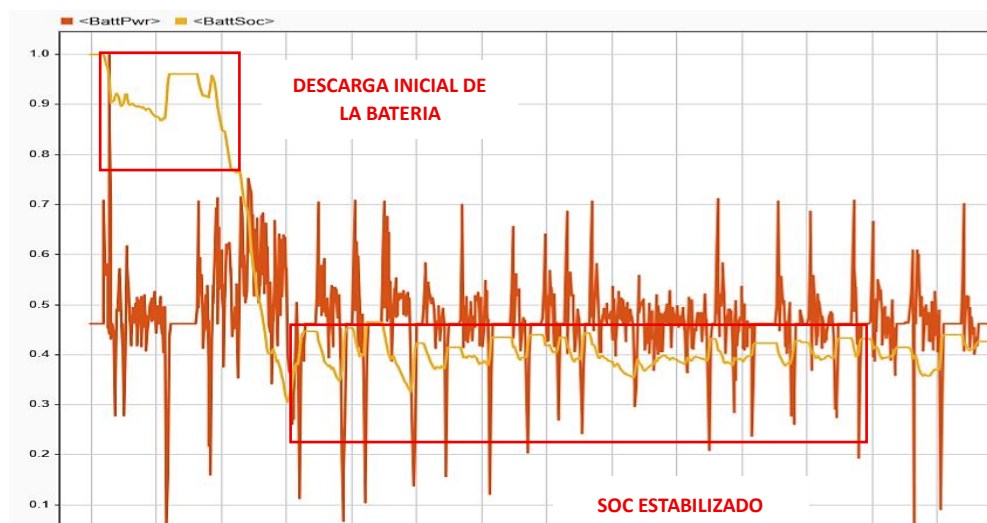


Figura 7. BattPwr vs BattSoc.

BattCurr vs BattVolt

En la Figura 8 observamos el comportamiento donde nos indica que el sistema de batería es capaz de soportar variaciones rápidas de corriente sin comprometer la estabilidad del voltaje, lo cual es esencial para garantizar un funcionamiento seguro, eficiente y confiable del sistema híbrido durante las distintas condiciones de operación del vehículo.

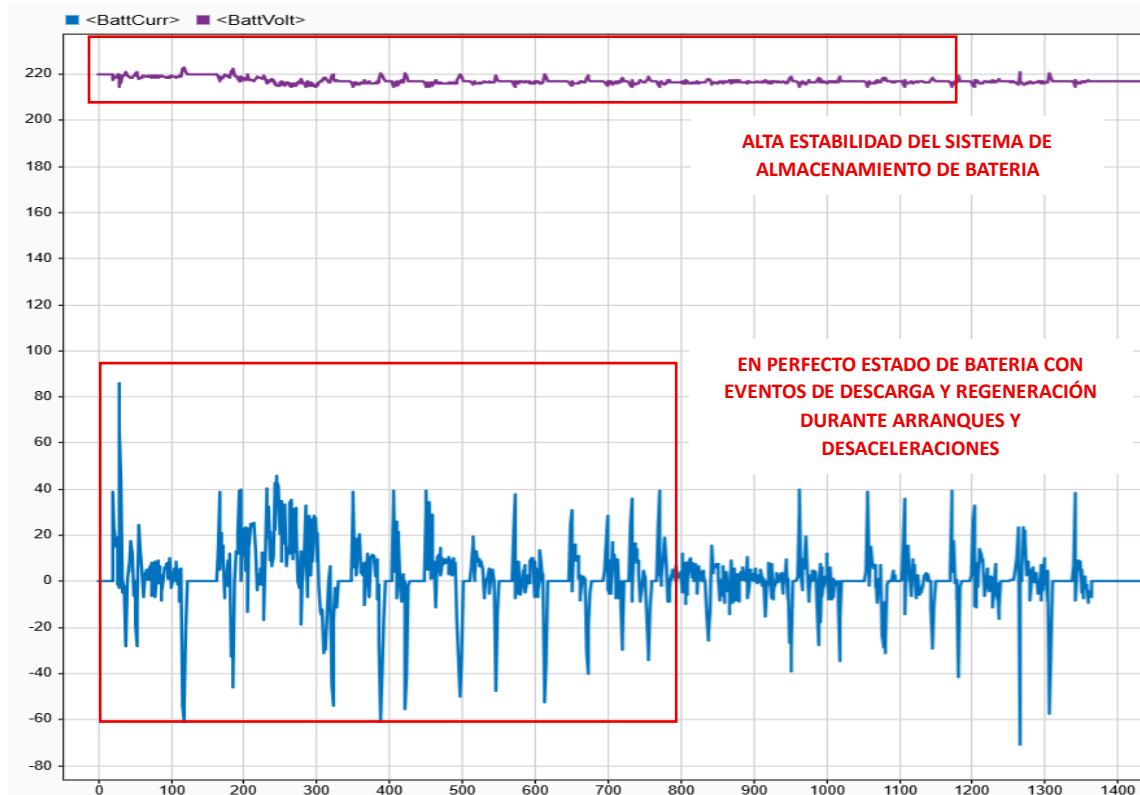


Figura 8. BattCurr vs BattVolt

FuelFlw vs EMPwrElec

La figura 9 presenta la evolución de FuelFlw (flujo de combustible) y EMPwrElec (potencia eléctrica del motor eléctrico), variables seleccionadas por su relevancia directa en el análisis del reparto de potencia entre el sistema térmico y el sistema eléctrico del vehículo híbrido.

