



**Universidad**  
Zaragoza

## Trabajo Fin de Grado

Implementación de un sistema de Pila de  
Combustible en el sistema de control de un  
vehículo eléctrico

Autor/es

**Natalia Artal Paracuellos**

Director/es

**Emilio Larrodé Pellicer**

Escuela Universitaria de Ingeniería y Arquitectura de Zaragoza (EINA)

2015



## DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./D<sup>a</sup>. NATALIA ARTAL PARACUELLOS,

con nº de DNI 76923147-S en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo

de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la

Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA, (Título del Trabajo)

IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE PILA DE COMBUSTIBLE EN EL SISTEMA  
DE CONTROL DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada  
debidamente.

Zaragoza, 25 de Junio de 2015

Fdo: Natalia Artal Paracuellos

# Implementación de un sistema de Pila de Combustible en el sistema de control de un vehículo eléctrico

## Resumen

---

- **Objetivo:** Incorporación a la algoritmia original del vehículo eléctrico base, las estrategias de control y seguridad de una segunda fuente basada en una tecnología de la pila de combustible.

Con la implementación de la segunda fuente de energía, se conseguirá aumentar la autonomía del vehículo de forma eficiente, manteniendo las medidas de seguridad estándar e incorporando las concernientes a la pila de combustible. Su estrategia de energía ("*Energy Management*") será desarrollada e integrada en la existente.

- **Finalidad:** Incremento de la autonomía de un vehículo eléctrico y apoyo al sistema de tracción liderado por la batería, aumentando su ciclo de vida útil. Desarrollo de tecnología novedosa y limpia.

- **Aportación del proyecto:**

Aportación general

- Conocimiento sobre tecnologías limpias, conocimiento sobre pilas de combustible
- Uso y aplicación de la plataforma software que permite la modelización
- Estudio sobre dos sistemas de energía y control de ambos para actuar simultánea y correlativamente
- Reducción de fuentes de energía contaminantes que usan combustibles fósiles

Aportación técnica

- Hibridación de un vehículo eléctrico
- Incremento de la autonomía total de un vehículo eléctrico
- Mejora del uso de la batería de tracción del vehículo (batería de ión-Litio) gracias al uso del sistema de pila de combustible a implementar
- Estudio de consumo de un vehículo híbrido de pila de consumo

- **Alcance del proyecto:** El alcance de éste radica en la propia integración de un sistema de pila de combustible en un vehículo eléctrico. Dicha integración se refiere a la algoritmia, al modelo software integrado en la unidad de control del vehículo.

Esta implementación se basa en un sistema de pila de combustible cuyo principal parámetro variable es la capacidad de almacenaje de dicho sistema.

Para la verificación del modelo final, se realiza una simulación de consumo que verifica los objetivos de funcionamiento y prestaciones; en concreto la autonomía del vehículo final.

- **Duración y carga de trabajo:** Casi 5 meses de trabajo distribuidos en 665 horas.

# Índice

---

Resumen.....	1
Índice.....	2
1. Objetivo.....	5
<b>1.1. Objetivo del proyecto</b> .....	5
<b>1.2. Fases del proyecto</b> .....	6
<b>1.3. Cronograma y Recursos</b> .....	7
2. Antecedentes.....	9
<b>2.1. Evolución del vehículo eléctrico en Europa</b> .....	9
<b>2.2. Ventajas y limitaciones de los vehículos eléctricos</b> .....	10
2.2.1. Ventajas.....	10
2.2.2. Inconvenientes.....	11
3. Descripción de la plataforma base y premisas del nuevo sistema a integrar.....	12
<b>3.1. Descripción del vehículo base</b> .....	12
3.1.1. Funcionalidad.....	12
3.1.2. Sistema de almacenaje de energía y capacidad.....	13
3.1.3. Sistema de tracción.....	13
3.1.4. Pesos y capacidad de transporte.....	14
3.1.5. Sistema de control.....	14
<b>3.2. Descripción del nuevo sistema a implementar</b> .....	15
3.2.1. Premisas del sistema de pila de combustible.....	16
4. Integración del algoritmo de control.....	16
<b>4.1. Objetivos técnicos del proyecto</b> .....	16
4.1.1. Objetivos de funcionamiento (Functional – Performance targets).....	16
4.1.2. Objetivos de diseño (Design targets).....	19
4.1.3. Listado de especificaciones vehiculares.....	21
<b>4.2. Libro de especificaciones</b> .....	21
4.2.1. Premisas consideradas a nivel de vehículo.....	22
4.2.2. Libro de especificaciones.....	23
<b>4.3. Descripción del algoritmo de gestión de la pila de combustible (“Energy Management”)</b> .....	43

Título: **Implementación de un sistema de Pila de Combustible en el sistema de control de un vehículo eléctrico**

4.3.1.	Listado de señales .....	43
4.3.2.	Implementación del algoritmo.....	44
<b>4.4.</b>	<b>Validación funcional de la integración.....</b>	<b>46</b>
4.4.1.	Resultados de la validación funcional del vehículo.....	46
5.	Simulación de consumo .....	58
<b>5.1.</b>	<b>Datos de entrada de la simulación.....</b>	<b>59</b>
<b>5.2.</b>	<b>Condiciones iniciales para la simulación.....</b>	<b>61</b>
<b>5.3.</b>	<b>Resultados de la simulación de consumo .....</b>	<b>61</b>
5.3.1.	NEDC.....	61
5.3.2.	Comparación de resultados de la simulación .....	64
6.	Conclusiones.....	65
<b>6.1.</b>	<b>Puntos críticos del proyecto .....</b>	<b>65</b>
<b>6.2.</b>	<b>Conclusiones finales del proyecto.....</b>	<b>65</b>
7.	Referencias.....	66
Anexos.....		67
1.	Vocabulario .....	67
<b>1.1.</b>	<b>Vehículos eléctricos (VE) .....</b>	<b>67</b>
<b>1.2.</b>	<b>Vehículos híbridos .....</b>	<b>68</b>
1.2.1.	Tipología de vehículos híbridos.....	68
1.2.2.	Arquitectura de vehículos híbridos .....	69
<b>1.3.</b>	<b>Pila de combustible (Fuel cell, FC).....</b>	<b>75</b>
1.3.1.	Tipos de pilas de combustible .....	76
1.3.2.	Aplicaciones.....	76
1.3.3.	Hidrógeno.....	77
1.3.4.	El vehículo de hidrógeno. Su funcionamiento .....	77
<b>1.4.</b>	<b>Range anxiety .....</b>	<b>78</b>
<b>1.5.</b>	<b>Estado de carga.....</b>	<b>79</b>
<b>1.6.</b>	<b>Alto voltaje.....</b>	<b>79</b>
<b>1.7.</b>	<b>Potencia y par motor.....</b>	<b>79</b>

Título: **Implementación de un sistema de Pila de Combustible en el sistema de control de un vehículo eléctrico**

<b>1.8. Ciclos de conducción</b> .....	80
1.8.1. NEDC.....	80
1.8.2. WLTP.....	80
1.8.3. US06 .....	81
1.8.4. Steady 80.....	81
1.8.5. Real.....	81
2. Descripción de la plataforma hardware y modelización.....	82
<b>2.1. Justificación de la elección de la plataforma</b> .....	82
2.1.1. Estado del arte .....	82
2.1.2. Plataforma de desarrollo “Software” .....	83
2.1.3. Plataforma de desarrollo “Hardware” .....	84
<b>2.2. Descripción de la herramienta de modelización</b> .....	85
2.2.1. Introducción al entorno Matlab .....	85
2.2.2. Introducción al entorno Simulink.....	85

Este documento contiene 66 páginas (87 páginas incluyendo los anexos), y ha sido escrito íntegramente por el autor citado.

# 1. Objetivo

---

Frente a los puntos fuertes de los vehículos eléctricos, se encuentran las limitaciones, de las cuales la autonomía del vehículo, supone el mayor hándicap para los conductores.

En consecuencia a lo anterior, se diseñan soluciones para solventar este problema. Soluciones como la hibridación del vehículo, que mediante una fuente de energía adicional permitan incrementar el kilometraje final que un vehículo eléctrico podrá recorrer.

Según la definición científica, un vehículo híbrido es un vehículo que posee dos fuentes de tracción diferentes para moverse. Aparte de una fuente de tracción con un depósito de energía eléctrica, como una batería o ultracondensadores, existe una segunda con una fuente de energía que mayoritariamente es un motor de combustión. También existen otros tipos de vehículos híbridos de tipo neumático o incluso hidráulico que se están vendiendo en el mercado a precios muy razonables según su utilidad.

La alternativa integrada en este proyecto, es una solución de tecnología de pila de combustible como extensor de la autonomía global del vehículo. Esta solución permite mantener las ventajas que ofrece un vehículo puramente eléctrico; cero emisiones, reducción de los niveles de sonoridad vehicular, independencia de los combustibles fósiles, etc. Y además, incorpora las ventajas que proporciona un vehículo híbrido.

## 1.1. Objetivo del proyecto

Como consecuencia de la integración de un sistema de “*Range extender (REX)*” o prolongador de autonomía en un vehículo eléctrico, el **objetivo principal** de este proyecto es la implementación en el modelo el control de una segunda fuente de energía. Gracias a una fuente de energía limpia adicional, el nuevo vehículo incorporará un sistema de pila de combustible por el que el hidrógeno como recurso, generará electricidad adicional como soporte al vehículo eléctrico base y aumentará su autonomía.

Este proyecto pretende **incorporar a la algoritmia original del vehículo eléctrico base, las estrategias de control y seguridad de una segunda fuente basada en una tecnología de la pila de combustible.**

Con la implementación de la segunda fuente de energía, se conseguirá aumentar la autonomía del vehículo de forma eficiente, manteniendo las medidas de seguridad estándar e incorporando las concernientes a la pila de combustible. Su estrategia de energía (“*Energy Management*”) será desarrollada e integrada en la existente.

El resultado del proyecto será la algoritmia completa de un vehículo híbrido en serie con una tracción hidrógeno-eléctrica. Algoritmia capaz de ser implementada en cualquier vehículo que cumpla con características similares, pues será calibrable según distintos escenarios.

## Título: **Implementación de un sistema de Pila de Combustible en el sistema de control de un vehículo eléctrico**

(Para más información sobre REX, ver el apartado Anexos, 1.2.2.1 Vehículo híbrido en serie, en la página 69).

### 1.2. Fases del proyecto

El proyecto se ha subdividido en 4 partes distintas y a su vez en cada una de estas fases, se han definido unas tareas o sub-actividades que han marcado la cronología del proyecto y se describen a continuación.

#### Fase 1: **Antecedentes y elección de propuesta de proyecto**

- 1.1 “*Brainstorming*” o tormenta de ideas de proyecto
  - 1.2 Estado del arte
  - 1.3 Elección de proyecto
  - 1.4 Recopilación de información del vehículo base
  - 1.5 Estudio de carencias del vehículo base
  - 1.6 Propuesta de solución
  - 1.7 Objetivos del proyecto
- 

Durante la primera fase del proyecto se estudia el campo de trabajo para la elección del proyecto y se investiga el actual estado del arte de vehículos de estas características.

Una vez seleccionado el proyecto y su alcance, se procede a recopilación de información del vehículo base y estudio de sus carencias para ser abordadas dentro del alcance del proyecto.

Con lo anterior, se establecen los objetivos principales del proyecto para cerrar la propuesta.

#### Fase 2: **Definición de la plataforma para la implementación**

- 2.1 Elección de la plataforma
  - 2.2 Aprendizaje del uso de la plataforma
- 

En la segunda fase se selecciona la plataforma para la implementación del algoritmo y se procede al aprendizaje de su uso, que queda fuera del alcance del proyecto.

#### Fase 3: **Integración del algoritmo de control**

- 3.1 Objetivos técnicos del proyecto (“*Target setting*”)
- 3.2 Libro de especificaciones (“*Specs book*”)

Título: **Implementación de un sistema de Pila de Combustible en el sistema de control de un vehículo eléctrico**

- 3.3 Integración del algoritmo de control en el modelo
  - 3.4 Validación funcional de la integración
  - 3.5 Simulación de consumo
- 

La fase 3 comprende la memoria técnica del proyecto, en ella se describe el trabajo técnico realizado.

- 3.1: Objetivos técnicos del proyecto ("*Target setting*")

El primer apartado define los objetivos técnicos de la solución.

- Objetivos de funcionamiento
- Objetivos de diseño
  
- 3.2: Libro de especificaciones ("*Specs book*")

El segundo punto describe la casuística de implementación. Los posibles escenarios en los que el vehículo puede verse y cómo debe actuar su unidad de control para comandar acciones vinculantes a dichos escenarios.

- 3.3: Integración del algoritmo de control en el modelo

Este apartado se basa en la implementación del razonamiento desarrollado en el apartado anterior a través de la plataforma Matlab-Simulink.

- 3.4: Validación funcional de la integración

El desarrollo del cuarto punto radica en la comprobación de que el algoritmo implementado en el modelo base, funciona correctamente.

- 3.5: Simulación de consumo

Se realizará una validación del consumo, simulando un ciclo estándar homologador según normativa <sup>1</sup> de consumo.

Fase 4: **Documentación y redacción**

### 1.3. Cronograma y Recursos

La Figura 1 muestra el cronograma del proyecto dividido por fases y actividades anteriormente descritas. La figura también hace referencia a los recursos invertidos durante la realización del mismo. Con un total de **665 horas de trabajo dentro del alcance del proyecto** y 878 horas totales (incluyendo el aprendizaje del uso de la herramienta) que representan casi 5 meses de trabajo ininterrumpido.

---

<sup>1</sup> Reglamento ECE R101

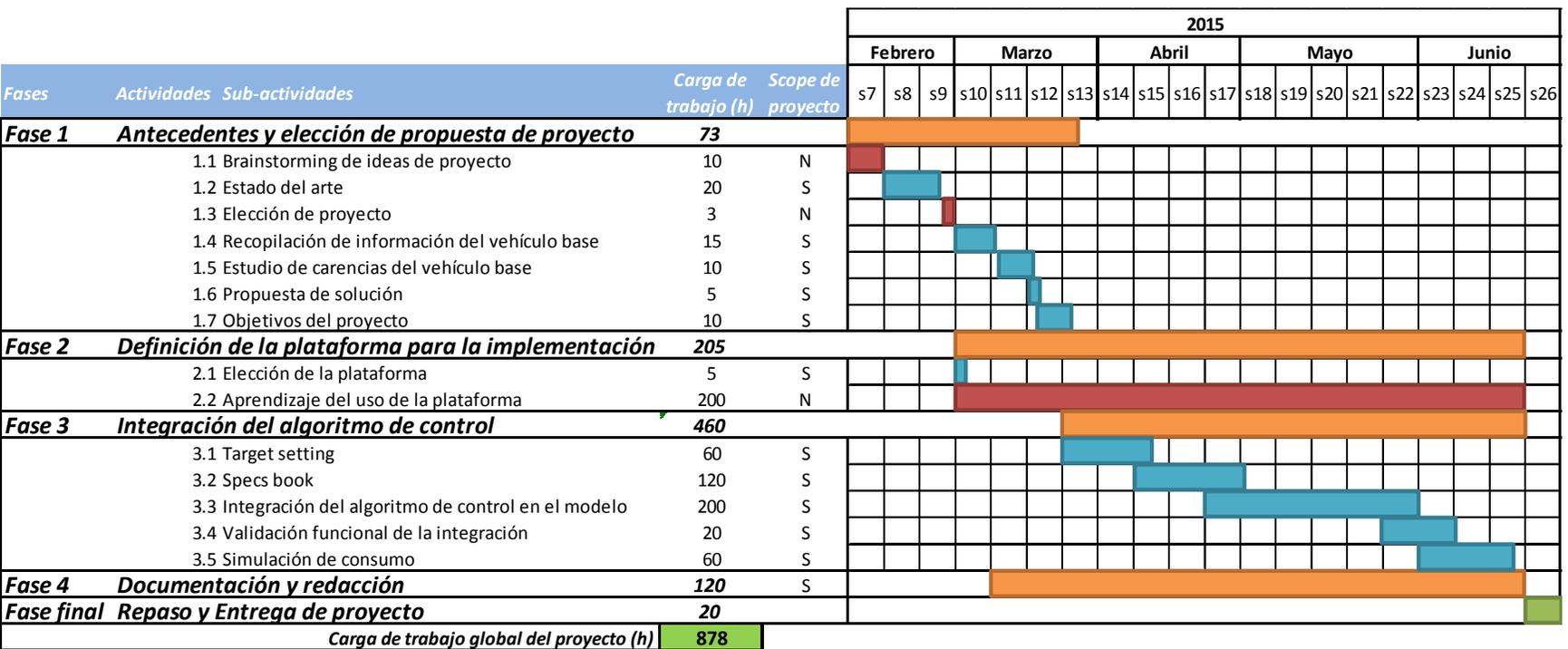


Figura 1 Cronograma del proyecto

## 2. Antecedentes

---

Eficiencia, contaminación, salud y otros problemas son algunas de las principales prioridades de nuestra sociedad. Por ello, día a día, más y más gente se concienza de que vehículos con motores de combustión interna (ICE, “*internal combustion engine*”, en inglés) necesitan ser reemplazados por nuevas y eficientes tecnologías motrices vehiculares. Desde 1990, nuevas arquitecturas de línea motriz han aparecido como serias y fiables alternativas a los motores de combustión.

Vehículos eléctricos e híbridos son las principales opciones de esta nueva era del parque automovilístico. Aunque el primer vehículo eléctrico de la historia, fue presentado hace más de 100 años.

Entre 1832 y 1839, sin fecha exacta, el inventor Robert Anderson diseñó el primer vehículo eléctrico puro. El vehículo era un carro movido por un motor eléctrico alimentado con baterías no recargables. En 1884 Robert Anderson fundó la empresa Anderson Carriage Company, que estuvo fabricando coches eléctricos hasta 1911. No fue hasta 1907, cuando introdujeron unas mejoras, entre ellas las baterías recargables de ácido de plomo. Otras referencias apuntan que fue el herrero norteamericano Thomas Davenport quién inventó el primer coche eléctrico en 1834 con baterías no recargables y una autonomía entre 15 y 30 km.

Sea como fuere, el vehículo eléctrico es un medio de transporte que poco a poco se va integrando en nuestra sociedad, como alternativa que cuida del medio ambiente (“*Environmental friendly*”), por sus capacidades y prestaciones.

### 2.1. Evolución del vehículo eléctrico en Europa

2014 terminó con 65.199 matriculaciones<sup>2</sup> de automóviles eléctricos en Europa.

El gran ganador de los últimos años fue Noruega, con 18.649 nuevos registros (más del doble en comparación con 2013). Noruega superó a Francia que está actualmente en el segundo lugar con 15.046 vehículos matriculados. Ambos países tienen más del 50% de todas las matriculaciones de automóviles eléctricos en Europa. Desde 2005, más de 43.000 coches totalmente eléctricos se registraron en Francia.

El tercer lugar es para Alemania, con 8.804; cuarta posición para Reino Unido, con 7.370 (Reino Unido está mostrando uno de los ritmos más altos de crecimiento). Holanda completa el top 5, con 3587.

El resto de países cuentan con cifras similares que van desde 1913 vehículos en Suiza, 1688 en Dinamarca, 1524 en Suecia, 1509 en España, 1.484 en Austria, 1431 en Italia y finalmente, 1422 en Bélgica y Luxemburgo.

---

<sup>2</sup> Fuente: Electromaps, Volumen de ventas del vehículo eléctrico en 2014.

## 2.2. Ventajas y limitaciones de los vehículos eléctricos

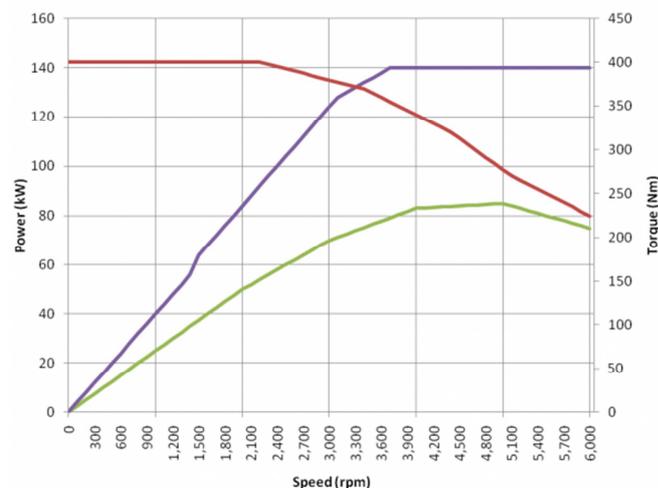
### 2.2.1. Ventajas

- Ausencia de contaminación atmosférica durante el funcionamiento del vehículo.
- Reducción de la contaminación sonora.
- Independencia de los combustibles fósiles. Su uso permite prescindir de combustible y así, ahorrar petróleo, una materia prima limitada.
- Su mantenimiento y coste energético es mucho menor al de uno convencional. El Tesla Model S, por ejemplo, gasta 700\$ de electricidad al año; el Porsche Panamera Turbo gasta 3400\$ de combustible al año. (Ver Figura 2 a continuación).



**Figura 2** Tesla Model S y Porsche Panamera Turbo

- Mayor eficiencia y par motor a partir de 0 revoluciones y la total ausencia de marchas, lo que se traduce en mejor respuesta en aceleración. En la Figura 3 se muestra la curva de par-potencia de un motor eléctrico estándar.



**Figura 3** Curva par-potencia de un motor eléctrico



### 3. Descripción de la plataforma base y premisas del nuevo sistema a integrar

#### 3.1. Descripción del vehículo base

El vehículo eléctrico considerado vehículo base del proyecto, es un camión ligero de 3,5 T. Se trata de un vehículo eléctrico con las siguientes especificaciones técnicas sintetizadas en la Figura 5:

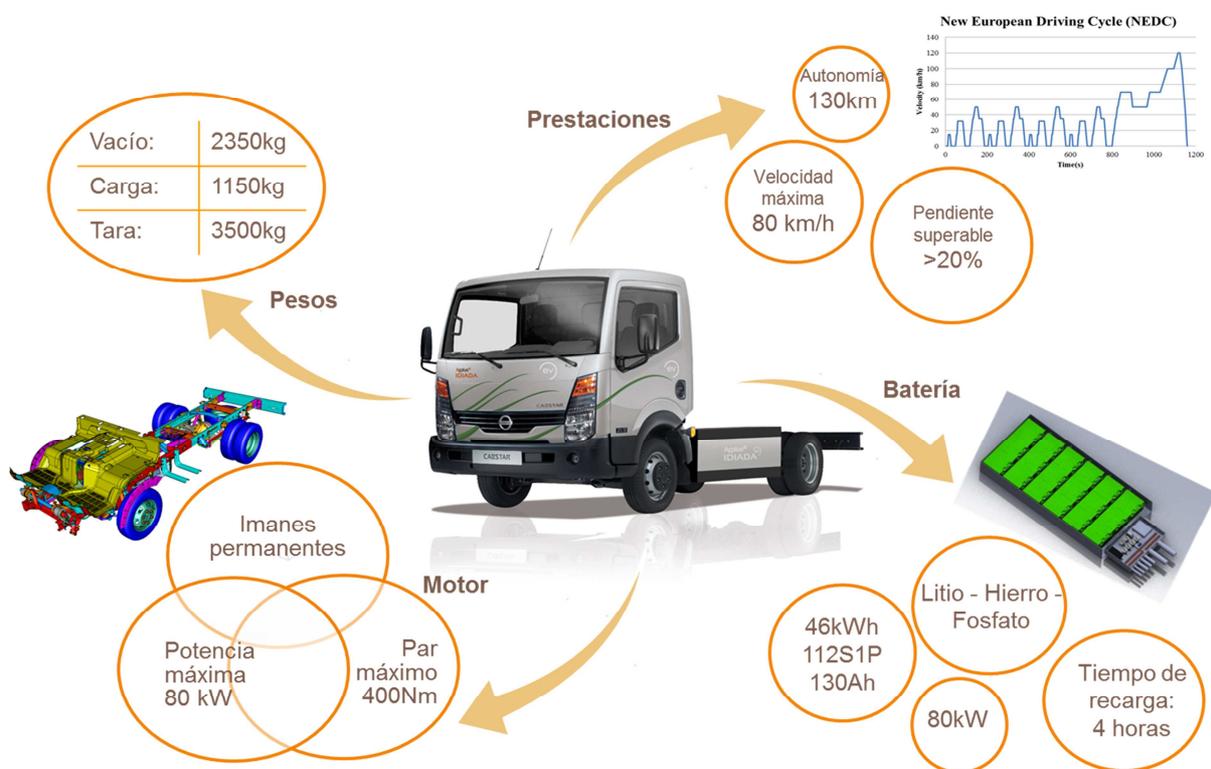


Figura 5 Especificaciones técnicas del vehículo base

##### 3.1.1. Funcionalidad

Se trata de un vehículo comercial destinado a grandes flotas de transporte urbano e interurbano. Por ello, la **velocidad máxima no excede 80 km/h**, con una pendiente máxima superable de >20%.

La **autonomía total** de este vehículo eléctrico es de **157 km** según ciclo de conducción estándar europeo, ciclo NEDC. (Ver en Anexos, apartado 1.8, Ciclos de conducción).

### 3.1.2. Sistema de almacenaje de energía y capacidad

El vehículo incorpora dos packs de baterías dotadas de la tecnología de ion Litio, concretamente de Litio Hierro Fosfato ( $\text{LiFePO}_4$ ). Véanse en la Figura 6 las curvas de descarga según diferentes ratios.

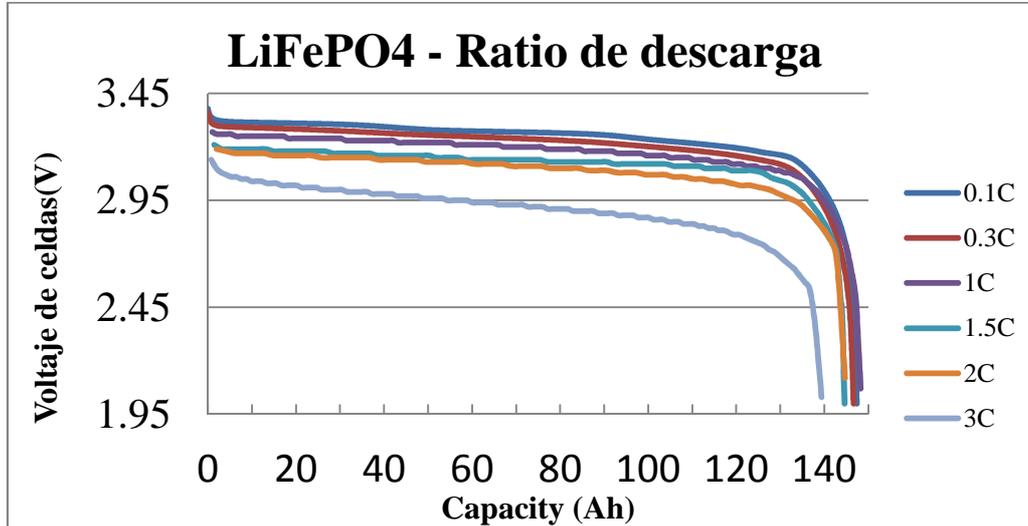


Figura 6 Curvas de descarga de una celda de  $\text{LiFePO}_4$

La **capacidad total de la batería es 46,6 kWh**. El total del sistema de almacenaje está compuesto por 112 celdas de 130 Ah cada una, con un voltaje nominal de 3,2 V. Todas las celdas están conectadas en serie y divididas en dos packs diferentes.

El voltaje nominal de la batería de tracción es 358,4 V y su peso es de alrededor de 550 kg.

**Ecuación 1** Justificación de voltaje y capacidad de la batería de tracción del vehículo base

$$112 \text{ celdas} \cdot 130 \text{ Ah} \cdot 3,2 \text{ V} = 46,592 \text{ kWh}$$

$$112 \text{ celdas} \cdot 3,2 \text{ V} = 358,4 \text{ V}$$

### 3.1.3. Sistema de tracción

El dispositivo de tracción del vehículo es un **motor eléctrico de corriente continua (CC)** de imanes permanentes con una potencia de 140 kW limitados a **80 kW**, con un **par máximo de 400 Nm** y una **velocidad máxima de 10000 rpm**.

