

Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería Aeroespacial

Modelado energético de vehículo eléctrico híbrido

Autor: Ángel Luis Téllez Guzmán

Tutor: Ascensión Zafra Cabeza

**Dep. Ingeniería de Sistemas y Automática.  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2019





Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería Aeroespacial

# **Modelado energético de vehículo eléctrico híbrido**

Autor:

Ángel Luis Téllez Guzmán

Tutor:

Ascensión Zafra Cabeza

Profesor titular

Dep. Ingeniería de Sistemas y Automática.

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019



Trabajo Fin de Grado: Modelado energético de vehículo eléctrico híbrido

Autor: Ángel Luis Téllez Guzmán

Tutor: Ascensión Zafra Cabeza

El tribunal nombrado para juzgar el trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal

Fecha:



# Agradecimientos

---

Este trabajo constituye el final de una etapa de mi vida. Ha sido un periodo de aprendizaje intenso que ha durado cinco años pero que me ha permitido conocer gente maravillosa que ya forma parte de mi vida.

En primer lugar, me gustaría agradecer a mis padres por el esfuerzo que han hecho durante todo este tiempo para que yo pudiera vivir lejos de casa y estudiara la carrera de mis sueños. También agradecer a mi hermana el apoyo que me ha mostrado en los días difíciles que nadie me entiende.

Una mención especial se merece mi abuela Pilar, que vio como me iba a Sevilla para estudiar lo que quería, que me apoyó tanto emocionalmente como económicamente y que por desgracia de la vida, no ha podido ver como su nieto acababa este grado. Un beso fuerte allá donde estés.

En segundo lugar, me gustaría agradecer a mis amigos del Colegio Mayor por todos los momentos inolvidables que hemos vivido y por su apoyo incondicional en todo este tiempo.

En tercer lugar y no menos importante, agradecer a mis nueve amigos de mi pueblo todo el apoyo que he recibido por su parte, todos los viajes que hemos organizado para poder despejarme en los momentos más duros y todas las fiestas y risas durante estos cinco años.

Muchas gracias a todos.

*Ángel Luis Téllez Guzmán*  
*Grado en Ingeniería Aeroespacial*  
*Sevilla, 2019*





# Resumen

---

En este trabajo se ha llevado a cabo el modelado en Simulink de los cuatro motores eléctricos que forman parte del vehículo eléctrico híbrido 'FOX' que pertenece al departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática.

Una vez realizado y desarrollado el modelado de los motores eléctricos en este trabajo, se han implementado en el vehículo con el resto de componentes del mismo, como son la batería, la pila de combustible y el tanque de hidrógeno, que fueron diseñados previamente por anteriores alumnos. Consiguiendo así, realizar el modelado energético deseado.

Por último, se han realizado una serie de prácticas con el coche 'FOX' en el laboratorio para poder llevar a cabo un estudio de control de la potencia necesaria, dependiendo del perfil de conducción que tenga que realizar y teniendo en cuenta las dos fuentes de energía existente (la batería y la pila de combustible, siendo el hidrógeno el combustible usado)



# Abstract

---

In this work, it has got modeled in Simulink the four electric engines which are part of an electric vehicle whose name is 'FOX' and it belongs to the department of Systems Engineering and Automation.

Once the modeling of the engines has been carried out and developed in this work, they have been implemented in the vehicle with the rest of the components such as battery, fuel cell and hydrogen tank, which were previously designed by previous students. Thus, perform the desire energy modeling.

Finally, series of practices have been carried out with the 'FOX' car at the laboratory to be able to make a control study of the necessary power depending on the driving cycle of the car and taking into account the two existing sources of energy (the battery and the fuel cell with hydrogen being the fuel used).



# Índice

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>vii</b>
<b>Resumen</b>	<b>ix</b>
<b>Abstract</b>	<b>xi</b>
<b>Índice</b>	<b>xiii</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>xv</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xvii</b>
<b>Notación</b>	<b>xix</b>
<b>1 Introducción.</b>	<b>1</b>
1.1. <i>Introducción a los Vehículos Eléctricos Híbridos.</i>	1
1.2. <i>Objetivos del trabajo.</i>	3
<b>2 Descripción del vehículo FOX.</b>	<b>5</b>
2.1. <i>Características del vehículo.</i>	5
2.2. <i>Componentes principales del vehículo.</i>	6
2.2.1. Baterías.	7
2.2.2. Pila de combustible.	8
2.2.3. Motores.	9
2.2.4. Sensores	10
<b>3 Modelado de los motores.</b>	<b>11</b>
3.1. <i>Modelado en simulink.</i>	9
3.1.1. "Driving cycle".	13
3.1.2. "Vehicle".	14
3.1.3. "Transmission".	16
3.1.4. "Electric Motor".	18
3.2. <i>Datos necesarios para el modelado de los motores.</i>	20
3.3. <i>Validación del modelo.</i>	21
<b>4 Implementación del modelo de motor en el vehículo FOX.</b>	<b>27</b>
4.1. <i>Modelado del vehículo FOX en Simulink.</i>	28
4.1.1. Criterio de signos empleado.	28
4.1.2. Potencia demandada.	29
4.1.3. Modelado de la batería.	29
4.1.4. Modelado de la pila de combustible.	31
4.1.5. Modelado del tanque de hidrógeno.	32
4.1.6. Modelo del vehículo FOX.	33

4.1.7. Descripción del control MPC	37
<b>5 Resultados obtenidos.</b>	<b>41</b>
5.1. Perfil de conducción ciclo "NEDC".	41
5.2. Perfil de conducción ciclo "USA CITY".	42
5.3. Perfil de conducción ciclo "CITY MANUAL".	43
5.3. Perfil de conducción ciclo "JAPON MODEL 15".	44
<b>6 Conclusiones y líneas futuras de trabajo.</b>	<b>47</b>
6.1. Conclusión final	47
6.2. Líneas futuras de trabajo abiertas	47
<b>Bibliografía</b>	<b>49</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 3–1 Parámetros iniciales para el modelado de motores

20





# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1-1. Comparación vehículo híbrido y vehículo híbrido con pila de combustible.	2
Figura 1-2. Ejemplo automóvil híbrido.	2
Figura 2-1. Vehículo FOX.	5
Figura 2-2. Estado actual del vehículo FOX.	6
Figura 2-3. Esquema de bloques del vehículo FOX.	7
Figura 2-4. Baterías del vehículo FOX.	8
Figura 2-5. Esquema funcionamiento pila PEM.	8
Figura 2-6. Pila de combustible tipo PEM del vehículo FOX.	9
Figura 2-7. Motor eléctrico del vehículo FOX.	9
Figura 2-8. Unidad de Medida Internacional (IMU).	10
Figura 3-1. Bloque del motor eléctrico en Simulink.	11
Figura 3-2. Bloques que constituyen el motor eléctrico.	12
Figura 3-3. Bloques que componen el "Driving Cycle".	13
Figura 3-4. Bloques que componen el "Vehicle".	15
Figura 3-5. Bloques que componen el bloque "Transmission".	17
Figura 3-6. Implementación en Simulink del par del motor.	17
Figura 3-7. Mapa de eficiencia del motor.	18
Figura 3-8. Bloques que componen el bloque "Electric Motor".	19
Figura 3-9. Velocidad del vehículo en ciclo NEDC	21
Figura 3-10. Ejemplo modelo vehículo híbrido con <i>QSS</i> .	23
Figura 3-11. Modelo del motor eléctrico de este trabajo aplicado al ejemplo <i>QSS</i> .	23
Figura 3-12. Mapa de puntos de operación del modelo <i>QSS</i> en ciclo NEDC	24
Figura 3-13. Mapa de puntos de operación del motor modelado.	24
Figura 3-14. Representación potencia necesaria del motor frente al tiempo.	25
Figura 3-15. Representación potencia necesaria del motor frente al tiempo en modelo <i>QSS</i> .	26
Figura 4-1. Librería en Simulink del vehículo FOX.	27
Figura 4-2. Curva característica de Ion-Litio	30
Figura 4-3. Parámetros iniciales para el modelo de la batería.	30
Figura 4-4. Modelo batería.	31
Figura 4-5. Modelo pila de combustible.	31
Figura 4-6. Parámetros iniciales pila de combustible	32

Figura 4-7. Modelo tanque de hidrógeno.	32
Figura 4-8. Parámetros iniciales modelo tanque de hidrógeno.	33
Figura 4-9. Visión general del modelo del vehículo FOX sin control.	33
Figura 4-10. Visión general del modelo del vehículo FOX.	34
Figura 4-11. Primera parte del modelo del vehículo FOX.	35
Figura 4-12. Segunda parte del modelo del vehículo FOX.	35
Figura 4-13. Tercera parte del modelo del vehículo FOX.	36
Figura 4-14. Predicción con horizonte $N=N_2-N_1$ .	38
Figura 4-15. Estructura modelo MPC.	38
Figura 5-1. Resultado obtenido simulación ciclo “NEDC”.	42
Figura 5-2. Potencia demandada por cada motor en ciclo “USA CITY 1”.	42
Figura 5-3. Resultado obtenido simulación ciclo “USA CITY 1”.	43
Figura 5-4. Potencia demandada por cada motor en ciclo “CITY MANUAL”.	43
Figura 5-5. Resultado obtenido simulación ciclo “CITY MANUAL”.	44
Figura 5-6. Potencia demandada por cada motor en ciclo “JAPON MODEL 15”.	44
Figura 5-7. Resultado obtenido simulación ciclo “JAPON MODEL 15”.	45
Figura 5-8. Ampliación resultado obtenido simulación ciclo “JAPON MODEL 15”.	45

# Notación

---

$H_2$	Hidrógeno
$CO_2$	Dióxido de Carbono
kg	Kilogramo
kW	Kilovatio
V	Voltio
SOC	Estado de carga batería
SC	Supercondensador
FC	Pila de combustible
GPS	Sistema de Posicionamiento Global
Rad/s	Radianes entre segundos
Nm	Newton por metro



# 1 INTRODUCCIÓN

---

## 1.1. Introducción a los Vehículos Eléctricos Híbridos

En los últimos años se ha incrementado el número de ventas de coches eléctricos, impulsado por el interés cada vez mayor del ser humano para reducir las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera e intentar evitar el avance del cambio climático, pero aunque parezca que este tipo de vehículos son de invención moderna es erróneo porque ya se inventaron en el siglo XIX, antes incluso que los automóviles diésel y gasolina.

Los coches eléctricos son un tipo de vehículos que están impulsados por un determinado número de motores eléctricos (el número depende del diseño del coche), que utilizan la energía eléctrica almacenada en una serie de baterías recargables y la transforma en energía cinética para obtener la tracción necesaria. Estos vehículos pueden ser puramente eléctricos o híbridos, en este último caso se combina un motor eléctrico con una fuente de combustible que proporciona mayor autonomía, el cual es el principal problema del coche eléctrico.

Así, debido a los problemas que presentan actualmente los coches eléctricos, los automóviles híbridos son los que ofrecen hoy en día, una solución de compromiso más satisfactoria.

El desarrollo de nuevo tipo de baterías como las baterías de iones de litio y su posibilidad de combinarlas con pilas de combustible han permitido avanzar en la investigación de vehículos híbridos recargables y se espera que cada vez haya una mayor cantidad de este tipo de coches en el mercado a escala global para los próximos años.

En este trabajo, el vehículo híbrido que se considera es del tipo FCHV (*“Fuel Cell Hybrid Vehicles”*) de tal forma que la energía eléctrica almacenada en la batería se combina con la generada en la pila de combustible (un dispositivo electroquímico que extrae energía química almacenada en un combustible, en este caso  $H_2$ ).

Así, los principales elementos que componen este tipo de coche híbrido son: el motor eléctrico, que puede ser tanto de corriente alterna como de corriente continua; las baterías de iones de litio, que funcionan de forma que cuando la potencia neta necesaria por el vehículo es menor que cero se descargan para aportar energía y cuando la potencia neta es mayor que cero se cargan y almacenan energía en forma de corriente continua, por lo que suelen estar conectadas a un inversor (que transforma la corriente continua en corriente alterna); la pila de combustible y su correspondiente depósito de combustible que aportan energía siempre que sea necesario; y un controlador, que permite el correcto funcionamiento del sistema y controla la distribución de energía en los elementos del vehículo.

El tipo de coche FCHV pretende sustituir el uso del motor térmico por la celda de combustible de tal forma que la única emisión por el tubo de escape sea vapor de agua.

En la siguiente figura se muestra un esquema de los componentes de un vehículo FCHV desarrollado por “Toyota”, una compañía de fabricación de automóviles japonesa.

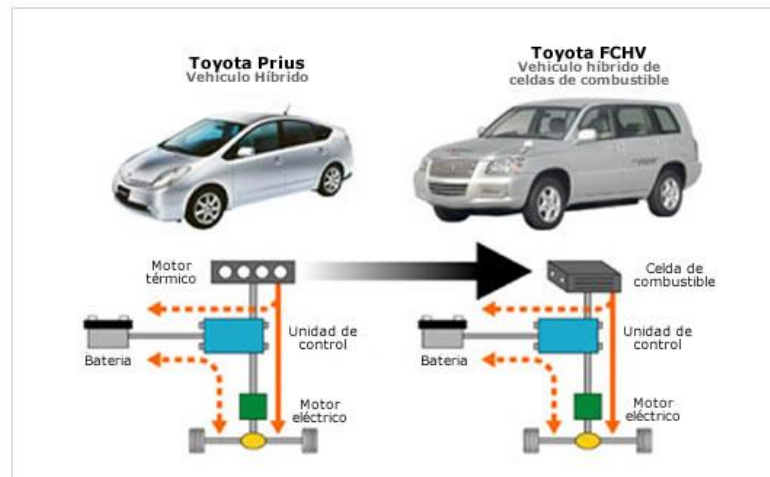


Figura 1-1. Comparación vehículo híbrido y vehículo híbrido con pila de combustible.

Por último es necesario indicar las ventajas que presentan estos coches y que justifican el interés en la mejora y el desarrollo de sus características:

- Son menos contaminantes que los vehículos diésel y gasolina.
- La mayor parte de la energía es una fuente de energía renovable y sostenible.
- Los motores eléctricos son más compactos, ligeros y simples que los motores de combustión interna, y más eficientes que los motores térmicos.
- Su conducción es más cómoda, ya que de forma general no necesitan cambio de marchas ni embrague.
- Los motores eléctricos tienen un mantenimiento más reducido por su simplicidad mecánica.
- No dependen de combustibles fósiles limitados como el petróleo cuyo coste en el mercado es cada vez mayor.
- Tienen permitida la accesibilidad a las grandes ciudades ya que no contribuyen a la contaminación de la atmósfera.

Sin embargo existen dos principales desventajas:

- El elevado coste de las baterías (lo cual supone una inversión mayor a la hora de obtener un vehículo eléctrico frente al vehículo diésel o de gasolina).
- La velocidad alcanzada por el vehículo híbrido es menor que la velocidad de los vehículos diésel o gasolina.
- El bajo rendimiento desde el punto de vista de la autonomía del vehículo.

Por lo tanto estas desventajas constituyen dos líneas futuras de trabajo en las cuales se puede investigar para intentar convertir al coche eléctrico en el coche del futuro.

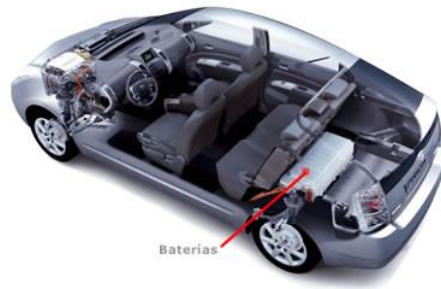


Figura 1-2. Ejemplo automóvil híbrido.

## 1.2. Objetivo del trabajo.

El objetivo principal de este trabajo es el diseño y modelado de los cuatro motores eléctricos, cada uno de los cuales está conectado a cada una de las cuatro ruedas del coche "FOX".

De esta forma una vez conseguido este modelo, se implementa junto con el resto de componentes del coche en Matlab Simulink, para poder realizar un estudio de la distribución de energía en el vehículo dependiendo de la trayectoria que se quiere realizar y diseñar diferentes estrategias de control.

Es obvio que este modelo se realiza para un coche de laboratorio de pequeña dimensiones pero siguiendo en esta línea de investigación, esta idea se puede extrapolar al mercado del automovilismo y de esta forma, se puede conseguir hacer competencia a los vehículos diésel y gasolina que tanto tiempo llevan en circulación y que cada vez presentan más restricciones por parte de los gobiernos de los países.

El calentamiento global y las elevadas emisiones de  $CO_2$  son una realidad y si el ser humano sigue en la misma dinámica y no apuesta por la energía renovable y sostenible (tanto en la industria automovilística como en otros sectores, como por ejemplo en la industria aeronáutica) puede ser que nos acerquemos rápidamente al fin de nuestra existencia.





## 2 DESCRIPCIÓN DEL VEHÍCULO FOX

---

El vehículo eléctrico híbrido FOX es un proyecto del Laboratorio de Control de Células de Combustible (FCCL, “*Fuel Cell Control Lab*”) del departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla.

Como ya se ha comentado anteriormente, en este trabajo se pretende diseñar el modelo de los cuatro motores que componen el coche FOX, el cual se muestra en la siguiente imagen:



Figura 2-1. Vehículo FOX.

### 2.1 Características del vehículo

En este apartado se pretende explicar de forma breve y sencilla las características generales del vehículo FOX, las cuales se han tenido en cuenta para el estudio y modelado de este trabajo.

En primer lugar, se estima que el vehículo tiene una masa de 400.238 kg sin pasajeros (dato que es necesario para el modelado del bloque de los motores eléctricos).

Por su parte, el chasis elegido es el que se mostraba en la figura 2-1 y se ha escogido por la facilidad de trabajo que permite, la posibilidad de adaptación y también la estética que presenta.

Para realizar una estimación inicial de la potencia necesaria del vehículo, se aplicó el ciclo NEDC de conducción (New European Driving Cycle) y se obtuvo una potencia necesaria de pico de 25kW.

Además comentar que los principales dispositivos instalados actualmente en el vehículo FOX son:

- 4 Motores eléctricos conectados cada uno a una rueda del coche.
- Sistema de baterías (“*Battery Management System*”).
- Sensores.
- Pila de combustible.
- Depósito de hidruros.
- Una bancada montada para pruebas.

Las características de cada uno de estos elementos se desarrollarán más detalladamente a continuación, dada su importancia para el modelado de los bloques de los motores eléctricos.

En la siguiente figura se muestra la distribución y colocación de los principales dispositivos del vehículo FOX comentados anteriormente.