En el intervalo 0 – 150, el FuelFlw presenta valores bajos o cercanos a cero, mientras que EMPwrElec se mantiene en niveles moderados, lo que indica una fase de operación eléctrica. Entre 150 y 300, se observa un incremento significativo de FuelFlw, acompañado de valores elevados de EMPwrElec, lo que evidencia una operación en modo híbrido, donde ambos sistemas aportan potencia.

En el intervalo 300 – 600, el FuelFlw presenta un comportamiento alternando entre valores bajos y picos breves, mientras que EMPwrElec se mantiene en un nivel relativamente estable. Esto indica una gestión adaptativa del motor térmico. Entre 600 y 1400, se observan múltiples picos de FuelFlw, coincidentes con caídas puntuales de EMPwrElec, lo que refleja transiciones frecuentes entre asistencia eléctrica y mayor actuar del motor térmico.

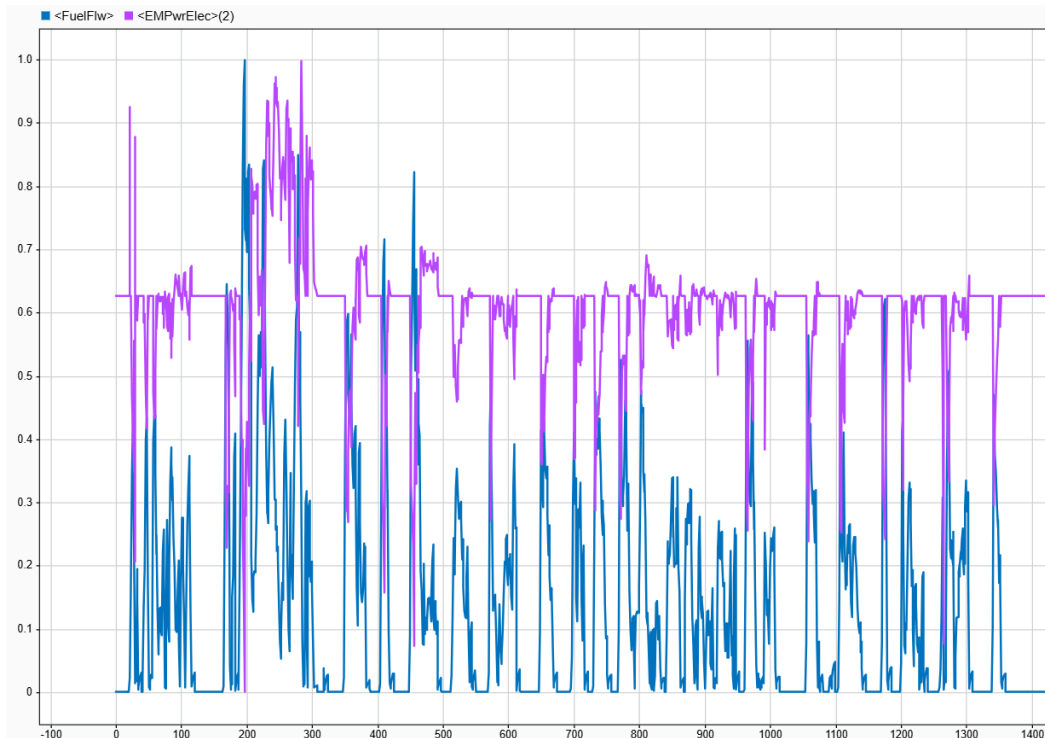


Figura 9. FuelFlw vs EMPwrElec.

EngTrq vs. EMTrq

La señal EngTrq (par del motor de combustión) muestra pulsos de par claramente definidos, con amplitudes que oscilan aproximadamente entre 40 y 120 Nm, lo que indica eventos repetitivos de demanda de par asociados a aceleraciones parciales.

La señal EMTrq presenta un comportamiento bidireccional, con valores positivos moderados (≈ 10 a 50 Nm) durante los flancos ascendentes de EngTrq, evidenciando asistencia eléctrica para reducir el esfuerzo del motor térmico y mejorar la respuesta transitoria. De forma contrastante, se observan picos negativos recurrentes de EMTrq (≈ -40 a -60 Nm), que coinciden con caídas abruptas del EngTrq, lo cual es característico de frenado regenerativo o absorción de par durante desaceleraciones.

Desde el punto de vista del control de par, la superposición temporal de ambas señales indica una lógica de reparto de torque (torque split), donde el motor eléctrico suaviza las variaciones bruscas del par del motor térmico, reduciendo oscilaciones en la línea motriz. Además, los picos negativos del EMTrq sugieren que el sistema prioriza la recuperación de energía cuando la demanda del conductor disminuye, manteniendo al motor térmico cercano a condiciones de carga favorables.



Figura 10. EngTrq vs. EMTrq.

EngSpdOut vs. EMSpd

La señal EngSpdOut (régimen del motor de combustión) muestra un comportamiento muy dinámico con variaciones frecuentes y picos pronunciados, alcanzando valores cercanos a las 1800-2200 rpm. Estas fluctuaciones indican cambios constantes en la velocidad del motor, característicos del ciclo de conducción repetido de aceleración y desaceleración, así como posibles transiciones de carga o cambios en las relaciones de transmisión.

Por otro lado, la señal EMSpd (velocidad del motor eléctrico) muestra un perfil más limitado con amplitudes significativamente más pequeñas, generalmente en el rango aproximado de 0 a 650 rpm. Se observa que EMSpd sigue parcialmente la tendencia de EngSpdOut, pero con respuestas más suaves y controladas, lo que sugiere que el motor eléctrico actúa como un elemento de soporte y regulador del modo del sistema de propulsión.