Esta limitación se debe al sobredimensionamiento del motor, que con 80 kW satisface las especificaciones de funcionamiento anteriormente citadas:

- Velocidad máxima de 80 km/h
- Pendiente superable de >20%
- Peso de vehículo igual a 3,5 T

Título: **Implementación de un sistema de Pila de Combustible en el sistema de control de un vehículo eléctrico**

3.1.4. Pesos y capacidad de transporte

Como se ha citado anteriormente el **peso total del vehículo son 3500 kg**, con un peso de la plataforma en vacío de 2350 kg y una carga útil que alcanza los 1150 kg.

El **peso global** del vehículo **no varía después del proceso de hibridación**, pues para el control energético y simulación de prestaciones vehiculares, se debe considerar su tara máxima de 3,5 T.

3.1.5. Sistema de control

El actual algoritmo de control y su interrelación con los componentes y funcionalidades vehiculares queda descrito en la Figura 7.

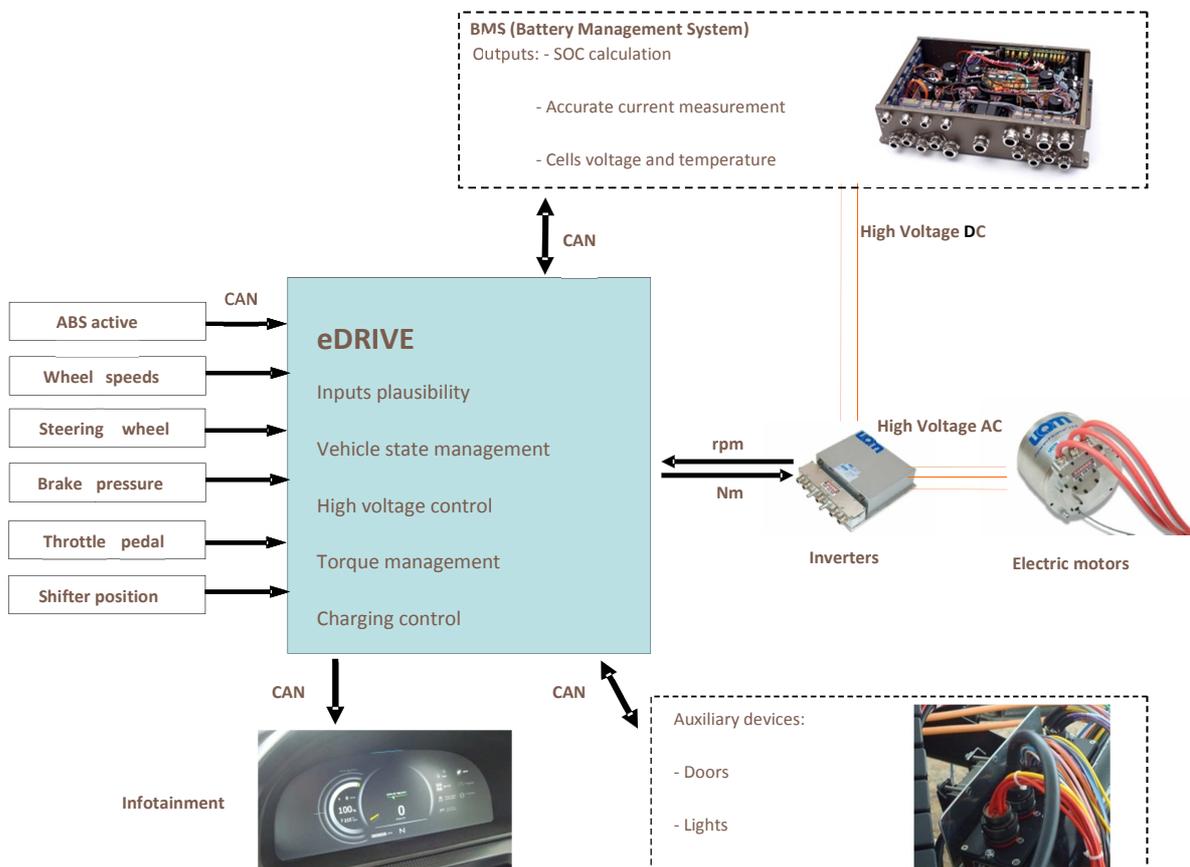


Figura 7 Arquitectura del vehículo base <sup>4</sup>

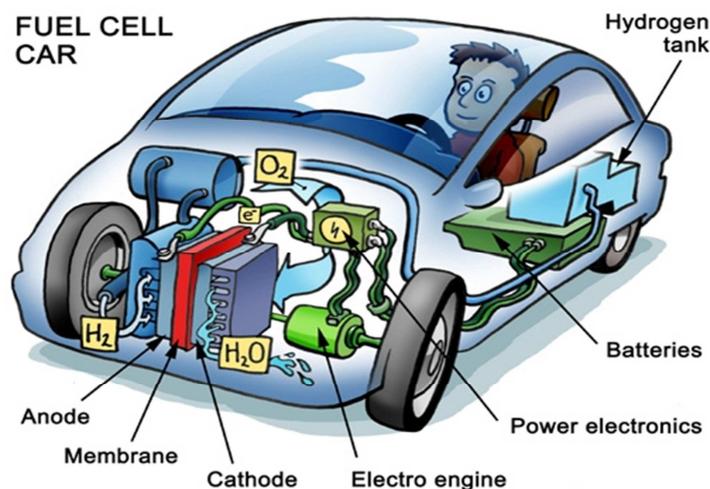
<sup>4</sup> Fuente: Christophe Moure, IDIADA (Instituto de Investigación Aplicada del Automóvil), Arquitectura de vehículo eléctrico Nissan E-Cabstar, Enero 2010.

### 3.2. Descripción del nuevo sistema a implementar

Además de los elementos que originalmente posee un vehículo eléctrico:

- *baterías de tracción*: dispositivo de almacenamiento de energía en corriente continua, que sirve no sólo como fuente de capacidad (kWh), sino también de potencia (kW)
- *inversor o "inverter"*: elemento que transforma la tensión de la batería de tracción a la tensión del motor y comanda a éste último
- *motor*: sistema de tracción usado para impulsar las ruedas motrices, dispositivo que recibe la potencia de la batería de tracción y es capaz de impulsar su propia potencia
- *convertidor DC/DC*: componente que recarga la batería de 12 V a través de la batería de tracción. Sería el equivalente al alternador en un vehículo de motor de combustión convencional
- *cargador integrado*: dispositivo que transforma la tensión de la red a la tensión de la batería de tracción para que ésta sea recargada. Cuando se produce carga rápida, más de 7,2 kWh el dispositivo es externo al vehículo, y en ese caso, el vehículo es externamente alimentado por tensión en continua
- *unidades de control y potencia*

un vehículo de pila de combustible consta de los componentes señalados en la Figura 8.



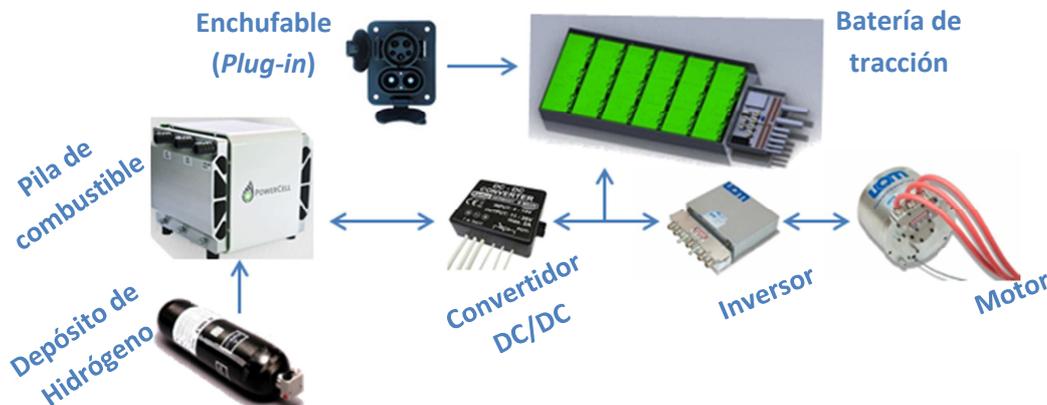
**Figura 8** Componentes de un vehículo de pila de combustible <sup>5</sup>

- *pila de combustible*: sistema químico-eléctrico que transforma hidrógeno y aire, en agua, calor y electricidad que es aprovechada para impulsar la tracción o recargar la baterías
- *tanques de hidrógeno*: sistema de almacenaje de hidrógeno que alimenta a la pila de combustible

<sup>5</sup> Fuente: Wikipedia, Pila de combustible, Febrero 2015

## Título: *Implementación de un sistema de Pila de Combustible en el sistema de control de un vehículo eléctrico*

- *convertidor DC/DC*: componente que iguala la tensión de la batería de tracción a la tensión de la pila de combustible
- *unidad de control y potencia*: unidad electrónica dónde se integra la algoritmia según la arquitectura del vehículo (Figura 9).



**Figura 9** Arquitectura de un vehículo híbrido enchufable de pila de combustible

### *3.2.1. Premisas del sistema de pila de combustible*

Las especificaciones de los nuevos componentes a integrar en la plataforma original y que conforman el sistema de pila de combustible, están directamente supeditadas a una de las características fundamentales de este sistema que es la potencia de la pila de combustible.

La **potencia de la pila de combustible** es de **20 kW** y el convertidor DC/DC actuará para igualar dinámicamente la tensión de la pila, a la tensión de la batería de tracción.

Por otro lado, una de las variables determinantes que afecta a las prestaciones del vehículo final es la capacidad de los tanques de hidrógeno. Este valor se calcula en los siguientes apartados de acuerdo a la autonomía final fijada como objetivo en esta memoria y descrita en el apartado 4-Integración del algoritmo de control- 4.1 Objetivos técnicos del proyecto.

## 4. Integración del algoritmo de control

### 4.1. Objetivos técnicos del proyecto

#### *4.1.1. Objetivos de funcionamiento (Functional – Performance targets)*

Título: **Implementación de un sistema de Pila de Combustible en el sistema de control de un vehículo eléctrico**

El principal objetivo radica en la mejora de las capacidades en el funcionamiento del vehículo base. La nueva posibilidad de convertirlo en un vehículo híbrido gracias al sistema extensor de autonomía permite cierta flexibilidad al controlar balances energéticos entre dos fuentes de energía.

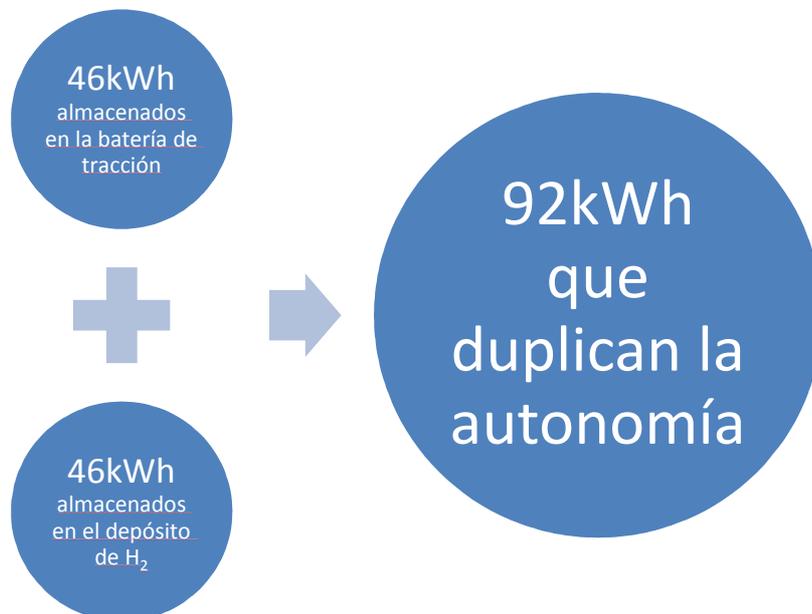
Uno de los principales puntos clave es incrementar la autonomía original del vehículo. Actualmente el vehículo alcanza 157 km (como se ha citado en el apartado 3 Descripción de la plataforma base) según ciclo NEDC.

Con el nuevo sistema integrado en el vehículo se pretende conseguir una **autonomía global del vehículo de 314 km** según el ciclo anteriormente descrito; es decir, **el proyecto pretende duplicar la autonomía inicial**.

Para conseguir dicho objetivo de aumentar la autonomía global del vehículo, la capacidad de almacenaje de energía debe ser aumentada consecuentemente.

Como se ha mencionado previamente junto con las características del vehículo original, la capacidad energética preliminar es de 46 kWh, y por consiguiente, el vehículo necesitará el aporte de energía adicional para incrementar el rango hasta la autonomía deseada. Este aporte de energía vendrá del sistema de almacenaje de H<sub>2</sub>.

Como clarificación de lo siguiente, si en un vehículo de 3,5 T se recorren actualmente 157 km, para recorrer el doble de distancia (según mismo ciclo), con el mismo peso, se necesitará el doble de capacidad medida en kWh. Por tanto, **el depósito de H<sub>2</sub> debe albergar 46 kWh**, lo mismo que la batería de tracción.



**Figura 10** Capacidad del vehículo después de incorporar el sistema extensor de autonomía

La mayoría de los proveedores de bombonas de hidrógeno tienen en cuenta el volumen de H<sub>2</sub> en litros, luego extrapolando lo anterior:

Título: **Implementación de un sistema de Pila de Combustible en el sistema de control de un vehículo eléctrico**

**Ecuación 2** Ecuación general de los gases ideales

$$PV = \eta RT$$

P= presión (atm)

V= volumen (l)

$\eta$ = moles de gas

R= constante universal de los gases ideales (0.082)

T= temperatura ambiente (°K)

$$\eta = \frac{PV}{RT} = \frac{(350\text{bar} \cdot \frac{1\text{atm}}{1,013\text{bar}})1\text{l}}{0,082 \cdot 298^\circ\text{K}} = 14,13\text{mol}$$

H<sub>2</sub> es una molécula diatómica → 2gr/mol luego:

$$14,13\text{mol} \cdot \frac{2\text{gr}}{\text{mol}} = 28,26\text{gr}$$

$$1\text{l de H}_2 = 28,26\text{gr} \rightarrow 1\text{kg} = X = 35,38\text{l}$$

Volviendo al primer propósito, varias fuentes de información han difundido que la relación de **1 kg de H<sub>2</sub> equivale a 15-18kWh**<sup>6</sup> de energía almacenada en su punto de máxima eficiencia, por tanto por aproximación se determina lo siguiente:

$$3\text{kg} = 106,14\text{l} \approx 46\text{kWh}$$



**Figura 11** Depósito de H<sub>2</sub> de la marca Luxfer

De acuerdo con este resultado, los tanques de H<sub>2</sub> (Figura 11) deben ser capaces de albergar una capacidad total de alrededor de 106 l para conseguir el objetivo propuesto. Y la eficiencia considerada, será la siguiente:

$$106,14\text{ l de H}_2 = 3\text{ kg} = 46,592\text{ kWh} \rightarrow 15,53\text{ kWh/kg}$$

Relativo al resto de funcionalidades referentes a la potencia, velocidad y pendiente, la nueva configuración de vehículo debe alcanzar los mismos valores que el vehículo original sin degradar ninguna de sus prestaciones. Velocidad máxima de 80 km/h y una potencia de 80 kW.

<sup>6</sup> Fuente: Dynatek/ Luxfer, Capacidad energética (kWh) en 1 kg de H<sub>2</sub>

## Título: **Implementación de un sistema de Pila de Combustible en el sistema de control de un vehículo eléctrico**

El vehículo está dimensionado, su motor, con una potencia de 140 kW, sin embargo fue limitado a 80 kW debido a que no se requieren potencias superiores para propulsar el tren motriz. Se recuerda que la pila integrada posee una potencia de 20 kW.

Consecuentemente, la velocidad del vehículo fue limitada a 80 km/h pues es un vehículo destinado a flotas y con este objetivo de velocidad satisface rutas urbanas, así como interurbanas.

La nueva capacidad de carga del vehículo se verá afectada por el peso de los nuevos componentes a incluir. No solo la pila de combustible o los tanques incrementarán el peso del vehículo base, sino también componentes auxiliares como convertidor DC-DC, tuberías, válvulas, compresor, etc. No obstante, la tara máxima que se considera para la modelización y simulación, es la misma, 3,5 T.

### 4.1.2. *Objetivos de diseño (Design targets)*

Una de las restricciones más notables del proyecto se basa en el espacio disponible del vehículo plataforma para albergar los nuevos componentes pertenecientes al sistema de pila de combustible. (Ver Figura 12, dónde se muestra la celda de combustible).



**Figura 12** Celda de pila de combustible de PowerCell Sweden AB

A pesar de las dimensiones globales del vehículo que se trata de un camión ligero, el estudio de disposición, o estudio de “*layout*” debe incorporar cada componente del nuevo sistema en su emplazamiento óptimo, intentando sacrificar el menor espacio destinado para carga.

Para determinar de forma aproximada del peso del nuevo vehículo, se puede considerar lo siguiente como válido:

Teniendo en cuenta la **densidad de potencia**, alrededor de **0,650 kW/kg**<sup>7</sup> en el peor de los casos (referente a peso), una pila de 20kW:

$$\frac{1 \text{ kg}}{0,650 \text{ kW}} \cdot 20 \text{ kW} = 30,76 \text{ kg}$$

<sup>7</sup> Fuente: Diego Feroli, control and Design of PEM Fuel Cell-Based System, Phd Thesis en Unversitat Politècnica de Catalunya, 2009.

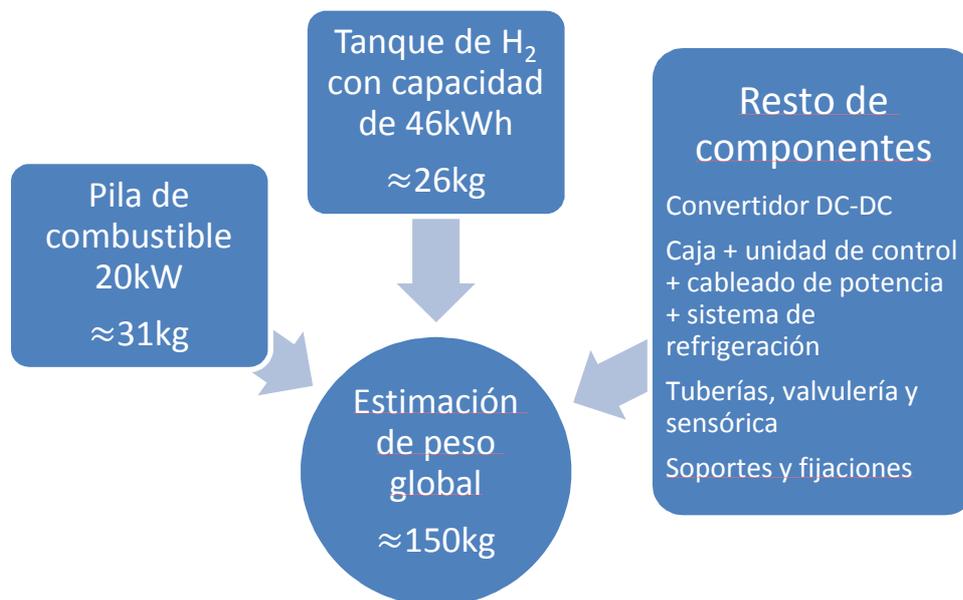
Título: **Implementación de un sistema de Pila de Combustible en el sistema de control de un vehículo eléctrico**

Se considera una pila de combustible de 30,76 kg (sólo la pila, no se incluye; sistema de refrigeración, canalización, caja,...).

El mismo cálculo puede ser extrapolado para el depósito de H<sub>2</sub> el cual cuenta con una **densidad energética de 1,8 kWh/kg**<sup>8</sup> (incluyendo el peso de tanque + H<sub>2</sub>):

$$\frac{1 \text{ kg}}{1,8 \text{ kWh}} \cdot 46 \text{ kWh} = 25,55 \text{ kg}$$

Se considera un depósito global de 26 kg. En la siguiente Figura 13 se hace referencia al peso del sistema global como una estimación.



**Figura 13** Estimación de peso de los principales componentes del sistema extensor de autonomía

El valor de pendiente mínima que el vehículo debe alcanzar es idéntico al del vehículo original. Este valor del **20% de pendiente superable** es un requisito del vehículo por estar destinado al transporte y ser necesario para el trabajo en terrenos escarpados o con accesibilidad limitada.

Mientras las baterías en los vehículos eléctricos pueden costar horas recargarlas completamente, un tanque de H<sub>2</sub> puede ser repostado en el tiempo que se puede repostar un depósito de un vehículo convencional. El tiempo exacto de llenado dependerá de la estación de recarga y del ratio de compresor de la estación.

Al mismo tiempo, la interfaz de recarga deberá cumplir características obligatorias incluidas en la normativa vigente. Fácil operatividad, alto ratio de flujo para evitar elevados tiempos de recarga, recirculación de aire purgado y mecanismo de bloqueo para cumplir especificaciones de seguridad; otros como protección térmica, son recomendados.

<sup>8</sup> Fuente: Diego Feroli, control and Design of PEM Fuel Cell-Based System, Phd Thesis en Unversitat Politècnica de Catalunya, 2009.

Título: **Implementación de un sistema de Pila de Combustible en el sistema de control de un vehículo eléctrico**

4.1.3. *Listado de especificaciones vehiculares*

En la Tabla 1 se detallan las especificaciones de diseño y funcionamiento del vehículo integrando el sistema REX de pila de combustible.

**Tabla 1** Especificaciones de vehículo después de la integración del sistema extensor de autonomía

	<b>Vehículo eléctrico original</b>	<b>Vehículo con sistema REX</b>
<b>Autonomía</b>	157 km	314 km
<b>Peso del sistema de pila de combustible</b>	-	~150 kg
Pila de combustible	-	~31 kg
Caja + unidad de control + cableado de potencia + sistema de refrigeración	-	~30 kg
Tanque de H <sub>2</sub>	-	~26 kg
Convertidor DC/DC	-	~13 kg
Tuberías, valvulería y sensórica	-	~30 kg
Soportes y fijaciones	-	~20 kg
<b>Carga útil</b>	1150 kg	1000 kg
<b>Peso en vacío</b>	2350 kg	2500 kg
<b>Peso total</b>	3500 kg	3500 kg
<b>Máxima pendiente</b>	>20%	>20%
<b>Máxima velocidad</b>	80 km/h	80 km/h
<b>Capacidad de H<sub>2</sub></b>	-	46,6 kWh / 106,14 l

4.2. **Libro de especificaciones**

En este apartado se describe la casuística de estados de los elementos de potencia que componen el vehículo. El resultado de cada escenario, es una serie de acciones ejecutadas por el control de energía o “*Energy Management*” del vehículo, como consecuencia de un algoritmo de control eficiente.

El objetivo del algoritmo de control es, a parte de la integración del propio sistema de pila de combustible, la consecución de la meta de kilometraje de 314 km de autonomía.

Para la consecución del objetivo, el consumo medio del vehículo no debe exceder 0,296 kWh/km, como se indica en la Ecuación 3.

**Ecuación 3** Justificación de consumo máximo

$$\frac{46,592 \text{ kWh}}{157 \text{ km}} = 296 \text{ Wh/km}$$

Título: **Implementación de un sistema de Pila de Combustible en el sistema de control de un vehículo eléctrico**

4.2.1. Premisas consideradas a nivel de vehículo

4.2.1.1. Condiciones generales

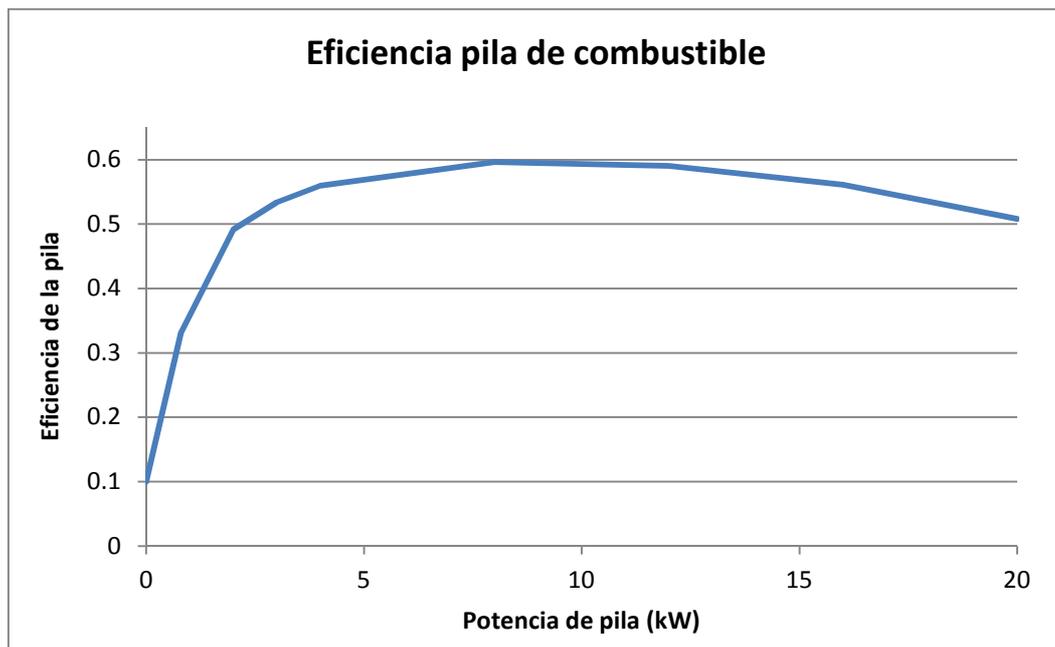
En este libro de especificaciones, no se consideran los errores de sistema motor-inversor, pues si el sistema de tracción falla, el vehículo consecuentemente quedará detenido y esto si queda incluido en el algoritmo del vehículo original.

Tampoco se considera el funcionamiento erróneo del convertidor DC-DC que gestiona la carga de la batería de 12 V, pues también está incluido en la algoritmia original.

En esta parte del documento se estudian las interrelaciones del sistema de pila de combustible con el resto de elementos del sistema de tracción y cómo los diferentes estados de la pila repercuten el funcionamiento del resto de elementos y viceversa.

4.2.1.2. Mapa de eficiencia de la pila de combustible

Uno de los datos más relevantes que marcan el funcionamiento de la pila de combustible dentro del sistema de control de energía es la eficiencia de la pila con respecto a la potencia suministrada. En la Figura 14 se muestra en detalle la correlación.



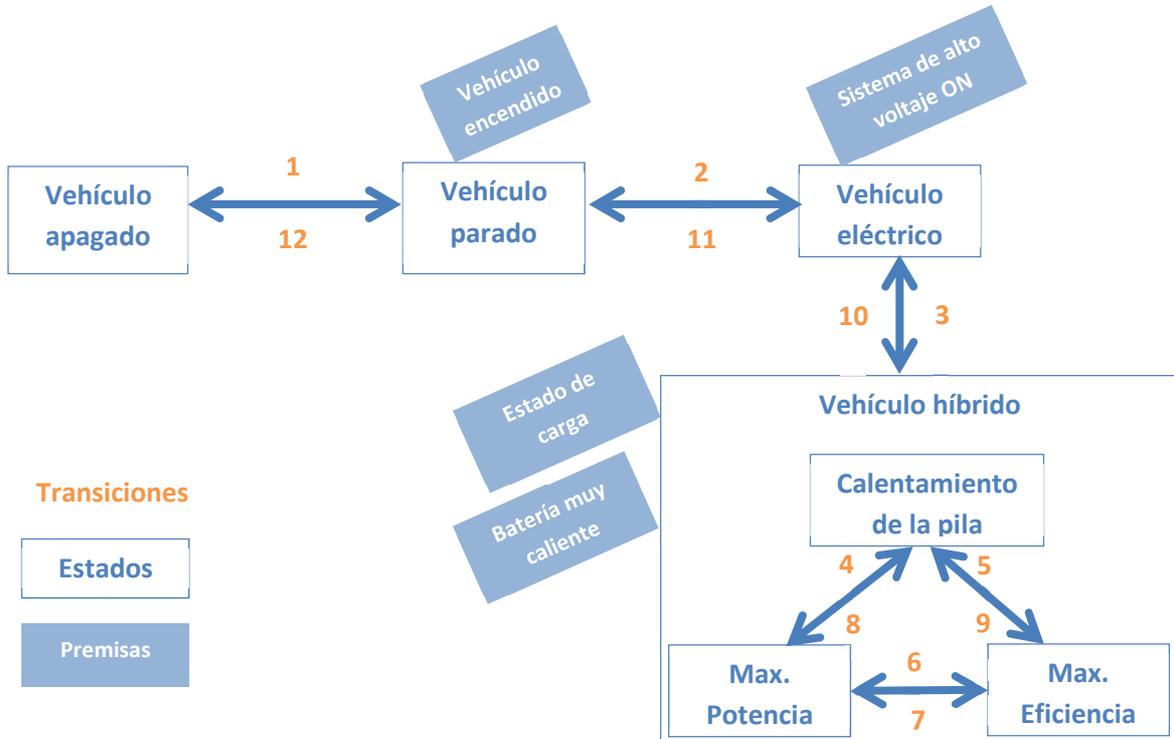
**Figura 14** Eficiencia de una pila de combustible PEM <sup>9</sup>

Como se puede ver en la figura anterior, en el punto de máxima eficiencia en una pila de combustible se alcanza el 60% y esto ocurre al 40% de su potencia máxima (8 kW).