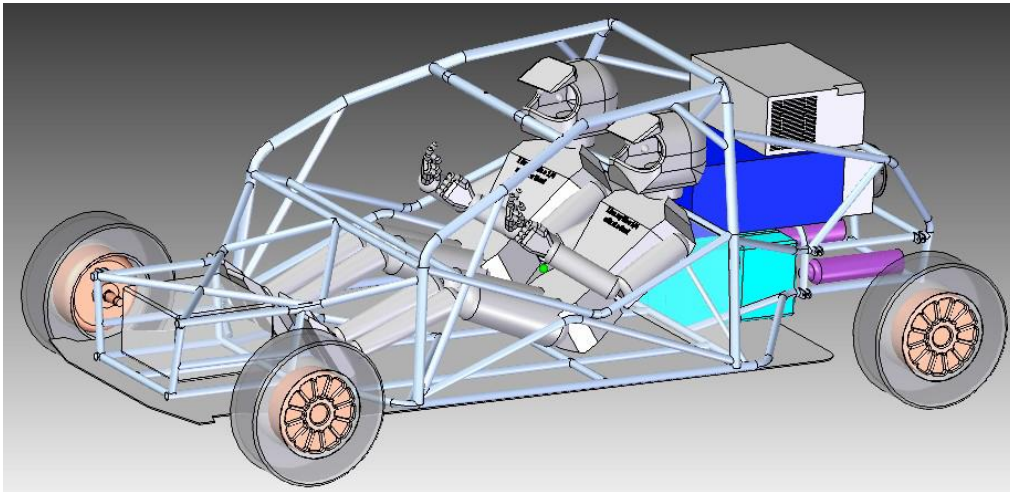


Figura 2-2. Estado actual del vehículo FOX.

Se deja para trabajos futuros la instalación de nuevos dispositivos como por ejemplo, un sistema de supercondensadores encargados de absorber y ceder picos de potencia.

## 2.2. Componentes principales del vehículo.

Para la construcción del vehículo FOX se ha adaptado el chasis de tal forma que permita el acoplamiento de los cuatro motores sin escobillas en los huecos de las ruedas. Además, para la comunicación entre los diferentes componentes se utiliza un bus tipo CAN, el cual está presente en la mayoría de los coches actuales.

Al estar cada rueda del coche conectada a su propio motor eléctrico, se permite tener un rango mayor de posibilidades para el desarrollo de controladores de tracción y estabilidad.

Así, la arquitectura interna del vehículo FOX se puede observar en el siguiente diagrama de bloques donde se identifican los diferentes componentes del coche, teniendo en cuenta que los supercondensadores todavía no se encuentran instalados en el vehículo (se trata de una línea futura de trabajo) y el bus DC/DC que conecta la batería con el bus principal, en un primer momento se decidió incluirlo pero finalmente se llegó a la conclusión de que no se instalaría en el vehículo.

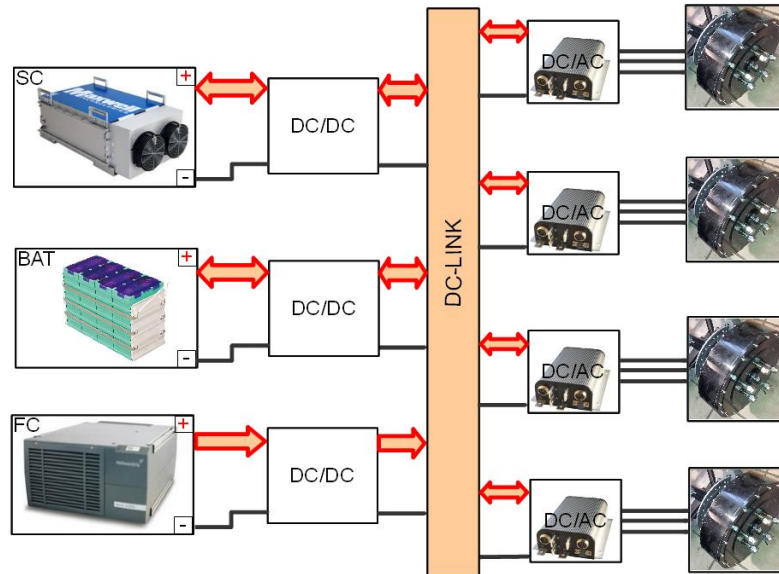


Figura 2-3. Esquema de bloques del vehículo FOX.

### 2.1.1 Baterías.

La batería es un elemento capaz de convertir la energía química almacenada en su interior en energía eléctrica posteriormente utilizada por el vehículo. La batería también es capaz de realizar el camino contrario, por lo que si existe un exceso de energía eléctrica en el vehículo, la almacena como energía química. Además, las baterías utilizadas son recargables.

El vehículo se compone de una batería formada por 6 paquetes que contienen 4 celdas cada uno. En total, se compone de 24 celdas de entre 3.2V y 72 V. Este conjunto de baterías es del tipo LiFeMnPO<sub>4</sub>, de tal forma que se basa en iones de litio que utiliza como componente catódico fosfato de hierro y manganeso. Estas se utilizan por la gran cantidad de ventajas que presentan:

Presentan una gran estabilidad química y térmica, la cual mejora la seguridad de la batería. Además, tienen una muy elevada densidad energética, que mejora con los años de uso y disponen de un alto número de ciclos de carga. Pero la ventaja más importante es que este tipo de baterías no son tan dañinas con el medioambiente como otro tipo de baterías de litio que se encuentran en el mercado, lo que permite seguir en la línea de nuestro motivo y objetivo que es, ante todo, dar una solución para el futuro, respetuosa con el medioambiente.

Por último hay que comentar que el vehículo FOX cuenta con un sistema de gestión de la batería (que ya se encuentra instalado en la misma) que recibe el nombre de “*Battery Management System*” y que realiza una gran cantidad de funciones como la protección de las celdas, el control de la carga, la gestión de la energía demandada, la determinación del SOC (estado de carga de la batería), la determinación del SOH (estado de salud de la batería) y la comunicación con el resto de elementos del vehículo a través de su conexión al bus CAN.

En la figura 2-4 se puede observar cómo es el conjunto de baterías que se encuentran instaladas en el vehículo.



Figura 2-4. Baterías del vehículo FOX.

### 2.1.2 Pila de combustible.

La pila de combustible es el elemento más complejo del vehículo. Se trata de una pila de combustible de tipo PEM que se denomina así porque el electrolito está formado por una membrana polimérica que separa la parte anódica y la parte catódica de una celda.

En la figura 2-5 se puede observar un esquema simplificado del funcionamiento de este tipo de pila donde la celda se compone de tres zonas: un electrodo cargado negativamente (cátodo), un electrodo cargado positivamente (ánodo) y en medio, la membrana electrolítica que separa físicamente los gases a ambos lados. El combustible que permite el funcionamiento de la pila PEM es el hidrógeno.

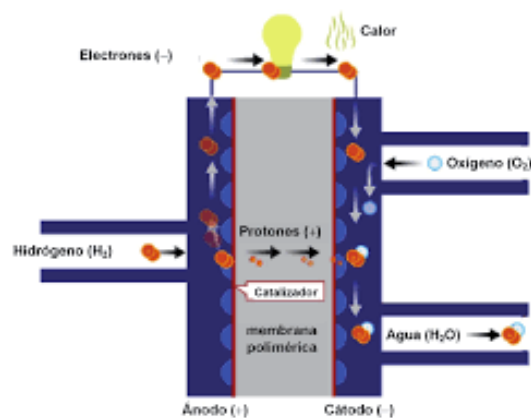


Figura 2-5. Esquema funcionamiento pila PEM.

La pila de combustible del vehículo FOX tiene una potencia de 1,2 kW y dispone de refrigeración por aire. Además, necesita de un convertidor DC/DC (como se puede observar en la figura 2-3) para su conexión al sistema y dispone de 2 depósitos de hidruros de 70 litros donde se almacena el  $H_2$  necesario para su funcionamiento.

En la figura 2-6 se puede ver el aspecto físico de la pila de combustible instalada en el vehículo.



Figura 2-6. Pila de combustible tipo PEM del vehículo FOX.

### 2.1.3 Motores.

Uno de los objetivos de este trabajo es modelar los motores eléctricos que forman parte del vehículo FOX. Este se compone de cuatro motores eléctricos “*Brushless*” (sin escobillas) que aportan una potencia de 7kW cada uno y un par máximo de 78Nm.

Cada motor será controlado mediante la unidad de control del vehículo a través de la comunicación del bus CAN.

En la figura 2-7 se puede observar el acoplamiento de uno de los motores en una rueda del vehículo FOX.



Figura 2-7. Motor eléctrico del vehículo FOX.

### 2.1.4 Sensores.

Los sensores instalados en el vehículo FOX son la herramienta fundamental para informar en todo momento del estado de todas y cada una de las variables que permiten el funcionamiento del mismo. De esta forma, un correcto control del coche se consigue recibiendo esta información recogida por los sensores y medidores instalados en el vehículo, en la mayor exactitud de tiempo posible.

Los principales sensores que se encuentran instalados en el vehículo FOX son:

- Sensor de posición instalado en el pedal de freno:

Se trata de un potenciómetro que trabaja de 0 a 5V, en función de la posición del pedal de freno en cada momento.

- Sensor de giro de volante:

Se trata de un potenciómetro rotatorio que permite medir el ángulo de giro del volante.

- Sensores instalados en la suspensión:

Consiste en un potenciómetro lineal que se encuentra instalado de forma paralela a los amortiguadores del coche permitiendo obtener medidas de variables como por ejemplo las fuerzas verticales a las que se encuentran sometidas las ruedas en todo momento.

- Unidad de medidas inerciales (IMU):

Se trata de un sensor de navegación formado por dispositivos de medidas inerciales como acelerómetros y giróscopos que funcionan tomando medidas en tres ejes de referencia locales. Este sensor permite obtener información del estado del vehículo en todo momento y además, consta de un sensor GPS integrado.



Figura 2-8. Unidad de Medida Internacional (IMU).

# 3 MODELADO DE LOS MOTORES

---

Para el modelado de los motores eléctricos del vehículo FOX se ha hecho uso de Simulink, una herramienta incluida en MATLAB que permite el modelado, la simulación y el análisis de sistemas dinámicos. Se trata de una herramienta gráfica que permite definir el sistema mediante un diagrama de bloques como se observará a continuación.

Se ha optado por utilizar esta herramienta, ya que actualmente ésta es muy usada en ingeniería de control y el procesamiento de señal para la simulación de sistemas y el diseño basado en modelos. Además, Simulink puede simular cualquier sistema que pueda ser definido por ecuaciones diferenciales continuas y/o discretas. Por lo tanto, puede modelar sistemas en tiempo continuo, discreto o híbrido.

En primer lugar, para realizar un adecuado modelado de los motores, es necesario conocer cuáles serán las entradas y las salidas de nuestro sistema de bloques, de tal forma que lo que se pretende es dada una trayectoria o ciclo de conducción, conocer la potencia necesaria de los motores en cada instante de tiempo.

De esta forma, el modelo va a consistir en un sistema compuesto por una serie de bloques, que a su vez están constituidos por más bloques que forman otros subsistemas y que van a permitir realizar un enfoque dinámico del mismo aplicando correctamente una descripción matemática (mediante ecuaciones diferenciales) del modelo realizado.

Una vez realizado esto, ayudándonos en información y trabajos anteriormente realizados, es necesario llevar a cabo una validación del modelo para comprobar la validez del mismo y su posterior aplicación al vehículo.

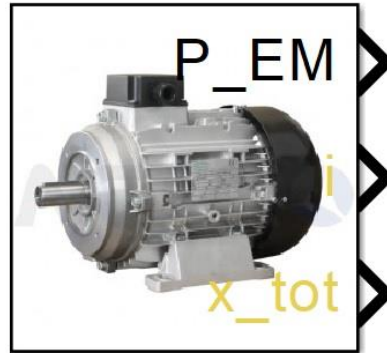
A continuación, se van a explicar detalladamente cada uno de los bloques que componen el modelo del motor eléctrico y se mostrará una visión global del sistema.

Por último, hay que comentar que este modelado no hubiese sido posible sin la información aportada en [1] y validado posteriormente basándonos en la misma información.

## 3.1 Modelado en Simulink.

El modelado en Simulink se ha realizado de tal forma que las tres salidas que se obtienen en el bloque del motor eléctrico del coche FOX son: la potencia necesaria (“*PEM*”), la distancia recorrida (“*xtot*”) y la posición de la marcha del engranaje del vehículo (“*i*”), aunque este último parámetro no se ha tenido en cuenta para el desarrollo del trabajo dado que no entraba dentro de los límites del mismo.

En la siguiente imagen se puede observar la visión general del bloque del motor que se ha modelado con las salidas comentadas anteriormente y teniendo en cuenta que la entrada es el perfil de conducción como se verá a continuación:



## Motor Eléctrico Coche FOX

Figura 3-1. Bloque del “Motor Eléctrico Coche FOX” en Simulink.

Y los subbloques que forman parte del modelado de motor eléctrico del vehículo FOX son: “*Driving Cycle*”, “*Vehicle*”, “*Transmission Vehicle-EM*” y “*Electric Motor*”; los cuales se muestran en la figura 3-2 y cuyo funcionamiento se va a explicar detalladamente a continuación.

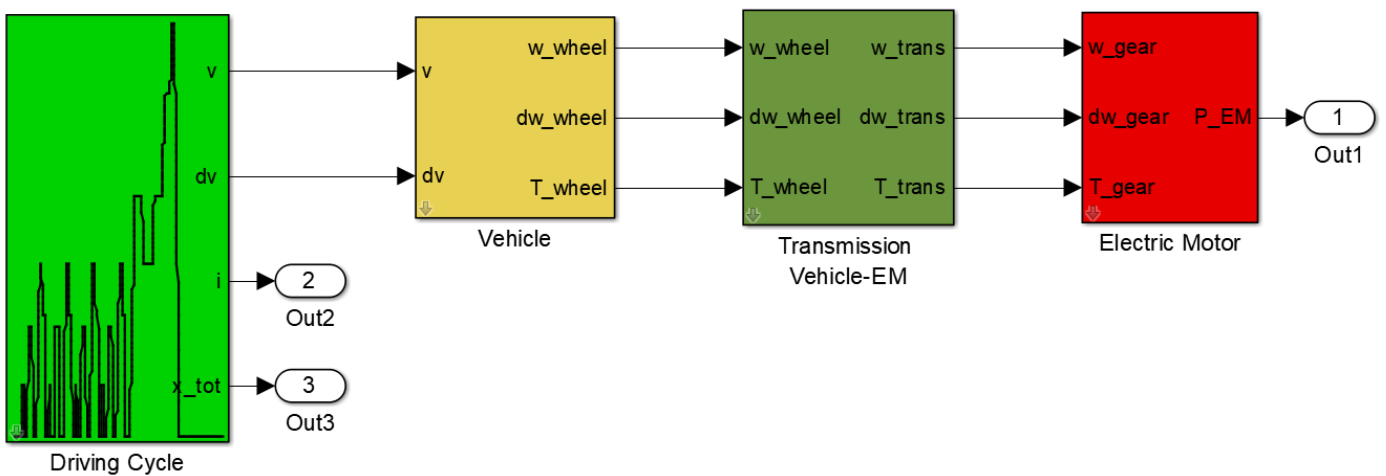


Figura 3-2. Bloques que constituyen el “Motor Eléctrico Coche FOX”.

Una vez mostradas ambas imágenes del modelo, hay que destacar la diferencia entre el bloque general del motor eléctrico mostrado en la Figura 3-1, nombrado por el autor de este trabajo “Motor Eléctrico Coche FOX”, cuyas salidas son la potencia necesaria, la distancia total y la posición de marcha, con el subbloque “Electric Motor” que aparece en la Figura 3-2 y que se estudiará más adelante en este trabajo, pero cuya única salida es el vector de la potencia necesaria por unidad de tiempo.

También es necesario comentar que los bloques y la estructura de la Figura 3-2 se han tomado de la herramienta “QSS” cuya información queda recogida en [2].



### 3.1.1 Bloque “Driving Cycle”.

Este bloque se puede definir como el ciclo de conducción en el que se va a basar la distribución de potencia necesaria por parte de los motores, ya que va a proporcionar los datos necesarios para conocer la trayectoria que debe seguir el coche eléctrico.

De esta forma, la trayectoria inicial que se introduce en este bloque puede ser introducida por el usuario (si se conoce la curva de velocidad del vehículo en esa trayectoria) o seleccionar algunas de las pruebas que se encuentran ya almacenadas previamente.

Así, las entradas a este bloque son tres vectores que quedan recogidos en los datos del ciclo:

- El vector tiempo (con intervalos de tiempo iguales)
- El vector velocidad del vehículo en esa trayectoria.
- El vector de cambios de engranaje (los cuales ya están establecidos y se obtienen de forma convencional).

Por su parte, las salidas del bloque “Driving Cycle” son:

- La velocidad del vehículo.
- La aceleración del vehículo.
- El número de engranaje (también nombrado en Simulink como “gear number”).
- La distancia total recorrida.

Para obtener estas salidas, se aplican los siguientes principios físicos:

La velocidad del vehículo se obtiene de forma sencilla ya que simplemente hay que extraer el vector velocidad de la matriz del ciclo de conducción.

Por su parte, la aceleración del vehículo se obtiene realizando la derivada de la velocidad aplicando la siguiente ecuación (obtenida de la definición de derivada):

$$a_f(k \cdot h) = \frac{v_f(k \cdot h + h) - v_f(k \cdot h)}{h}, \quad k = 1, \dots, k_{max} - 1, \quad a_f(k_{max}) = 0$$

Para ello, se debe definir el paso  $h$  y un valor máximo del coeficiente  $k$ , como ya se indicará más adelante.

Por último, la distancia total recorrida se obtiene de integrar la velocidad del vehículo con respecto del tiempo.

$$x_{total} = \int_{t_0}^t v dt$$

En la figura 3-3 se puede observar cómo es el bloque “Driving Cycle” para obtener las salidas comentadas anteriormente.

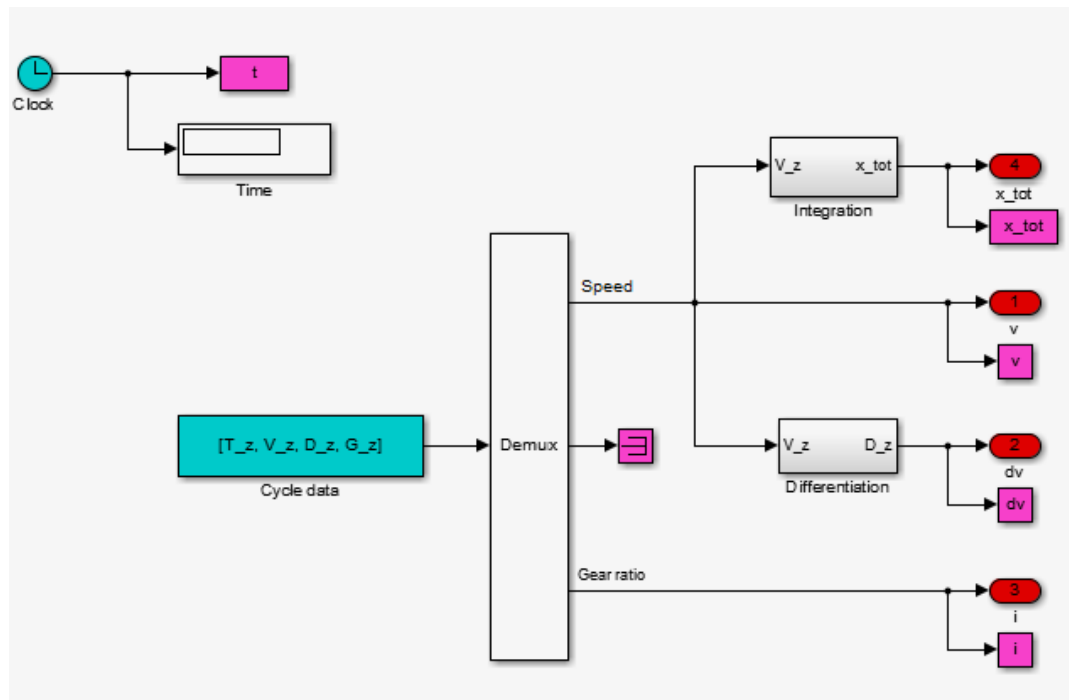


Figura 3-3. Bloques que componen el “Driving Cycle”.

