

**MODELADO Y SIMULACIÓN DE VEHÍCULOS HÍBRIDOS MEDIANTE EL USO  
DE MATLAB SIMULINK DE LAS ARQUITECTURAS: SERIE, PARALELO Y  
PARALELO SERIE.**

**EDINSON ALEXANDER CAMPOS RUEDA  
DAVID ALBERTO CHACÓN REÁTIGA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA**

**2016**

**MODELADO Y SIMULACIÓN DE VEHÍCULOS HÍBRIDOS MEDIANTE EL USO  
DE MATLAB SIMULINK DE LAS ARQUITECTURAS: SERIE, PARALELO Y  
PARALELO SERIE.**

**EDINSON ALEXANDER CAMPOS RUEDA**

**DAVID ALBERTO CHACÓN REÁTIGA**

**Trabajo de grado para optar al título de  
Ingenieros Electricistas**

**Director**

**JAVIER E. SOLANO MARTÍNEZ**

**Ingeniero Electricista, Ph.D**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

**INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS**

**ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES**

**BUCARAMANGA**

**2016**

## TABLA DE CONTENIDO

	Pág
INTRODUCCIÓN .....	14
1. MARCO TEÓRICO.....	17
1.1 HISTORIA DE LOS VEH Y PANORAMA ACTUAL .....	17
1.2 TIPOS DE VEH.....	18
1.3 CICLOS DE CONDUCCIÓN .....	20
2. MODELADO, REPRESENTACIÓN Y CONTROL .....	24
2.1 REM (REPRESENTACIÓN ENERGÉTICA MACROSCÓPICA).....	24
2.1.1 Principio de la interacción .....	24
2.1.2 Principio de la causalidad .....	25
2.1.3 Principio de inversión.....	25
2.2 Elementos de la rem .....	26
2.2.1 Fuentes de energía .....	26
2.2.2 Elementos de acumulación .....	27
2.2.3 Elementos de conversión mono-físico .....	27
2.2.4 ELEMENTOS DE CONVERSIÓN MULTI-FÍSICO.....	28
2.2.5 ELEMENTOS DE ACOPLAMIENTO.....	28
2.3 ESTRUCTURA DE CONTROL MÁXIMA (MCS) .....	29
3. MODELADO DE LAS ARQUITECTURAS DE LOS VEHÍCULOS HÍBRIDOS .....	30
METODOLOGÍA DE TRABAJO .....	30
3.1 VEHÍCULO ELÉCTRICO (VE).....	31
3.1.1 BATERÍA .....	32
3.1.2 CONVERTIDOR DC/DC.....	34
3.1.3 MOTOR ELÉCTRICO.....	34
3.1.4 CAJA DE CAMBIOS .....	36
3.1.5 DIFERENCIAL.....	37
3.1.6 RUEDAS.....	38

3.1.7	CHASIS .....	38
3.1.8	AMBIENTE .....	40
3.1.9	CONTROL .....	40
3.2	VEH SERIE.....	42
3.2.1	MOTOR DE COMBUSTIÓN .....	44
3.2.2	EJE DE ACOPLE .....	44
3.2.3	GENERADOR DC .....	45
3.2.4	CONVERTIDOR DC/DC 1 .....	46
3.2.5	BUS DE DC .....	47
3.2.6	CONTROL .....	47
3.2.7	BLOQUE DE GESTIÓN DE ENERGÍA.....	50
3.3	VEH PARALELO.....	53
3.3.1	SISTEMA DE CORREA .....	55
3.3.2	FRENO .....	56
3.3.3	MODIFICACIÓN DEL ACOPLE DEL CHASIS.....	56
3.3.4	CONTROL .....	57
3.3.5	BLOQUE DE GESTIÓN DE ENERGÍA.....	58
3.4	VEH Paralelo - Serie .....	60
3.4.1	SELECTOR – DIFERENCIAL.....	62
3.4.2	BLOQUE ESTRATÉGICO VEH SERIE – PARALELO .....	64
4.	RESULTADOS DE SIMULACIÓN .....	66
4.1	VEHÍCULO ELÉCTRICO .....	68
4.2	VEH SERIE .....	72
4.3	VEH PARALELO.....	76
4.4	EH SERIE-PARALELO.....	80
4.5	RESULTADOS CON OTROS CICLOS DE PRUEBA.....	85
5.	OBSERVACIONES Y CONCLUSIONES .....	86
	BIBLIOGRAFÍA .....	88
	ANEXOS .....	91

## LISTA DE FIGURAS

Pág

Figura 1 Arquitectura del Vehículo Híbrido Serie. ....	19
Figura 2 Arquitectura del Vehículo Híbrido Paralelo. ....	19
Figura 3 Arquitectura del Vehículo Híbrido Serie-Paralelo.....	20
Figura 4 Prueba de emisiones en vehículos ligeros .....	21
Figura 5 . FTP-75 ciclo de prueba de EPA.....	21
Figura 6 . JC08 Ciclo de prueba Japonés de 2005 .....	22
Figura 7 ECE 15 ciclo de conducción urbano europeo.....	22
Figura 8 . Vista del bloque Drive Cycle dentro de Simulink.....	23
Figura 9 Control mediante el principio de inversión .....	26
Figura 10 Representación de fuente de energía.....	26
Figura 11 Representación de elemento de acumulación.....	27
Figura 12 Representación de un convertidor mono-físico.....	27
Figura 13 Representación de un convertidor multi-físico.....	28
Figura 14 Representación elementos de acople.....	28
Figura 15 Representación de los elementos de control .....	29
Figura 16 Esquema de la Metodología de trabajo Implementada .....	31
Figura 17 Representación y control del Vehículo Eléctrico .....	32
Figura 18 Batería ilustrada mediante REM (Elemento fuente).....	33
Figura 19 Conexión del bloque de Batería.....	33
Figura 20 Convertidor DC/DC.....	34
Figura 21 Modelo de motor DC de Imanes Permanentes .....	35
Figura 22 Bobinado del motor DC.....	35
Figura 23 Elemento de conversión multifísico.....	36
Figura 24 Representación de la caja de cambios.....	37
Figura 25 Representación del diferencial.....	37

Figura 26 Representación de las ruedas .....	38
Figura 27 Representación del chasis .....	39
Figura 28 Representación de la máquina de DC.....	46
Figura 29 Representación del convertidor DC-DC 1.....	46
Figura 30 REM del Bus DC.....	47
Figura 31 Prueba preliminar del Eje de acople .....	48
Figura 32 Algoritmo de operación del bloque estratégico .....	51
Figura 33 Esquema en simulink del bloque estratégico del VEH Serie .....	52
Figura 34 Detalle del bloque Encendido Suave .....	52
Figura 35 Representación y control de la arquitectura tipo Paralelo.....	54
Figura 36 Representación del sistema de correa.....	55
Figura 37 Representación del sistema de frenos.....	56
Figura 38 Representación del chasis, acoplamiento mono-físico.....	57
Figura 39 Diseño de la máquina de estado del VEH paralelo.....	59
Figura 40 Esquema en simulink del bloque estratégico del VEH Paralelo.....	59
Figura 41 Representación y control de la arquitectura tipo paralelo-serie .....	61
Figura 42 Representación del selector. ....	62
Figura 43 Algoritmo del selector. ....	63
Figura 44 Diseño de la máquina de estados para de VEH Paralelo - Serie.....	65
Figura 45 Esquema en simulink del bloque estratégico del VEH Paralelo-Serie ...	65
Figura 46 Implementación del Vehículo eléctrico en Matlab Simulink .....	68
Figura 47 Resultados de Simulación para la Velocidad del VE .....	69
Figura 48 Vista de Detalle de la Figura 4.2.....	69
Figura 49 Resultados de Simulación en la Batería Vehículo Eléctrico.....	70
Figura 50 Resultados de Simulación en Motor DC Vehículo Eléctrico.....	71
Figura 51 Resultados de Simulación en Motor DC Vehículo Eléctrico.....	71
Figura 52 Implementación del Vehículo serie en Matlab Simulink.....	72
Figura 53 Resultados de Simulación en la Batería Vehículo serie.....	73
Figura 54 Operación de Bloque de Gestión de Energía en VEH Serie.....	73
Figura 55 Arranque del motor de combustión Torque vs tiempo. ....	74

Figura 56 Corrientes que atraviesan el bus de DC. ....	75
Figura 57 Implementación del Vehículo paralelo en Matlab Simulink. ....	76
Figura 58 Resultados de Simulación en la batería del vehículo paralelo.....	77
Figura 59. Operación de Bloque de Gestión de Energía en VEH Paralelo .....	77
Figura 60 Resultados de Simulación del Convertidor DC/DC. ....	78
Figura 61 Resultados de la simulación del motor de DC .....	79
Figura 62 Resultados de los momentos en la correa-polea.....	79
Figura 63 Implementación del Vehículo Paralelo-Serie en Matlab Simulink. ....	80
Figura 64 Resultados de Simulación en la batería del vehículo Paralelo-Serie.....	81
Figura 65 Primera parte de las variables de entrada y salida del bloque de gestión de energía.....	81
Figura 66 Segunda parte de las variables de entrada y salida del bloque de gestión de energía.....	82
Figura 67 Variador de tensión 1 .....	82
Figura 68 Variador de tensión 2 .....	83
Figura 69 Corrientes en el Bus DC .....	83
Figura 70 Distintos torques del juego de poleas. ....	84

## LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Modelo de Embrague .....	952
Anexo B. Modelo engrane planetario .....	985
Anexo C. Resultados con otros ciclos de conducción.....	98

## RESUMEN

**TITULO:** MODELADO Y SIMULACIÓN DE VEHÍCULOS HÍBRIDOS MEDIANTE EL USO DE MATLAB SIMULINK DE LAS ARQUITECTURAS: SERIE, PARALELO Y PARALELO SERIE\*.

**AUTORES:**

EDINSON ALEXANDER CAMPOS RUEDA

DAVID ALBERTO CHACÓN REATIGA\*\*

**PALABRAS CLAVE:** REPRESENTACIÓN ENERGÉTICA MACROSCÓPICA, ESTADO DE CARGA, GESTIÓN DE ENERGÍA, CONTROL, SISTEMAS MULTI-FÍSICOS.

**DESCRIPCIÓN:**

Los Vehículos Eléctricos Híbridos (VEH), tienen un mejor rendimiento en comparación a los automóviles convencionales, y su desarrollo apunta a aumentar las distancias y la autonomía de los trayectos en comparación a un vehículo eléctrico. Dependiendo de las distintas configuraciones, los VEH pueden clasificarse como: Serie, Paralelo y Paralelo-Serie.

En los VEH serie, toda la tracción es provista por un motor eléctrico, el cual es regulado por electrónica de potencia que toma la energía de un Bus DC al cual se conectan múltiples fuentes (e.g pilas de combustible, baterías, grupos electrógenos).

Los VEH paralelo tienen acoplado al eje de las ruedas, un sistema que distribuye la energía mecánica provista por un motor térmico y la maquina eléctrica con su respectivas fuentes de energía y control de potencia. En esta configuración los dos sistemas pueden trabajar de forma simultánea o por separado y solo necesita una maquina eléctrica.

La configuración Paralelo- Serie, tiene al igual que el vehículo paralelo, un sistema de acople que recoge la energía del motor eléctrico y del motor a combustión, pero a diferencia de este, posee un generador eléctrico por el cual el motor a combustión puede ser usado para suministrar energía al motor eléctrico.

El presente trabajo desarrolla modelos de simulación, que permiten observar el comportamiento de cada una de las arquitecturas de los VEH bajo un ciclo de conducción de referencia. Esto se logró haciendo una revisión bibliográfica, proponiendo métodos de gestión de energía y usando la Representación Energética Macroscópica (REM).

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, Director Dr. Javier Solano Martínez.

## ABSTRACT

**TITLE:** MODELING AND SIMULATION OF HYBRID VEHICLES USING MATLAB SIMULINK ARCHITECTURES: SERIES, PARALLEL AND SERIES-PARALLEL.\*

**AUTHORS:**

EDINSON ALEXANDER CAMPOS RUEDA

DAVID ALBERTO CHACON REÁTIGA\*\*

**KEYWORDS:** ENERGY REPRESENTATION MACROSCOPIC, STATE OF CHARGE, POWER MANAGEMENT, CONTROL, SYSTEMS MULTI-PHYSICS.

**DESCRIPTION:** Hybrid Electric Vehicles (HEV), have better performance compared to conventional vehicles, and its development aimed at increasing distances and the autonomy of journeys compared to an electric vehicle. Depending on the various configurations, HEV can be classified as: Series, Parallel and Series-Parallel.

In the VEH series, all the traction is provided by an electric motor, which is regulated by power electronics, it taking power from a DC bus with multiple sources connected (e.g. fuel cells, batteries, generators).

The VEH have parallel coupled to the wheel axle, a system that distributes mechanical power supplied by a thermal engine and the electric machine with its respective power sources and power control. In this configuration the two systems can work simultaneously or separately and only needs an electric machine.

Series-Parallel configuration, having as the vehicle parallel, a coupling system that collects the energy of the electric motor and the combustion engine, but unlike this, has an electrical generator by which the combustion engine can be used to power the electric motor.

This paper develops simulation models for observing the behavior of each of the architectures HEV under a reference driving cycle. This was achieved by a literature review, proposing energy management methods and using Energy Macroscopic Representation (EMR).

---

\* Degree Work

\*\* Faculty of Physico-Mechanical Engineering. School of Electric, Electronic and Telecommunications Engineering. Director Dr. Javier Solano Martínez.

## INTRODUCCIÓN

### MOTIVACIÓN

Los Vehículos eléctricos híbridos son un caso particular de micro-redes, pues en estos se integran múltiples fuentes de energía, cargas y tienen límites definidos; además un VEH puede proveer y almacenar energía en una red mayor. Este trabajo contribuye con modelos de simulación que se pueden articular con otros proyectos desarrollados para micro-redes, como son investigaciones en baterías, motores, electrónica de potencia y algoritmos de gestión energética entre otros. Ejemplos de estos proyectos son los desarrollados por el grupo GISEL de la E3T para la construcción de un laboratorio de integración energética y micro-redes en las instalaciones del Parque Tecnológico Guatiguará, y los avances de la compañía ESSA EPM para la puesta en marcha de una estación de recarga piloto.

### TEMÁTICA

El trabajo se desarrolla mediante Matlab-Simulink. Esta es una herramienta capaz de realizar cálculos de variables físicas que cambian en el tiempo en sistemas con distintas fuentes; en esta herramienta se aplicó el formalismo REM (Representación Energética Macroscópica) para representar los componentes y las configuraciones de los VEH.

Debido a que los VEH cuentan con más de una fuente de energía, los componentes internos pueden conectarse de diferentes maneras para llevar energía mecánica hacia las ruedas; los VEH pueden clasificarse como: Serie, Paralelo y Serie-Paralelo [1].

Para las diferentes arquitecturas de los vehículos, las simulaciones constaron de dos partes fundamentales: el sistema físico (REM) y el circuito de control.

El sistema físico que está compuesto de: fuentes de energía, ya sean eléctricas (baterías, celdas de combustibles y supercondensadores) o mecánicas (motores a combustión, Par resistente de frenos); convertidores que controlan la tensión que recibe una máquina eléctrica o la corriente de entrada a un bus DC, cajas de velocidades, diferenciales que transmiten la energía a las ruedas y al chasis del vehículo [2].

El sistema de control se basa en el principio de inversión de la REM, que consta en la inversión directa del modelo físico, excepto para aquellos elementos que son temporalmente dependientes, en los cuales se usan circuitos controladores P, PI ó PID según la forma de la respuesta necesaria [2].

El presente trabajo se puede resumir de la siguiente manera:

En el Capítulo 1 se presenta una breve reseña historia de los Vehículos eléctricos híbridos y su panorama en Colombia, una explicación general sobre las arquitecturas de los VEH basada en las referencias bibliográficas consultadas, y una introducción a los ciclos de conducción estándar para prueba de vehículos y el motivo por el cual se usaron en este trabajo.

En el Capítulo 2 se exponen los fundamentos básicos del formalismo de representación REM (Representación Energética Macroscópica), y se detallan cada uno de los componentes o pictogramas correspondientes para construir un esquema del sistema.

El Capítulo 3 explica para cada una de las arquitecturas, la construcción de los modelos de los VEH partiendo del desarrollo de un modelo para el Vehículo Eléctrico (VE), y las ecuaciones y algoritmos usados para la gestión de energía.

En el capítulo final se exhiben y discuten resultados de simulación para diferentes arquitecturas y ciclos de conducción, se muestran las consideraciones que tuvieron lugar, las observaciones durante la realización del trabajo y las conclusiones a las que se llegó, también se añaden comentarios para facilitar posibles proyectos, que se piensen acoplar con este.

## 1. MARCO TEÓRICO

### 1.1 HISTORIA DE LOS VEH Y PANORAMA ACTUAL

Los antecedentes de los VEH se remontan a 1905, año en el cual se lanza la primera patente de este tipo de vehículos. Sin embargo solo hasta la década de los años sesenta, cuando el congreso de Estados Unidos recomienda el uso de Vehículos Eléctricos como forma de reducir el impacto ambiental, la industria automotriz comienza a moverse en el desarrollo de las maquinas híbridas. Posteriormente en 1969 la General Motors lanza su primer prototipo XP512 que solo se consideró como una demostración tecnológica; desde entonces los VEH han evolucionado con patentes de Victor Wouk, y en 1997 el VEH comercial se hace realidad con el Prius de Toyota que fue todo un éxito [4].

En Colombia el panorama de los VEH no es muy alentador, pues su masificación aun no es visible, esto es debido a que su costo aún es muy elevado con respecto a los vehículos convencionales. Solo hasta diciembre de 2013 el Gobierno Nacional firma el decreto 2909, una medida que establece que los VEH pueden ser importados pagando un 5% de arancel y con un contingente anual de importación de 750 unidades bajo ciertas restricciones especiales. A pesar de esta situación, la empresa Praco Didacol adelanta pruebas de camiones Diesel/Eléctricos de la marca HINO [5].

Los VEH son una alternativa de inversión para todas empresas del sector transporte, las cuales pueden recuperar lo invertido en una flota que incluya VEH con el dinero ahorrado en combustible. Uno de los pocos ejemplos vistos en Colombia es en el caso de los 200 híbridos de la marca Volvo que hacen parte del sistema de transporte integrado de Bogotá y que se encuentran en pleno funcionamiento [5].

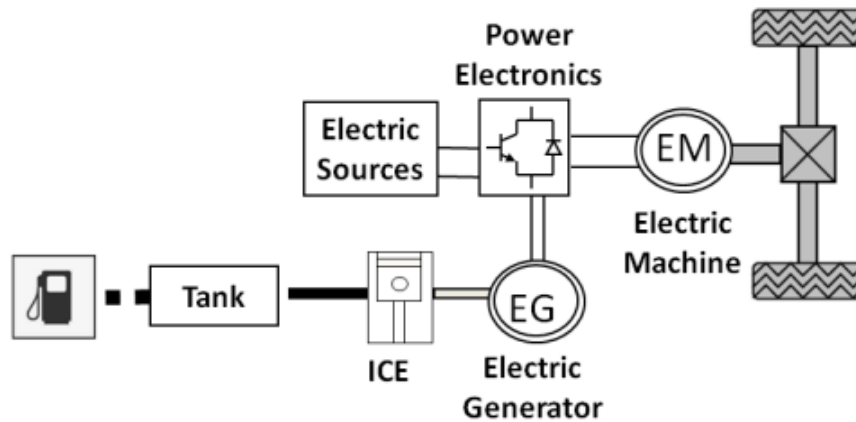
## 1.2 TIPOS DE VEH

La configuración de un vehículo híbrido depende de la disposición de los elementos que lo componen, por lo tanto se pueden clasificar en híbridos serie, paralelo y Paralelo-Serie.

Los vehículos serie se caracterizan, por tener múltiples fuentes de energía conectadas a una red eléctrica. Para este trabajo se considera un motor de combustión interna (ICE Internal Combustion Engine) que está acoplado a un generador eléctrico, el nivel de tensión de salida del generador es controlado por un convertidor DC/DC que junto con una batería distribuyen energía al vehículo a través de un bus DC **[1]**, el diagrama se muestra en la figura 1

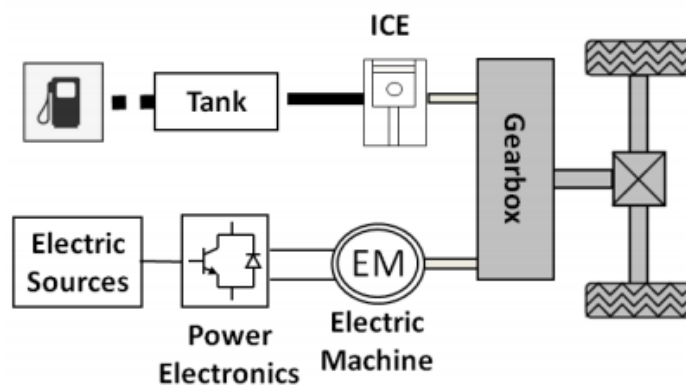
El generador se utiliza principalmente como un amplificador de prestaciones, por lo que en la mayoría de los kilómetros se circula con las baterías. Cuando la duración del viaje excede a las prestaciones de la batería, el dispositivo generador se enciende **[16]**.

**Figura 1. Arquitectura del Vehículo Híbrido Serie. [1]**



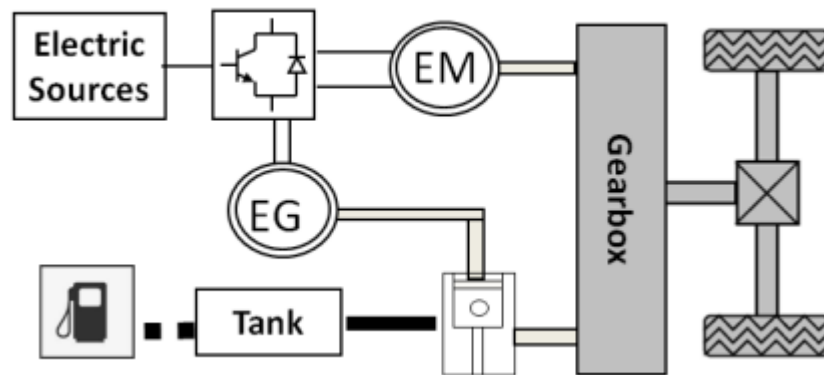
En la arquitectura paralelo la máquina eléctrica y el ICE están acoplados a la caja de cambios usando una transmisión mecánica [1], figura 2. Este método evita las pérdidas inherentes a la conversión de energía mecánica en eléctrica que se da en los híbridos en serie. Además como los picos de demanda de potencia le corresponden al motor de combustión interna, las baterías pueden ser mucho más pequeñas [16].

**Figura 1. Arquitectura del Vehículo Híbrido Paralelo. [1]**



La arquitectura Paralelo - Serie combina las ventajas de los sistemas anteriores y es la más utilizada por los fabricantes de automóviles como en el caso del Toyota Prius [10], aquí el motor de combustión puede ser usado para la propulsión del automóvil o como suministro de energía a la batería [1] figura 3.

**Figura 2. Arquitectura del Vehículo Híbrido Serie-Paralelo. [1]**



### 1.3 CICLOS DE CONDUCCIÓN

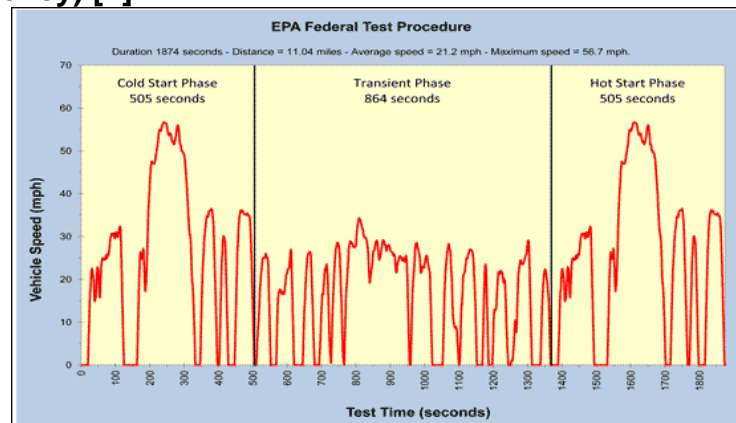
En todos los modelos, la operación está programada para emular la velocidad que el conductor desea establecer al vehículo con el pedal del acelerador, a esto lo llamamos velocidad de referencia. Esta referencia se acopla al lazo de control el cual establece las variables sobre las partes del vehículo y se obtiene como resultado una velocidad de respuesta.

**Figura 3. Prueba de emisiones en vehículos ligeros [7].**

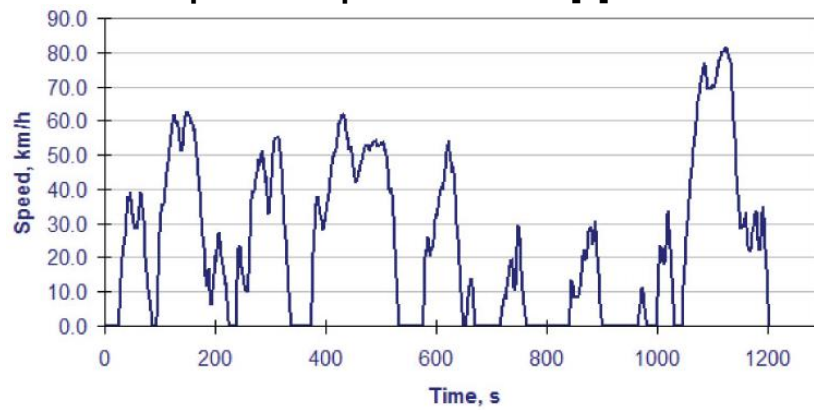


En el presente trabajo se ha decidido usar ciclos de conducción normalizados como la velocidad de referencia para las simulaciones. Estos ciclos son creados por agencias gubernamentales de países que desarrollan automotores, como parte de estándares que permitan medir las emisiones de gases contaminantes en modelos nuevos y vehículos usados. Para estas pruebas el vehículo es conducido en el laboratorio sobre dinamómetros de rodillo, que simulan la velocidad y resistencia de un camino real [7]; aunque también existen pruebas sobre la carretera que dan la opción de evaluar en curvas y pendientes. Los ciclos de conducción más reconocidos se presentan en las siguientes figuras.

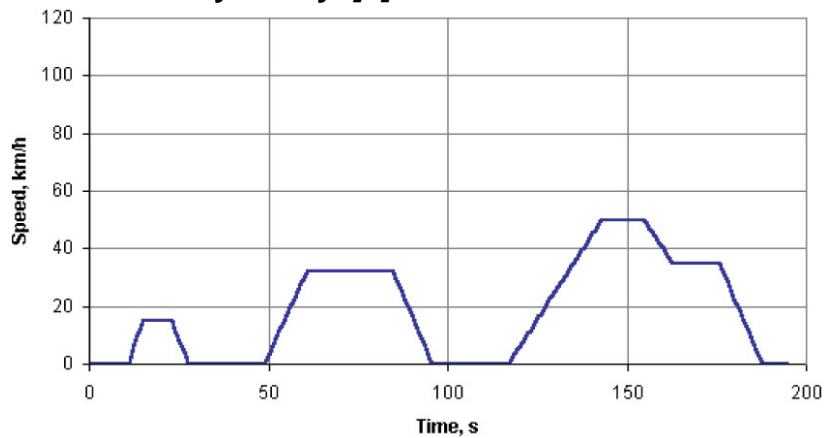
**Figura 4. FTP-75 ciclo de prueba de EPA (United States Environmental Protection Agency) [7]**



**Figura 5. JC08 Ciclo de prueba Japonés de 2005 [8]**

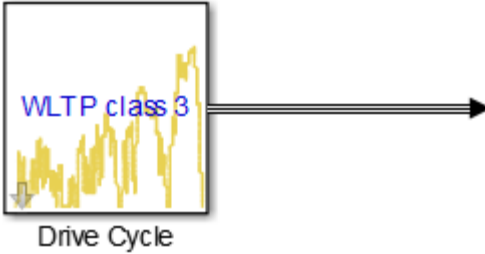


**Figura 6. ECE 15 ciclo de conducción urbano europeo de The European Union Automotive Fuel Economy Policy [8].**



Los datos usados para las simulaciones, se pueden descargar de la librería disponible en [9].

**Figura 7 . Vista del bloque Drive Cycle dentro de Simulink. La salida tiene tres vectores con desplazamiento, velocidad y aceleración para cada ciclo de conducción [9].**



## 2. MODELADO, REPRESENTACIÓN Y CONTROL

### 2.1 REM (REPRESENTACIÓN ENERGÉTICA MACROSCÓPICA)

Para efectos del presente trabajo, se empleará el software Matlab Simulink y el formalismo de Representación Energética Macroscópica (REM), el cual es una técnica desarrollada en la universidad de Lille en Francia en el 2000, para facilitar los estudios de sistemas electromecánicos como maquinas eléctricas o VEH. Este mecanismo para describir gráficamente los sistemas mencionados, habilita el modo de unificar las descripciones causales de los diferentes sistemas electromecánicos [2]. La REM ofrece grandes ventajas para deducir las estructuras de control con sus reglas de inversión, y es fácilmente implementada mediante el software comercial Matlab Simulink [6].

La representación energética macroscópica está compuesta de cuatro etapas:

1. Representación.
2. Inversión de la representación.
3. Medir, ajustar, Simplificar y estimar.
4. Desarrollar estrategias de control. [1]

La REM se fundamenta en tres principios básicos: el principio de la interacción, el principio de la causalidad y el principio de la invertibilidad [2].

**2.1.1 Principio de la Interacción.** El sistema de representación macroscópica se puede representar mediante cuatro elementos básicos:

Fuentes de energía.

1. Elementos de acumulación
2. Elementos de conversión sin acumulación de energía

### 3. Elementos de acoplamiento para distribución de la energía

Todos estos elementos funcionan bajo el principio de acción reacción y se interconectan mediante flechas, estas conexiones representan el intercambio de energía [2].

**2.1.2 Principio de la Causalidad.** Para la REM solo se considera la causalidad integral, esta propiedad sirve para definir elementos de acumulación, de variables que tengan una relación tiempo-dependencia entre ellas, en cada una de sus salidas como una función integral de sus entradas, otros elementos son descritos sin usar relaciones dependientes del tiempo. Con el fin de respetar la causalidad integral se han diseñado reglas específicas de asociación [2].

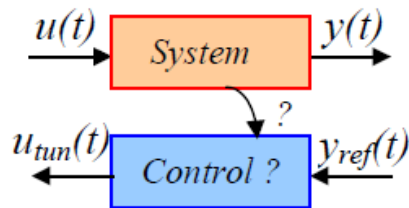
**2.1.3 Principio de Inversión.** En la teoría de control, se busca que la salida del sistema mantenga una relación con una entrada de referencia y se pretende que la diferencia entre ellas se use como medio de control [11]. Esto también sucede con la REM, en la cual la estructura de control (pictogramas azules) tiene que definir las entradas apropiadas al sistema teniendo en cuenta la salida deseada o referencia; es por esto que el esquema de control se puede considerar como un modelo de inversión como se muestra en la figura 2.1 [2].

Para la REM existen dos reglas básicas de inversión:

1. Los elementos de conversión sin acumulación de energía se invierten directamente.
2. Los elementos de acumulación se invierten usando lazos cerrados de control, es una inversión indirecta hecha con controladores y medidas del sistema. Esto se debe a que el principio de causalidad impide una inversión directa de las relaciones que dependen del tiempo.

Esta metodología de inversión es una forma para localizar controladores, instrumentos de medida o métodos de estimación para cuando la medida en la práctica pueda resultar costosa [2].

**Figura 9 . Control mediante el principio de inversión [2]**

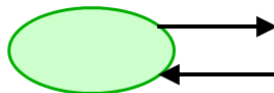


## 2.2 ELEMENTOS DE LA REM

A continuación se presenten los elementos de la Representación Energética Macroscópica, para el desarrollo de las simulaciones de las diferentes configuraciones de los vehículos (eléctrico e híbridos) y algunos otros elementos que también forman parte del sistema básico de la REM.

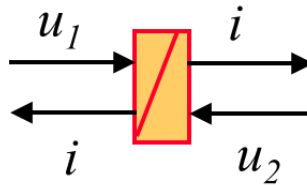
**2.2.1 Fuentes de Energía.** En este sistema se presenta las fuentes de energía mediante un ovalo de color verde, pueden ser fuentes tales como energía solar, eólica o hidráulica o como en el caso de este proyecto: baterías y motores de combustión, en la figura 10 se muestra este componente.

**Figura 10. Representación de fuente de energía.**



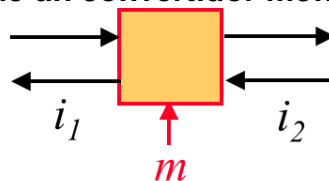
**2.2.2 Elementos de Acumulación.** Son usados para representar elementos que acumulen energía de algún tipo, se consideran elementos de acumulación tales como bobinas, capacitores, volantes de inercia, resortes, entre otros. Estos componentes se representan mediante un rectángulo con una línea diagonal en medio de color naranja figura 11.

**Figura 11. Representación de elemento de acumulación.**



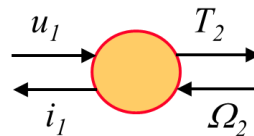
**2.2.3 Elementos de Conversión Mono-Físico.** Este elemento representa los cambios que se hacen de un sistema físico al mismo sistema físico como pueden ser cambios de tipos mecánicos, eléctricos, térmicos entre otros, por ejemplo hacer cambios de señales DC a DC o cambios de par a fuerza o frecuencia angular. Algunos de estos dispositivos son transformadores, electrónica de potencia, cajas de velocidades. El elemento que simboliza estas conversiones se representa mediante un cuadrado naranja figura 12.

**Figura 12. Representación de un convertidor mono-físico.**



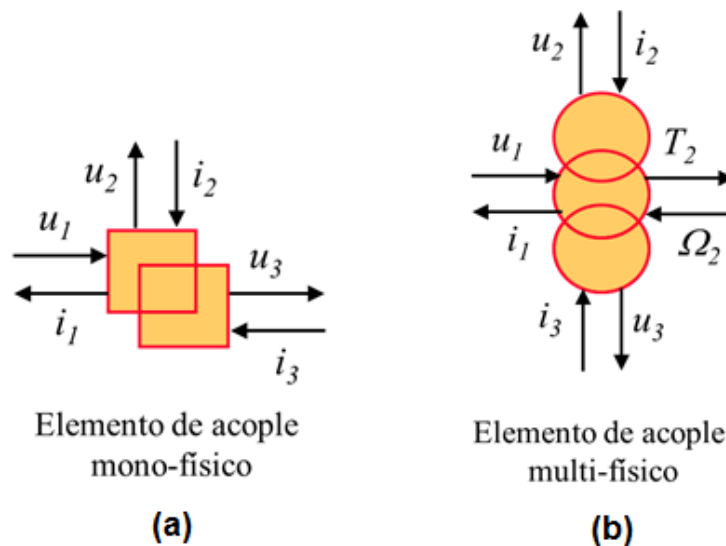
**2.2.4 Elementos De Conversión Multi-Físico.** Son usados para representar la conversión de un tipo de energía a otro como puede ser mecánica a eléctrica (en un generador eléctrico), eléctrica a mecánica (motor eléctrico), eléctrica a térmica (calefactor por resistencias), etc. Se representaron por medio de un círculo naranja figura 13.

**Figura 13. Representación de un convertidor multi-físico.**



**2.2.5 Elementos De Acoplamiento.** Tanto el elemento de acople mono-físico como el multi-físico se usan para la distribución de la energía, en el sistema macroscópico se diferencian como su nombre lo indica en que el multi-físico maneja diversos tipos de energía. Los elementos mono-físicos se representan mediante cuadrados entrelazados figura 14 (a). Y los multi-físicos con representados mediante círculos entrelazados figura 14 (b). Sirven como ejemplo el Bus DC y el diferencial.