<sup>9</sup> Fuente: Diego Feroli, control and Design of PEM Fuel Cell-Based System, Phd Thesis in Unversitat Politècnica de Catalunya, 2009.

#### 4.2.2. Libro de especificaciones

El control del sistema de energía del vehículo (“*Energy management*”), se basa en el siguiente diagrama de estados dónde la parte a integrar (alcance del proyecto) es el estado modo REX (vehículo híbrido).



**Figura 15** Máquina de estados del vehículo eléctrico con sistema REX de pila de combustible

La Figura 16 muestra una enumeración de las transiciones necesarias para pasar de un estado a otro, teniendo 4 estados posibles a gestionar:

- *Vehículo apagado*
- *Vehículo parado (Stop)*: vehículo detenido
- *Vehículo eléctrico (Modo EV)*: vehículo funcionando gracias a la tracción eléctrica
- *Vehículo híbrido (Modo REX)*: vehículo funcionando con tracción hidrogeno-eléctrica

El número de transiciones es 12, de las cuales desde la 3 a la 10 se contemplan las interacciones del vehículo con el sistema de pila de combustible.

Las transiciones de 4 a 9 entran dentro de las condiciones de funcionamiento de la pila y quedan comprendidas en los escenarios de funcionamiento. En el siguiente apartado se detallan todos los escenarios de funcionamiento posibles concernientes al sistema de pila de combustible y su interrelación con el sistema de tracción del vehículo.

## Título: **Implementación de un sistema de Pila de Combustible en el sistema de control de un vehículo eléctrico**

### 4.2.2.1. Definición de variables

Descripción de las variables que forman los distintos escenarios.

#### **Sistema batería de tracción**

- *Estado de carga (SOC, "State of Charge")*: Cantidad de carga de la batería en %  
  
(Véase la definición de estado de carga en la página 79, apartado 1.5 de los anexos, "Estado de carga").
- *Temperatura de batería*: Temperatura instantánea más alta registrada por los sensores de temperatura (°C)
- *Error de batería*: Errores en la batería representados por un valor booleano
  - 0 = no error
  - 1 = error

#### **Sistema pila de combustible**

- *Cantidad de Hidrógeno*: Volumen de Hidrógeno en %
- *Temperatura de la pila*: Temperatura instantánea registrada en la pila (°C)
- *Error de la pila*: Errores en la pila representados por un valor booleano
  - 0 = no error
  - 1 = error

---

Descripción de las variables que forman las actuaciones a tomar en cada uno de los escenarios.

#### **Batería de tracción**

- *ON/ OFF*: Gestión de la batería. Entrega de potencia controlada por la demanda de par.
- *Potencia*: Potencia máxima nominal de la batería que entrega. Valor en %.
- *Recarga*: Energía de recarga que proviene de:
  - Pila de combustible
  - Freno regenerativo

#### **Pila de combustible**

- *ON/ OFF*: Gestión de la pila. Entrega de potencia controlada por las condiciones de operatividad del conjunto y supeditada por la batería de tracción.
- *Potencia*: Potencia de entrega de la pila. Valor en %.
  - *Máx. eficiencia*. Valor de 40% de potencia máxima (8 kW)
  - *Máx. potencia*. Valor de 100% de potencia máxima (20 kW)

La pila sólo trabaja en estos dos estados para incrementar la eficiencia del sistema de pila de combustible.

Título: **Implementación de un sistema de Pila de Combustible en el sistema de control de un vehículo eléctrico**

**Demanda de par**

- *Demanda de par de aceleración (tracción):* Valor en % del par máximo total que satisface la demanda del sistema motor-inversor.
- *Demanda de par de deceleración (freno regenerativo):* Valor en % del par máximo negativo total abastecido por el sistema de freno regenerativo.

---

Leyenda de los comentarios adicionales referentes a cada uno de los escenarios.

**Tipo de tracción:**

- *Eléctrica:* tracción con potencia proveniente de la batería
- *Con hidrógeno:* tracción con potencia proveniente de la pila
- *Hidrogeno-eléctrica:* tracción con potencia proveniente de ambos sistemas

**Demanda de par de aceleración (tracción):**

- *Satisfecha* = 100%
- *Reducida* <100% & >10%
- *Muy reducida* ≤10%

**Demanda de par de deceleración (freno regenerativo):**

- *Satisfecha* = 100%
- *Reducida* <100% & >10%
- *Muy reducida* ≤10%
- *Nula* = 0%

**Funcionamiento de la batería**

**Funcionamiento de la pila**

**Otros**

**4.2.2.2. Escenarios de funcionamiento y acciones**

El razonamiento del libro de especificaciones se basa en el sistema descrito a continuación y consta de 18 escenarios diferentes agrupados en la Tabla 2 según tareas.

**Tabla 2** Agrupación de escenarios de funcionamiento del sistema extensor de autonomía

<b>Escenario 1</b>	Error en la batería
<b>Escenarios 2-7</b>	Calentamiento de batería
<b>Escenarios 8-11</b>	Error en la pila correlativo a estado de carga de la batería
<b>Escenario 12</b>	Calentamiento de pila
<b>Escenario 13</b>	Condición inicial
<b>Escenarios 14-18</b>	Condiciones de funcionamiento

Título: **Implementación de un sistema de Pila de Combustible en el sistema de control de un vehículo eléctrico**

**Escenario 1: Error en la batería**

- Escenario 1:

- Batería de tracción

▪ Estado de carga (SOC), (%):	$\leq 100\% \ \& \ \geq 0\%$
▪ Temperatura de batería ( $^{\circ}\text{C}$ ):	$> -30^{\circ}\text{C}$
▪ Error de batería:	1

- Pila de combustible

▪ Cantidad de Hidrógeno (%):	$\leq 100\% \ \& \ \geq 0\%$
▪ Temperatura de pila ( $^{\circ}\text{C}$ ):	$> -30$
▪ Error de pila:	0

- Acciones – Escenario 1:

- Batería de tracción

▪ ON/OFF:	OFF
▪ Potencia de batería:	0%
▪ Recarga:	0%

- Pila de combustible

▪ ON/OFF:	OFF
▪ Potencia de pila:	0%

- Demanda de par

▪ Demanda de par de aceleración (%):	0%
▪ Demanda de par de deceleración (%):	0%

- Comentarios

- Tipo de tracción: No hay tracción
- Demanda de par de aceleración: Nula
- Demanda de par de deceleración: Nula
- Funcionamiento de la batería: Batería OFF
- Funcionamiento de la pila: Pila OFF
- Otros:
  - Error BMS contempla:
    - Sobrevoltaje
    - Sub-voltaje
    - Sobreintensidad
    - Contactador de alto voltaje (HV) soldado
    - Fallo en la comunicación

Título: **Implementación de un sistema de Pila de Combustible en el sistema de control de un vehículo eléctrico**

- Fallo de aislamiento

**Escenarios 2-7: Calentamiento de batería**

**Escenario 2:**

- Escenario 2:

- Batería de tracción

▪ Estado de carga (SOC), (%):	$\leq 100\% \ \& \ \geq 0\%$
▪ Temperatura de batería ( $^{\circ}\text{C}$ ):	$\geq 55^{\circ}\text{C}$
▪ Error de batería:	1

- Pila de combustible

▪ Cantidad de Hidrógeno (%):	$\leq 100\% \ \& \ \geq 0\%$
▪ Temperatura de pila ( $^{\circ}\text{C}$ ):	$> -30$
▪ Error de pila:	0

- Acciones - Escenario 2:

- Batería de tracción

▪ ON/OFF:	ON
▪ Potencia de batería:	Absorbe la demanda de par
▪ Recarga:	No debe recargar. Evitar mayor sobretemperatura

- Pila de combustible

▪ ON/OFF:	OFF
▪ Potencia de pila:	0%

- Demanda de par

▪ Demanda de par de aceleración (%):	5%
▪ Demanda de par de deceleración (%):	0%

- Comentarios

- Tipo de tracción: Eléctrica (tracción con potencia proveniente de la batería)
- Demanda de par de aceleración: Muy reducida
- Demanda de par de deceleración: Nula
- Funcionamiento de la batería: Tracción mínima suficiente para estacionar el vehículo
- Funcionamiento de la pila: Pila apagada, pues el vehículo debe ser detenido

Título: **Implementación de un sistema de Pila de Combustible en el sistema de control de un vehículo eléctrico**

- Otros:
  - Vehículo debe ser detenido, tan sólo tendrá la potencia necesaria para aparcar.
  - Es un riesgo seguir calentando la batería.

**Escenario 3:**

- Escenario 3:

- Batería de tracción

▪ Estado de carga (SOC), (%):	$\leq 100\% \ \& \ \geq 0\%$
▪ Temperatura de batería ( $^{\circ}\text{C}$ ):	$\geq 35^{\circ}\text{C} \ \& \ < 40^{\circ}\text{C}$
▪ Error de batería:	0

- Pila de combustible

▪ Cantidad de Hidrógeno (%):	$\leq 100\% \ \& \ \geq 25\%$
▪ Temperatura de pila ( $^{\circ}\text{C}$ ):	$\geq 75^{\circ}\text{C}$
▪ Error de pila:	0

- Acciones – Escenario 3:

- Batería de tracción

▪ ON/OFF:	ON
▪ Potencia de batería (%):	Absorbe la demanda de corriente que no absorbe la pila
▪ Recarga:	Freno regenerativo

- Pila de combustible

▪ ON/OFF:	ON
▪ Potencia de pila (%):	100%

- Demanda de par

▪ Demanda de par de aceleración (%):	80%
▪ Demanda de par de deceleración (%):	60%

- Comentarios

- Tipo de tracción: Hidrogeno-eléctrica
- Demanda de par de aceleración: Reducida
- Demanda de par de deceleración: Reducida
- Funcionamiento de la batería: Batería ON y recarga a través del freno regenerativo
- Funcionamiento de la pila: Pila impulsa la tracción

Título: **Implementación de un sistema de Pila de Combustible en el sistema de control de un vehículo eléctrico**

**Escenario 4:**

- Escenario 4:

- Batería de tracción

▪ Estado de carga (SOC), (%):	$\leq 100\% \ \& \ \geq 0\%$
▪ Temperatura de batería ( $^{\circ}\text{C}$ ):	$\geq 40^{\circ}\text{C} \ \& \ < 45^{\circ}\text{C}$
▪ Error de batería:	0

- Pila de combustible

▪ Cantidad de Hidrógeno (%):	$\leq 100\% \ \& \ \geq 25\%$
▪ Temperatura de pila ( $^{\circ}\text{C}$ ):	$\geq 75^{\circ}\text{C}$
▪ Error de pila:	0

- Acciones - Escenario 4:

- Batería de tracción

▪ ON/OFF:	ON
▪ Potencia de batería (%):	Absorbe la demanda de corriente que no absorbe la pila
▪ Recarga:	Freno regenerativo

- Pila de combustible

▪ ON/OFF:	ON
▪ Potencia de pila (%):	100%

- Demanda de par

▪ Demanda de par de aceleración (%):	60%
▪ Demanda de par de deceleración (%):	40%

- Comentarios

- Tipo de tracción: Hidrogeno-eléctrica
- Demanda de par de aceleración: Reducida
- Demanda de par de deceleración: Reducida
- Funcionamiento de la batería: Batería ON y recarga a través del freno regenerativo
- Funcionamiento de la pila: Pila impulsa la tracción

**Escenario 5:**

Título: **Implementación de un sistema de Pila de Combustible en el sistema de control de un vehículo eléctrico**

- Escenario 5:

- Batería de tracción

▪ Estado de carga (SOC), (%):	$\leq 100\% \ \& \ \geq 0\%$
▪ Temperatura de batería ( $^{\circ}\text{C}$ ):	$\geq 45^{\circ}\text{C} \ \& \ < 50^{\circ}\text{C}$
▪ Error de batería:	0

- Pila de combustible

▪ Cantidad de Hidrógeno (%):	$\leq 100\% \ \& \ \geq 25\%$
▪ Temperatura de pila ( $^{\circ}\text{C}$ ):	$\geq 75^{\circ}\text{C}$
▪ Error de pila:	0

- Acciones – Escenario 5:

- Batería de tracción

▪ ON/OFF:	ON
▪ Potencia de batería (%):	Absorbe la demanda de corriente que no absorbe la pila
▪ Recarga:	Freno regenerativo

- Pila de combustible

▪ ON/OFF:	ON
▪ Potencia de pila (%):	100%

- Demanda de par

▪ Demanda de par de aceleración (%):	30%
▪ Demanda de par de deceleración (%):	10%

- Comentarios

- Tipo de tracción: Hidrogeno-eléctrica
- Demanda de par de aceleración: Reducida
- Demanda de par de deceleración: Reducida
- Funcionamiento de la batería: Batería ON y recarga a través del freno regenerativo
- Funcionamiento de la pila: Pila impulsa la tracción

**Escenario 6:**

- Escenario 6:

- Batería de tracción

Título: **Implementación de un sistema de Pila de Combustible en el sistema de control de un vehículo eléctrico**

▪ Estado de carga (SOC), (%):	$\leq 100\% \ \& \ \geq 0\%$
▪ Temperatura de batería ( $^{\circ}\text{C}$ ):	$\geq 50^{\circ}\text{C} \ \& \ < 55^{\circ}\text{C}$
▪ Error de batería:	0

- Pila de combustible

▪ Cantidad de Hidrógeno (%):	$\leq 100\% \ \& \ \geq 25\%$
▪ Temperatura de pila ( $^{\circ}\text{C}$ ):	$\geq 75^{\circ}\text{C}$
▪ Error de pila:	0

- Acciones – Escenario 6:

- Batería de tracción

▪ ON/OFF:	ON
▪ Potencia de batería (%):	Absorbe la demanda de corriente que no absorbe la pila
▪ Recarga:	No debe recargar. Evitar mayor sobretemperatura

- Pila de combustible

▪ ON/OFF:	ON
▪ Potencia de pila (%):	100%

- Demanda de par

▪ Demanda de par de aceleración (%):	10%
▪ Demanda de par de deceleración (%):	0%

- Comentarios

- Tipo de tracción: Hidrogeno-eléctrica
- Demanda de par de aceleración: Reducida
- Demanda de par de deceleración: Reducida
- Funcionamiento de la batería: Batería ON
- Funcionamiento de la pila: Pila impulsa la tracción

**Escenario 7:**

- Escenario 7:

- Batería de tracción

▪ Estado de carga (SOC), (%):	$\leq 100\% \ \& \ \geq 0\%$
▪ Temperatura de batería ( $^{\circ}\text{C}$ ):	$\geq 35^{\circ}\text{C}$
▪ Error de batería:	0

Título: **Implementación de un sistema de Pila de Combustible en el sistema de control de un vehículo eléctrico**

- Pila de combustible

▪ Cantidad de Hidrógeno (%):	<25%
▪ Temperatura de pila (°C):	≥75°C
▪ Error de pila:	0

- Acciones – Escenario 7:

- Batería de tracción

▪ ON/OFF:	ON
▪ Potencia de batería (%):	Absorbe la demanda de corriente que no absorbe la pila
▪ Recarga:	No debe recargar. Evitar mayor sobretemperatura

- Pila de combustible

▪ ON/OFF:	ON
▪ Potencia de pila (%):	40%

- Demanda de par

▪ Demanda de par de aceleración (%):	60%
▪ Demanda de par de deceleración (%):	40%

- Comentarios

- Tipo de tracción: Hidrogeno-eléctrica
- Demanda de par de aceleración: Reducida
- Demanda de par de deceleración: Reducida
- Funcionamiento de la batería: Batería ON y recarga a través del freno regenerativo
- Funcionamiento de la pila: Pila impulsa la tracción

**Escenarios 8-11: Error en la pila correlativo al estado de carga de la batería**

**Escenario 8:**

- Escenario 8:

- Batería de tracción

▪ Estado de carga (SOC), (%):	≤100% & ≥65%
▪ Temperatura de batería (°C):	>-30°C
▪ Error de batería:	0

Título: **Implementación de un sistema de Pila de Combustible en el sistema de control de un vehículo eléctrico**

- Pila de combustible

▪ Cantidad de Hidrógeno (%):	$\leq 100\% \ \& \ \geq 0\%$
▪ Temperatura de pila ( $^{\circ}\text{C}$ ):	$> -30$
▪ Error de pila:	1

- Acciones – Escenario 8:

- Batería de tracción

▪ ON/OFF:	ON
▪ Potencia de batería (%):	100%
▪ Recarga:	Freno regenerativo

- Pila de combustible

▪ ON/OFF:	OFF
▪ Potencia de pila (%):	0%

- Demanda de par

▪ Demanda de par de aceleración (%):	100%
▪ Demanda de par de deceleración (%):	100%

- Comentarios

- Tipo de tracción: Eléctrica
- Demanda de par de aceleración: Satisfecha
- Demanda de par de deceleración: Satisfecha
- Funcionamiento de la batería: Batería impulsa la tracción; disminuye SOC
- Funcionamiento de la pila: Error de pila y por tanto, pila OFF

**Escenario 9:**

- Escenario 9:

- Batería de tracción

▪ Estado de carga (SOC), (%):	$< 65\% \ \& \ \geq 40\%$
▪ Temperatura de batería ( $^{\circ}\text{C}$ ):	$> -30^{\circ}\text{C}$
▪ Error de batería:	0

- Pila de combustible

▪ Cantidad de Hidrógeno (%):	$\leq 100\% \ \& \ \geq 0\%$
▪ Temperatura de pila ( $^{\circ}\text{C}$ ):	$> -30$
▪ Error de pila:	1

Título: **Implementación de un sistema de Pila de Combustible en el sistema de control de un vehículo eléctrico**

- Acciones – Escenario 9:

- Batería de tracción

▪ ON/OFF:	ON
▪ Potencia de batería (%):	100%
▪ Recarga:	Freno regenerativo

- Pila de combustible

▪ ON/OFF:	OFF
▪ Potencia de pila (%):	0%

- Demanda de par

▪ Demanda de par de aceleración (%):	50%
▪ Demanda de par de deceleración (%):	100%

- Comentarios

- Tipo de tracción: Eléctrica
- Demanda de par de aceleración: Reducida
- Demanda de par de deceleración: Satisfecha
- Funcionamiento de la batería: Batería impulsa la tracción; disminuye SOC
- Funcionamiento de la pila: Error de pila y por tanto, pila OFF

**Escenario 10:**

- Escenario 10:

- Batería de tracción

▪ Estado de carga (SOC), (%):	<40% & ≥25%
▪ Temperatura de batería (°C):	>-30°C
▪ Error de batería:	0

- Pila de combustible

▪ Cantidad de Hidrógeno (%):	≤100% & ≥0%
▪ Temperatura de pila (°C):	>-30
▪ Error de pila:	1

- Acciones – Escenario 10:

- Batería de tracción

▪ ON/OFF:	ON
-----------	----

Título: **Implementación de un sistema de Pila de Combustible en el sistema de control de un vehículo eléctrico**

▪ Potencia de batería (%):	100%
▪ Recarga:	Freno regenerativo

- Pila de combustible

▪ ON/OFF:	OFF
▪ Potencia de pila (%):	0%

- Demanda de par

▪ Demanda de par de aceleración (%):	25%
▪ Demanda de par de deceleración (%):	100%

- Comentarios

- Tipo de tracción: Eléctrica
- Demanda de par de aceleración: Reducida
- Demanda de par de deceleración: Satisfecha
- Funcionamiento de la batería: Batería impulsa la tracción; disminuye SOC
- Funcionamiento de la pila: Error de pila y por tanto, pila OFF

**Escenario 11:**

- Escenario 11:

- Batería de tracción

▪ Estado de carga (SOC), (%):	<25%
▪ Temperatura de batería (°C):	>-30°C
▪ Error de batería:	0

- Pila de combustible

▪ Cantidad de Hidrógeno (%):	≤100% & ≥0%
▪ Temperatura de pila (°C):	>-30
▪ Error de pila:	1

- Acciones - Escenario 11:

- Batería de tracción

▪ ON/OFF:	ON
▪ Potencia de batería (%):	100%
▪ Recarga:	Freno regenerativo

- Pila de combustible

Título: **Implementación de un sistema de Pila de Combustible en el sistema de control de un vehículo eléctrico**

▪ ON/OFF:	OFF
▪ Potencia de pila (%):	0%

- Demanda de par

▪ Demanda de par de aceleración (%):	10%
▪ Demanda de par de deceleración (%):	100%

- Comentarios

- Tipo de tracción: Eléctrica
- Demanda de par de aceleración: Muy reducida
- Demanda de par de deceleración: Satisfecha
- Funcionamiento de la batería: Batería impulsa la tracción; disminuye SOC
- Funcionamiento de la pila: Error de pila y por tanto, pila OFF

**Escenario 12: Calentamiento de la pila**

- Escenario 12:

- Batería de tracción

▪ Estado de carga (SOC), (%):	$\leq 80\% \ \& \ \geq 0\%$
▪ Temperatura de batería ( $^{\circ}\text{C}$ ):	$> -30^{\circ}\text{C}$
▪ Error de batería:	0

- Pila de combustible

▪ Cantidad de Hidrógeno (%):	$\leq 100\% \ \& \ \geq 10\%$
▪ Temperatura de pila ( $^{\circ}\text{C}$ ):	$< 75^{\circ}\text{C}$
▪ Error de pila:	0

- Acciones – Escenario 12:

- Batería de tracción

▪ ON/OFF:	ON
▪ Potencia de batería (%):	100%
▪ Recarga:	Freno regenerativo

- Pila de combustible

▪ ON/OFF:	ON
▪ Potencia de pila (%):	0%

- Demanda de par

Título: **Implementación de un sistema de Pila de Combustible en el sistema de control de un vehículo eléctrico**

▪ Demanda de par de aceleración (%):	100%
▪ Demanda de par de deceleración (%):	100%

- Comentarios

- Tipo de tracción: Eléctrica
- Demanda de par de aceleración: Satisfecha
- Demanda de par de deceleración: Satisfecha
- Funcionamiento de la batería: Batería ON
- Funcionamiento de la pila: Arranca la pila para ir alcanzando la temperatura mínima de consigna de 75°C

**Escenario 13: Condición inicial**

**Escenario 13:**

- Escenario 13:

- Batería de tracción

▪ Estado de carga (SOC), (%):	$\leq 100\% \ \& \ \geq 80\%$
▪ Temperatura de batería (°C):	$< 35^{\circ}\text{C}$
▪ Error de batería:	0

- Pila de combustible

▪ Cantidad de Hidrógeno (%):	$\leq 100\% \ \& \ \geq 0\%$
▪ Temperatura de pila (°C):	$> -30$
▪ Error de pila:	0

- Acciones - Escenario 13:

- Batería de tracción

▪ ON/OFF:	ON
▪ Potencia de batería (%):	100%
▪ Recarga:	Freno regenerativo

- Pila de combustible

▪ ON/OFF:	OFF
▪ Potencia de pila (%):	0%

- Demanda de par

▪ Demanda de par de	100%
---------------------	------

Título: **Implementación de un sistema de Pila de Combustible en el sistema de control de un vehículo eléctrico**

aceleración (%):	
▪ Demanda de par de deceleración (%):	100%

- Comentarios

- Tipo de tracción: Eléctrica
- Demanda de par de aceleración: Satisfecha
- Demanda de par de deceleración: Satisfecha
- Funcionamiento de la batería: Batería ON
- Funcionamiento de la pila: Pila OFF
- Otros:
  - Escenario inicial
  - Vehículo completamente cargado (baterías y tanque de H<sub>2</sub>)

**Escenarios 14-18: Condiciones de funcionamiento**

**Escenario 14:**

- Escenario 14:

- Batería de tracción

▪ Estado de carga (SOC), (%):	<80% & ≥40%
▪ Temperatura de batería (°C):	<35°C
▪ Error de batería:	0

- Pila de combustible

▪ Cantidad de Hidrógeno (%):	≤100% & ≥0%
▪ Temperatura de pila (°C):	≥75°C
▪ Error de pila:	0

- Acciones – Escenario 14:

- Batería de tracción

▪ ON/OFF:	ON
▪ Potencia de batería (%):	Absorbe la demanda de corriente que no absorbe la pila
▪ Recarga:	Freno regenerativo Pila de combustible

- Pila de combustible

▪ ON/OFF:	ON
▪ Potencia de pila (%):	40%

Título: **Implementación de un sistema de Pila de Combustible en el sistema de control de un vehículo eléctrico**

- Demanda de par

▪ Demanda de par de aceleración (%):	100%
▪ Demanda de par de deceleración (%):	100%

- Comentarios

- Tipo de tracción: Hidrogeno-eléctrica
- Demanda de par de aceleración: Satisfecha
- Demanda de par de deceleración: Satisfecha
- Funcionamiento de la batería: Batería impulsa con la potencia que la pila no es capaz de suministrar o será recargada si la pila puede satisfacer la demanda de par final
- Funcionamiento de la pila: Pila funciona cargando la batería y dando tracción. Punto de máxima eficiencia de la pila es al 40% de su potencia máxima.

**Escenario 15:**

- Escenario 15:

- Batería de tracción

▪ Estado de carga (SOC), (%):	<40% & ≥25%
▪ Temperatura de batería (°C):	<35°C
▪ Error de batería:	0

- Pila de combustible

▪ Cantidad de Hidrógeno (%):	>50%
▪ Temperatura de pila (°C):	≥75°C
▪ Error de pila:	0

- Acciones - Escenario 15:

- Batería de tracción

▪ ON/OFF:	ON
▪ Potencia de batería (%):	Absorbe la demanda de corriente que no absorbe la pila
▪ Recarga:	Freno regenerativo Pila de combustible

- Pila de combustible

▪ ON/OFF:	ON
▪ Potencia de pila (%):	100%

Título: **Implementación de un sistema de Pila de Combustible en el sistema de control de un vehículo eléctrico**

- Demanda de par

▪ Demanda de par de aceleración (%):	80%
▪ Demanda de par de deceleración (%):	100%

- Comentarios

- Tipo de tracción: Hidrogeno-eléctrica
- Demanda de par de aceleración: Reducida
- Demanda de par de deceleración: Satisfecha
- Funcionamiento de la batería: Batería ON
- Funcionamiento de la pila: Pila ON

**Escenario 16:**

- Escenario 16:

- Batería de tracción

▪ Estado de carga (SOC), (%):	<40% & ≥25%
▪ Temperatura de batería (°C):	<35°C
▪ Error de batería:	0

- Pila de combustible

▪ Cantidad de Hidrógeno (%):	≤50%
▪ Temperatura de pila (°C):	≥75°C
▪ Error de pila:	0

- Acciones - Escenario 16:

- Batería de tracción

▪ ON/OFF:	ON
▪ Potencia de batería (%):	Absorbe la demanda de corriente que no absorbe la pila
▪ Recarga:	Freno regenerativo Pila de combustible

- Pila de combustible

▪ ON/OFF:	ON
▪ Potencia de pila (%):	100%

- Demanda de par

▪ Demanda de par de aceleración (%):	60%
--------------------------------------	-----

Título: **Implementación de un sistema de Pila de Combustible en el sistema de control de un vehículo eléctrico**

▪ Demanda de par de deceleración (%):	100%
---------------------------------------	------

- Comentarios

- Tipo de tracción: Hidrogeno-eléctrica
- Demanda de par de aceleración: Reducida
- Demanda de par de deceleración: Satisfecha
- Funcionamiento de la batería: Batería ON
- Funcionamiento de la pila: Pila ON

**Escenario 17:**

- Escenario 17:

- Batería de tracción

▪ Estado de carga (SOC), (%):	<25%
▪ Temperatura de batería (°C):	<35°C
▪ Error de batería:	0

- Pila de combustible

▪ Cantidad de Hidrógeno (%):	>50%
▪ Temperatura de pila (°C):	≥75°C
▪ Error de pila:	0

- Acciones – Escenario 17:

- Batería de tracción

▪ ON/OFF:	ON
▪ Potencia de batería (%):	Absorbe la demanda de corriente que no absorbe la pila
▪ Recarga:	Freno regenerativo Pila de combustible

- Pila de combustible

▪ ON/OFF:	ON
▪ Potencia de pila (%):	100%

- Demanda de par

▪ Demanda de par de aceleración (%):	40%
▪ Demanda de par de deceleración (%):	100%

Título: **Implementación de un sistema de Pila de Combustible en el sistema de control de un vehículo eléctrico**

- Comentarios

- Tipo de tracción: Hidrogeno-eléctrica
- Demanda de par de aceleración: Reducida
- Demanda de par de deceleración: Satisfecha
- Funcionamiento de la batería: Batería ON, recargada por la potencia excedente de la pila
- Funcionamiento de la pila: Pila ON

**Escenario 18:**

- Escenario 18:

- Batería de tracción

▪ Estado de carga (SOC), (%):	<25%
▪ Temperatura de batería (°C):	<35°C
▪ Error de batería:	0

- Pila de combustible

▪ Cantidad de Hidrógeno (%):	≤50%
▪ Temperatura de pila (°C):	≥75°C
▪ Error de pila:	0

- Acciones – Escenario 18:

- Batería de tracción

▪ ON/OFF:	ON
▪ Potencia de batería (%):	0%
▪ Recarga:	Freno regenerativo Pila de combustible

- Pila de combustible

▪ ON/OFF:	ON
▪ Potencia de pila (%):	100%

- Demanda de par

▪ Demanda de par de aceleración (%):	20%
▪ Demanda de par de deceleración (%):	100%

- Comentarios

Título: **Implementación de un sistema de Pila de Combustible en el sistema de control de un vehículo eléctrico**

- Tipo de tracción: Hidrogeno-eléctrica
- Demanda de par de aceleración: Reducida
- Demanda de par de deceleración: Satisfecha
- Funcionamiento de la batería: Batería ON, recargada por la potencia excedente de la pila
- Funcionamiento de la pila: Pila ON

### 4.3. Descripción del algoritmo de gestión de la pila de combustible (“Energy Management”)

Este apartado se basa en la implementación del razonamiento desarrollado en el apartado anterior a través de la plataforma Matlab-Simulink.