Desde el punto de vista del control de velocidad, la superposición de las dos señales muestra una estrategia de acoplamiento híbrido, donde el motor eléctrico ayuda a estabilizar la transmisión durante cambios repentinos en la velocidad del motor. En particular, cuando EngSpdOut muestra picos altos o caídas pronunciadas, EMSpd tiende a permanecer activo, lo que ayuda a suavizar la respuesta dinámica y reducir las tensiones mecánicas en el sistema.

Asimismo, los intervalos en los que EMSpd cae a valores cercanos a cero coinciden con descensos significativos en EngSpdOut, indicando fases de desaceleración o funcionamiento predominantemente del motor térmico sin asistencia eléctrica. En general, el comportamiento observado es consistente con una estrategia de gestión de energía en la que el motor eléctrico se utiliza selectivamente para mejorar la eficiencia, la suavidad de funcionamiento y la respuesta transitoria del sistema híbrido.

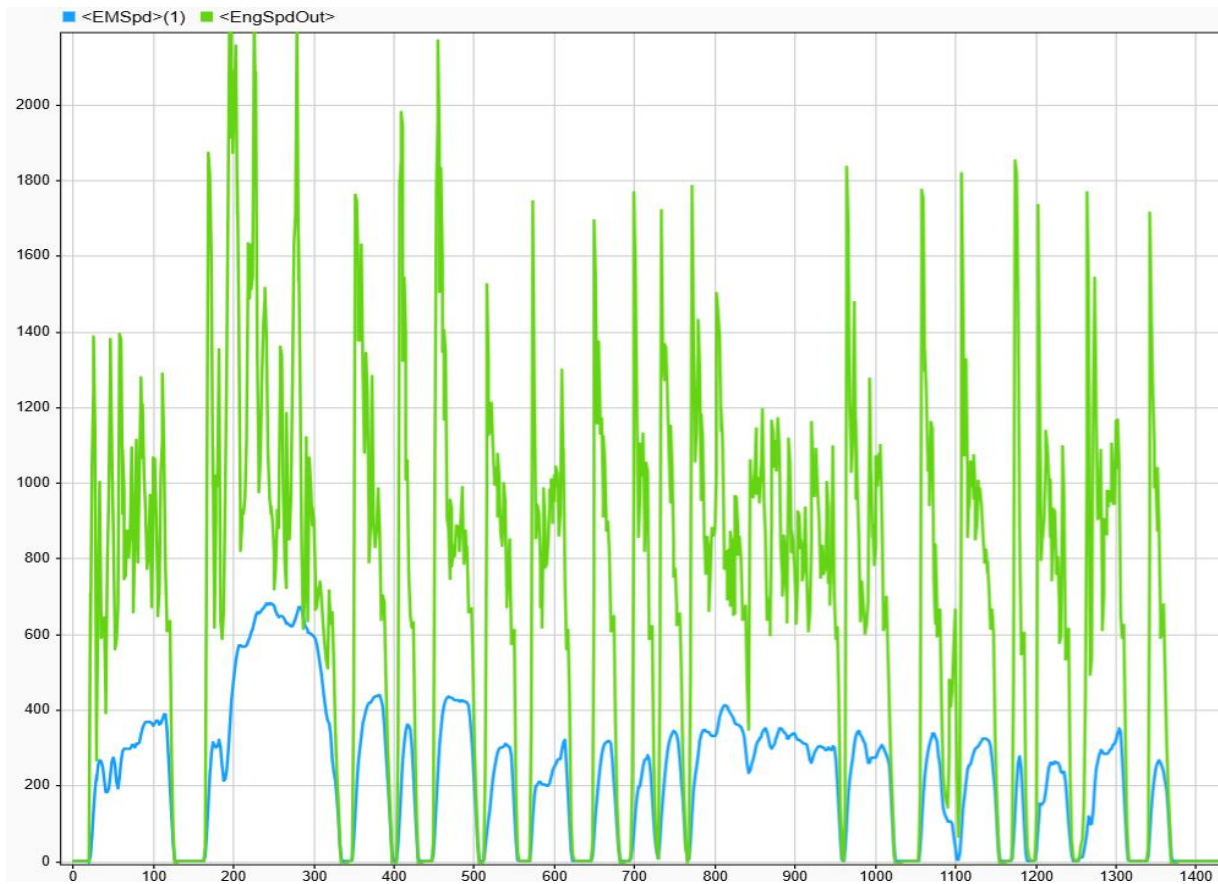


Figura 11. EngSpdOut vs. EMSpd

EngTrqCrk vs. BattPwr

La señal EngTrqCrk (par entregado al cigüeñal de un motor de combustión interna) muestra un comportamiento muy variable con valores que oscilan alrededor del eje cero y picos tanto positivos como negativos. Se observan picos positivos entre 8×10^3 y $1,8 \times 10^4$ (unidades relativas del modelo), asociados a eventos de aceleración o aumentos repentinos de la demanda de par en el motor térmico.

Además, la señal BattPwr (energía de la batería) exhibe una naturaleza bidireccional pronunciada, alternando valores positivos y negativos. Los picos positivos en BattPwr indican una descarga de la batería que coincide con un aumento en EngTrqCrk con el tiempo, lo que demuestra que el sistema eléctrico proporciona energía para ayudar al motor de combustión durante las fases de alta demanda.

Por el contrario, se identifican picos negativos significativos de BattPwr que alcanzan valores cercanos a $-1,2 \times 10^4$ a $-1,5 \times 10^4$, que se asocian con disminuciones pronunciadas o valores negativos de EngTrqCrk. Este comportamiento es típico de las fases de recuperación de energía, donde el motor eléctrico actúa como generador y transfiere corriente de regreso a la batería durante la desaceleración o carga reducida.

