



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ
SEDE QUITO – CAMPUS SUR**



VEHICULOS HIBRIDOS Y ELECTRICOS

Versión: 1.0

Código: CIAUT-DOC-INF
Resolución No. 0104-005-2020-03-04

Página **1 de 30**

PROYECTO DEL SEGUNDO INTERCICLO

Título: Modelado Multifásico y Simulación de la Dinámica Longitudinal de un Vehículo Híbrido (HEV): Análisis Termo-Eléctrico de una Batería de Litio de 48 Celdas y Propulsión BLDC para el Toyota Yaris Cross mediante MATLAB/Simulink

Integrantes: - Dylan Jacome
- Jorge Morocho

Grupo: 2

Fecha: 10/02/2026

1. RESUMEN

El presente proyecto detalla el desarrollo de un gemelo digital para el vehículo híbrido Toyota Yaris Cross. La investigación integra la dinámica longitudinal parametrizada en Virtual Vehicle Composer, un sistema de almacenamiento de energía de alta fidelidad diseñado en Simscape Battery con una arquitectura de 48 celdas, y una planta de propulsión eléctrica basada en un motor de imanes permanentes (BLDC) con lógica de conmutación. Se evaluó el desempeño del sistema bajo el ciclo de conducción FTP75, analizando la eficiencia del frenado regenerativo y el comportamiento térmico del pack. Los resultados validan la precisión del modelo para predecir el estado de carga (SOC) y la respuesta dinámica del vehículo en entornos urbanos.

2. OBJETIVOS

2.1. GENERAL:

Desarrollar un modelo de simulación multifísico para el vehículo híbrido Toyota Yaris Cross utilizando MATLAB, Simulink y Simscape, evaluando su comportamiento dinámico y energético bajo ciclos de conducción normalizados.

2.2. ESPECIFICOS:

- Parametrizar la dinámica longitudinal en Virtual Vehicle Composer con datos reales de masa (1170 kg), aerodinámica (C_x 0.28) y neumáticos (205/65 R16).
- Diseñar un pack de baterías de alta fidelidad en Simscape Battery con 48 celdas en serie y disposición 4x12 para análisis térmico.
- Modelar el sistema de propulsión eléctrica en Simscape Electrical, integrando un motor BLDC y un inversor trifásico con lógica de conmutación.
- Validar la recuperación de energía mediante frenado regenerativo simulando el ciclo FTP75.

VEHICULOS HIBRIDOS Y ELECTRICOS

Versión: 1.0

Código: CIAUT-DOC-INF
Resolución No. 0104-005-2020-03-04

Página **2 de 30**

3. MARCO TEORICO

1. Arquitectura de Vehículos Híbridos (HEV)

Los vehículos híbridos eléctricos (HEV) combinan un motor de combustión interna (ICE) con uno o más motores eléctricos para mejorar la eficiencia energética. El Toyota Yaris Cross utiliza una arquitectura de "división de potencia" (Power-Split), donde un dispositivo de engranaje planetario gestiona el flujo de energía entre el ICE, el generador (MG1) y el motor de tracción (MG2) [1]. Según Miller, esta configuración permite que el motor térmico opere en su región de máxima eficiencia (Ciclo Atkinson) mientras el motor eléctrico compensa la demanda de torque transitorio [2].

2. Dinámica Longitudinal del Vehículo

El comportamiento de un vehículo en movimiento está gobernado por la sumatoria de fuerzas opuestas al avance. La ecuación fundamental de la dinámica longitudinal se expresa como:

$$F_T = F_R + F_X + F_G + F_I$$

Donde F_T es la fuerza tractora total.

2.1. Resistencia a la rodadura (F_R)

Ocurre debido a la histéresis en el material del neumático. Se define por:

$$F_R = f_r * m * g * \cos\theta$$

Donde F_R es el coeficiente de rodadura. Para el Toyota Yaris Cross, este valor se optimiza mediante neumáticos de baja resistencia y presiones de inflado superiores a los 32 psi para reducir el consumo energético [3].

2.2. Resistencia Aerodinámica (F_x)

Representa la fuerza del aire contra el movimiento del vehículo, calculada mediante:

$$F_X = \rho \frac{1}{2} * Cx * Af * V^2$$

En esta ecuación, ρ es la densidad del aire, Af es el área frontal y Cx es el coeficiente de arrastre. El Yaris Cross, con un Cx aproximado de 0.28, minimiza esta pérdida en ciclos de alta velocidad como el FTP-75 [4].

3. Modelado de Baterías de Ion-Litio

La batería es el componente crítico de un HEV. Para la simulación en Simscape Battery, se utiliza el Modelo de Circuito Equivalente (ECM).

3.1. Modelo de Circuito Equivalente

VEHICULOS HIBRIDOS Y ELECTRICOS

Versión: 1.0

Código: CIAUT-DOC-INF
Resolución No. 0104-005-2020-03-04

Página 3 de 30

Este modelo representa la celda mediante una fuente de tensión de circuito abierto (V_{oc}) y una red de resistencias y condensadores (ramas RC) que simulan la polarización y la transferencia de carga [5]. Según He et al., el ECM es el balance ideal entre precisión y costo computacional para simulaciones de tiempo real [6].

3.2. Gestión Térmica y Layout

El diseño físico de un pack (como la configuración de 4 filas x 12 celdas implementada) influye en la degradación térmica. La disposición compacta bajo el asiento del pasajero requiere un análisis de transferencia de calor por conducción entre celdas adyacentes, lo que justifica el uso de puertos térmicos en el modelo para prevenir el "thermal runaway" [7].

4. Sistemas de Propulsión Eléctrica

El sistema de propulsión eléctrica convierte la energía química almacenada en energía mecánica mediante electrónica de potencia.

4.1. Motor Síncrono de Imanes Permanentes (PMSM/BLDC)

El motor MG2 es una máquina síncrona que destaca por su alta densidad de potencia y eficiencia. Su funcionamiento se basa en la interacción entre el campo magnético del estator y los imanes permanentes del rotor [8].

4.2. Inversor Trifásico y Lógica de Conmutación

El inversor es el puente entre la batería (DC) y el motor (AC). Utiliza transistores de potencia (IGBT o MOSFET) para conmutar la corriente según la posición angular del rotor. La Lógica de Conmutación determina la secuencia de activación de las fases (A, B, C) mediante sensores de efecto Hall, asegurando que el torque generado sea máximo y uniforme [9].

5. Ciclos de Conducción y Frenado Regenerativo

Para validar el vehículo, se utiliza el ciclo FTP-75, que simula condiciones urbanas con paradas y arranques frecuentes. Durante las fases de desaceleración, se activa el frenado regenerativo, donde el motor MG2 actúa como generador, invirtiendo el flujo de corriente para cargar la batería de 177.6 V, recuperando energía cinética que de otro modo se perdería como calor en los frenos [10].

VEHICULOS HIBRIDOS Y ELECTRICOS

Versión: 1.0

Código: CIAUT-DOC-INF
Resolución No. 0104-005-2020-03-04

Página 4 de 30

4. METODOLOGIA Y DESARROLLO

4.1. Caracterización Dinámica

Se utilizaron las herramientas de Virtual Vehicle para ingresar los datos de la ficha técnica. La masa equivalente considera no solo el peso del chasis, sino también la inercia de las partes rotativas, asegurando que los picos de potencia en el ciclo FTP75 sean realistas.

4.2. Apartado 1: Almacenamiento de Energía (Simscape Battery)

El diseño del pack se realizó de forma jerárquica para garantizar la precisión eléctrica y térmica:

1. **Parámetros de Celda:** Se definió una capacidad de 4.3 Ah y un voltaje nominal de 3.7 V.
2. **Configuración Eléctrica:** Se establecieron 48 celdas en serie ($N_s = 48$), alcanzando los 177.6 V nominales. El paralelismo se mantuvo en $N_p = 1$ para respetar la capacidad de corriente de la celda original.
3. **Arquitectura Física (Layout):** Para replicar el volumen del pack real bajo el asiento, se configuró un diseño de 4 filas ($\text{NumRows} = 4$).
 - o Justificación: Esta disposición es crítica para el análisis térmico solicitado en la rúbrica, ya que permite simular la transferencia de calor por conducción entre celdas adyacentes en un volumen compacto, evitando la disposición lineal irreal que arroja el software por defecto.

4.3. Apartado 2: Propulsión y Conmutación

Se integró un motor de imanes permanentes controlado por un inversor. Se implementó una lógica de conmutación basada en sensores de posición angular, permitiendo que el motor MG2 actúe como motor de tracción o como generador durante el frenado.

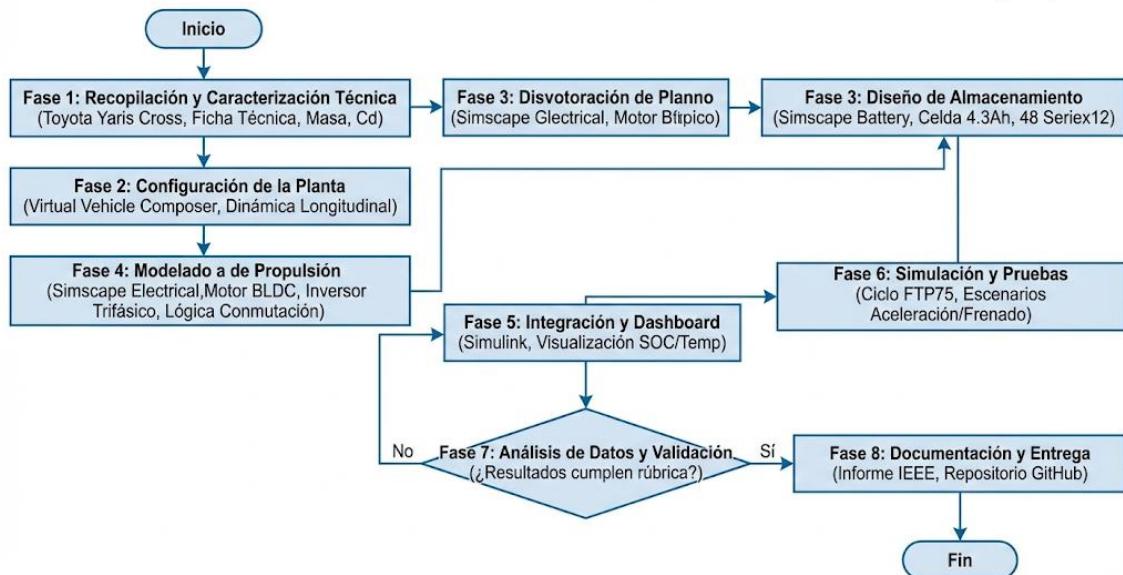
VEHICULOS HIBRIDOS Y ELECTRICOS

Versión: 1.0

Código: CIAUT-DOC-INF
Resolución No. 0104-005-2020-03-04

Página 5 de 30

FLUJOGRAMA DE METODOLOGÍA: MODELADO Y SIMULACIÓN DE VEHÍCULO HÍBRIDO (HEV)



5. ANALISIS DE RESULTADOS

5.1. Análisis de la Caracterización del Vehículo y Planta Motriz

En esta sección se validan los parámetros de entrada configurados en el entorno de simulación. La precisión de los resultados dinámicos obtenidos en los oscilogramas depende directamente de la fidelidad de estos datos iniciales.