#### 4.3.1. Listado de señales

##### 4.3.1.1. Listado de señales de entrada

**Tabla 3** Listado de señales de entrada del vehículo original

Señal	Nomenclatura	Tipo de señal
Sistema electrónico encendido	Key_ON	Booleano 0=Sistema apagado 1= Sistema encendido
Sistema de alto voltaje activado	Battery_Status	Booleano 0=Sistema apagado 1= Sistema encendido
Error de batería	Batt_Error	Booleano 0=No error 1= Error
Estado de carga de la batería (SOC)	Batt_SOC	Analógico (%)
Temperatura de la batería	Batt_Temp	Analógico (°C)

**Tabla 4** Listado de señales de entrada del sistema REX

Señal	Nomenclatura	Tipo de señal
Error de pila de combustible	FC_Error	Booleano 0=No error 1= Error
Cantidad de hidrógeno	FC_H2	Analógico (%)
Temperatura de la pila	FC_Temp	Analógico (°C)

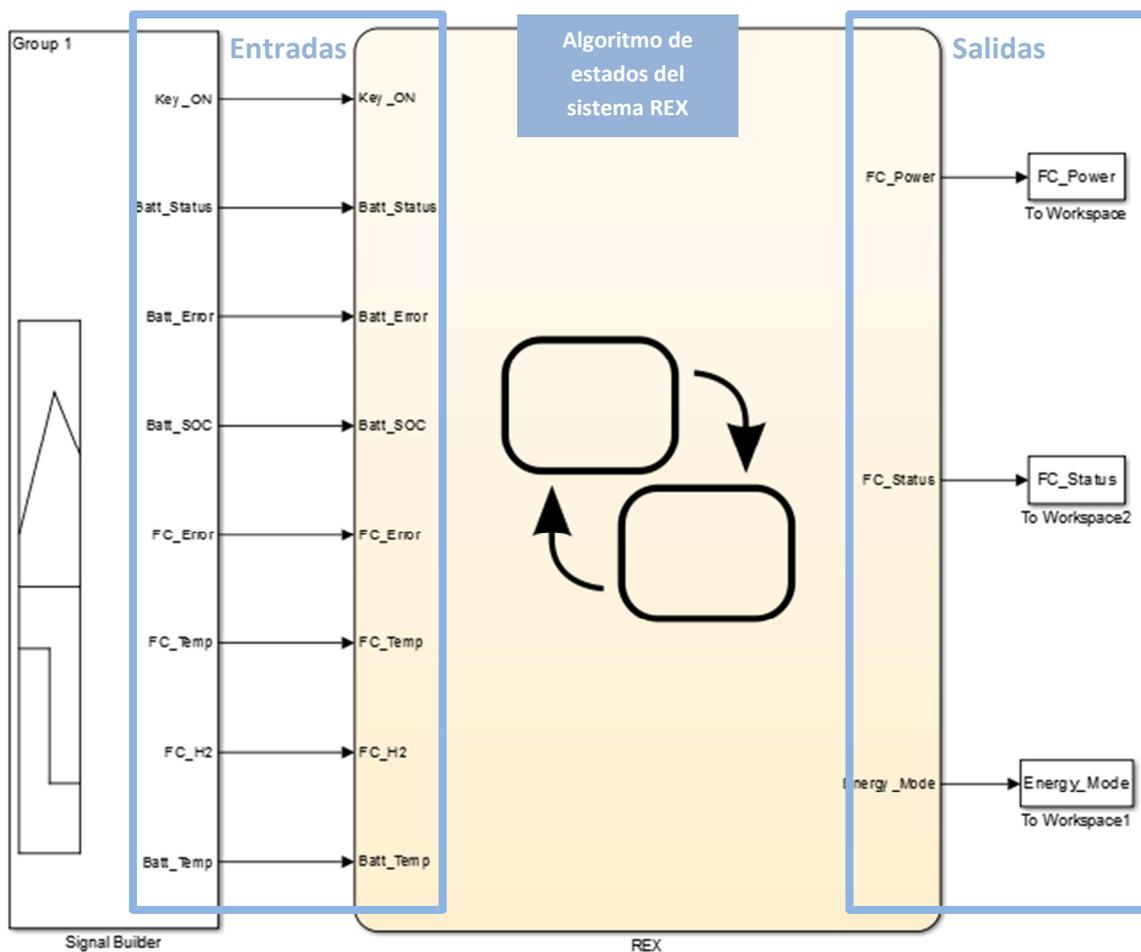
##### 4.3.1.2. Listado de señales de salida

**Tabla 5** Listado de señales de salida del sistema REX

Señal	Nomenclatura	Tipo de señal
Sistema de energía activo	Energy_Mode	Analógico (Valor numérico)  1= Modo eléctrico puro 2= Modo eléctrico + modo REX (máx. eficiencia) 3= Modo eléctrico + Modo REX (máx. potencia)
Potencia de entrega de la pila	FC_Power	Analógico (kW)
Estado de la pila	FC_Status	Booleano  0=Pila apagada 1= Pila encendida

### 4.3.2. Implementación del algoritmo

Por medio de la herramienta Matlab-Simulink se modela el algoritmo global de implementación de pila de combustible mostrado en la siguiente figura.



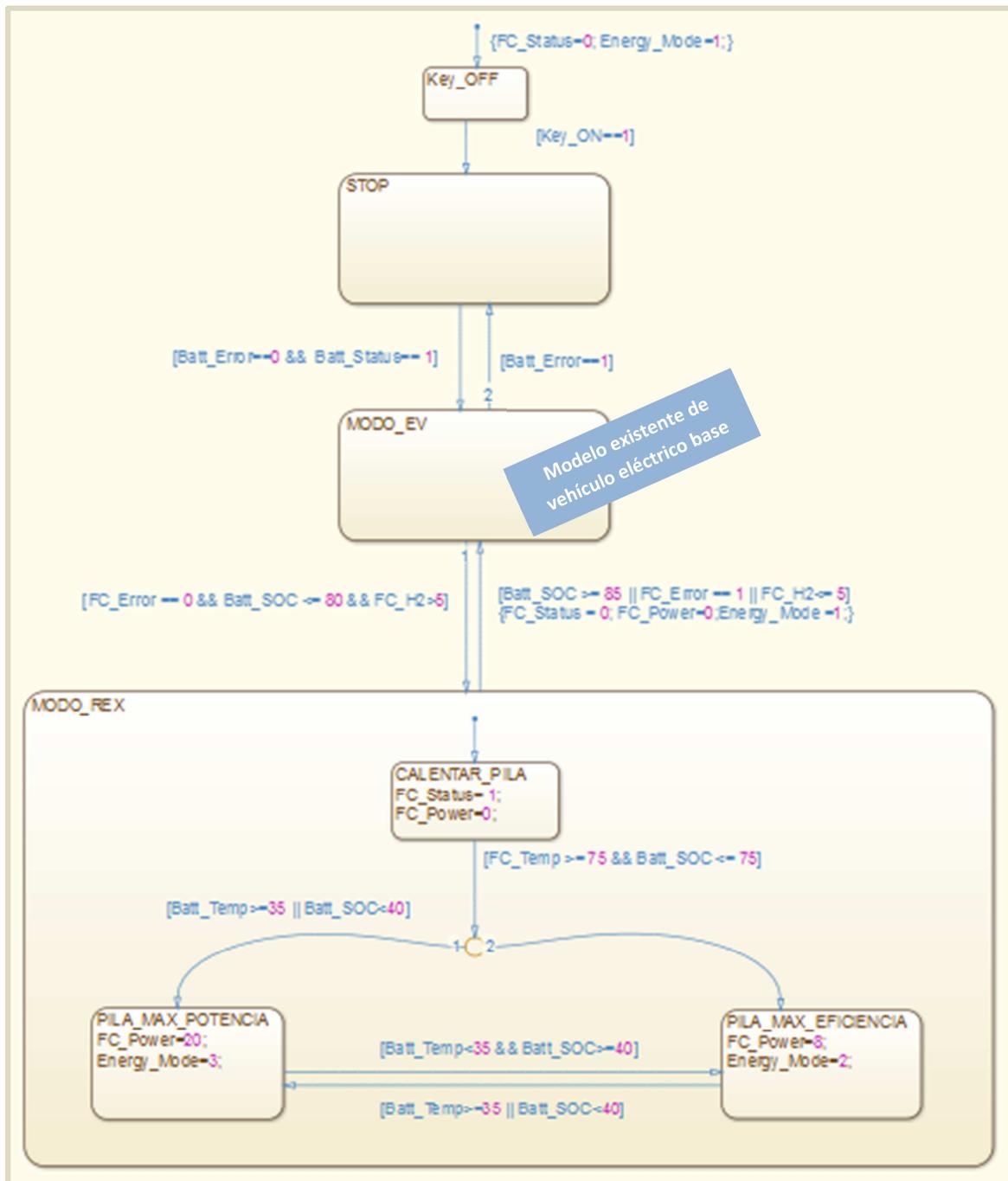
**Figura 17** Modelo Simulink del vehículo eléctrico con sistema REX de pila de combustible

Título: **Implementación de un sistema de Pila de Combustible en el sistema de control de un vehículo eléctrico**

4.3.2.1. Descripción de transiciones

La idea es reflejar lo que describe la Figura 15, Máquina de estados del vehículo eléctrico con sistema REX de pila de combustible; se trata de implementar las transiciones basadas en los escenarios descritos en el apartado 4.2.2.1.

Se realiza gracias a la herramienta Simulink y la librería "Stateflow" como detalla la Figura 18.



**Figura 18** Algoritmo de estados del vehículo eléctrico con sistema REX de pila de combustible

#### 4.4. Validación funcional de la integración

Con el objetivo de validar la integración del sistema de pila de combustible en el vehículo eléctrico original, se proponen distintos casos reales (simulación de estrategia) y se comprueba que su funcionamiento es el óptimo de acuerdo a la definición de la algoritmia (libro de especificaciones y descripción del algoritmo).

Para esta verificación se han simulado más de 20 casos distintos. A continuación se detallan los 6 más representativos, cuyos resultados muestran que dicha **validación es satisfactoria**.

##### 4.4.1. Resultados de la validación funcional del vehículo

- Datos de entrada:

La función que sirve para generar datos de entrada y su respectiva evolución en el tiempo en Matlab-Simulink es “*Signal builder*” o generador de señales.

En cada uno de los casos que se describen a continuación se generan 10 segundos de simulación.

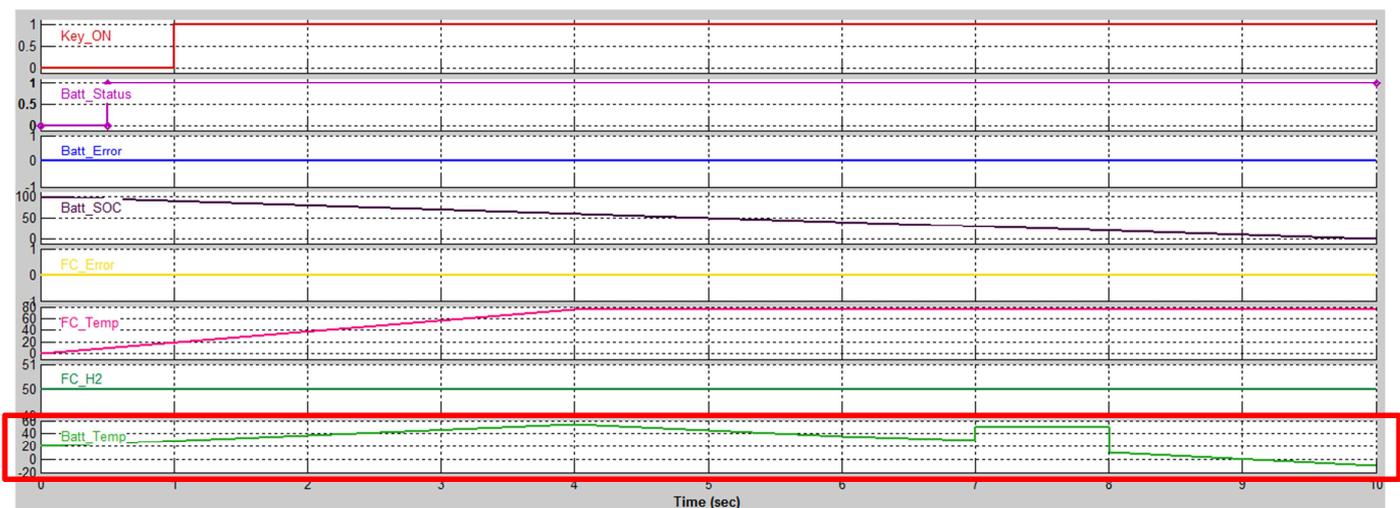
- Datos de salida:

Se generan 3 datos de salida para comprobar el modo en el que trabaja el sistema completo vehicular (Energy\_Mode), el funcionamiento de la pila (FC\_Status) y la potencia a la que trabaja la pila (FC\_Power).

Los datos se generan gracias a la función “*To Workspace*” de Simulink y la función “*Plot*” de Matlab.

##### Caso 1: Funcionamiento habitual con calentamiento de batería

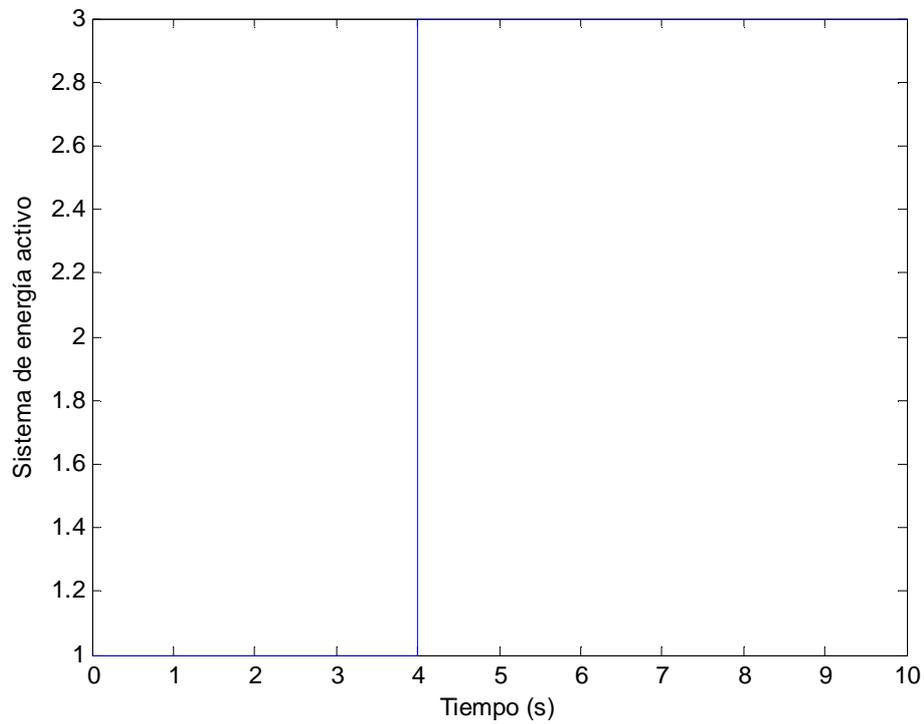
- Datos de entrada:



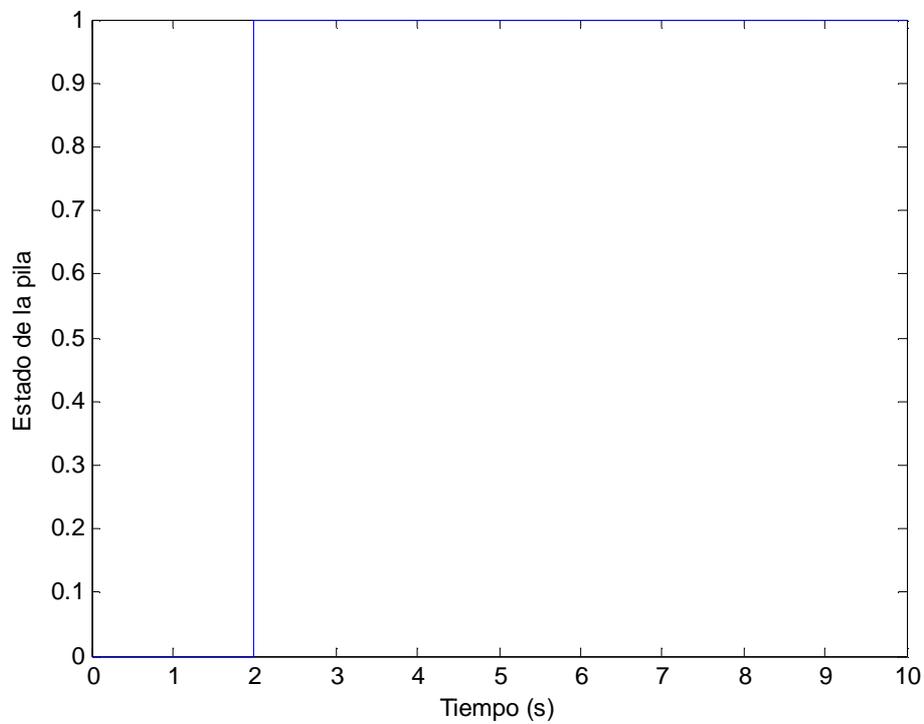
**Figura 19** Datos de entrada de la validación del caso 1

Título: **Implementación de un sistema de Pila de Combustible en el sistema de control de un vehículo eléctrico**

- Datos de salida:

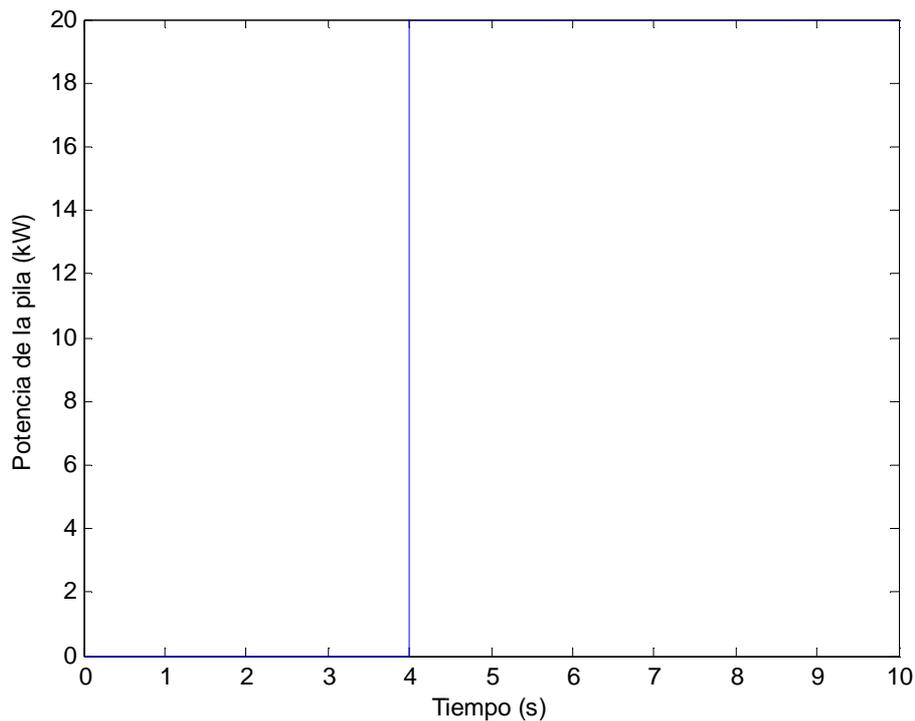


**Figura 20** Evolución de los sistemas activos en la validación del caso 1



**Figura 21** Evolución del estado de la pila de combustible en la validación del caso 1

Título: **Implementación de un sistema de Pila de Combustible en el sistema de control de un vehículo eléctrico**

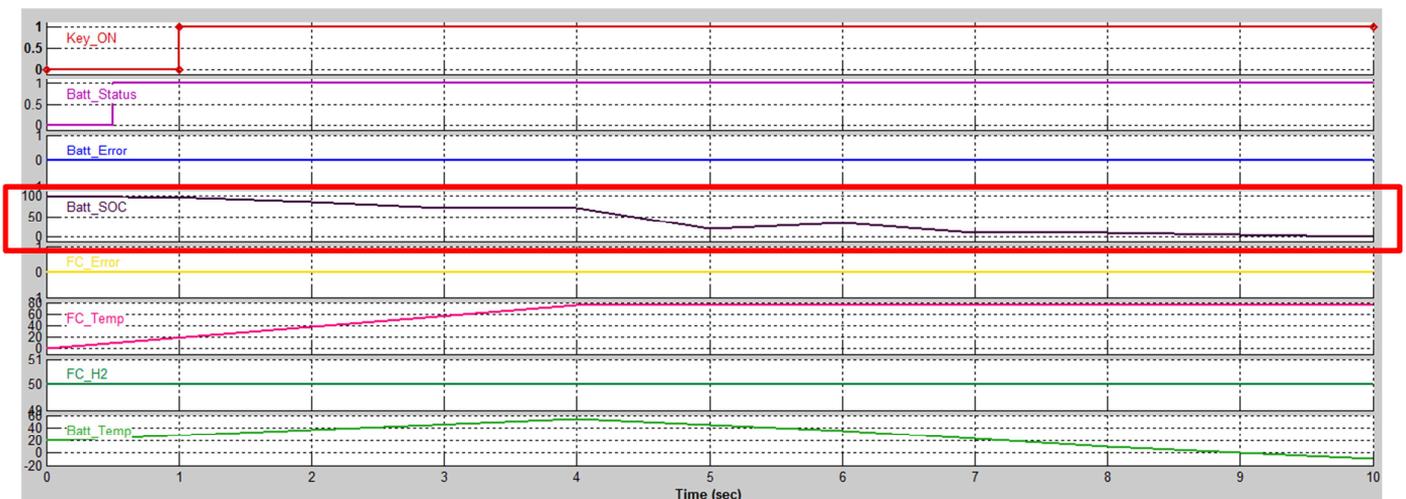


**Figura 22** Evolución de la potencia de la pila de combustible en la validación del caso 1

Hasta el segundo 4 la temperatura de la pila no alcanza su valor de consigna de 75°C. Por tanto, los 4 primeros segundos, el vehículo funciona en modo eléctrico. La pila arranca en el segundo 2 para calentarse, pues el valor de SOC es inferior al 80. Una vez la pila se calienta, trabaja a máxima potencia debido a que la batería alcanza temperaturas mayores de 35°C y/o el SOC es inferior al 40%.