### 3.1.2 Bloque “Vehicle”.

Este bloque permite calcular la resistencia total que se opone al vehículo durante su trayecto en carrera. Esta resistencia se puede calcular como la suma de diferentes pérdidas energéticas en el vehículo. Estas pérdidas que se producen en el coche, se pueden clasificar en tres grupos:

1. Pérdidas aerodinámicas.
2. Pérdidas por resistencia de rodadura.
3. Pérdidas de resistencia de aceleración al vehículo (pérdidas debido a la inercia).

Así, para calcular esta resistencia total, las entradas al bloque “Vehicle” son:

- La velocidad del vehículo.
- La aceleración del vehículo.

Ambas entradas obtenidas como salidas del bloque “Driving Cycle” como ya se ha comentado y como se puede observar en la figura 3-3.

Y por su parte, las salidas que resultan de este bloque son:

- La velocidad angular de la rueda ( $rad/s$ ).
- La aceleración angular de la rueda ( $rad/s^2$ ).
- El par generado por la rueda ( $Nm$ ).

Las ecuaciones matemáticas aplicadas para obtener estas salidas son:

En primer lugar, para obtener la velocidad angular de la rueda ( $w_{wheel}$ ), se calcula la velocidad media del vehículo durante el trayecto en carrera y se divide por el radio de la rueda ( $r_{wheel}$ ) correspondiente. De esta forma, la ecuación resultante es:

$$w_{wheel} = v_m \times \frac{1}{r_{wheel}}$$

Para calcular la aceleración angular de la rueda ( $dw_{wheel}$ ), se realiza el mismo proceso de tal forma que:

$$dw_{wheel} = dv_m \times \frac{1}{r_{wheel}}$$

Por último, para calcular el par generado en la rueda ( $T_{wheel}$ ) hay que tener en cuenta todas las fuerzas que se aplican sobre la misma. Así, la ecuación física que nos permite obtener el par es:

$$T_{wheel} = (F_{roll} + F_{aero} + F_{iner}) \times r_{wheel}$$

Donde  $F_{roll}$  es la fuerza debida a la resistencia de rodadura,  $F_{aero}$  es la fuerza debida a la resistencia aerodinámica y  $F_{iner}$  es la fuerza debida a la inercia del vehículo. Estas fuerzas están definidas por las siguientes ecuaciones obtenidas aplicando principios físicos:

- La fuerza debida la resistencia de rodadura:

$$F_{roll} = m_v \times g \times \mu$$

Donde  $m_v$  es la masa del vehículo,  $g$  es la gravedad y  $\mu$  es el coeficiente de rozamiento del terreno.

- La fuerza debida a la resistencia aerodinámica:

$$F_{aero} = \frac{1}{2} \times \rho \times c_w \times A_{frontal} \times u^2$$

Donde  $\rho$  es la densidad,  $c_w$  es el coeficiente de resistencia,  $A_{frontal}$  es el área frontal del vehículo y  $u$  es la velocidad media del vehículo.

- La fuerza de inercia se calcula como la inercia del vehículo sin ruedas más la inercia producida en cada rueda. De esta forma, se calcula:

$$F_{iner} = \left( m_{v\sinruedas} + 4 \times \theta_{wheel} \times \frac{1}{r_{wheel}^2} \right) \times dv$$

Donde  $\theta_{wheel}$  es un parámetro definido como “Rotating mass (%)”.

Todos los parámetros necesarios para calcular estas fuerzas, son introducidos como datos de entrada y su valor ha sido definido gracias a la colaboración con alumnos del laboratorio del Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, como ya se comentará en la siguiente sección.

En la figura 3-4 se muestra cómo se implementan todas las ecuaciones anteriormente explicadas en Simulink para obtener las salidas deseadas.

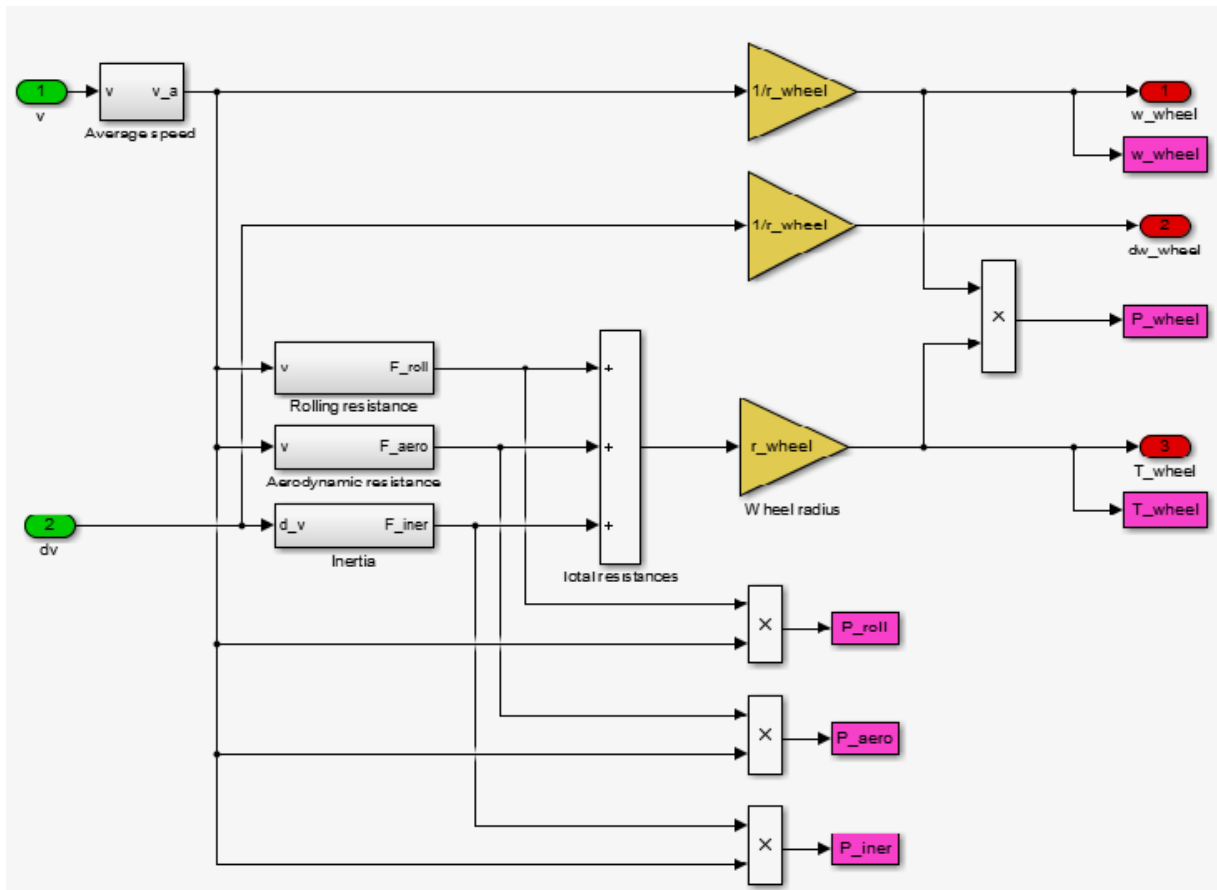


Figura 3-4. Bloques que componen el “Vehicle”.

### 3.1.3 Bloque “Transmission Vehicle-Electric Motor”.

Este bloque permite cambiar el eje de referencia, de tal forma que permite pasar de medir tomando como eje de referencia el eje de la rueda, a medir tomando como eje de referencia el eje del motor eléctrico. Por lo tanto, se consigue pasar de velocidades angulares de rueda a velocidades angulares del motor eléctrico asociado a dicha rueda.

Las entradas de este bloque son las salidas del bloque anterior:

- La velocidad angular de la rueda ( $rad/s$ ).
- La aceleración angular de la rueda ( $rad/s^2$ ).
- El par generado por la rueda ( $Nm$ ).

Y las salidas del bloque “Transmission” son:

- La velocidad angular del eje del motor ( $rad/s$ ).
- La aceleración angular del eje del motor ( $rad/s^2$ ).
- El par generado en el eje del motor ( $Nm$ ).

Para poder realizar este cambio de sistema de referencia es necesario tener en cuenta el “gear ratio” que es un parámetro característico del motor y por lo tanto, es conocido. De esta forma, la velocidad angular del eje del motor ( $w_{trans}$ ) se calcula como:

$$w_{trans} = w_{wheel} \times gear\ ratio$$

Y la aceleración angular del eje del motor ( $dw_{trans}$ ) se calcula realizando el mismo procedimiento:

$$dw_{trans} = dw_{wheel} \times gear\ ratio$$

Para el caso del par en el motor ( $T_{trans}$ ) hay que tener en cuenta que si la energía del motor es mayor que la energía de la rueda, el par es positivo (la dirección del flujo es del motor a la rueda) y se calcula como:

$$T_{trans} = T_{wheel} + \left( \frac{1}{w_{wheel} \times e_{GT}} \times P_{GT0} \right) \times \left( \frac{1}{gear\ ratio \times e_{GT}} \right)$$

Si por el contrario, la energía del motor es menor que la energía existente en la rueda, el par es negativo (la dirección del flujo es de la rueda al motor) y se obtiene como:

$$T_{trans} = T_{wheel} + \left( \frac{1}{w_{wheel} \times e_{GT}} \times P_{GT0} \right) \times (gear\ ratio \times e_{GT})$$

Donde  $e_{GT}$  es la eficiencia de la transmisión y  $P_{GT0}$  recoge las pérdidas por ralentí (“idling losses”, en vatios) y ambos parámetros son datos particulares del vehículo y serán proporcionados por el fabricante.

En la figura 3-5 y 3-6 se puede observar cómo se implementan estas ecuaciones en Simulink para obtener las salidas deseadas.

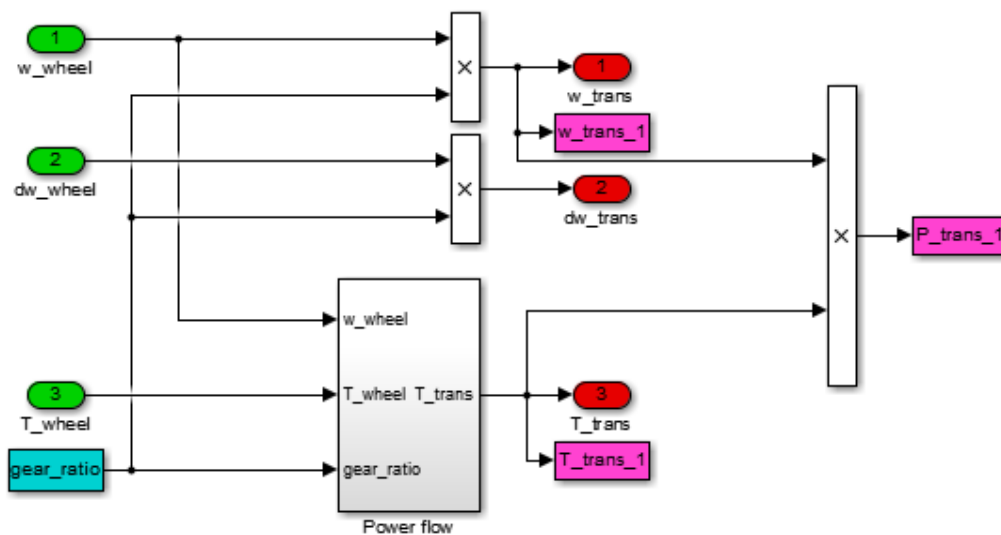


Figura 3-5. Bloques que componen el bloque “Transmission”.

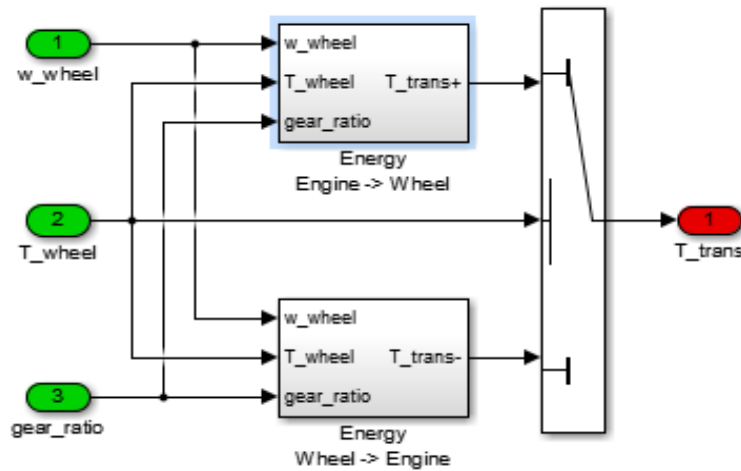


Figura 3-6. Implementación en Simulink del par del motor

### 3.1.4 Bloque “Electric Motor”.

El bloque “Electric Motor” es el último bloque y es el más importante, ya que define y calcula la potencia que el motor eléctrico necesita en cada instante de tiempo de la trayectoria que está realizando el vehículo.

Las entradas del bloque son:

- La velocidad angular de la rueda ( $rad/s$ ).
- La aceleración angular de la rueda ( $rad/s^2$ ).
- El par generado por la rueda ( $Nm$ ).

Y la única salida del bloque es:

- La potencia demandada por el motor eléctrico ( $kW$ )

El mapa de eficiencia del motor, es decir, la función  $\eta_{EM} = \eta_{EM}(w_{EM}, T_{EM})$  debe ser proporcionada por el fabricante del motor eléctrico y por lo tanto, es conocido.

Como ya se comentó en la descripción del vehículo FOX (sección 2 de este trabajo), este coche presenta unos motores eléctricos “*Brushless*” que aportan un par máximo de 78 Nm. Sin embargo, el mapa de eficiencia de estos motores presentes en el coche FOX no ha podido ser facilitado por el departamento y por lo tanto, se decidió utilizar un mapa de eficiencia similar como se observa en la figura 3-7 pero de un par máximo entorno a 70Nm (por debajo del límite máximo de nuestros motores) realizándose así, todo el estudio con un mapa de eficiencia que no corresponde con los motores reales del coche.

Quedará como línea futura de investigación, obtener y conseguir el mapa de eficiencia correcto y adecuado a los motores para poder realizar un estudio más exacto y preciso.

El mapa de eficiencia que se ha tomado se puede encontrar en [1] y se muestra en la figura 3-7.

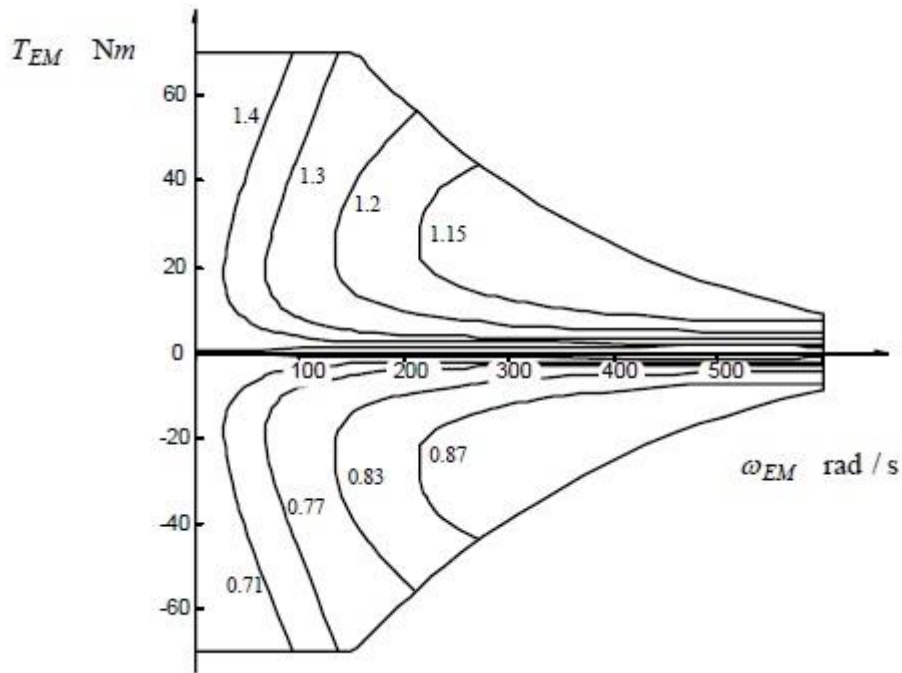


Figura 3-7. Mapa de eficiencia del motor

En la figura 3-7 se muestran las eficiencias del motor eléctrico para cada uno de los casos como resultado de la combinación relativa del par y la velocidad de rotación en cada instante de tiempo que se está considerando, dentro de unos límites establecidos por las limitaciones físicas del motor.

Es necesario considerar que el motor eléctrico queda definido por el segundo cuadrante del mapa de eficiencia mostrado en la figura 3-7.

Pero para obtener la velocidad angular en el motor ( $w_{EM}$ ) y el par en el motor ( $T_{EM}$ ), es necesario aplicar las siguientes ecuaciones:

$$w_{trans} = w_{EM}$$

$$T_{EM} = T_{trans} + dw_{trans} \times \theta_{EM}$$

Donde  $\theta_{EM}$  es un valor constante, dado por el fabricante del motor eléctrico.

Así, si  $w_{EM} > 0$  y  $T_{EM} > 0$ , la potencia total demandada es:

$$P_{EM} = w_{EM} \times T_{EM} \times \frac{1}{\eta_{EM}(w_{EM}, T_{EM})} \quad (I)$$

Y en el caso de que,  $w_{EM} > 0$  y  $T_{EM} < 0$ , la potencia total demandada es:

$$P_{EM} = w_{EM} \times T_{EM} \times \eta_{EM}(w_{EM}, T_{EM}) \quad (II)$$

Se sabe que el rendimiento es una función del par y de la velocidad de rotación del eje, y su expresión matemática es la que se muestra a continuación:

$$\eta_{EM} = \frac{T_{EM} * \omega_{EM}}{\sqrt{3} * V * I * \cos \Phi} \quad (III)$$

Siendo V la diferencia de potencia en el motor en Voltios, I la intensidad en Amperios y  $\cos \Phi$  el factor de potencia del motor, dado por el fabricante.