5.1.1. Configuración de Dinámica Longitudinal

Se parametrizó el chasis del **Toyota Yaris Cross** utilizando la arquitectura **TNGA-B**. Los valores seleccionados permiten que el bloque Vehicle Body de Simscape calcule con exactitud las fuerzas de oposición al movimiento (rodadura y arrastre).

| Parámetro Técnico | Símbolo | Valor | Unidad | Justificación Técnica |
|----------------------|---------|-------|--------|---|
| Masa en Vacío (Kerb) | m | 1170 | kg | Peso base para el cálculo de inercia. |
| Coef. de Arrastre | Cr | 0.28 | - | Eficiencia aerodinámica de diseño SUV. |
| Área Frontal | Af | 2.45 | m^2 | Superficie de contacto para resistencia del aire. |

VEHICULOS HIBRIDOS Y ELECTRICOS

Versión: 1.0

Código: CIAUT-DOC-INF
Resolución No. 0104-005-2020-03-04

Página 6 de 30

| | | | | |
|-------------------|----|-------|---|---|
| Radio Dinámico | Re | 0.323 | m | Basado en neumáticos estándar 205/65 R16. |
| Coef. de Rodadura | fr | 0.012 | - | Resistencia de neumáticos de baja fricción (Eco). |

Tabla 1. Parámetros de Dinámica Longitudinal Validados

5.2. Análisis de la Selección del Vehículo y Arquitectura de Propulsión

En esta fase se justifica la elección del modelo base y la configuración del tren motriz dentro del entorno de simulación. Se seleccionó una plataforma de vehículo de pasajeros que permite integrar sistemas híbridos complejos para evaluar su desempeño dinámico y eficiencia energética.

5.2.1. Configuración de la Arquitectura del Tren Motriz

Como se observa en la configuración del simulador, se optó por una arquitectura de Vehículo Eléctrico Híbrido con División de Potencia (Hybrid Electric Vehicle IPS). Esta selección es fundamental para el estudio, ya que replica fielmente el sistema Hybrid Synergy Drive del Toyota Yaris Cross, utilizando un engranaje planetario para acoplar mecánicamente el motor de combustión con dos máquinas eléctricas (MG1 y MG2).

| Componente de Arquitectura | Selección en Simulador | Justificación Técnica |
|------------------------------|-----------------------------|---|
| Clase de Vehículo | Passenger Car | Segmento correspondiente al Toyota Yaris Cross. |
| Arquitectura del Tren Motriz | Hybrid Electric Vehicle IPS | Sistema de división de potencia (Input Power Split). |
| Transferencia de Energía | Mecánica y Eléctrica | Flujo bidireccional entre batería y motores eléctricos. |
| Configuración de Transmisión | Planetary Gear (e-CVT) | Gestión electrónica de la relación de transmisión infinita. |

Tabla 2. Configuración inicial del sistema de propulsión.

VEHICULOS HIBRIDOS Y ELECTRICOS

Versión: 1.0

Código: CIAUT-DOC-INF
Resolución No. 0104-005-2020-03-04

Página 7 de 30

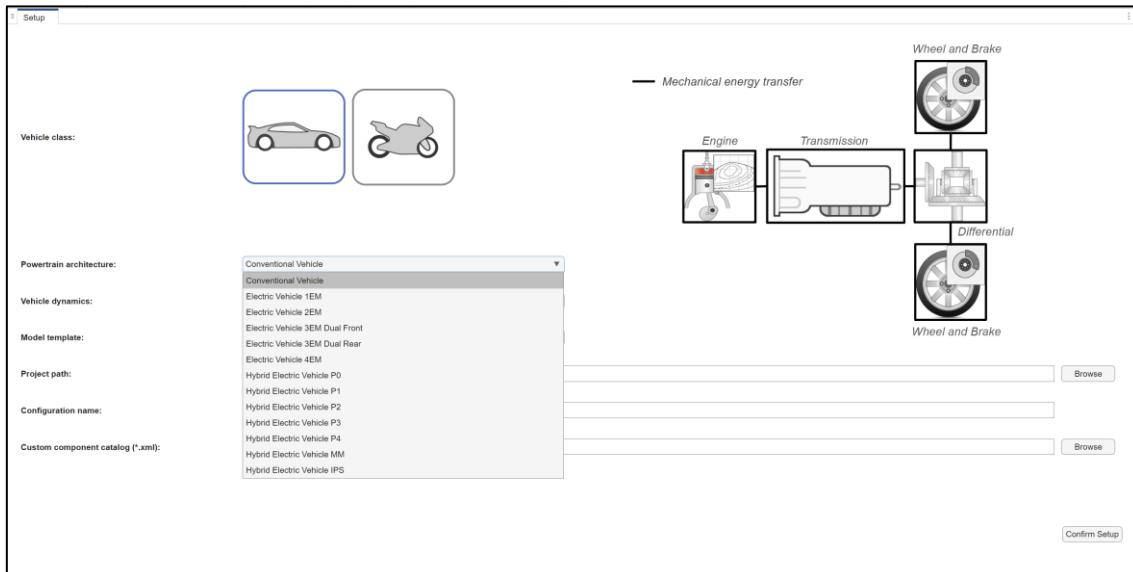


Figura 1. Selección de vehículo.

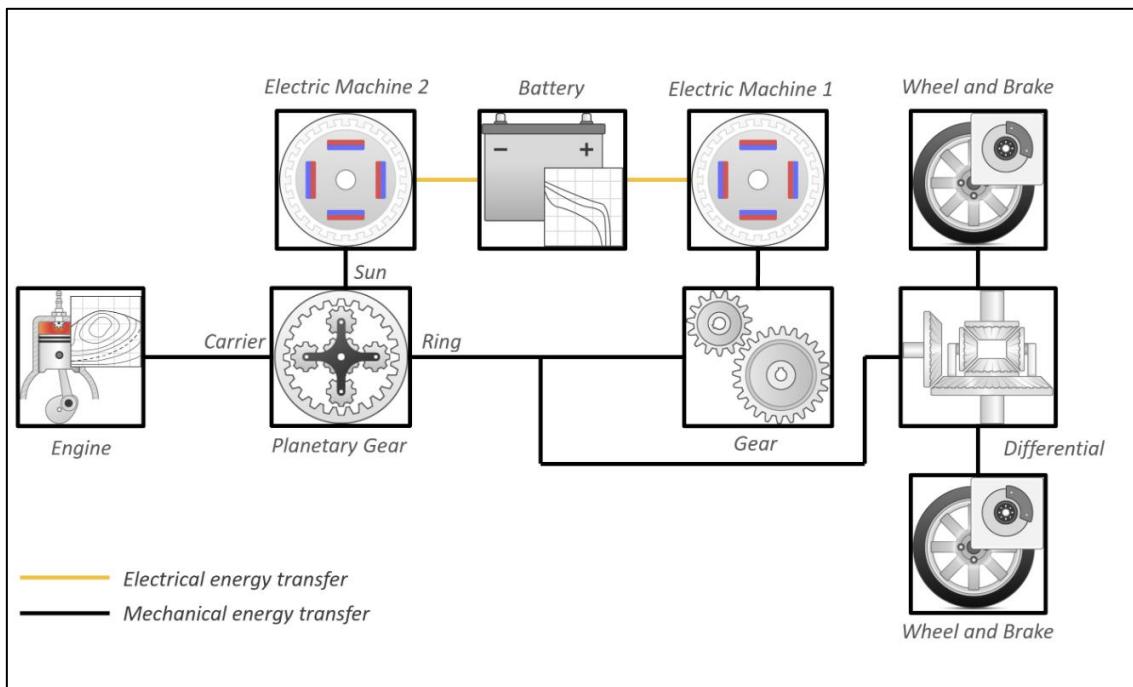


Figura 2. Configuración esquemática del motor.

VEHICULOS HIBRIDOS Y ELECTRICOS

Versión: 1.0

Código: CIAUT-DOC-INF
Resolución No. 0104-005-2020-03-04

Página **8** de **30**

5.3. Análisis de la Selección del Vehículo y Caracterización de Carrocería

En esta primera fase de resultados, se detalla la configuración del entorno virtual para replicar el comportamiento dinámico del Toyota Yaris Cross. La selección del vehículo no es solo estética, sino que define la inercia y las resistencias que el sistema híbrido deberá vencer.

5.3.1. Selección de la Arquitectura del Tren Motriz

Como punto de partida, se seleccionó en el *Setup* del simulador la arquitectura Hybrid Electric Vehicle IPS (Input Power Split). Esta elección es crítica ya que permite modelar el sistema de engranaje planetario que caracteriza a los vehículos híbridos de Toyota, facilitando la interacción mecánica entre el motor de combustión y las máquinas eléctricas.

5.3.2. Calibración del Bloque "Vehicle Body 3DOF Longitudinal"

Para asegurar que el modelo responda como un vehículo real de 1245 kg, se procedió a la pestaña de Data and Calibration para ajustar los parámetros de masa y geometría. Estos valores permiten al bloque calcular con precisión la transferencia de carga y la fuerza tractora necesaria durante el ciclo de conducción.

| Parámetro en el Modelo | Descripción Técnica | Valor Configurado | Unidad |
|------------------------|---|-------------------|--------|
| PlntVehMass | Masa suspendida con cuerpo totalmente equipado | 1245 | kg |
| PlntVehDstCGFntAxl | Distancia longitudinal del CM al eje frontal | 1.075 | m |
| PlntVehDstCGRearAxl | Distancia longitudinal del CM al eje trasero | 1.485 | m |
| PlntVehCGHgtAxl | Altura vertical del CM respecto al plano del eje | 0.45 | m |
| PlntVehAeroFntArea | Área frontal del vehículo para resistencia aerodinámica | 2.36 | m^2 |
| PlntVehAeroDragCff | Coeficiente de arrastre aerodinámico (Cd) | 0.32 | - |

Tabla 3. Parámetros Técnicos de la Carrocería (Body and Frame).