**Figura 14. Representación elementos de acople: figura X (a) mono-físico, figura (b) multi-físico.**





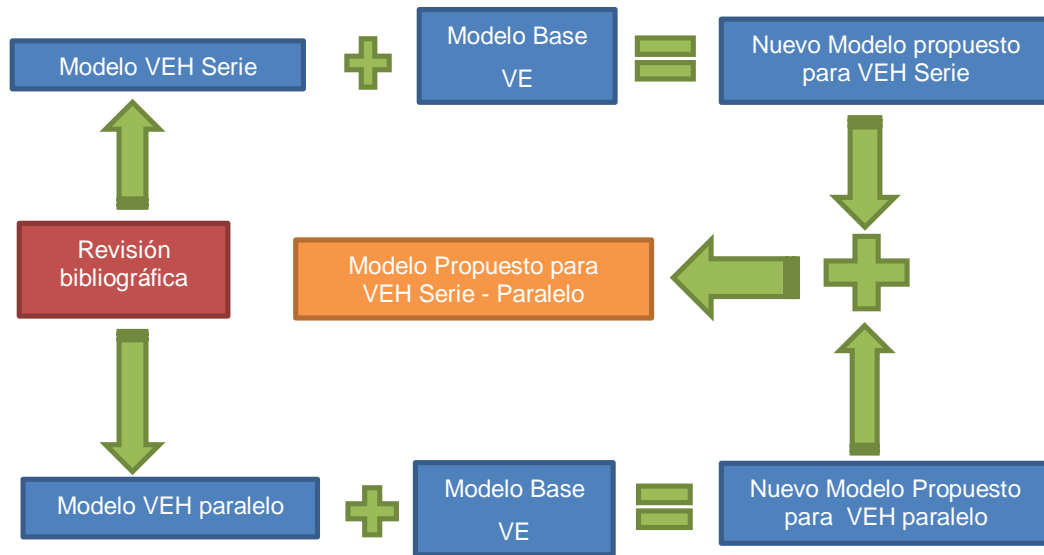
### **3. MODELADO DE LAS ARQUITECTURAS DE LOS VEHÍCULOS HÍBRIDOS**

#### **METODOLOGÍA DE TRABAJO**

Para el desarrollo de esta sección se usó la siguiente metodología: Como primera instancia se realizó una revisión bibliográfica de modelos ya existentes con la técnica de REM para las configuraciones Serie y Paralelo, se escogieron convenientemente dos referencias [14] y [12].

En un segundo paso, se realizó una adaptación de los modelos consultados con el modelo del Vehículo Eléctrico basado en [2]. En el caso del Vehículo Serie se optó por proponer una nueva estrategia de gestión de energía y un rediseño del circuito de control, con el ánimo de sacar el mejor provecho del modelo de batería implementada. Para el vehículo paralelo se simplificó el modelo del motor de combustión, y se decidió no considerar el embrague, ya el mismo autor consultado sugiere que puede desprejarse en condiciones similares a la que se usaron en este trabajo. En el último paso se usaron los resultados anteriores para combinarlos y obtener un modelo de la arquitectura Paralelo - Serie.

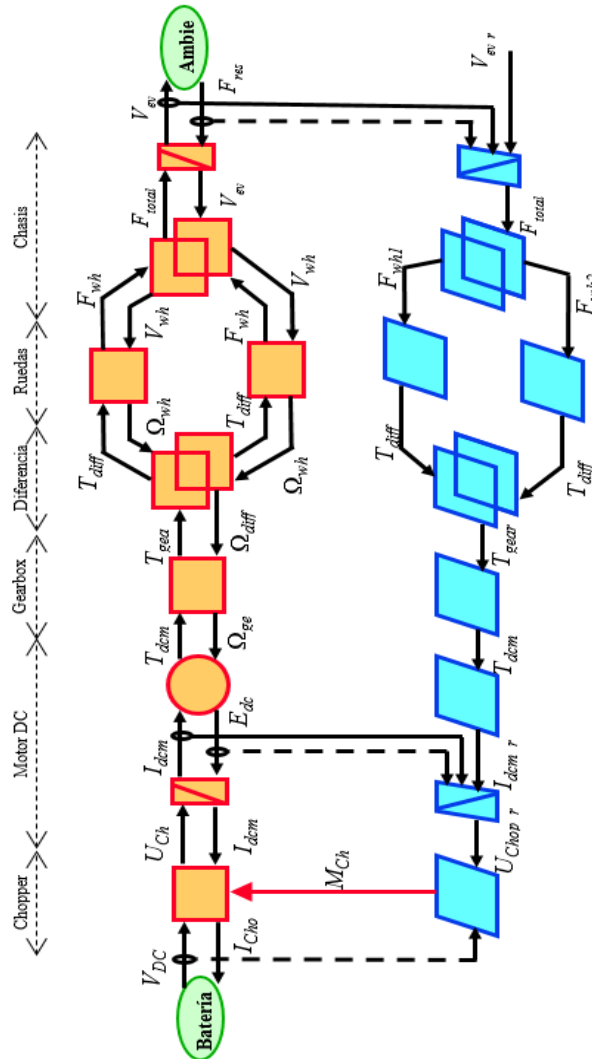
**Figura 16 Esquema de la Metodología de trabajo Implementada**



### 3.1 VEHÍCULO ELÉCTRICO (VE)

En nuestro trabajo a pesar de que se trata de modelar las arquitecturas de vehículos híbridos, se decidió empezar por desarrollar el vehículo eléctrico aunque no conste de un motor a combustión, la razón principal es que el vehículo eléctrico es la base de las tres arquitecturas, ya que los híbridos contiene los siguientes elementos: Batería, electrónica de potencia (e.g Convertidor DC/DC o Variadores de Frecuencia), Máquinas eléctricas, caja de cambios, diferencial, ruedas, chasis, el medio ambiente y el sistema de control figura 17

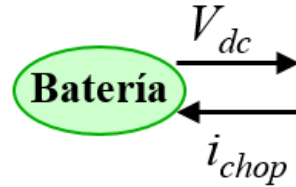
Figura 17. Representación y control del Vehículo Eléctrico.



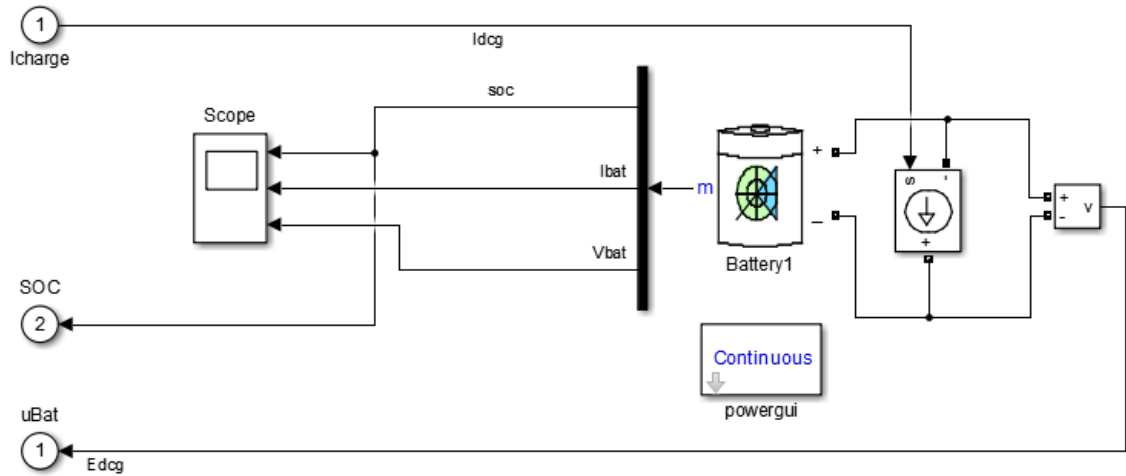
**3.1.1 Batería.** Fue tomada de la librería Simscape disponible en la suite de Simulink, la cual simula los tipos de baterías más populares como: plomo-Acido, Ion-Litio, níquel-cadmio y níquel-metal hidruro. El bloque está diseñado para trabajar con valores de placa de baterías reales, entre los que destacan tensión nominal en volts, capacidad en Ah y estado de carga inicial (SOC) en porcentaje.

La batería se representa como una fuente externa de energía con el pictograma que se muestra en la figura 18. El contenido de este bloque se detalla en la figura 19.

**Figura 18. Batería ilustrada mediante REM (Elemento fuente)**



**Figura 19. Conexión del bloque de Batería.**

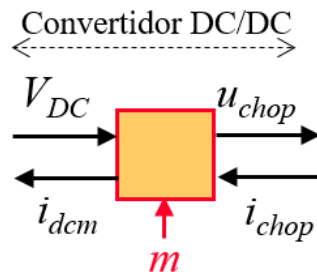


**3.1.2 Convertidor DC/DC.** El convertidor (chopper), permite transformar la potencia de corriente continua, se usa para acoplar las señales de tensión y corriente entre dos sistemas de DC, la conversión de energía se da respondiendo a una señal de control que puede variar en un ciclo de trabajo que se llamó  $m_{chop}$ . El convertidor recibe la corriente proveniente del elemento de acumulación (Bobina)  $i_{dcm}$  y la tensión que le impone la fuente, está a su vez proporciona tensión a la bobina y corriente que regresa a la batería.

$$u_{chop} = m_{chop} * v_{dc} \quad (3.1)$$

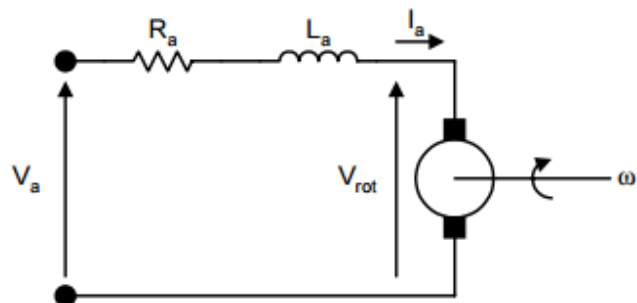
$$i_{chop} = m_{chop} * i_{chop} \quad (3.2)$$

**Figura 20. Elemento de conversión mono-físico que representa el convertidor DC/DC.**



**3.1.3 Motor Eléctrico.** El VE considerado está compuesto por un motor de DC que se encarga de suministrar energía mecánica a la caja de cambios, a su vez el motor recibe una tensión impuesta por el convertidor DC/DC. Para este proyecto se tomó el sencillo modelo del motor de imanes permanentes figura 21. Para representar una máquina de corriente directa es necesario descomponerla en dos elementos distintos, el primero es un acumulador de energía que representa el devanado del motor y un elemento de conversión multi-físico que describe la transformación de energía eléctrica en mecánica.

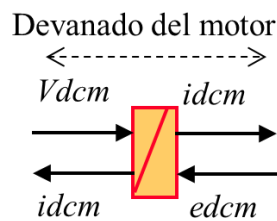
Figura 21. Modelo de motor DC de Imanes Permanentes



**3.1.3.1 Elemento de Acumulación de Energía.** El bobinado del motor, tiene una inductancia  $L_{ind}$  y una resistencia  $R_{ind}$ , la corriente que resulta del proceso de inducción es requerida por el elemento de conversión multi-físico del motor DC y el convertidor DC/DC y el componente de inversión de la bobina misma. La ecuación 3.3 describe el comportamiento del devanado.

$$L_{arm} \frac{d}{dt} i_{dcm} = V_{dcm} - e_{dcm} - R_{arm} i_{dcm} \quad (3.3)$$

Figura 22. Elemento de conversión multi-físico que representa el bobinado del motor DC.

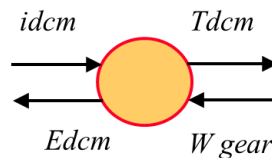


**3.1.3.2 Convertidor Multi-Físico del Motor DC.** Este convertidor es el encargado de transformar la energía eléctrica en mecánica, y proporciona par directamente a la caja de cambios  $T_{dcm}$ , básicamente toma la corriente proveniente del elemento de acumulación y la frecuencia angular proporcionada por la misma caja de cambios y al multiplicarlas por una constante  $k_{mcc}$  (coeficiente de torque de la conversión electromecánica) produce el par mencionado y una tensión  $e_{dcm}$  que se usa en el cálculo de la corriente en el elemento de acumulación.

$$T_{dcm} = k_{mcc} * I_{dcm} \quad (3.4)$$

$$e_{dcm} = k_{mcc} * W_{gear} \quad (3.5)$$

**Figura 23. Elemento de conversión multifísico que simboliza la transformación de energía eléctrica a mecánica.**

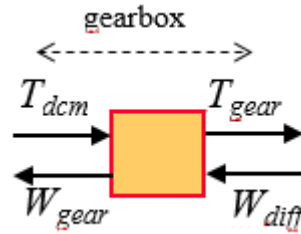


**3.1.4 Caja de Cambios.** La caja de cambios puede modelarse como un elemento convertidor de energía el cual recibe un torque del motor eléctrico ( $T_{dcm}$ ) y una velocidad angular proveniente del diferencial ( $W_{diff}$ ), y esta a su vez produce un torque  $T_{gear}$  y una velocidad  $W_{gear}$  al pasar a través de la relación de reducción de la caja ( $R_{red}$ ).

$$T_{gear} = R_{red} * T_{dcm} \quad (3.6)$$

$$W_{gear} = R_{red} * W_{diff} \quad (3.7)$$

**Figura 24. Representación de la caja de cambios.**

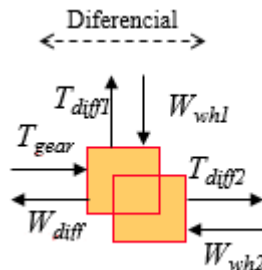


**3.1.5 Diferencial.** El diferencial se modela como un elemento de acoplamiento mono-físico que recurre al torque que le transmite la caja de cambios ( $T_{diff}$ ) y las velocidades de ambas ruedas ( $W_{wh1}$  y  $W_{wh2}$ ), para producir el torque necesario en las llantas, en nuestro caso ya que se simuló rutas completamente rectas el valor de torque se transmite equitativamente en que cada rueda por lo que ambas corresponde la mitad del torque que el diferencial proporciona.

$$T_{diff1} = T_{diff2} = \frac{1}{2} T_{gear} \quad (3.8)$$

$$W_{diff} = \frac{W_{wh1} + W_{wh2}}{2} \quad (3.9)$$

**Figura 25. Representación del diferencial.**

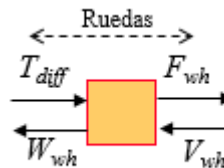


**3.1.6 Ruedas.** Las ruedas del vehículo proporcionan tracción con respecto al medio donde este se desplace, estas serán representadas como elementos de conversión mono-físicos ya que convertirán el par proporcionado por el diferencial y la velocidad proveniente del chasis en fuerza que impulsa al vehículo de acuerdo a las ecuaciones 3.10 y 3.11, donde  $R_r$  es el radio de las ruedas

$$F_{wh1} = 1/R_r * T_{diff} \quad (3.10)$$

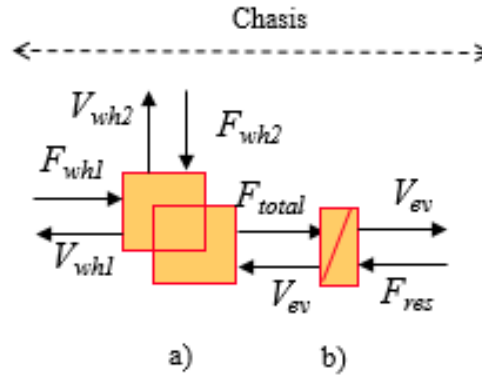
$$W_{wh} = 1/R_r * V_{wh} \quad (3.11)$$

**Figura 26. Representación de las ruedas mediante un elemento de conversión mono-física.**



**3.1.7 Chasis.** El chasis de un automóvil es aquella parte del vehículo en la que reposan los pasajeros, la carga, la carrocería y los elementos de potencia; por esto se modela el chasis con la ecuación 3.16, donde  $M$  es la masa total del vehículo y  $F_{res}$  es la fuerza resistente proveniente del medio ambiente. Puesto que también se encarga de convertir la fuerza proporcionada por las ruedas en velocidad, es necesario modelar la carrocería en dos elementos, un elemento de acople mono-físico y un elemento de acumulación de energía.

Figura 27. Representación del chasis a) acoplamiento mono-físico. b) elemento acumulador de energía.



$$V_{wh1} = \frac{R_{curv} + l_{ev}/2}{R_{curv}} V_{ev} \quad (3.12)$$

$$V_{wh2} = \frac{R_{curv} - l_{ev}/2}{R_{curv}} V_{ev} \quad (3.13)$$

$$F_{total} = F_{wh1} + F_{wh2} \quad (3.14)$$

Donde el  **$R_{curv}$**  es el radio de curvatura de posibles giros del vehículo y la constante  **$l_{ev}$**  representa el ancho del vehículo, pero tomando en cuenta que las simulaciones realizadas, se simula una línea recta durante todo el recorrido las ecuaciones se simplifican así:

$$V_{wh1} = V_{wh2} = V_{ev} \quad (3.15)$$

$$M \frac{d}{dt} V_{ev} = F_{total} - F_{res} \quad (3.16)$$

**3.1.8 Ambiente.** El medio ambiente es el que ofrece la resistencia posible al vehículo y se representa como una fuente de energía que proporciona una fuerza de resistencia  $F_{res}$ , esta fuerza es de la forma:

$$F_{res} = F_o + aV_{ev} + bV_{ev}^2 + Mgsin \alpha \quad (3.17)$$

Donde  $F_o$  es la fuerza de rodamiento inicial,  $a$  coeficiente de rodamiento,  $b$  el coeficiente de arrastre,  $\alpha$  el ángulo de la pendiente y  $g$  la constante gravitatoria.

**3.1.9 Control** Se aplican las normas de inversión que se exponen en el capítulo 2 y como resultado se eligieron controladores proporcional-integrales (PI) para los elementos de acumulación del motor eléctrico y el chasis.

La ecuación 3.18 muestra la estructura de la inversión para el elemento de acumulación de chasis, la expresión **control()** hace referencia al resultado de aplicar el controlador PI seleccionado a la diferencia entre la velocidad medida en el vehículo y la velocidad de referencia. **Fres-med** es la fuerza resistente obtenida del ambiente

$$F_{total} = control(V_{ev\_med} - V_{ev\_ref}) + F_{res\_med} \quad (3.18)$$

A la inversión de la distribución del chasis se agregó un factor **Kd** que representa la distribución de la energía que se da en cada rueda y puede tener valores entre 0 y 1, en la simulación se usó un valor de 0.5 para indicar que la cantidad de energía se reparte igual en cada rueda, este modelo sigue las ecuaciones:

$$F_{wh1\_ref} = k_D F_{total\_ref} \quad (3.19)$$

$$F_{wh2\_ref} = (1 - k_D) F_{total\_ref} \quad (3.20)$$

La inversión de las ruedas es directa y se rige por:

$$T_{diff1\_ref} = R_r F_{wh1\_ref} \quad (3.21)$$

$$T_{diff2\_ref} = R_r F_{wh2\_ref} \quad (3.22)$$

El control del diferencial será la suma de los torques provenientes de cada una de las ruedas según la ecuación:

$$T_{gear\_ref} = T_{diff1\_ref} + T_{diff2\_ref} \quad (3.23)$$

La caja de cambios tiene una inversión directa de acuerdo a:

$$T_{dcm\_ref} = \frac{1}{R_{red}} * T_{gear\_ref} \quad (3.24)$$

La referencia de la corriente en el elemento de conversión de la máquina de DC es deducida de la inversión directa de la referencia del torque:

$$I_{dcm} = \frac{1}{k_{mcc}} * T_{dcm} \quad (3.25)$$

Debido a que el devanado de la máquina de DC es un elemento de acumulación, es imposible hacer una inversión directa, la tensión de chopper ***Uchop\_ref*** tiene

que deducirse a partir de un control PI de las corrientes de referencia y medida de la máquina misma según la ecuación:

$$U_{chop\_ref} = control(i_{dcm\_med} - i_{dcm\_ref}) + E_{dcm} \quad (3.26)$$

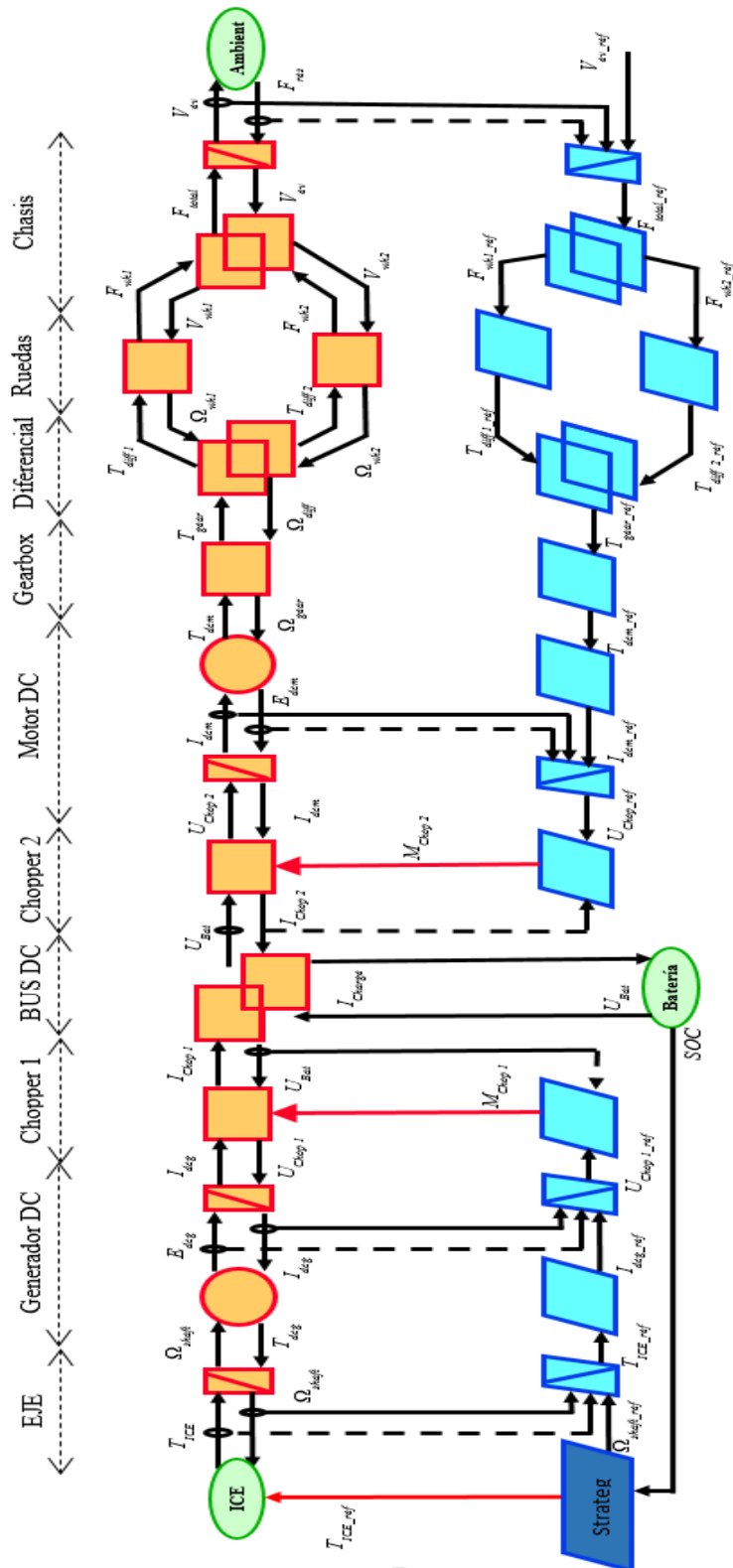
Por último el control se encarga de indicar el valor del ciclo de trabajo del convertidor DC/DC ***mchop***, se calcula mediante relación la tensión que provee la batería y la tensión ***Uchop\_ref***:

$$m_{chop} = (V_{dc}/U_{chop\_ref}) \quad (3.27)$$

### 3.2 VEH SERIE.

El vehículo serie considerado, posee todos los elementos del VE, pero se adiciona una máquina de combustión acoplada a un generador eléctrico mediante un eje. La tensión de salida del generador se acopla al Bus DC, gracias a un variador de tensión. También se le adicionó un bloque estratégico que se encarga de la gestión de energía, esto se visualiza en la figura 28.

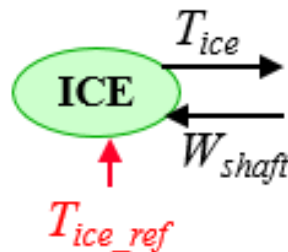
Figura 28. Representación y control de la arquitectura tipo serie.



**3.2.1 Motor de Combustión.** La caracterización de un motor a combustión es un proceso complejo que no se encuentra en el alcance de este trabajo, por lo que se modeló como una fuente controlada de energía ideal que suministra torque al generador por medio de un eje, el torque de salida es controlado por el bloque estratégico que le envía una señal  $T_{ice\_ref}$ , el diagrama se visualiza en la figura 29.

$$T_{ice} = T_{ice\_ref} \quad (3.28)$$

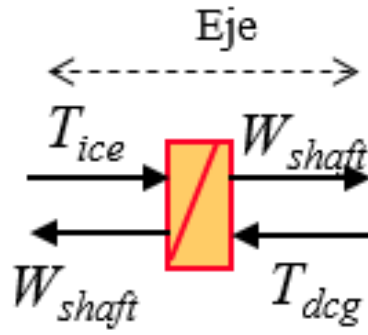
**Figura 29. Representación del motor a combustión.**



**3.2.2 Eje de Acople.** Es el encargado transmitir la energía del motor de combustión al generador eléctrico, como este presenta una inercia considerable fue necesario modelarlo. Se representó como un elemento de acumulación que recibe el torque de la máquina térmica y entrega velocidad angular a la máquina eléctrica, ecuación 3.29, donde  $J$  es el momento de inercia y  $f$  es el coeficiente de fricción del eje.

$$J \frac{dW_{shaft}}{dt} + f * W_{shaft} = T_{ice} - T_{dcg} \quad (3.29)$$

**Figura 27. Representación del eje de acople**



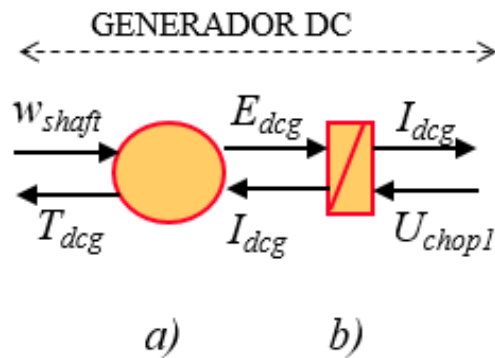
**3.2.3 Generador DC.** Para este modelo se consideró utilizar un Generador DC, sin embargo existen otras tecnologías, como generadores síncronos de imanes permanentes. En este caso, el generador DC recibe la velocidad angular proveída por el motor de combustión para transformarlo en energía eléctrica, el generador se representa de forma similar al motor DC como se muestra en la figura 28.

$$T_{dcg} = k_{fig} * I_{dcg} \quad (3.30)$$

$$E_{dcg} = k_{fig} * w_{shaft} \quad (3.31)$$

$$L_{dcg} \frac{dI_{dcg}}{dt} + R_{dcg} I_{dcg} = E_{dcg} - U_{chop1} \quad (3.32)$$

Figura 28. Representación de la máquina de dc a) elemento de conversión multi-físico. b) elemento acumulador de energía.

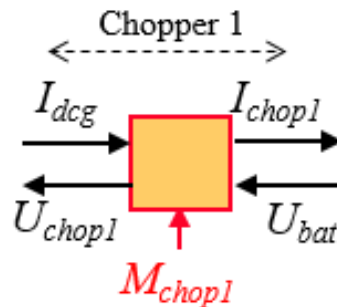


**3.2.4 Convertidor DC/DC 1.** El convertidor provee la corriente de carga al bus DC, este convertidor está diseñado para elevar o disminuir el nivel de corriente entrante al bus y la tensión de operación del generador, por medio del ciclo de trabajo proveniente del control, llamado  $M_{chop1}$ .

$$u_{chop1} = m_{chop1} * U_{bat} \quad (3.33)$$

$$i_{chop1} = m_{chop1} * i_{chop1} \quad (3.34)$$

Figura 29. Representación del convertidor DC-DC 1.

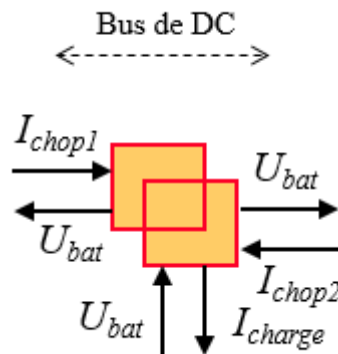


**3.2.5 bus de DC.** Con este elemento convergen los dos convertidores y la batería. Está diseñado para el paso de la corriente de la batería hacia el chopper 2 o del generador hacia la batería y al chopper 2, esto depende del estado de carga de la batería. En la realidad los buses de corriente directa tienen un límite de corriente, en nuestro caso este valor fue omitido y se consideró un bus de capacidad ilimitada. Como a este elemento convergen dos formas de energía del tipo eléctrico se representa mediante un elemento de acoplamiento mono-físico.

$$u_{bat} = U_{bat} = U_{bat} \quad (3.35)$$

$$i_{charge} = i_{chop2} - i_{chop1} \quad (3.36)$$

**Figura 30. REM del Bus DC.**



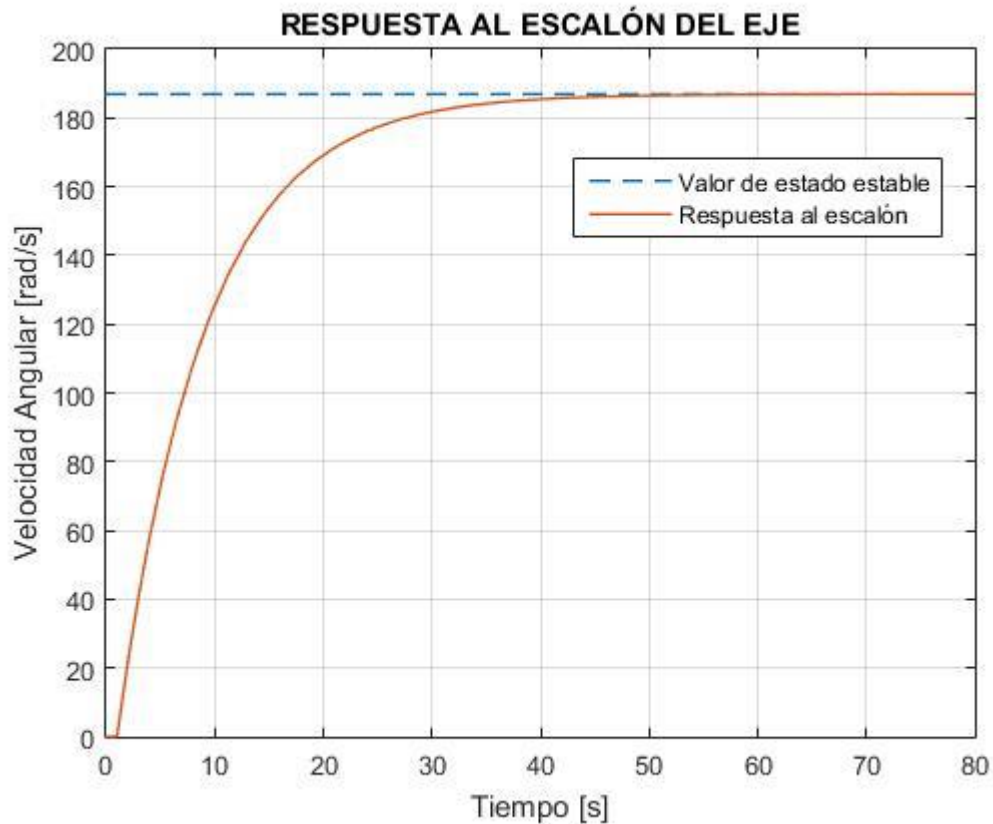
### 3.2.6 CONTROL

Ya que el elemento de acumulación del generador de DC y del eje de acople, se modelan mediante ecuaciones que tienen elementos que varían con respecto al tiempo, fue necesario aplicar controladores para obtener un valor estimado de las variables a invertir.

En pruebas preliminares utilizando señales de escalón en cada elemento, las respuestas no presentan un gran retraso con respecto a los valores esperados y tampoco una sobre-elongación de más del 10% obtenida en ambos casos. Se

enseñará solo la respuesta del eje, ya que este y el inducido del generador, son ecuaciones de primer orden y tienen comportamiento similar figura 31, por lo que se decide utilizar un controlador del tipo proporcional.

**Figura 31. Prueba preliminar del Eje de acople**



La inversión del convertidor, da como resultado el ciclo de trabajo ( **$M_{chop1}$** ), para esto es necesario dividir la tensión de referencia entre la tensión medida de la batería como se aprecia en la siguiente ecuación:

$$m_{chop1} = u_{chop1\_ref} / U_{bat\_m} \quad (3.37)$$

Para poder invertir el elemento de conversión del generador de DC fue necesario usar un control tipo P, usando la corriente y tensión medidas del generador, y la corriente de referencia obtenida de la inversión del elemento de conversión, obteniendo así la tensión de referencia del chopper 1.

$$u_{chop1\_ref} = control(i_{dcg\_ref} - i_{dcg\_med}) + E_{dcg\_m} \quad (3.38)$$

Una simple inversión del elemento de conversión mono-física mostrada en la ecuación 3.39, permite obtener la corriente de referencia del generador.

$$i_{dcg\_ref} = T_{dcg\_ref}/K_{fig} \quad (3.39)$$

La inversión del eje de acople se logró mediante el controlador ya mencionado tipo P midiendo la velocidad del eje y recibiendo la velocidad de referencia del bloque estratégico, a eso se le adiciona el torque proveniente del generador dc para obtener el torque de referencia ***T<sub>dcg\_ref</sub>***.

$$T_{dcg\_ref} = control(W_{shaft\_ref} - W_{shaft\_med}) + T_{dcg\_m} \quad (3.40)$$

**3.2.7 Bloque de Gestión de Energía.** En el capítulo 2 se mencionó que la metodología de la REM tiene una etapa final en la que se desarrollan estrategias de control, que para el caso de este trabajo se enfoca en cómo gestionar las fuentes de energía en el vehículo.

En esta etapa se establecen: Las entradas adicionales en la inversión de los elementos de acople para controlar la distribución de señales, referencias para las fuentes controladas y bloques de inversión indirecta, además de las señales de control sobre elementos de distribución.

Para el caso del híbrido serie, en el que toda a tracción es provista por una máquina eléctrica, se propone una operación que prolongue la vida útil de la batería, para lo cual se consideró evitar descargas profundas, sobrecargas y reducir el número de ciclos de recarga.