Con la expresión explicada en (III) e introduciéndola en (I) o (II) se pueden calcular los puntos de operación del motor y obtener la potencia demandada por los motores para cada una de las combinaciones del motor eléctrico.

Por su parte, la figura 3-8 muestra cómo se implementa en Simulink el bloque de “Electric Motor”.

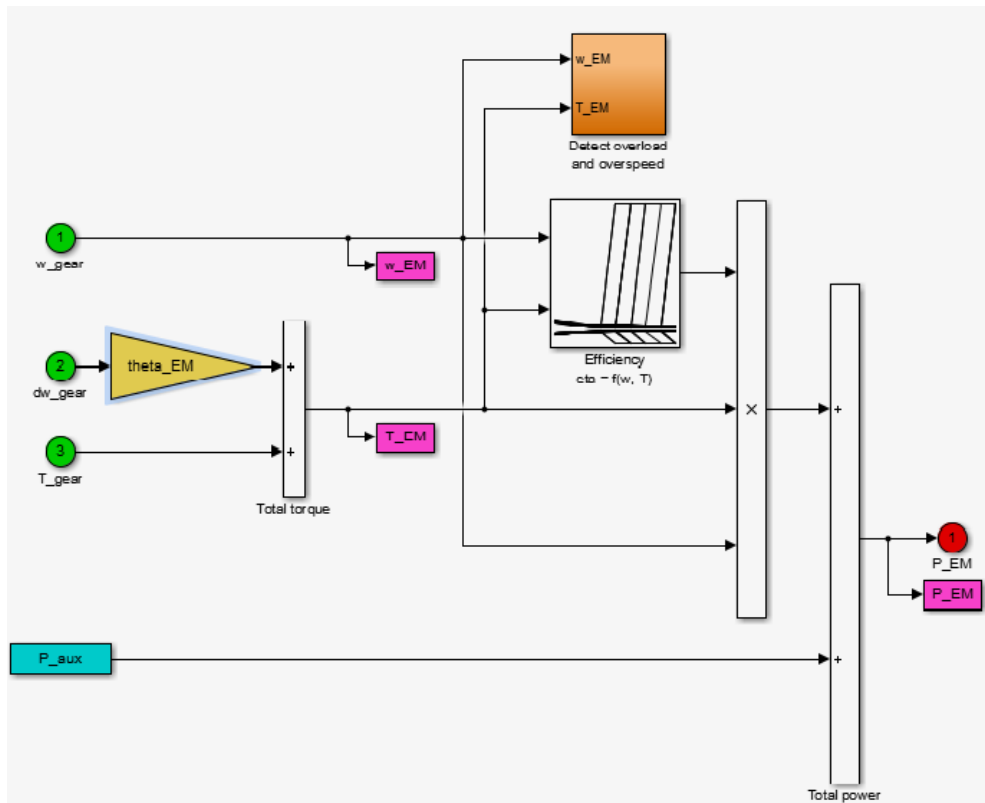


Figura 3-8. Bloques que componen el bloque “Electric Motor”.

### 3.2 Datos necesarios para el modelado de los motores.

Como se ha visto a medida que se explicaba el modelado de los motores, existen una serie de datos que deben ser conocidos previamente para el correcto modelado de los motores eléctricos que posteriormente se instalarán en el vehículo FOX.

De esta forma, manteniendo contacto con las personas encargadas del vehículo en el laboratorio de Ingeniería de Sistemas y Automática, se han conseguido establecer los valores de los siguientes parámetros de partida, los cuales se muestran en la siguiente tabla:



Tabla 3–1 Parámetros iniciales para el modelado de motores

Ciclo de conducción	Ciclo a elegir
$h$ (paso integración)	1
Masa vehículo	400.238 kg
Diámetro ruedas delanteras	0.504 m
Diámetro ruedas traseras	0.54 m
Área frontal vehículo	$2 m^2$
Coefficiente fricción	0.008
Coefficiente de resistencia	0.2
“Rotating mass”	5 %
Gear ratio	3.5
Eficiencia transmisión	0.98
Pérdidas fricción ralenti	0 W
“Motor scaling factor”	1
Inercia del motor	$0.1 \text{ kg} \cdot m^2$
Potencia auxiliar	0
Par máximo del motor real	78 Nm
Par máximo aplicado	70 Nm
Velocidad angular máxima	500 rad/s

La mayoría de los datos han sido proporcionados por el departamento, sin embargo, alguno de ellos por motivos externos al autor de este proyecto no han sido facilitados y por lo tanto, se han supuesto teniendo en cuenta la literatura y otros ejemplos estudiados a lo largo de la realización de este trabajo como ha sucedido con el mapa de eficiencia del motor, el coeficiente de fricción, la eficiencia de la transmisión, la velocidad angular máxima y el dato del “*rotating mass*”.

### 3.3 Validación del modelo.

Para realizar la validación del modelo del motor eléctrico que se acaba de explicar, se ha comparado con un modelo similar obtenido a través de [2] donde se ejecuta el modelo “*The QuasiStatic Toolbox Manual*” también conocido como el modelo *QSS* con el que se ha trabajado y estudiado para llevar a cabo este proyecto y que a su vez, se trata de un manual basado en [1] ya anteriormente comentado.

Además, para poder realizar la validación del modelado de los motores se ha utilizado el ciclo de conducción NEDC, ya implementado en el bloque “Driving Cycle” y cuya representación de la velocidad del vehículo en función del tiempo se muestra en la figura 3-9.

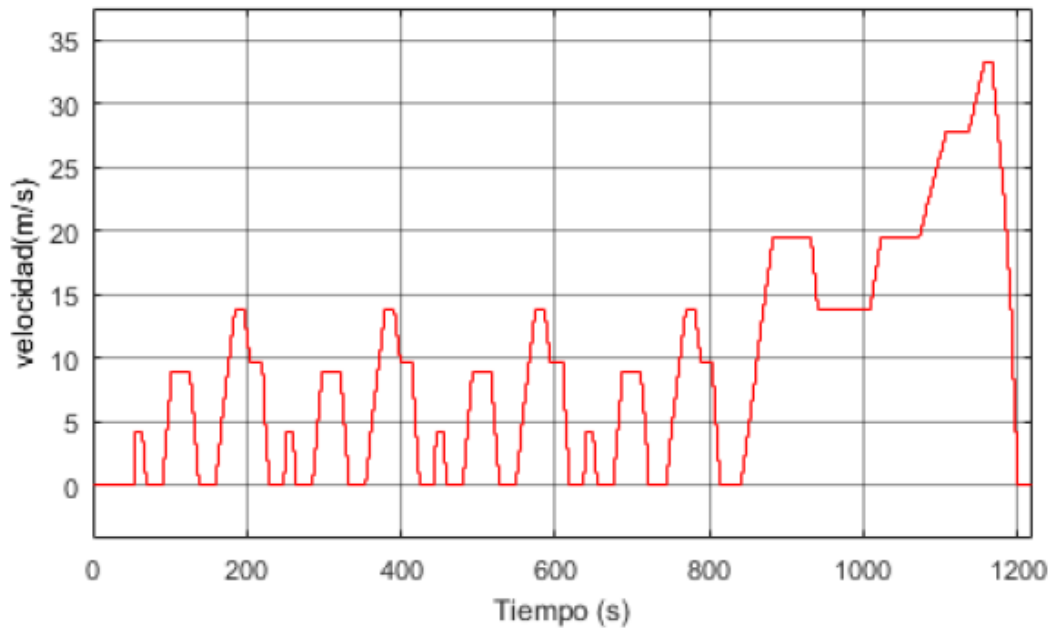


Figura 3-9. Velocidad del vehículo en ciclo NEDC

Por lo tanto, el modo de validación del modelo de los motores se va a basar en una comparación de los mapas de puntos de operación ejecutando dos modelos de vehículos híbridos, uno de ellos obtenido en el modelo *QSS* y explicado en [2] y el otro caso sigue la misma estructura pero aplicando el modelo del motor desarrollado en este trabajo.

Así, se observa la similitud entre los mapas de puntos de operación del primer caso del *QSS* y del modelo del motor eléctrico del FOX (figura 3.11 y 3.13 respectivamente). Por lo que de esta manera, por identificación, se puede validar el modelo desarrollado a lo largo de esta sección.

Una vez validado el modelo, es necesario explicar el significado del resultado obtenido en la figura 3-13. En esta imagen, la línea azul marca el valor límite del par del motor (valor en torno a 70Nm, debido al mapa de eficiencia seleccionado) a partir del cual se produce la parada del motor, por riesgo de fallo y/o rotura del mismo. Por su parte, la línea roja determina el valor límite con signo negativo para cada velocidad angular del eje del motor.

Hay que destacar, que los valores máximos del par se alcanzan para velocidades angulares del motor bajas.

El resto de líneas vienen dados por el mapa de eficiencia del motor (de ahí la similitud entre las figuras 3-11 y 3-13)

Por último, los puntos redondeados son los puntos de operación (“operating points”) del motor eléctrico, obtenidos con la ecuaciones explicadas anteriormente (calculando el rendimiento a partir de (III) y la potencia demandada a partir de (I) o (II) para cada instante de tiempo) para calcular la potencia demandada por el motor ( $P_{EM}$ ).

El mapa de puntos de operación del motor es importante pero también es importante demostrar que el modelo desarrollado cumple con el objetivo inicial propuesto de que es capaz de producir la potencia necesaria por el mismo en cada instante de tiempo, dado que es lo que se necesita para realizar el estudio del vehículo FOX y por ello, ese vector frente al tiempo se muestra en la figura 3.14.

De esta forma, se muestra aquí el ejemplo del modelo de un vehículo híbrido basado en el modelo *QSS* comentado, que se explica detalladamente en [2] y se muestra en la figura 3-10.

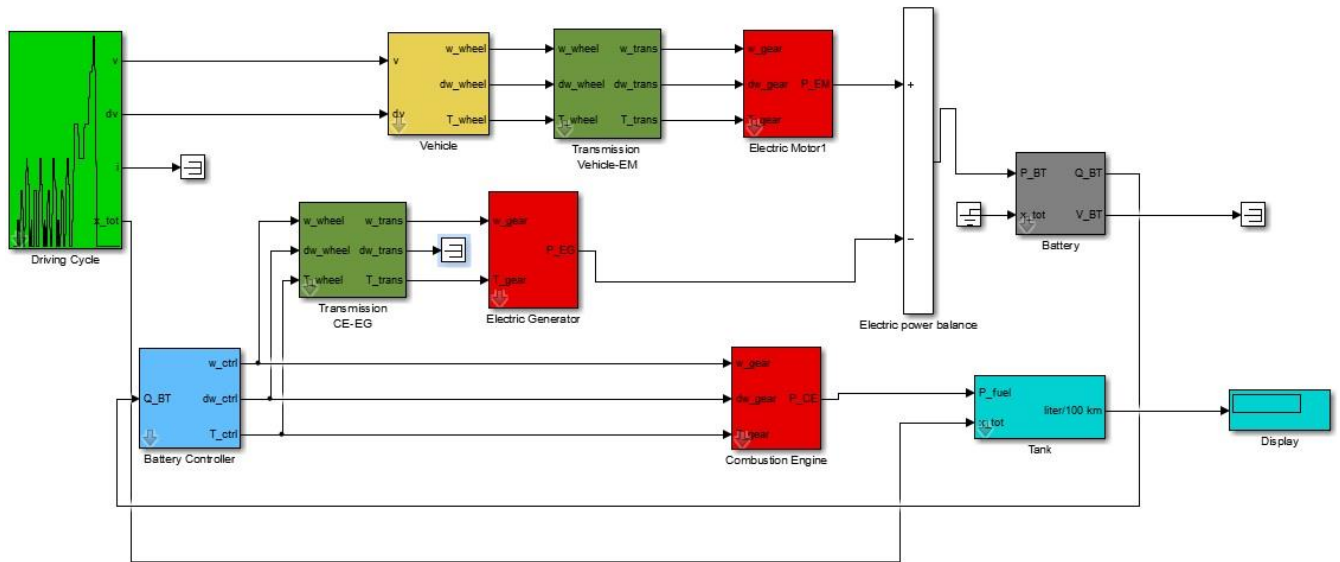


Figura 3-10. Ejemplo modelo vehículo híbrido con *QSS*

Y a continuación, se utiliza la misma estructura pero aplicando el modelo del motor eléctrico desarrollado y explicado en este trabajo para poder obtener resultados particulares y poder realizar la comparación y verificación comentada.

Tanto la figura 3-10 como la figura 3-11 muestran el modelo que se aplica para demostrar la justificación del modelo energético del motor, particularizando para los datos que se tienen del vehículo FOX y dando validez al mismo para su posterior aplicación en el modelo desarrollado en el apartado 4.

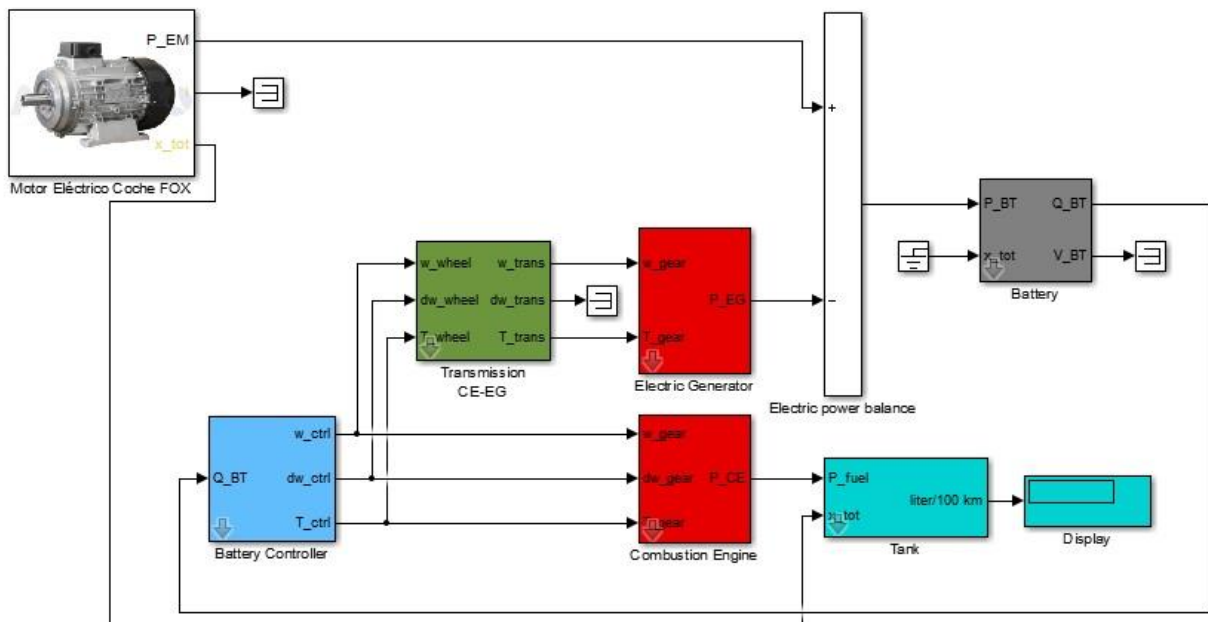


Figura 3-11. Modelo del motor eléctrico de este trabajo aplicado al ejemplo *QSS*

Así, se puede obtener el mapa de puntos de operación del motor para el modelo *QSS* en el ciclo NEDC como

se puede ver en la siguiente figura:

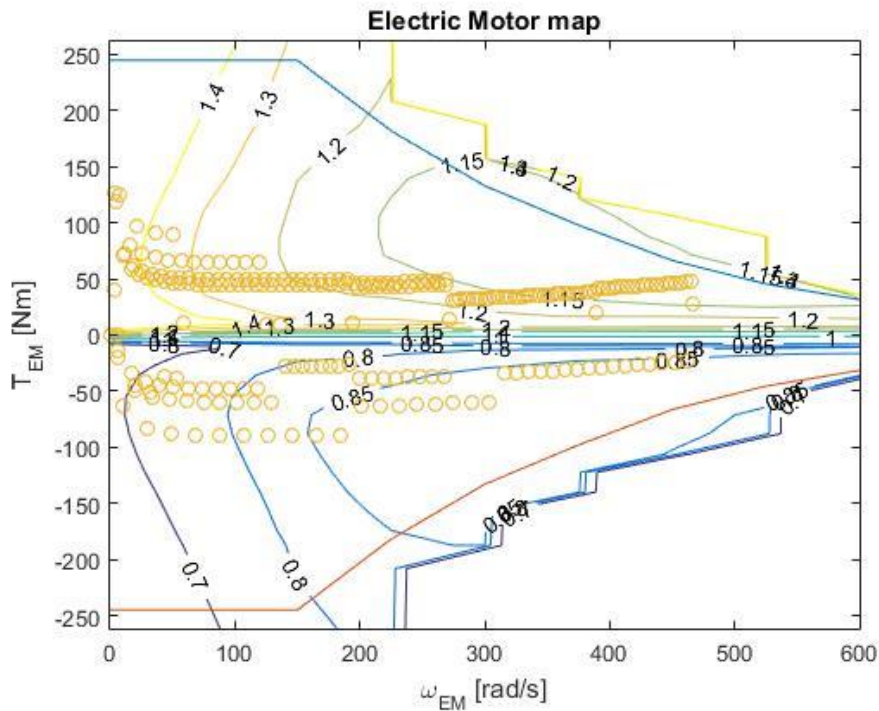


Figura 3-12. Mapa de puntos de operación del modelo  $QSS$  en ciclo NEDC

Teniendo en cuenta que el mapa de eficiencia del motor que se ha utilizado para modelar los motores eléctricos ha sido el mismo que el mapa de eficiencia del modelo  $QSS$  (dado que el personal de laboratorio no ha podido facilitar el mapa de eficiencia de los motores eléctricos instalados en el vehículo FOX, como ya se ha comentado), el resultado obtenido aplicando nuestro modelo al ejemplo del manual [2] es el siguiente:

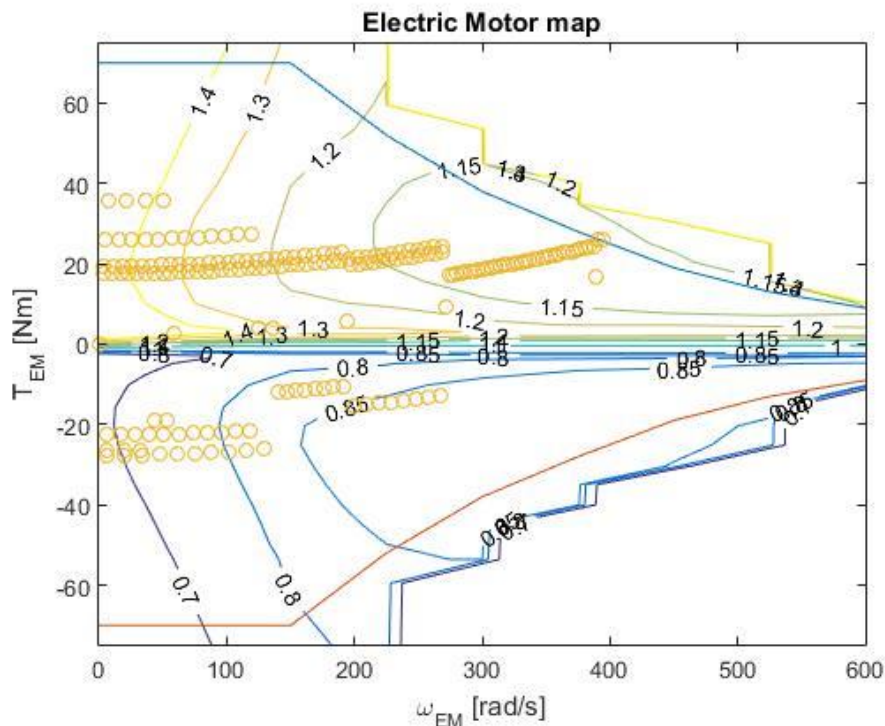


Figura 3-13. Mapa de puntos de operación del motor modelado.