Desde una perspectiva de gestión de energía, la superposición de las dos señales revela una estrategia de gestión de energía activa en la que la batería actúa como un elemento amortiguador contra las fluctuaciones de par térmico del motor. Esta lógica permite suavizar las transiciones, mejorar la eficiencia general del sistema híbrido y mantener el motor de combustión interna funcionando en

zonas de mayor rendimiento, maximizando al mismo tiempo la recuperación de energía en condiciones favorables.

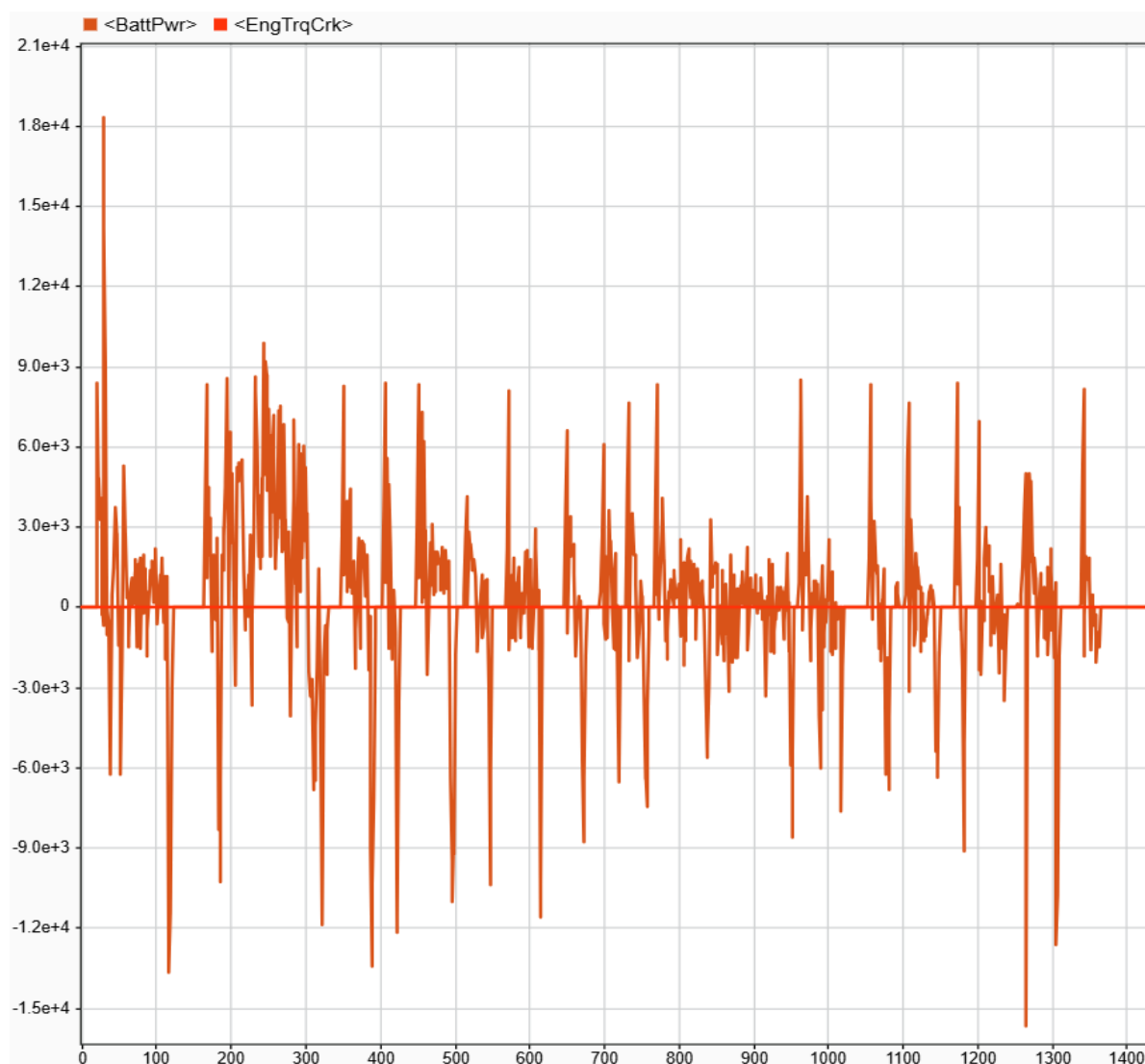


Figura 12. EngTrqCrk vs. BattPwr

EngSpdOut vs FuelFlw

La señal de la Figura 13, EngSpdOut (velocidad de salida del motor) muestra un comportamiento muy dinámico con picos de velocidad que alcanzan valores normalizados hasta 0,95, indicando un funcionamiento periódico caracterizado por aceleraciones rápidas seguidas de periodos de ralentí o corte (valores cercanos a 0). Estos pulsos de velocidad son indicativos de un ciclo de conducción con paradas frecuentes o demandas de carga variables típicas de entornos urbanos o ciclos de prueba transitorios.

La señal FuelFlw muestra una correlación positiva directa con la velocidad del motor, aunque con amplitudes normalizadas más pequeñas, que normalmente oscilan entre 0,2 y 0,7. Cabe señalar que los picos de consumo de combustible coinciden con los lados crecientes de la velocidad, mostrando

el consumo de energía necesario para vencer la inercia y alcanzar las velocidades de rotación requeridas.