El bloque estratégico encenderá el motor de combustión interna con una señal de referencia caracterizada las ecuaciones 3.41 y 3.42, en el momento en que el estado de carga de la batería SOC (State Of Charge) sea inferior al 65%, y lo mantendrá en régimen constante hasta que la batería este completamente cargada.

$$T_{ICE\_ref} = T_n(1 - e^{-\frac{t*5}{T}}) \quad (3.41)$$

$$W_{ICE\_ref} = W_n(1 - e^{-\frac{t*5}{T}}) \quad (3.42)$$

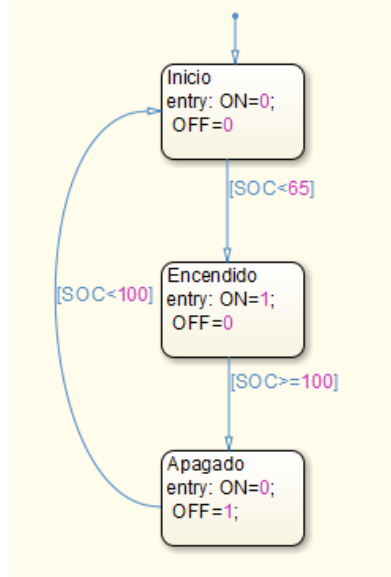
Una vez el estado de carga sea de 100% el bloque estratégico apagará la maquina térmica de forma similar al encendido, ecuaciones 3.43 y 3.44.

$$T_{ICE_{ref}} = T_n e^{-\frac{t*5}{T}} \quad (3.43)$$

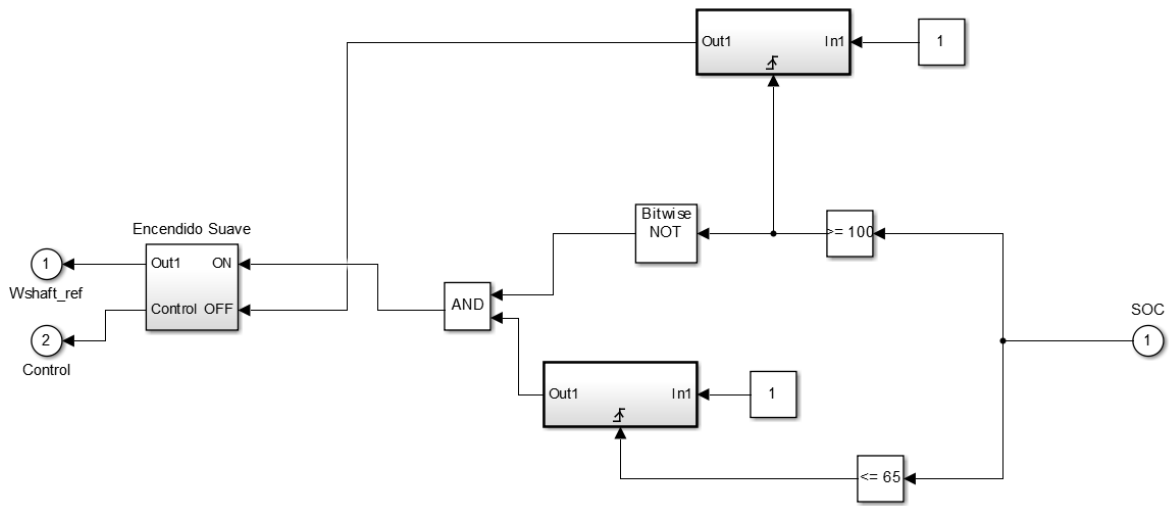
$$W_{ICE_{ref}} = W_n e^{-\frac{t*5}{T}} \quad (3.44)$$

Donde ***T<sub>n</sub>*** es el máximo torque que entrega el motor de combustión a la velocidad ***W<sub>n</sub>*** y ***T*** es el tiempo de establecimiento para llegar a este punto de operación. Este algoritmo se muestra en la figura 32.

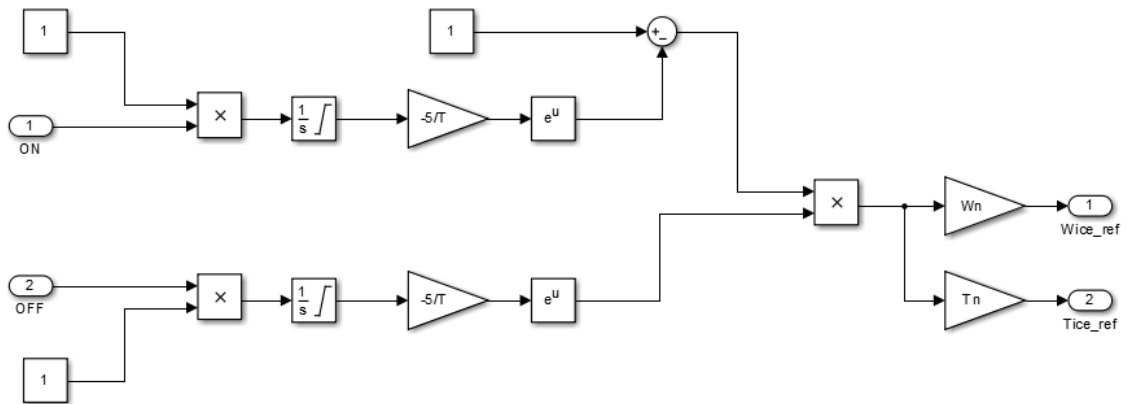
**Figura 32. Algoritmo de operación del bloque estratégico**



**Figura 33. Esquema en simulink del bloque estratégico del VEH Serie**



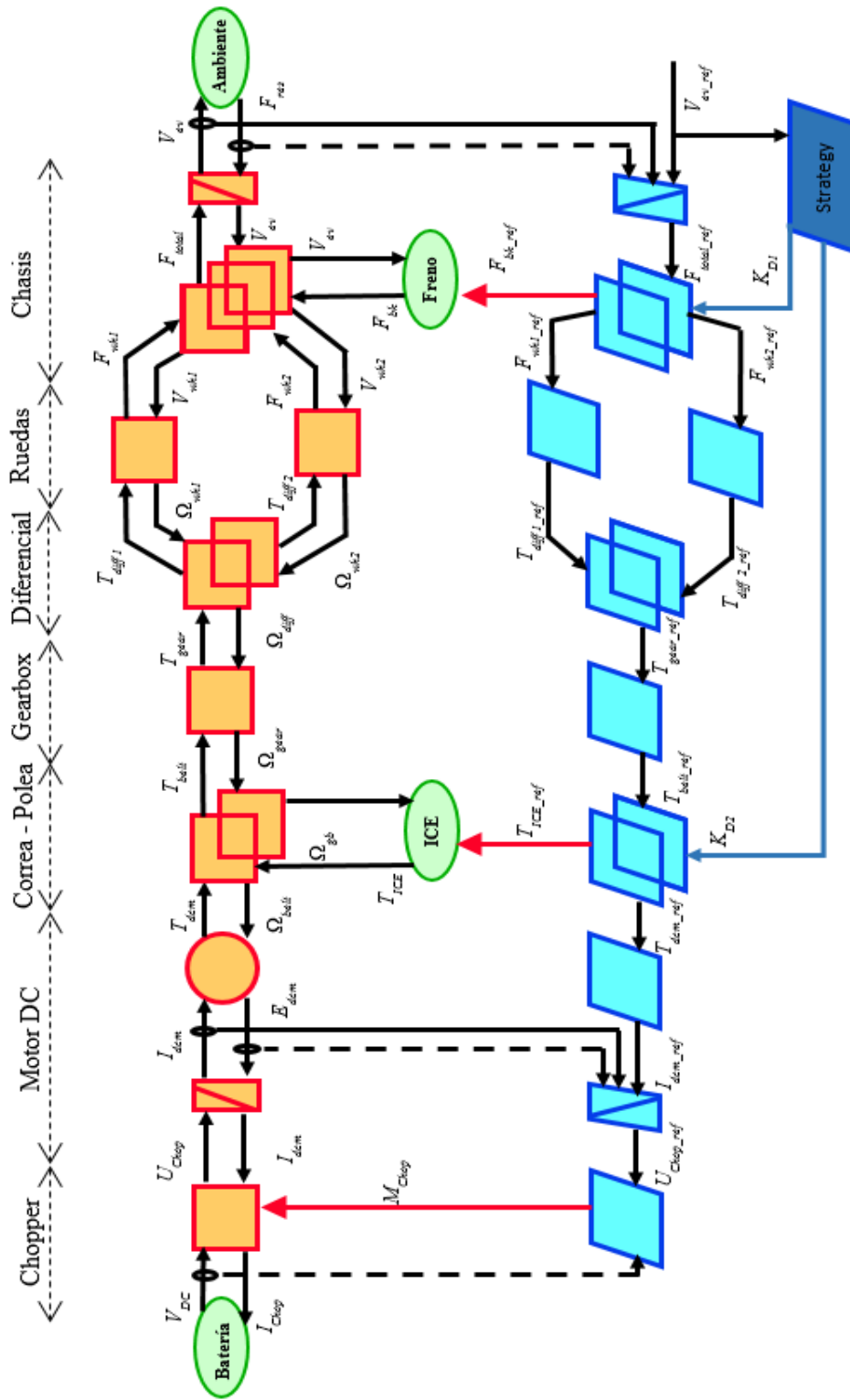
**Figura 34. Detalle del bloque Encendido Suave**



### **3.3 VEH PARALELO**

El diseño del vehículo paralelo es muy similar con el vehículo eléctrico en cuanto de la REM se habla, solo se le adicionará tres elementos nuevos los cuales son: el motor de combustión que se modela igual que el VEH serie, un elemento de acople entre el motor de DC y el motor de combustión, y un sistema de frenado mecánico que se representa como una fuente de energía ya que ofrece una fuerza resistente al movimiento en el chasis. La representación del chasis que se modela como un elemento de acople se ha modificado, ahora tendrá una cuarta entrada y salida que pertenecen al freno mecánico.

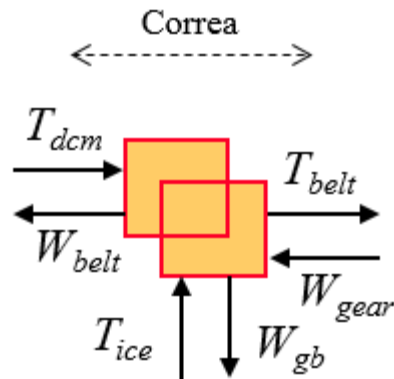
Figura 35. Representación y control de la arquitectura tipo Paralelo.



**3.3.1 Sistema de Correa.** En este elemento de acoplamiento fue diseñado para permitir el paso de la energía mecánica producida por el ICE o por el motor DC hacia la caja de cambios, es necesario mencionar que las posibles pérdidas que las correas puedan tener a causa de la elasticidad de las mismas, fueron despreciadas.

En un vehículo híbrido real se adiciona el elemento del embrague con el fin de desacoplar el movimiento de las ruedas al de los motores cuando sea necesario, una introducción al desarrollo de un modelo de esta pieza se presenta en el **anexo A.1**, el cual se recomienda introducir en el desarrollo de futuros trabajos que pretendan hacer de estos modelos más realistas.

**Figura 36. Representación del sistema de correa como elemento de acoplamiento.**



$$T_{belt} = k_{pb} * I_{dcm} + T_{ice} \quad (3.45)$$

$$W_{belt} = k_{pb} * w_{gear} \quad (3.46)$$

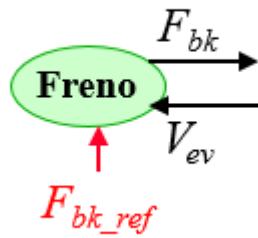
$$W_{gb} = w_{gear} \quad (3.47)$$

Donde  $k_{pb}$  es el radio de la correa.

**3.3.2 Freno.** El sistema de frenos es considerado como una fuente de energía disipativa que entrega una fuerza resistente al armazón del auto, se activa cuando la inversión del elemento de acople le envíe un señal de freno de referencia, en las simulaciones realizadas aunque es posible activar el freno con la señal  $F_{bk\_ref}$ , se considera mejor que el frenado se represente como una desaceleración suave en el ciclo de conducción.

$$F_{bk} = F_{bk\_ref} \quad (3.48)$$

**Figura37. Representación del sistema de frenos**

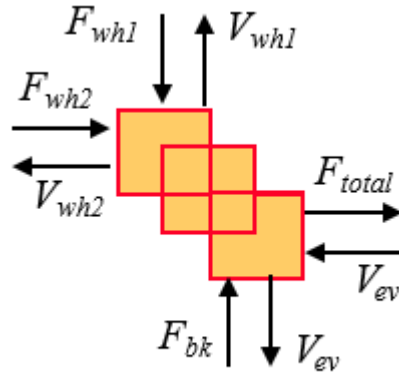


**3.3.3 Modificación del Acople del Chasis.** Como se mencionó anteriormente, el acople del chasis sufrirá un cambio ya que se le adicionará un freno mecánico que le entregará una fuerza de frenado cuando sea necesario, por lo demás el acople cumplirá las mismas funciones explicadas anteriormente en el vehículo eléctrico.

$$V_{wh2} = V_{wh1} = V_{ev} \quad (3.49)$$

$$F_{total} = F_{wh1} + F_{wh2} - F_{bk} \quad (3.50)$$

**Figura 38. Representación del chasis, acoplamiento mono-físico.**



**3.3.4 Control.** La ecuación 3.51 modela la inversión de acople del chasis, se puede ver que el valor de  $Kd1$  controla la función de freno mecánico, si  $Kd1=1$  la fuerza de referencia para el freno es cero y por el contrario si  $Kd1=0$  la referencia del freno es igual a la fuerza total del vehículo; se añadió una constante de 0.5 para indicar que fuerza total resistente se divide equitativamente entre ambas ruedas.

$$\begin{cases} F_{wh1_{ref}} = F_{wh2_{ref}} = 0.5 * K_{d1} * F_{total_{ref}} \\ F_{bk_{ref}} = (K_{d1} - 1)F_{total_{ref}} \end{cases} \quad (3.51)$$

En la ecuación 3.52 se muestra la inversión del sistema de correa, el valor de  **$Kd2$**  será impuesto por el bloque de gestión de gestión de energía.

$$\begin{cases} T_{ice_{ref}} = K_{d2} * T_{belt_{ref}} \\ T_{dcm_{ref}} = \frac{1 - K_{d2}}{K_{pb}} T_{belt_{ref}} \end{cases} \quad (3.52)$$

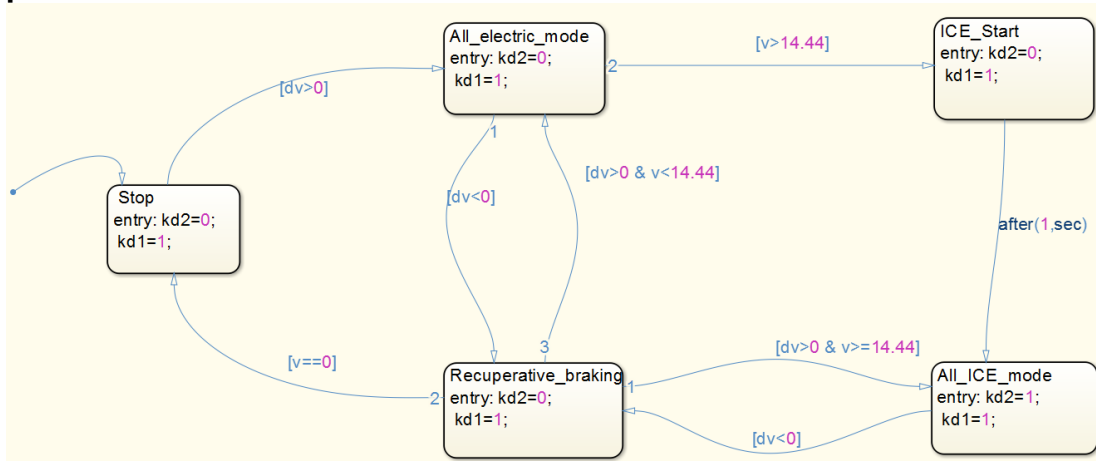
**3.3.5 Bloque de Gestión De Energía.** En el modelo del VEH que se proponen en este trabajo, la velocidad de del motor de combustión es proporcional a la velocidad del vehículo de la misma forma que en un automóvil convencional, partiendo desde esta idea y consultando en la literatura correspondiente [12], se implementa un modo de operación que tiene como base la velocidad del vehículo.

En términos generales el bloque estratégico hace que la tracción del vehículo sea únicamente eléctrica sí la velocidad del mismo es inferior a 52 [km/h] (14.44 [m/s]), por el contrario sí la velocidad es superior a este valor, toda la tracción será aportada por la máquina térmica. Mientras el vehículo frene o disminuya su velocidad se regresa al modo eléctrico para realizar un frenado recuperativo.

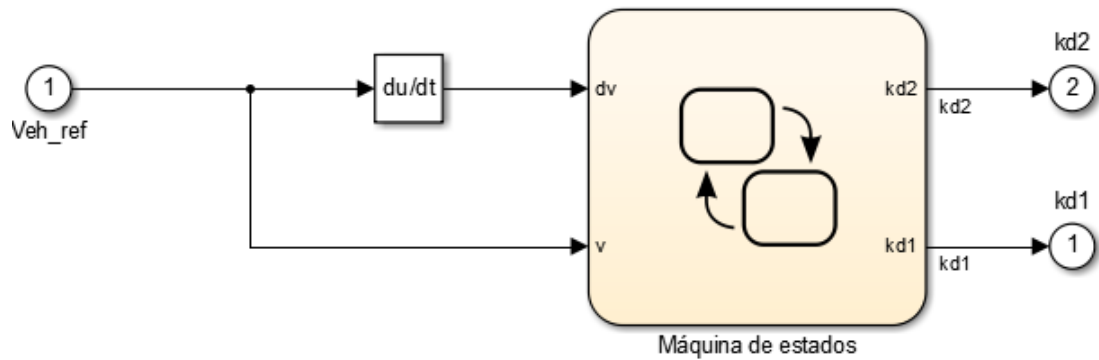
En esta metodología se hace uso de los valores  $Kd1$  y  $Kd2$  de la inversión de los acoples mono-físicos, los cuales se rigen por las ecuaciones 3.51 y 3.52. De estas ecuaciones se puede notar que  $Kd2$  administra la referencia a aplicar en las fuente de torque, vemos que si  $Kd2=1$  el torque de referencia para el motor de combustión ( $T_{ice\_ref}$ ) es igual al torque de referencia total que necesita el vehículo, si  $Kd2=0$  la maquina térmica se apaga y toda la tracción es provista por la maquina eléctrica además si  $Kd2=0.5$  el torque necesario se reparte en entre las dos máquinas en la proporción que permita el juego de correas que las acoplan.

Para implementar esta estrategia se hace uso de una máquina de estados cuya descripción puede observarse en la figura 3.26, vale la pena aclarar que el valor de  $Kd1$  siempre será de 1 ya que no se va a considerar el accionamiento del freno mecánico por parte del conductor del vehículo.

**Figura 39. Diseño de la máquina de estado para el bloque estratégico del VEH paralelo**



**Figura 40. Esquema en simulink del bloque estratégico del VEH Paralelo**

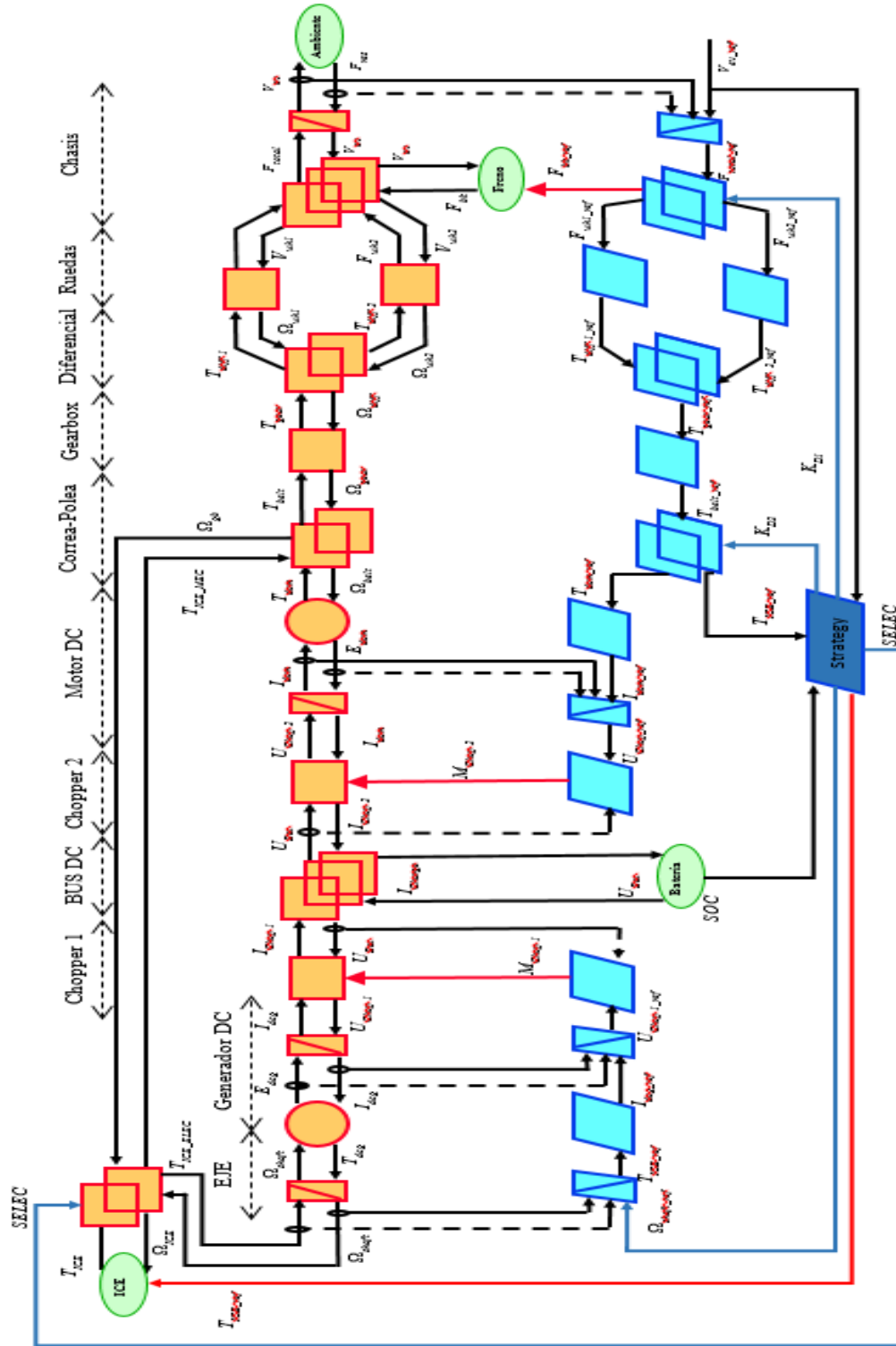


### 3.4 VEH Paralelo – Serie

El vehículo de arquitectura serie-paralelo como su nombre lo indica es la unión de las arquitecturas serie y paralelo, buscando los beneficios de ambas configuraciones. Uno de los inconvenientes de esta arquitectura, es que al tener más elementos se aumenta su costo. Se definirán aquellos elementos que no se definieron en las 3 arquitecturas propuestas anteriormente y aquellos que hayan tenido a un cambio debido a la combinación Figura 41.

Como en el vehículo serie se inyecta energía desde un motor de combustión hacia el generador por medio de un eje y pasando por un bloque Selector – Diferencial. La tensión de salida será ajustada al nivel del bus de DC donde también se acopla la batería para entregar energía al motor de corriente continua, luego como en el vehículo de arquitectura paralelo, el mismo motor de combustión y el motor de dc irán acoplados a la correa que entrega el torque a la caja de cambios y este a su vez al diferencial que se encarga de repartir la energía a ambas ruedas, por último el chasis donde se ha implementado el freno mecánico absorbe la fuerza resistente que proviene de las condiciones del medio ambiente.

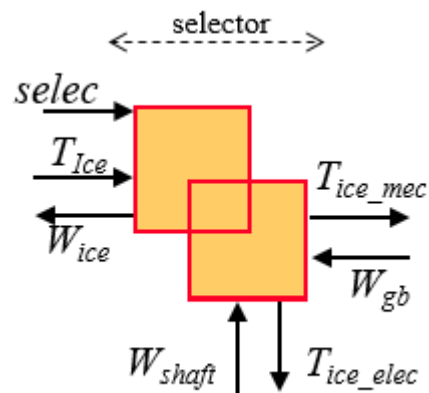
Figura 41. Representación y control de la arquitectura tipo paralelo-serie



**3.4.1 Selector – Diferencial.** Ya que el motor de combustión puede entregar energía directamente al sistema de acople de la correa y al eje del generador DC, es necesario introducir un selector.

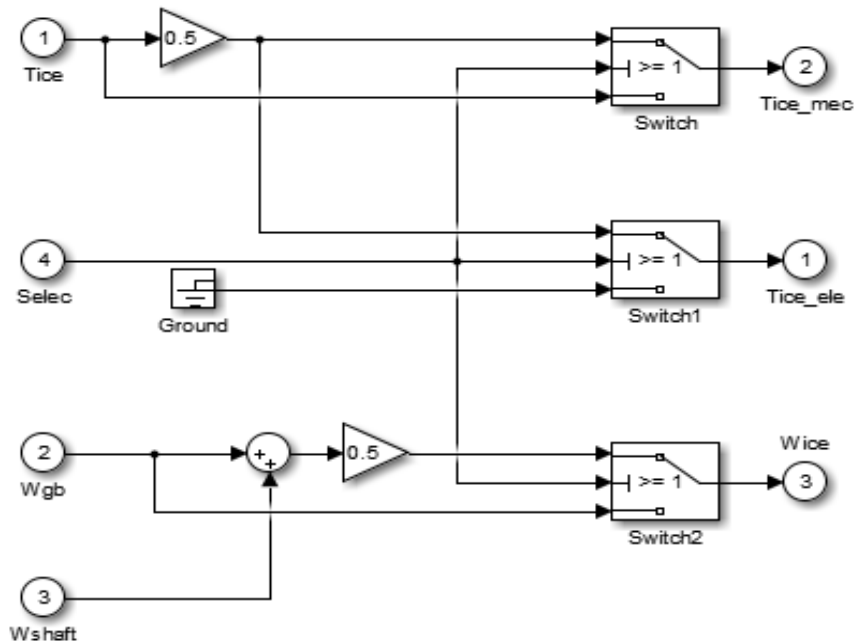
El selector recibe una señal del bloque estratégico que el indica si debe transmitir energía mecánica a la correa o al eje del generador DC, este se modela como un elemento de acople mono-físico.

**Figura 42. Representación del selector.**



Para detallar su funcionamiento es necesario hacer un acercamiento a su algoritmo interno figura 3.31.

**Figura 43. Algoritmo del selector.**



La señal de SELEC conecta en cada uno de los switch, si esta señal equivale a 1 el torque del motor a combustión se divide en partes iguales, una es el torque que va a la correa y la otra es la que pasa por el generador de DC y luego al bus para entregar energía a la batería; si SELEC equivale a cualquier otro valor diferente de 1 el Selector-Diferencial entregará toda la energía mecánica a la correa.

Cabe resaltar que en un vehículo híbrido real con arquitectura Serie –paralelo, se hace uso de un engrane planetario para acoplar los torques y velocidades de las maquinas, en el **anexo A.2** se presenta brevemente un modelo para este dispositivo mediante la REM, sin embargo no se usa en este trabajo debido a que el modelo allí propuesto no se adapta fácilmente al modelo de chasis desarrollado en las dos arquitecturas anteriores, además de que requiere un desarrollo más elevados de las estructuras de control.

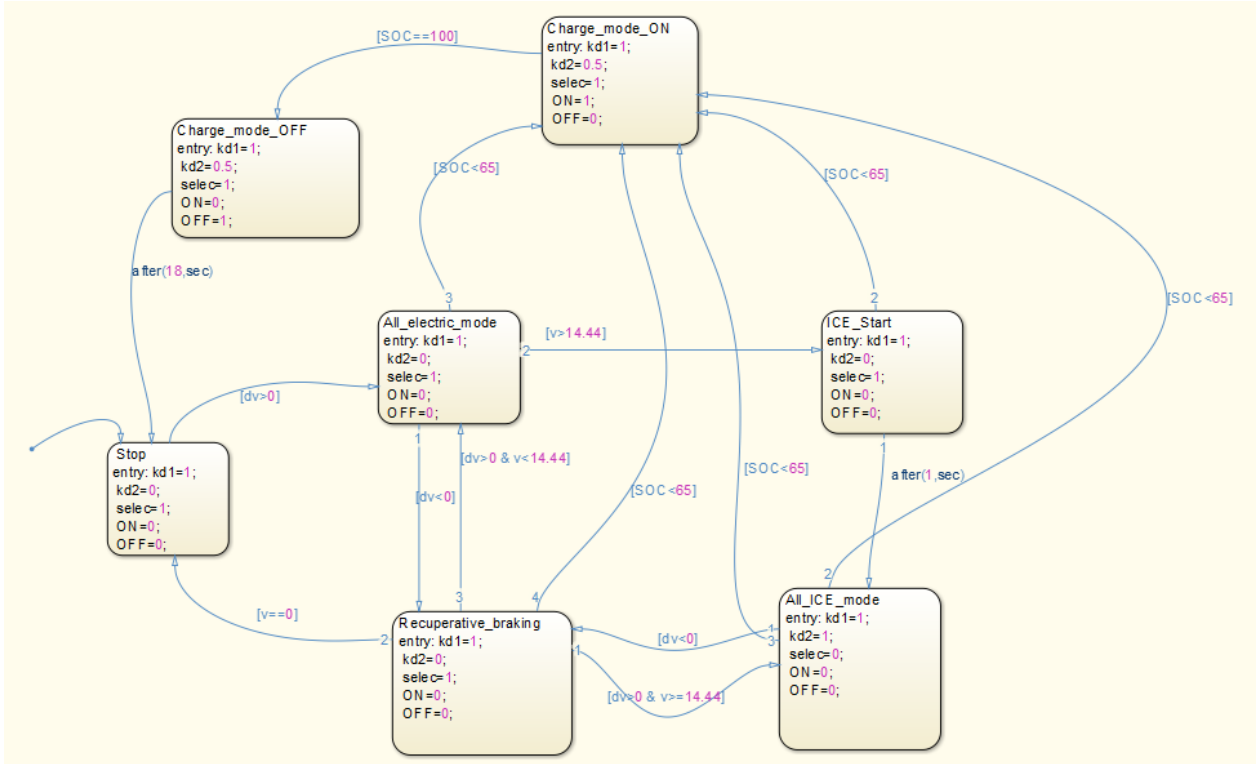
**3.4.2 Bloque Estratégico VEH Serie – Paralelo.** El modelo para híbrido Serie-Paralelo que se propone en este trabajo es sólo una combinación de los dos modelos anteriores, por ende la gestión de energía en este caso también es la combinación de las usadas anteriormente. El vehículo alterna entre tracción eléctrica y térmica haciendo uso del acople de par del juego de poleas conforme a la velocidad varía, y entrará en un modo de carga de batería si el SOC es inferior al 65%, esto es, manteniendo el motor de combustión a régimen constante entregando par al eje de acople de Generador DC y al juego de poleas a través de un diferencial.

Este bloque estratégico tiene como entradas la velocidad del vehículo de referencia y el estado de carga de la Batería; y como salidas El torque de referencia del motor de combustión, la velocidad de referencia para el eje de acople del generador, los factores de distribución  $Kd1$  y  $Kd2$  y la señal de control SELEC, que permite elegir entre un acople directo o un uno diferencial para que la térmica entregue energía al juego de poleas y al Generador DC.

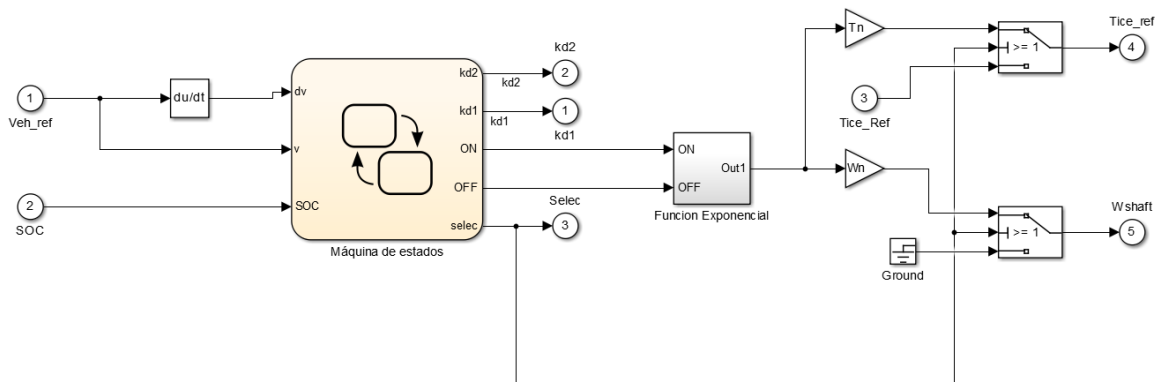
Nuevamente se implementa una máquina de estados para desarrollar esta estrategia, la cual es la misma que se usó en el híbrido paralelo solo que añadiéndole dos estados para iniciar y finalizar el modo de carga, el diseño de esta máquina de estado puede verse en la figura 44.

La configuración de este bloque estratégico se muestra en la figura 45. Vale la pena resaltar que usa nuevamente el bloque “Función Exponencial” del híbrido serie y se añaden bloques de selección que se activan con la señal SELEC con la misma lógica con la que funciona el bloque Selector-Diferencial.

**Figura 44. Diseño de la máquina de estados para el bloque estratégico de VEH Paralelo - Serie**



**Figura 45. Esquema en simulink del bloque estratégico del VEH Paralelo - Serie**



#### 4. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Se hace necesario aclarar características generales que hacen parte de todas las simulaciones que se presentan en este capítulo, las cuales tienen que ver con la naturaleza de los modelos implementados y las razones de los mismos.

Como se mostró en el capítulo 1, los fabricantes de automóviles deben someter a sus nuevos modelos a pruebas de emisiones de gases en laboratorio bajo un ciclo de conducción que se usa como estándar para prueba, este ciclo que indica la velocidad del vehículo en un tiempo de la prueba. Lo que se presenta en este trabajo es un intento de emular estas pruebas de laboratorio en los vehículos híbridos y para esto se toman las siguientes consideraciones:

1. Terreno plano: las trayectorias de los vehículos no tiene pendientes ascendentes ni descendentes.
2. Sin curvas: el vehículo siempre se mantiene en línea recta.
3. Frenado regenerativo: se asume que durante la prueba el vehículo en el frenado se puede usar la energía cinética acumulada para cargar la batería.

A pesar de esto, sí en trabajos futuros se decidieran incluir estas características bastaría con alterar las ecuaciones que modelan el chasis y el ambiente (ecuaciones (3.15) y (3.17)) y modificar los algoritmos de gestión de energía; además sería necesario que los datos de referencia que se introducen en la simulación incluyan el ángulo de inclinación del vehículo y el radio de la curva sobre la trayectoria trazada.

La tabla muestra los datos que se usaron durante la prueba, se cargan en los scripts (archivos .m) antes de correr la simulación.