Así, se ha conseguido extrapolar un ejemplo de la referencia [2] para obtener un modelo energético del motor eléctrico que nos permite deducir en qué rango de velocidades de rotación y par se encuentra sometido el motor en cada instante de tiempo y la eficiencia que eso conlleva (como se observa gracias a los puntos de operación).

Los puntos de operación se obtienen en la simulación como resultado de aplicar las ecuaciones (I) y (II), que se encuentran implementadas en el bloque de “Electric Motor” explicado con anterioridad.

Por último, se añade la gráfica que muestra el vector potencia necesaria del motor eléctrico modelado del coche FOX (PEM) para el ciclo NEDC de conducción, que se ha utilizado para la validación del modelo y que se ha mostrado anteriormente.

Se puede observar que hay algunos instantes de tiempos en los que la potencia necesaria por el motor eléctrico es negativa, por lo tanto, eso significa que el motor no necesita potencia (no demanda potencia) y esa potencia sobrante puede ser utilizada en otros dispositivos del vehículo.

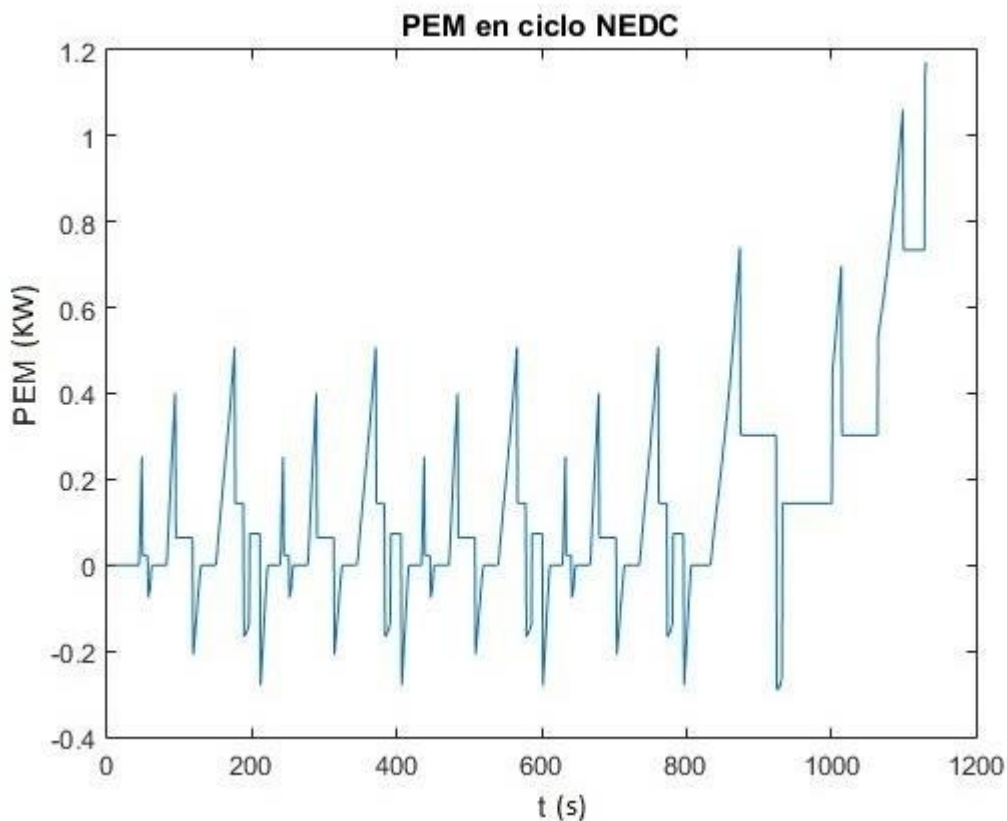


Figura 3-14. Representación potencia necesaria del motor frente al tiempo.

Además también se muestra la representación de la potencia necesaria por el motor desarrollado en el ejemplo del modelo QSS explicado en [3]. En esta gráfica se puede observar la diferencia de magnitud entre ambos modelos pese a la similitud general que comparten. Por otro lado, se puede observar que para realizar el mismo trayecto, el modelo QSS requiere más potencia que el modelo del motor eléctrico desarrollado en este trabajo

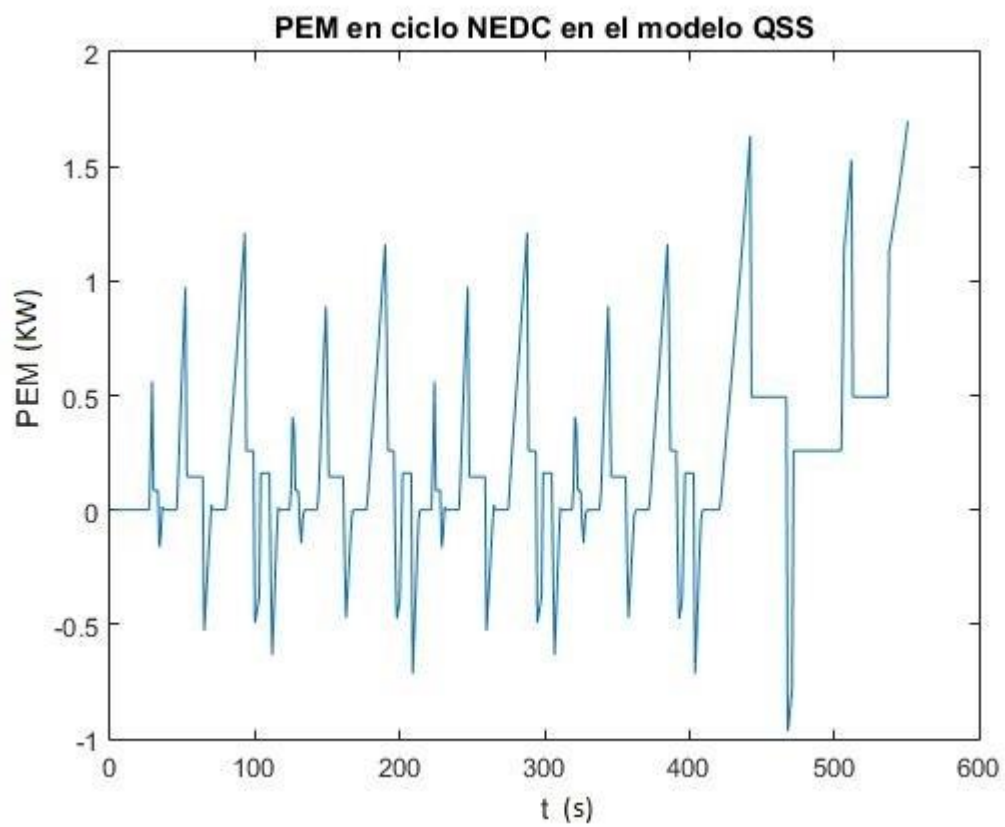


Figura 3-15. Representación potencia necesaria del motor frente al tiempo en modelo QSS.

# 4 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO DEL MOTOR EN EL VEHÍCULO FOX

Una vez validado el modelo del motor eléctrico, este ya puede ser implementado al modelo del vehículo FOX en Simulink con el resto de elementos de la librería que componen el vehículo. Esto se ha conseguido en base al modelo de una microrred HYLAB [3] (desarrollada por un antiguo alumno de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería) facilitada por la profesora titular de este trabajo, el cual ha permitido servir de ejemplo para poder llevar a cabo un modelado correcto y adecuado.

Así, los elementos que forman parte del modelo del vehículo FOX son los que se muestran en la figura 4-1.

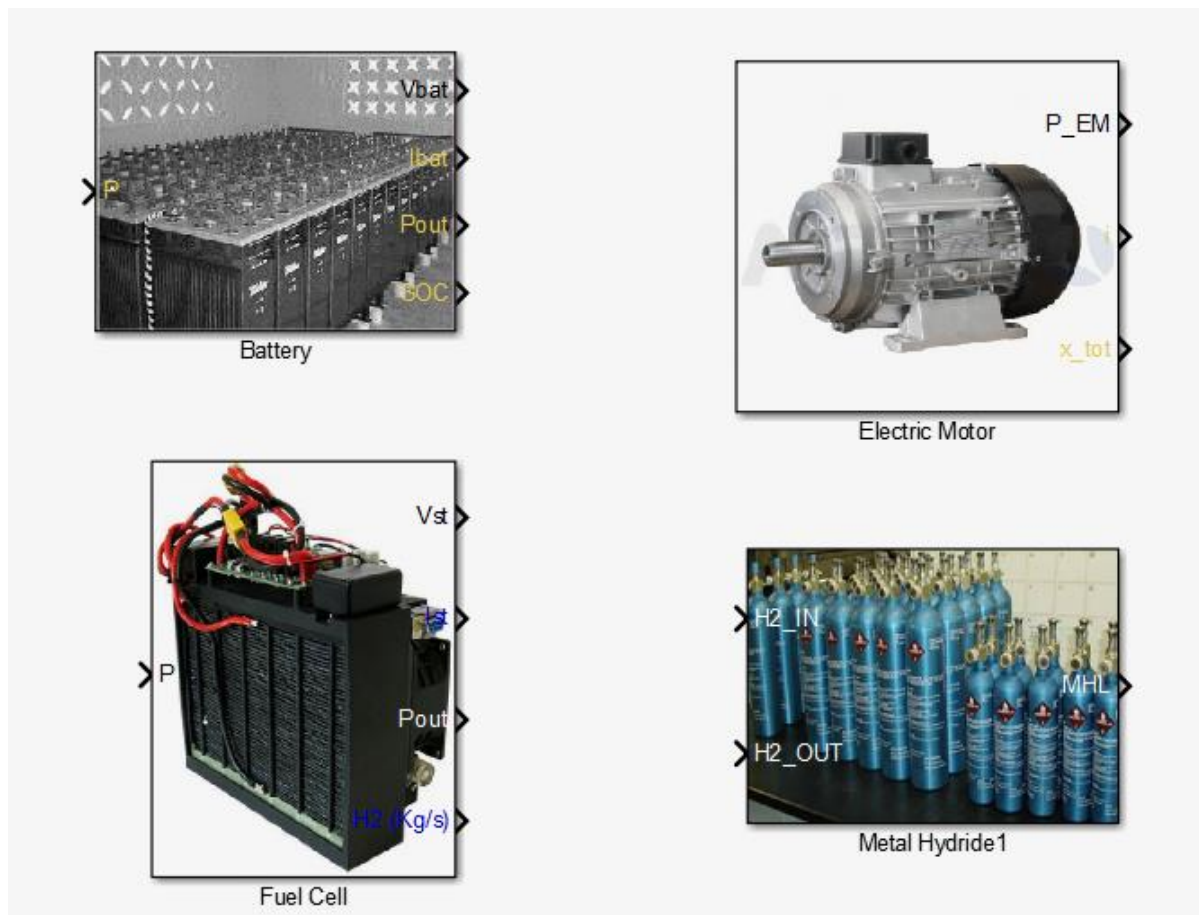


Figura 4-1. Librería en Simulink del vehículo FOX.

## 4.1 Modelado del vehículo FOX en Simulink

En esta sección se muestra la simulación del vehículo FOX y para ello se hace uso del control predictivo basado en modelo (MPC) para el control de la potencia en el vehículo, teniendo en cuenta algunas restricciones del laboratorio.

Así, el elemento principal del modelo es el bus general que permite conectar los diferentes elementos del vehículo como son la pila de combustible, la batería y los cuatro motores eléctricos. Este bus es el encargado de realizar el balance eléctrico de potencia que permita decidir de dónde se obtiene la potencia necesaria para mover los motores y a su vez las ruedas, y distribuir la potencia entre los elementos del vehículo FOX, como ya se ha visto en la figura 2.3 donde se observa un esquema general del mismo.

Sólo hay que conseguir implementar la idea del esquema de la figura 2-3 en Simulink y de esta forma, obtener y estudiar los resultados.

En la siguiente sección, se mostrarán los resultados obtenidos de la simulación del vehículo para diferentes ciclos de conducción.

Sin embargo, antes de mostrar el modelo es necesario destacar algunos aspectos importantes a considerar.

### 4.1.1 Criterio de signos empleado.

El criterio general de signos para la potencia consiste en considerar que la potencia demandada que entra al bus es negativa y la potencia generada que entra al bus es positiva.

La suma de todas las potencias, tanto la potencia generada (potencia que entra al bus con signo positivo, producida por la batería y la pila de combustible, también definida como la potencia aportada) como la demandada (potencia que entra al bus con signo negativo y se puede definir como la potencia necesitada por los cuatro motores del vehículo FOX) es la potencia neta. De esta forma, si la potencia neta es mayor que cero, significa que hay más potencia generada que demandada por lo que hay un exceso de energía que se puede almacenar. Si por el contrario, la potencia neta es negativa, supone que hay que aportar energía procedente de los sistemas de almacenamiento.

Desde el punto de vista de los componentes del vehículo se sigue el mismo criterio:

- Batería: una potencia negativa significa que la batería aumenta su estado de carga (SOC). Por el contrario, una potencia positiva significa que entra potencia en el bus y por lo tanto, sale potencia de la batería (disminuyendo el estado de carga).
- Pila de combustible: aporta potencia positiva al bus principal, a medida que disminuye el nivel de hidrógeno en el tanque. La pila de combustible se encuentra conectada al tanque de hidrógeno directamente.
- Motores: actúan como el elemento que demanda potencia al bus, por lo tanto, la potencia que aportan es negativa.

El balance de potencia en el bus es el siguiente:

$$P_{motores} + P_{batería} + P_{pila} = 0$$

De esta forma, para calcular la potencia de la batería en el modelo se aplica la siguiente ecuación:

$$P_{batería} = -P_{motores} - P_{pila}$$



Donde  $P_{motores}$  es negativa y  $P_{pila}$  es positiva.

Aplicando correctamente este criterio de signos se puede obtener un modelo adecuado como se mostrará a continuación.

#### 4.1.2 Potencia demandada.

En nuestro modelo, los únicos elementos que actúan como demanda son los cuatro motores que están instalados en cada una de las cuatro ruedas.

La potencia demandada se introduce en el modelo como un vector de un determinado número de componentes, dependiendo del ciclo de conducción que vaya a llevar a cabo el vehículo. De esta manera, es aquí donde se incorpora el modelo del motor eléctrico mostrado y explicado a lo largo de la sección anterior.

Como ya se ha comentado antes, la demanda de potencia es un vector de valores, en el que aparece un valor por cada instante de tiempo (como se puede observar en la figura 3.14) y estos valores pueden ser positivos o negativos, dependiendo del ciclo de conducción y de si los motores eléctricos necesitan potencia (potencia demandada positiva) o no necesitan potencia (potencia demandada negativa) y en este caso es potencia que se puede destinar a otro dispositivo como por ejemplo a la alimentación de la batería.

#### 4.1.3 Modelado de la batería.

El modelo de las baterías que se implementa en la simulación, al igual que el resto de componentes como la pila de combustible y el tanque de hidrógeno ya han sido diseñados en trabajos previos realizados por otros alumnos. En concreto, el modelo de la batería se puede consultar en [3]. Sin embargo es necesario comentar algunos aspectos de este componente del vehículo.

Las baterías instaladas en el vehículo FOX se tratan de batería del tipo Ion-Litio, unas baterías que se llevan utilizando desde hace muchos años atrás pero que se utilizan por su rapidez de respuesta ante la variación de carga y permiten estabilizar la red.

El rango de voltaje de cada celda de ion-litio es de 3.75V. De esta forma dependiendo del voltaje que se necesite, utilizaremos un determinado número de celdas.

Como ya se ha comentado, estas baterías son baterías recargables y son el elemento esencial que permite al vehículo eléctrico híbrido solucionar los desajustes que se producen entre la potencia generada y la potencia demandada.

Además, permite un rango mayor de estrategias de control en el vehículo ya que a través de su almacenamiento de energía eléctrica en forma de energía química permite reducir el consumo de combustible en el coche.

También es necesario comentar que hay que controlar la temperatura que alcanzan este tipo de baterías, ya que es importante que no alcancen temperaturas extremas que pongan en peligro el estado del vehículo, la vida del piloto o simplemente, que reduzcan la vida operativa de la batería.

Por último en la figura 4.2 se puede observar la curva característica de funcionamiento para la carga y la descarga de este tipo de batería cuando ha sido sometida a una potencia constante de 1kW.

Estas graficas se obtienen realizando test de este tipo (detallados en [3]) y permitiendo aproximar y estimar los valores iniciales que hay que introducir en el modelo de la batería.

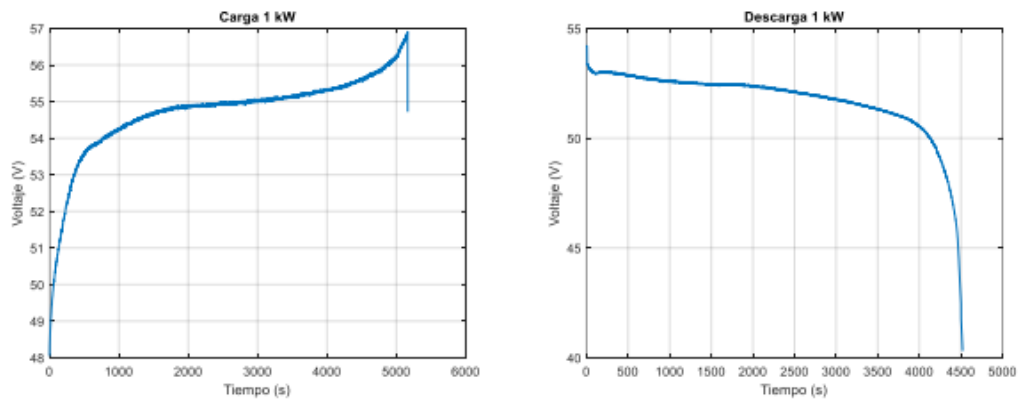


Figura 4-2. Curva característica de Ion-Litio.