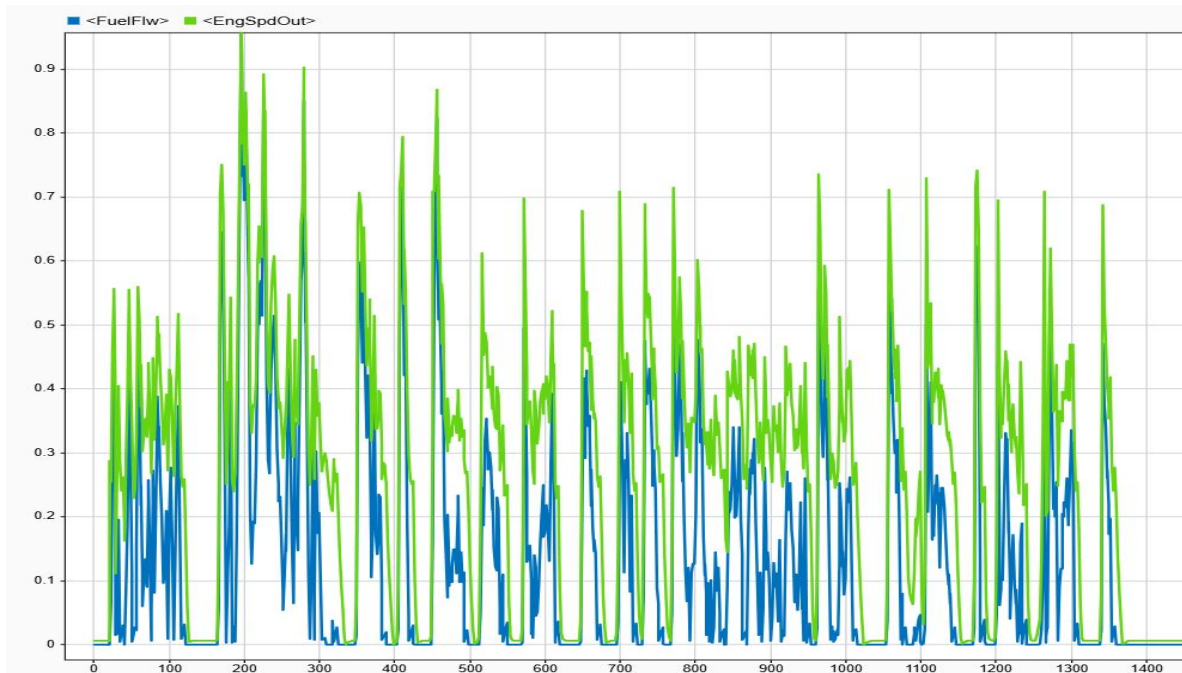


Figura 13. EngSpdOut vs FuelFlw.

2. Selección del tipo de motor eléctrico (Simulink)

Para el presente proyecto se seleccionó un motor síncrono de imanes permanentes (PMSM), debido a que este tipo de máquina eléctrica es la utilizada en el sistema híbrido del Toyota Prius, específicamente en el motor de tracción principal (MG2). Los motores PMSM se caracterizan por su alta eficiencia, elevado par a bajas revoluciones y excelente respuesta dinámica, cualidades fundamentales en aplicaciones automotrices híbridas.

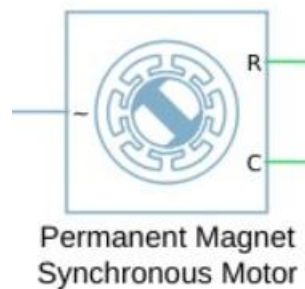


Figura 14. PMSM MOTOR.

Implementación del motor PMSM en MATLAB/Simulink

El motor eléctrico fue implementado en MATLAB/Simulink utilizando bloques de la librería Simscape Electrical, considerando los siguientes bloques principales:

- Fuente de energía en corriente continua (DC Source / Battery)
Suministra la energía eléctrica al sistema de tracción.
- Inversor trifásico (Three-Phase Inverter)
Convierte la corriente continua en corriente alterna trifásica para alimentar el motor.
- Controlador PMSM (PMSM Controller)
Genera las señales de control del inversor mediante control vectorial (FOC), regulando par y velocidad.
- Motor síncrono de imanes permanentes (Permanent Magnet Synchronous Motor)
Convierte la energía eléctrica trifásica en energía mecánica para la tracción del vehículo.
- Sensor de posición y velocidad (Encoder)
Proporciona la realimentación necesaria para el control del motor.
- Carga mecánica (Load / Inertia)
Representa la inercia y carga equivalente del vehículo.
- Bloques de medición y visualización (Sensors, Scope, Data Inspector)
Permiten analizar variables como par, velocidad y corrientes del motor.

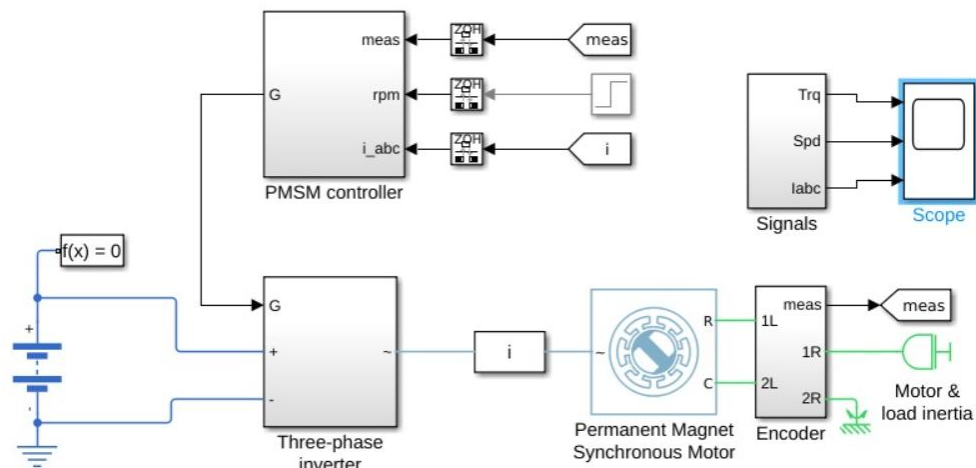


Figura 15. Estructura del motor eléctrico.