**Caso 2: Funcionamiento normal con descenso de SOC**

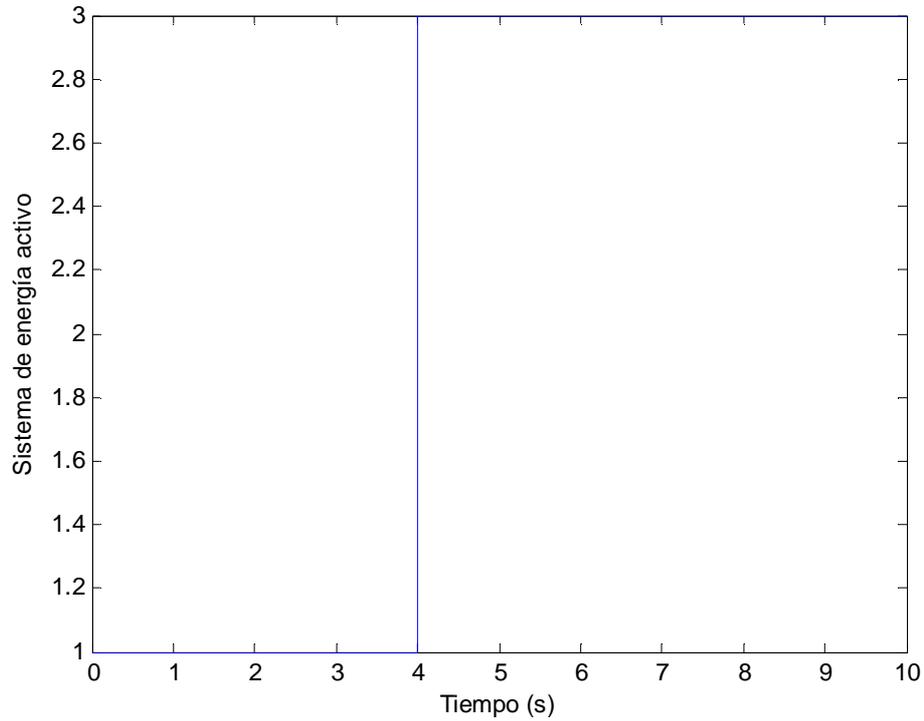
- Datos de entrada:



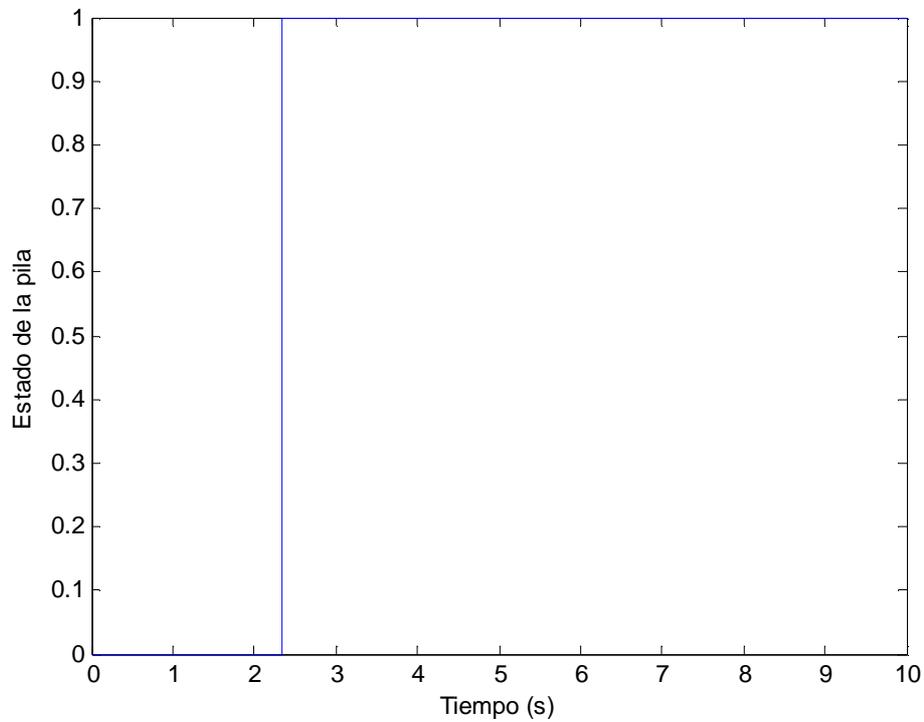
**Figura 23** Datos de entrada de la validación del caso 2

Título: **Implementación de un sistema de Pila de Combustible en el sistema de control de un vehículo eléctrico**

- Datos de salida:

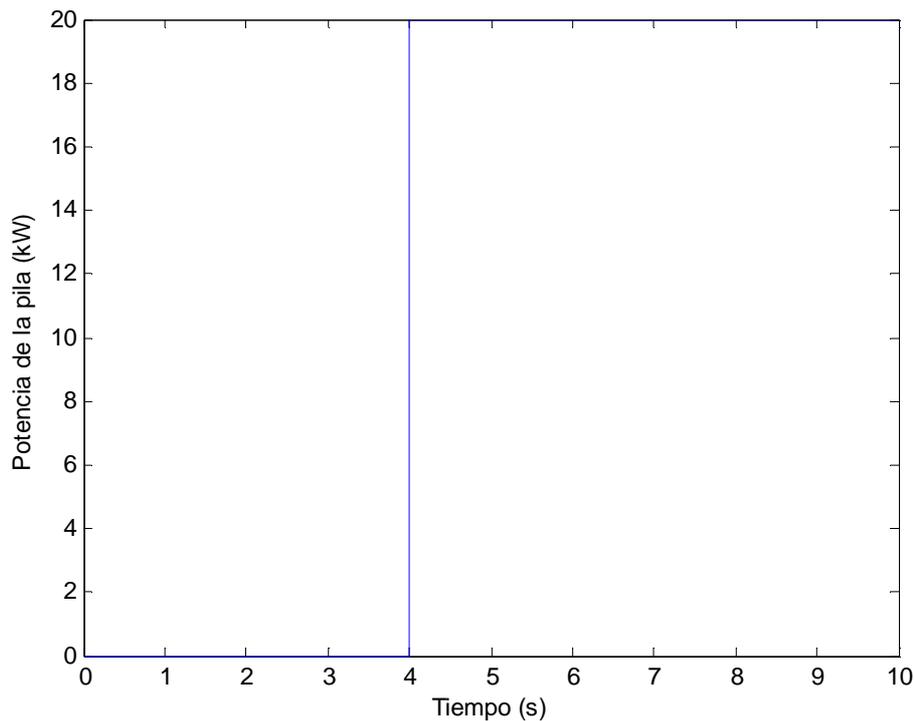


**Figura 24** Evolución de los sistemas activos en la validación del caso 2



**Figura 25** Evolución del estado de la pila de combustible en la validación del caso 2

Título: **Implementación de un sistema de Pila de Combustible en el sistema de control de un vehículo eléctrico**

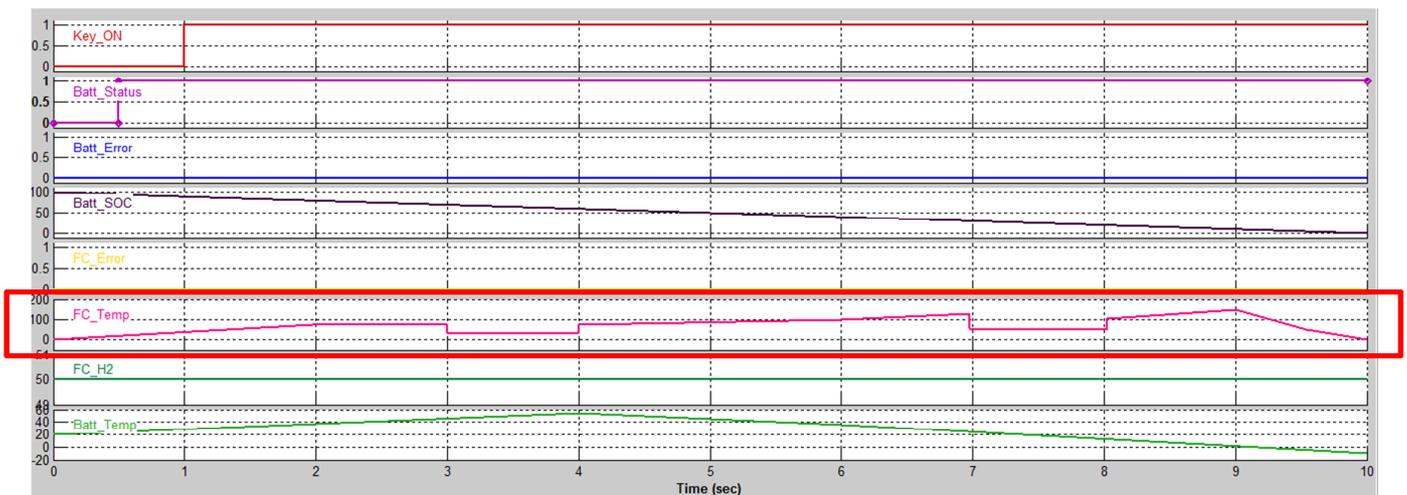


**Figura 26** Evolución de la potencia de la pila de combustible en la validación del caso 2

Hasta el segundo 4 la temperatura de la pila no alcanza su valor de consigna de 75°C. Por tanto, los 4 primeros segundos el vehículo funciona en modo eléctrico. La pila arranca en el segundo 2,3 pues el valor de SOC es inferior al 80%, para calentarse. Después ésta trabaja a máxima potencia debido a que la batería alcanza temperaturas mayores de 35°C y/o el SOC es inferior al 40% una vez la pila alcanza la temperatura consigna.

**Caso 3: Evolución del calentamiento de la pila de combustible**

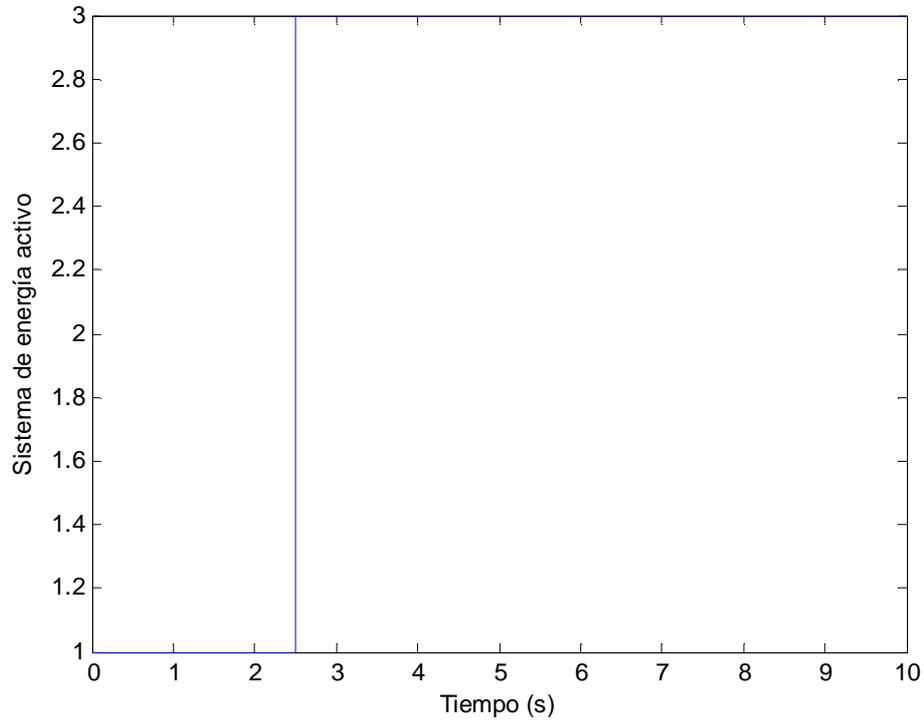
- Datos de entrada:



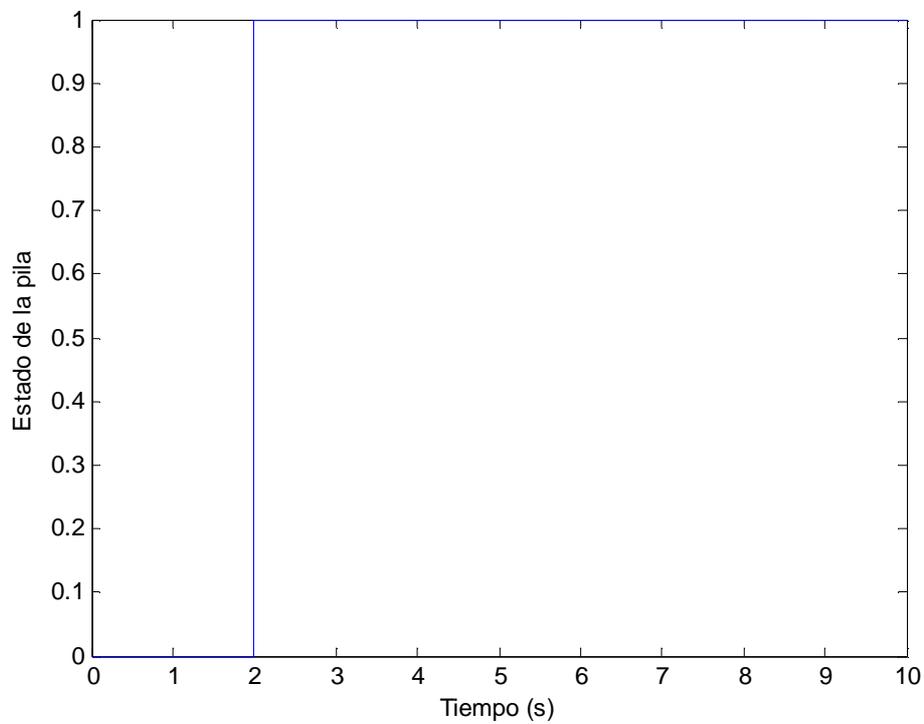
**Figura 27** Datos de entrada de la validación del caso 3

Título: **Implementación de un sistema de Pila de Combustible en el sistema de control de un vehículo eléctrico**

- Datos de salida:

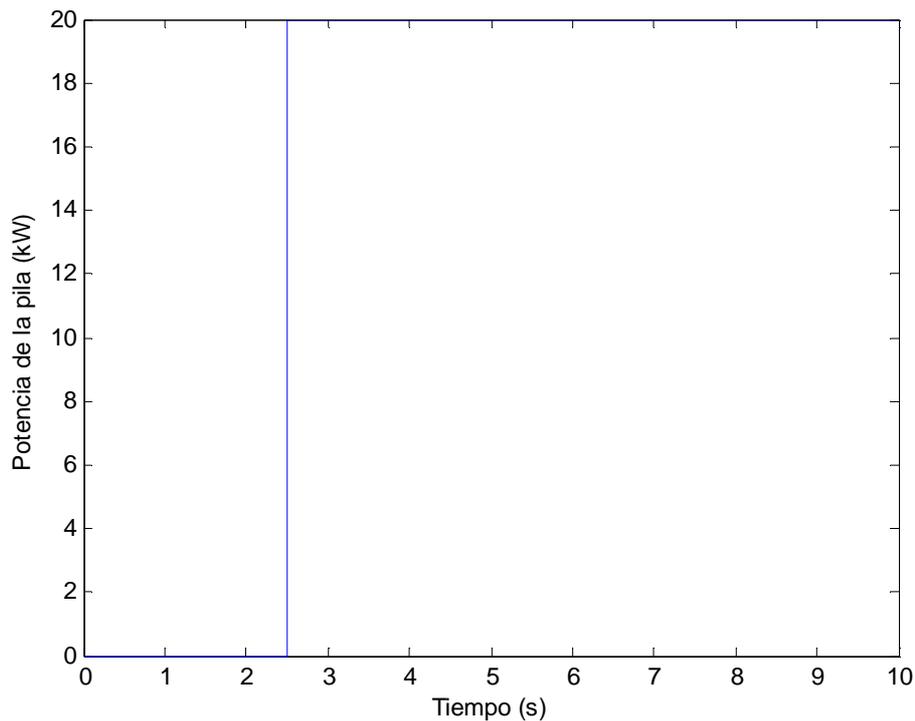


**Figura 28** Evolución de los sistemas activos en la validación del caso 3



**Figura 29** Evolución del estado de la pila de combustible en la validación del caso 3

Título: **Implementación de un sistema de Pila de Combustible en el sistema de control de un vehículo eléctrico**

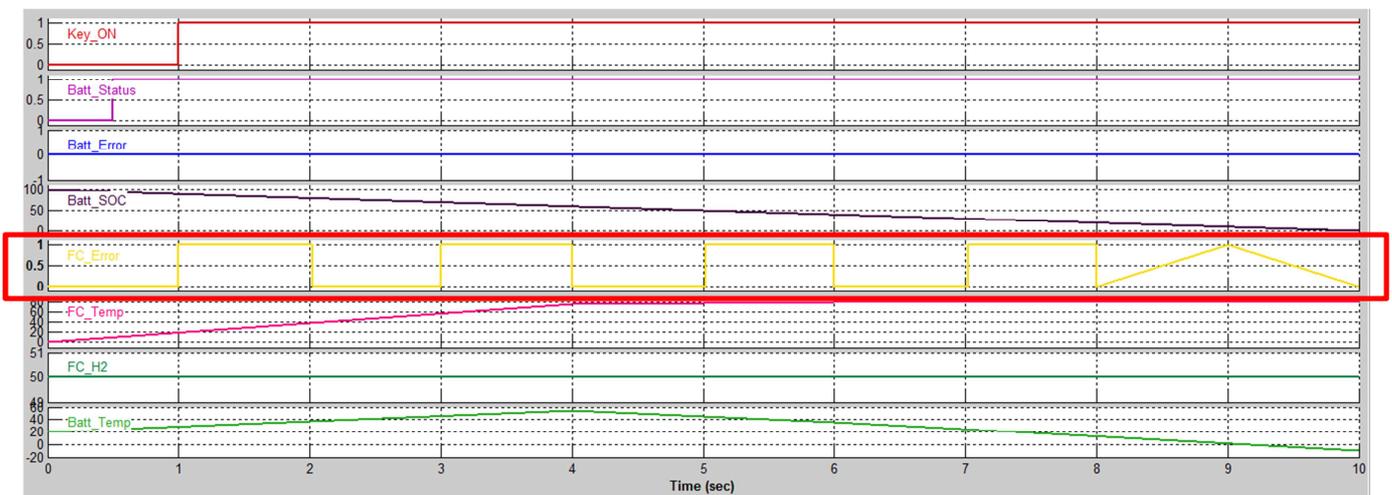


**Figura 30** Evolución de la potencia de la pila de combustible en la validación del caso 3

Hasta el segundo 2,5 la temperatura de la pila no alcanza su valor de consigna de 75°C. Por tanto, los 2,5 primeros segundos el vehículo funciona en modo eléctrico. La pila arranca en el segundo 2 para calentarse pues el valor de SOC es inferior al 80%. Pila trabaja a máxima potencia debido a que la batería alcanza temperaturas mayores de 35°C y/o el SOC es inferior al 40% una vez la pila alcanza la temperatura consigna.

**Caso 4: Error de pila**

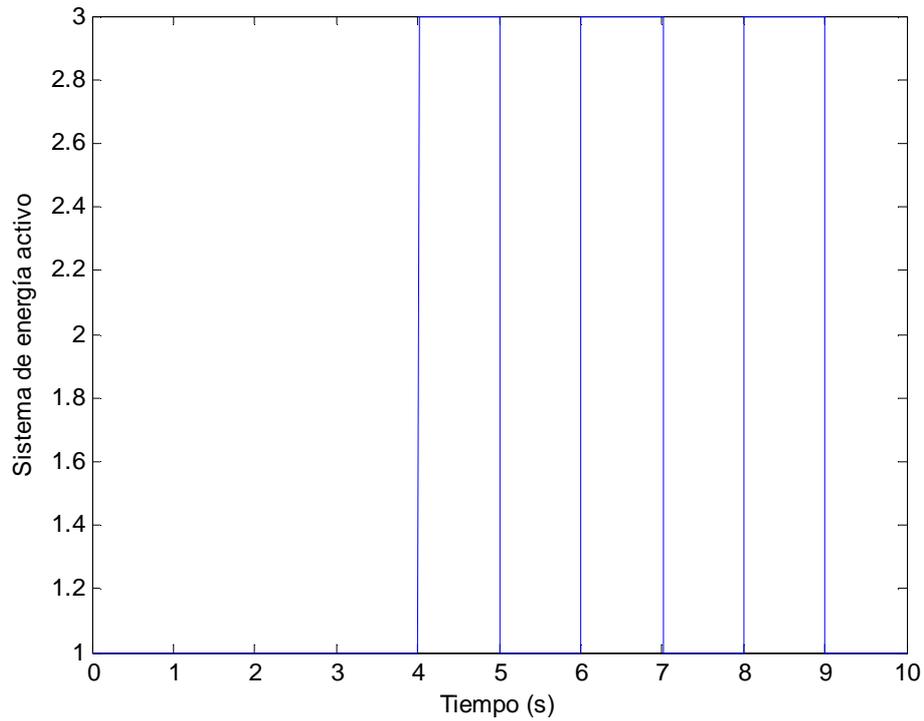
- Datos de entrada:



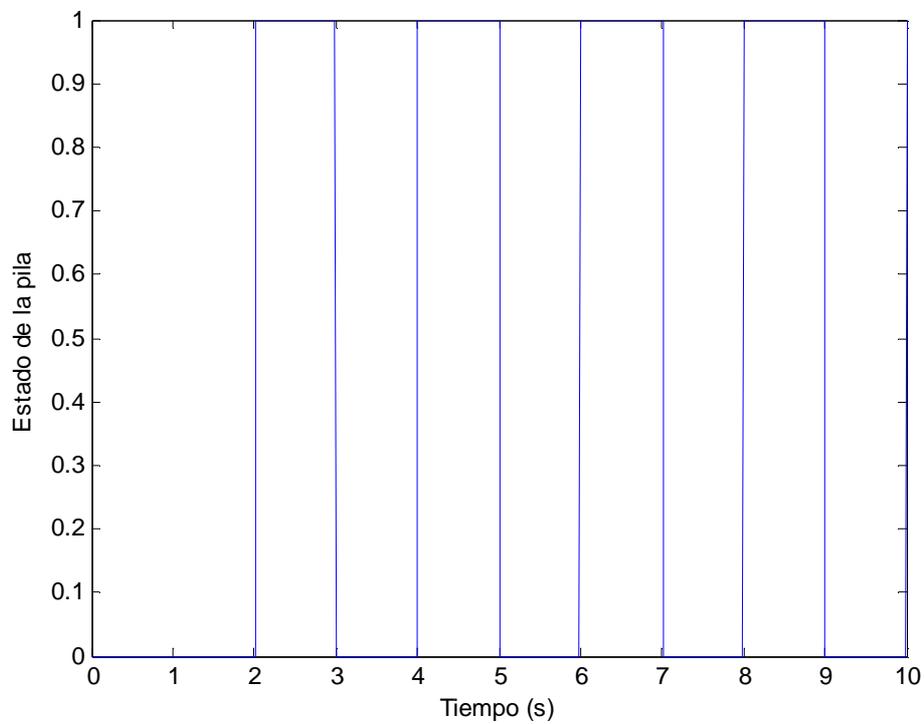
**Figura 31** Datos de entrada de la validación del caso 4

Título: **Implementación de un sistema de Pila de Combustible en el sistema de control de un vehículo eléctrico**

- Datos de salida

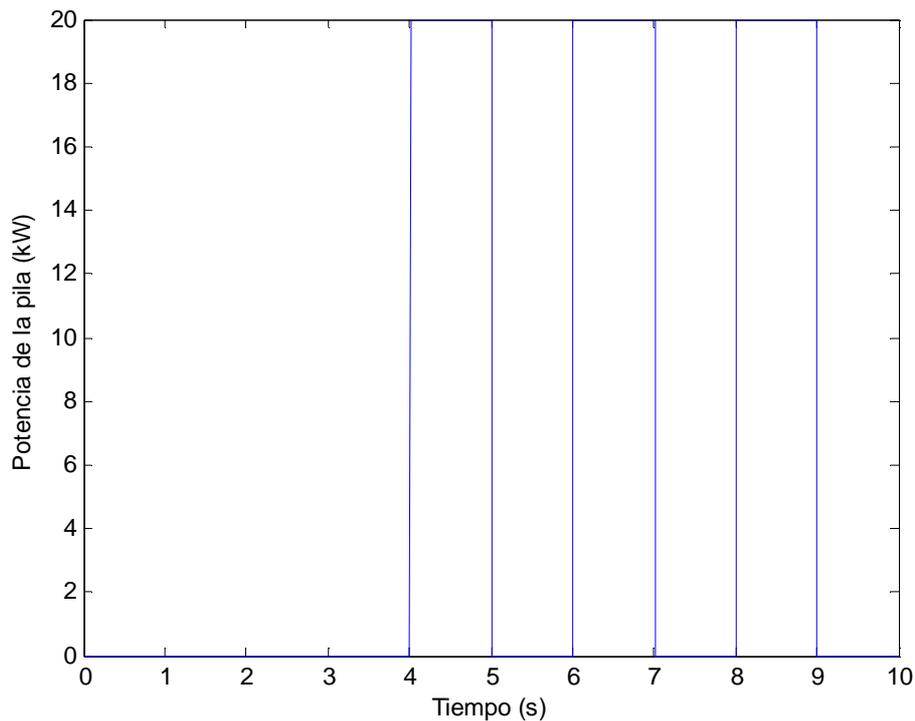


**Figura 32** Evolución de los sistemas activos en la validación del caso 4



**Figura 33** Evolución del estado de la pila de combustible en la validación del caso 4

Título: **Implementación de un sistema de Pila de Combustible en el sistema de control de un vehículo eléctrico**

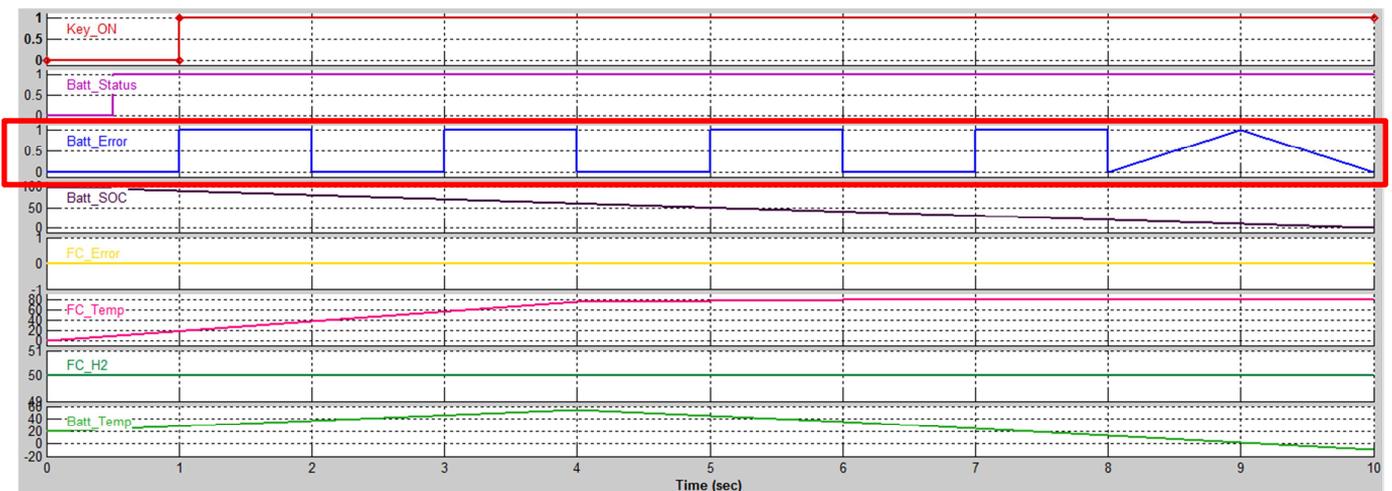


**Figura 34** Evolución de la potencia de la pila de combustible en la validación del caso 4

Hasta el segundo 4 la temperatura de la pila no alcanza su valor de consigna de 75°C. Por tanto, los 4 primeros segundos el vehículo funciona en modo eléctrico. La pila arranca en el segundo 2 para calentarse, pues el valor de SOC es inferior al 80% y se apaga en el 3 cuando el SOC sube. Pila trabaja a máxima potencia debido a que la batería alcanza temperaturas mayores de 35°C y/o el SOC es inferior al 40% una vez la pila alcanza la temperatura consigna y siempre que ésta no tiene errores.