### Datos de componentes de los VEH. Recopilación de [1], [10] y [12]

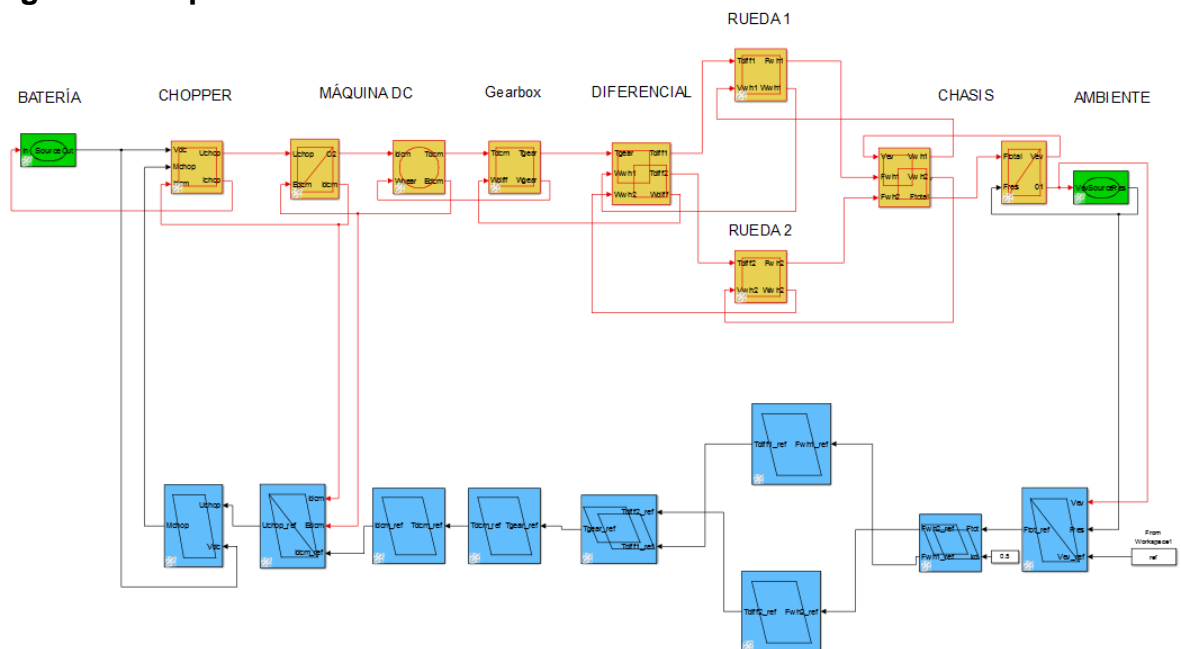
Componente	Variables	Valores
Vehículo	Masa (m)	500 [kg]
	Ancho (l)	1 [m]
	Área frontal (Sfront)	2 [m <sup>2</sup> ]
	Coefficiente aerodinámico (Cx)	0.35
Ruedas	Radio (Rr)	0.27 [m]
GearBox	Relación del reductor de velocidad (Rred)	1/8.48
Juego de poleas	Relación Correa – Polea (Kbp)	1.2
Motor DC Generador DC	Resistencia de inducido (Rind=Rdcg)	0.79 [Ω]
	Inductancia de Inducido (Lind=Ldcg)	70 [mH]
	Coefficiente de conversión (Kmcc =Kfig)	1.18
Eje de acople Generador DC	Coefficiente de fricción (f)	$5.35 \cdot 10^{-3}$ [Nms]
	Momento de Inercia (J)	$4.32 \cdot 10^{-2}$ [Kg*m <sup>2</sup> ]
Batería - Banco de Baterías	Tipo de batería	Lead-Acid
	Tensión nominal	128 [V]
	Capacidad Nominal	72 [Ah]
	Estado de Carga Inicial*	67 %
Motor de combustión interna	Torque de máxima eficiencia (Tn)	108 [Nm]
	Velocidad a torque máximo (Wn)	5000 [rpm]

\* Este valor puede cambiar según lo requiera el objeto de la prueba

## 4.1 VEHÍCULO ELÉCTRICO

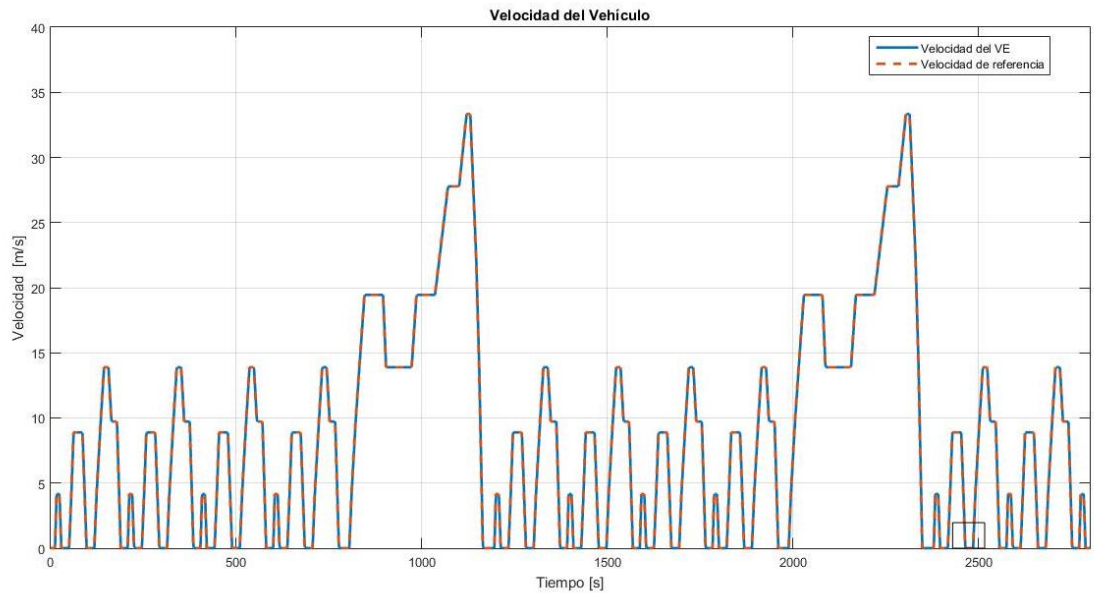
Como se ha mencionado el vehículo eléctrico es el punto de partida para el desarrollo de las arquitecturas de los híbridos Serie, Paralelo y Serie-Paralelo que se realizaron para este trabajo, por ende expondremos a continuación los resultados de las simulaciones obtenidos en este modelo a manera de referencia inicial.

**Figura 46. Implementación del Vehículo eléctrico en Matlab Simulink**

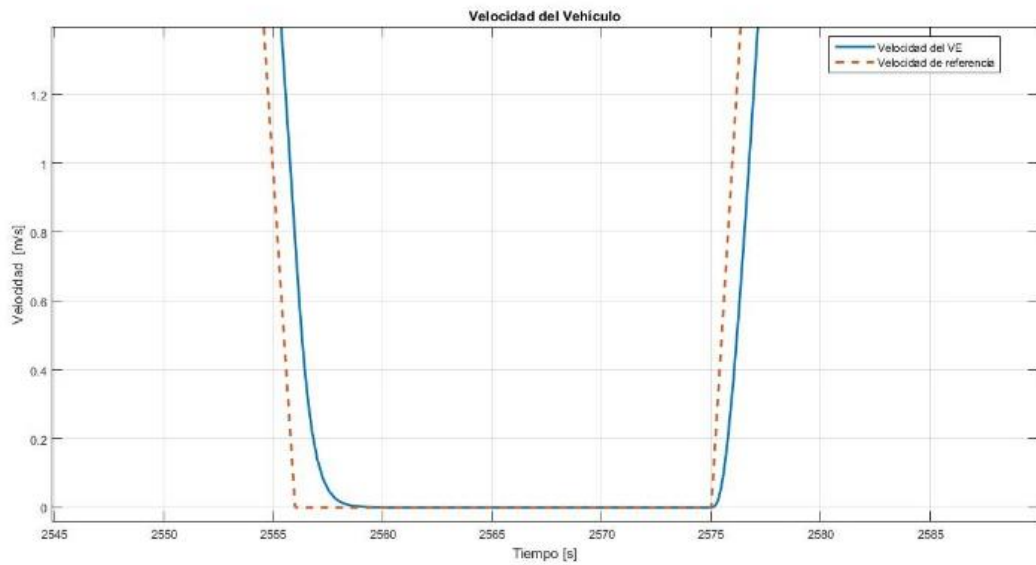


El modelo fue simulado en 2800 segundos bajo dos ciclos y medio de conducción NEDC, cada uno de estos ciclos equivalen a 4 ciclos ECE 15 urbanos, dibujados del entre 0 s y 800 s, y un ciclo de extraurbano EUDC, dibujado entre 800s y 1200 s [8]. Esto puede apreciarse en las figuras 47 y 48.

**Figura 47. Resultados de Simulación para la Velocidad del VE**



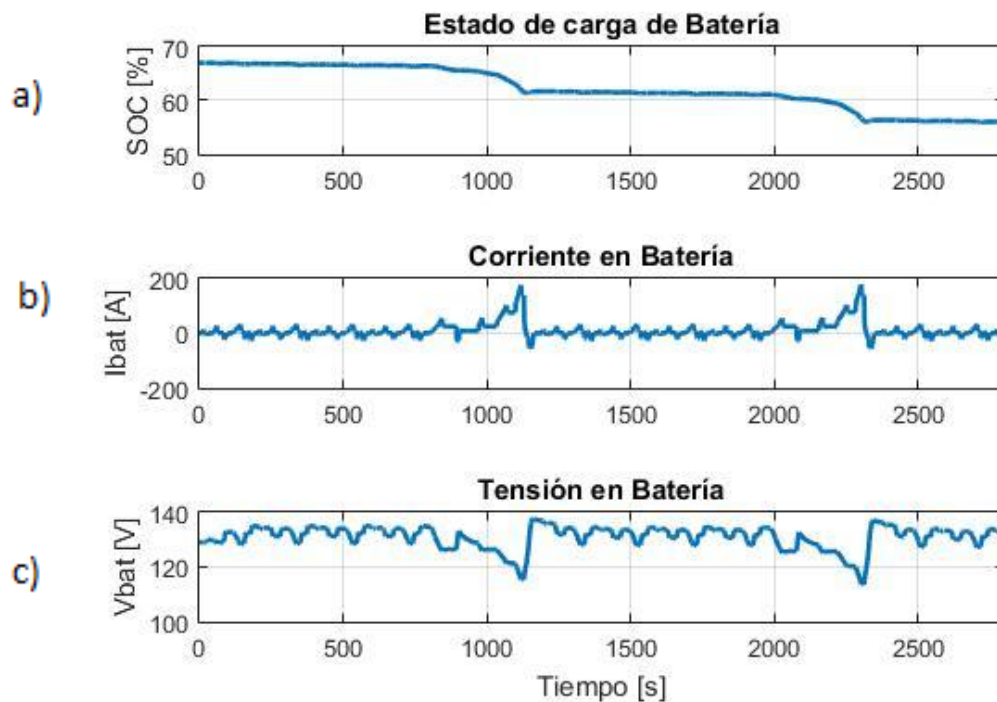
**Figura 48. Vista de Detalle de la Figura 48**



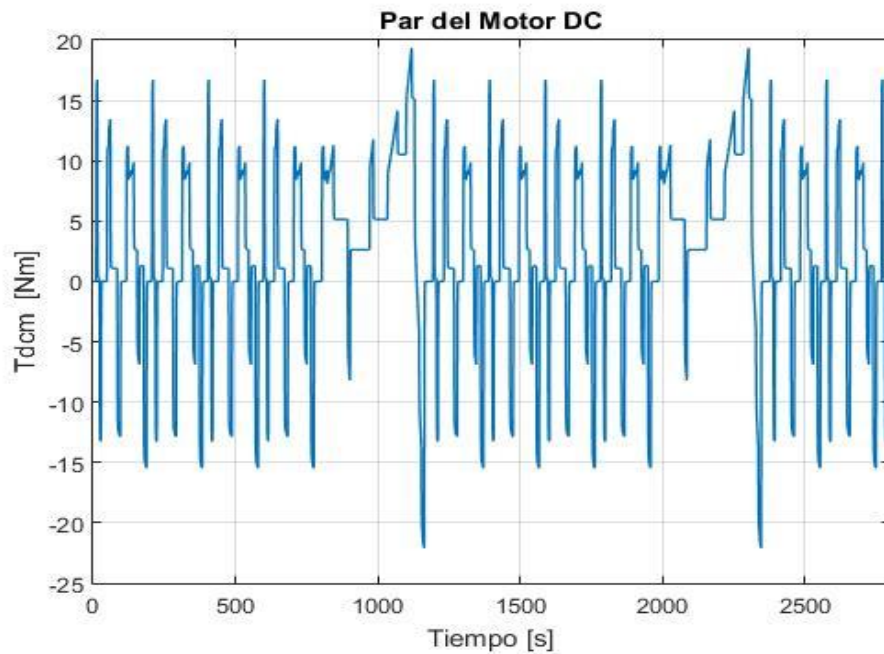
En la gráfica 48 se puede ver la velocidad de referencia en línea roja punteada y la velocidad respuesta del vehículo como una línea azul, es factible afirmar que la respuesta del vehículo cumple con lo esperado, ya que no presenta un desfase de más de un segundo con respecto a la señal de referencia. Esta gráfica es idéntica en las tres arquitecturas mencionadas, por lo que no es necesario repetirla en cada una de ellas.

El modelo implementado para la batería permite obtener información de tensión, corriente y estado de carga. En todos los modelos, cuando la corriente medida en esta gráfica adquiere valores positivos, la batería entrega energía al resto del sistema, por el contrario si tiene valores negativos, la batería recibe energía como en el caso del frenado regenerativo o en modo de carga.

**Figura 49. Resultados de Simulación en la Batería Vehículo Eléctrico, a)**

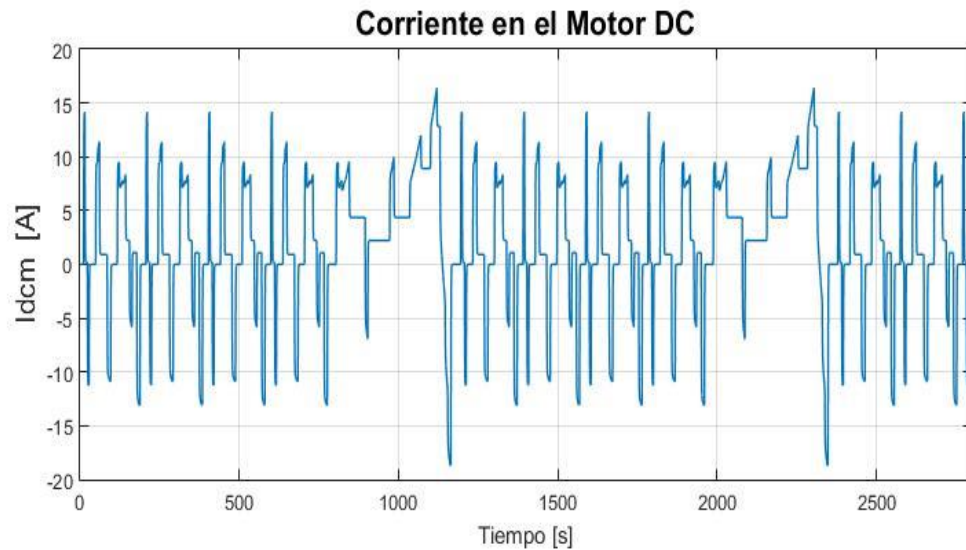


**Figura 50. Resultados de Simulación en Motor DC Vehículo Eléctrico, Par entregado**



En las figuras 50 y 51 se puede apreciar que en los momentos de desaceleración del motor los valores de corriente de la batería y el torque del motor se vuelven negativos, en estos instantes es cuando la batería se recarga gracias a su freno regenerativo.

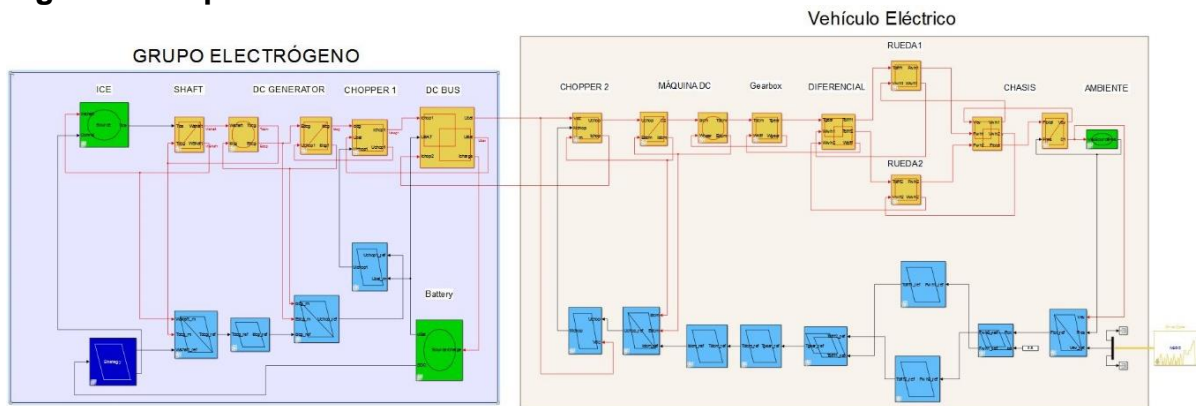
**Figura 51. Resultados de Simulación en Motor DC Vehículo Eléctrico, Corriente de respuesta**



## 4.2 VEH SERIE

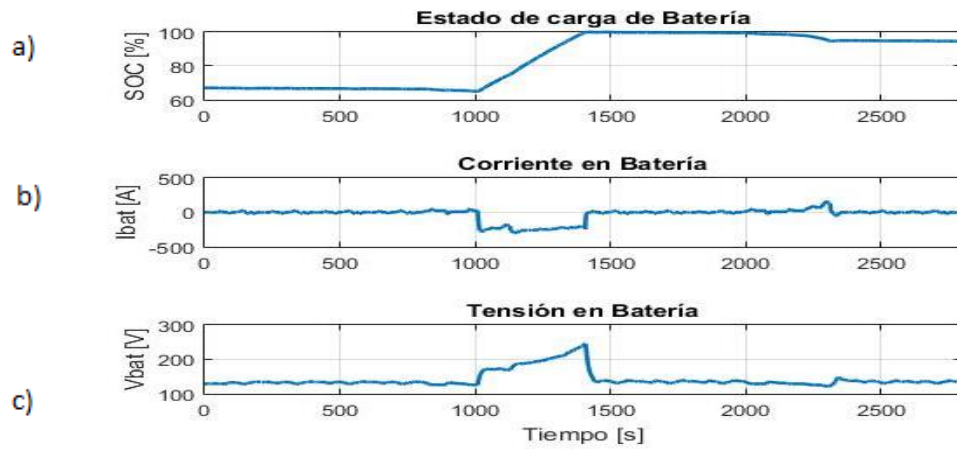
Para el vehículo de arquitectura serie se mostrará solo los resultados del grupo electrógeno, ya que las del vehículo eléctrico (Parte derecha figura 52) son muy similares a las mostradas en la consigna anterior, se omitirán.

**Figura 52. Implementación del Vehículo serie en Matlab Simulink**



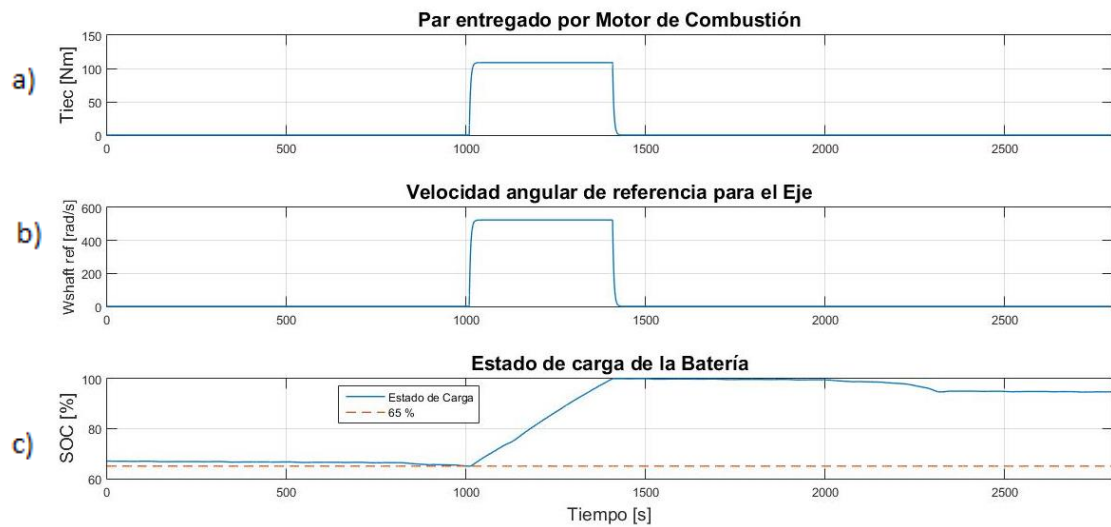
En la ilustración de la Figura 53 se puede apreciar el momento en el que la batería se descarga hasta en cierto valor para iniciar el modo de carga, también se ve como la corriente cambia su dirección para permitir su recarga, después de que se completa el 100% del SOC, el circuito de control detiene la corriente entrante a la batería.

**Figura 53. Resultados de Simulación en la Batería Vehículo serie, a) estado de carga, b) corriente c) tensión.**



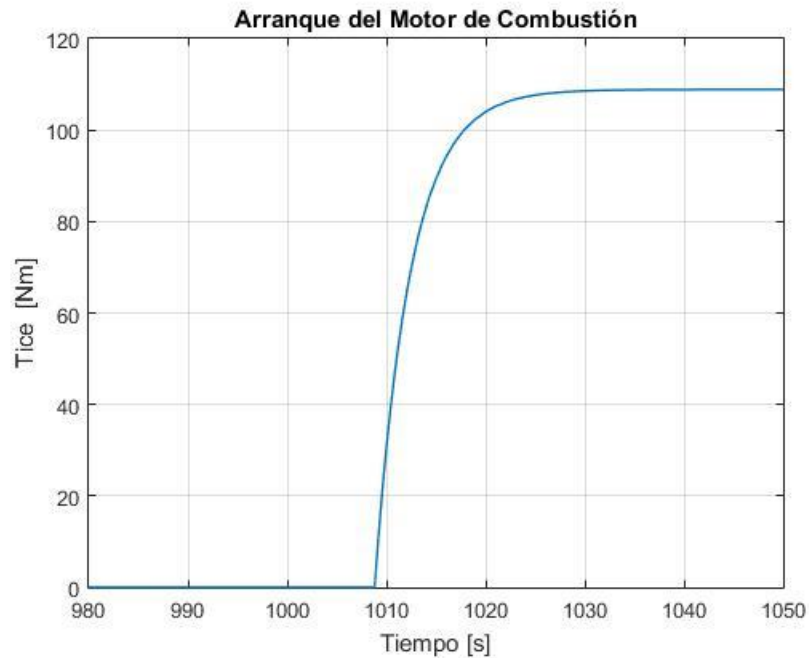
Para la ilustración del arranque del motor a combustión se propone la Figura 54, se puede ver como se enciende (el torque y la velocidad angular aumentan) en el momento que la batería se descarga para darle continuidad al movimiento del vehículo y además brindar energía de recarga a la batería y se apaga después que la batería está completamente cargada.

**Figura 54. Operación de Bloque de Gestión de Energía en VEH Serie.**



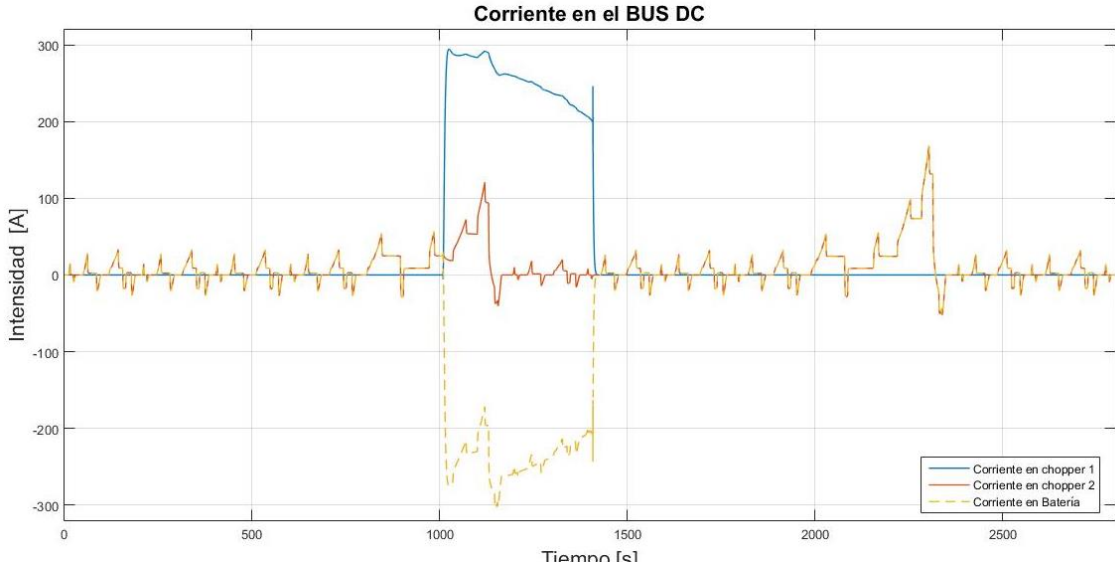
En el motor de combustión el arranque toma cerca de 18 segundos en alcanzar su potencia máxima, por esto la señal de referencia no debería comportarse como un escalón unitario. Aunque se acerca un poco más a su funcionamiento, tampoco es acertado afirmar que el torque se comporte como una rampa, la curva que más se asemeja es la una como la mostrada en la Figura 55.

**Figura 55. Arranque del motor de combustión Torque vs tiempo.**



En la figura 56, se muestran las corrientes que atraviesan el bus DC, se puede resaltar que es la corriente que produce el generador alcanza valores que parecen excesivos, pero esto se debe a que la potencia de salida del motor de combustión está ajustada para llegar al máximo posible, con el fin de facilitar la visualización de la recarga de la batería.

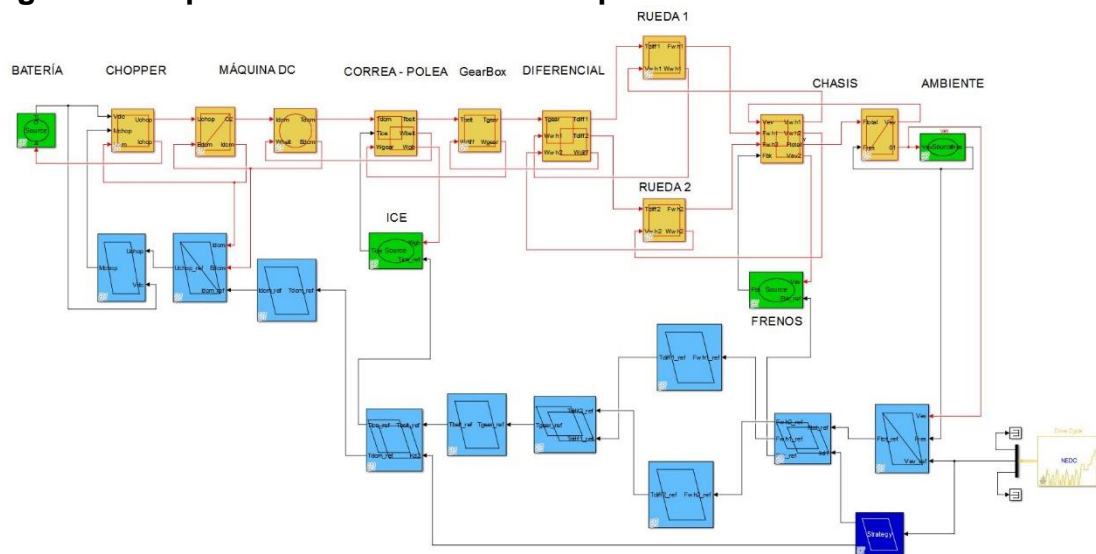
**Figura 56. Corrientes que atraviesan el bus de DC.**



### 4.3 VEH PARALELO

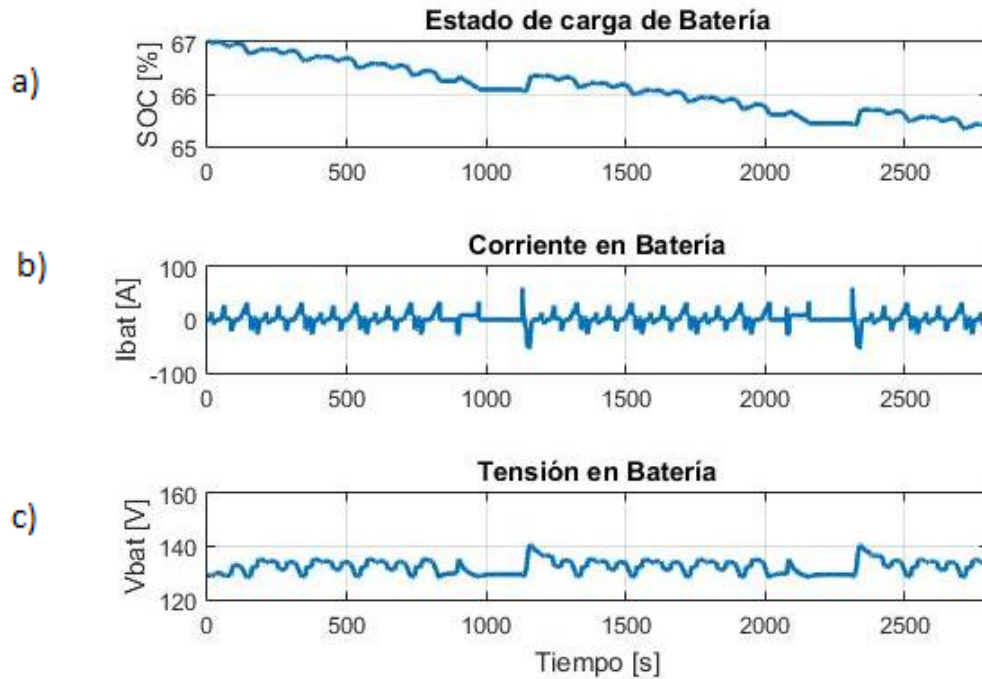
Para esta arquitectura se presentan: la tensión, corriente y estado de carga en porcentaje de la batería, resultados de convertidor DC/DC y del generador DC y torques que se producen en el sistema de correa.

**Figura 57. Implementación del Vehículo paralelo en Matlab Simulink.**

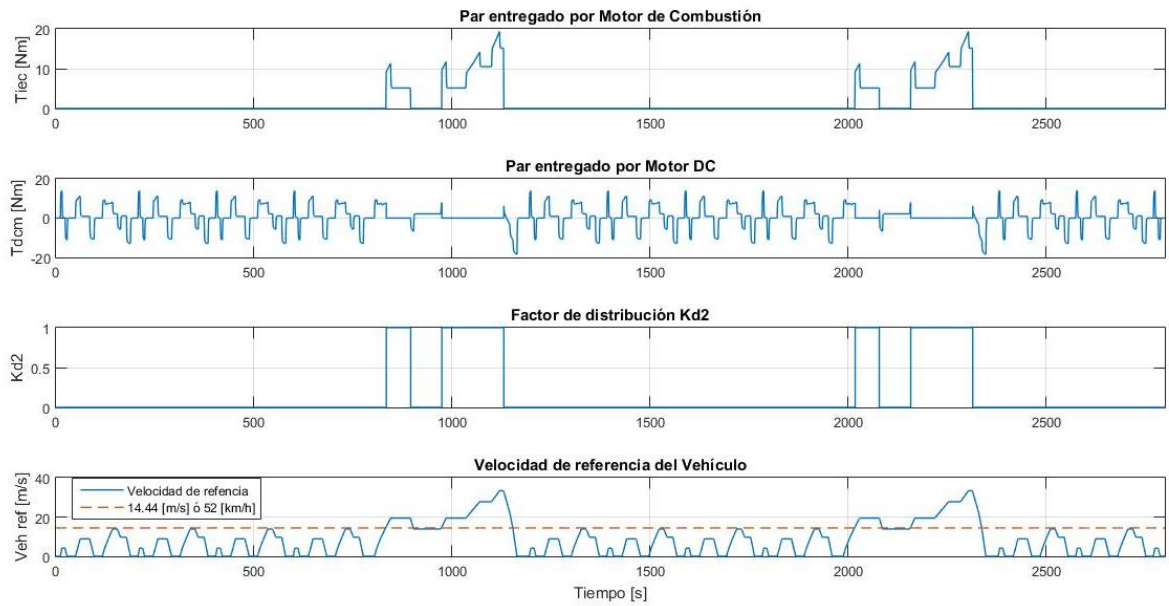


De la figura 58, se puede decir que el Estado de carga inicial es igual al del vehículo de arquitectura serie, pero no decae hasta el valor crítico establecido (65%) en todo el recorrido, esto se debe a que el bloque de gestión de energía enciende el motor térmico pasados los 52 km/h para entregar tracción en las ruedas durante los instantes de mayor exigencia.

**Figura 58. Resultados de Simulación en la batería del vehículo paralelo, a) estado de carga, b) corriente c) tensión**

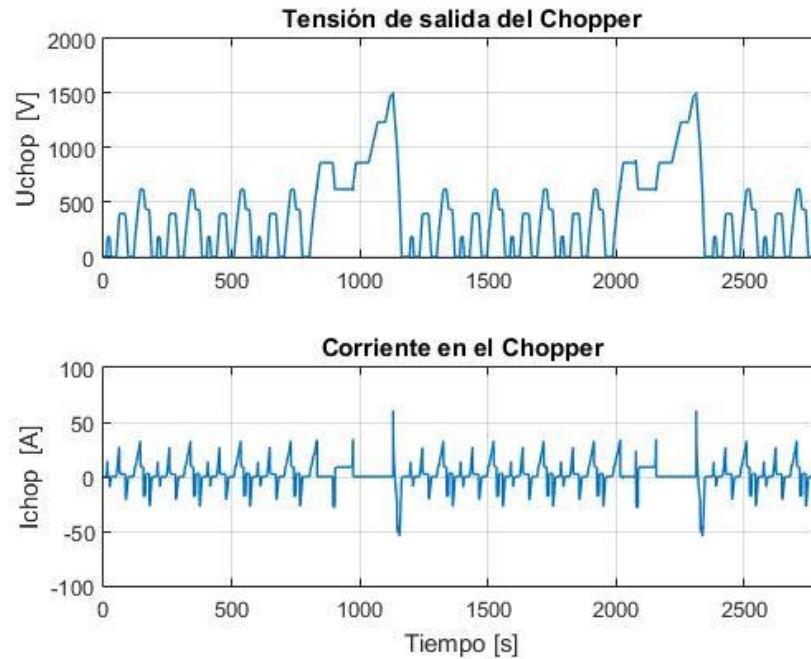


**Figura 59. Operación de Bloque de Gestión de Energía en VEH Paralelo**

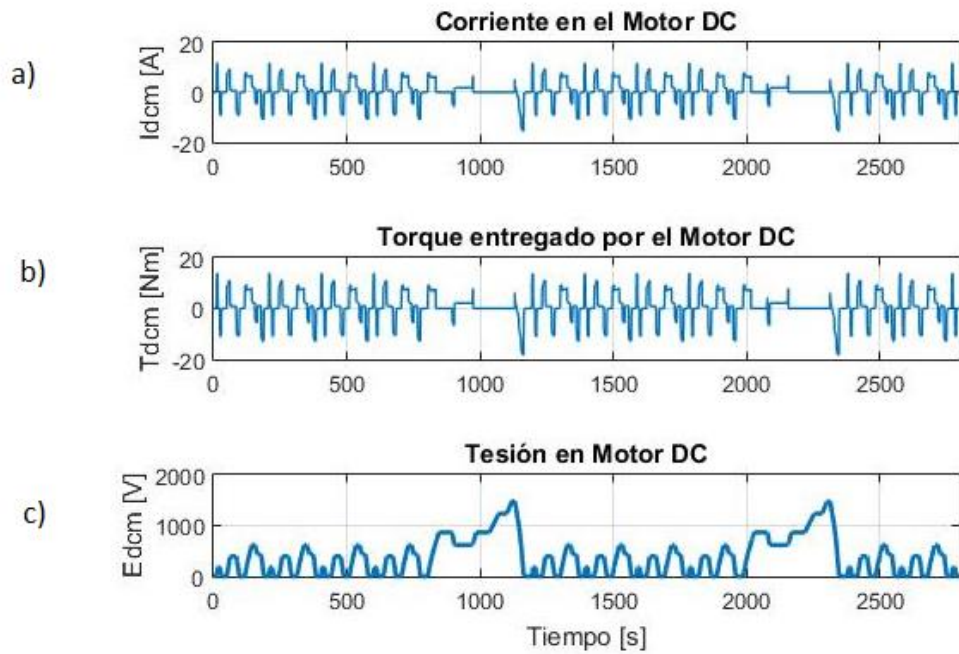


En la práctica en un VEH paralelo el embrague desconecta el movimiento de la maquina eléctrica cuando se opera con el motor de combustión, sin embargo como no se tuvo en cuenta en el modelo los resultados de simulación del motor DC y de convertidor DC/DC muestran tensión en esos instantes.