Variables analizadas del motor eléctrico

Durante la simulación se monitorearon las siguientes variables, consideradas las más relevantes para evaluar el desempeño del motor eléctrico:

- Par electromagnético (Nm)
- Velocidad de rotación (rpm)
- Corrientes trifásicas del estator (A)
- Potencia eléctrica y mecánica

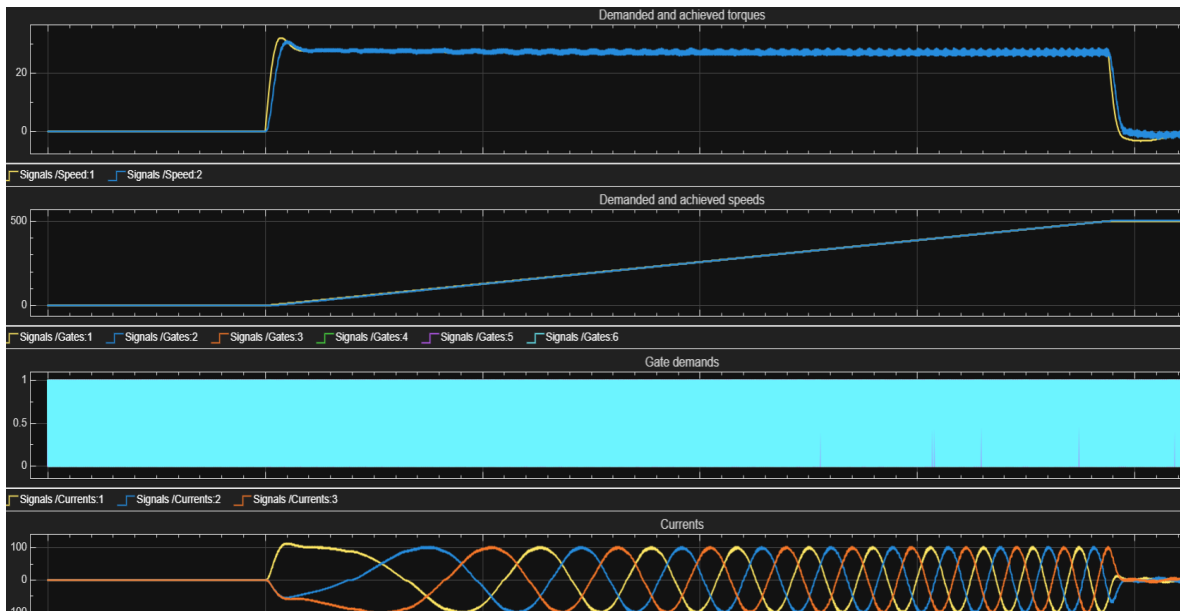


Figura 16. Variables analizadas del motor eléctrico

Análisis: El modelo desarrollado representa de manera funcional el motor eléctrico del Toyota Prius, ya que reproduce el mismo principio de operación del motor MG2, incluyendo el uso de un inversor trifásico, control vectorial y una máquina síncrona de imanes permanentes. Aunque algunos componentes se encuentran simplificados, el modelo permite analizar de forma adecuada el desempeño eléctrico y mecánico del sistema de tracción híbrida.

3. Simscape Battery (Battery Equivalent Circuit)

La batería de alta tensión provee un voltaje de 220 V en las versiones más modernas, y voltajes mayores para versiones anteriores del Prius, y lógicamente estos valores cambian dependiendo del fabricante, este voltaje en el caso del Prius proviene de un paquete de 14 baterías en serie dispuestos así. Existen 28 baterías pequeñas de 7,89 V cada una y están conectadas en serie de dos en dos para formar 14 paquetes de baterías de 15,78V cada una y a su vez están conectadas todos estos 14 paquetes en serie para generar un total de 220 Voltios.

Cada bloque de la batería del Toyota Prius está conformado por seis celdas de níquel–hidruro metálico conectadas en serie, proporcionando un voltaje nominal de aproximadamente 7.2 V por módulo.

- 6 celdas por módulo
- 28 módulos
- 168 celdas en total
- Voltaje nominal ≈ 201.6 V

Celda

En batteryBiulder, se procede a generar la celda con las especificaciones de la ficha tecnica del Toyota Prius, los datos que pide dentro del matlab y que no se encuentran en la ficha tecnica fue consultado en fuentes del fabricante para proporcionar datos exactos.