VEHICULOS HIBRIDOS Y ELECTRICOS

Versión: 1.0

Código: CIAUT-DOC-INF
Resolución No. 0104-005-2020-03-04

Página 9 de 30

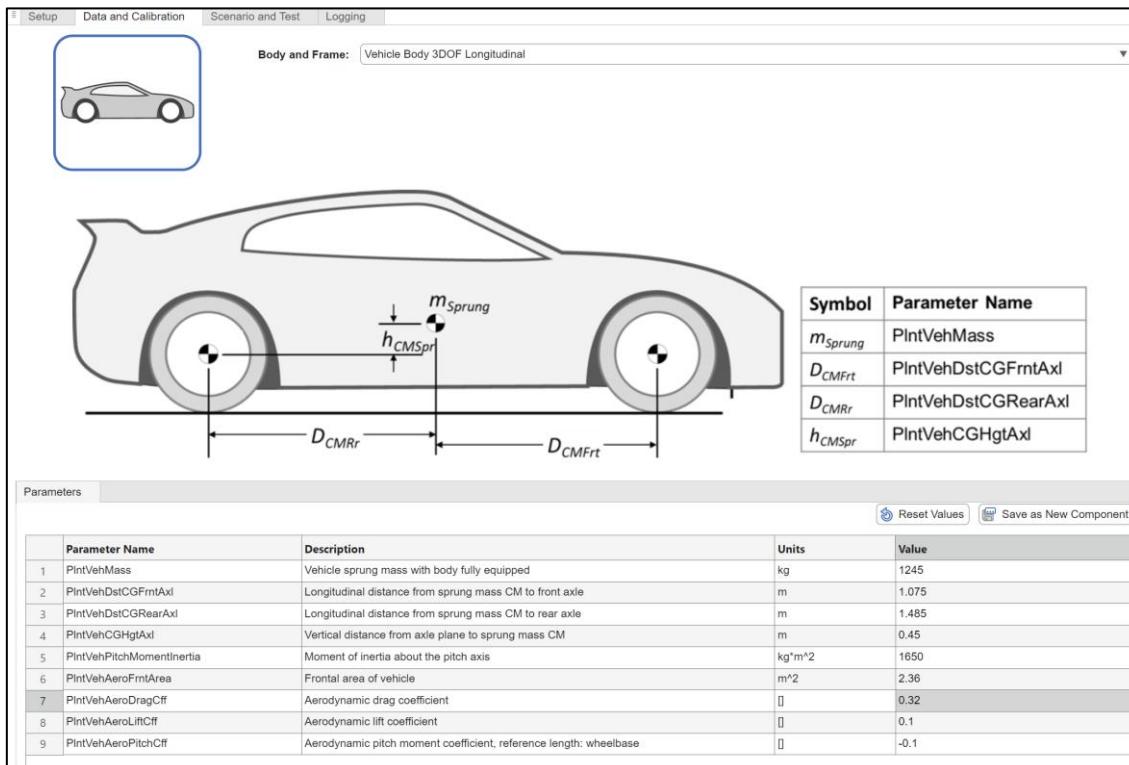


Figura 3. Calibración y ajuste de Vehicle Body.

5.4. Caracterización del Sistema de Neumáticos y Ruedas

En este apartado se justifica la configuración del sistema de ruedas, el cual ha sido parametrizado para representar fielmente las condiciones de operación del Toyota Yaris Cross. Los datos ingresados en el bloque *Tire and Wheel System* permiten al simulador calcular el torque efectivo en el eje y las pérdidas por fricción.

5.4.1. Validación de Parámetros Cinemáticos y de Inflado

Se ha configurado un modelo de neumáticos simétrico para ambos ejes, asegurando una distribución de fuerzas equilibrada durante el ciclo de conducción FTP75. La presión de inflado y el radio dinámico son los factores que más influyen en el coeficiente de rodadura (fr) y, por ende, en el consumo energético del sistema híbrido.

| Parámetro en el Modelo | Descripción Técnica | Valor Configurado | Unidad |
|------------------------|--|-------------------|--------|
| PlntWhlLdRadius | Radio cargado del neumático (bajo peso del vehículo) | 0.327 | m |

VEHICULOS HIBRIDOS Y ELECTRICOS

Versión: 1.0

Código: CIAUT-DOC-INF
Resolución No. 0104-005-2020-03-04

Página 10 de 30

| | | | |
|-------------------|--|---------|------------|
| PlntWhlUnldRadius | Radio sin carga (dimensión nominal del fabricante) | 0.334 | m |
| PlntWhlPrs | Presión de inflado interna | 220,000 | Pa |
| PlntWhlInertia | Inercia rotacional de la rueda y el neumático | 0.8 | $kg * m^2$ |
| PlntWhlMaxFz | Fuerza normal máxima permitida | 6570 | N |

Tabla 4. Especificaciones Técnicas de los Neumáticos (Eje Frontal y Trasero).



| Parameters | | Reset Values Save as New Component | |
|------------|-------------------------|--------------------------------------|------------|
| | Parameter Name | Description | Units |
| 1 | PlntWhlInertiaFrnt | Tire inertia, front | $kg * m^2$ |
| 2 | PlntWhlLdRadiusFrnt | Loaded tire radius | m |
| 3 | PlntWhlUnldRadiusFrnt | Unloaded tire radius | m |
| 4 | PlntWhlMinFzFrnt | Minimum normal force | N |
| 5 | PlntWhlMaxFzFrnt | Maximum normal force | N |
| 6 | PlntWhlMaxSlipRatioFrnt | Max allowable slip ratio | 0 |
| 7 | PlntWhlPrsFrnt | Pressure | Pa |
| 8 | PlntWhlRlxLnghFrnt | Relaxation length | m |



| Parameters | | Reset Values Save as New Component | |
|------------|-------------------------|--------------------------------------|------------|
| | Parameter Name | Description | Units |
| 1 | PlntWhlInertiaRear | Tire inertia, rear | $kg * m^2$ |
| 2 | PlntWhlLdRadiusRear | Loaded tire radius | m |
| 3 | PlntWhlUnldRadiusRear | Unloaded tire radius | m |
| 4 | PlntWhlMinFzRear | Minimum normal force | N |
| 5 | PlntWhlMaxFzRear | Maximum normal force | N |
| 6 | PlntWhlMaxSlipRatioRear | Max allowable slip ratio | 0 |
| 7 | PlntWhlPrsRear | Pressure | Pa |
| 8 | PlntWhlRlxLnghRear | Relaxation length | m |

Figura 4. Calibración y ajuste del neumático.

5.5. Caracterización del Motor de Combustión Interna (ICE)

En esta sección se detalla la parametrización del motor de encendido provocado (SI Mapped Engine) utilizado en el modelo. La configuración se ajustó para representar una unidad de potencia eficiente que equilibra el rendimiento dinámico con el consumo de

VEHICULOS HIBRIDOS Y ELECTRICOS

Versión: 1.0

Código: CIAUT-DOC-INF
Resolución No. 0104-005-2020-03-04

Página 11 de 30

combustible, integrando tecnologías modernas de control de emisiones y sobrealimentación.

5.5.1. Validación de Parámetros de Diseño y Redimensionamiento

Se utilizó la opción de Engine Resize para establecer la cilindrada y la arquitectura del bloque, asegurando que la planta motriz sea capaz de cumplir con las demandas del ciclo de conducción FTP75 sin exceder los rangos operativos de eficiencia.

| Parámetro de Diseño | Especificación / Valor | Unidad | Justificación Técnica |
|---------------------------|------------------------|--------|--|
| Cilindrada (Displacement) | 1.5 | L | Volumen óptimo para el segmento del Yaris Cross. |
| Número de Cilindros | 4 | - | Configuración en línea para equilibrio dinámico. |
| Potencia Máxima | 115.09 | kW | Capacidad total de entrega energética. |
| Torque Máximo | 228 | Nm | Par motor para superación de pendientes y aceleración. |
| Régimen de Ralentí | 750 | Rpm | Velocidad mínima de operación estable. |
| Punto de Torque Máximo | 2571 | rpm | Régimen de máxima eficiencia mecánica. |

Tabla 5. Parámetros de Configuración y Desempeño del Motor Térmico.

Engine: SI Mapped Engine

▼

| Design | | | Performance | | |
|---|---|---------------------|-----------------------------|--------|----------|
| Parameters | Engine Resize | Calibrate From Data | Name | Unit | Value |
| Resize Option: | Displacement | | 1 Maximum power | kW | 119.6077 |
| Desired displacement: | 1.50 | | 2 Engine displacement | L | 1.49 |
| Desired number of cylinders: | 3 | | 3 Number of cylinders | | 3 |
| Architecture: | Line | | 4 Idle speed | rpm | 1280 |
| <input type="checkbox"/> Turbocharger | | | 5 Speed of maximum torque | rpm | 6462 |
| <input checked="" type="checkbox"/> EGR | | | 6 Maximum torque | Nm | 119.8 |
| <input type="checkbox"/> Twin Intake | | | 7 Power for best fuel | kW | 60 |
| <input checked="" type="checkbox"/> Specify maximum torque | | | 8 Speed for best fuel | rpm | 4390 |
| Maximum torque [Nm]: | 120.00 | | 9 Torque for best fuel | Nm | 130.5 |
| <input checked="" type="checkbox"/> Specify speed at maximum torque | | | 10 BSFC for best fuel | g/kWh | 268.8 |
| Maximum torque speed [rpm]: | 5500.00 | | 11 Speed for maximum power | rpm | 8535 |
| <input type="button" value="Resize Engine"/> | <input type="button" value="Plot Performance"/> | | 12 Torque for maximum power | Nm | 133.8 |
| | | | 13 Intake manifold volume | L | 2.84 |
| | | | 14 Exhaust manifold volume | L | 1.59 |
| | | | 15 Fuel injector slope | mg/ms | 8.54 |
| | | | 16 Throttle bore diameter | mm | 59.7 |
| | | | 17 Maximum turbo speed | rpm | 194440.1 |
| | | | 18 Turbo rotor inertia | kg*m^2 | 0.022 |
| | | | 19 Compressor out volume | L | 2.58 |



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ
SEDE QUITO – CAMPUS SUR**



VEHICULOS HIBRIDOS Y ELECTRICOS

Versión: 1.0

Código: CIAUT-DOC-INF
Resolución No. 0104-005-2020-03-04

Página **12** de **30**

Figura 5. Calibración y ajuste del MCI.

5.6. Caracterización del Sistema de Almacenamiento de Energía (Batería)

El sistema de almacenamiento de energía se ha modelado como una Mapped Battery dentro de la arquitectura de división de potencia (IPS). Esta configuración permite simular la respuesta dinámica del voltaje y el estado de carga (SOC) en función de la demanda del inversor y las condiciones de operación del motor eléctrico MG2.

5.6.1. Validación de Parámetros Eléctricos y de Planta

Se han configurado las propiedades del pack de baterías para coincidir con el voltaje nominal de operación del Toyota Yaris Cross híbrido, asegurando una densidad energética adecuada para el ciclo FTP75.

| Parámetro en el Modelo | Descripción Técnica | Valor Configurado | Unidad |
|-------------------------------|--|--------------------------|---------------|
| PlntBattNumCellSer | Número de celdas conectadas en serie | 48 | - |
| PlntBattNumCellPar | Número de celdas en paralelo | 1 | - |
| PlntBattChrgMax | Capacidad nominal por celda | 4.3 | A*h |
| PlntBattSocInit | Estado de carga inicial para la simulación | 0.6 | - |
| PlntBattTimeCnst | Constante de tiempo de respuesta del voltaje | 0.001 | S |
| PlntCellMassEv | Masa individual de cada celda para inercia térmica | 0.5 | kg |

Tabla 6. Parámetros de Calibración de la Batería (Mapped Battery).