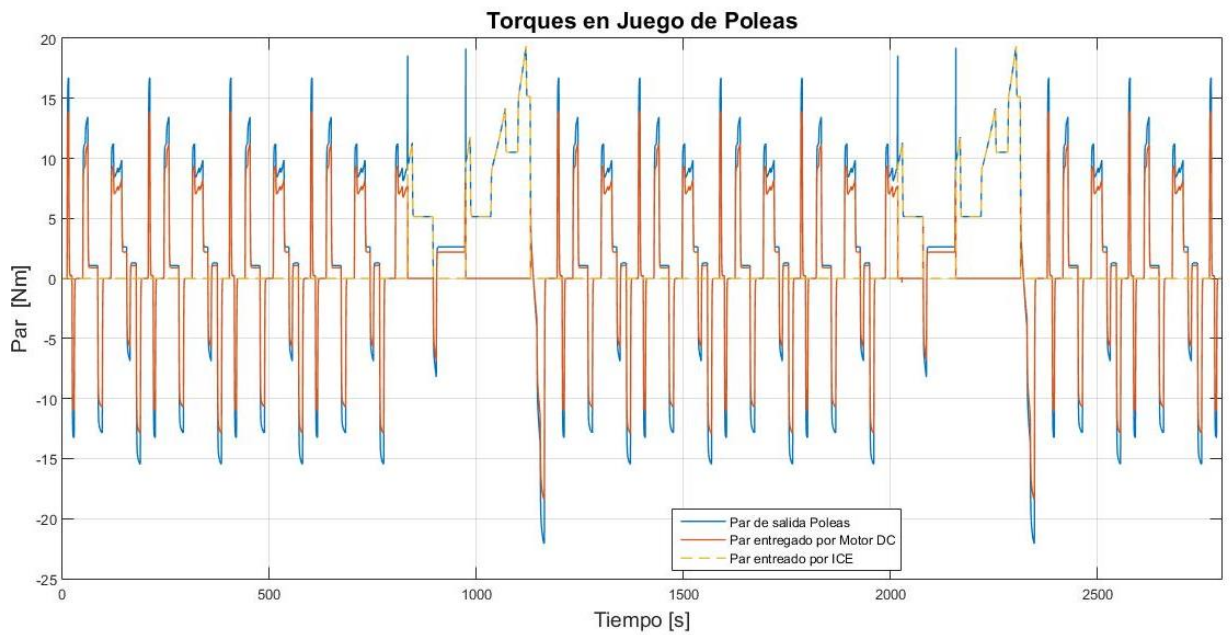
**Figura 60. Resultados de Simulación del Convertidor DC/DC.**



**Figura 61. Resultados de la simulación del motor de DC a) corriente, b) torque entregado c) tensión.**



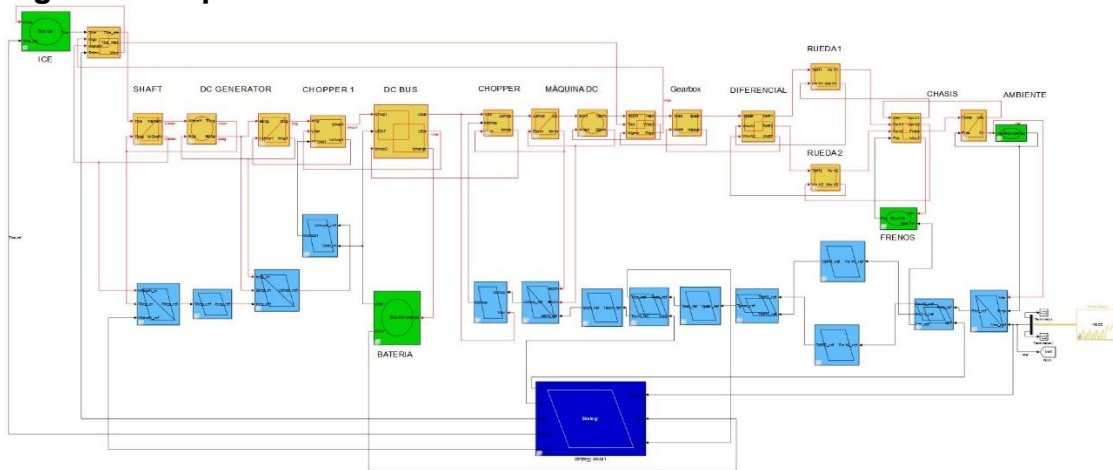
**Figura 62. Resultados de los momentos en la correa-polea**



#### 4.4 VEH SERIE-PARALELO

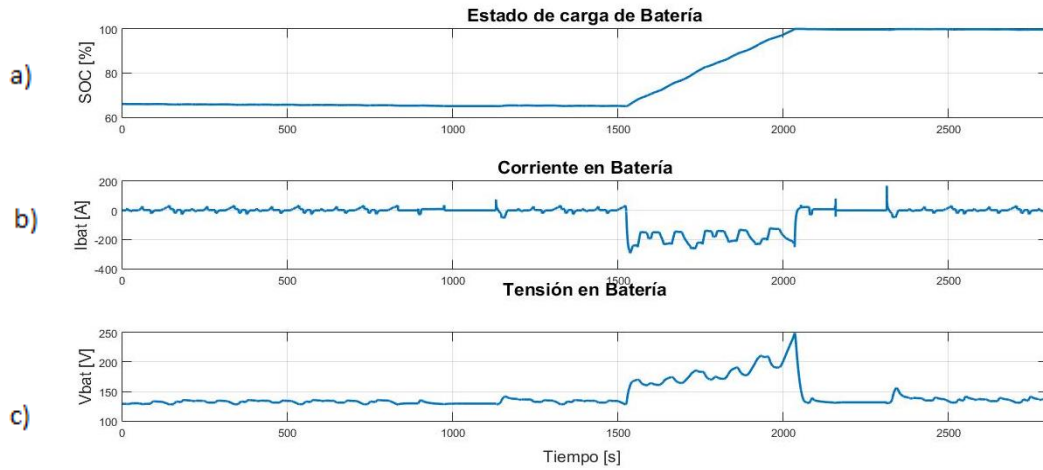
Se presentan los siguientes resultados: Tensión, corriente y SOC de la Batería, corrientes en el Bus DC, torques en el juego de Correa – Polea y los detalles del funcionamiento del bloque de gestión de energía.

**Figura 63. Implementación del Vehículo Paralelo-Serie en Matlab Simulink.**

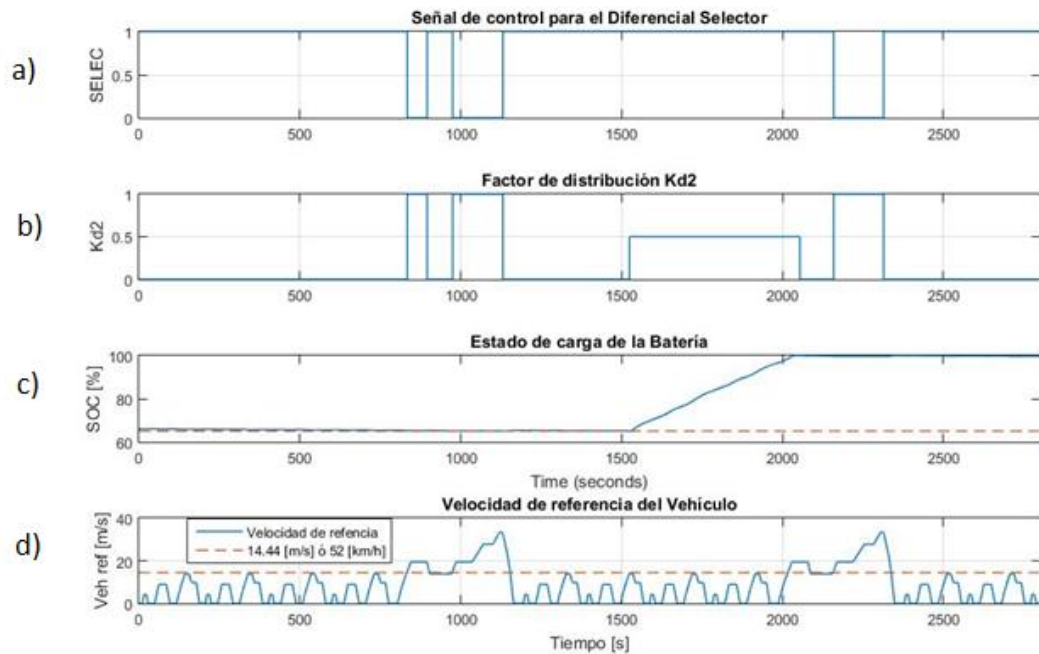


Se enseñará el estado de carga, pero tendrá un SOC inicial diferente a los híbridos anteriores, esto se debe a que el comportamiento del estado carga es idéntico al vehículo paralelo, se opta por elegir un estado inicial de 66% para poder visualizar el proceso de recarga de la batería después de llegar al 65.

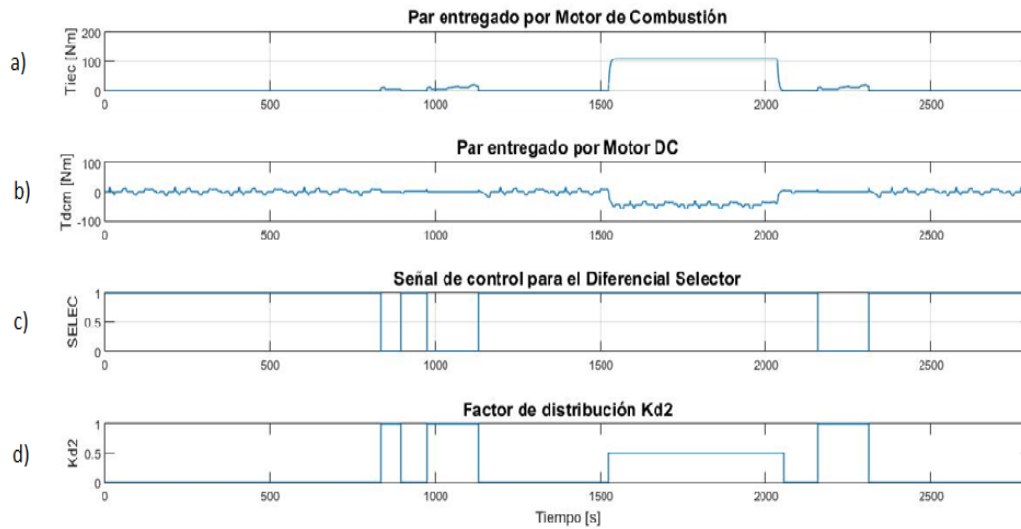
**Figura 64. Resultados de Simulación en la batería del vehículo Paralelo-Serie, a) estado de carga, b) corriente c) tensión.**



**Figura 65. Primera parte de las variables de entrada y salida del bloque de gestión de energía a) señal del selector, b) factor de distribución de la inversión de la correa, c) estado de carga tomado de la batería, d) velocidad de referencia del vehículo**



**Figura 66. Segunda parte de las variables de entrada y salida del bloque de gestión de energía a) torque del motor de combustión, b) torque del motor DC c) selec d) factor de distribución del Kd2.**



Las figuras 67 y 68 muestran en funcionamiento de la electrónica de potencia, se puede resaltar que el variador 2 entrega la corriente excedente durante el modo de carga hacia el Bus DC que finalmente se inyecta en la batería.

**Figura 67. Variador de tensión 1 a) tensión de salida b) corriente que lo atraviesa.**

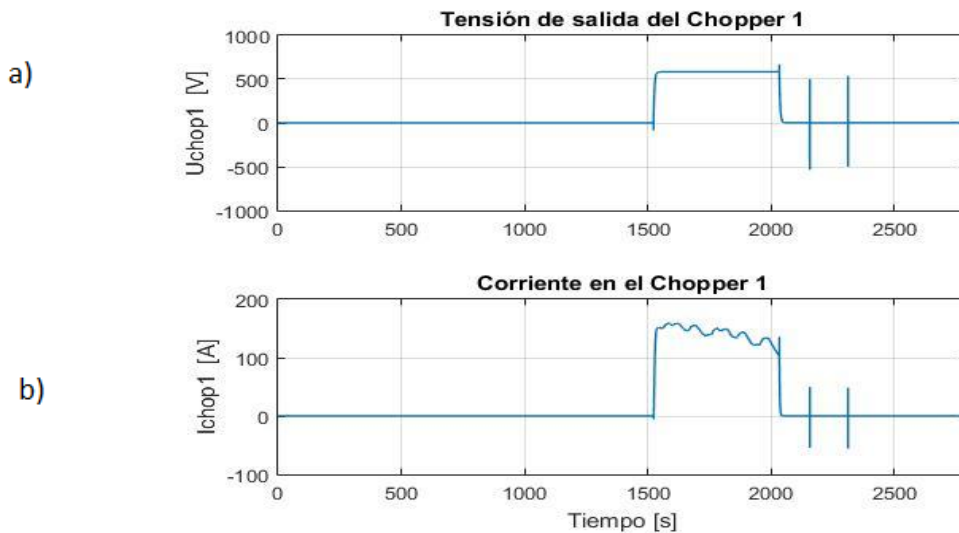


Figura 68. Variador de tensión 2 a) tensión de salida b) corriente que lo atraviesa.

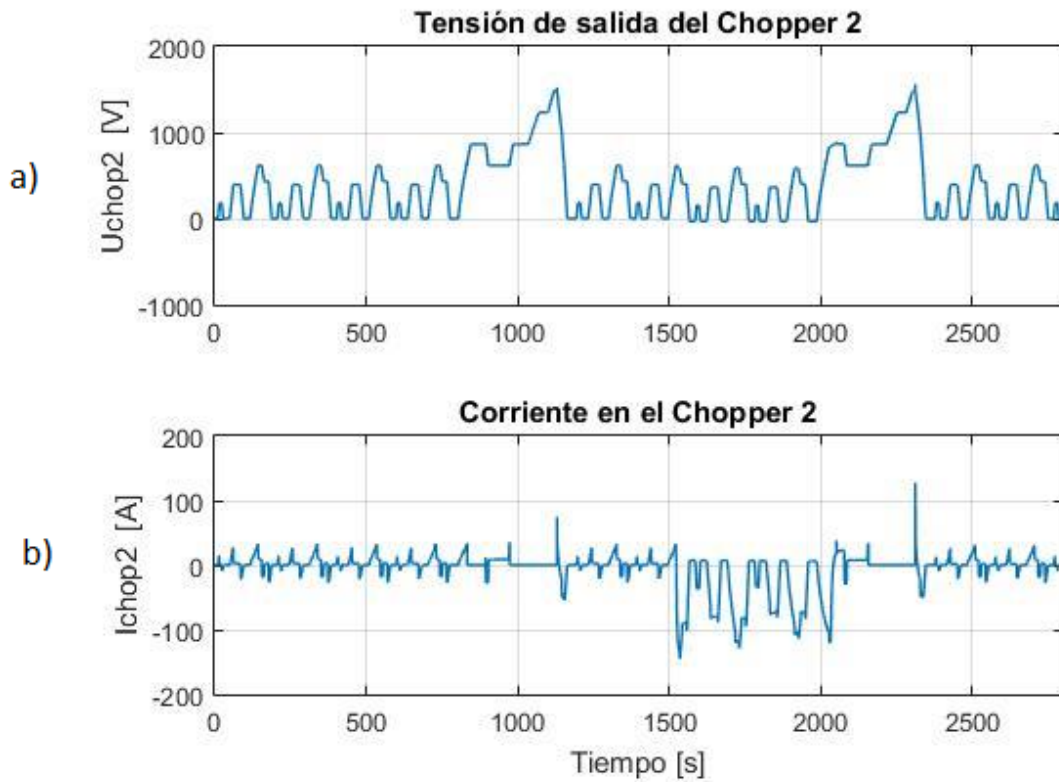
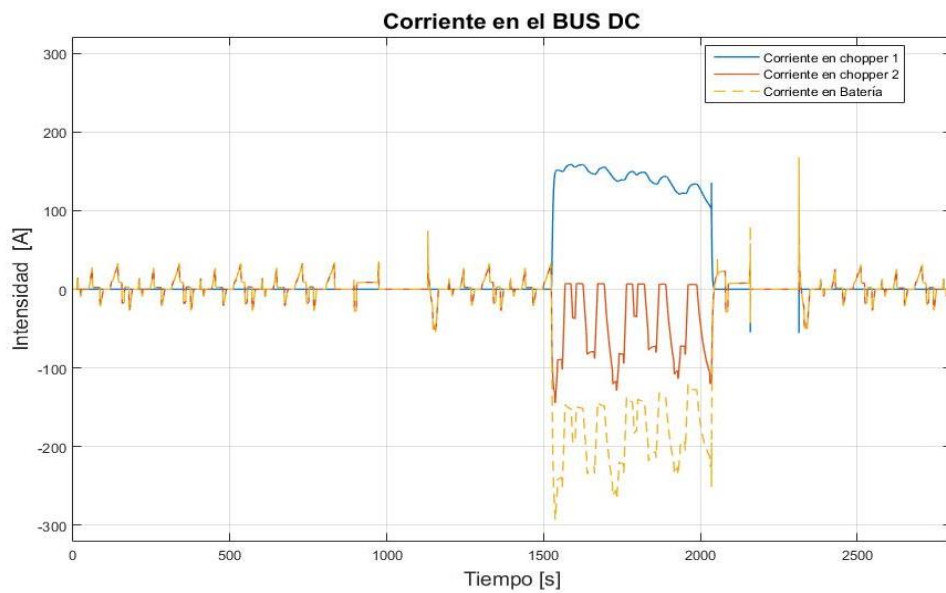
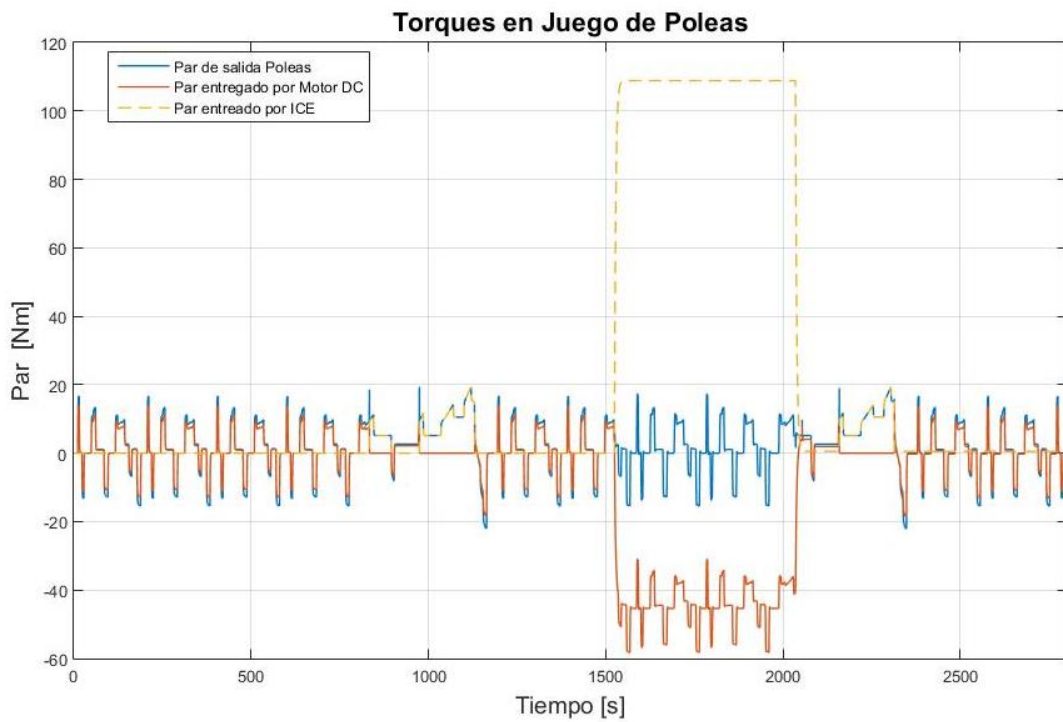


Figura 69. Corrientes en el Bus DC



Por último la gráfica del sistema de correa-polea (figura 70) se pueden observar el torque entregado por el motor DC, el entregado por el motor a combustión y el par de salida. La línea punteada que pertenece al motor de combustión entrega bastante par entre 1500 y 2000 segundos, el cual en parte se utiliza para el movimiento del vehículo y en parte para la recarga de la batería.

**Figura 70. Distintos torques del juego de poleas.**



#### **4.5 RESULTADOS CON OTROS CICLOS DE PRUEBA**

Para evaluar la influencia del ciclo de conducción sobre el desempeño de los modelos desarrollados se realizaron pruebas con otros ciclos estándar, las características de estos ciclos y los resultados de las pruebas sobre los modelos se presentan en el **anexo A.3**; Estos resultados muestran un comportamiento más inestable en las señales de par y corriente en los momentos en que se cambia de fuente energía y cuando ocurren cambios súbitos en la velocidad (Pruebas con WLTP class 3 en VEH paralelo y Serie - Paralelo). Esta evidencia sugiere que se hace necesario un cambio en la estructura de control si el ciclo de conducción así lo requiere y que la adición del embrague y el engrane planetario ayudarían a mejorar la respuesta del modelo cuando se somete a estas pruebas.

## 5. OBSERVACIONES Y CONCLUSIONES

Este trabajo presenta modelos de los Vehículos Eléctricos Híbridos y del Vehículo Eléctrico, mostrando el desempeño de sus componentes principales en gráficos y usando el formalismo de Representación Energética Macroscópica (REM) para describir los modelos.

Se realizó una revisión de fuentes bibliográficas en donde se describen los modelos matemáticos y físicos de los VEH que sirvieron como base para la construcción de los modelos.

Cada uno de los componentes los Vehículos se describió a través de ecuaciones y algoritmos. Con estos se crearon los modelos de cada arquitectura usando la REM la cual permitió efectuar la estructura de control máxima que mantiene la simulación dentro de márgenes aceptables comparadas con los ciclos de conducción que se usaron como referencia.

Los modelos obtenidos contienen valor agregado ya que combinan los modelos presentados en [12] para el vehículo serie y en [14] de la arquitectura paralelo, con las ventajas del modelo presentado en [2] del vehículo eléctrico, por ejemplo la facilidad de introducir curvas y pendientes.

Adicionalmente se propusieron estrategias de ya que la estrategia toma como variable de activación el estado de carga de la batería y no la tensión, esto permite que la maquina térmica trabaje de forma continua en su punto de máxima eficiencia; y se diferencia también de la hallada en [14] porque se hace un arreglo acorde con el nuevo modelo desarrollado para el vehículo paralelo. Cada estrategia se adapta a las necesidades que se dan en las arquitecturas; para el vehículo serie se tiene en cuenta que la batería se descargue a su mínimo recomendable para su óptima operación, como requisito para el arranque del motor a combustión; en cambio la gestión de energía de la arquitecturas paralelo, se enfoca en el apoyo del motor de combustión a las baterías en los momentos de más exigencia (por ejemplo

en velocidades superiores a 52 km/h) y el serie-paralelo se beneficia de las dos estrategias anteriores.

La introducción de las máquinas de estado en el modelo paralelo y serie-paralelo, facilita el diseño y la operación dentro de la simulación, de la lógica que controla los bloques de gestión de energía establecidos, pues de no usarlos sería necesario formalizar un código en la workspace de matlab donde se debe realizar complicadas operaciones condicionales para reemplazarlo.

El uso de matlab-simulink permite un fácil proceso de cambios modulares, lo que quiere decir que fue sencillo acoplar, reemplazar y quitar diferentes elementos para cada arquitectura, como también sería sencillo agregar las arquitecturas a otros sistemas más complejos como pudiesen ser micro-redes, cosa que es demasiado complicada llevar a cabo con un código en texto plano.

## CITAS

- [1] Solano Martinez, Javier, "Energy management of a hybrid electric vehicle: an approach based on type-2 fuzzy logic", Tesis para optar por el título de Ph.D, De Montfort University, Leicester, Royaume-Uni, Belfort, 2012.
- [2] A. Bouscayrol, A. Bruyère, P. Delarue, F. Giraud, B. Lemaire-Semail, Y. Le Menach, W. Lhomme, F. Locment, "Teaching drive control using Energetic Macroscopic Representation -initiation level", University of Lille, L2EP, Lille, Francia, 2014.
- [3] IEEE Global History Network, "Electric and Hybrid Vehicles", consultado el 5/01/2014 en: <[http://www.ieeeahn.org/wiki/index.php/Electric\\_and\\_Hybrid\\_Vehicles](http://www.ieeeahn.org/wiki/index.php/Electric_and_Hybrid_Vehicles)>
- [4] Motorpasion, "Historia del coche híbrido: la tecnología se perfecciona", consultado el: 05/01/2014 en: <[http://www.motorpasion.com/coches-hibridos-alternativos/historia-del-coche-hibrido-la-tecnologia-se\\_perfecciona%E2%80%99](http://www.motorpasion.com/coches-hibridos-alternativos/historia-del-coche-hibrido-la-tecnologia-se_perfecciona%E2%80%99)>
- [5] Portafolio.co, "Los autos híbridos aún no arrancan en Colombia", consultado el 05/01/2014 en: <<http://www.portafolio.co/portafolio-plus/autos-hibridos-venta-colombia>>
- [6] EMR Website, "EMR library", consultado el 22/01/2015 en: <<http://www.emrwebsite.org/>>
- [7] Vehicle and Fuel Emissions Testing. United States Environmental protection Agency. consultado el 13 de febrero de 2016 en <<https://www.epa.gov/vehicle-and-fuel-emissions-testing#vehcycles>>

- [8] Cleaner, More Efficient Vehicles. United Nations Environment Programme. consultado el 13 de febrero de 2016 en <[http://www.unep.org/transport/gfei/autotool/approaches/information/test\\_cycles.asp#European](http://www.unep.org/transport/gfei/autotool/approaches/information/test_cycles.asp#European)>.
- [9] Driving Cycle (Simulink Block). Foro de Mathworks consultado el 13 de febrero de 2016 en <<http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/46777-driving-cycle--simulink-block->>
- [10] Keyu CHEN, “Common Energetic Macroscopic Representation and Unified Control Structure for different Hybrid Electric Vehicles”. Tesis para optar por el título de Ph.D Université Lille 1, Lille Francia 2010.
- [11] Katsuhiko Ogata, “Ingeniería de control Moderna”, Quinta edición, Editorial PEARSON EDUCACIÓN, Madrid 2010
- [12] T. Letrouve, A. Bouscayrol, W. Lhomme. “Influence of the clutch model in a simulation of a parallel Hybrid Electric Vehicle”. University of Lille North of France L2EP. Lille ,France 2009
- [13] DieselNet. Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure (WLTP), consultado el 26 de abril de 2016, disponible en: <<https://www.dieselnet.com/standards/cycles/wltp.php>>
- [14] W. Lhomme, A. Bouscayrol, P Barrade. “Simulation of a Series Hybrid Electric base don Energetic Macroscopic Representation” IEEE 2004

- [15] Leonardo J. Marín, Víctor M. Alfaro “sintonización de controladores por ubicación de polos y ceros”, departamento de automática, Escuela de ingeniería Eléctrica, Universidad de Costa Rica.
- [16] «Honda IMA technology». Honda Motor. Disponible en <<http://world.honda.com/automobile-technology/IMA/ima02>> consultado el 28 de marzo del 2016.

## BIBLIOGRAFIA

BOUSCAYROL, A. Formalismes de représentation et de commande des systèmes électromécaniques multimachines multiconvertisseurs. HDR dissertation. [online] [Lille, Francia] Université Lille, December 2003. Available from Internet: <http://www.emrwebsite.org/uploads/Fichiers/Libraries/memo-EMR-2013.pdf>

KEYU, Chen. Common Energetic Macroscopic Representation and Unified Control Structure for diferent Hybrid Electric Vehicles. Tesis Doctoral. Lille, Francia: Université Lille 1, 2010.

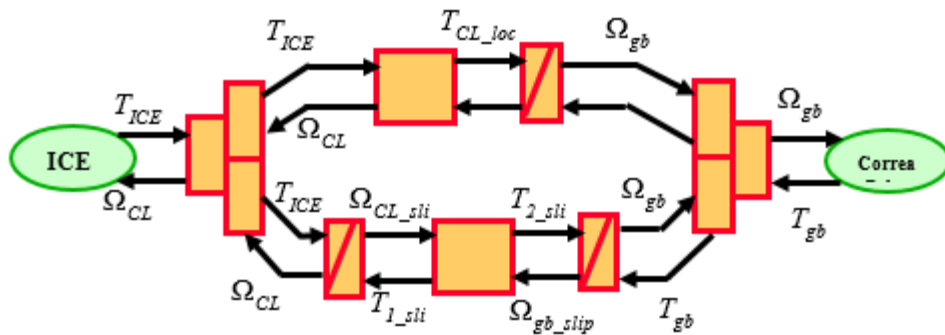
SOLANO MARTINEZ, Javier, Energy management of a hybrid electric vehicle: an approach based on type-2 fuzzy logic. Tesis Doctoral. The Gateway Leicester, U.K: De Montfort University, 2012.

## ANEXOS

### ANEXO A: MODELO DEL EMBRAGUE

Para futuros trabajos que desarrollen modelos más realistas de un motor de combustión interna para acoplar a las arquitecturas aquí desarrolladas, se recomienda incluir adicionalmente un modelo del embrague o Clutch que permita desconectar el movimiento del vehículo del motor combustión tal y como se haría en un automóvil convencional. La representación energética macroscópica sugerida para este dispositivo, se presenta en la figura 0.1.

#### REM para el embrague de un VEH Paralelo ó Serie – Paralelo. Actualización de [12]



En la bibliografía consultada, el autor propone dos modelos que se ejecutan simultáneamente y cambiando entre ellos conforme a la operación del sistema. El comportamiento de este embrague no es lineal y tiene dos estados en consideración:

Modelo 1: Cuando el embrague está abierto o desconectado, mostrado en la parte inferior de la figura A.1, las ecuaciones que modelan este estado son:

$$J_{ice} \frac{d}{d} \Omega_{cl} + f_{ice} \Omega_{cl} = T_{ice} - T_{1-slip} \quad (0.1)$$

$$J_{gb} \frac{d}{dt} \Omega_{gb} + f_{gb} \Omega_{gb} = T_{2-slip} - T_{gb} \quad (0.2)$$

$$T_{2-slip} = T_{1-slip} = 2F_n R_{clutch} \mu \quad (0.3)$$

$$F_n = F_{n\_max} \left[ 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{P_{clutch}}{100} - 1 \right)^2} \right] \quad (0.4)$$

$$\mu = \mu_{stat} - \alpha_{dyn} |\Omega_{cl} - \Omega_{gb}| \quad (0.5)$$

Donde  $T_{1-slip}$  y  $T_{2-slip}$  son señales de par producidas por el embrague,  $\Omega_{cl}$  y  $\Omega_{gb}$  son la velocidad primaria y secundaria del embrague,  $f_{ice}$ ,  $f_{gb}$  y  $J_{ice}$ ,  $J_{gb}$  son coeficientes de fricción y momentos de inercia del eje respectivamente; la función  $\mu$  hace referencia a los coeficientes de fricción del embrague:  $R_{clutch}$  es el radio promedio del plato de fricción y  $F_n$  es la acción de la fuerza normal.

Modelo 2: Cuando el embrague está bloqueado, el plato de fricción esta rígidamente acoplado con los platos primarios y secundarios, las ecuaciones resultantes son:

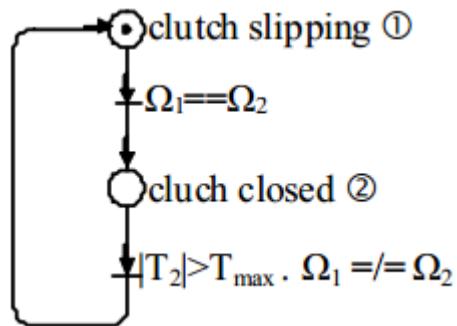
$$J_{lock} \frac{d}{dt} \Omega_{gb} + f_{lock} \Omega_{gb} = T_{ice} - T_{gb} \quad (0.6)$$

$$\begin{cases} f_{lock} = f_{ice} + f_{gb} \\ J_{lock} = J_{ice} + J_{gb} \end{cases} \quad (0.7)$$

$$\begin{cases} T_{lock} = T_{ice} \\ \Omega_{cl} = \Omega_{gb-lock} \end{cases} \quad (0.8)$$

El algoritmo que usa el selector se describe en la red de Petri mostrada en la figura 0.2, el estado inicial ① hace referencia a cuando el embrague esta desconectado y el ② cuando esta acoplado.

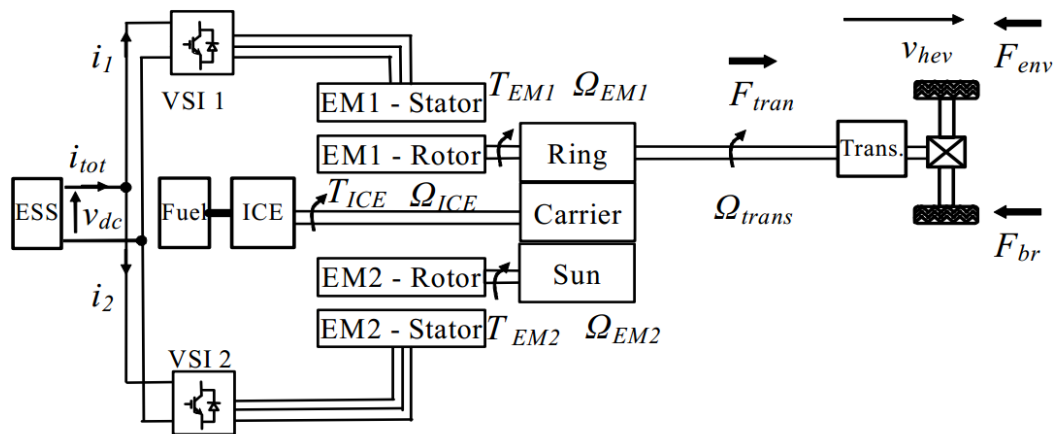
**Algoritmo para el selector del Embrague. [12]**



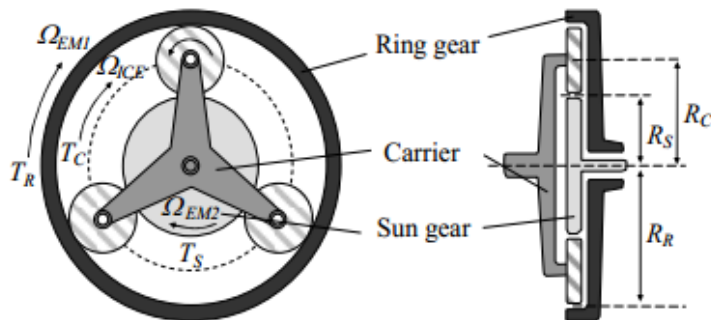
## ANEXO B. MODELO ENGRANE PLANETARIO

La arquitectura más popular en los Vehículos Híbridos es la Serie – Paralelo, usada en el Toyota Prius, la cual usa un engrane planetario para acoplar la potencia mecánica del motor de combustión y las máquinas eléctricas. Este engrane permite operar a la maquina térmica en su punto óptimo [10]. Un esquema general de un VEH Serie – Paralelo con engrane planetario se muestra en la figura A.3.

### VEH Serie – Paralelo con engrane planetario [10].

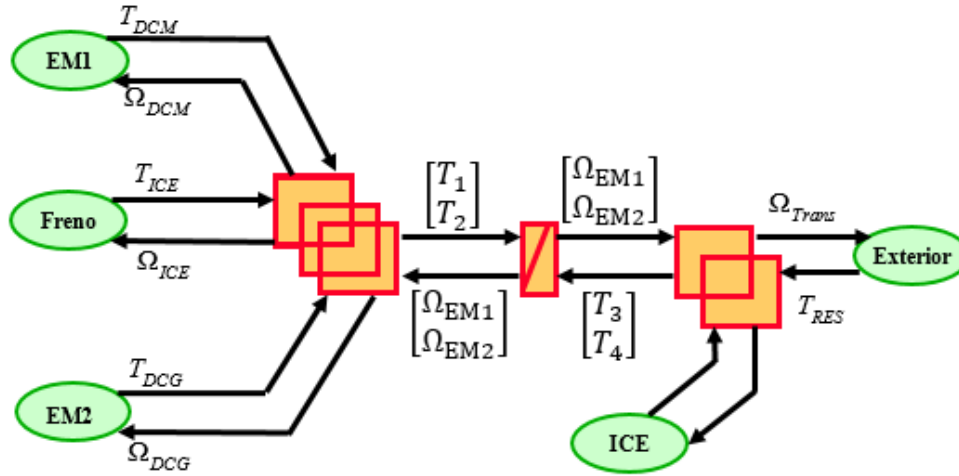


### Esquema General de un engrane planetario. [10]



Este dispositivo puede modelarse usando la Representación Energética Macroscópica como se muestra en la figura A.5. El acople de la izquierda en esta figura está descrito por la ecuación A.9.