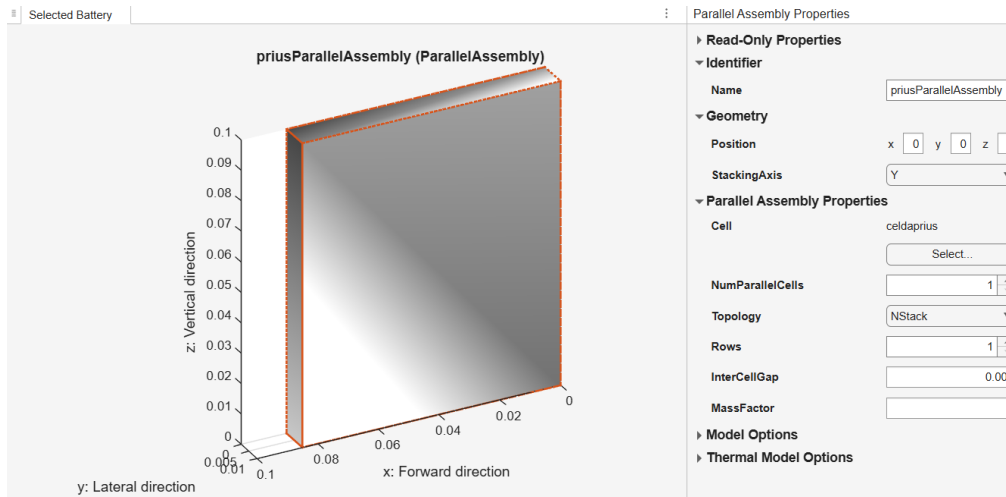


Figura 17. Celda de la batería.

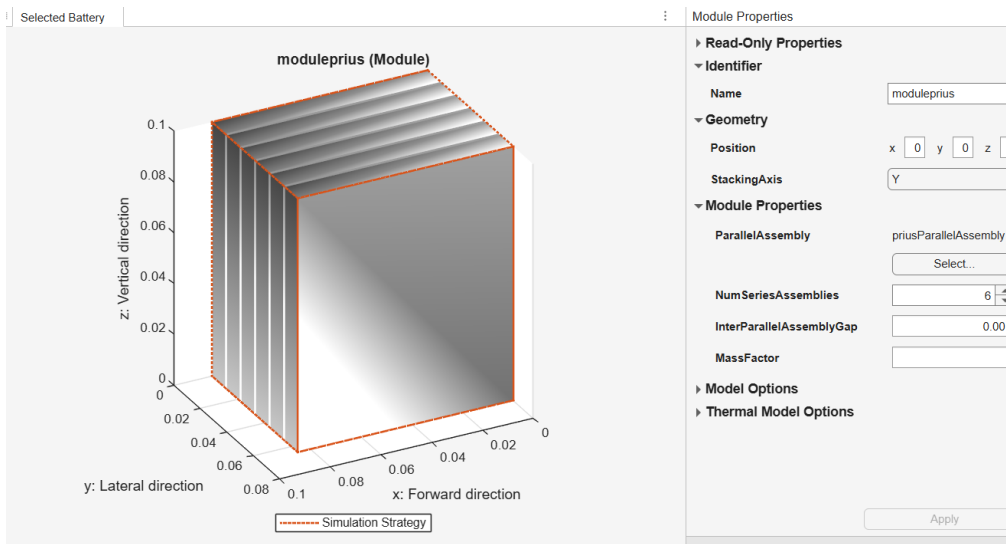


Figura 18. Módulo de la batería

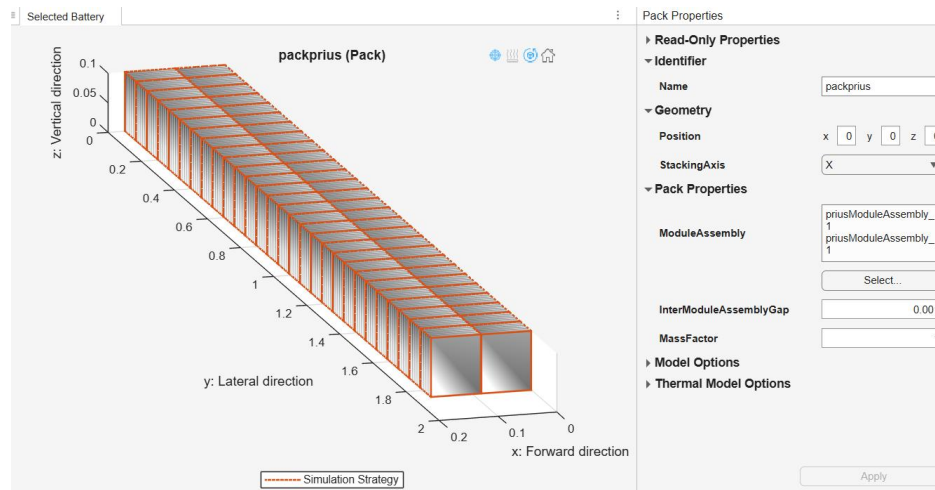


Figura 19. Pack de la batería Toyota Prius.

Graficas de la batería en Simulink

Se debe crear una librería de la batería



Figura 20. Creación de la librería de la batería.

Dentro del simulink se realiza una estructura general para obtener las gráficas de la batería.

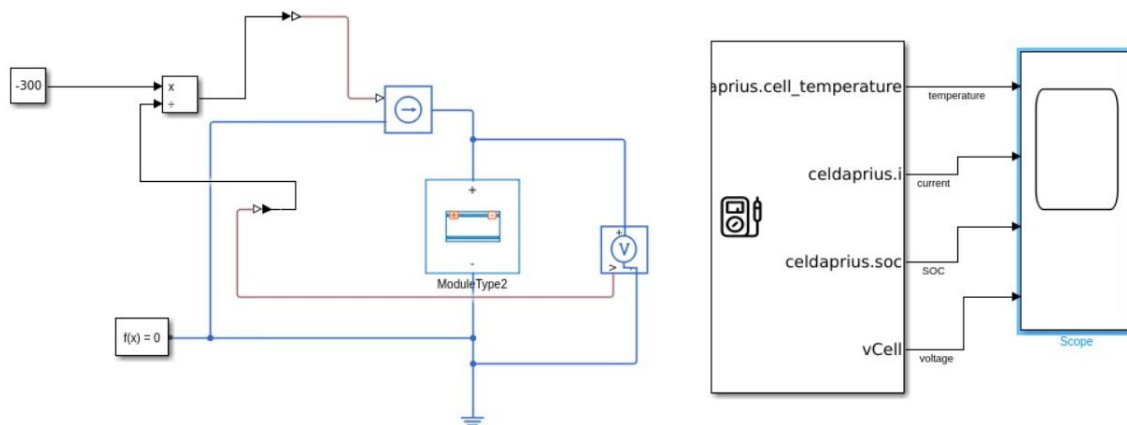


Figura 21. Estructura en Simulink para las gráficas de la batería.