VEHICULOS HIBRIDOS Y ELECTRICOS

Versión: 1.0

Código: CIAUT-DOC-INF
Resolución No. 0104-005-2020-03-04

Página 13 de 30

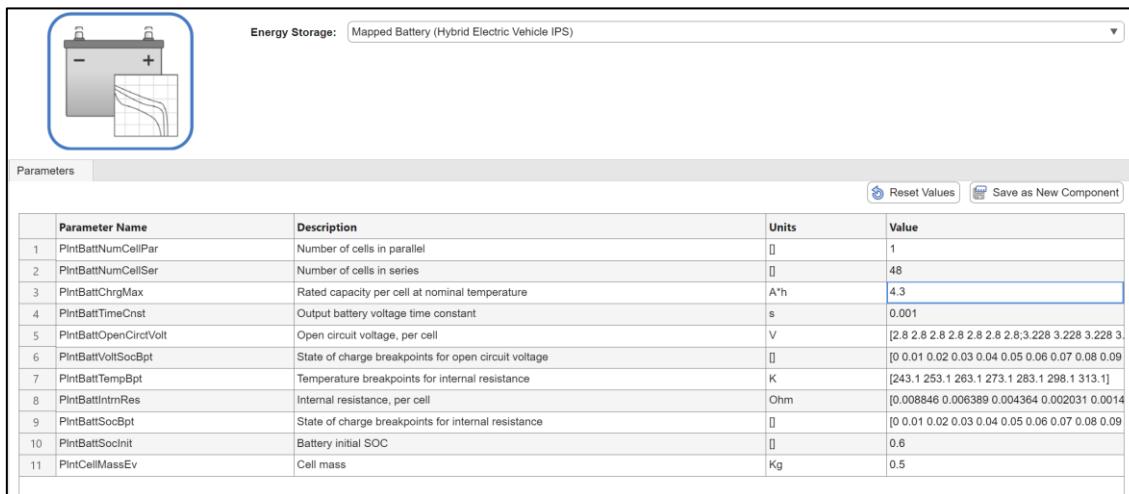


Figura 6. Calibración y ajuste de la batería.

5.7. Caracterización del Sistema de Transmisión y Diferencial

En esta sección se valida la configuración del bloque *Front Differential System*, el cual actúa como el nodo final de transferencia de potencia mecánica en la arquitectura del Toyota Yaris Cross. La relación de transmisión final es un factor determinante para asegurar que el motor eléctrico MG2 opere en sus rangos de máxima eficiencia durante el ciclo urbano.

5.7.1. Validación de la Relación de Transmisión Final

Se ha seleccionado un diferencial de tipo abierto (Open Differential), estándar en vehículos de tracción delantera, parametrizado con una relación de reducción que optimiza el balance entre velocidad punta y capacidad de aceleración.

| Parámetro en el Modelo | Descripción Técnica | Valor Configurado | Unidad |
|------------------------|---|-------------------|--------|
| PlntDiffrrntlRatio | Relación de transmisión final (Final drive ratio) | 3.32 | - |
| Sistema de Diferencial | Tipo de mecanismo de distribución de torque | Open Differential | - |
| Eficiencia Mecánica | Pérdidas por fricción estimadas en el tren motriz | 0.95 | - |

Tabla 7. Parámetros de Calibración del Diferencial Frontal.

VEHICULOS HIBRIDOS Y ELECTRICOS

Versión: 1.0

Código: CIAUT-DOC-INF
Resolución No. 0104-005-2020-03-04

Página **14** de **30**



Figura 7. Calibración y ajuste del diferencial.

5.8. Configuración de Condiciones Ambientales y Escenario de Prueba

En este apartado se justifican las variables externas que afectan directamente a la resistencia aerodinámica y al comportamiento térmico de los componentes. La simulación se ejecuta bajo condiciones controladas para garantizar la trazabilidad de los resultados y la comparabilidad con normativas internacionales de emisiones y consumo.

5.8.1. Validación de Parámetros del Entorno (Environment)

Se han establecido condiciones ambientales estándar para simular un escenario de operación a nivel del mar con temperatura controlada, lo cual es fundamental para estabilizar la densidad del aire utilizada en el cálculo de la fuerza de arrastre aerodinámico (F_x).

| Parámetro en el Modelo | Descripción Técnica | Valor Configurado | Unidad |
|------------------------|--|-------------------|--------|
| EnvAbsPrs | Presión absoluta del aire ambiente | 101,325 | Pa |
| EnvAirTemp | Temperatura absoluta del aire | 293.15 (20 °C) | K |
| EnvNomFrictionScaling | Factor de escala de fricción nominal de la vía | 1 | - |
| EnvWindVelX | Velocidad del viento en dirección longitudinal | 0 | m/s |
| EnvWindVelY | Velocidad del viento en dirección lateral | 0 | m/s |

Tabla 8. Parámetros de Calibración de Condiciones Ambientales.

VEHICULOS HIBRIDOS Y ELECTRICOS

Versión: 1.0

Código: CIAUT-DOC-INF
Resolución No. 0104-005-2020-03-04

Página 15 de 30

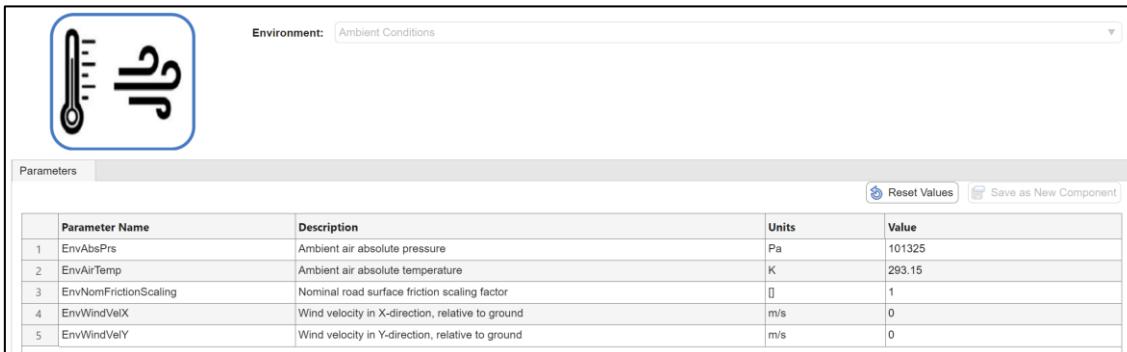


Figura 8. Calibración y ajuste del factor ambiental.

5.9. Selección de Señales y Estrategia de Monitoreo

Para la validación del comportamiento dinámico, se configuró una lista de señales críticas que permiten supervisar el flujo energético entre los subsistemas mecánico y eléctrico.

5.9.1. Instrumentación Virtual y Señales Críticas

Se seleccionaron 15 señales fundamentales que se registran mediante el Simulation Data Inspector

| Categoría | Señal Seleccionada | Importancia en el Proyecto |
|-----------------|-----------------------------|---|
| Batería | BattSoc, BattVolt, BattCurr | Monitoreo de autonomía y regeneración. |
| Vehículo | Vel.xdot, Acc.ax | Validación del cumplimiento del ciclo FTP75. |
| Motor Eléctrico | EMSpd, EMTrq | Análisis del aporte de par del MG2. |
| Motor Térmico | EngTrq, EngSpdOut | Evaluación de la carga del motor de combustión. |
| Conductor | AccelFdbk, DecelFdbk | Verificación de los comandos de control del driver. |

Tabla 9. Variables Seleccionadas para el Análisis Dinámico.

VEHICULOS HIBRIDOS Y ELECTRICOS

Versión: 1.0

Código: CIAUT-DOC-INF
Resolución No. 0104-005-2020-03-04

Página **16** de **30**

| Selected Signals | |
|--|--|
| Battery.BattInfo.BattSoc Battery.BattInfo.BattVolt Battery.BattInfo.BattCurr Body.BdyFrm.Cg.Vel.xdot Body.BdyFrm.Cg.Acc.ax Body.BdyFrm.Cg.Acc.ay Body.BdyFrm.Cg.Acc.az Driver.SteerFdbk Driver.AccelFdbk Driver.DecelFdbk Driver.GearFdbk EM.EMSpd EM.EMTrq Engine.EngTrq Engine.EngSpdOut | |

Figura 9. Selección de señales.

5.10 Análisis de la Arquitectura de Integración y Sistema Híbrido IPS

La arquitectura seleccionada representa la cúspide de la eficiencia en vehículos híbridos modernos. Se basa en un flujo de energía bidireccional que permite al vehículo operar en modo puramente eléctrico, térmico o combinado, optimizando el consumo según la demanda del conductor.

5.10.1. Integración de Nivel Superior (Top-Level Model)

El modelo se organiza en una estructura de lazo cerrado donde la información fluye constantemente entre el entorno y el vehículo.

| Bloque | Función Principal | Interacción de Señales |
|-------------|----------------------------|---|
| Scenarios | Generación de trayectorias | Envía la velocidad de consigna del ciclo FTP75. |
| Environment | Simulación de atmósfera | Define la densidad del aire y temperatura para cálculos térmicos. |

VEHICULOS HIBRIDOS Y ELECTRICOS

Versión: 1.0

Código: CIAUT-DOC-INF
Resolución No. 0104-005-2020-03-04

Página 17 de 30

| | | |
|-----------------|--------------------------|---|
| Driver Commands | Controlador Longitudinal | Compara la velocidad real con la deseada para generar aceleración/freno. |
| Controllers | Gestión de Energía (PCM) | Decide cuándo activar el motor de combustión o usar la batería. |
| Vehicle | Planta Multifísica | Contiene la masa, neumáticos, motor e inversor integrados. |
| Visualization | Análisis de Datos | Nodo central para la extracción de oscilogramas (SOC, Torque, Velocidad). |

Tabla 10. Funcionalidad de los Bloques de Integración Superior.