Así, algunos parámetros iniciales hay que introducirlos manualmente como por ejemplo el estado de carga inicial de la batería o la resistencia interna de la misma entre otros. En la siguiente figura se muestra la cantidad de parámetros iniciales necesarios para el modelado de la batería:

Open Circuit Battery Voltage, "Vbt,0" (V)	51.58
Maximum Capacity of the battery, "C120,bt" (A·h)	367
Polarization Constant, "Kbt" (V)	0.006215
Amplitude of the exponential zone, "Abt" (V)	11.053
Inverse of the time constant in the exponencial zona, "Bbt" (A·h-1)	2.452
Internal Resistance, "R" (ohms)	0.07
Charge/Discharge Max. Current	100
SOC Initial Batteries (%)	80

Figura 4-3. Parámetros iniciales para el modelo de la batería.

La entrada a la batería es una potencia, que como ya se ha comentado al inicio de esta sección, si es positiva se produce un aumento del estado de carga de la batería (SOC) y una potencia negativa implica una descarga.

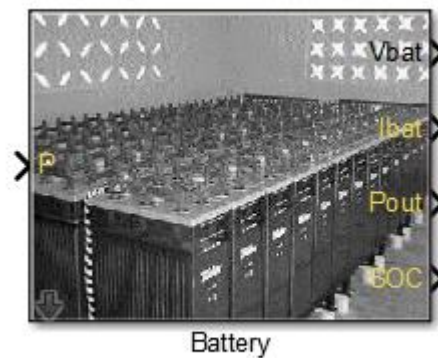


Figura 4-4. Modelo batería.

#### 4.1.4 Modelado de la pila de combustible.

La pila de combustible del vehículo FOX es el elemento capaz de generar electricidad a partir del hidrógeno, siendo este el combustible y la fuente de alimentación del dispositivo. El combustible sufre una reacción electroquímica, que se aprovecha para redirigir una corriente de electrones generada, a través de un circuito.

La pila de combustible instalada en el coche tiene una capacidad nominal de 1.2kW.

Además, toda la información relacionada con el modelado de la pila de combustible se puede ver en [3] como ya se ha comentado anteriormente.

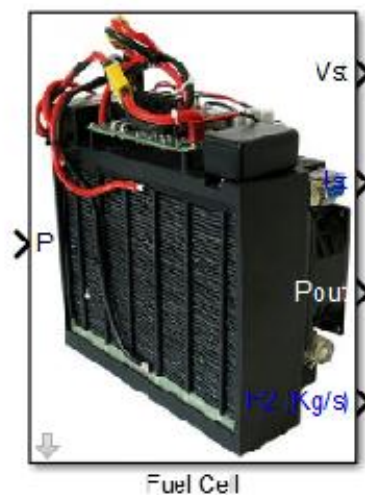


Figura 4-5. Modelo pila de combustible.

En la siguiente figura se muestran los parámetros iniciales necesarios para el modelo de la pila de combustible.

Fuel Cell Parameters	
Stack Temperature (K)	293
Nominal Stack Temperature (K)	296
Oxygen Pressure at the Cathode (bar)	0.16
Hydrogen Pressure at the Anode (bar)	1.55
Effective Area of the Membrane (cm <sup>2</sup> )	61
Number of Cell in the Fuel Cell	60
Number of Electrons per Molecule	2
Faraday Constant (Cn)	96485.33289

Figura 4-6. Parámetros iniciales pila de combustible.

#### 4.1.5 Modelado del tanque de hidrógeno.

El depósito del tanque de hidrógeno es el elemento encargado de almacenar el combustible necesario por la pila. El depósito en concreto almacena Hidruros Metálicos (HM), además absorbe el hidrógeno a una presión máxima de 5 bar y expulsa a un mínimo de 2 bar.

Los dos tanques instalados en el vehículo tienen una capacidad máxima de  $14 \text{ Nm}^3$ .

También es necesario comentar que el hidruro metálico escogido no requiere agua a una temperatura demasiado baja para la desorción ( $15\text{-}20^\circ\text{C}$ ) y por ello, se utiliza directamente agua de red.

Al igual que con la pila de combustible y la batería, toda la información referente al modelado del tanque de hidrógeno se puede encontrar en [3].



Figura 4-7. Modelo tanque de hidrógeno.

Los principales parámetros que hay que introducir antes de realizar la simulación son:

- La cantidad inicial de hidrógeno.
- El peso del tanque de hidrógeno.

También hay que indicar que aunque presenta dos entradas, en la simulación del vehículo FOX no se tiene en

cuenta el llenado del tanque. El vehículo parte al inicio de la trayectoria con una determinada cantidad de hidrógeno y disminuye a medida que avanza en el ciclo de conducción.

En la siguiente figura se muestran los parámetros iniciales necesarios para el modelado del tanque de hidrógeno.

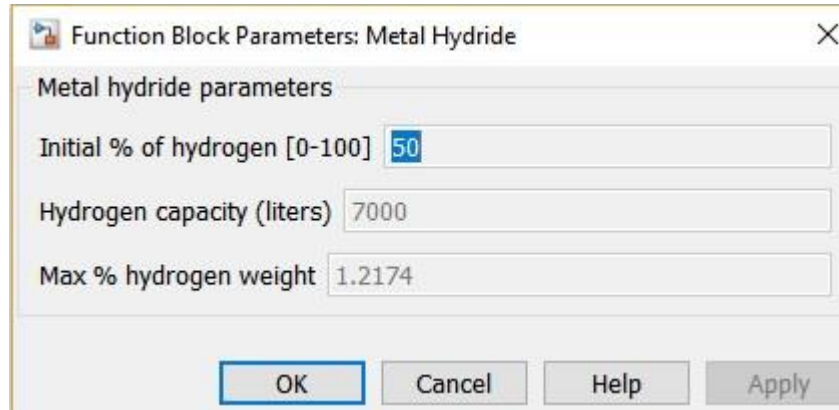


Figura 4-8. Parámetros iniciales modelo tanque de hidrógeno.

#### 4.1.6 Modelo del vehículo FOX.

Tras definir todos y cada uno de los elementos y explicar su forma de actuar en el modelo del vehículo FOX se muestra en esta sección el modelado en Simulink.

En un primer momento se muestra el modelo del vehículo sin incluir ningún modelo de control, de tal forma que los componentes del coche quedarían unidos de la siguiente forma:

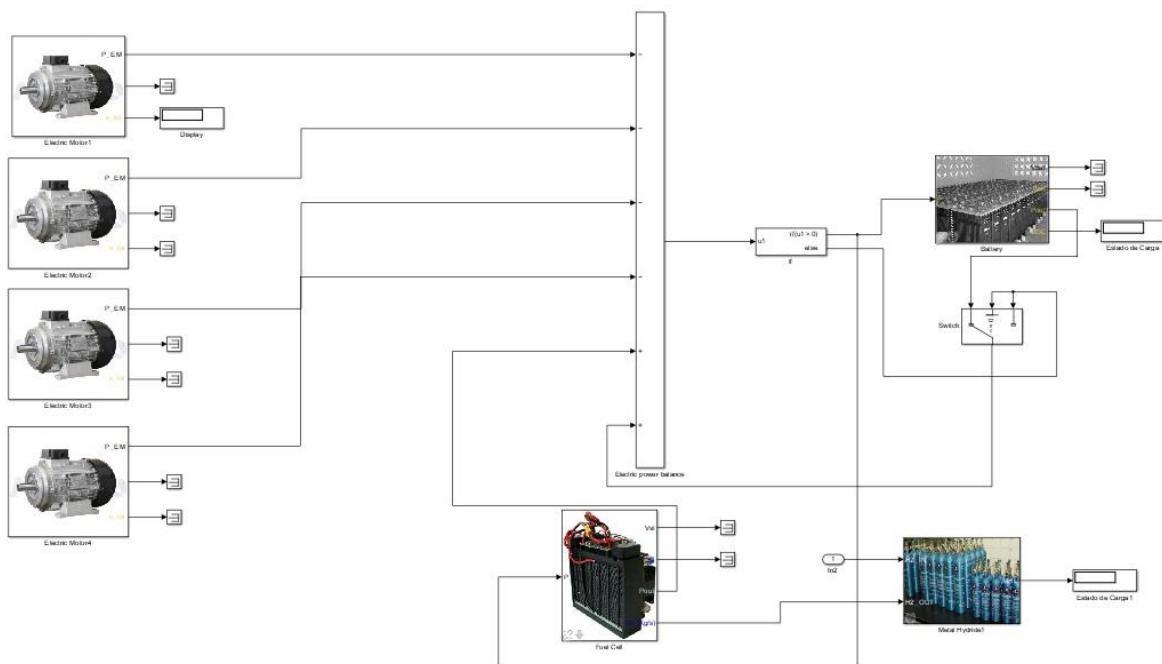


Figura 4-9. Visión general del modelo vehículo FOX sin control.

A continuación se muestra una visión muy general del modelo con el control de predicción MPC (cuyo funcionamiento se explicará en el apartado 4.7) para poder visualizar todos los subsistemas que conforman el modelo completo, aunque sea de forma intuitiva como se muestra en la figura 4-10.

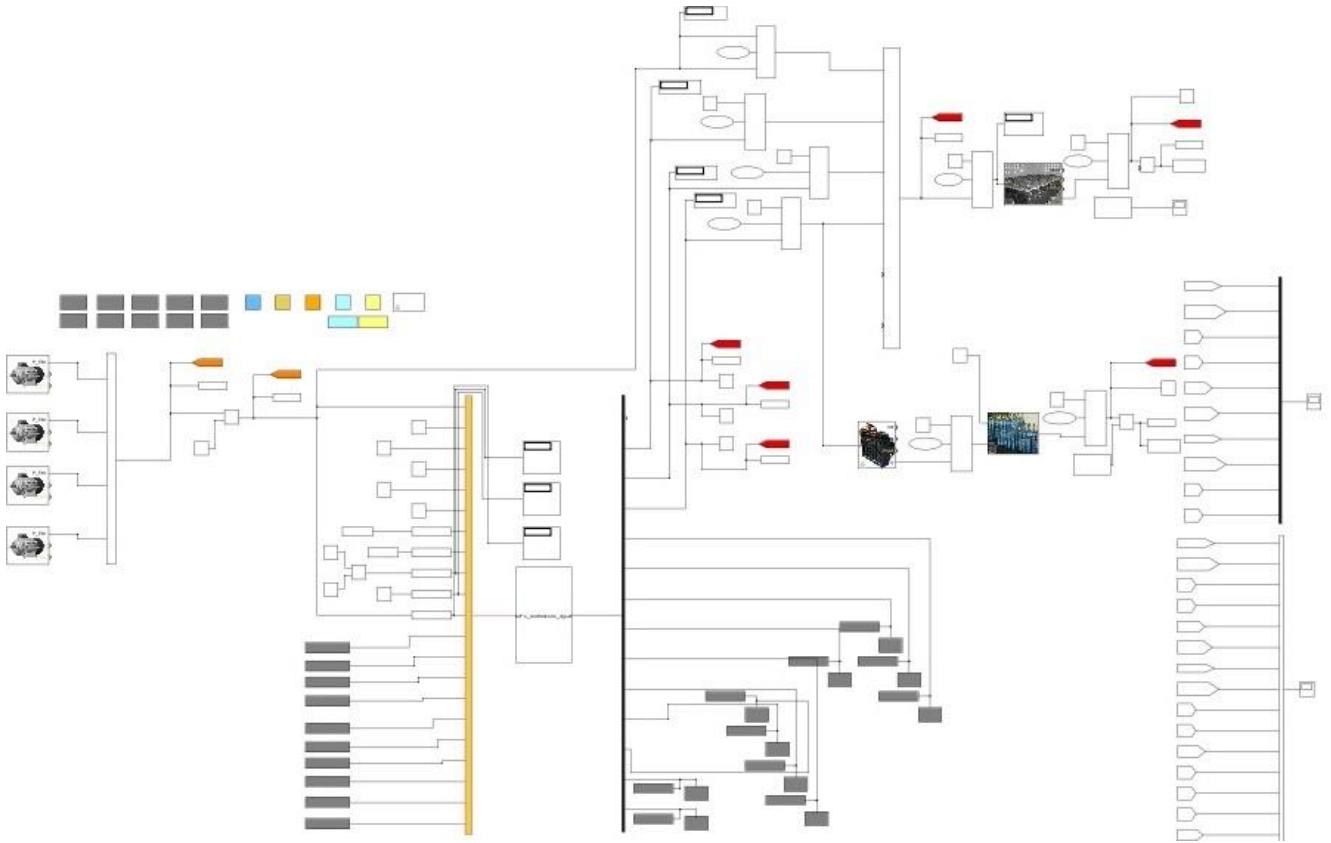


Figura 4-10. Visión general del modelo vehículo FOX.

A continuación, en la figura 4-11 se muestra la primera parte del modelo en la que se pueden ver los cuatro motores eléctricos del vehículo que demandan una potencia conectada directamente al bus principal con signo negativo (ya que absorbe potencia del bus).

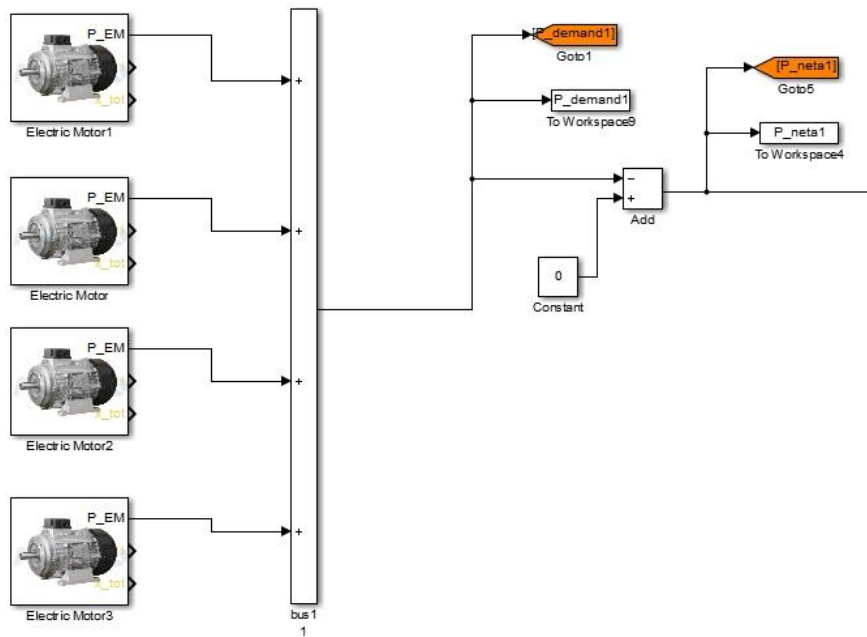


Figura 4-11. Primera parte del modelo vehiculo FOX

En la segunda parte del modelo se muestra ese bus principal, en el que se realiza el balance de potencia teniendo en cuenta la pila de combustible, que a su vez está conectada al tanque de combustible, ya que es su fuente de alimentación y por lo tanto, la batería es el elemento que está en contacto con el bus principal de tal forma que si la potencia neta es positiva, aprovecha para cargar su estado y si por el contrario, la potencia neta es negativa a porta potencia.

En la siguiente imagen se muestra la conexión entre los elementos del sistema. Y también hay que destacar que el tanque de hidrógeno no se rellena a lo largo de la simulación ya que no existe electrolizador en el vehículo.

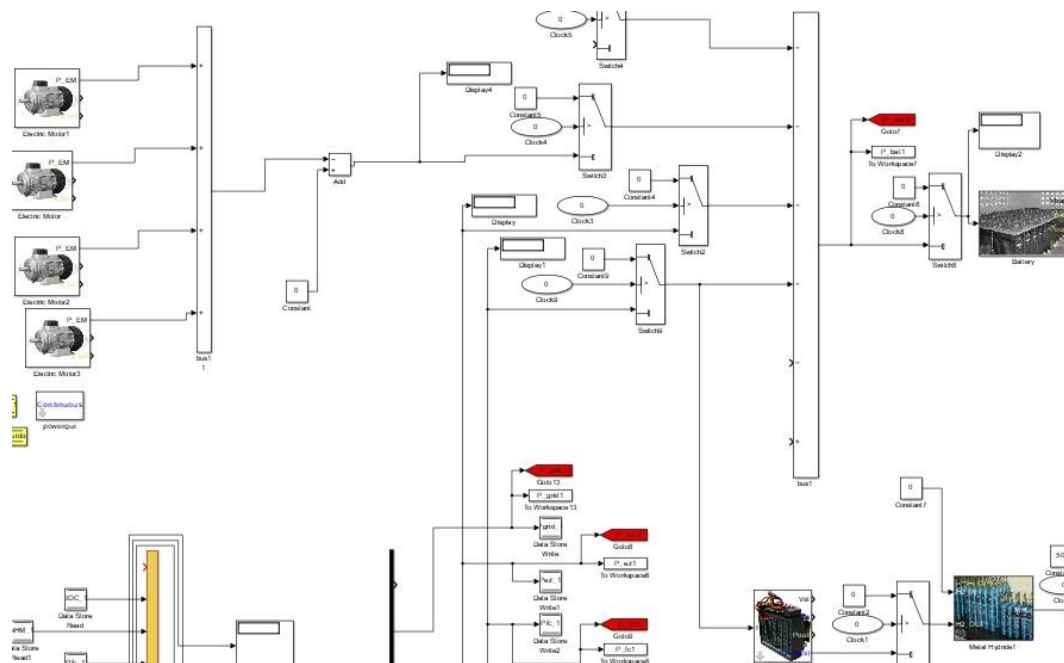


Figura 4-12. Segunda parte del modelo vehiculo FOX

Este modelo está realizado para que en todo momento la potencia demandada por los motores eléctricos sea producida por la batería, ya que interesa que esta esté en funcionamiento en todo momento y se consuma el menor combustible posible.

En la tercera parte, se muestra la conexión con el modelo de predicción MPC que es el que permite realizar la estrategia de control como se ha explicado anteriormente.