## REM de Engrane Planetario. Actualización de [10]



$$\begin{cases} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{EM1} \\ T_{br} \\ T_{EM2} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \Omega_{EM1} \\ \Omega_{tran} \\ \Omega_{EM2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Omega_{EM1} \\ \Omega_{EM2} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (0.9)$$

El elemento de acumulación de energía que representa el efecto de los momentos de inercia de los ejes acoplados en el engrane ( $J_{em1}$ ,  $J_{em2}$  y  $J_{ice}$ ) y sus coeficientes de fricción ( $f_{em1}$ ,  $f_{em2}$ ,  $f_{ice}$ ) está descrito en la ecuación diferencial matricial A.10., donde  $K_r$  y  $k_s$  son las relaciones entre los radios que componen al engrane planetario y  $J_{eq}$  el momento de inercia equivalente del vehículo.

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} J_{EM1} + J_{eq} + K_R^2 J_{ICE} & k_R k_S J_{ICE} \\ k_R k_S J_{ICE} & k_S^2 J_{ICE} + J_{EM2} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Omega_{EM1} \\ \Omega_{EM2} \end{bmatrix} \\ & = - \begin{bmatrix} f_{EM1} + K_R^2 f_{ICE} & k_R k_S f_{ICE} \\ k_R k_S f_{ICE} & k_S^2 f_{ICE} + f_{EM2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Omega_{EM1} \\ \Omega_{EM2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} T_3 \\ T_4 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (0.10)$$

El acople de la derecha en el la figura A.5 obedece a ecuación A.11.

$$\left\{ \begin{array}{l} \begin{bmatrix} T_3 \\ T_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -k_R \\ 0 & -k_S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{res} \\ T_{ICE} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \Omega_{trans} \\ \Omega_{ICE} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ k_R & k_S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Omega_{EM1} \\ \Omega_{EM2} \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (0.11)$$

Estas ecuaciones son el resultado del autor de la referencia consultada **[10]**, en la búsqueda de obtener un modelo único para todas las arquitecturas de los vehículos eléctricos híbridos.

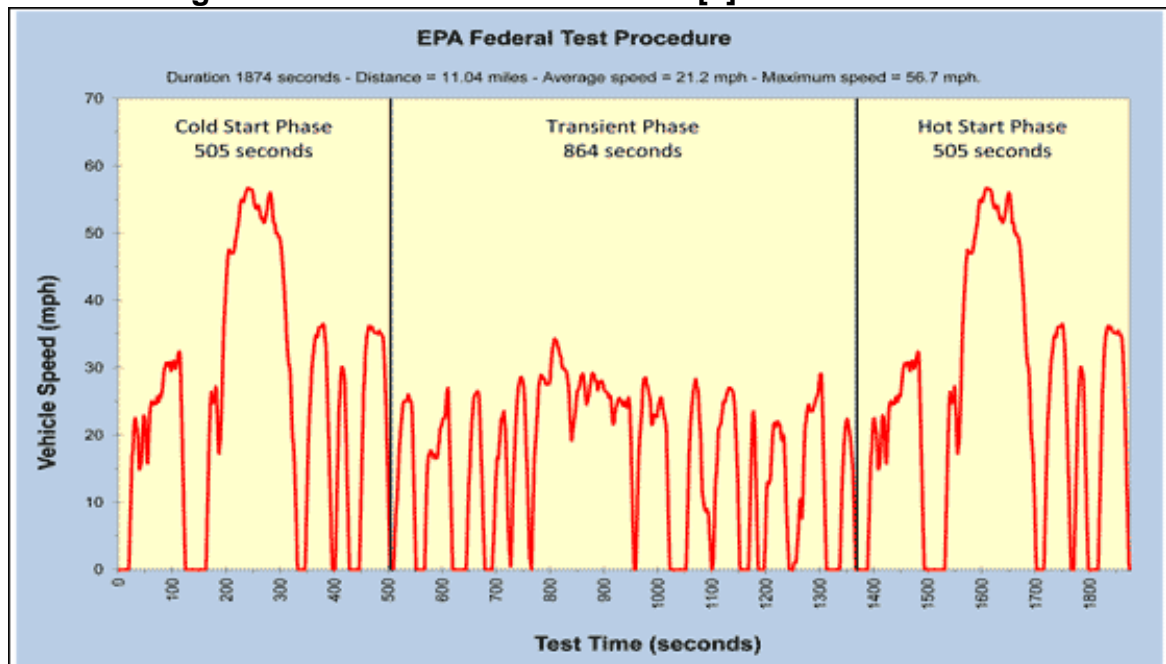
## ANEXO C. RESULTADOS CON OTROS CICLOS DE CONDUCCIÓN

Se presentan los resultados de las simulaciones con la misma metodología presentada en el capítulo 4.

### FTP –EPA

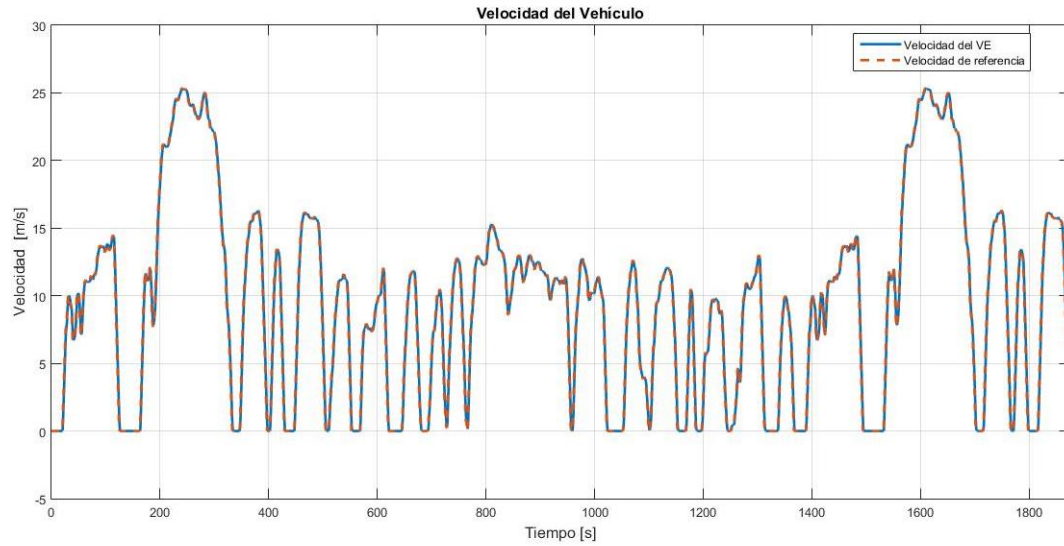
El FTP (Federal Test Procedure) es un ciclo de prueba desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) publicado en 1996 como parte de una prueba para evaluar las emisiones contaminantes en vehículos de trabajo ligero y pequeños camiones; esta propone simular el comportamiento del conductor, las rápidas fluctuaciones de velocidad, el comportamiento al volante tras el arranque y el uso del aire acondicionado [7]. Las características de este ciclo se muestran en la figura A.6.

### Información general del Ciclo de Prueba FTP [7]

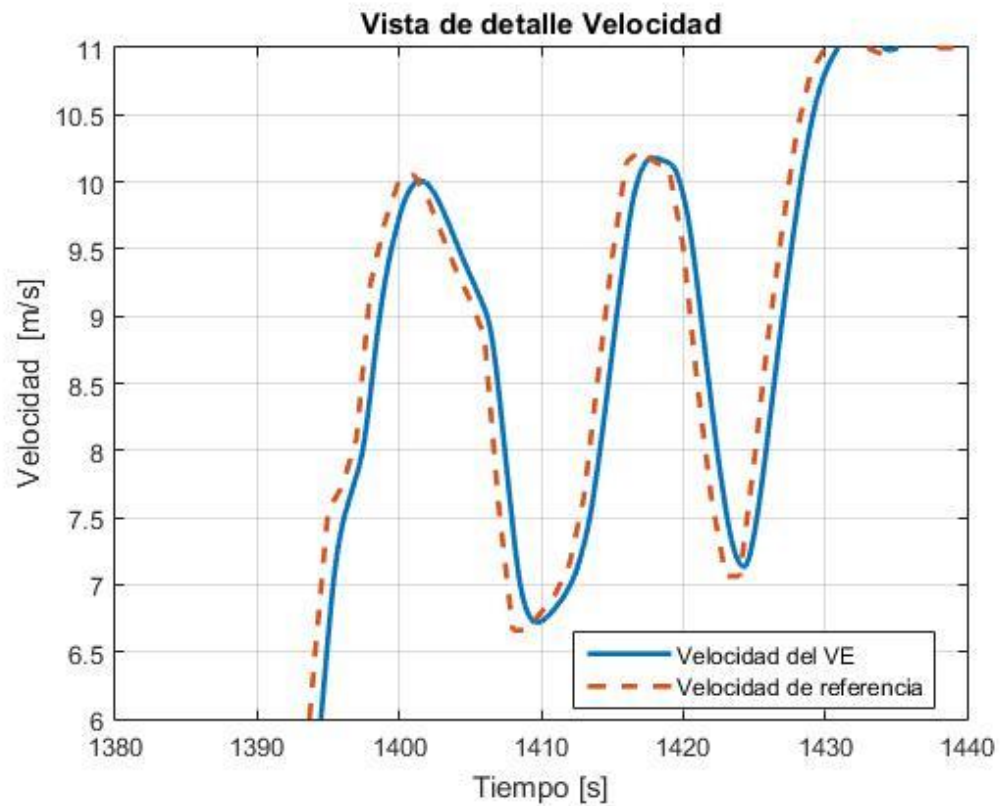


## RESULTADOS VEHÍCULO ELÉCTRICO

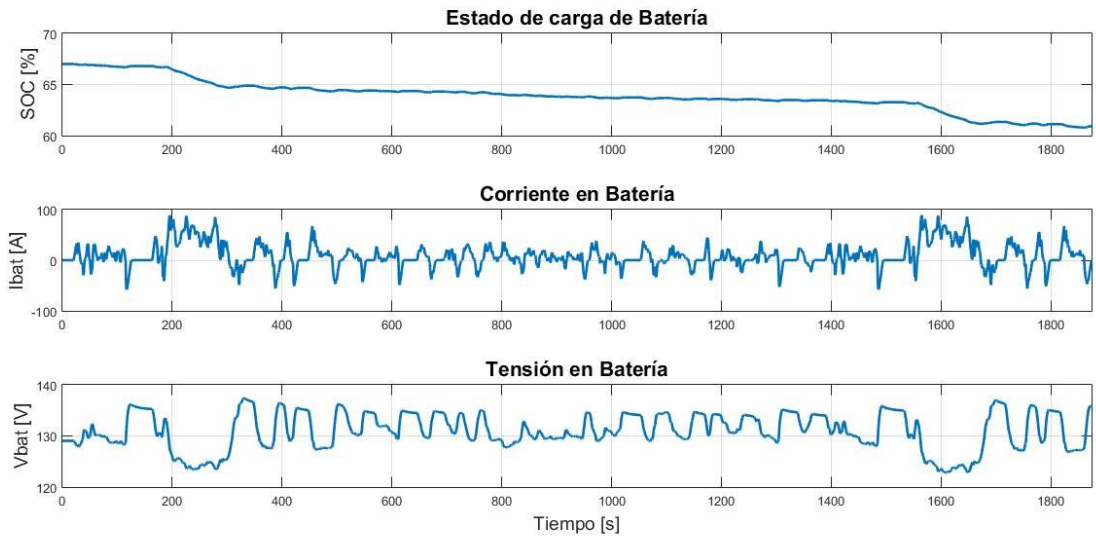
### Velocidad del Vehículo Eléctrico probado con FTP



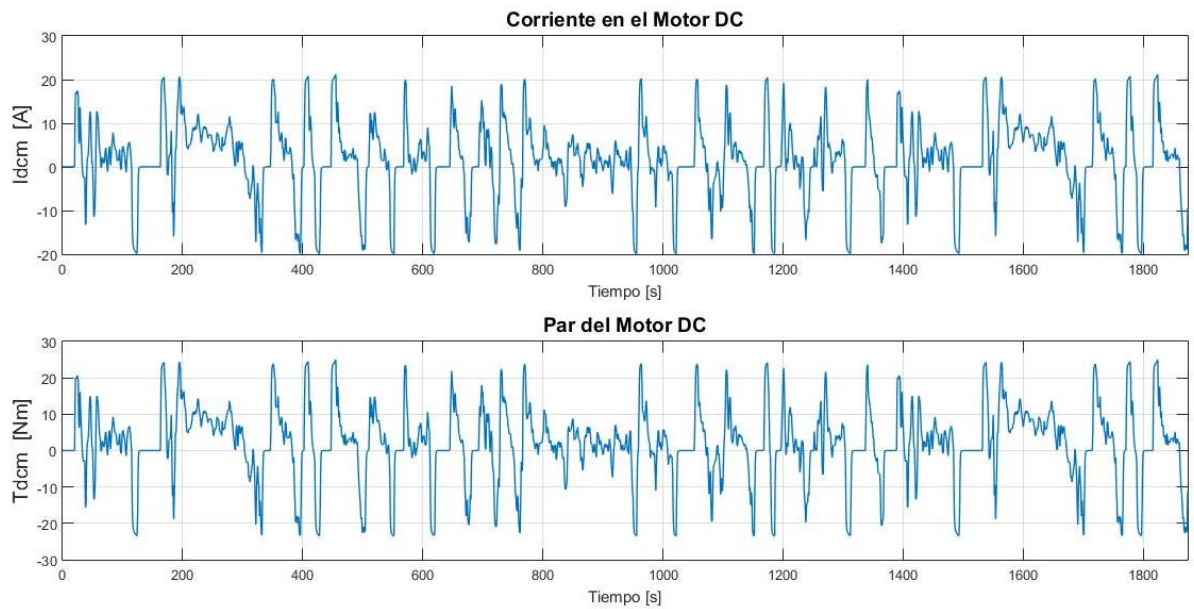
### Figura Vista de detalle de la Figura anterior



## Comportamiento de la Batería en el Vehículo Eléctrico probado con FTP

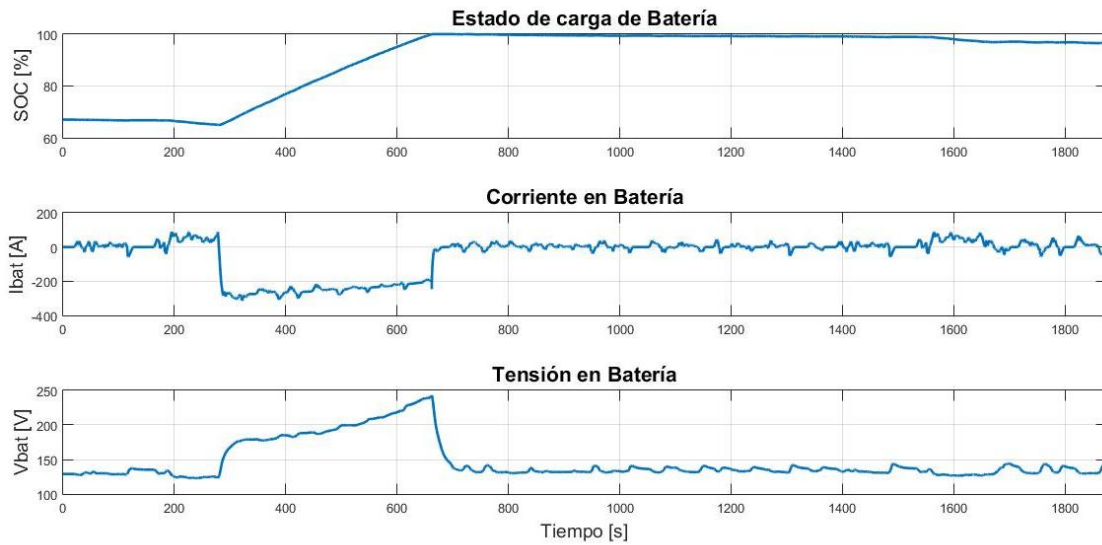


## Comportamiento del motor DC del VE probado con FTP

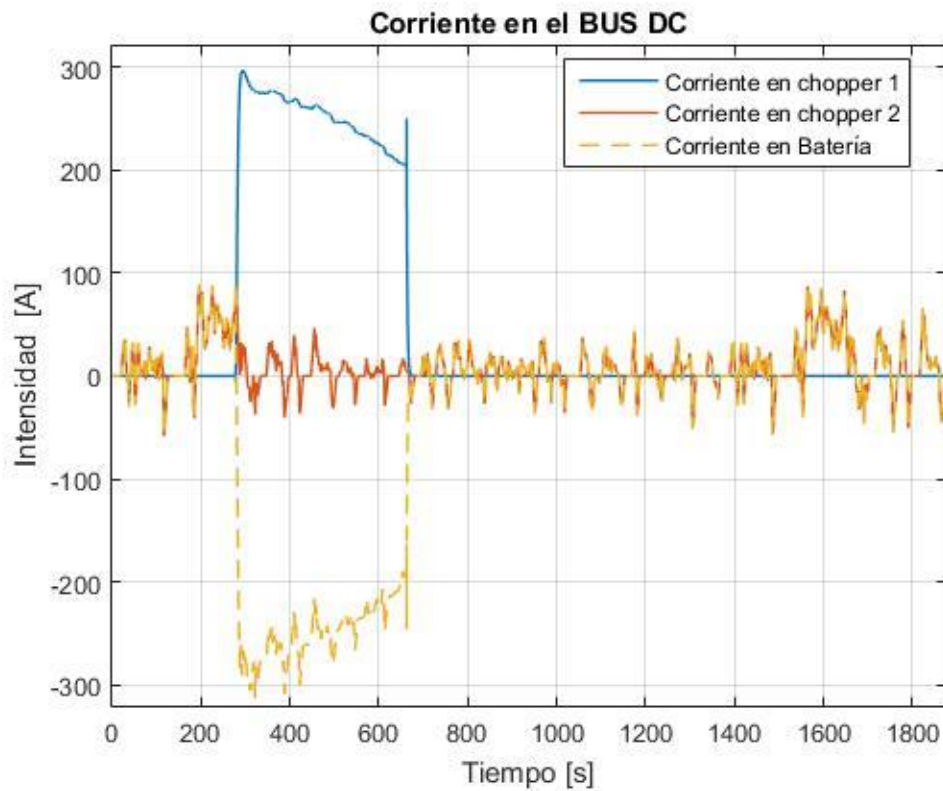


## RESULTADOS VEH SERIE

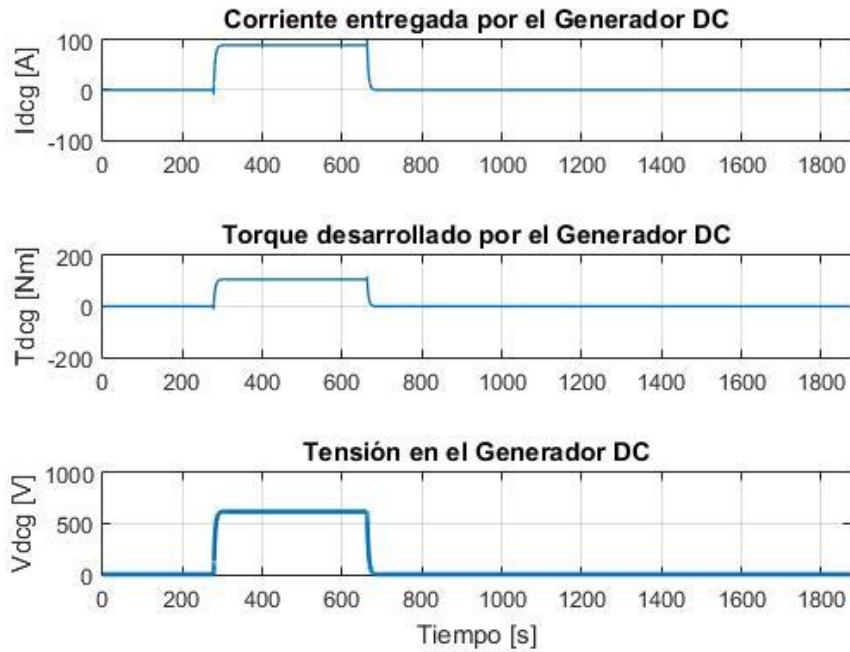
### Comportamiento de la Batería en el VEH Serie probado con FTP



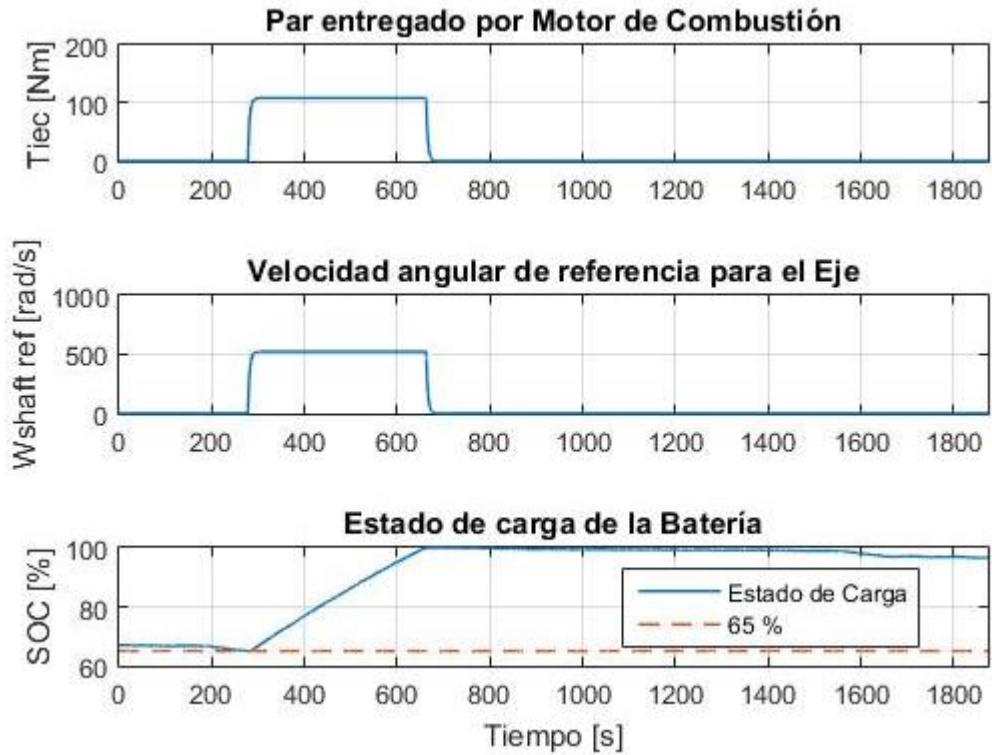
### Corrientes en el BUS DC VEH Serie probado con FTP



## Comportamiento del Generador DC del VEH Serie probado con FTP

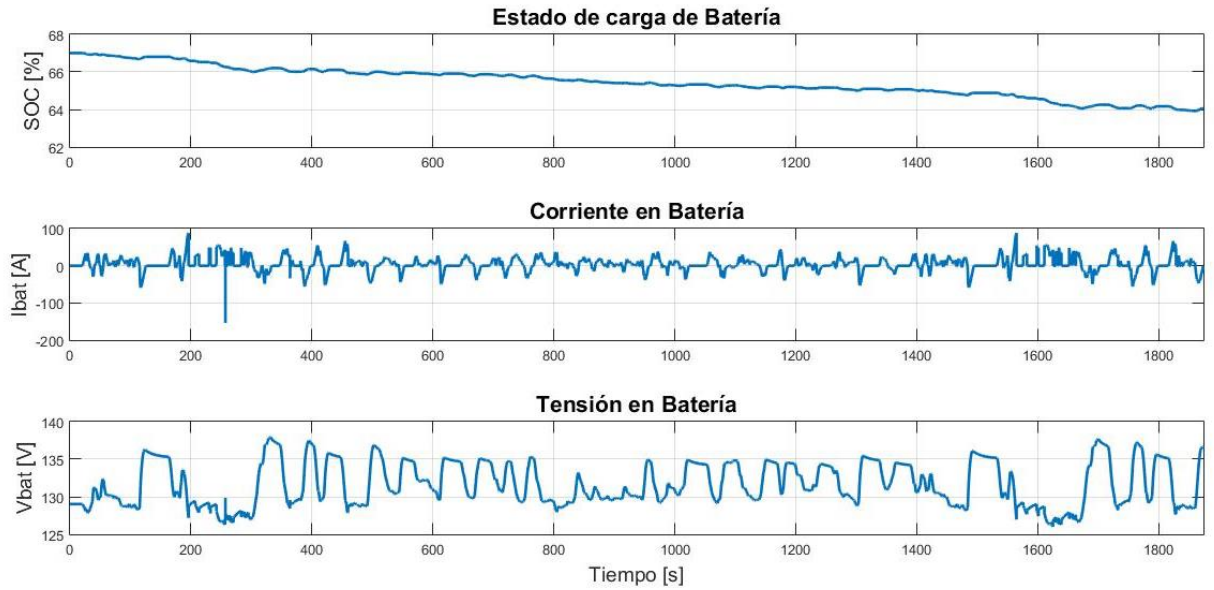


## Operación de Bloque de Gestión de Energía en VEH Serie probado con FTP

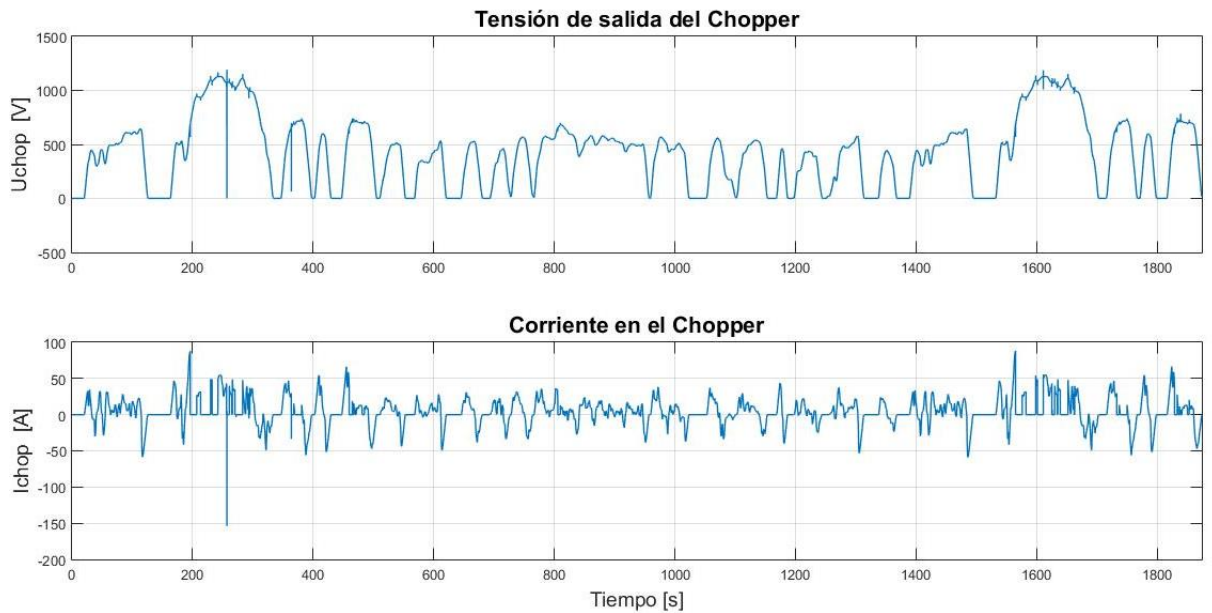


## RESULTADOS VEH PARALELO

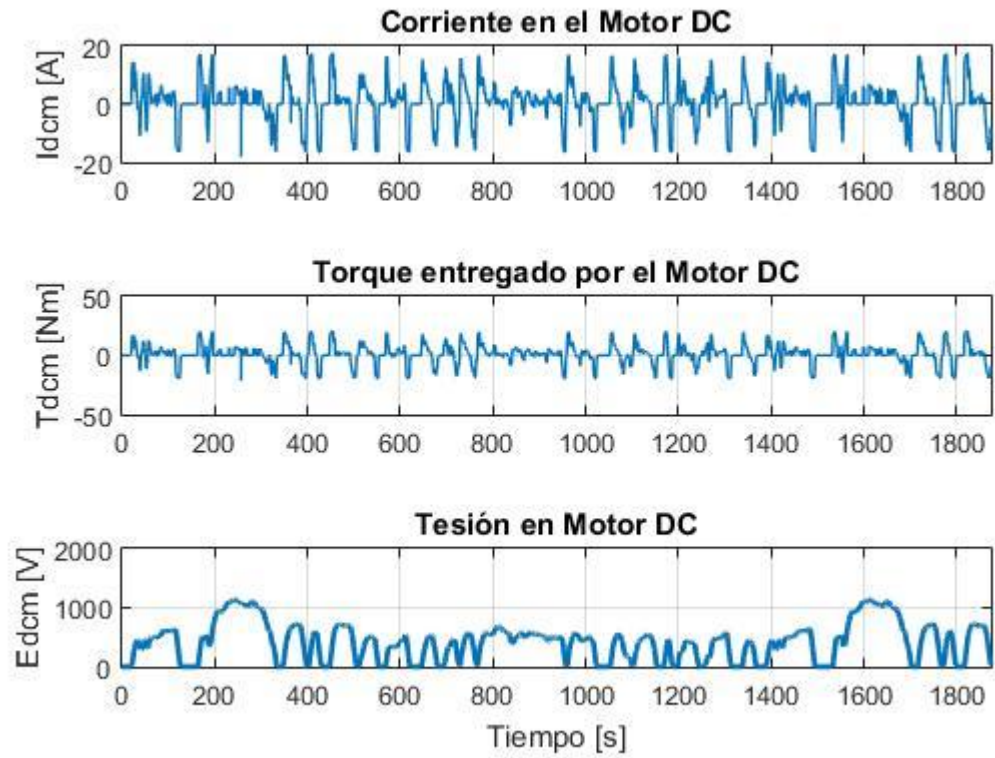
### Comportamiento de la Batería en el VEH Paralelo probado con FTP



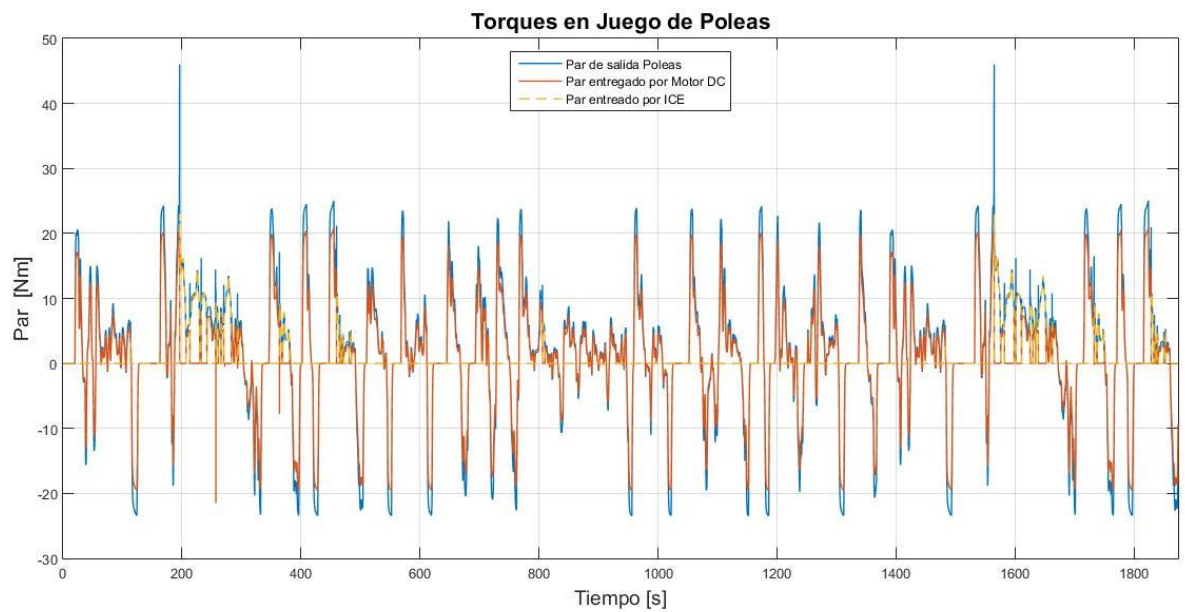
### Comportamiento del Chopper en VEH Paralelo probado con FTP



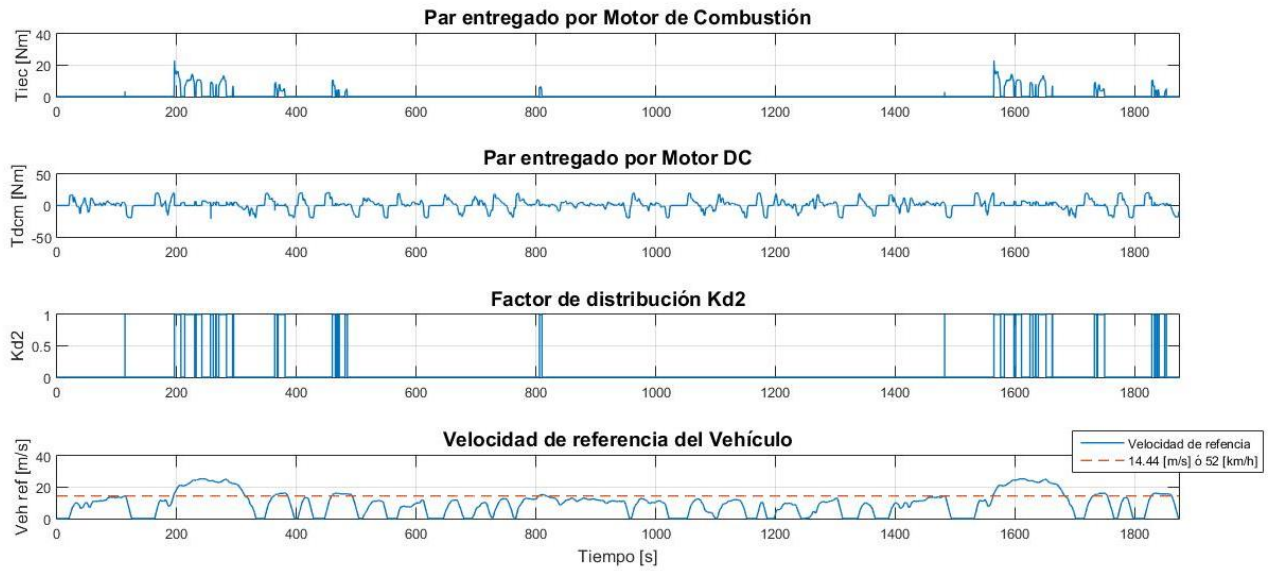
## Comportamiento del Motor DC en VEH Paralelo con FTP