**Caso 5: Error de batería**

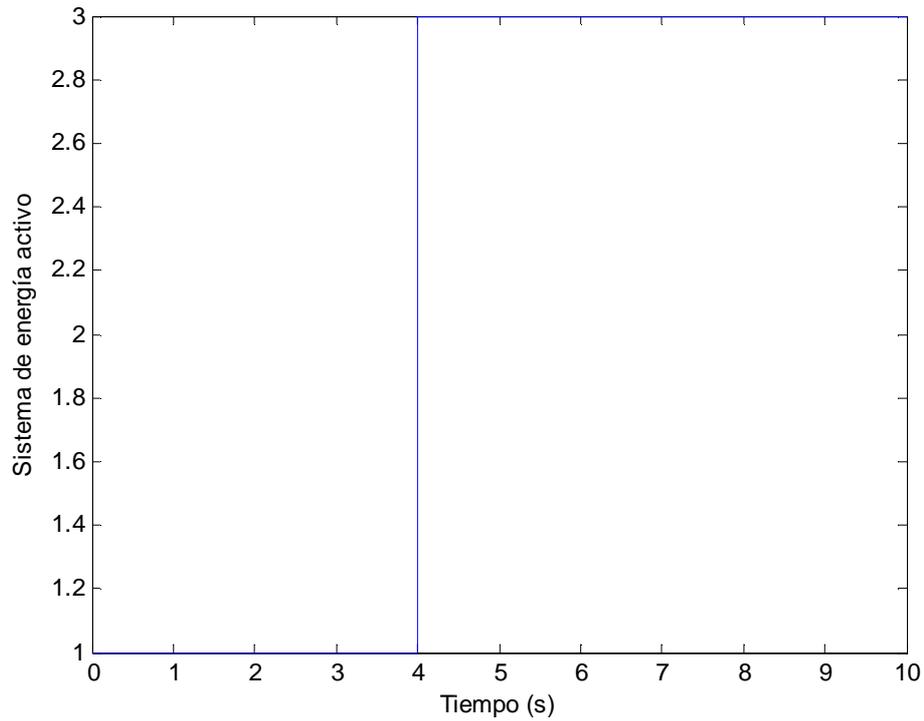
- Datos de entrada:



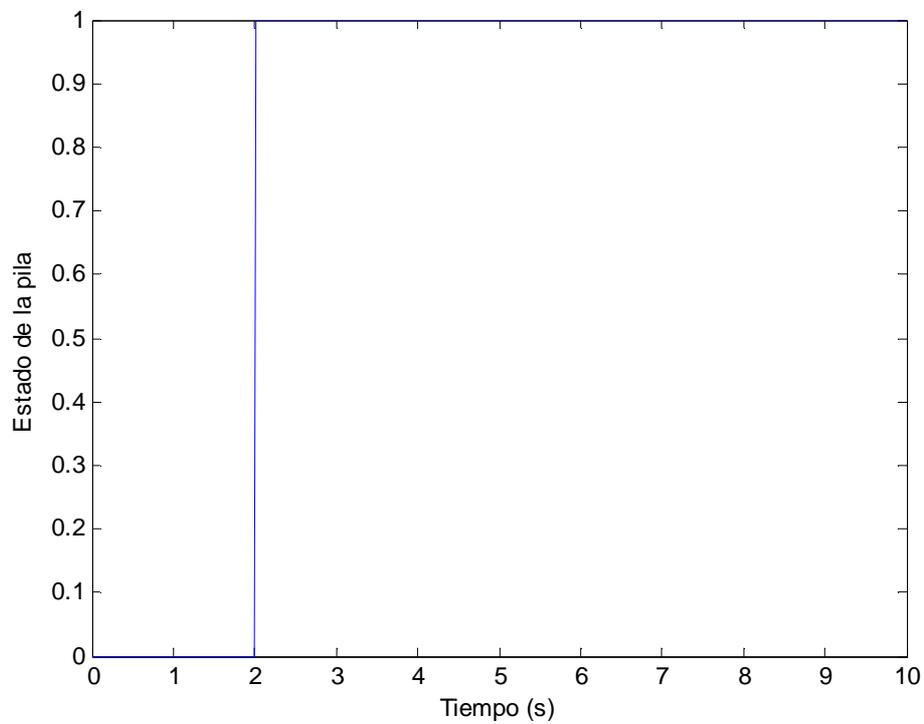
**Figura 35** Datos de entrada de la validación del caso 5

Título: **Implementación de un sistema de Pila de Combustible en el sistema de control de un vehículo eléctrico**

- Datos de salida:

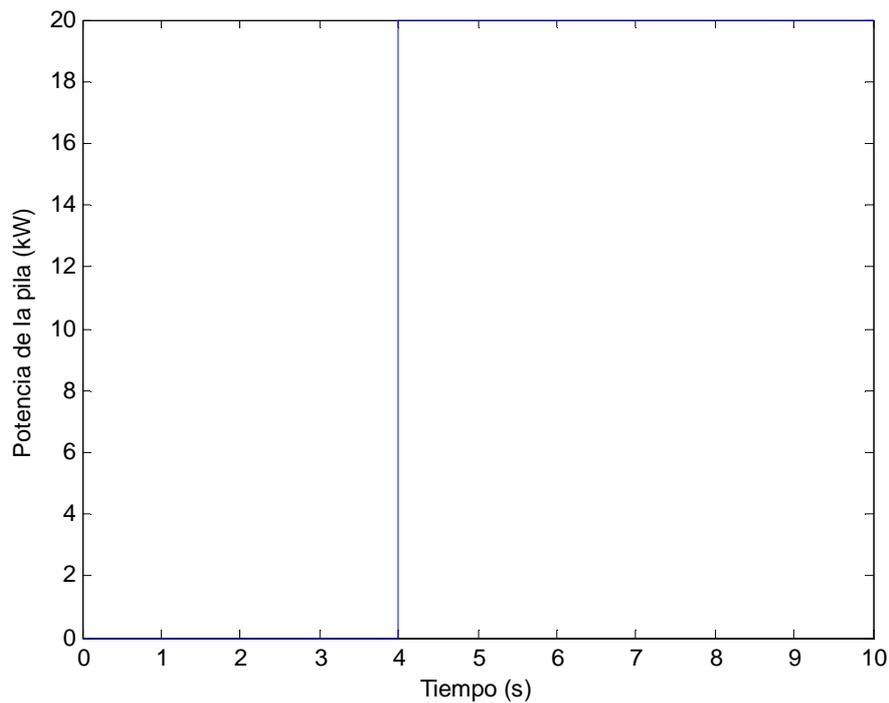


**Figura 36** Evolución de los sistemas activos en la validación del caso 5



**Figura 37** Evolución del estado de la pila de combustible en la validación del caso 5

Título: **Implementación de un sistema de Pila de Combustible en el sistema de control de un vehículo eléctrico**

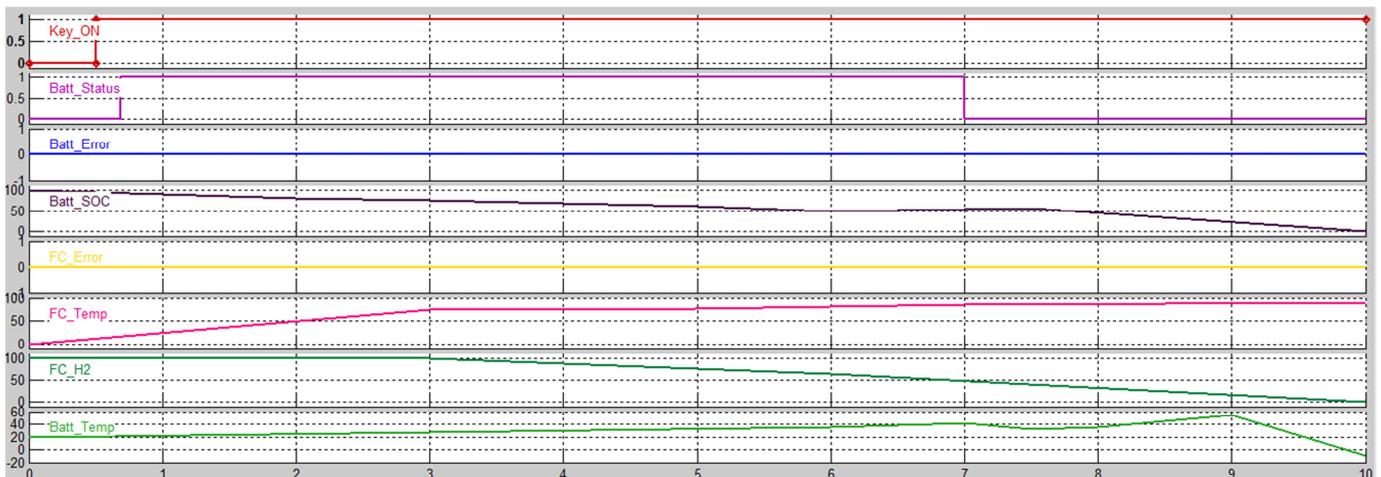


**Figura 38** Evolución de la potencia de la pila de combustible en la validación del caso 5

Los 4 primeros segundos la batería permanece encendida aunque ésta tenga errores, pues la gestión de la batería pertenece al vehículo eléctrico original, y será esta algoritmia la encargada de decidir si la batería se apaga o no (dependiendo del error y gravedad). La pila arranca en el segundo 2 para calentarse, pues el valor de SOC es inferior al 80%. La pila trabaja a máxima potencia debido a que la batería alcanza temperaturas mayores de 35°C y/o el SOC es inferior al 40% una vez la pila alcanza la temperatura consigna.

**Caso 6: Funcionamiento completo desde condiciones iniciales**

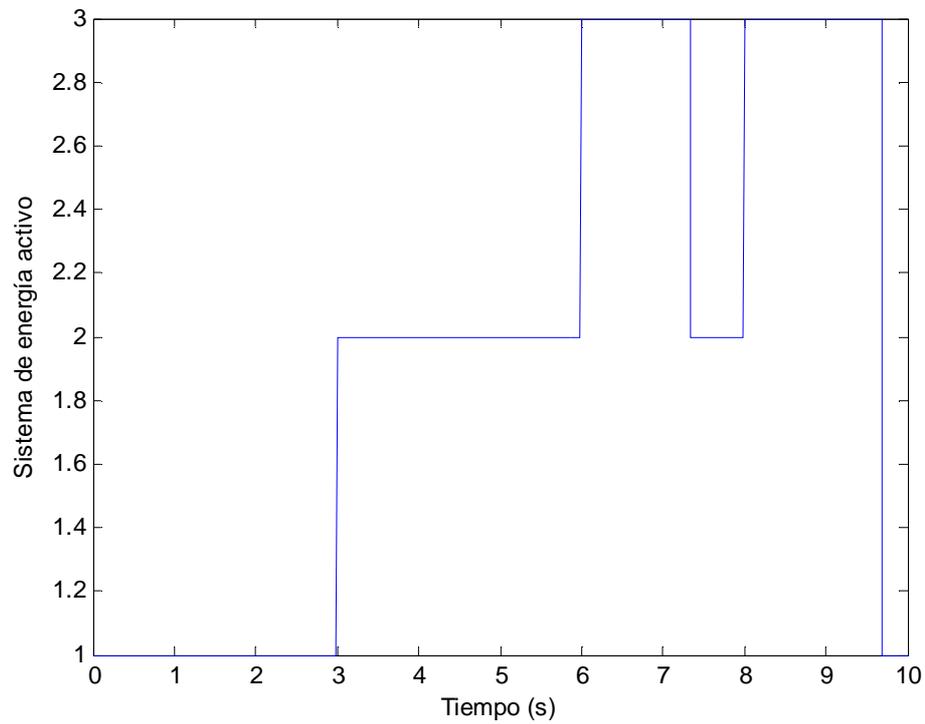
- Datos de entrada:



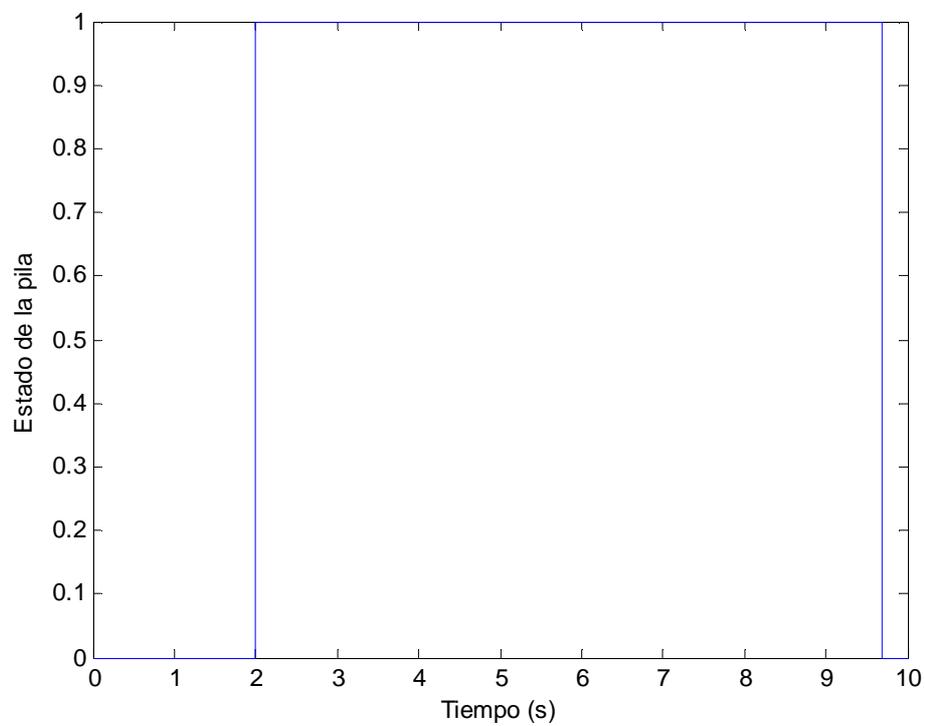
**Figura 39** Datos de entrada de la validación del caso 6

Título: **Implementación de un sistema de Pila de Combustible en el sistema de control de un vehículo eléctrico**

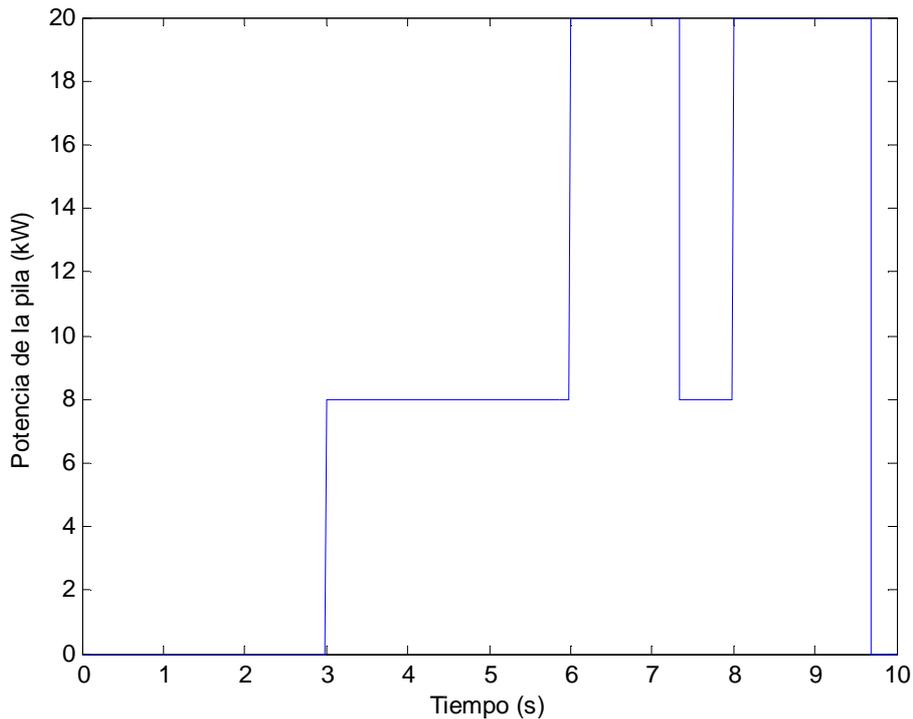
- Datos de salida:



**Figura 40** Evolución de los sistemas activos en la validación del caso 6



**Figura 41** Evolución del estado de la pila de combustible en la validación del caso 6



**Figura 42** Evolución de la potencia de la pila de combustible en la validación del caso 6

Hasta el segundo 3 la temperatura de la pila no alcanza su valor de consigna de 75°C. Por tanto, los 3 primeros segundos el vehículo funciona en modo eléctrico. La pila arranca en el segundo 2 para calentarse, pues el valor de SOC es inferior al 80%. La pila trabaja con valor de máxima eficiencia con valores de SOC entre 40 y 75% y la temperatura de la batería es menor que 35°C. La pila trabaja a máxima potencia debido a que la batería alcanza temperaturas mayores de 35°C y/o el SOC es inferior al 40% una vez la pila alcanza la temperatura consigna.

## 5. Simulación de consumo

---

La velocidad máxima así como el consumo de energía de un vehículo dependen directamente de:

- Peso del vehículo
- Potencia del motor
- Resistencia aerodinámica

Por ello, la primera etapa de la simulación de consumo del vehículo se basa en definir y/o calcular los datos de entrada.

### 5.1. Datos de entrada de la simulación

A continuación se definen una serie de datos de entrada que deben considerarse para la simulación. Algunos de ellos se han citado previamente en este documento, pero de nuevo se hace una referencia a ellos de forma estructurada, por categorías.

#### - Descripción vehicular general

Dato	Valor/Descripción
Marca y modelo de vehículo	Nissan Cabstar
Peso de vehículo	3500 kg
Peso conductor (estándar considerado)	75 kg (incluido en tara máxima)
Arquitectura de la línea motriz	
Potencia de motor eléctrico	80 kW
Eficiencia de motor eléctrico	80%
Eficiencia de la reductora	97%
Eficiencia del diferencial	98%
Consumo permanente de componentes electrónicos de 12 V	400 W

#### - Parámetros aerodinámicos del vehículo

Con el objetivo de que el vehículo se desplace, éste debe superar la fuerza de resistencia de arrastre:

**Ecuación 4** Fuerza de Resistencia de arrastre

$$F = F_0 + F_2 \cdot v^2$$

F= Resistencia de arrastre en N

F<sub>0</sub>= Resistencia a la rodadura en N

F<sub>2</sub>= Resistencia aerodinámica en N/(km/h)<sup>2</sup>

v= velocidad del vehículo en km/h

Para la determinación de los parámetros aerodinámicos que componen la fuerza de arrastre (F<sub>0</sub> y F<sub>2</sub>), existen dos opciones:

#### a) Realizar un ensayo de "Coast-Down"

Los ensayos de "Coast-Down" se realizan en pistas. Se acelera el vehículo hasta una velocidad inicial (normalmente 80Km/h) y desembraga el motor (con lo que se desacopla el motor del resto de la transmisión). Sin aplicar ningún par de frenado, se deja el vehículo circular hasta que se detiene.

Durante este proceso se mide el tiempo transcurrido hasta que se alcanzan determinadas velocidades de control. Se obtienen así tablas de valores tiempo-velocidad sobre los que se deben aplicar correcciones asociadas a las condiciones atmosféricas (velocidad del viento, etc...).

Título: **Implementación de un sistema de Pila de Combustible en el sistema de control de un vehículo eléctrico**

Este procedimiento cobra más sentido con vehículos convencionales de combustión, debido a que los motores eléctricos siempre pueden generar fuerzas electromagnéticas que perturben a la inercia del vehículo. Por este motivo, se calculan valores teóricos de “Coast-Down” a continuación.

b) Calcular los parámetros de “Coast-Down” a partir de valores teóricos.

Dato	Valor/Descripción
Resistencia aerodinámica	
Coefficiente aerodinámico (Cx)	0,66
Área frontal (a)	3,78m <sup>2</sup>
Coefficiente de resistencia de la rueda (μ)	0,0091 t/t
Densidad del aire (ρ)	1,1993kg/m <sup>3</sup>

– **Parámetro F0, Resistencia a la rodadura**

**Ecuación 5** Parámetro F0 de “Coast-Down”.

$$F0 = m(\text{vehículo} + 75 \text{ kg}) \cdot g \text{ (m/s)} \cdot \mu \text{ (t/t)}$$

La masa máxima del vehículo es 3500kg, luego en este caso no se añade la masa del conductor (75 kg) pues ya está incluida en la masa del vehículo (m=3.5 T).

$$F0 = 312,65 \text{ N}$$

▪ **Parámetro F2, Resistencia aerodinámica**

**Ecuación 6** Parámetro F2 de “Coast-Down”.

$$F2 = a(m2) \cdot \frac{\rho \left(\frac{kg}{m3}\right)}{2} \cdot \frac{Cx}{3,6}$$

$$F2 = 0,1164 \text{ N/(km/h)}^2$$

– **Potencia y energía de las fuentes de tracción**

Dato	Valor/Descripción
Pila de combustible	
Potencia de la pila	20 kW
Capacidad total	46,592 kWh
Batería de tracción	
Química	LiFePO <sub>4</sub>
Potencia de la batería	76 kW
Capacidad total	46,592 kWh

– **Mapa de eficiencia de la pila** (Ver apartado 4.2.1.2, Mapa de eficiencia de la pila de combustible)

## 5.2. Condiciones iniciales para la simulación

Al comienzo de la simulación el vehículo dispondrá de la batería al 100% del estado de carga (SOC) y su depósito de H<sub>2</sub> completamente cargado.

Asimismo, el peso del vehículo considerado no varía con respecto al vehículo original y responde a la capacidad máxima de peso, 3,5 T (referenciado previamente en este documento).

Referente al tiempo de calentamiento de la pila de combustible o tiempo que le cuesta a la pila alcanzar la temperatura de operación de 75°C, se consideran 2 minutos.

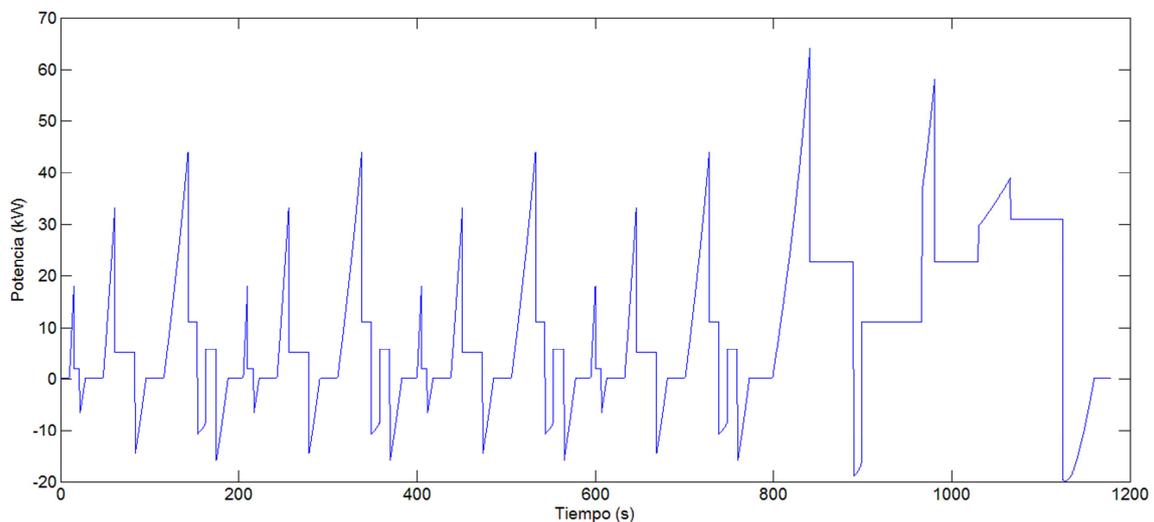
## 5.3. Resultados de la simulación de consumo

El objetivo de la simulación se basa en la validación final del algoritmo, detallando cual es la meta de autonomía conseguida por el vehículo (según ciclo NEDC).

### 5.3.1. NEDC

**Tabla 6** Resultados de la simulación de consumo según ciclo NEDC

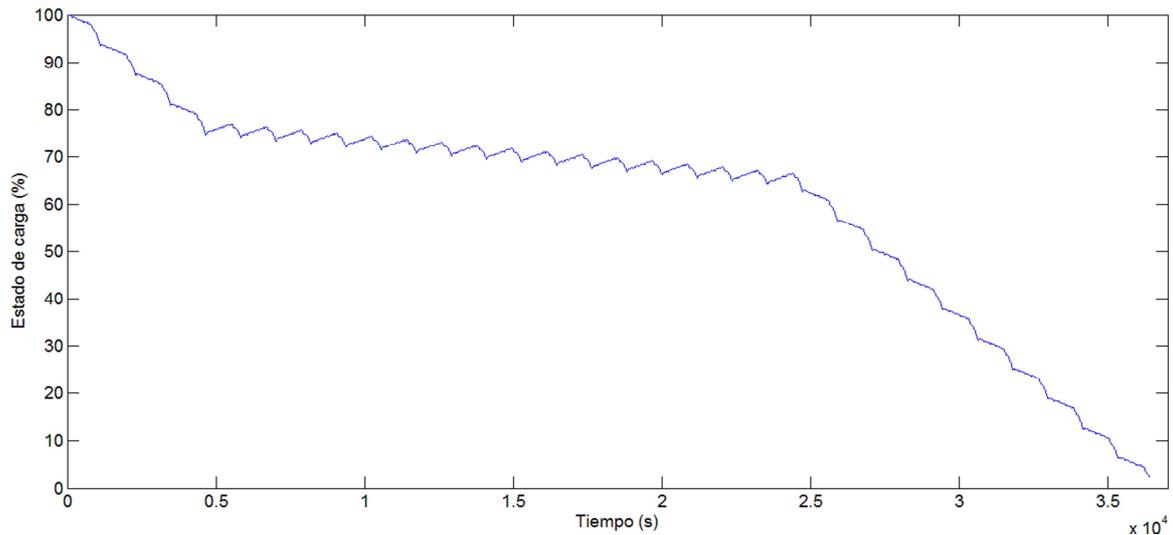
Resultado	NEDC
Autonomía (km)	308,9
Número de ciclos	28,62
Consumo (Wh/km)	150,82



**Figura 43** Perfil de potencia según un ciclo NEDC

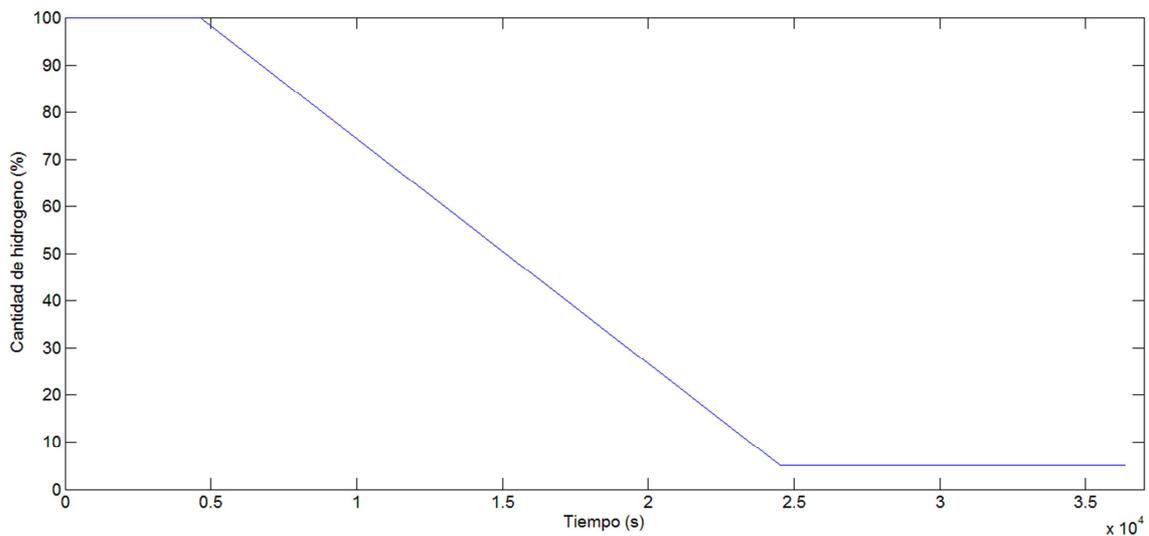
La figura anterior describe el perfil de potencia del vehículo según el recorrido de un solo ciclo NEDC. Este perfil se repite tantos ciclos como la autonomía total del vehículo permite.

Título: **Implementación de un sistema de Pila de Combustible en el sistema de control de un vehículo eléctrico**



**Figura 44** Estado de carga y tiempo según ciclo NEDC

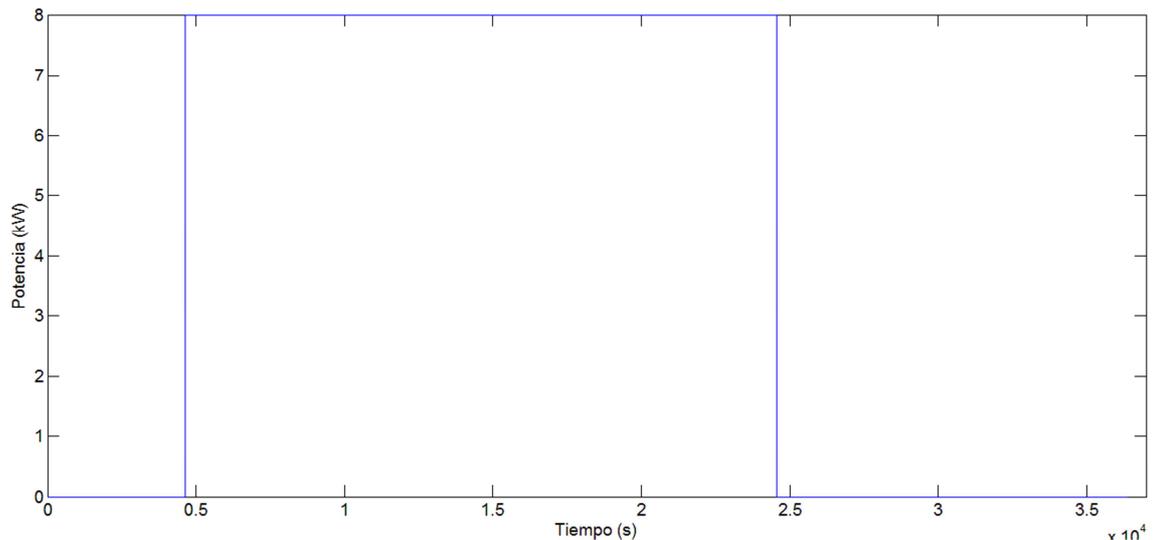
La Figura 44 describe la curva de descarga de la batería de tracción del vehículo. Cuando la batería llega a 1% de capacidad, desconecta y abre relés como medida proteccionista con el fin de evitar sobredescargas y daños permanentes en sí misma.



**Figura 45** Cantidad de H<sub>2</sub> (%) y tiempo según ciclo NEDC

La cantidad de H<sub>2</sub> disminuye hasta su valor límite de 5% con el fin de evitar daños en el sistema de pila de combustible. Tal y como muestra la Figura 45, la cantidad de energía disminuye cuando la pila está en funcionamiento y entregando potencia.

Título: **Implementación de un sistema de Pila de Combustible en el sistema de control de un vehículo eléctrico**



**Figura 46** Distribución de potencia (tiempo) de la pila de combustible según ciclo NEDC

La figura anterior muestra que la pila de combustible sólo trabaja en el punto de máxima eficiencia cuando describe un ciclo NEDC y por tanto, no es necesario usar la pila en su punto de máxima potencia; punto que por otro lado consume más y es más ineficiente.

**5.3.1.1. Otros ciclos: WLTP, US06, Steady 80 and Real cycle**

Además de la verificación de autonomía según ciclo NEDC, se procede a la validación de autonomía según otros ciclos de conducción usados en la industria del automóvil.

La información detallada de los siguientes ciclos de conducción se encuentra adjunta en los anexos, apartado 1.8, Ciclos de conducción.

En las siguientes tablas se muestran los resultados.