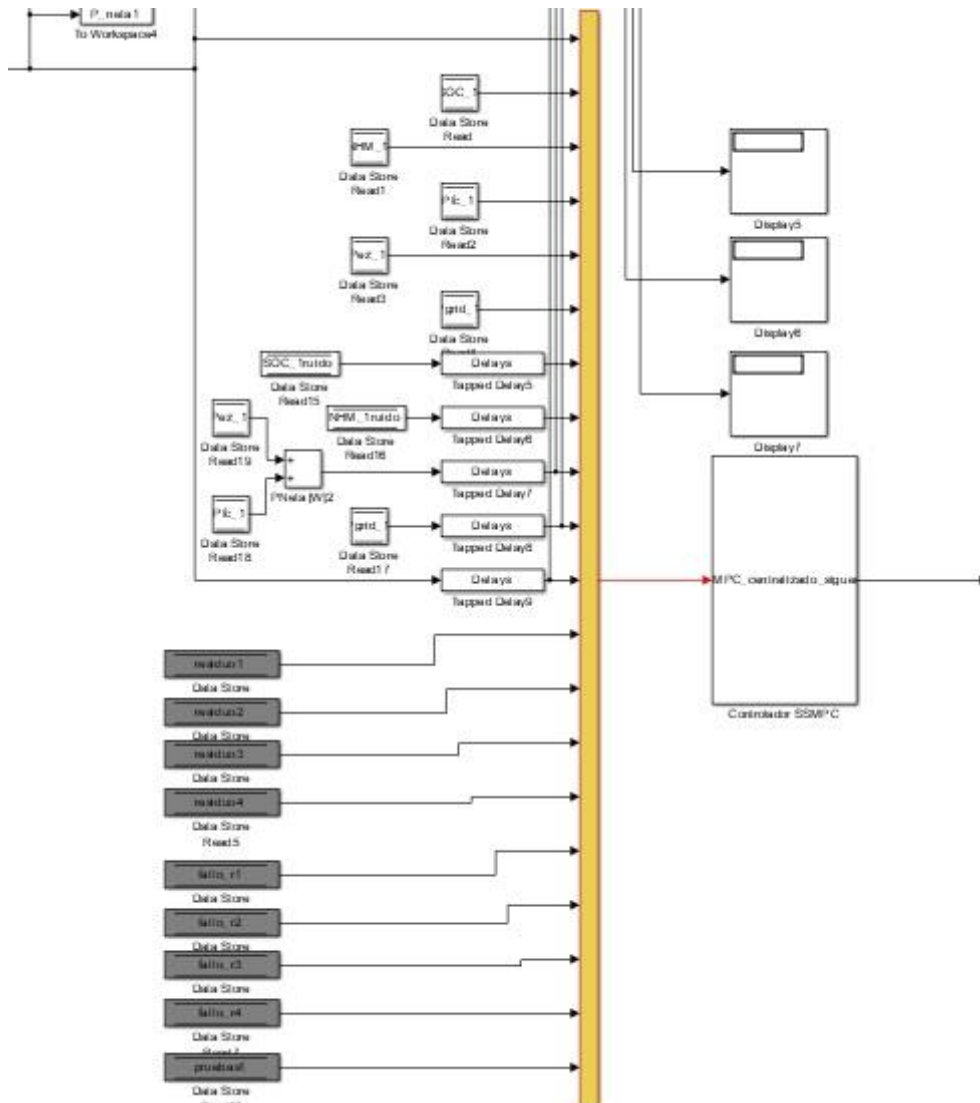


Figura 4-13. Tercera parte del modelo vehículo FOX

De esta forma se ha conseguido implementar cada uno de los componentes iniciales del vehículo con un modelo de predicción, que nos ha permitido así intuir y visualizar la demanda de potencia en el vehículo dependiendo de la trayectoria realizada por el mismo.

Los resultados obtenidos al aplicar dicho modelo se muestran en la sección 5 de este trabajo al igual que las aclaraciones necesarias para la comprensión de los mismos.



#### 4.1.7 Descripción del control MPC.

El control predictivo basado en modelo (Model Predictive Control) se trata de un método avanzado de control de procesos. Su principal característica es que se basa en un modelo de la planta para predecir las acciones futuras de control.

Las principales funciones que tiene que llevar a cabo el controlador son:

- El uso explícito del modelo del sistema para predecir las salidas futuras del proceso.
- El cálculo de una secuencia de control, de manera que se minimice la función objetivo.
- Llevar a cabo la estrategia de horizonte deslizante: El horizonte se desplaza en cada instante de control y se aplica únicamente la primera señal de control calculada.

Para su implementación en el modelo del vehículo FOX, se ha basado en el uso de este tipo de controlador en la microrred descrita en [3].

El objetivo de la gestión de potencia es el de entregar al motor la potencia que el usuario requiere en cada momento, realizándose esta acción de la manera más eficaz y eficiente posible, teniendo en cuenta las limitaciones de los dispositivos.

Por eso el controlador MPC es el más adecuado, ya que la función objetivo se puede sintonizar de manera que se asegure la entrega de la potencia demandada por el motor. Por su parte, las limitaciones de los dispositivos se tienen en cuenta en las restricciones.

El MPC se trata de un controlador basado en la optimización del sistema teniendo en cuenta un modelo de predicción relacionado con la predicción de comportamientos futuros del sistema gracias a un modelo dinámico del mismo. Esta optimización se consigue mediante la función de coste.

La estrategia de MPC se caracteriza por tres elementos: la estrategia de horizonte deslizante (que permite corregir las diferencias entre el comportamiento predicho por el modelo dinámico y el comportamiento real del sistema), el modelo de la planta y la función de coste.

A continuación se explicará brevemente cada uno de los componentes del modelo predictivo MPC.

##### 4.1.7.1 Estrategia deslizante:

Este tipo de estrategia se basa en que en cada instante de tiempo  $t$ , el controlador determina las salidas futuras haciendo uso de un modelo de planta para un horizonte de predicción  $N$ . Las predicciones de la variable controlada en  $N$  instantes de muestreo en adelante con datos hasta el instante  $t$  se denominan por:

$$\{\hat{y}(t+1|t), \dots, \hat{y}(t+N|t)\}$$

Para estas predicciones se hace uso tanto de los valores pasados de las variables manipuladas como de los valores presentes y pasados de las variables controladas del proceso, como se muestra en la siguiente figura:

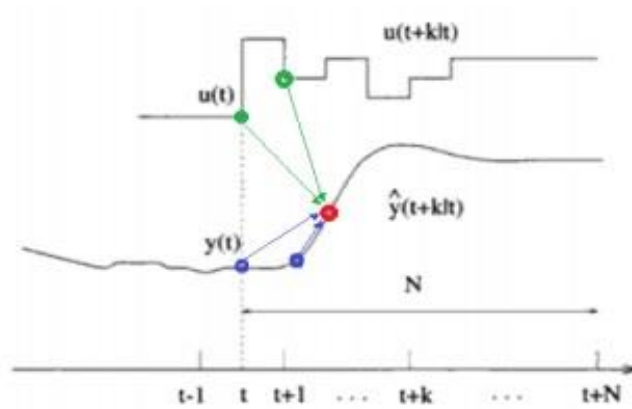


Figura 4-14. Predicción con horizonte  $N=N_2-N_1$

Y en la siguiente imagen se puede observar la estructura básica del modelo MPC donde se puede ver cómo el modelo permite predecir las salidas futuras en función de las entradas pasadas. Las acciones de control son calculadas por el optimizador y es aquí donde adquiere importancia la función de coste (función que permite indicar el criterio a optimizar) y las restricciones del proceso. Este modelo permite calcular el error futuro que se cometería, permitiendo así, actuar con ventaja al sistema.

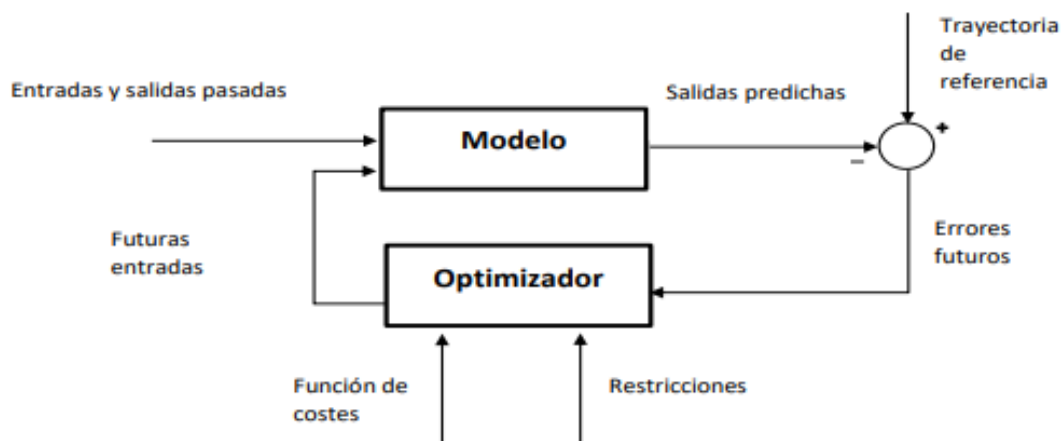


Figura 4-15. Estructura modelo MPC.

#### 4.1.7.2 Modelo de predicción:

El modelo de predicción es el modelo de la planta y es el elemento clave del modelo MPC.

Este modelo no debe ser lo suficientemente complejo, ya que no interesa que realice cálculos en largos periodos de tiempo pero tiene que ser lo suficientemente ventajoso para describir las dinámicas de la planta.

Las técnicas usadas para llevar a cabo un modelo de predicción se salen fuera del objetivo de este trabajo pero toda la información queda recogida en [3].

#### 4.1.7.3 Función de coste u optimizador:

Como ya se ha mencionado la función de coste es aquella función que permite modelar el criterio a optimizar cuando se calcula la acción de control.

Sin embargo, aunque existen multitud de variantes de funciones de coste que son productivas y satisfactorias para el modelo de MPC para obtener la ley de control, todas ellas tienen una característica en común. Esta regla general es que todas están basadas en un criterio que consiste en seguir una referencia en la salida (dentro del horizonte considerado) a la vez que se penaliza el esfuerzo de control requerido para alcanzarlo.

#### 4.1.7.4 Restricciones:

En la mayoría de los modelos de predicción existen numerosas restricciones en las operaciones. Tanto limitaciones físicas como en los actuadores y en el equipo y por lo tanto, es necesario tenerlas en cuenta en el control del sistema.

Normalmente existen limitaciones a la salida del sistema pero el modelo MPC permite incluir dichas restricciones en la propia formulación del modelo.

Una vez definido cómo funciona este modelo de predicción MPC utilizado en este trabajo es necesario explicar cómo se ha introducido e implementado con nuestro modelo del vehículo FOX y los resultados que se obtienen al ponerlo en práctica.



# 5 RESULTADOS OBTENIDOS

---

En esta sección se van a realizar una serie de experimentos en los que se van a aplicar diferentes perfiles de conducción al modelo explicado y desarrollado a lo largo de este trabajo. De esta forma, se va a intentar demostrar la validez de los resultados y la similitud entre los mismos.

Además también se va a representar la gráfica de la potencia demandada por los motores en cada uno de los perfiles de conducción, ya que es el vector de salida del modelo del motor desarrollado a lo largo de la sección 3 de este trabajo.

Por último destacar que los ciclos de conducción que se aplican ya estaban implementados en el modelo descrito en [2] y no se han podido aplicar otros perfiles de conducción reales en el mismo coche, por lo que esto quedará como posible línea de trabajo en el futuro.

## 5.1 Perfil de conducción ciclo “NEDC”

Para poder realizar la simulación correctamente es necesario aplicar un ciclo de conducción al vehículo, para ello, se ha seleccionado en primer lugar ciclo que ya se mostró anteriormente (el ciclo “NEDC”).

En este ciclo, la potencia demandada en función del tiempo de cada uno de los motores es la que se mostró en la figura 3.14 de este mismo trabajo.

Por su parte, si se introduce este ciclo al modelo del vehículo FOX se obtienen los resultados que se muestran en la figura 5.1. En dicha figura se muestran las diferentes potencias de cada uno de los elementos: en azul se muestra la potencia demandada por los cuatro motores eléctricos (de ahí que sea negativa); en rosa se representa la potencia generada por la batería, y por último, la línea verde muestra la potencia aportada por la pila de combustible, ya que solo es al final del trayecto cuando es necesaria la aportación de potencia por parte de la pila de combustible y así poder cargar las baterías.

Comparando con la potencia demandada por un motor y teniendo en cuenta que en el vehículo existen cuatro motores eléctricos en total (siendo la potencia necesitada por estos la única potencia demandada) se demuestra la correspondencia, validez y sobre todo la concordancia entre el modelo del motor y el modelo del vehículo FOX implementado. Lo mismo que sucede en este ciclo, ocurre en el resto de ciclos que se muestran a continuación y por lo tanto, se puede observar cómo se distribuye la potencia a lo largo del perfil de conducción que lleva a cabo el vehículo.

Se muestra que en la mayoría de los casos la potencia demandada es totalmente producida por las baterías, entrando en juego la pila de combustible siempre al final del trayecto, cuando se acumula el desgaste y la descarga de la batería o simplemente cuando se necesita más potencia adicional y las baterías no son capaces de producir la potencia total demandada por los motores.

También hay que indicar, que en la mayoría de los perfiles que se aplican en este trabajo, la potencia demandada por los motores es negativa en muchos instantes de tiempo, lo que significa que en ese instante de tiempo los motores no necesitan potencia, bien porque aprovechan la cinética del movimiento o bien por otra situación distinta, pero eso significa que la batería puede aprovechar ese instante para cargar su estado.

Todo lo que se ha explicado para este ciclo, se puede aplicar al resto de ciclos que aparecen en los siguientes apartados. Por lo tanto, se demuestra una regla general y de esta forma, se da validez al modelo creado y se puede confiar en la precisión de los resultados.

En la figura 5-1 se muestra el ciclo con los diferentes colores explicados anteriormente.

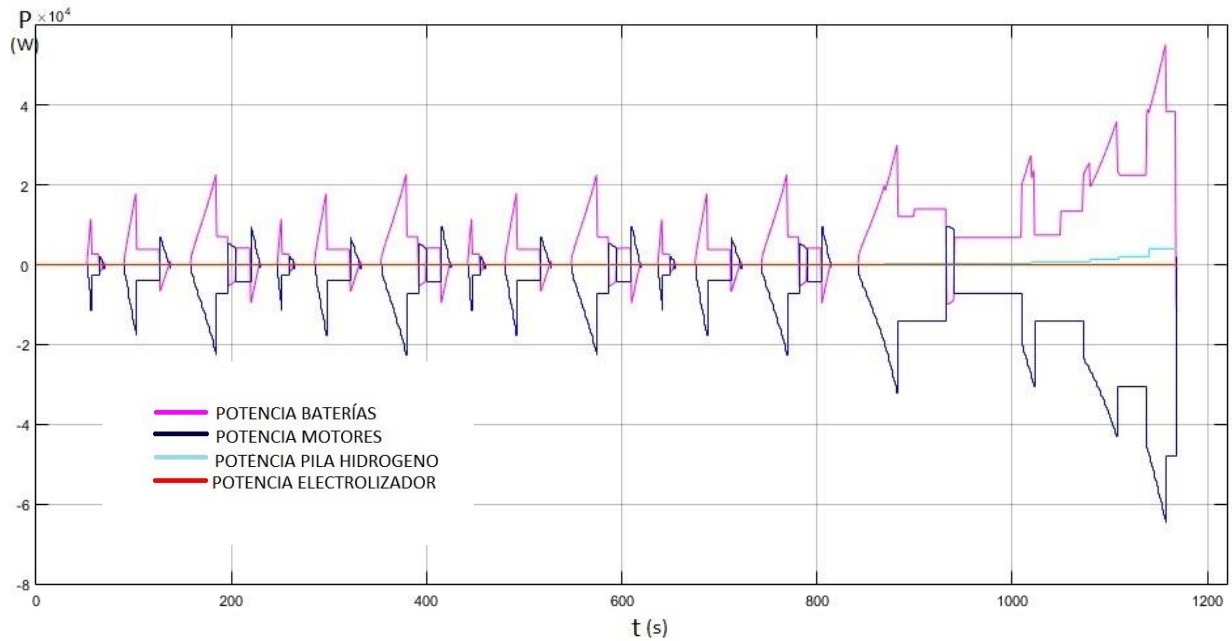


Figura 5-1.Resultado obtenido simulación ciclo “NEDC”.

## 5.2 Perfil de conducción ciclo “USA CITY 1”

Por su parte en este perfil de conducción, la potencia demandada por unidad de tiempo por cada uno de los motores eléctricos es la que se muestra a continuación, siendo un ciclo en los que aparecen picos de potencia muy repentinos y acusados por los motores y tramos de bajada en los que ni se demanda ni sobra potencia.

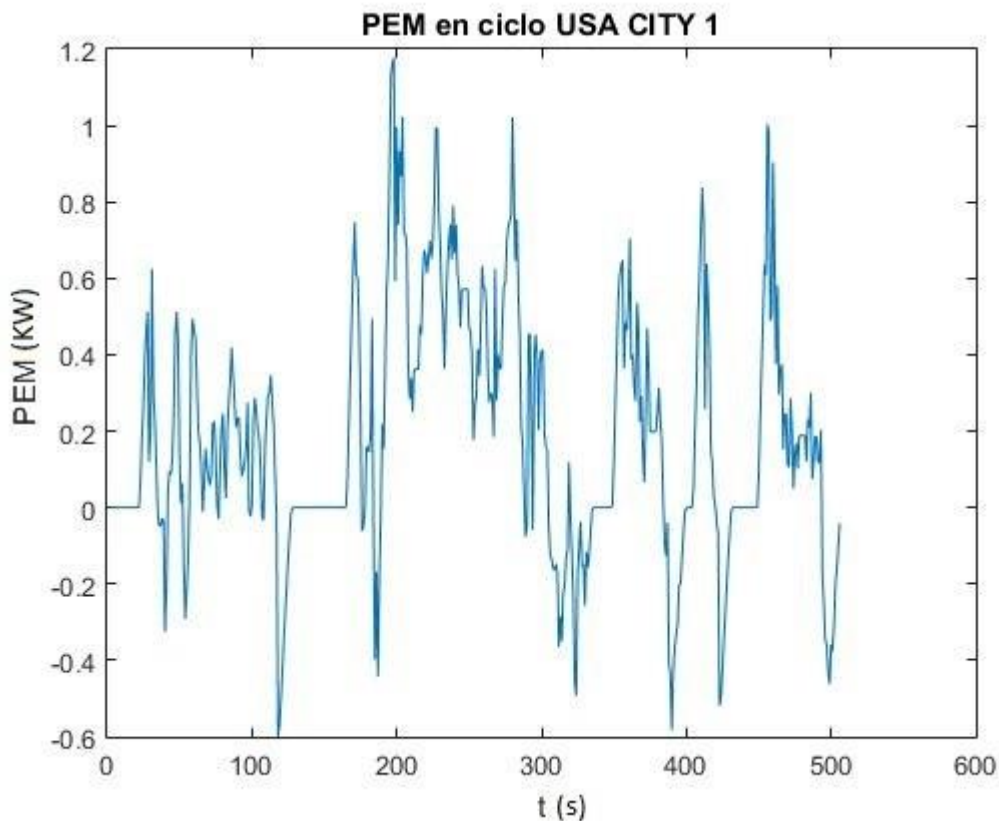


Figura 5-2.Potencia demandada por cada motor en ciclo “USA CITY 1”.

A continuación se muestran los resultados obtenidos de este ciclo en la simulación en el modelo del vehículo FOX y se muestra la concordancia con la gráfica anterior, apareciendo la potencia producida por la pila de combustible a partir del instante de tiempo  $t = 250$  aproximadamente.