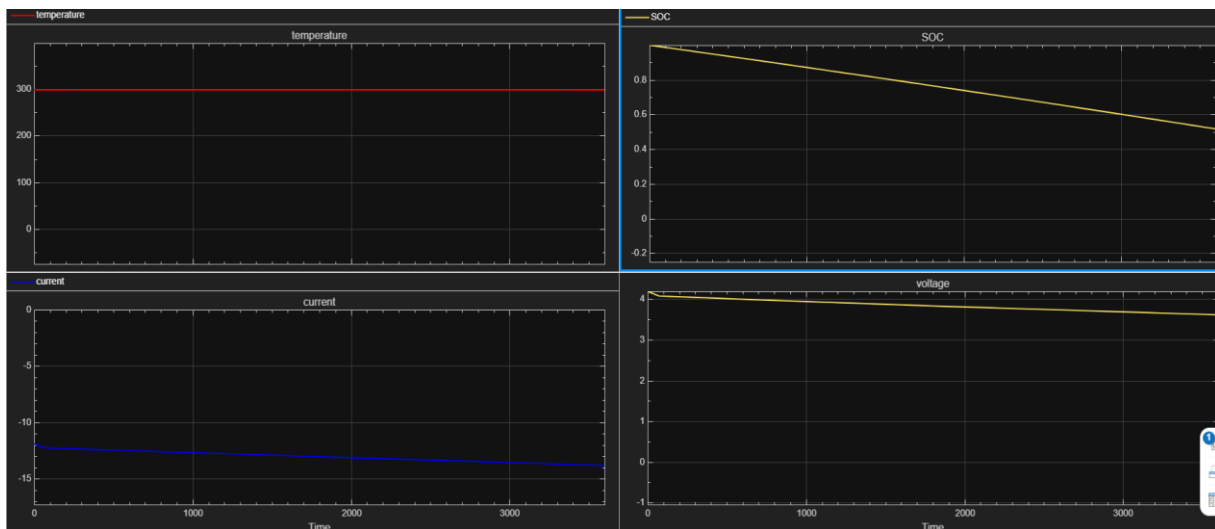


Figura 22. Graficas de la batería.

4. Discusión

Los resultados muestran un comportamiento coordinado entre el motor térmico y eléctrico durante ciclos de aceleración, desaceleración y modo eléctrico puro. Por ejemplo, en EMSpd vs EMTrq, el torque positivo (10-50 Nm) soporta aceleraciones iniciales, mientras valores negativos (-40 a -60 Nm) indican frenado regenerativo entre 300-900 s, recuperando energía. La batería mantiene estabilidad: BattSoc desciende de ~1 a 0.4 durante descargas (BattPwr positivo), pero se equilibra con recargas, y BattCurr vs BattVolt evidencia alta estabilidad voltaica pese a variaciones de corriente.

El reparto de potencia es eficiente, con FuelFlw bajo en modo eléctrico (0-150 s) y picos conjuntos con EMPwrElec en modo híbrido, reduciendo consumo de combustible.

Tabla 1. Variables importantes del análisis del Dashboard.

Variable	Comportamiento clave	Rango observado
EMTrq	Asistencia y regeneración	+10-50 Nm / -40-60 Nm
BattSoc	Descarga inicial, estabilización	1 a 0.4 (normalizado)
FuelFlw vs EMPwrElec	Transiciones modo EV/híbrido	Bajo en EV, picos híbridos
EngSpdOut vs EMSpd	Soporte eléctrico suave	1800-2200 rpm térmico / 0-650 rpm eléctrico

5. Conclusiones

Los hallazgos validan la arquitectura Power-Split, donde el PMSM (MG2) proporciona torque rápido a bajas RPM, optimizando eficiencia en conducción urbana, como se ve en la asistencia durante picos de EngTrq. El frenado regenerativo y balance SOC destacan la gestión energética, amortiguando fluctuaciones del motor térmico y priorizando zonas eficientes (~1800-2200 rpm).

Limitaciones incluyen simplificaciones en Mapped Motor y Battery Equivalent Circuit, que aproximan, pero no capturan pérdidas térmicas reales o envejecimiento de celdas NiMH (168 celdas, 201.6 V nominal). Comparado con vehículos híbridos reales, los resultados alinean con datos del Prius, mostrando ~20-30% menor consumo vía eléctrico.

La simulación facilita comprensión de torque split y e-CVT, útil para diseño de HEV futuros y nos ayuda a confirmar que el sistema híbrido del Prius integra efectivamente motor térmico, PMSM y batería NiMH, logrando modos EV puro, asistencia y regeneración para eficiencia energética.

El modelo en Simulink/Simscape es robusto para análisis dinámico, evidenciando estabilidad SOC y voltaje bajo demandas variables.

6. Referencias

MATLAB & Simulink Documentation. (2025). Hybrid Electric Vehicle IPS Reference Application. MathWorks.

Toyota Prius Hybrid System Specifications. (2024). Toyota Technical Manual.