**WLTP:**

**Tabla 7** Resultados de la simulación de consumo según ciclo WLTP

Resultado	WLTP
Autonomía (km)	261,4
Número de ciclos	11,4
Consumo (Wh/km)	178,24

**US06:**

**Tabla 8** Resultados de la simulación de consumo según ciclo US06

Resultado	US06
Autonomía (km)	176,1
Número de ciclos	13,7
Consumo (Wh/km)	264,64

Título: **Implementación de un sistema de Pila de Combustible en el sistema de control de un vehículo eléctrico**

**Steady 80:**

**Tabla 9** Resultados de la simulación de consumo según ciclo Steady 80

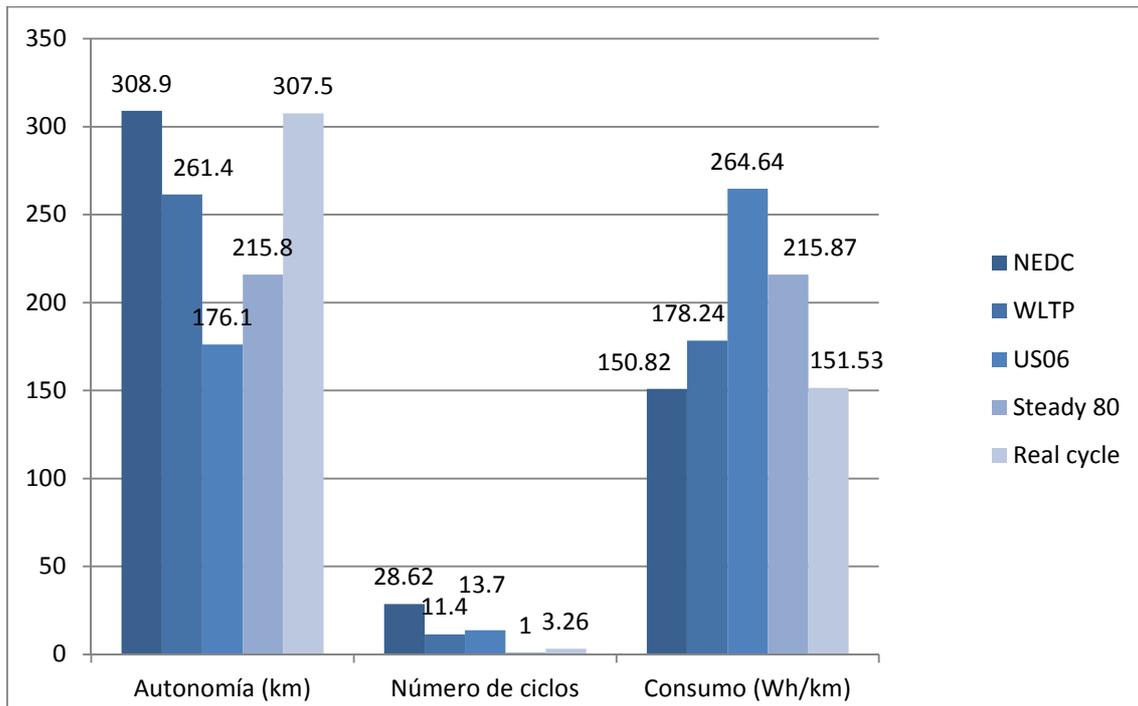
Resultado	Steady 80
Autonomía (km)	215,8
Consumo (Wh/km)	215,87

**Real:**

**Tabla 10** Resultados de la simulación de consumo según ciclo Real

Resultado	Real
Autonomía (km)	307,5
Número de ciclos	3,26
Consumo (Wh/km)	151,53

*5.3.2. Comparación de resultados de la simulación*



**Figura 47** Comparativa de resultados de la simulación según diferentes ciclos de conducción

Como se aprecia en la Figura 47, el ciclo estandarizado NEDC es el que más autonomía consigue alcanzar con un menor consumo de energía proveniente de la batería de tracción.

Por el contrario, el ciclo US06 alcanza un valor de autonomía más bajo debido a ser un ciclo más agresivo y por tanto, requerirá de mayor cantidad de energía.

## 6. Conclusiones

---

### 6.1. Puntos críticos del proyecto

En este apartado se enumera por orden cronológico los puntos críticos que han representado un reto mayor en el diseño y desarrollo de este proyecto.

- **Definición de objetivos de proyecto**
- **Integración de la algoritmia de la pila de combustible**

Debido a la falta de conocimiento sobre el funcionamiento de la pila en sí, se han realizado varias revisiones para incorporar particularidades relacionadas con:

- temperatura de la pila de combustible; consideración del calentamiento de la pila de combustible y tiempo de calentamiento
- puntos de eficiencia máxima; estudio del mapa de eficiencia de una pila de combustible tipo PEM (véase el anexo 1.3.1, Tipos de pilas de combustible).

- **Simulación de consumo**

La simulación de consumo era uno de los retos más importantes del proyecto. Aunque la validación de la integración se llevaba a cabo simulando casos de entrada y comprobando que el funcionamiento de la pila era el esperado de acuerdo a la modelización desarrollada; el estudio y cálculo de los datos de entrada y estudio de los diferentes ciclos normalizados, así como la propia simulación en sí, han supuesto una inversión de recursos mayor.

Otro de los puntos clave para el desarrollo del proyecto fue el **aprendizaje de la plataforma Matlab-Simulink**. Hubo un aprendizaje intensivo durante 3-4 semanas y el resto de conocimientos se adquirieron conforme avanzaba el desarrollo del proyecto, en un total de 20 semanas.

### 6.2. Conclusiones finales del proyecto

De acuerdo a los resultados obtenidos en los apartados de validación y simulación (apartados 4 y 5) podemos concluir que **se ha integrado con éxito el nuevo sistema de extensor de autonomía**:

Título: **Implementación de un sistema de Pila de Combustible en el sistema de control de un vehículo eléctrico**

- La **validación** funcional del vehículo después de la integración de software **ha dado los resultados esperados** en todos los casos. (Varios escenarios diferentes validados).
- Los resultados de la simulación de consumo confirman que el vehículo es capaz de extender su autonomía global hasta los 308,9 km (según NEDC) dato que **no cumple con el objetivo de proyecto de doblar la autonomía** inicial de 157 km.

Igualmente, se considera que la **integración ha sido un éxito** debido a que un vehículo con REX de pila de H<sub>2</sub> tiene unas protecciones de 1% de SOC y 5% de H<sub>2</sub>. Esto significa que cuando la cantidad de energía almacenada en la batería o la cantidad de H<sub>2</sub> que contiene el tanque, sobrepasa estos límites respectivamente, se considera que no hay más energía en ellos como **medio de protección**. Por tanto, realmente el objetivo de autonomía ha sido conseguido al 98,37%.

- Además se ha comprobado cuales son los resultados de autonomía del vehículo según **distintos ciclos de conducción usados para la validación de consumo** en la industria del automóvil.

## 7. Referencias

---

Todos y cada uno de los datos tomados de otras publicaciones o informaciones adicionales ajenas al conocimiento del autor de este documento, han sido referenciadas en el mismo párrafo o misma página que se han citado.

# Anexos

---

## 1. Vocabulario

---

### 1.1. Vehículos eléctricos (VE)<sup>10</sup>

Los vehículos eléctricos obtienen su energía de las baterías, las cuales son recargadas principalmente del sistema “*plugging*” del coche, gracias a una alimentación externa. Así como también pueden recargarse a través de sistemas como el freno regenerativo, como los vehículos híbridos.

Estos vehículos son considerados cero emisiones pero esto solo aplica a emisiones locales. Dependiendo de dónde viene el tipo de energía para ser recargados (generación hidráulica = bajo ratio CO<sub>2</sub>/kWh, central de generación térmica (carbón) = mayor ratio CO<sub>2</sub>/kWh), implica que sus emisiones globales pueden ser más bajas que un vehículo de combustión

Su eficiencia desde el depósito hasta la rueda (“*tank-to-wheel*”) es la mayor de todas las configuraciones de línea motriz, debido principalmente a la alta eficiencia de los motores eléctricos (eficiencia pico >90% Vs 40% de los motores diésel).

Su arquitectura de línea motriz es generalmente más simple por el hecho de que los motores eléctricos pueden suministrar par a velocidades negativas, cero y positivas a diferencia de los motores térmicos y por ello, no necesitan embragues, ni cajas de cambios.

Los principales problemas de los vehículos eléctricos son la autonomía y su precio, ambos debidos a la batería de tracción. Para casos específicos, por ejemplo, ratios de coste-beneficio pueden ser obtenidos comparados con vehículos con motor de combustión interna. Para largas distancias, la autonomía según perfil de velocidad en autopista de vehículos eléctricos es incluso más baja que la mostrada en la certificación de ciclos de conducción que tienen tramo extra urbano.

Otro inconveniente de los vehículos eléctricos es la dependencia a la infraestructura de carga descrita en el apartado 2.2.2 del presente documento.

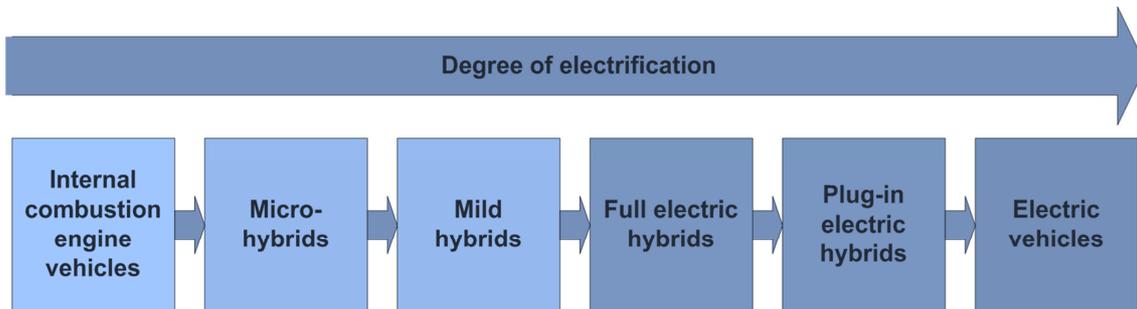
La conducción y manejo de la mayoría de los vehículos eléctricos actuales es muy positiva ya que la batería es montada en el suelo del vehículo, lo cual hace descender el centro de gravedad en comparación con los vehículos con motor de combustión interna. Otros factores como la suavidad de aceleración desde cero hasta altas velocidades con apenas ruido, son un placentero motivo para conducirlos.

---

<sup>10</sup>Fuente: Klaus Kersting y Christophe Moure, IDIADA (Instituto de Investigación Aplicada del Automóvil), Categorización de vehículos eléctricos e híbridos. 2009.

## 1.2. Vehículos híbridos<sup>11</sup>

Un vehículo híbrido puede ser clasificado según su grado de electrificación, comenzando por vehículos convencionales con motor de combustión interna, hasta vehículos puramente eléctricos. (Ver esquema más abajo). Otro criterio de clasificación es según tipo de arquitectura de la línea motriz (serie, paralelo,...).



**Figura 48** Grado de electrificación

### 1.2.1. Tipología de vehículos híbridos

#### 1.2.1.1. Micro hybrid

“**Micro hybrid**” es tan solo el nombre comercial que se le da a un motor de combustión interna con sistema start-stop integrado. Debido a que el sistema start-stop del motor no actúa directamente sobre la propulsión del vehículo, este tipo de vehículo híbrido no es un híbrido en el sentido estricto de su definición. Típicamente, es un alternador modificado o reforzado para el motor de combustión interna durante el ralenti del vehículo y arranca el motor cuando el pedal de embrague es presionado de nuevo. En ciclos de conducción urbanos con elevados tiempos de motor a ralenti, se puede ahorrar hasta el 10% del combustible.

#### 1.2.1.2. Mild hybrid

En la línea motriz de un “**mild hybrid**” el motor eléctrico también es capaz de funcionar no sólo como un generador gracias al sistema de freno regenerativo, sino también suministrando potencia a la tracción, ayudando al motor de combustión (modo “*boost*”). La mejora de consumo comparado con vehículos con motor de combustión interna depende principalmente de la potencia del motor eléctrico y puede llegar hasta 20% en ciclos de conducción urbanos.

#### 1.2.1.3. Full hybrid

Un vehículo “**full hybrid**” o híbrido puro, es solamente propulsado por el modo eléctrico. Durante la frenada, velocidad constante y aceleraciones muy suaves, el motor de combustión interna se apaga y se enciende cuando la demanda de aceleración es demasiada o el estado de carga (SOC, “*state of charge*”) de la batería no permite conducir

<sup>11</sup> Fuente: Klaus Kersting y Christophe Moure, IDIADA (Instituto de Investigación Aplicada del Automóvil), Categorización de vehículos eléctricos e híbridos. 2009.

Título: **Implementación de un sistema de Pila de Combustible en el sistema de control de un vehículo eléctrico**

en modo eléctrico puro. Este tipo de vehículos, son incluso más eficientes que los que poseen arquitectura “*mild hybrid*”.

1.2.1.4. *Plug-in hybrid*

“**Plug-in hybrids**” (PHEV) o vehículos híbridos enchufables, tienen mayor capacidad de almacenamiento de energía en su batería que los vehículos “*full hybrid*” y pueden ser recargados externamente (también mediante freno regenerativo durante su conducción).

Por esta razón tienen limitada la autonomía puramente eléctrica la cual permite conducirlos con cero emisiones locales dentro de zonas urbanas. Sin embargo, en largas distancias esta batería del vehículo PHEV puede ser completamente descargada y es entonces, cuando el vehículo se comporta y consume como un vehículo “*full hybrid*”.

El ratio de combustible y emisiones de un PHEV es una media:

- de emisiones/consumo de autonomía eléctrica
- y emisiones/consumo de 30km de conducción

La consecuencia de esto es que los valores de CO<sub>2</sub> son considerablemente más bajos que en los vehículos full hybrids. Este bajo consumo puede ser conseguido solo para patrones de conducción que permiten recargar la batería de manera habitual, y no así durante la conducción de largas distancias. Es uno de los puntos más importantes cuando se evalúan los costes de un PHEV.

Como se ha mencionado previamente, existe un segundo punto de distinción entre vehículos híbridos y es la configuración de línea motriz:

**Tabla 11** Tipos de vehículos híbridos

Tipo de híbrido	Mild	Full	Plug-in
Capacidades	“Start-stop” “Boost” Freno regenerativo	“Start-stop” “Boost” Freno regenerativo Conducción eléctrica	“Start-stop” “Boost” Freno regenerativo Conducción eléctrica Recarga externa
Configuraciones	Paralelo	Serie Paralelo Powersplit	Serie Paralelo “Powersplit” Combinado

1.2.2. *Arquitectura de vehículos híbridos*

1.2.2.1. *Vehículo híbrido en serie*

## Título: **Implementación de un sistema de Pila de Combustible en el sistema de control de un vehículo eléctrico**

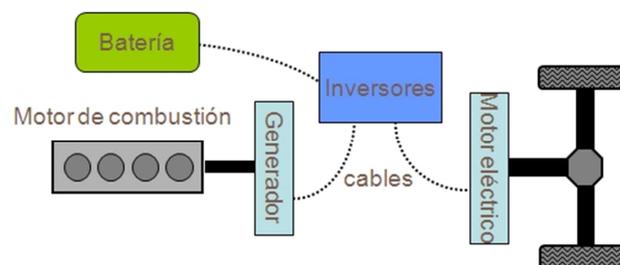
En un **híbrido en serie** no existe conexión mecánica entre el motor de combustión interna y las ruedas. El motor de combustión y un generador actúan juntos como un extensor (o alargador) de la autonomía propia del vehículo. Estos motores de combustión comúnmente trabajan en un rango de operación constante para incrementar la eficiencia del sistema. La potencia de tracción es suministrada por un segundo motor, en este caso eléctrico, alimentado por la batería y por el sistema “range extender”.

Esta arquitectura presenta varias ventajas:

- “Packaging” flexible a nivel de la ubicación del motor de combustión
- Operación estacionaria del motor de combustión => rendimiento optimizado y reducción de emisiones
- Picos de potencia cubiertos por la batería => reducción del tamaño del motor de combustión
- Unidad motor de combustión/generador sustituible por celda de combustible
- Varias posibilidades de arquitectura de la línea motriz: motor en rueda, motor central, etc.

Sin embargo, presenta ciertos inconvenientes:

- Eficiencia baja a velocidad constante
- Costes altos debido a los dos motores eléctricos



**Figura 49** Línea motriz de un híbrido en serie

### 1.2.2.1.1. Range Extender (REX)

“**Range extender**” o prolongador de autonomía, es un sistema que genera energía para recargar en marcha las baterías de un vehículo eléctrico equipado con el dispositivo “range extender”, y de este modo ampliar su autonomía.

“**Range Extender**” es una unidad de potencia auxiliar incorporada exteriormente a un vehículo eléctrico para aumentar su autonomía eléctrica. Los prolongadores de autonomía más comúnmente usados son los motores de combustión interna que impulsan un generador eléctrico que a su vez suministra a la batería y al motor eléctrico con electricidad. El sistema “range extender” también puede ser alimentado por una pila de

## Título: **Implementación de un sistema de Pila de Combustible en el sistema de control de un vehículo eléctrico**

combustible o de otras fuentes de energía. La autonomía es una de las principales barreras para el éxito comercial de los vehículos eléctricos, e incrementar la autonomía del vehículo cuando la batería se agota, ayuda a aliviar las preocupaciones de los conductores frente a este fenómeno.

Como ejemplos de vehículos en el mercado con un sistema incorporado de range extender, son el Chevrolet Volt, o el BMW i3 (con dicho dispositivo), también son conocidos como los vehículos eléctricos REX ("*Range extender*").

### 1.2.2.2. *Vehículo híbrido en paralelo*

En un vehículo **híbrido en paralelo** (parallel hybrid) el motor eléctrico y el de combustión están acoplados mecánicamente a la línea de tracción por medio de una transmisión engranada o una transmisión con variador (CVT, en inglés, "continuously variable transmission").

Un híbrido en serie consiste en combinar las fuerzas del motor eléctrico y del motor de combustión interna de forma mecánica. En este caso, el motor de combustión está conectado a las ruedas mediante una transmisión y un embrague. Por lo tanto, ofrece la posibilidad de quitar el convertidor de par y de elegir entre distintos embragues. Un sistema "Full Hybrid" implica tener una potencia eléctrica en función del peso vehículo: 15-20kW/t. Además, existen varias maneras de integrar el motor eléctrico:

- En salida motor de combustión
- En entrada de la transmisión
- En salida de la transmisión
- En diferencial o rueda

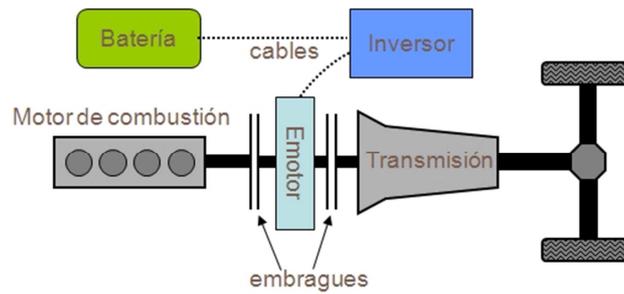
Esta arquitectura presenta varias ventajas:

- Costes: solo un motor eléctrico y puede ser pequeño para los sistemas "mild hybrid"
- Eficiente también en velocidades constantes y altas

Sin embargo, presenta ciertos inconvenientes:

- Conducción eléctrica a través de transmisión convencional
- Estrategias de control del vehículo complejas

Título: **Implementación de un sistema de Pila de Combustible en el sistema de control de un vehículo eléctrico**



**Figura 50** Línea motriz de un híbrido en paralelo

Los vehículos híbridos en paralelo pueden ser vehículos “mild”, “full” o “plug-in hybrids”.

#### 1.2.2.2.1. Through-the-road hybrid

“**Through-the-road hybrids**” son un caso especial de vehículo híbrido en paralelo puesto que su motor de combustión interna y su motor eléctrico no tienen ningún tipo de conexión mecánica dentro del vehículo. Uno de ellos es conectado a uno de los ejes mientras que el otro es conectado al otro eje, considerándose dos líneas motrices completamente independientes. Este tipo de vehículos son considerados como híbridos en paralelo ya que la propia carretera sirve como elemento de unión entre los dos motores. Un ejemplo de este tipo de configuración es Peugeot 3008 Hybrid4.

Características:

- Línea motriz convencional conectada a un eje
- Módulo eléctrico conectado al otro eje

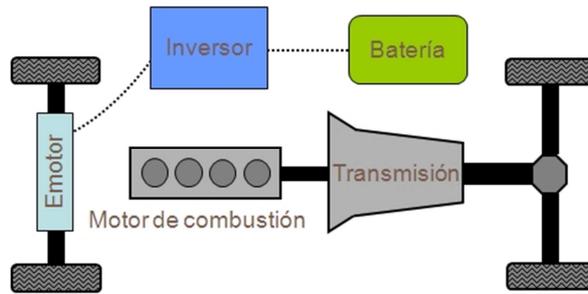
Ventajas:

- Minimiza costes: línea motriz convencional conservada
- 4x4 eléctrico pero no es totalmente comparable con un vehículo 4x4 convencional con bloqueo
- Posible “retrofit”

Desventajas:

- Más peso debido al diferencial y a la reductora adicional
- Baja eficiencia para recargar la batería
- No permite arrancar el motor de combustión con el motor eléctrico

Título: **Implementación de un sistema de Pila de Combustible en el sistema de control de un vehículo eléctrico**



**Figura 51** Línea motriz de una variante del híbrido through-the-road

#### 1.2.2.2.2. Powersplit hybrid

“**Powersplit hybrids**” son vehículos híbridos basados en un motor de combustión interna y dos motores eléctricos con un engranaje planetario como elemento central. El motor de combustión interna es dividido por el engranaje planetario, una parte de la potencia cruza la transmisión mecánicamente mientras la otra parte de la potencia es convertida a potencia eléctrica por uno de los motores eléctricos, transmitida eléctricamente a el segundo motor eléctrico y reconvertida de nuevo en potencia mecánica. Al ajustar velocidades de ambos motores eléctricos, la configuración del sistema “*powersplit*” permite ratios variables de transmisión. Este sistema contempla el nivel de ahorro de combustible más alto comparado con otras tecnologías. El ejemplo más famoso de éste tipo de tecnología es el Toyota Hybrid System (THS).

Características:

- Dos motores eléctricos conectados a la transmisión
- Flujo de potencia eléctrico y flujo de potencia mecánico (=> “*powersplit*”)
- Tres tipos diferentes:
  - “*Input split*” (Toyota Prius)
  - “*Output split*” (Opel Ampera)
  - “*Compound split*”
- Relación de marcha variable mediante la variación de velocidad de los motores

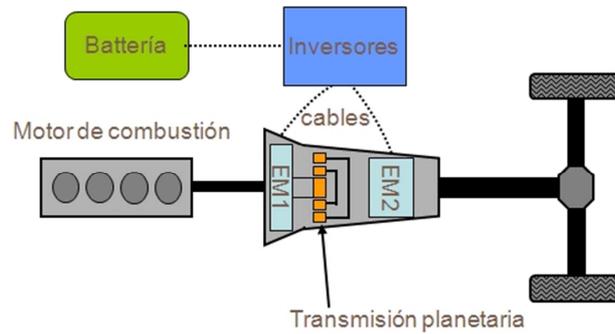
Ventajas:

- Eficiencia máxima debido a la relación de marcha variable en muchos ciclos
- Arranque del motor de combustión sin arrancador convencional

Desventajas:

- Requiere un diseño nuevo de la transmisión
- Estrategias de control del vehículo muy complejas

Título: **Implementación de un sistema de Pila de Combustible en el sistema de control de un vehículo eléctrico**



**Figura 52** Línea motriz de un híbrido tipo power split

### 1.2.2.2.3. Otros

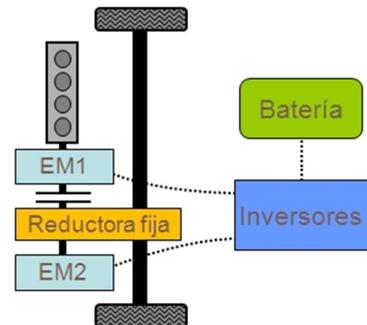
Existen también **combinaciones** de diferentes arquitecturas. El Opel Ampera por ejemplo, puede operar en modo serie y gracias a la tecnología “powersplit”, puede cerrar y abrir automáticamente embragues dentro de la transmisión. La transmisión tipo “twin-drive” de Volkswagen muestra a través de su prototipo Golf la posibilidad de operatividad en modo serie y paralelo. La opción de selección del modo de conducción depende de la velocidad, del estado de carga de la batería y del “input” del conductor. Normalmente, todo ello se intenta optimizar para ahorrar la mayor cantidad de energía posible.

Existen tres principales arquitecturas de híbridos mixtos que se diferencian por su transmisión y sus modos de operación.

#### Sistema 1- “twin drive” (Volkswagen)

Modos de operación:

- Modo eléctrico con el embrague abierto
- Modo híbrido en serie con el embrague abierto y el motor de combustión encendido (uso urbano)
- Modo híbrido en paralelo con el embrague cerrado y el motor de combustión encendido (uso extraurbano)



**Figura 53** Línea motriz de un híbrido con el sistema “Twin drive”

#### Sistema 2-“mode hybrid” (General Motors)

Modos de operación, seleccionados con 4 embragues:

- Cuatro marchas fijas
- Modo 1: “powersplit” tipo “inputs split” para uso urbano y conducción eléctrica
- Modo 2: “powersplit” tipo “compound split” para uso extraurbano

Título: **Implementación de un sistema de Pila de Combustible en el sistema de control de un vehículo eléctrico**

Sistema 3- Voltec (Chevrolet Volt / Opel Ampera)

Modos de operación:

- Modo eléctrico con uno o dos motores
- Modo híbrido en serie y motor de combustión encendido (uso urbano)
- Modo híbrido tipo "powersplit" ("output split") con motor de combustión encendido (uso extraurbano)



**Figura 54** Sistema Voltec

### 1.3. Pila de combustible (Fuel cell, FC)<sup>12</sup>

Una pila de combustible, también llamada célula o celda de combustible es un dispositivo electroquímico que transforma de forma directa la energía química en eléctrica. Es similar a una batería.

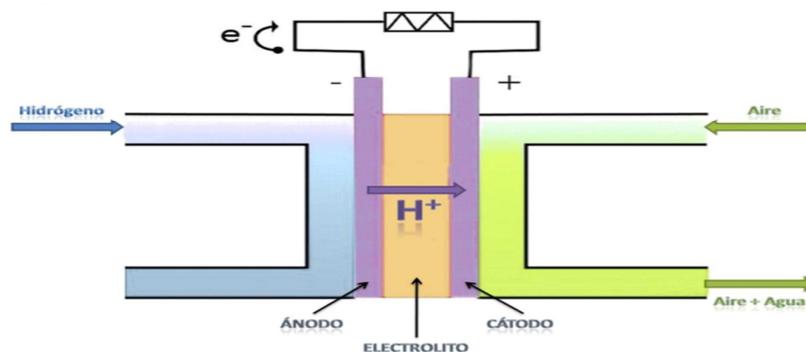
Se diferencia de la batería en que puede tener alimentación continua de los reactivos y en que sus electrodos son catalíticos y relativamente estables.

Parte de unos reactivos, un combustible – generalmente hidrógeno- y de un comburente – en muchos casos oxígeno – para producir agua, electricidad en forma de corriente continua y calor.

Tiene diversas partes:

- Electrodos (ánodo, donde se reduce el  $H_2$  y cátodo, donde reacciona  $H^+$  y  $O_2$ )
- Electrolito (separa los gases, permite el paso de iones  $H^+$  al cátodo y separa los  $e^-$ )
- Placas bipolares (que separan las celdas, "conducen" los gases y evacúan  $H_2O$ )

Una pila de combustible es una asociación de celdas de combustible.



**Figura 55** Esquema de la reacción ánodo- cátodo en una pila de combustible

<sup>12</sup> Fuente: Centro Nacional de H<sub>2</sub>

**Título: *Implementación de un sistema de Pila de Combustible en el sistema de control de un vehículo eléctrico***

Las reacciones que tienen lugar en cada uno de los electrodos son:

- Reacción en el ánodo:  $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$
- Reacción en el cátodo:  $\frac{1}{2} O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$
- Reacción global:  $H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$

En el lado del ánodo, el hidrógeno que llega se disocia en protones y electrones. Los protones son conducidos a través de la membrana al cátodo, pero los electrones están forzados a viajar por un circuito externo (produciendo energía) ya que la membrana está aislada eléctricamente. En el catalizador del cátodo, las moléculas del oxígeno reaccionan con los electrones (conducidos a través del circuito externo) y protones para formar el agua. En este caso, el único residuo es vapor de agua o agua líquida.