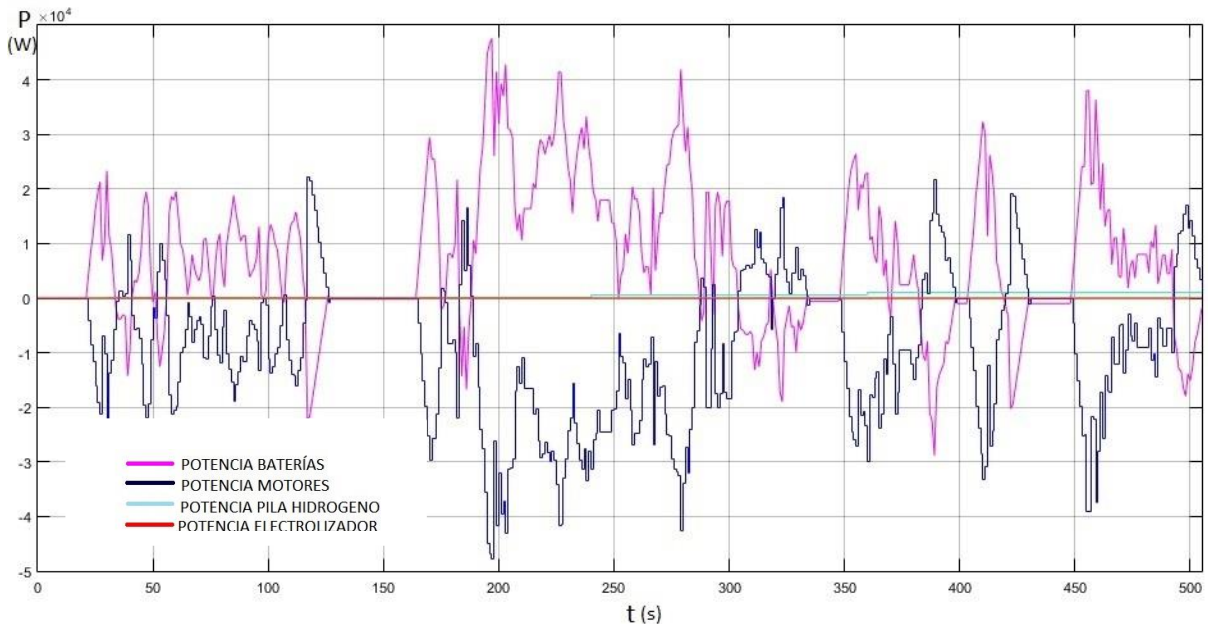


Figura 5-3. Resultado obtenido simulación ciclo “USA CITY 1”.

### 5.3 Perfil de conducción ciclo “CITY MANUAL”

En el ciclo de conducción “CITY MANUAL”, la potencia demandada por unidad de tiempo por cada uno de los motores eléctricos es la siguiente:

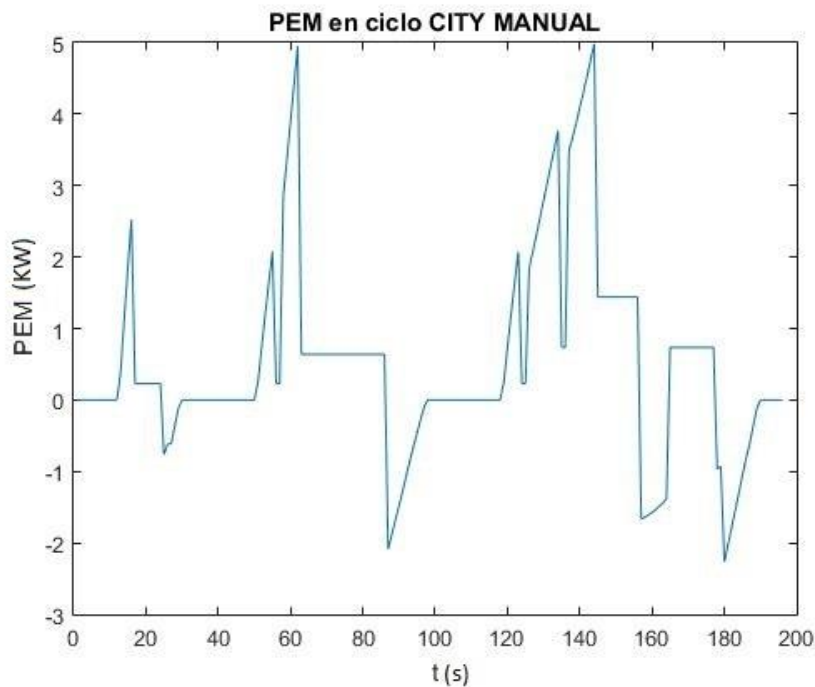


Figura 5-4. Potencia demandada por cada motor en ciclo “CITY MANUAL”.

Y la simulación en el modelo del vehículo se muestra en la siguiente figura donde destaca la curiosidad de que prácticamente es despreciable el uso de la pila de combustible en dicho trayecto.

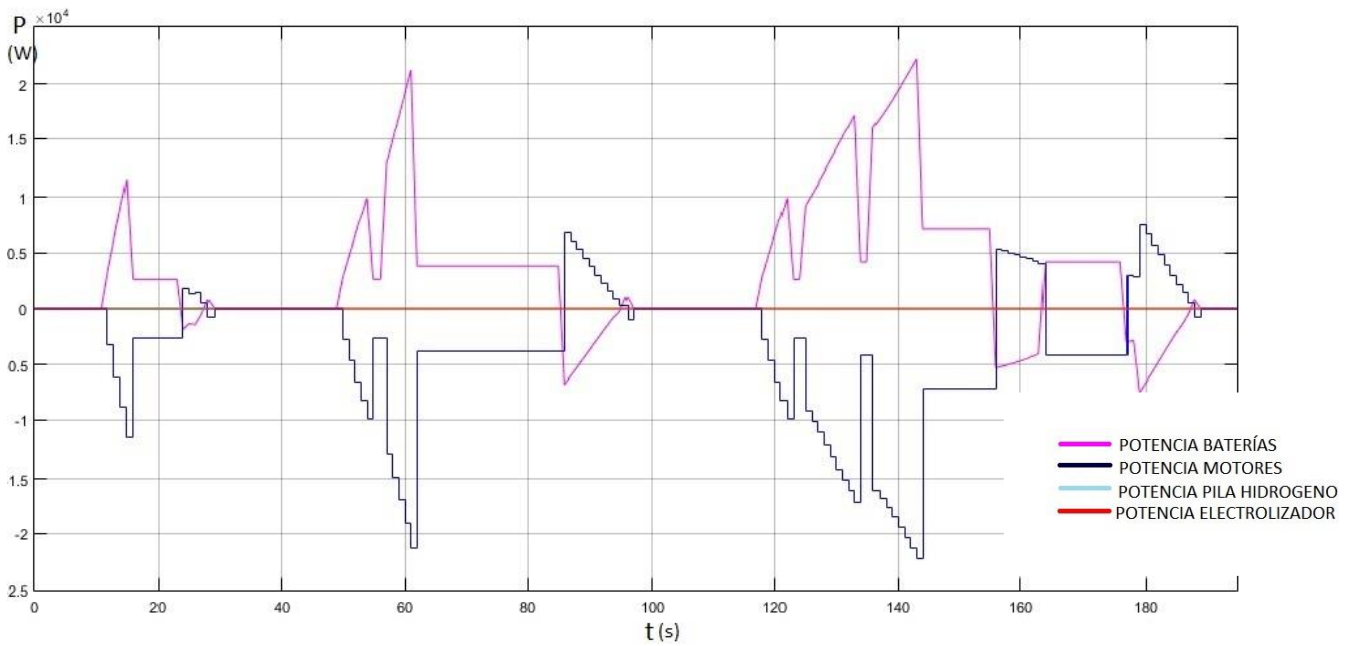


Figura 5-5.Resultado obtenido simulación ciclo “CITY MANUAL”.

#### 5.4 Perfil de conducción ciclo “JAPON MODEL 15”

Por último, en este ciclo de conducción aplicado, se muestra la potencia necesitada por cada uno de los motores por unidad de tiempo en la siguiente figura, apreciando los picos de potencia más acusados en comparación con el resto de ciclos.

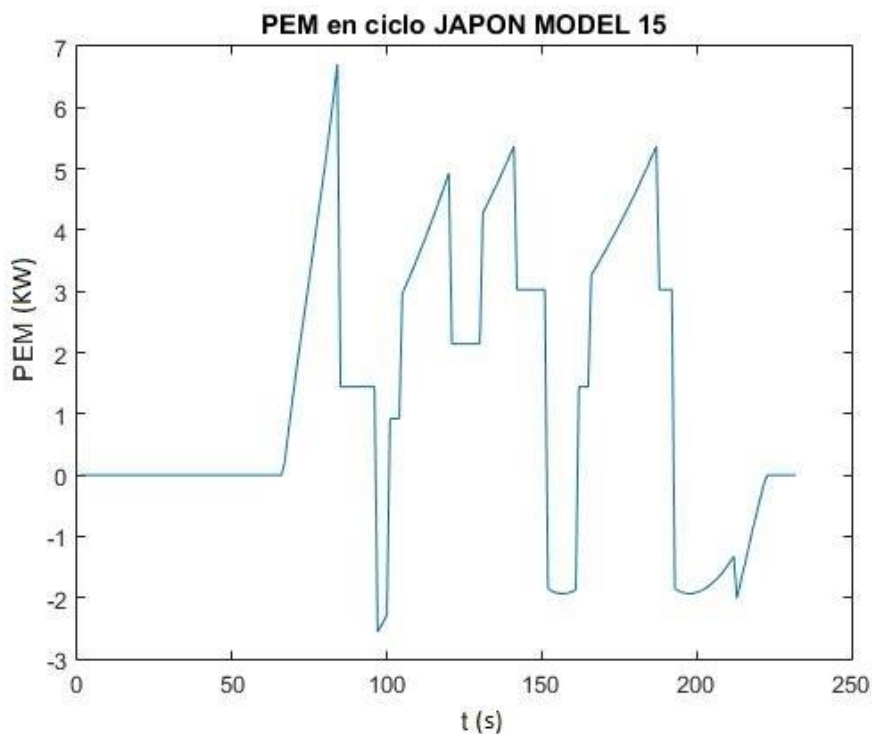


Figura 5-6.Potencia demandada por cada motor en ciclo “JAPON MODEL 15”.



La simulación en el modelo del vehículo FOX es curiosa dado que existe un tramo de pendiente hacia abajo en el que no se necesita potencia y después la potencia demandada por los motores es producida por las baterías, salvo hasta el instante  $t = 170$ , aparece en funcionamiento la pila de combustible para apoyar esa subida de potencia.

Dado que en la figura 5-7 no se observa bien, se ha decidido realizar un zoom en dicha simulación en la figura 5-8 para observar cómo se produce la aparición de la pila de combustible comentada.

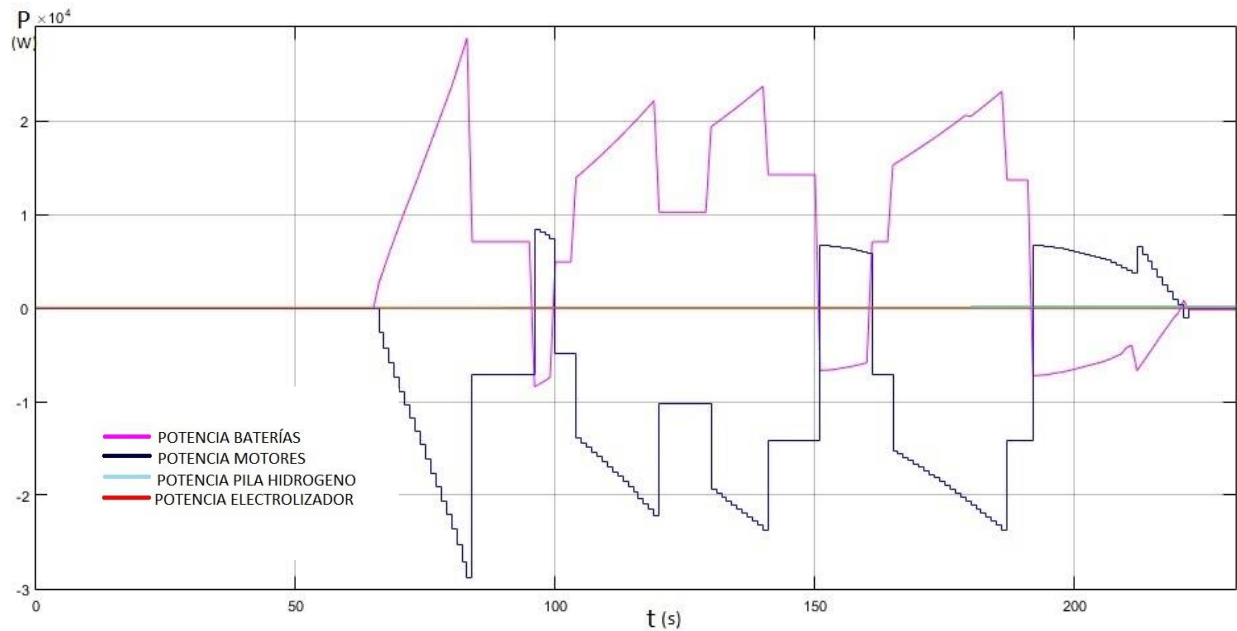


Figura 5-7.Resultado obtenido simulación ciclo “JAPON MODEL 15”.

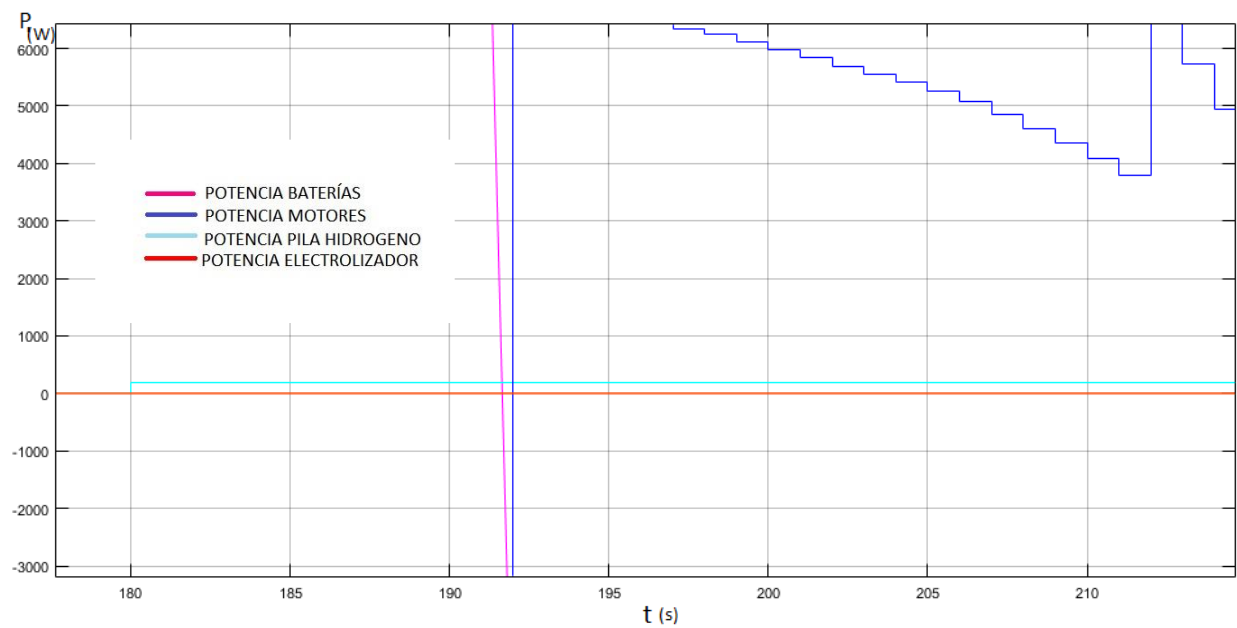


Figura 5-8.Ampliación ciclo de conducción “JAPON MODEL 15”.



# 6 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO

---

En esta sección se va a tratar las conclusiones a las que se han llegado a lo largo de la realización de este trabajo teniendo en cuenta los objetivos que se fijaron al comienzo del mismo. Teniendo en cuenta las herramientas utilizadas y el tiempo del que se disponía.

## 6.1 Conclusión final

En este trabajo se han conseguido los objetivos iniciales que se propusieron al comienzo del mismo, ya que se ha conseguido realizar un modelo exitoso de motor eléctrico que permite dar la potencia demandada dependiendo de la trayectoria a realizar. Y no solo eso, también se ha conseguido implementar dicho modelo con el resto de elementos ya existentes y realizados por otros alumnos, de tal forma que se ha llegado a constituir un modelo realista del vehículo FOX que se encuentra en el laboratorio del departamento.

Además dicho modelo, permite un importante avance en el desarrollo de los vehículos eléctricos híbridos, ya que permite reducir el consumo de combustible en el perfil de conducción, aunque depende fuertemente de este.

## 6.2 Líneas futuras de trabajo

Algunas posibles líneas futuras de trabajo son el estudio del modelo del vehículo FOX aplicando otro tipo de modelo de predicción que no sea el modelo MPC y realizar otro modelo del motor eléctrico basado en otras ecuaciones, comparándolo con el desarrollado en este trabajo y observar cuál es más efectivo, entre otras.

Otras líneas de trabajo son el intento de mejorar el rendimiento de los vehículos eléctricos híbridos así como también intentar mejorar la velocidad alcanzada por los mismos.

También se trata de una posible línea futura de trabajo la inclusión de nuevos elementos en el vehículo FOX como son los supercondensadores y el efecto que estos tendrían en el vehículo, así como el análisis de fallos del modelo energético desarrollado.

Todo esto queda abierto como futura línea de investigación para resto de alumnos o investigadores interesados en el tema.



# BIBLIOGRAFÍA

---

- [1] Guzzella L., Onder C. H. (2004). *Introduction to Modeling and Control of Internal Combustion Engine Systems*. Springer Verlag, Berlín.
- [2] Guzzella L., Amstutz A. (2005). *“The QuasiStatic Toolbox Manual”*
- [3] Proyecto Fin de Master, *“Automatización de una microrred con doble banco de baterías”*. Pedro Antonio Fernández Gómez.
- [4] Trabajo Fin de Grado, *“Diseño de controladores para vehículo eléctrico con cuatro motores en rueda”*. Miguel Navas Alcántara.
- [5] Trabajo Fin de Grado, *“Estudio preliminar del diseño de una nueva unidad de control del motor para el vehículo FOX”*. Pablo Marín Cortés
- [6] Trabajo Fin de Grado, *“Modelado y simulación del Skywalker X8”*. Eduardo Fernández Camacho.
- [7] Documentación acerca de vehículos híbridos.  
<http://www.aficionadosalamecanica.net/hibridos.htm>.
- [8] Documentación acerca de la pila de combustible de hidrógeno.  
<http://www.energia2012.es/sites/default/files/Hidr%C3%B3geno.%20Pilas%20de%20combustible%20de%20tipo%20PEM.pdf>.
- [9] Documentación acerca de los coches eléctricos de la marca PEUGEOT.  
<https://www.peugeot.es/gama/descubre-nuestra-gama/nuestros-coches-electricos.html>.