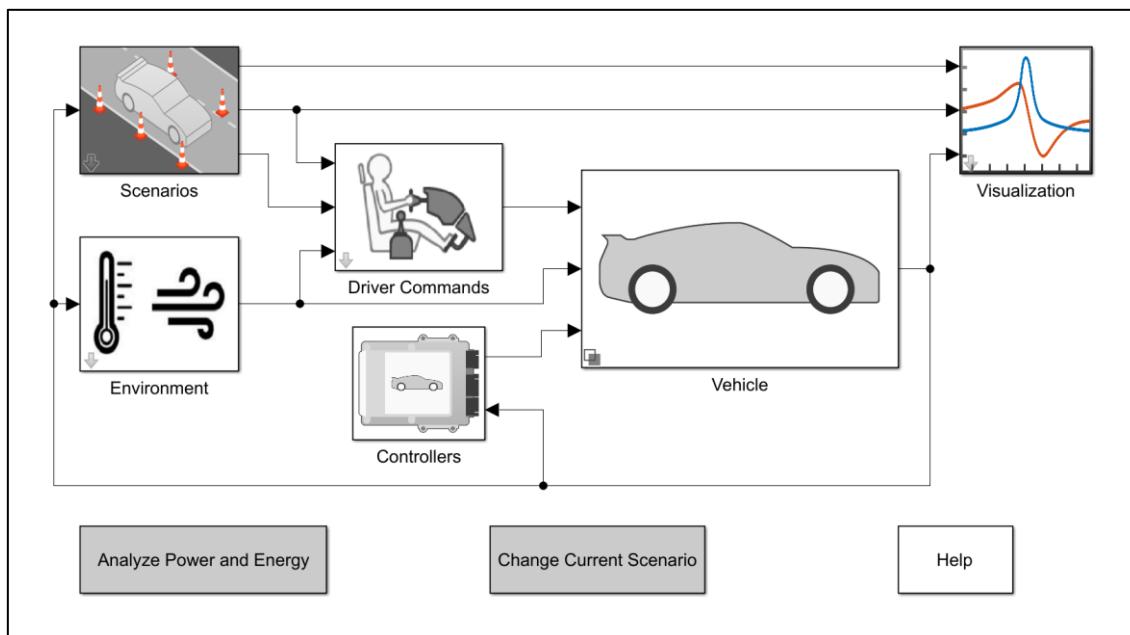


Figura 10. Arquitectura final del Toyota Yaris Cross HV.

5.11 Caracterización de las Máquinas Eléctricas (MG1 y MG2)

La configuración de las unidades motrices eléctricas dentro del entorno de Simulink. Se han implementado bloques de tipo Mapped EM (Mapped Electric Machine), los cuales utilizan tablas de consulta (look-up tables) de torque y eficiencia para representar el comportamiento real de los motores sin la carga computacional de un modelo dinámico fundamental.

5.11.1 Configuración de los Bloques "Electric Machine"

VEHICULOS HIBRIDOS Y ELECTRICOS

Versión: 1.0

Código: CIAUT-DOC-INF
Resolución No. 0104-005-2020-03-04

Página **18** de **30**

Ambas máquinas, denominadas en el sistema Toyota como MG1 (Motor-Generador 1) y MG2 (Motor-Generador 2), comparten una arquitectura de señales similar para garantizar la cohesión del flujo energético:

- Entradas de Control: Reciben consignas de torque (EMTrqCmd) desde la Unidad de Control del Vehículo (VCU) y la velocidad de giro actual (EMSpd).
- Conexión Eléctrica: Ambos bloques están vinculados al bus de alta tensión (BusVolt), extrayendo o inyectando corriente (EMCurr) según el estado operativo.
- Gestión Térmica: El sistema integra un puerto de temperatura (MtrTemp) que permite monitorear el calor generado por las pérdidas de potencia (PwrLoss), asegurando que la operación se mantenga dentro de rangos seguros.

| Componente | Función Principal | Comportamiento Dinámico | |
|------------------------|------------------------------------|--|--|
| Electric Machine (MG1) | 1 Generador y Control de Velocidad | Actúa como el "cerebro mecánico" que ajusta la relación de transmisión e-CVT y carga la batería mediante el motor térmico. | |
| Electric Machine (MG2) | 2 Tracción y Regeneración | Proporciona el torque motriz instantáneo (hasta 141 Nm) y es el encargado principal del frenado regenerativo. | |

Tabla 11. Funciones Operativas de MG1 y MG2.

VEHICULOS HIBRIDOS Y ELECTRICOS

Versión: 1.0

Código: CIAUT-DOC-INF
Resolución No. 0104-005-2020-03-04

Página 19 de 30

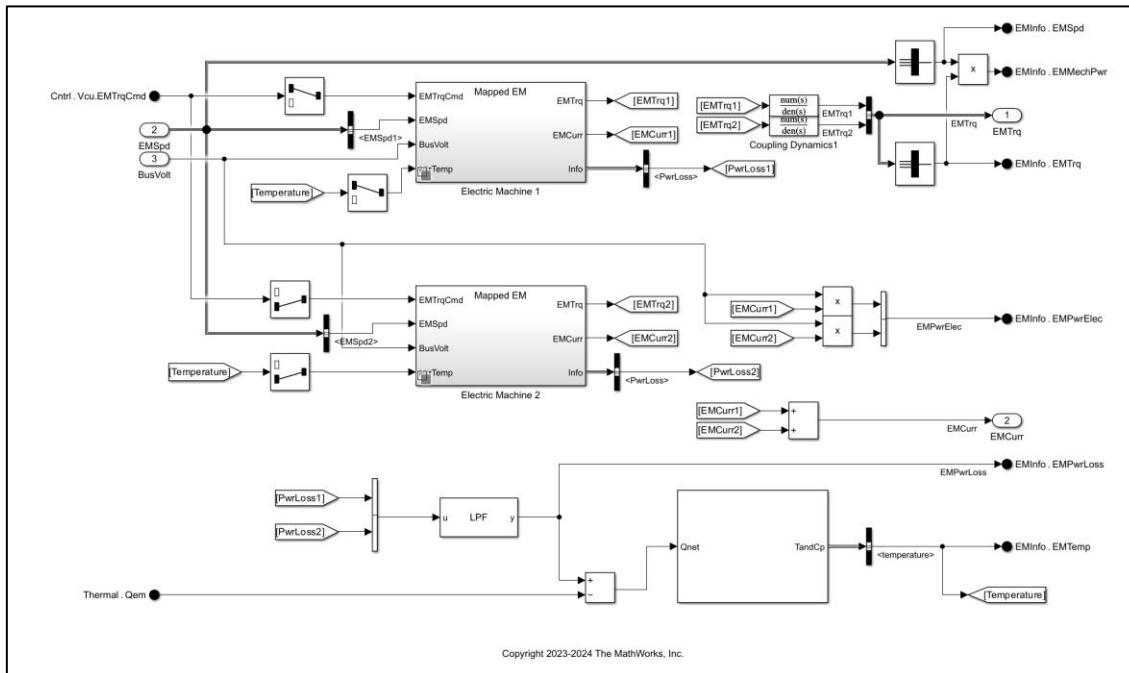


Figura 11. Esquema MG1 y MG2.

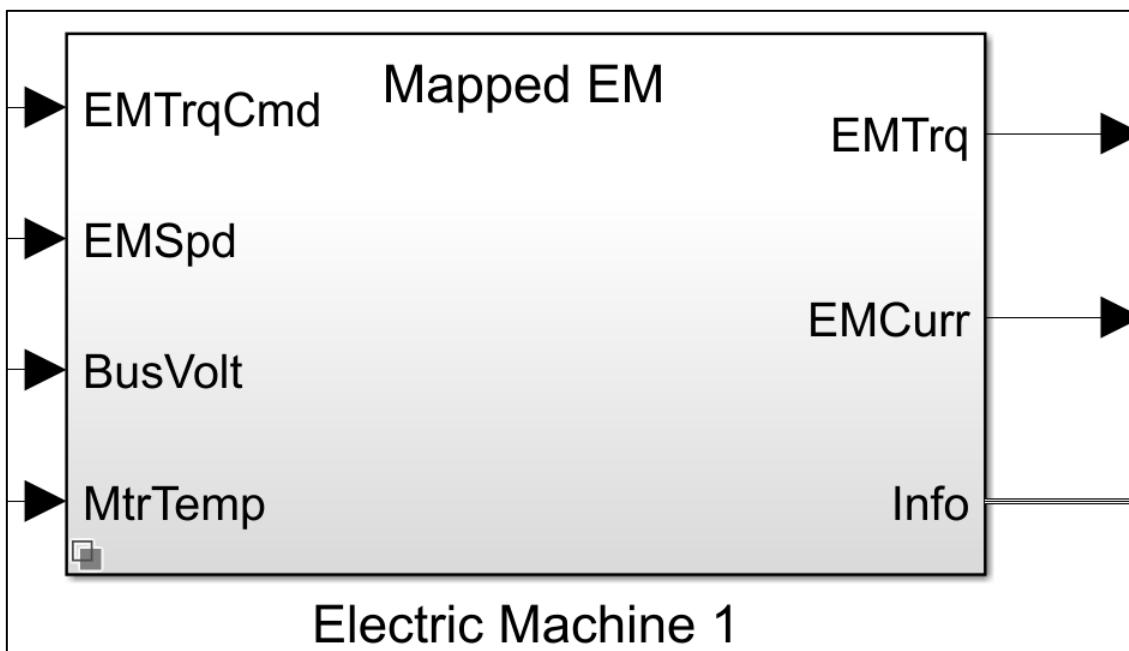


Figura 12. Esquema MG1.