## Torques en el Juego de Poleas en VEH Paralelo probado con FTP

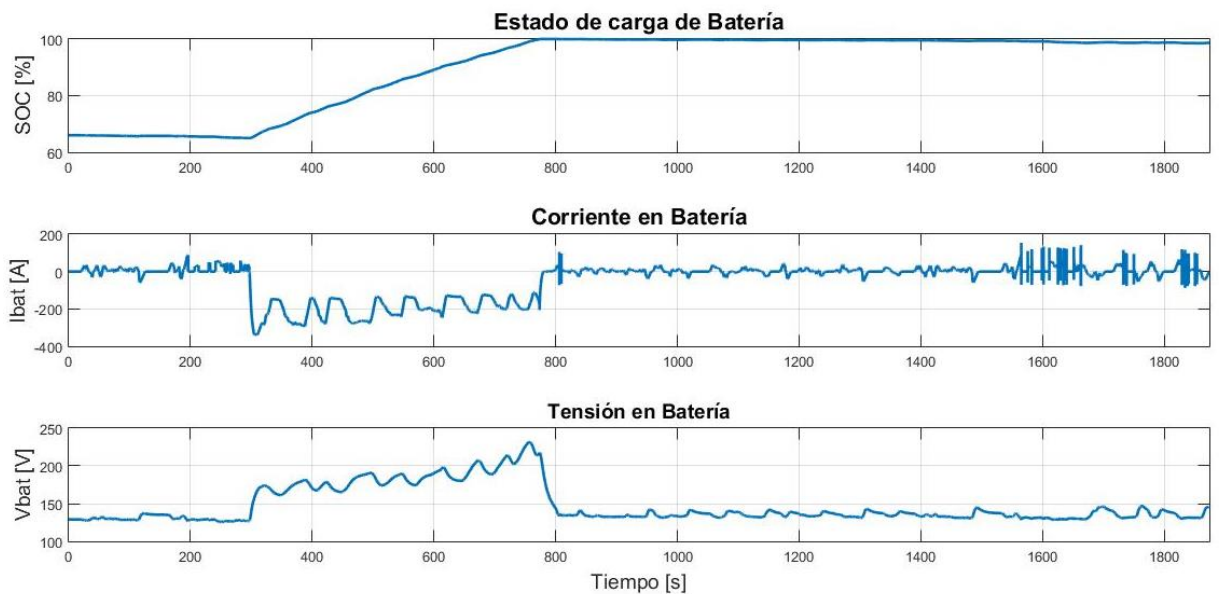


## Operación de Bloque de Gestión de Energía en VEH Paralelo Probado con FTP

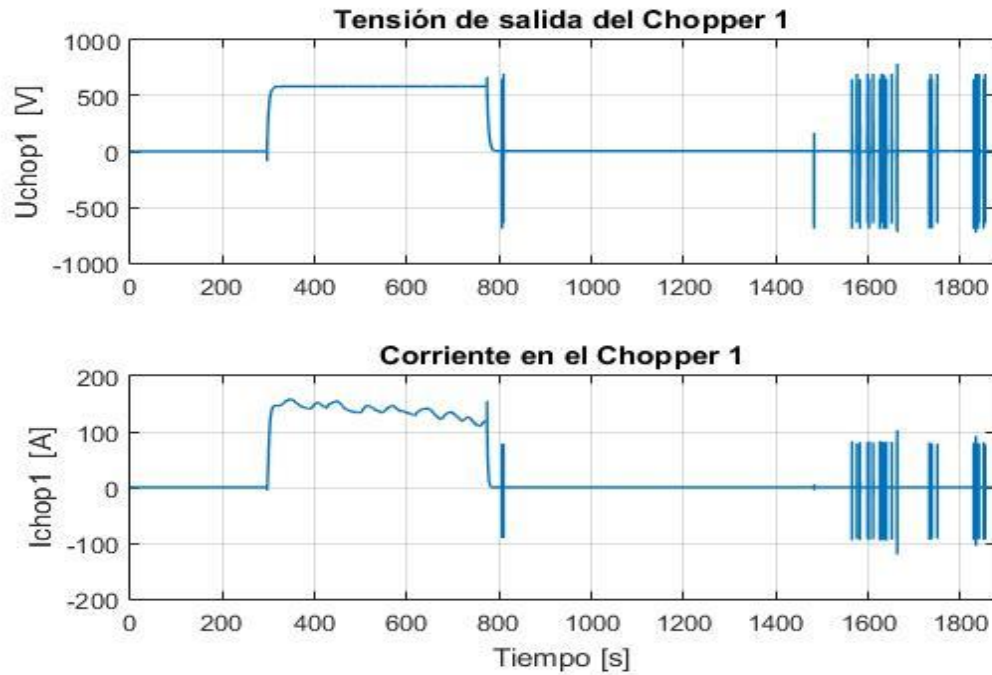


## RESULTADOS VEH SERIE – PARALELO

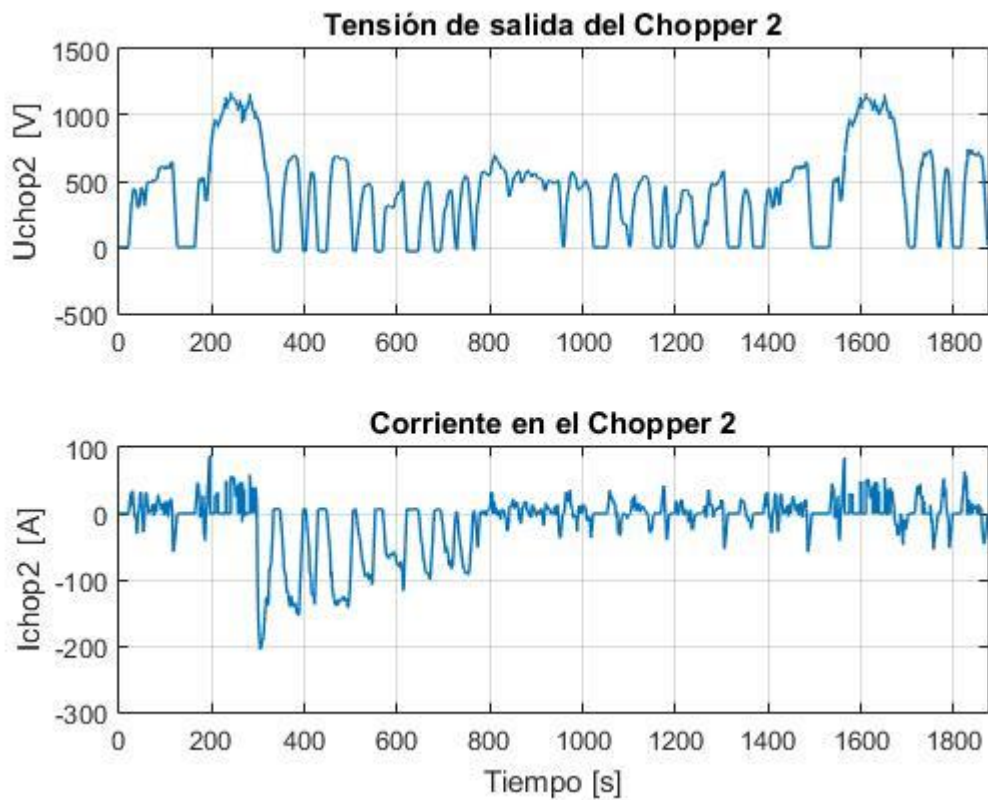
### Comportamiento de la Batería en el VEH Serie –Paralelo probado con FTP



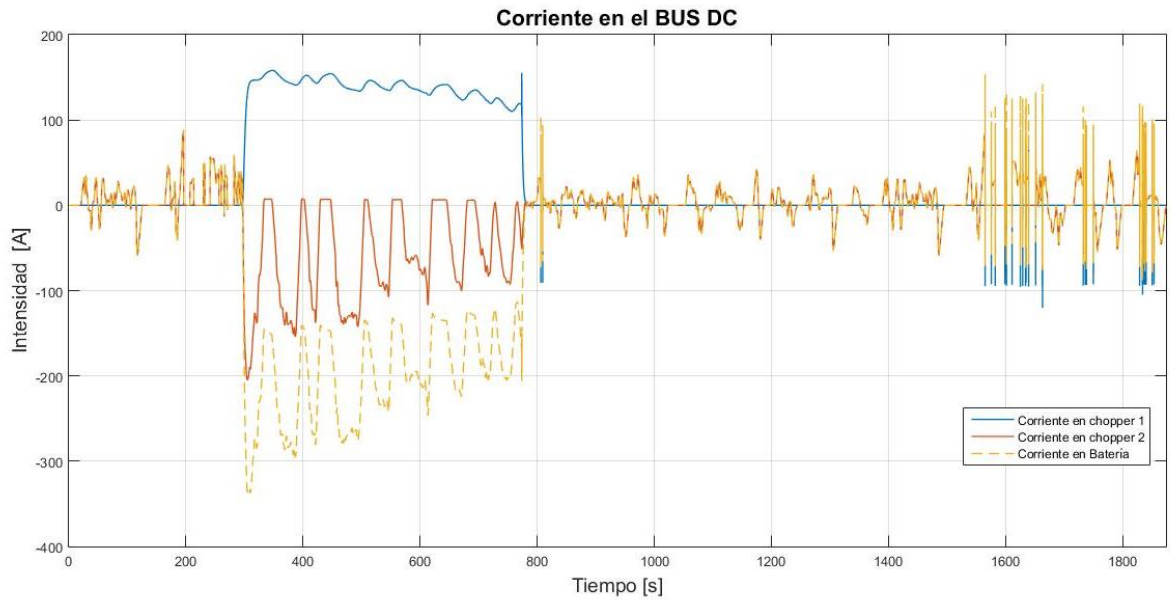
### Comportamiento del Chopper 1 en el VEH Serie –Paralelo probado con FTP



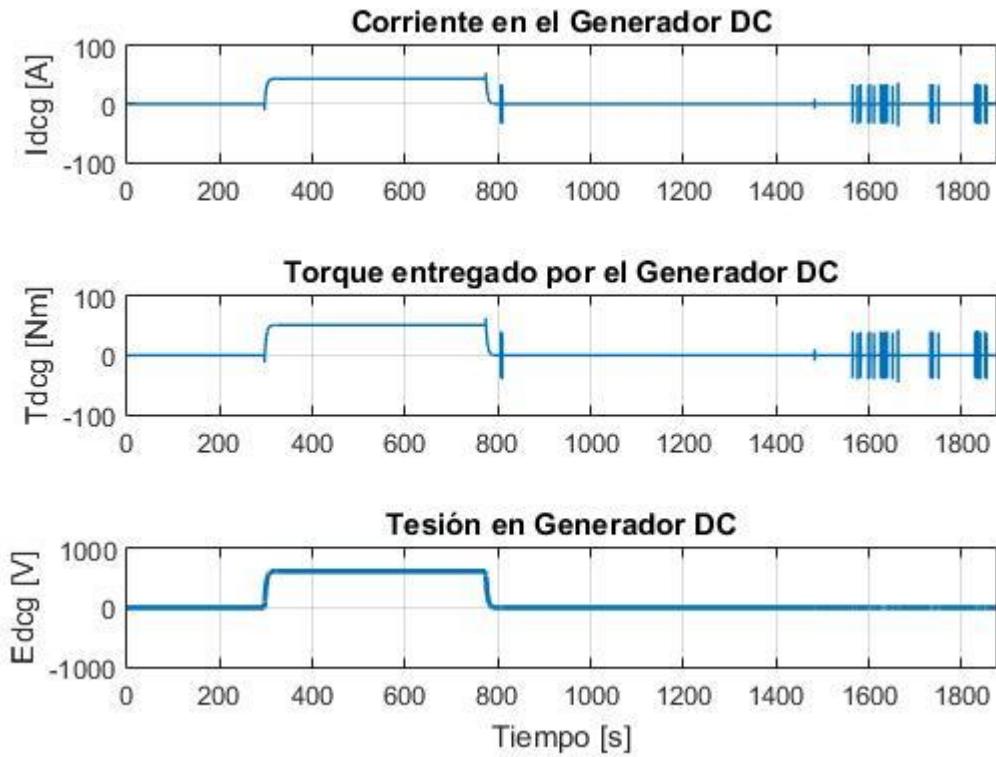
### Comportamiento del Chopper 2 en el VEH Serie – Paralelo probado con FTP



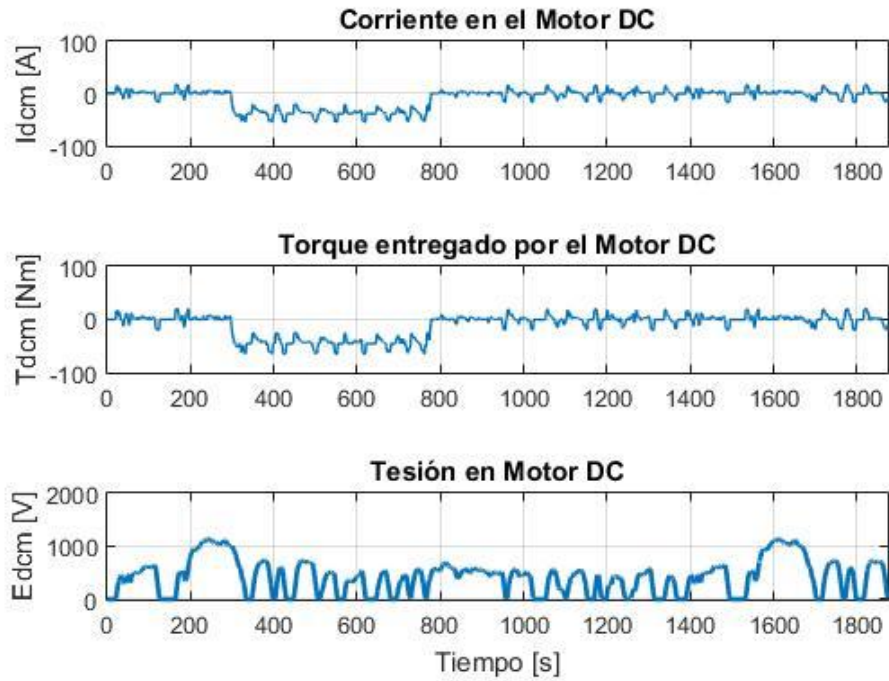
### Corrientes en el Bus DC en VEH Serie –Paralelo probado con FTP



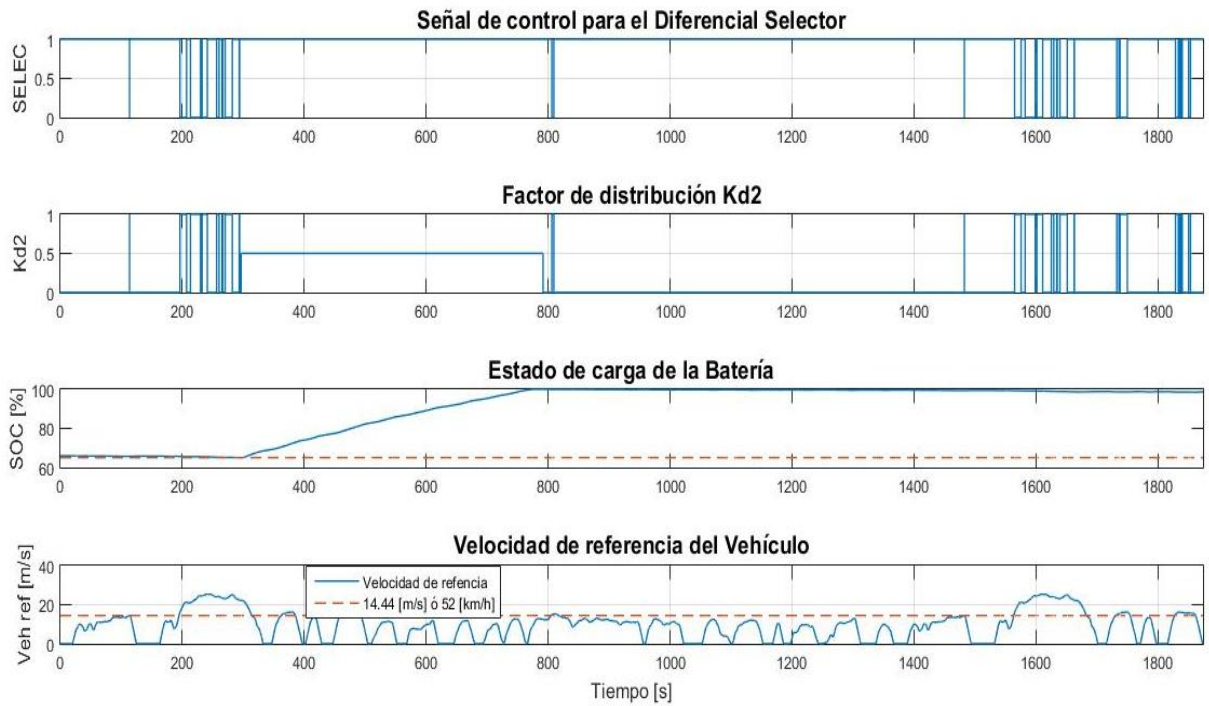
**Comportamiento de Generador DC en el VEH Serie – Paralelo probado con FTP**



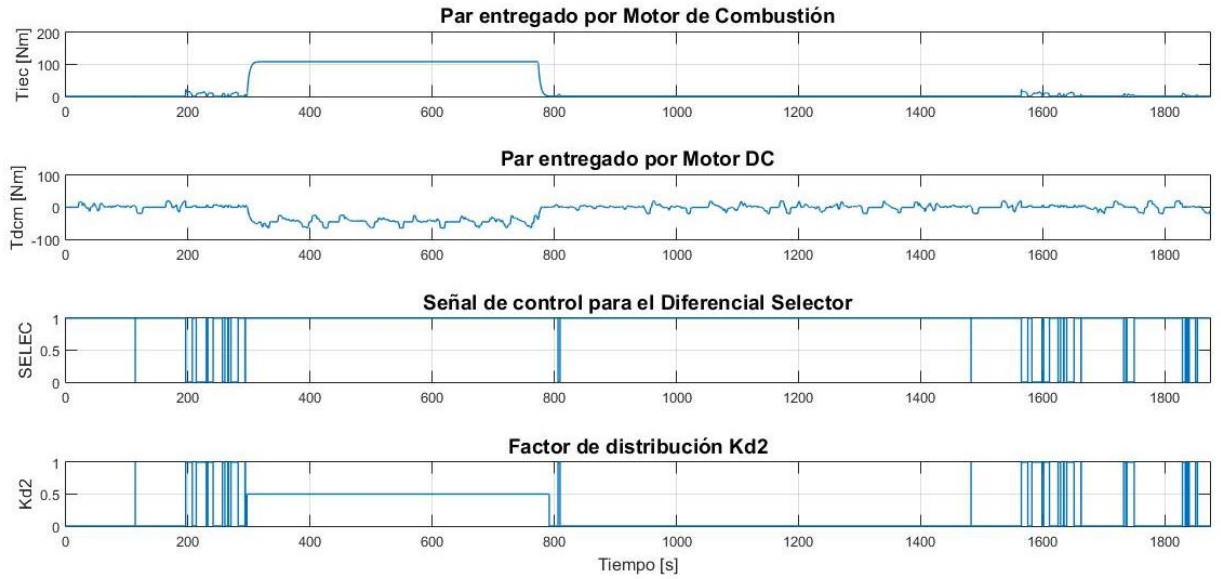
## Comportamiento de Motor DC en el VEH Serie – Paralelo probado con FTP



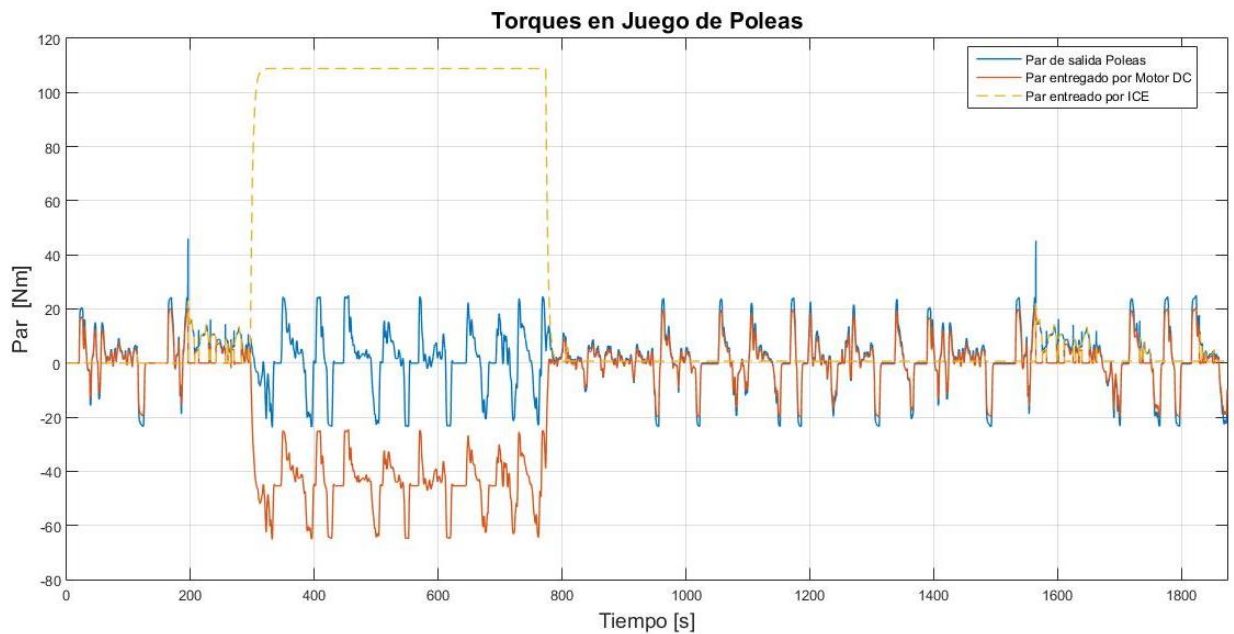
## Operación de Bloque de Gestión de Energía en VEH Serie –Paralelo probado con FTP



## Operación del Bloque de Gestión de Energía en VEH Serie – Paralelo probado con FTP



## Torques en el Juego de Poleas del VEH Serie – Paralelo Probado con FTP



### WLTP CLASS 3

El WLTP (abreviatura de “Worldwide harmonized light vehicles test procedure”) es un conjunto de ciclos de conducción diseñados para evaluar las emisiones y consumo de combustible en vehículos ligeros, desarrollado por la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas con el grupo de trabajo sobre Polución y energía UN ECE GRPE [13]. Las Pruebas se dividen en tres clases según la relación de potencia y peso de los vehículos como se muestra en la tabla.

#### Categorías de las pruebas WLTP [13]

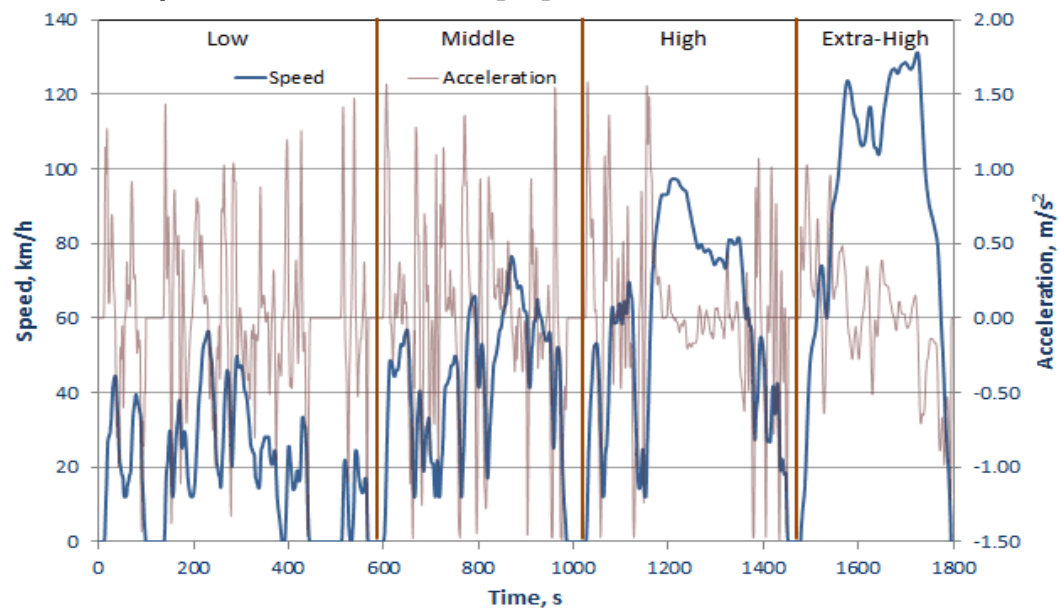
Category	PMR, W/kg	Speed Phases	Comments
Class 3	PMR > 34	Low, Middle, High, Extra-High	If v_max < 135 km/h, phase 'extra-high' is replaced by a repetition of phase 'low'.
Class 2	34 ≥ PMR > 22	Low, Middle, High	If v_max < 90 km/h, phase 'high' is replaced by a repetition of phase 'low'.
Class 1	PMR ≤ 22	Low, Middle	If v_max ≥ 70 km/h, phase 'low' is repeated after phase 'middle'. If v_max < 70 km/h, phase 'middle' is replaced by a repetition of phase 'low'.

Para este trabajo se ha escogido la clase 3 debido a su duración; Se espera que estos ciclos de conducción reemplacen al NEDC en las regulaciones europeas. Las características generales de este ciclo se muestran en la tabla y su forma en la figura 0.25.

### Datos Generales de WLTP Class 3 [13]

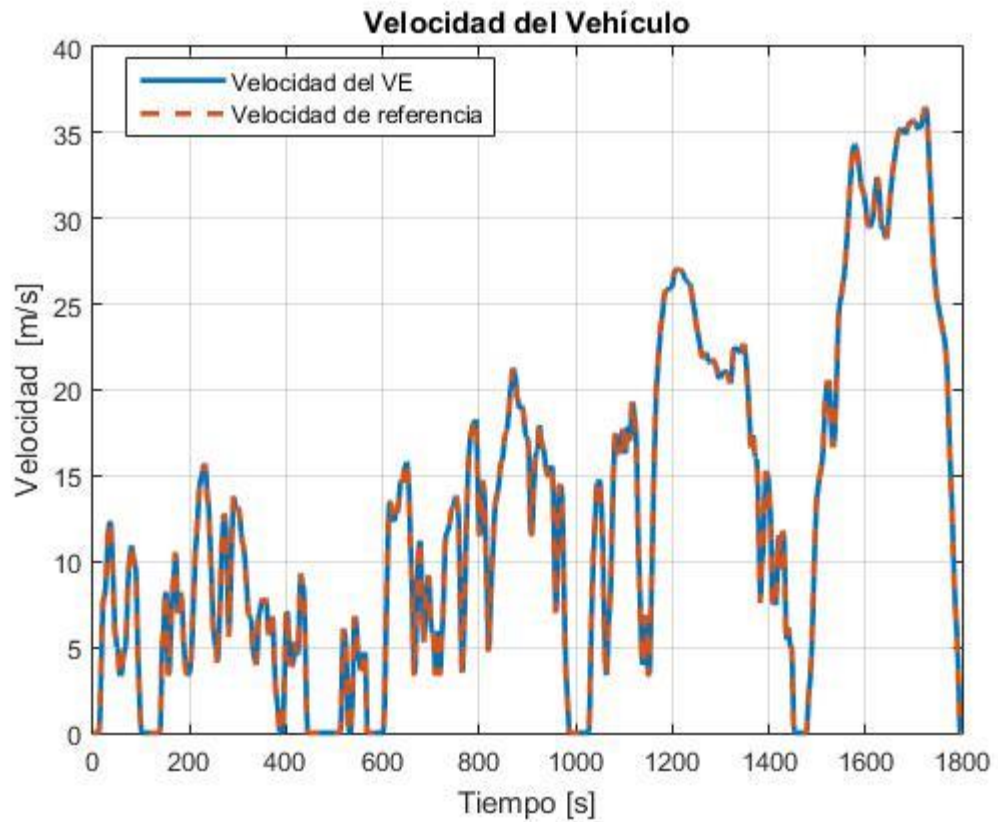
Phase	Duration	Stop Duration	Distance	p_stop	v_max	v_ave w/o stops	v_ave w/ stops	a_min	a_max
	s	s	m		km/h	km/h	km/h	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>
Low	589	156	3095	26.5%	56.5	25.7	18.9	-1.47	1.47
Middle	433	48	4756	11.1%	76.6	44.5	39.5	-1.49	1.57
High	455	31	7158	6.8%	97.4	60.8	56.6	-1.49	1.58
Extra-High	323	7	8254	2.2%	131.3	94.0	92.0	-1.21	1.03
Total	1800	242	23262						

### Clicclo de prueba WLTP Class 3 [13]

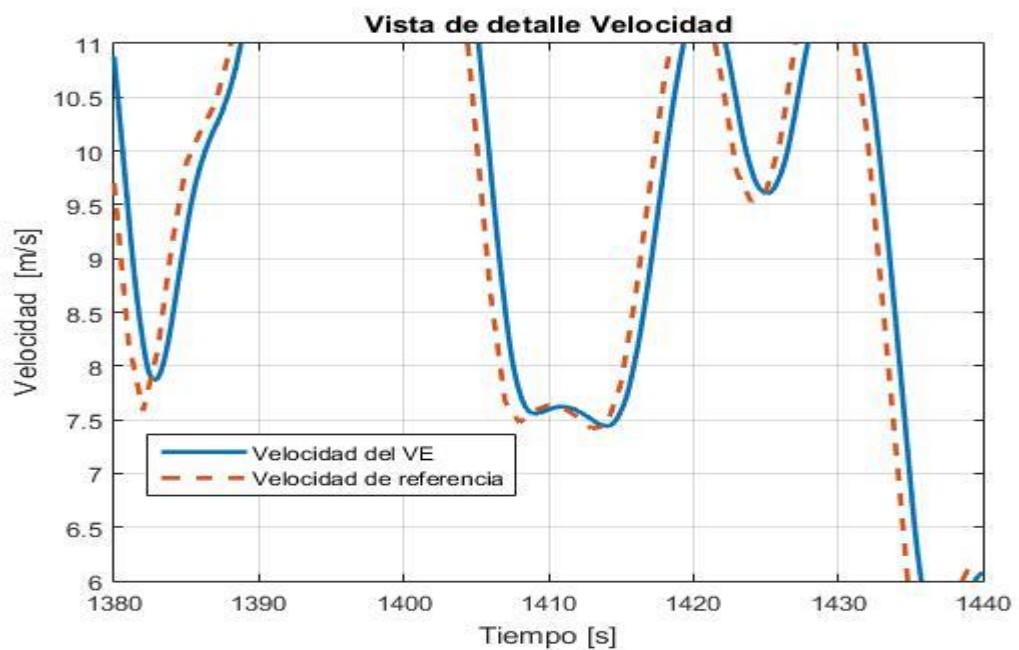


## RESULTADOS VEHÍCULO ELÉCTRICO

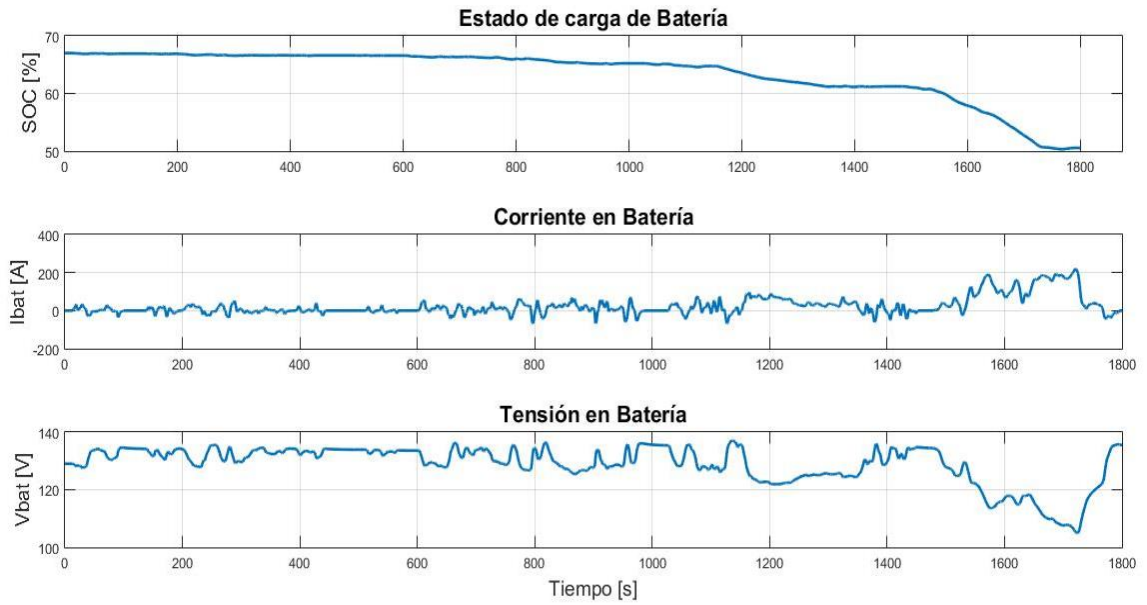
### Velocidad del Vehículo Eléctrico probado con WLTP class 3



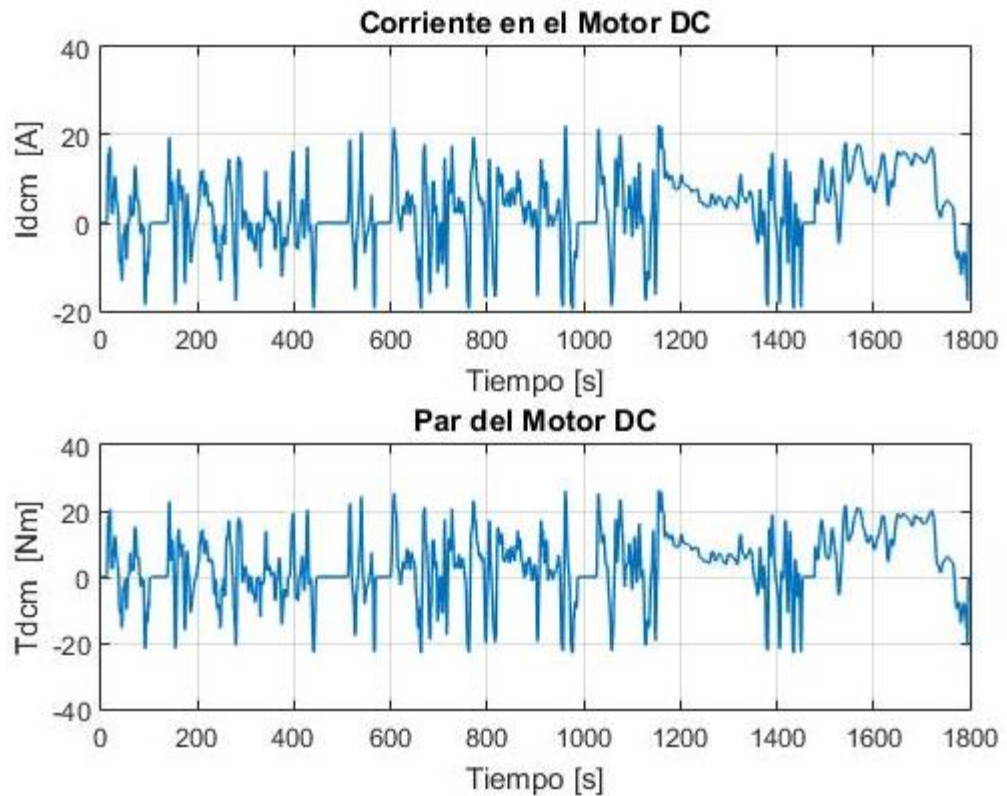
### Detalle de la Figura A.30



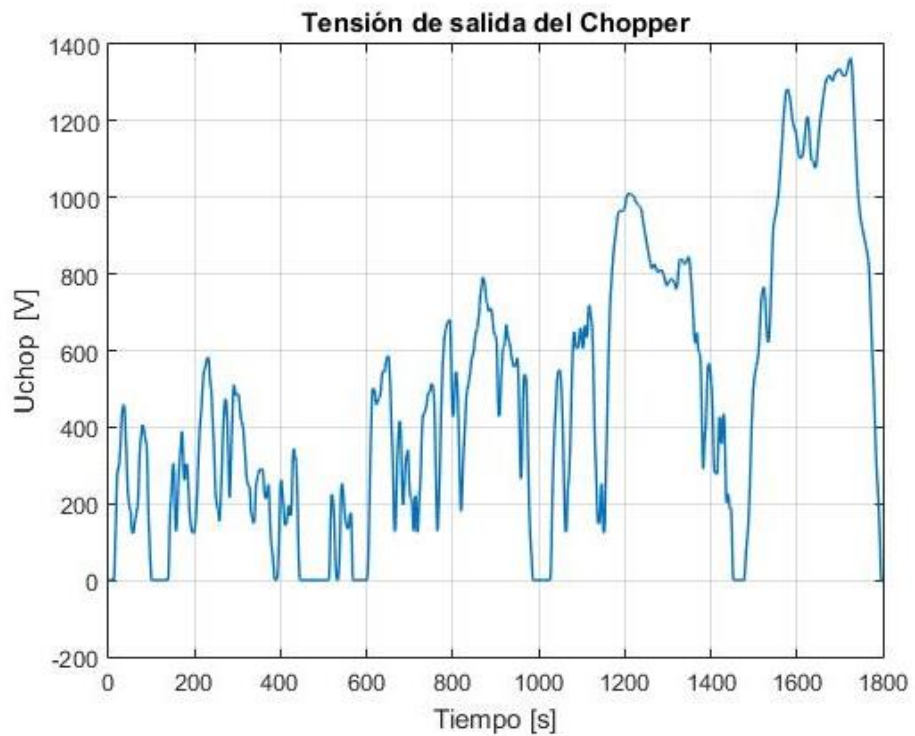
## Comportamiento de la Batería en el Vehículo Eléctrico probado con WLTP class 3