*1.3.1. Tipos de pilas de combustible*

Existen una gran variedad de pilas de combustible en función del tipo de electrolito utilizado y de la temperatura aproximada de operación. Según estas características se pueden clasificar en lo detallado en la Tabla 12.

**Tabla 12** Tipologías de membranas en pilas de combustible

	PEMFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC	DMFC
<b>Electrolito</b>	Membrana de Polímero Sólido	Solución Alcalina	Ácido Fosfórico	Carbonatos Fundidos	Óxido Sólido	Membrana de Polímero Sólido
<b>Temperatura Trabajo (°C)</b>	60 – 80	100 – 120	200 – 250	600 – 700	800 – 1000	50 -120
<b>Combustible</b>	Hidrógeno	Hidrógeno	Hidrógeno Gas Natural	Gas Natural	Gas Natural	Metanol
<b>Ventajas</b>	Baja Tª Arranque rápido Baja corrosión y mantenimiento	Mayor eficiencia Reacción catódica más rápida	Acepta H2 con 1% de CO	Reformado interno Cogeneración	Reformado interno Cogeneración	No necesita reformador de combustible
<b>Aplicaciones</b>	Transporte Portátiles Residencial	Espaciales	Generación eléctrica distribuida Automoción	Generación eléctrica	Generación eléctrica	Portátiles

*1.3.2. Aplicaciones*

Las pilas de combustible comprenden una amplia variedad de aplicaciones: desde dispositivos portátiles (ordenadores, teléfonos móviles, pequeños electrodomésticos), vehículos de todo tipo (coches, autobuses, barcos), hasta sistemas estacionarios de generación de calor y energía para empresas, hospitales, zonas residenciales, etc.

Las celdas de combustible son muy útiles como fuentes de energía en lugares remotos, como por ejemplo naves espaciales, estaciones meteorológicas alejadas, parques grandes,

## Título: ***Implementación de un sistema de Pila de Combustible en el sistema de control de un vehículo eléctrico***

localizaciones rurales, y en ciertos usos militares. Un sistema con celda de combustible que funciona con hidrógeno puede ser compacto, ligero y no tiene piezas móviles importantes.

### *1.3.3. Hidrógeno*

El hidrógeno es el primer elemento de la tabla periódica. Es el elemento químico más ligero que existe, su átomo está formado por un protón y un electrón y es estable en forma de molécula diatómica (H<sub>2</sub>).

En condiciones normales se encuentra en estado gaseoso, y es insípido, incoloro e inodoro.

En la Tierra es muy abundante, constituye aproximadamente el 75 % de la materia del Universo, pero se encuentra combinado con otros elementos como el oxígeno formando moléculas de agua, o al carbono, formando compuestos orgánicos. Por tanto, no es un combustible que pueda tomarse directamente de la naturaleza, sino que es un vector energético (como la electricidad) y por ello se tiene que “fabricar.”

Un kilogramo de hidrógeno puede liberar más energía que un kilogramo de cualquier otro combustible (casi el triple que la gasolina o el gas natural), y para liberar esa energía no emite nada de dióxido de carbono, tan sólo vapor de agua, por lo que el impacto ambiental es nulo.

#### *1.3.3.1. El sistema energético del hidrógeno*

Existen distintos métodos de producción de hidrógeno. Se puede producir a partir de distintas materias primas, distintas fuentes de energía y por distintos procedimientos.

Según sean la materia prima y la fuente energética utilizada para producirlo se podrá hablar de procesos 100% renovables, 100% fósiles o híbridos en un determinado porcentaje.

#### *1.3.4. El vehículo de hidrógeno. Su funcionamiento*

Para el funcionamiento de un vehículo de hidrógeno, en primer lugar es necesario obtener el hidrógeno que se va a utilizar como combustible. Para ello se parte de agua destilada que haciéndola pasar a través de los electrolizadores y mediante aplicación de una fuente de energía eléctrica o placas solares, se descompone en hidrógeno y oxígeno.

El hidrógeno y oxígeno pasan a través de conductos a los electrodos de la pila de combustible, en este caso de tipo PEM (pila de combustible de membrana polimérica). En los electrodos se producirán las reacciones químicas explicadas anteriormente, de manera que los protones H<sup>+</sup> pasan a través del electrolito, y se combinan con el oxígeno generando la energía suficiente para que el coche se ponga en funcionamiento.

Como elemento residual se obtiene vapor de agua, único producto que saldría por el tubo de escape si se tratase de un vehículo a escala real.

Con la tecnología del coche a hidrógeno en plena eclosión en Japón, y pendiente de arrancar de forma efectiva en Estados Unidos y Europa, los fabricantes más interesados

## Título: **Implementación de un sistema de Pila de Combustible en el sistema de control de un vehículo eléctrico**

(Toyota, Honda y Hyundai especialmente) se han lanzado a una carrera por ofrecer un modelo digno y asequible. En ese sentido, las unidades del Toyota Mirai (Figura 56) ya ruedan por Japón con una proyección optimista.



**Figura 56** Toyota Mirai

### 1.4. Range anxiety

La ansiedad por la autonomía o “*range anxiety*” es el temor de que un vehículo tenga autonomía suficiente para llegar a su destino y que por lo tanto, que sus ocupantes no se queden varados en el camino.

El término, que se utiliza sobre todo en referencia a los vehículos eléctricos (VE) es considerado como uno de los principales obstáculos para la adopción a gran escala de los vehículos eléctricos por el parque automovilístico global.

El término “*range anxiety*” se declaró por primera vez en la prensa el 1 de septiembre de 1997 en el negocio de San Diego Diario de Richard Acello refiriéndose a las preocupaciones de los conductores de coches eléctricos. El 6 de julio de 2010, General Motors presentó a la marca registrada el término.

Las principales estrategias para aliviar la ansiedad de autonomía entre los conductores de coches eléctricos son:

- despliegue de una amplia infraestructura de recarga
- desarrollo de una mayor capacidad de la batería a un precio aceptable
- mejora de la tecnología de baterías
- uso de range extenders, una sistema de navegación y predicción de autonomía preciso
- disponibilidad libre de prestamistas para viajes largos



**Figura 57** Cuadro de instrumentos de un vehículo eléctrico

### 1.5. Estado de carga

El estado de carga o SOC (*State of Charge*) es el equivalente al medidor de combustible en un depósito de un vehículo convencional pero en este caso para la batería de tracción en un vehículo eléctrico o híbrido. La unidad de medida son puntos de porcentaje (0% = vacío; 100% = completamente cargado).

Una forma alternativa el medir la profundidad de descarga o DoD (*Depth of Discharge*), que es la inversa del SOC ((100% = vacío; 0% = completamente cargado).

El SOC es comúnmente usado cuando se trata del estado de la corriente de la batería en uso.

Este valor no puede ser determinado directamente. Hay varios métodos para determinarlo: químicamente, a través del voltaje, integración de corriente o presión.

### 1.6. Alto voltaje

Según el reglamento ECE R100-02 por el que se regula la funcionalidad de los vehículos eléctricos, se considera alto voltaje de un componente o circuito, si el voltaje de operación es  $> 60V$  y  $\leq 1500V$  DC o  $> 30$  y  $\leq 1000V$  AC.

### 1.7. Potencia y par motor<sup>13</sup>

La potencia (P) desarrollada por el par motor (T) viene dada por la siguiente expresión:

**Ecuación 7** Potencia del motor

$$P = T \cdot \omega$$

Siendo ( $\omega$ ) la velocidad angular de giro (rad/s) del eje de transmisión o eje del cigüeñal.

La potencia del motor se mide, según el Sistema Internacional de Unidades, en Watios (W).

En ocasiones es interesante conocer la potencia en función de las revoluciones por minutos (rpm) a la que gira el motor en vez de la velocidad angular. En efecto, si (n) son las revoluciones por minuto a la que gira el motor, entonces la potencia (P) se expresa como sigue, que aproximadamente resulta:

**Ecuación 8** Potencia (cambio de unidades a rpm)

$$P = T \cdot \omega = \frac{T \cdot n}{60 / 2\pi} = \frac{T \cdot n}{9.55}$$

P = es la potencia motor, en W;

T = es el par motor, en Nm;

---

<sup>13</sup> Fuente: La Potencia y el Par Motor, Estudio de la Cadena Cinemática, Estabilidad en los Vehículos. Tutorial 63.

## Título: **Implementación de un sistema de Pila de Combustible en el sistema de control de un vehículo eléctrico**

$n$  = son las revoluciones por minuto de giro del motor (rpm)

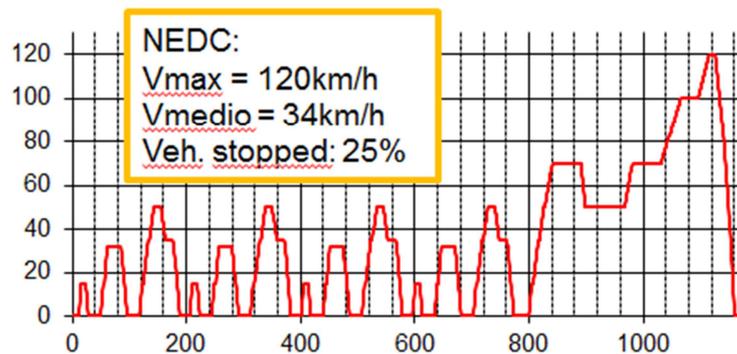
### 1.8. Ciclos de conducción

#### 1.8.1. NEDC

El NEDC (*New European Driving Cycle*) es un ciclo de conducción diseñado para evaluar los niveles de emisión de motores de automóviles y el ahorro de combustible en los vehículos de pasajeros (excluidos los camiones ligeros y vehículos comerciales). También se conoce como ciclo MVEG (Vehículo de Emisiones Motor Group).

El NEDC se supone que representa el uso típico de un automóvil en Europa. Se compone de cuatro ECE-15 ciclos urbanos repetidos, "Urban Driving" (CDU) y un ciclo extraurbano (EUDC).

El procedimiento de prueba es mantenido por la CEPE Foro Mundial para la Armonización de los Reglamentos sobre Vehículos.

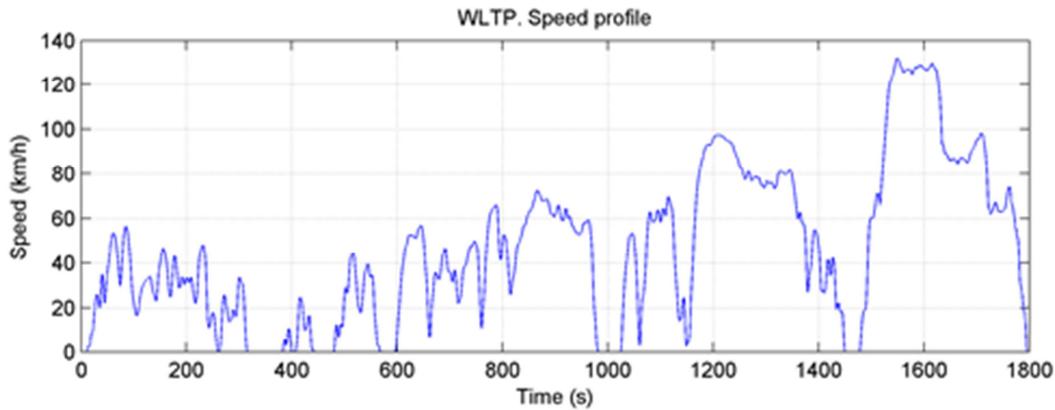


**Figura 58** New European Driving Cycle, NEDC

#### 1.8.2. WLTP

El *Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedures* (WLTP) define una norma global armonizada para determinar los niveles de los contaminantes y las emisiones de CO<sub>2</sub>, el consumo de combustible o energía y la autonomía eléctrica de vehículos ligeros (turismos y furgonetas comerciales ligeros).

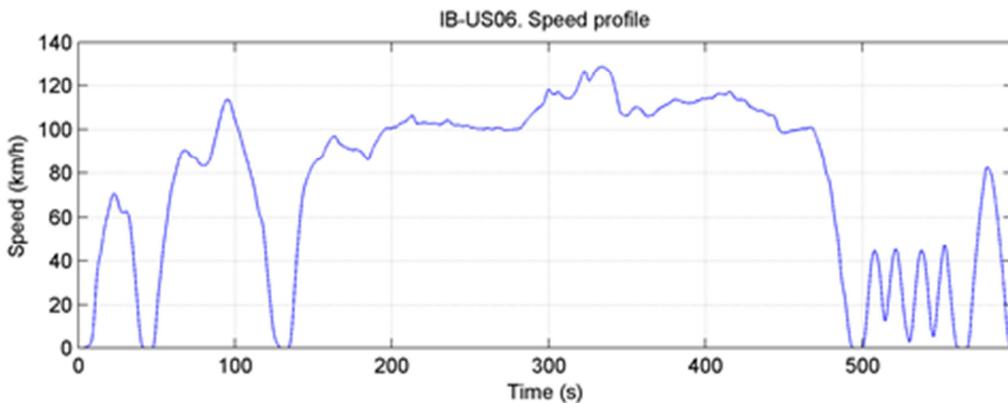
El ciclo consta de 1.800 segundos, 23.626 metros con una velocidad media de 46,6 km/h. La velocidad máxima es 131,3 km/h y una aceleración máxima es de 1,6 m/s<sup>2</sup>.



**Figura 59** Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedures, WLTP

### 1.8.3. US06

US06 es un ciclo de aceleración rápida y alta velocidad que tiene una duración de 10 minutos (596 segundos), cubre 8,01 millas (12,8 km), con un promedio de 48 mph (77 km/h) y alcanza una velocidad máxima de 80 mph (130 km/h). Incluye cuatro paradas, y la aceleración enérgica maximiza a un ritmo de 8,46 millas (13,62 km/h) por segundo.



**Figura 60** US06

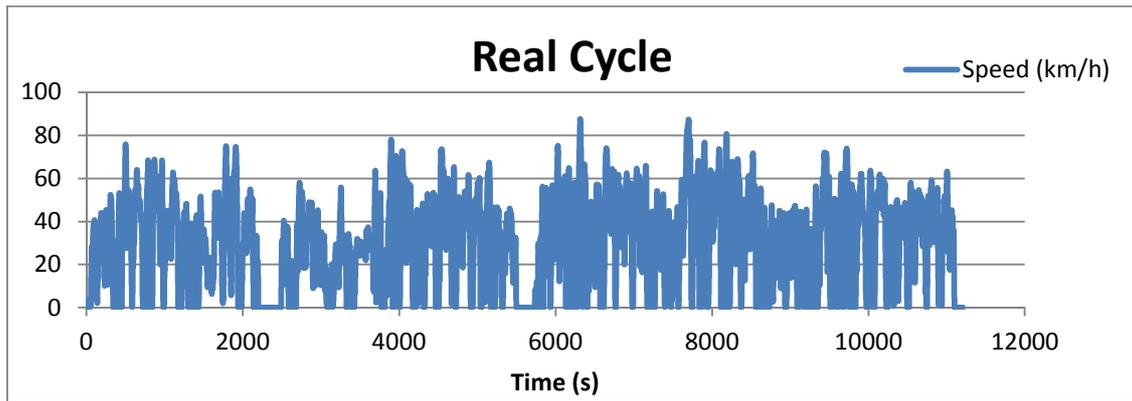
### 1.8.4. Steady 80

Ciclo extra-urbano estabilizado a alta velocidad (80 km/h) durante todo el test. Este ciclo simula el funcionamiento vehicular durante una ruta por autopista.

### 1.8.5. Real<sup>14</sup>

Ciclo urbano real grabado en la ciudad asiática de Shanghai. El ciclo tiene una velocidad máxima de 87,6 km/h y una duración de 11208 segundos (más de 3 horas).

<sup>14</sup> Fuente: IDIADA (Instituto de Investigación Aplicada del Automóvil), Ciclos de conducción no estandarizados. 2015.



*Figura 61* Ciclo real urbano

## 2. Descripción de la plataforma hardware y modelización

### 2.1. Justificación de la elección de la plataforma

#### 2.1.1. Estado del arte

Los sistemas de automoción son cada vez más difíciles y caros de diseñar con igual éxito que crece la demanda del mercado y su creciente complejidad. Esto significa la creación de sistemas de control que combinan la entrada de varios sensores y siguen reglas de comportamiento complejos. Metodologías de diseño tradicionales que implican escribir una especificación de texto e implementación de algoritmos en C. Sin embargo, los algoritmos no se pueden verificar sin hardware.

Este enfoque deja al ingeniero en la difícil posición de esperar a que llegue la última pieza de hardware para poder probar su sistema. Con el fin de evitar estos problemas, los ingenieros necesitan desacoplar el desarrollo de algoritmos y la verificación de la disponibilidad de hardware. Para hacer frente a esta necesidad, los fabricantes de equipos y proveedores de todo el mundo están cambiando al **diseño basado en modelos**.

El diseño basado en modelos es un proceso de diseño basado en un modelo de sistema a sistema. A partir de esta base, el proceso de desarrollo se divide en varios pasos:

- Definición de los objetivos y requisitos
- Diseño con la simulación
- Ejecución con generación de código
- Prueba continua y verificación.

Inicialmente, el requisito y objetivos se definen antes de cualquier acción relacionada con el diseño.

## Título: **Implementación de un sistema de Pila de Combustible en el sistema de control de un vehículo eléctrico**

En base a este catálogo de especificaciones, los ingenieros de desarrollo de diseño a través de la simulación elaboran el modelo hasta que el algoritmo y el sistema están listos para su implementación. Durante la fase de diseño, los ingenieros pueden utilizar el modelo de simulación para diferentes alternativas, en busca de un diseño que cumple con los requisitos de desempeño, costes y calidad. Los ingenieros pueden comprobar que el diseño cumple con los requisitos, ya que el entorno de modelado se puede utilizar para captar tanto el algoritmo, así como el comportamiento de la planta - este proceso se refiere a menudo como "prueba real". Esta verificación se puede aplicar a cientos de combinaciones de vehículos, sin la ayuda de ningún prototipo, algo que es imposible en un entorno de diseño no ejecutable. La etapa de implementación utiliza el modelo de diseño para generar código.

A continuación, el código se dirige al procesador final para verificar la implementación de hardware del diseño - esto se conoce como "*Rapid Prototyping*" (o prototipaje rápido).

El valor del nuevo proceso industrial del automóvil es significativo: una vez que el diseño es verificado, el código puede ser rápida y eficientemente generado a través de la generación automática de código. Es importante notar la facilidad de generación de código da más oportunidades y conduce a pruebas más adelantadas, que a su vez conduce a una mejor calidad inicial y menores costos, ya que se evitan cambios de última hora.

En resumen, los beneficios del diseño basado en modelos son:

- Habilitación de una aplicación más rápida y "*rapid prototyping*" de componentes de software mediante el uso de modelado basado en modelos de simulación.
- Habilitación de una mejor y más clara visualización de las implementaciones de software en la placa de hardware a través de modelos.
- Mejorar la capacidad de auditoría del sistema de control en aplicaciones de automoción.

### 2.1.2. Plataforma de desarrollo "*Software*"

Una de las principales desventajas de las viejas plataformas de hardware era que sólo era posible programar en lenguaje C de programación. Esta solución no es flexible e implica tener siempre a la persona adecuada para llevar a cabo cualquier cambio en un algoritmo determinado y probarlo en vehículo.

Como consecuencia, se decidió cambiar dicha metodología. En el pasado varios proyectos de desarrollo de vehículos se llevaron a cabo utilizando el "*rapid prototyping*" basado en Matlab y Simulink. Hoy en día esta herramienta es la referencia y el estándar en la industria automotriz para diseñar, modelar, simular e implementar algoritmos relacionados con las funciones.

A partir de estas experiencias anteriores, se ha observado que **la mayoría de los usuarios de Simulink pueden llegar a un nivel avanzado después de usarlo durante dos años.**

## Título: **Implementación de un sistema de Pila de Combustible en el sistema de control de un vehículo eléctrico**

Para concluir, se decidió utilizar Matlab y Simulink para desarrollar todas las funciones incluidas en el vehículo ECU: gestión de la comunicación, el control de entradas / salidas, la tracción, la carga, etc.

### 2.1.3. Plataforma de desarrollo "Hardware"

Como se mencionó anteriormente, la elección de la plataforma hardware se determinó por el cumplimiento de "*rapid prototyping*", requisito de implementación de software. IDIADA había utilizado en varios proyectos anteriores de la plataforma "DSpace, MicroAuto box " *rapid prototyping* ". Sin embargo, esta plataforma se descartó al inicio de este proyecto en beneficio de otra: PI Innovo M220 mostrada en la Figura 62. Incluso si este cambio implicase un tiempo significativo en el proceso de aprendizaje, el beneficio observado cubrió los esfuerzos realizados.

Se exploraron varios aspectos para justificar esta elección:

- Coste
- Representatividad ECU Producción
- Proveedor sólida colaboración

Para la implementación del sistema de control, la plataforma hardware usada es una unidad electrónica de control (ECU, electronic control unit) de las siguientes características.



**Figura 62** Dispositivo hardware instalado en el vehículo

La completa MicroAuto box de DSpace cuesta más o menos 12.000€, frente a los 1.300€ que cuesta la ECU de Pi Innovo M220.

El PI Innovo M220 presenta también la ventaja de ser similar a una ECU automotriz en el aspecto hardware electrónico. Permite realizar la suposición de que si el software implementado en el M220 funciona correctamente, puede ser implementado en cualquier ECU en modo "producción" sin implicar demasiadas modificaciones para cumplir con las limitaciones inherentes. La distancia entre el concepto y el producto final se reduce significativamente.

## **2.2. Descripción de la herramienta de modelización**

Para la implementación del sistema de control en la algoritmia del vehículo base la herramienta de modelización usada es Matlab-Simulink.

### *2.2.1. Introducción al entorno Matlab*

Matlab (Matrix Laboratory, "laboratorio de matrices").

Como información general podemos mencionar que Matlab tiene un modelo de desarrollo de Software propietario, de genero Software matemático lazado en 1984. Este software de ayuda al cálculo está formado por un lenguaje de programación propio (lenguaje M). Entre sus aplicaciones se hallan: el cálculo matemático de matrices, manipulación y figuración de datos y funciones, el desarrollo de algoritmos, la realización de interfaces de usuario (GUI's), un entorno de programación visual (Simulink) y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware. Está disponible para los sistemas operativos Windows, Unix y Apple Mac.

Matlab dispone de dos aplicaciones adicionales que amplían sus propiedades, que son: Simulink (plataforma de simulación) y GUIDE (editor de interfaces de usuario - GUI). Además, se pueden aumentar las características de Matlab con las herramientas (toolboxes), y las de Simulink con las aplicaciones de bloques (blocksets).

Este software es utilizado en centros de desarrollo, centros de investigación, universidades y en empresas de i+d. En estos años se ha ampliado el número de prestaciones, como la de programar directamente procesadores digitales de señal o crear código VHDL.

#### *2.2.1.1. Acotaciones*

Al ser Matlab un software bajo patente de The Mathworks, hubo muchas críticas desde los usuarios, ya que estos estaban sujetos a éste. Actualmente se ha elaborado una aplicación "Application Deployment" para utilizar funciones Matlab como archivos de biblioteca que pueden ser usados de aplicación .net o Java.

### *2.2.2. Introducción al entorno Simulink*

Simulink es un entorno de diagramas de bloque para la simulación multidominio y el diseño basado en modelos. Admite el diseño y la simulación a nivel de sistema, la generación automática de código y la prueba y verificación continuas de los sistemas embebidos.

Simulink ofrece un editor gráfico, bibliotecas de bloques personalizables y solvers para modelar y simular sistemas dinámicos. Se integra con MATLAB®, lo que permite incorporar algoritmos de MATLAB en los modelos y exportar los resultados de la simulación a MATLAB para llevar a cabo más análisis.

Simulink es un entorno de programación visual, que funciona sobre el entorno de programación Matlab. De un alto nivel de programación con lenguaje interpretado por

## **Título: *Implementación de un sistema de Pila de Combustible en el sistema de control de un vehículo eléctrico***

Matlab (archivos con extensión .m). Simulink genera archivos con extensión .mdl (de "model"). Simulink viene a ser una herramienta de simulación de modelos o sistemas, con cierto grado de abstracción de los fenómenos físicos involucrados en los mismos. Se hace hincapié en el análisis de sucesos, a través de la realización de sistemas (cajas negras que realizan alguna operación).

Se emplea en ingeniería electrónica en temas relacionados con el procesamiento digital de señales (DSP), involucrando temas específicos de ingeniería biomédica, telecomunicaciones, entre otros. También es muy utilizado en ingeniería de control y robótica.

Simulink es una plataforma para simulación multidominio y diseño basado en modelos de sistemas dinámicos. Proporciona un entorno gráfico interactivo y un conjunto de librerías de bloques personalizables que permiten diseñar, simular, implementar y probar una gran variedad de sistemas con variación temporal, entre los que se incluyen sistemas de comunicaciones, control, procesado de señales, vídeo e imagen.

### *2.2.2.1. Funciones principales*

- Bibliotecas extensas y ampliables de bloques predefinidos
- Editor de gráficos interactivos para ensamblar y administrar diagramas de bloque intuitivos
- Capacidad de gestionar diseños completos segmentando los modelos en jerarquías de componentes de diseño
- Explorer, para navegar, crear, configurar y buscar todas las señales, parámetros, propiedades y código generado asociados con el modelo
- Interfaces de programación de aplicaciones (API) que permiten conectar con otros programas de simulación e incorporar código escrito manualmente
- Embedded Matlab, Bloques de funciones para implementar los algoritmos de Matlab en Simulink e implementaciones de sistemas empotrados
- Modos de simulación (normal, acelerador y acelerador rápido) para ejecutar simulaciones de forma interpretativa o a velocidades de código C compilado
- Depurador y perfilador gráfico para examinar los resultados de simulación y diagnosticar el rendimiento y el comportamiento inesperado del diseño
- Acceso completo a Matlab para analizar y visualizar resultados, personalizar el entorno de modelaje y definir señales, parámetros y datos de prueba
- Herramientas de análisis de modelos y diagnosis para garantizar la coherencia de los modelos e identificar errores de modelaje

### *2.2.2.2. Funciones principales*

Con Simulink se puede crear, modelar y hacer el mantenimiento de un diagrama de bloques del sistema detallado utilizando un amplio conjunto de bloques predefinidos. Simulink cuenta con herramientas para el modelaje jerárquico, la gestión de datos y la personalización de subsistemas, por lo que resulta fácil crear representaciones concisas y precisas independientemente de la complejidad del sistema con el que se trabaja.

### 2.2.2.3. Selección y personalización de bloques

El software de Simulink incluye una amplia biblioteca de funciones que se usan habitualmente en el modelaje de un sistema. Estas incluyen:

- Bloques dinámicos continuos y discretos, como el de integración y el de retardo de la unidad
- Bloques de algoritmos, como el de suma, el de producto y el de tabla de búsqueda
- Bloques estructurales, como MUX, interruptor y selector de bus
- Pueden personalizarse los bloques integrados o crear nuevos bloques directamente en Simulink e introducirlos en las bibliotecas propias
- Definición y control de señales y parámetros Simulink permite definir y controlar los atributos de las señales y parámetros asociados con el modelo. Las señales son cantidades que varían según el tiempo representadas por los bloques de conexión de líneas. Los parámetros son coeficientes que ayudan a definir la dinámica y el comportamiento del sistema. Los atributos de las señales y parámetros pueden especificarse directamente en el diagrama o en un diccionario de datos independiente. Con el Model Explorer se puede gestionar el diccionario de datos y reorientar un modelo de forma rápida incorporando distintos conjuntos de datos.

### 2.2.2.4. Ejecución de una simulación

Después de crear el modelo con Simulink, puede simularse su comportamiento dinámico y comprobar los resultados en tiempo real. El software de Simulink ofrece varias funciones y herramientas para garantizar la velocidad y la precisión de la simulación, como solucionadores de paso fijo y de paso variable, un depurador gráfico.

### 2.2.2.5. Análisis de resultados

Simulink incluye varias herramientas para analizar el sistema, visualizando los resultados y probando, validando y documentando los modelos.

### 2.2.2.6. Visualización de resultados

Puede visualizarse el sistema observando las señales con las pantallas y vistas que ofrece el software de Simulink. Si no, también pueden diseñarse pantallas personalizadas con las herramientas de visualización y desarrollo de guía de Matlab.

También pueden registrarse las señales para el postprocesado.