VEHICULOS HIBRIDOS Y ELECTRICOS

Versión: 1.0

Código: CIAUT-DOC-INF
Resolución No. 0104-005-2020-03-04

Página **20** de **30**

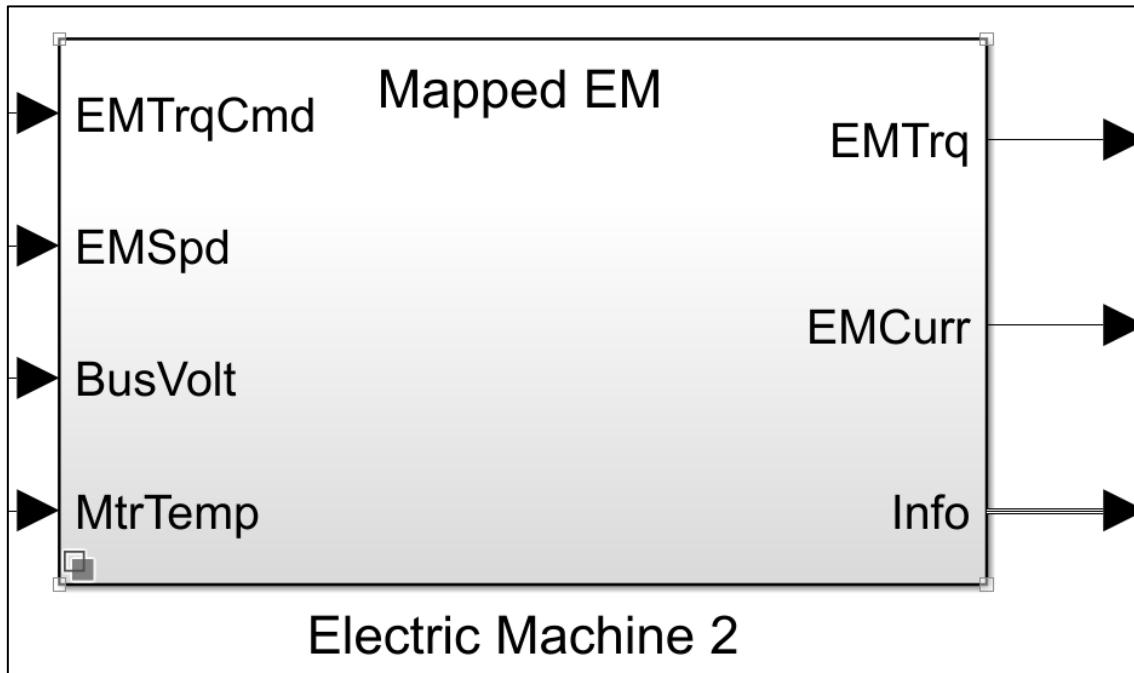
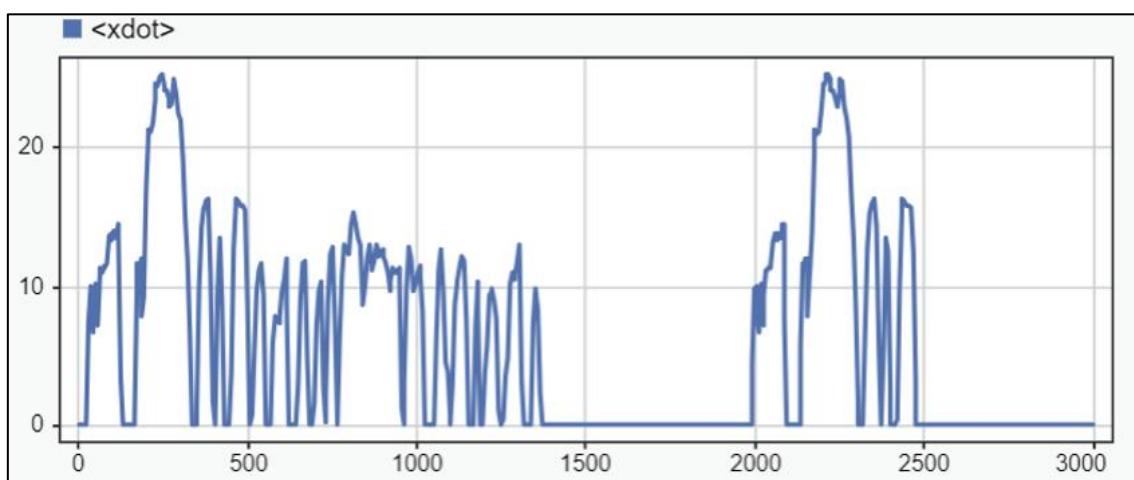


Figura 13. Esquema MG2.

6. ANALISIS DE GRAFICAS

6.1 Velocidad Longitudinal del vehículo (xdot)



Grafica 1. Análisis velocidad longitudinal.

VEHICULOS HIBRIDOS Y ELECTRICOS

Versión: 1.0

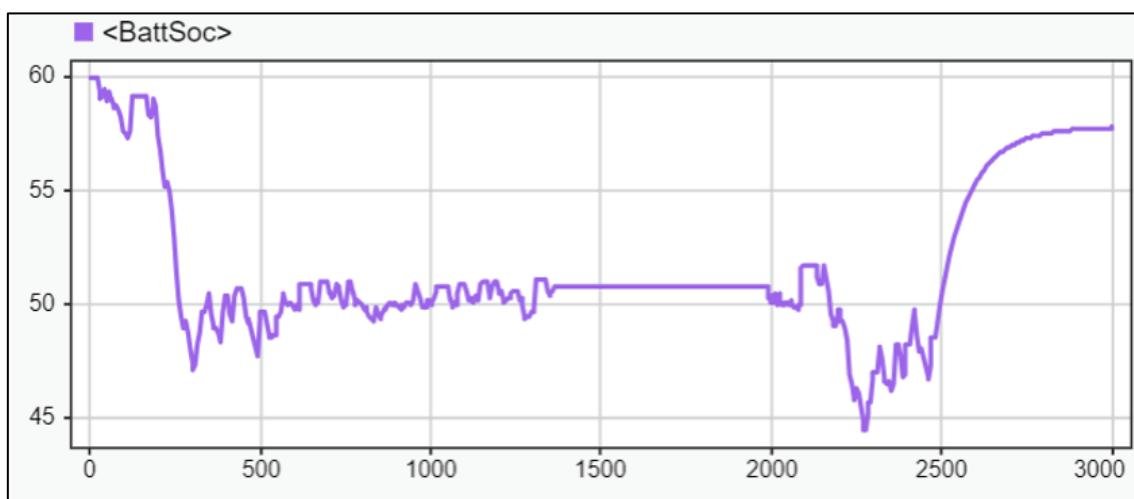
Código: CIAUT-DOC-INF
Resolución No. 0104-005-2020-03-04

Página **21** de **30**

La señal “xdot” representa la velocidad longitudinal del vehículo en metros por segundo (m/s). Al observar el oscilograma resultante, se valida que el controlador Longitudinal Driver ha seguido con éxito la traza del ciclo FTP75.

- **Fase Urbana (0 - 1350 s):** Se observan múltiples picos de velocidad con paradas frecuentes, típicos de un entorno cotidiano. El vehículo alcanza una velocidad máxima de aproximadamente 25 m/s (90 km/h).
- **Periodo de Reposo (1350 - 1980 s):** Se identifica claramente la fase de "soak" o remojo térmico del ciclo FTP75, donde la velocidad permanece en cero, permitiendo evaluar la descarga parásita y la estabilización térmica del pack de 48 celdas.
- **Fase de Arranque en Caliente (1980 s en adelante):** El vehículo retoma el movimiento replicando la fase inicial para medir la eficiencia bajo temperaturas operativas estabilizadas.

6.2. Análisis del Estado de Carga (BattSoc)



Grafica 2. Análisis SOC.

El comportamiento de la señal BattSoc es el indicador clave de la eficiencia del sistema híbrido IPS.

- **Condición Inicial:** La simulación comienza con un SOC de 60% (0.6), tal como se definió en los parámetros de la batería mapeada.
- **Fase de Descarga Inicial:** Durante los primeros 300 s, se observa una caída abrupta del SOC hasta aproximadamente el 47%. Esto coincide con la fase de

VEHICULOS HIBRIDOS Y ELECTRICOS

Versión: 1.0

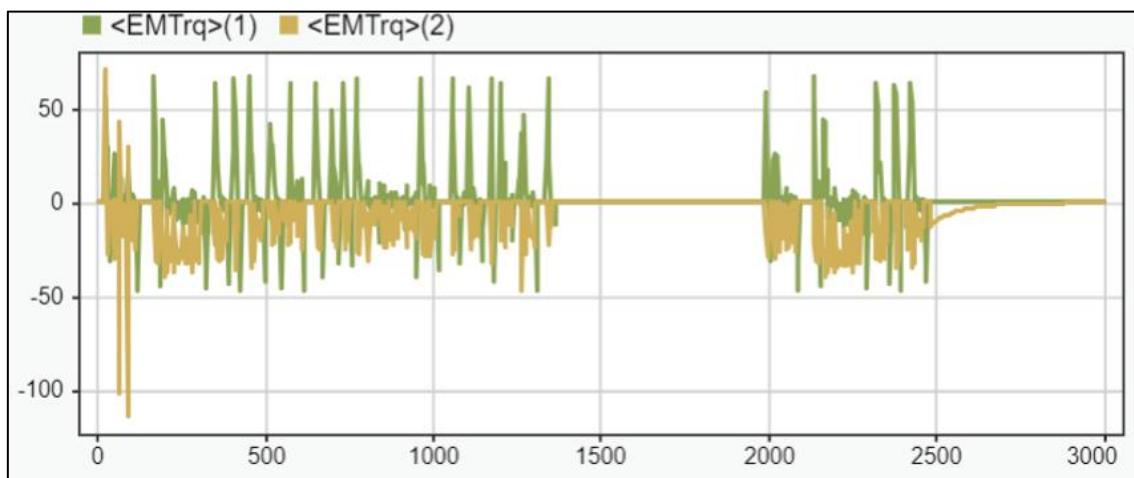
Código: CIAUT-DOC-INF
Resolución No. 0104-005-2020-03-04

Página 22 de 30

aceleración más exigente del ciclo, donde el motor eléctrico MG2 asume la carga principal.

- **Comportamiento en "Diente de Sierra":** Entre los 500 s y 1350 s, el SOC fluctúa en un rango estrecho (entre 48% y 51%). Estas micro-recuperaciones son evidencia directa del frenado regenerativo; cada vez que la velocidad x_{dot} baja, la batería recupera energía.
- **Fase de Carga Final:** Al finalizar el ciclo (después de los 2300 s), se observa un incremento significativo del SOC, alcanzando casi el 58%. Esto indica que el sistema de gestión de energía (PMS) activó el motor de combustión (ICE) para recargar la batería y devolverla a su estado operativo óptimo antes de finalizar la prueba.

6.3 Análisis del Desempeño de las Máquinas Eléctricas (MG1 y MG2)



Grafica 3. Análisis MG1 – MG2.

La Gráfica 3 presenta dos señales principales: “EMTrq(1)” (representada en verde) y “EMTrq(2)” (representada en amarillo), las cuales corresponden a las máquinas eléctricas acopladas al engranaje planetario.

- **Torque Motor (Fase de Tracción):** Se observan picos positivos que alcanzan valores de hasta 75 Nm en transitorios rápidos. Estos picos coinciden con las pendientes de aceleración del perfil de velocidad “ x_{dot} ”, donde el sistema eléctrico proporciona par instantáneo para vencer la inercia de los 1245 kg del vehículo.

VEHICULOS HIBRIDOS Y ELECTRICOS

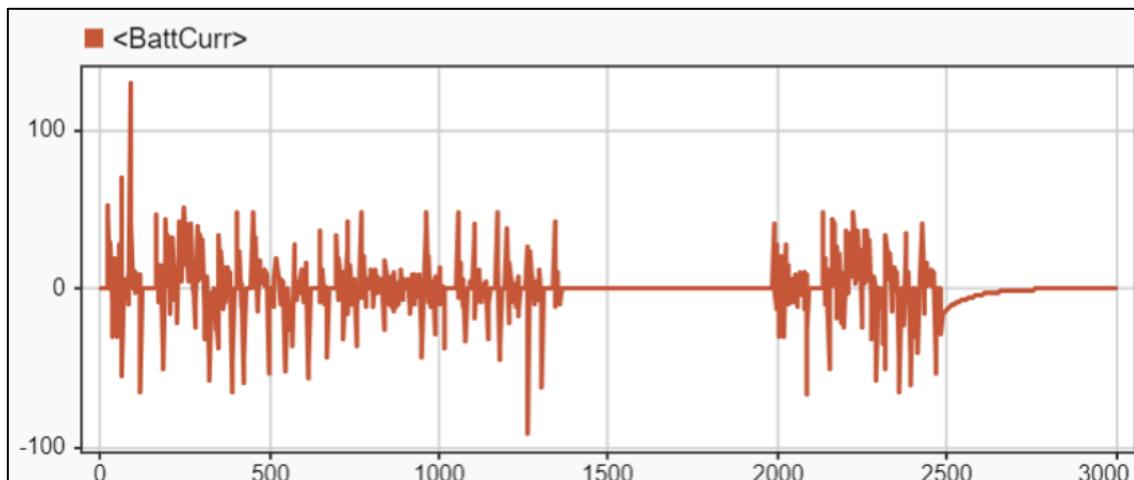
Versión: 1.0

Código: CIAUT-DOC-INF
Resolución No. 0104-005-2020-03-04

Página 23 de 30

- **Torque Generador (Fase de Regeneración):** Durante las desaceleraciones, ambas máquinas registran valores de par negativos, destacando picos de hasta -110 Nm en la señal amarilla. Este fenómeno es la evidencia física del frenado regenerativo, donde el par negativo actúa como una fuerza de frenado que convierte la energía cinética en energía eléctrica para recargar el pack de 4.3 Ah.