## Comportamiento del Motor DC en el Vehículo Eléctrico probado con WLTP class 3.

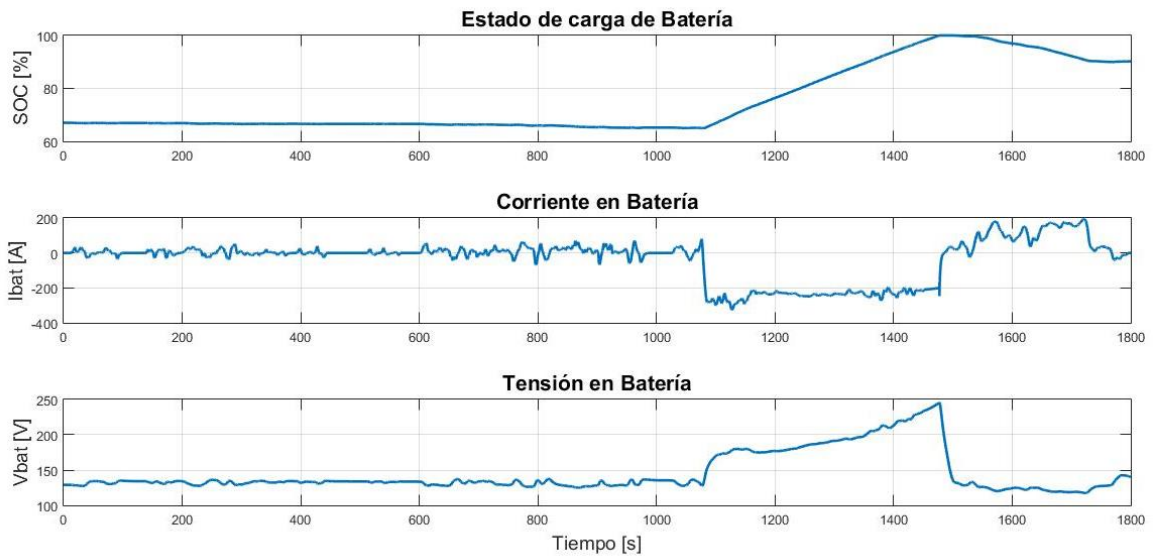


**Tensión de salida en el Chopper del Vehículo Eléctrico probado con WLTP class 3.**

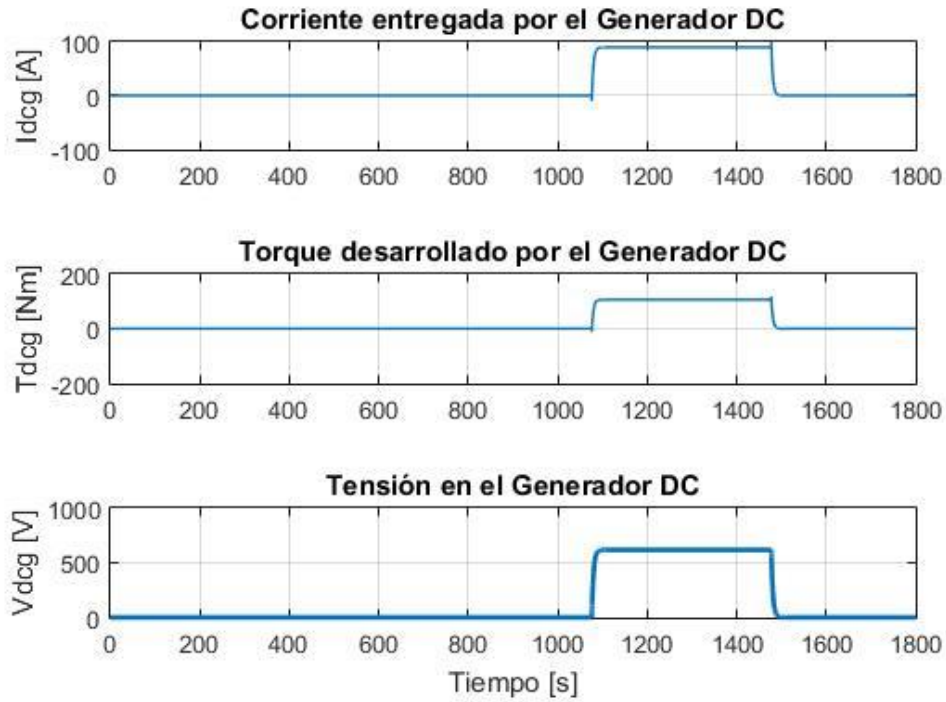


**RESULTADOS VEH SERIE**

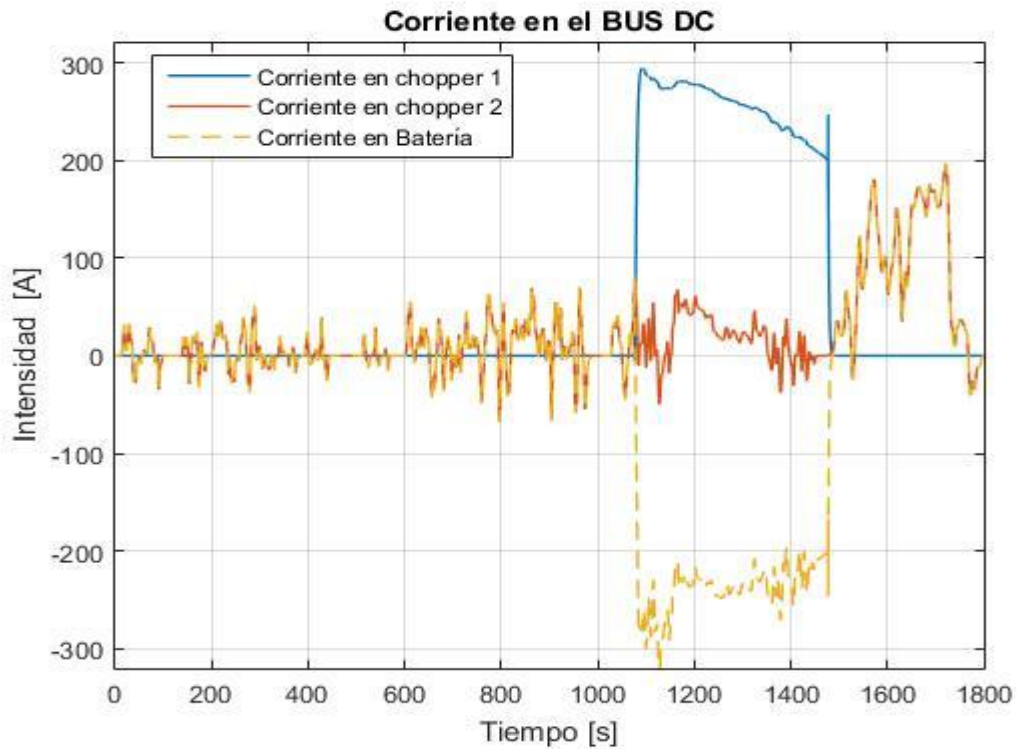
**Comportamiento de la Batería en el VEH Serie probado con WLTP class 3.**



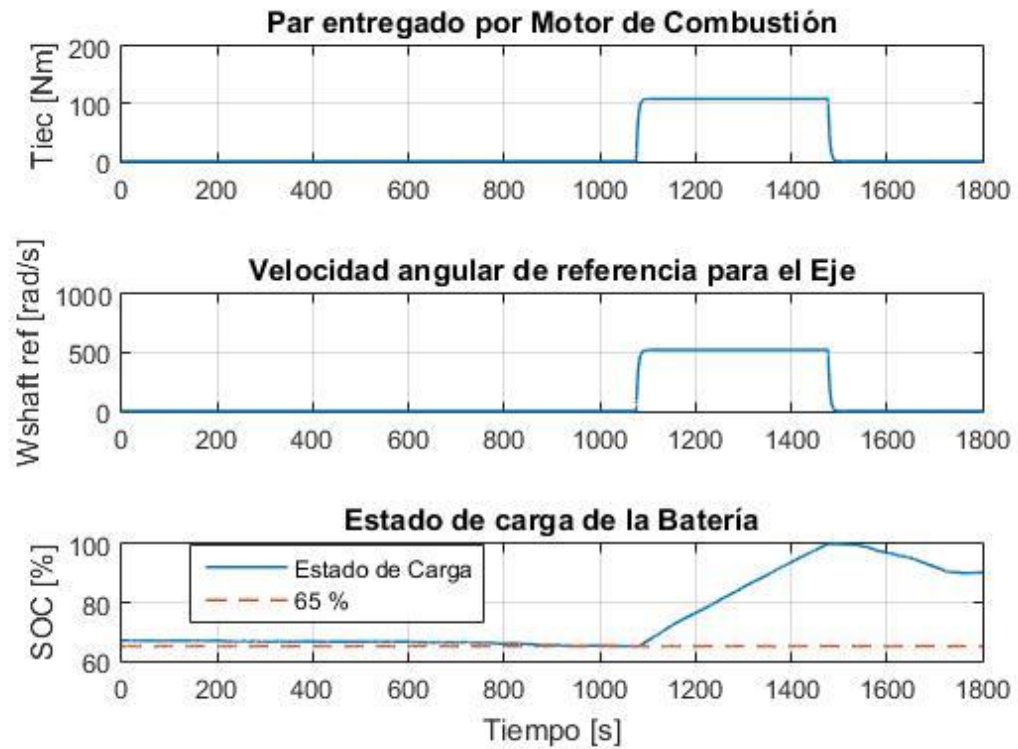
### Comportamiento del Generador DC en VEH Serie probado con WLTP class3.



### Corrientes en el Bus DC de VEH Serie probado con WLTP class 3

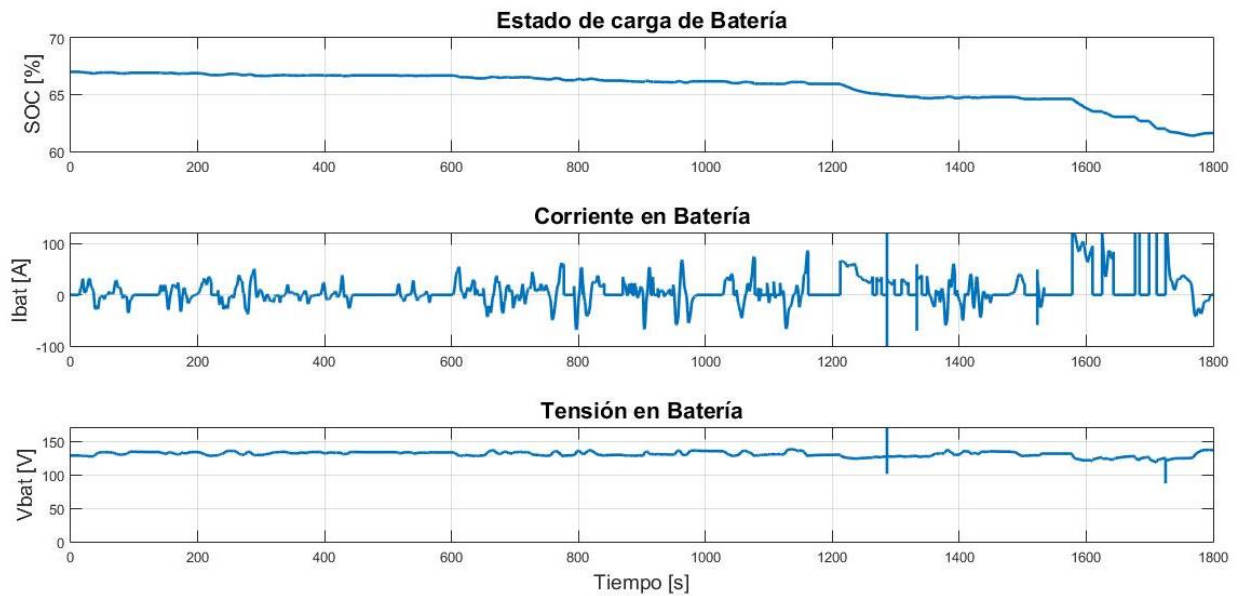


### Operación del bloque de Gestión de Energía en VEH Serie probado con WLTP class 3.

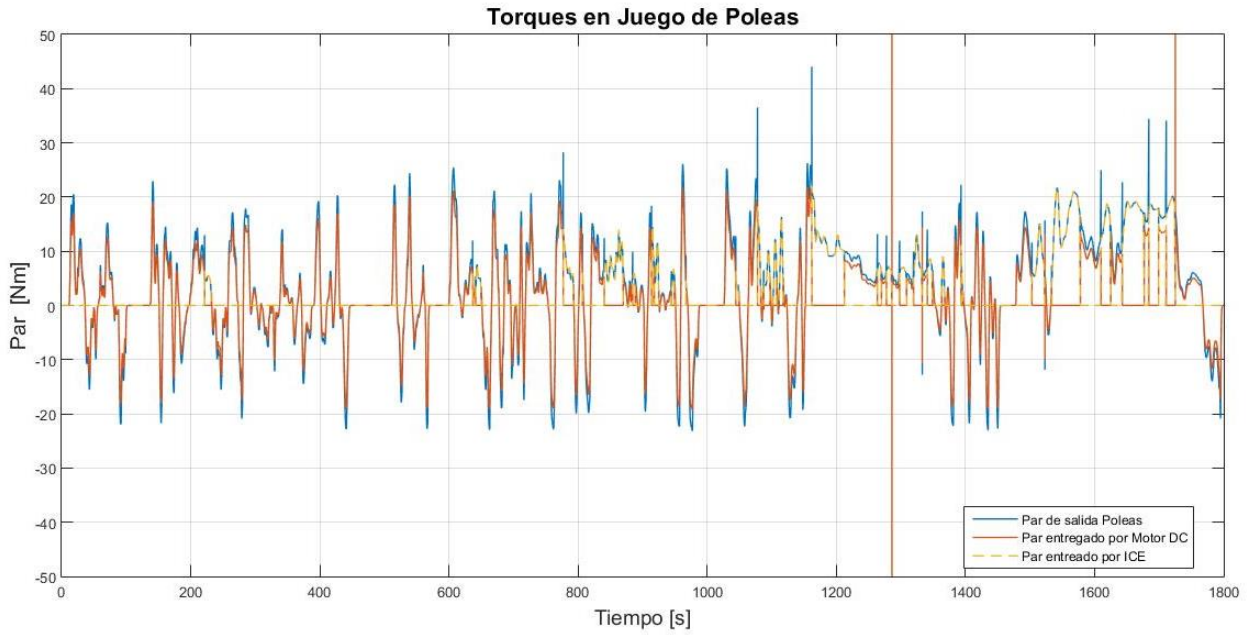


### Resultados VEH Paralelo

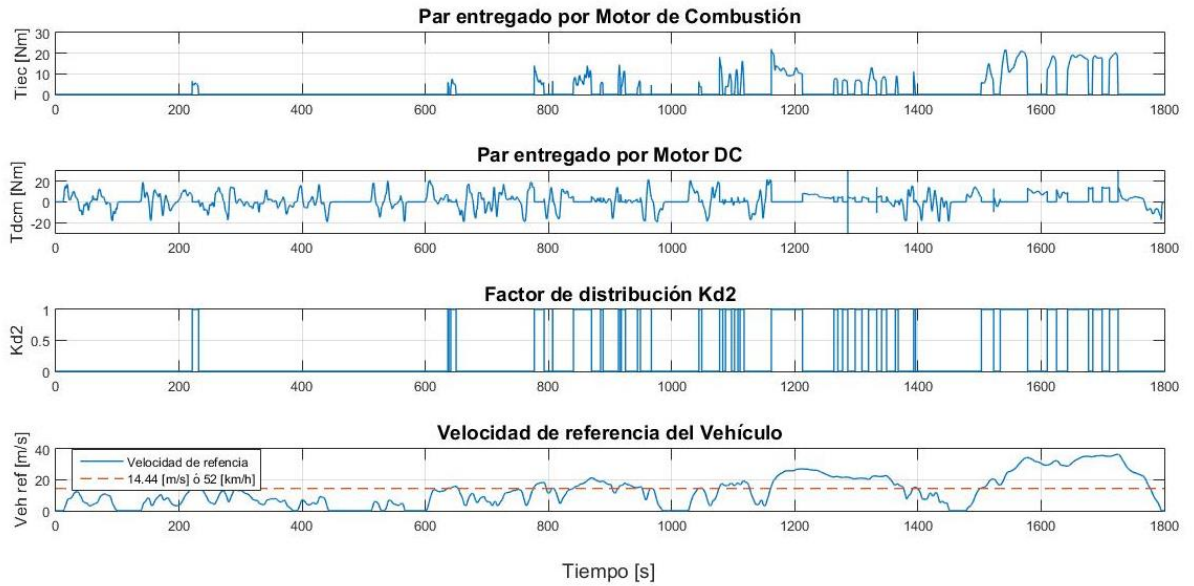
### Comportamiento de la Batería en VEH Paralelo probado con WLTP class 3.



### Torques en el Juego de Poleas de VEH Paralelo probado con WLTP class 3.

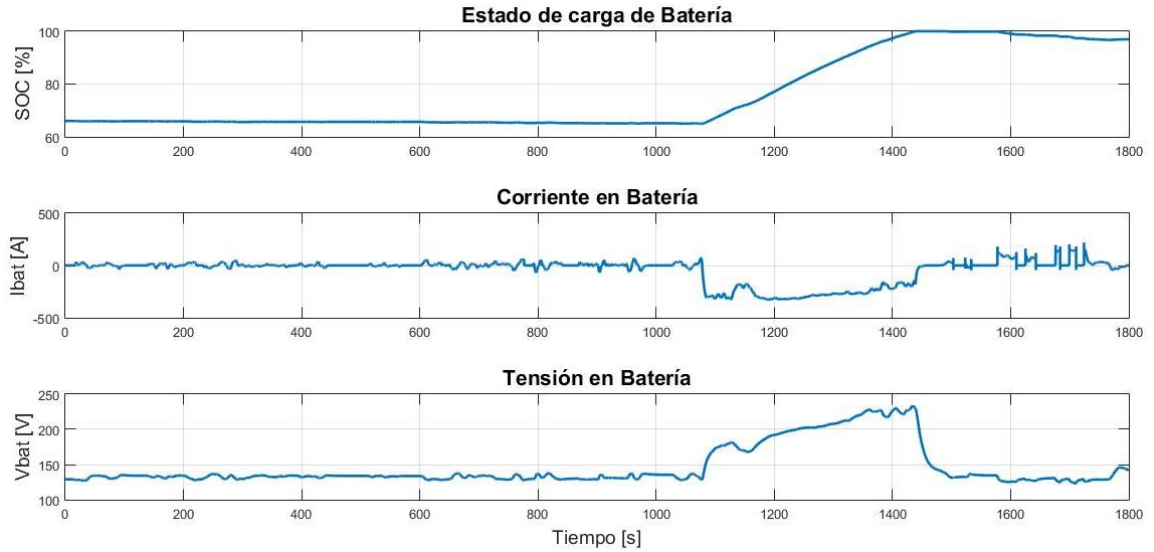


### Operación de Bloque de Gestión de Energía en VEH paralelo probado con WLTP class 3.

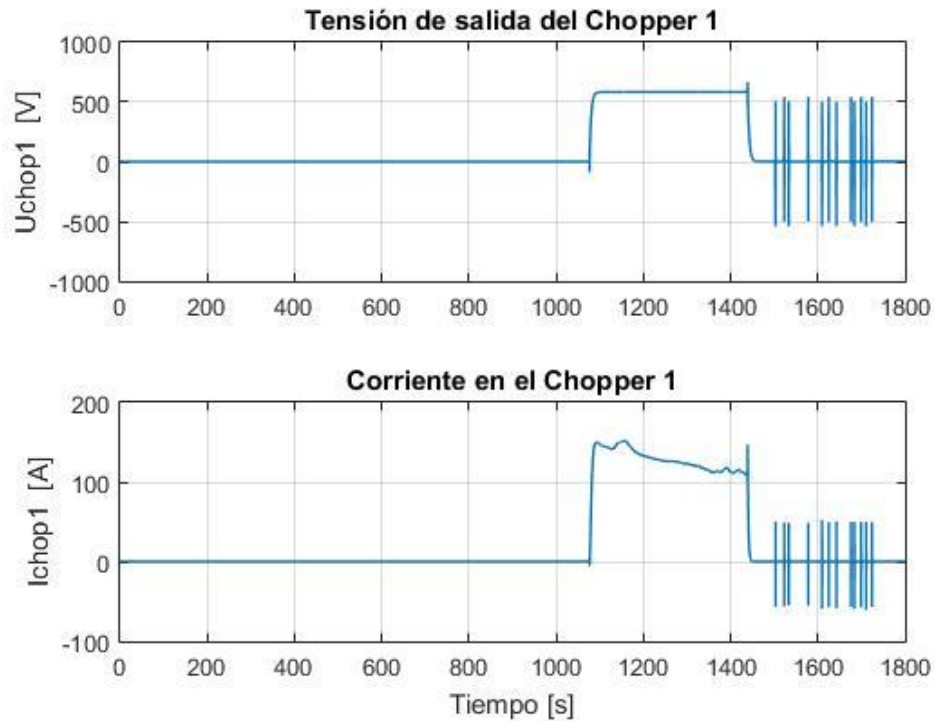


## Resultados VEH Serie – Paralelo

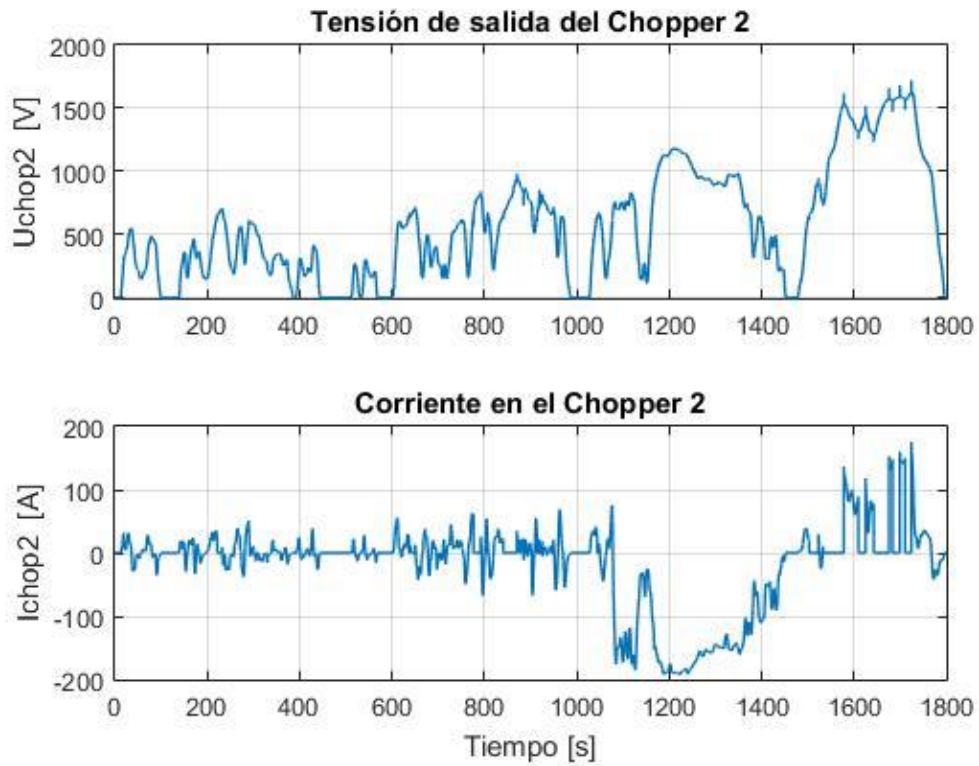
### Comportamiento de la Batería en VEH Serie – Paralelo probado con WLTP class3.



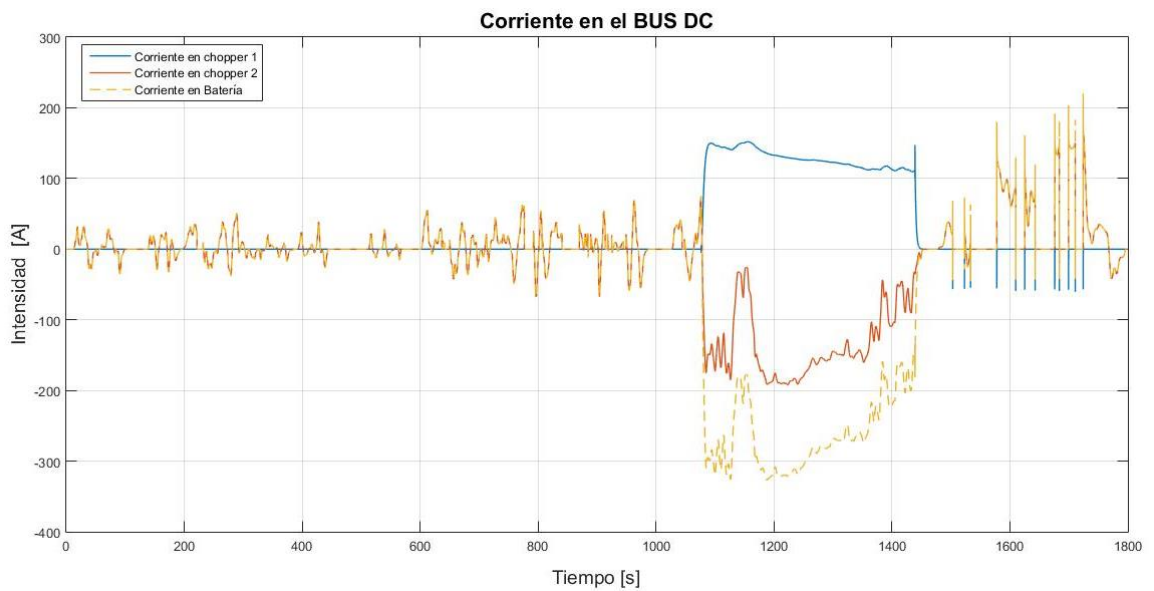
### Comportamiento del Chopper 1 en VEH Serie – Paralelo probado con WLTP class 3.



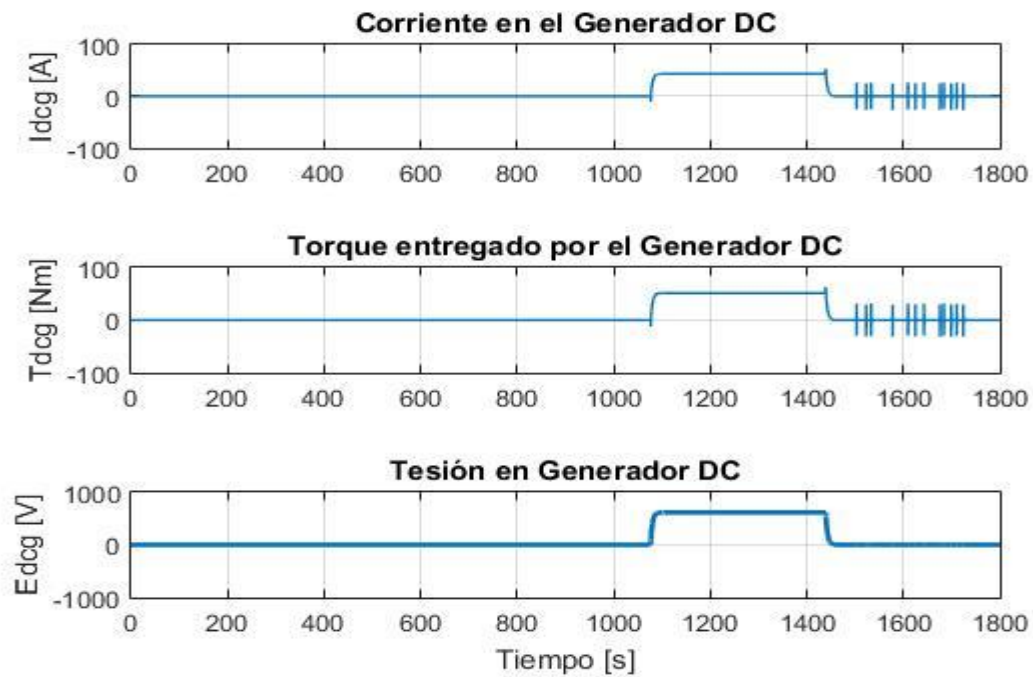
**Comportamiento del Chopper 2 en VEH Serie – Paralelo probado con WLTP class 3.**



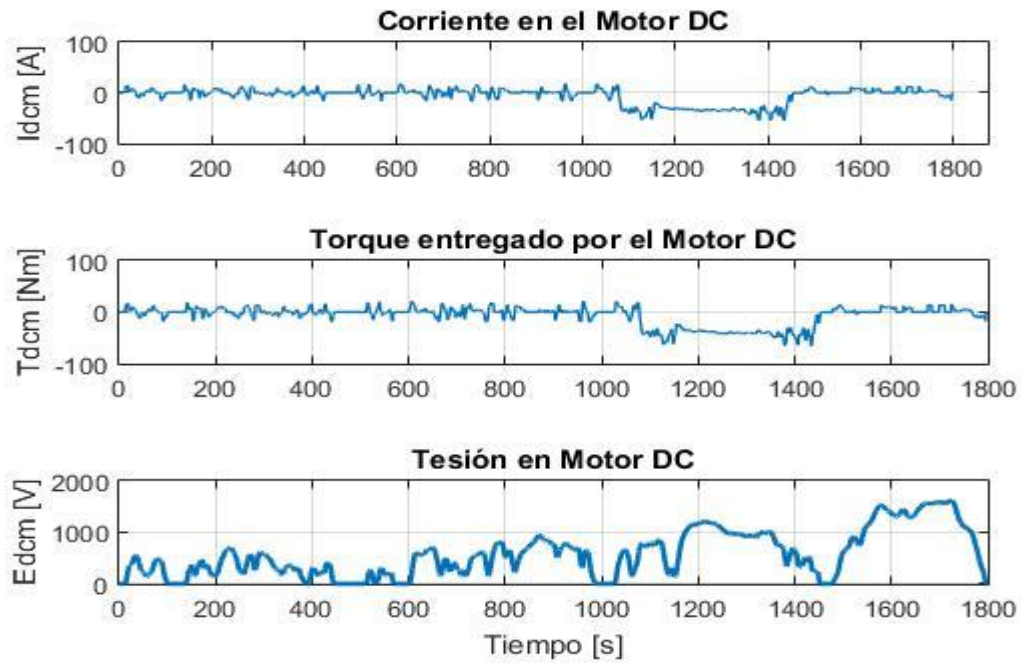
**Comportamiento del Bus DC en VEH Serie – Paralelo probado con WLTP class 3.**



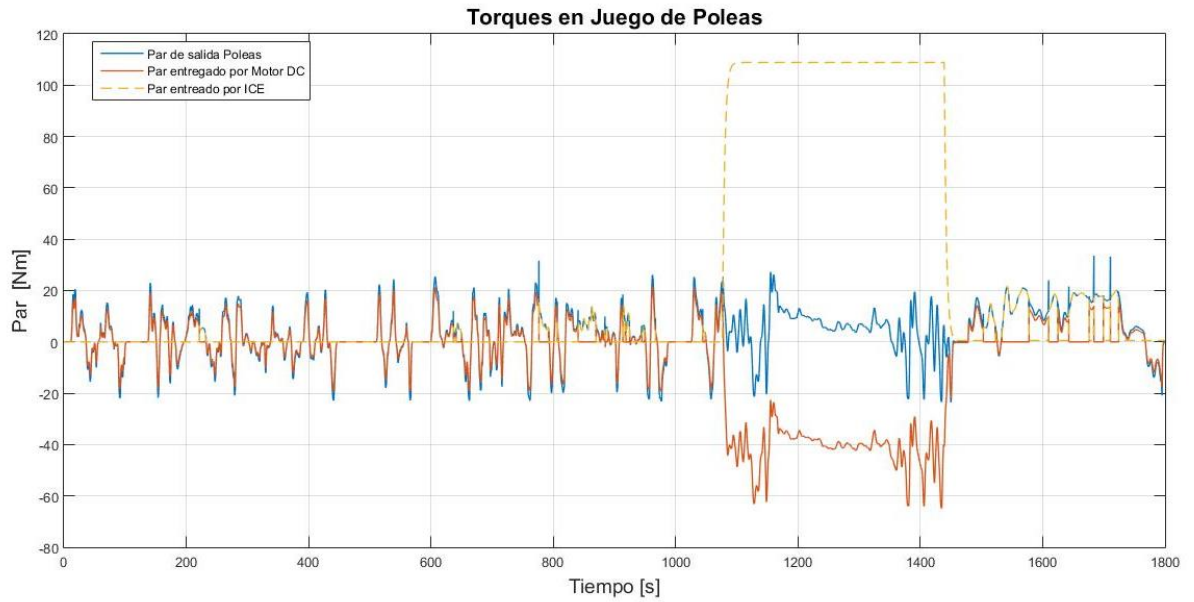
**Comportamiento del Generador DC en VEH Serie – Paralelo probado con WLTP class 3.**



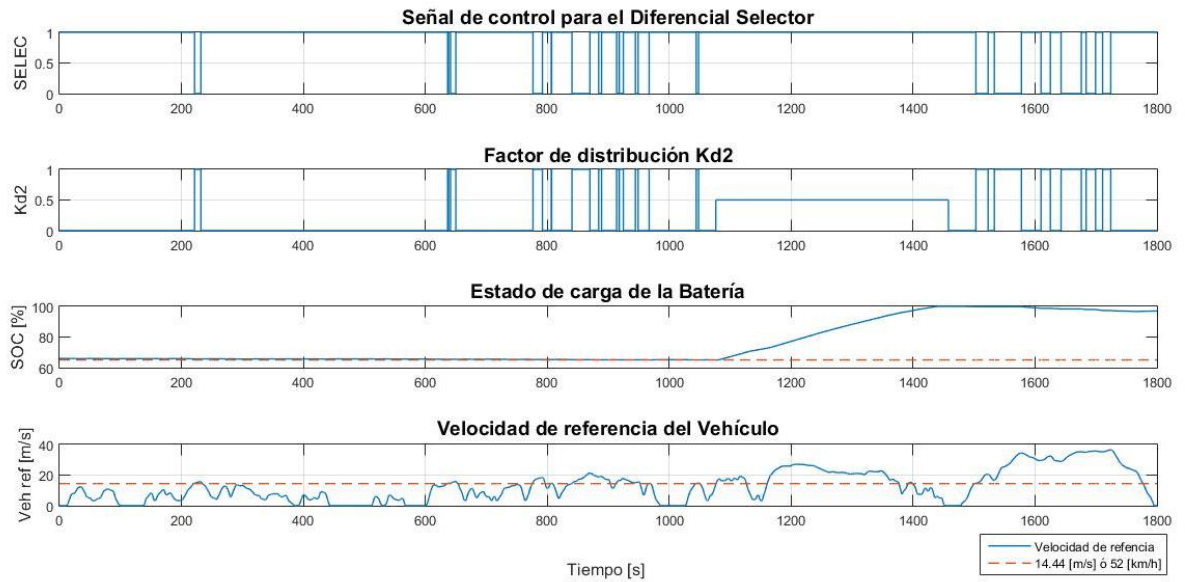
**Comportamiento del Motor DC en VEH Serie – Paralelo probado con WLTP class 3.**



**Figura 0.1 Torque en Juego de Poleas en VEH Serie – Paralelo probado con WLTP class 3.**



**Operación de Bloque de Gestión de Energía en VEH Serie – Paralelo probado con WLTP class 3.**



### Operación de Bloque de Gestión de Energía en VEH Serie – Paralelo probado con WLTP class 3.