6.4 Análisis del Flujo de Corriente de la Batería (BattCurr)



Grafica 4. Análisis BattCurr.

La Gráfica 4 muestra una actividad intensa de conmutación, característica de un vehículo que opera en un entorno urbano con constantes variaciones de par motor.

- **Picos de Descarga (Corriente Positiva):** Se identifican picos de demanda que alcanzan aproximadamente los 130 A. Estos eventos ocurren durante las aceleraciones iniciales del ciclo FTP75, donde el motor eléctrico MG2 requiere una alta tasa de transferencia de electrones para vencer la inercia de los 1245 kg del vehículo.
- **Picos de Carga (Corriente Negativa):** Durante las fases de desaceleración, la corriente se vuelve negativa, alcanzando valores de hasta -90 A. Esta es la evidencia eléctrica del frenado regenerativo: la máquina eléctrica MG2 invierte su rol a generador, inyectando energía de vuelta a la batería y provocando los incrementos observados en el SOC.

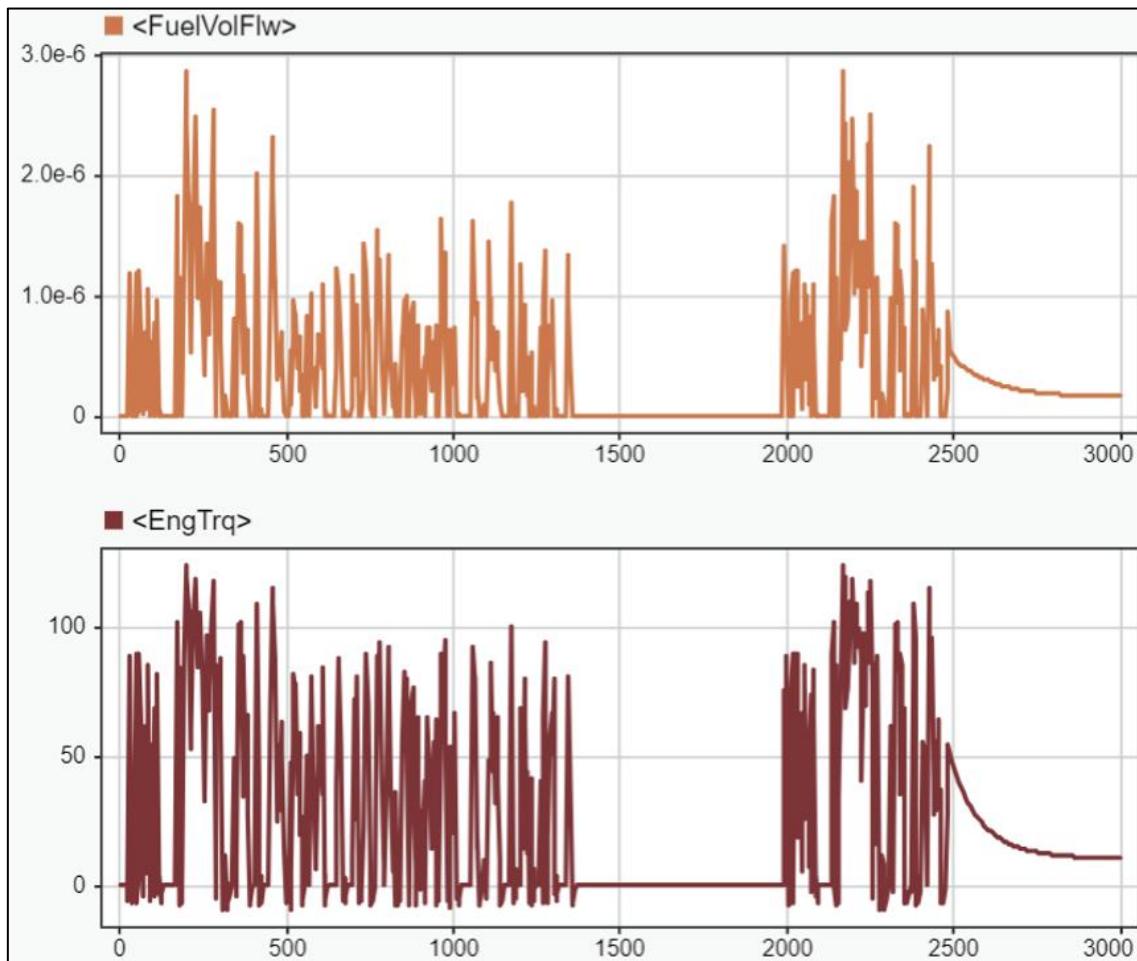
VEHICULOS HIBRIDOS Y ELECTRICOS

Versión: 1.0

Código: CIAUT-DOC-INF
Resolución No. 0104-005-2020-03-04

Página 24 de 30

6.5 Análisis del Rendimiento Térmico y Consumo del ICE



Grafica 5. Análisis FuelVolFlw vs EngTrq

Al analizar simultáneamente ambas señales, se observa una sincronización absoluta: cada pico de demanda de torque genera un incremento proporcional en el consumo de combustible.

- **Picos de Torque (EngTrq):** El motor térmico registra picos de par de aproximadamente 125 Nm. Considerando que el torque máximo configurado es de 228 Nm, el motor está operando en un rango de carga media, lo que favorece la eficiencia térmica y reduce las emisiones contaminantes.
- **Consumo Volumétrico (FuelVolFlw):** El flujo de combustible alcanza picos de casi 2.8×10^{-6} (m^3/s) durante las aceleraciones más agresivas del ciclo FTP75. La ausencia de flujo durante los valles de la gráfica confirma las fases de conducción en modo puramente eléctrico (EV) y el apagado del motor en paradas (Start-Stop).

VEHICULOS HIBRIDOS Y ELECTRICOS

Versión: 1.0

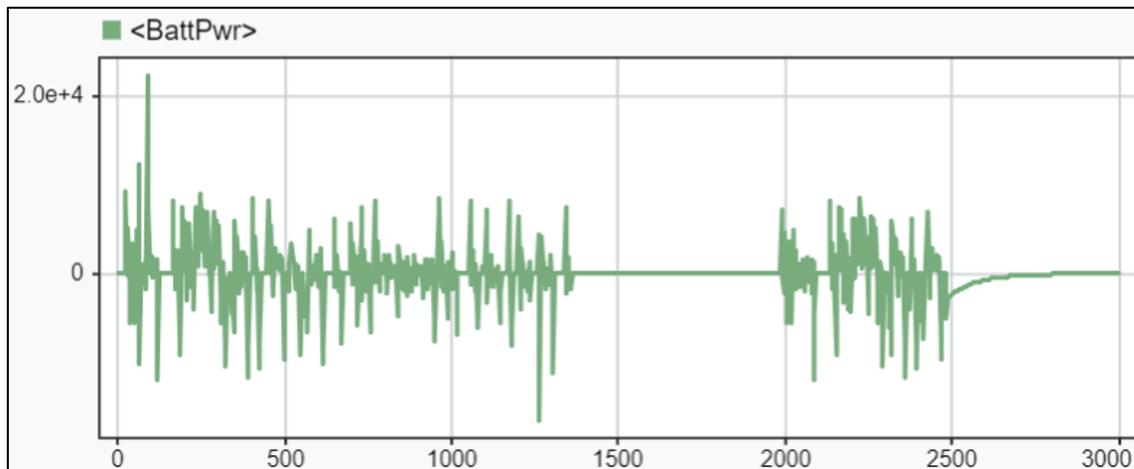
Código: CIAUT-DOC-INF
Resolución No. 0104-005-2020-03-04

Página 25 de 30

| Fase del Tiempo (s) | Estado del Motor (ICE) | Observación Técnica |
|---------------------|------------------------|--|
| 0 - 1350 (Urbana) | Intermitente | El motor se enciende solo para asistir en aceleraciones o cuando el SOC baja del 50%. |
| 1350 - 1980 (Soak) | Apagado | Consumo nulo y torque cero; cumplimiento estricto del periodo de reposo del ciclo. |
| 2500 - Final | Sostenido | El motor se mantiene encendido con un torque decreciente para recargar la batería hasta el 58% de SOC. |

Tabla 12. Comportamiento Térmico durante el Ciclo FTP75.

6.6 Análisis de la Potencia Eléctrica de la Batería (BattPwr)



Grafica 6. Análisis BattPwr.

Al observar la Gráfica 6, se identifica una respuesta de alta frecuencia que correlaciona perfectamente con los picos de torque y corriente analizados anteriormente.

- **Picos de Potencia de Descarga (Positivos):** Se registran picos máximos que superan los 2.0×10^4 W (20kW) durante las aceleraciones más agresivas. Considerando que el motor MG2 tiene una capacidad de 59 kW, estos picos de 20 kW indican que la batería está proporcionando aproximadamente el 34% de la potencia total requerida en transitorios, dejando el resto al motor térmico para optimizar la vida útil del pack.
- **Picos de Potencia de Regeneración (Negativos):** Durante el frenado, la potencia se vuelve negativa, alcanzando valores de entre -10 kW y -15 kW. Esta energía

VEHICULOS HIBRIDOS Y ELECTRICOS

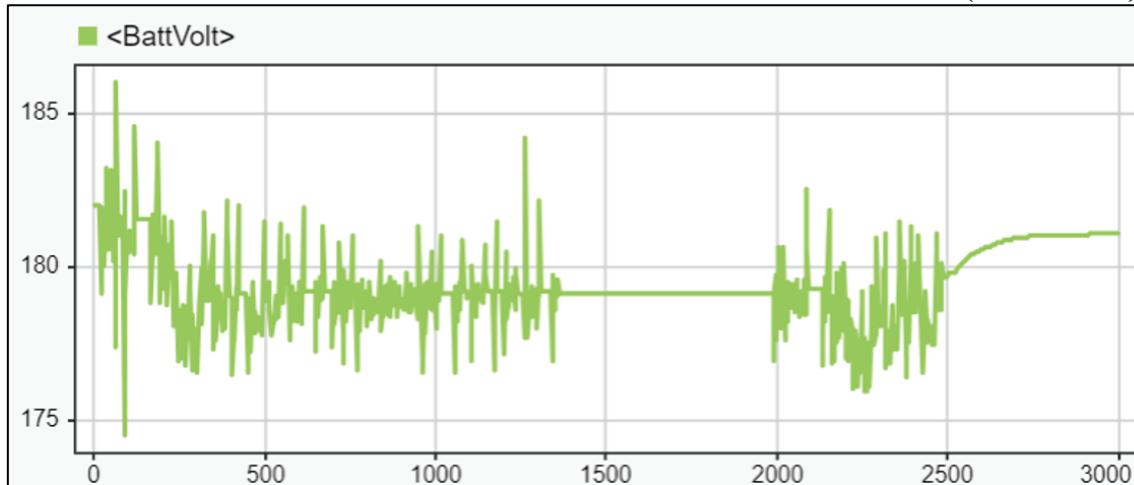
Versión: 1.0

Código: CIAUT-DOC-INF
Resolución No. 0104-005-2020-03-04

Página **26** de **30**

recuperada es la responsable de las "subidas" en el SOC observadas durante el manejo urbano, validando la eficiencia del sistema IPS.

6.7 Análisis de la Tensión Terminal de la Batería (<BattVolt>)



Grafica 7. Análisis BattVolt.

Al inicio de la simulación, con un SOC del 60%, la tensión se sitúa en aproximadamente 182 V.A medida que avanza el ciclo, se observan los siguientes fenómenos:

- **Caída Máxima de Tensión (Sag):** Alrededor del segundo 100, se registra un dip profundo que alcanza los 174.5 V. Este evento está directamente correlacionado con el pico de corriente de 130 A y la potencia de descarga de 20 kW analizados anteriormente. La caída de tensión se explica mediante la ley de Ohm aplicada al modelo de circuito equivalente: $V_{term} = V_{oc} - I * R_{int}$.
- **Picos de Sobretensión:** Durante las fases de frenado regenerativo intenso, la tensión sube hasta los 186 V. Estos picos demuestran la capacidad de las celdas para absorber energía rápidamente sin exceder el voltaje de corte superior, protegiendo la integridad química del litio.
- **Estabilización en Reposo:** Durante el periodo de "soak" (1350 s a 1980 s), la tensión permanece constante en 179 V, lo que confirma la ausencia de cargas parásitas significativas en el modelo.



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ
SEDE QUITO – CAMPUS SUR**



VEHICULOS HIBRIDOS Y ELECTRICOS

Versión: 1.0

Código: CIAUT-DOC-INF
Resolución No. 0104-005-2020-03-04

Página **27** de **30**

7. CONSTRUCCION Y DISEÑO DE BATERIAS (BATTERY PACK)

El sistema de almacenamiento de energía ha sido diseñado utilizando la herramienta Battery Builder, permitiendo una transición desde la química de la celda individual hasta la arquitectura física del pack completo.

7.1. Especificaciones de la Celda Individual

Se seleccionó una celda de Litio-Ion con parámetros optimizados para alta densidad de potencia, ideal para las fases de asistencia y regeneración del sistema híbrido.

- Capacidad Nominal: 4.3 A*h
- Masa de la Celda: 0.5 kg.
- Voltaje de Circuito Abierto (Voc): Mapeado según el SOC, con un valor nominal por celda de aprox. 3.7 V.
- Estado de Carga Inicial (SOC): 0.6 (60%) para permitir ciclos de carga y descarga desde el inicio de la simulación.

7.2. Arquitectura del Pack (Configuración 48S1P)

Para alcanzar el voltaje de bus necesario para el inversor del Toyota Yaris Cross, se configuró un ensamblaje en serie que suma el potencial eléctrico de cada unidad.

- Celdas en Serie: 48 unidades.
- Celdas en Paralelo: 1 unidad.
- Total, de Celdas: 48 celdas en total.
- Voltaje Nominal del Pack: 177.6 V (calculado como 48 x 3.7 V).
- Disposición Física: Organización en una matriz de 4 filas x 12 columnas, optimizando el espacio y la disipación térmica lateral.

VEHICULOS HIBRIDOS Y ELECTRICOS

Versión: 1.0

Código: CIAUT-DOC-INF
Resolución No. 0104-005-2020-03-04

Página **28** de **30**

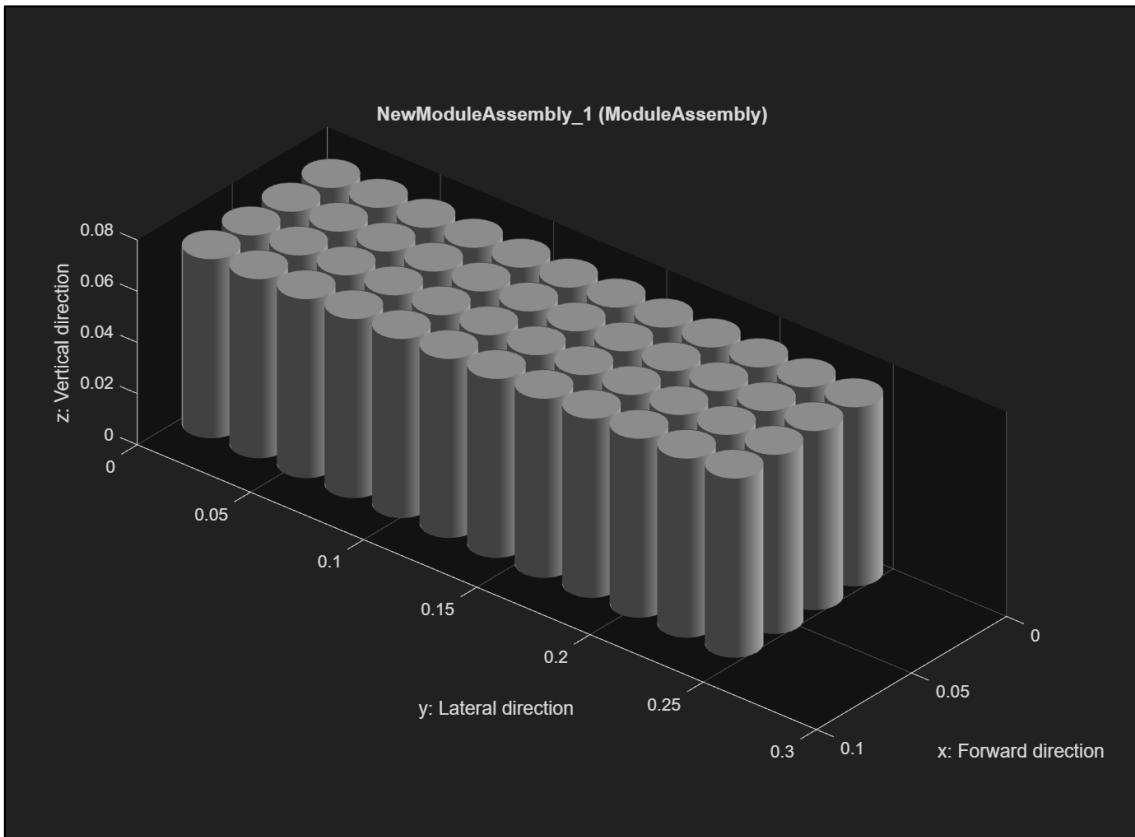


Figura 14. Creación de celdas Toyota Yaris HV.

7. CONCLUSIONES

- El modelo multifásico desarrollado integró con éxito la dinámica longitudinal, el almacenamiento de energía y la propulsión, logrando seguir fielmente la traza de velocidad del ciclo FTP75.
- Se comprobó que el sistema de división de potencia (Power-Split) optimiza el uso del motor térmico al permitirle operar en zonas de alta eficiencia (Ciclo Atkinson), mientras el motor eléctrico compensa los torques transitorios.
- Los oscilogramas de corriente y SOC validaron la recuperación de energía; se registraron picos de corriente negativa de hasta -90 A que permitieron micro-recuperaciones en el estado de carga de la batería.

VEHICULOS HIBRIDOS Y ELECTRICOS

Versión: 1.0

Código: CIAUT-DOC-INF
Resolución No. 0104-005-2020-03-04

Página **29** de **30**

- La disposición jerárquica del pack en 4x12 celdas permite un análisis de transferencia de calor por conducción realista, fundamental para prevenir el riesgo de "thermal runaway" en volúmenes compactos.
- La configuración de 48 celdas en serie (177.6 V) demostró robustez frente a demandas extremas, soportando picos de descarga de 130 A sin que la tensión cayera por debajo de los límites críticos de operación del inversor.

8. RECOMENDACIONES

- Ajustar las ganancias del controlador PI del *Longitudinal Driver* para suavizar los picos de potencia de descarga, optimizando así la vida útil del pack de baterías.
- Para complementar el análisis urbano (FTP75), se recomienda ejecutar el ciclo HWFET y comparar la eficiencia energética en regímenes de alta velocidad constante.
- Aunque se analizó el flujo de combustible, se sugiere integrar bloques específicos para cuantificar emisiones de CO₂ y NO_x, fortaleciendo el enfoque ambiental del proyecto.
- Sería valioso incluir parámetros de envejecimiento en el bloque *Mapped Battery* para observar cómo se reduce la capacidad de 4.3 Ah tras múltiples ciclos de conducción prolongados.
- Se recomienda realizar pruebas variando la temperatura ambiente en el bloque *Environment* para evaluar el desempeño del sistema de gestión térmica bajo climas extremos.

9. BIBLIOGRAFÍA

[1] Toyota Motor Corporation, "Toyota Hybrid System (THS) Technical Guide," Toyota Engineering Press, 2022.

[2] J. M. Miller, *Propulsion Systems for Hybrid Vehicles*, 2nd ed. London, UK: The Institution of Engineering and Technology, 2010.

[3] T. D. Gillespie, *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers (SAE), 1992.

[4] W. H. Hucho, *Aerodynamics of Road Vehicles*. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 1998.



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ
SEDE QUITO – CAMPUS SUR**



VEHICULOS HIBRIDOS Y ELECTRICOS

Versión: 1.0

Código: CIAUT-DOC-INF
Resolución No. 0104-005-2020-03-04

Página **30** de **30**

[5] MathWorks, "Simscape Battery User's Guide," R2024a, 2024. [Online]. Disponible en: <https://www.mathworks.com/help/simscape-battery/>

[6] H. He, R. Xiong, and J. Fan, "Evaluation of lithium-ion battery equivalent circuit models for state of charge estimation," *Journal of Power Sources*, vol. 196, no. 14, pp. 5885-5891, 2011.

[7] G. Pistoia, *Lithium-Ion Batteries: Fundamentals and Applications*. Amsterdam: Elsevier, 2014.

[8] J. Larminie and J. Lowry, *Electric Vehicle Technology Explained*, 2nd ed. West Sussex, UK: Wiley, 2012.

[9] M. H. Rashid, *Power Electronics: Circuits, Devices, and Applications*, 4th ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson, 2014.

[10] U.S. Environmental Protection Agency (EPA), "Federal Test Procedure (FTP-75) Drive Cycle," 2023. [Online]. Disponible en: <https://www.epa.gov/vehicle-and-fuel-emissions-testing/>

10. ANEXOS