



UNIVERSIDAD  
NEBRIJA

**EVALUACIÓN DE DIFERENTES FUENTES DE ENERGÍA  
PARA VEHÍCULOS ELÉCTRICOS DE 0 EMISIONES**

Daniel García Sánchez

Departamento de Ingeniería en Tecnologías Industriales

**TRABAJO FIN DE GRADO**

Director de proyecto:  
Dr. Roberto Álvarez Fernández

Madrid  
Junio de 2018



## RESUMEN

Este trabajo de fin de grado se centra en desarrollar un modelo para un sistema de distribución de energía basado en varias fuentes de energía, una siendo batería de litio, comúnmente usada en los vehículos eléctricos actuales, otra una pila de combustible y la tercera consistiendo de una batería de supercondensadores. Dicho sistema irá orientado a la optimización de las distintas fuentes de energía con el fin de introducir nuevas tecnologías, como puede ser la pila de combustible, que son más beneficiosas para el medio ambiente y tienen mejores características, de forma poco disruptiva y sin necesidad de una infraestructura propia. Para dichos fines se utilizará un software de simulación, en este caso la herramienta Simulink de MATLAB y su entorno Simscape.

**Palabras clave:**

Baterías, supercondensadores, pila de combustible, distribución de energía, vehículos eléctricos.



## Contenido

1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Objetivos.....	1
2 VEHÍCULOS ELÉCTRICOS .....	3
2.1 “Full electric” .....	3
2.2 Híbridos .....	4
2.3 Fuel cell .....	7
3 FUENTES DE ENERGÍA.....	9
3.1 Fundamentos.....	9
3.1.1 Voltaje nominal .....	9
3.1.2 Capacidad .....	9
3.1.3 SOC .....	10
3.1.4 SOH.....	10
3.1.5 Energía específica.....	11
3.2 Dimensionamiento.....	11
3.3 Fuentes electroquímicas .....	12
3.3.1 Baterías de ion de litio .....	13
3.3.2 Pilas de combustible .....	17
3.4 Supercondensadores .....	22
4 MOTIVACIÓN .....	25
4.1 Litio .....	25
4.2 Pila de combustible.....	26
4.3 Supercondensadores .....	28
4.4 Impacto medioambiental .....	29
5 MODELIZACIÓN .....	31
5.1 Perspectiva general .....	31
5.2 Cálculo de potencia .....	33
5.2.1 Energía requerida para la propulsión del vehículo .....	35
5.2.2 Energía consumida por la fuerza aerodinámica.....	35
5.2.3 Energía consumida por la gravedad en pendiente .....	36
5.2.4 Energía consumida por la resistencia a la rodadura .....	37
5.2.5 Visión general del modelo de cálculo de potencia .....	37
5.3 Rendimientos.....	40
5.3.1 Rendimiento de la máquina .....	40
5.3.2 Rendimiento del inversor .....	41
5.3.3 Rendimiento del convertidor.....	42

5.4 Fuentes de energía .....	44
5.4.1 Análisis de la máscara del bloque.....	44
5.4.2 Esquema del bloque.....	47
5.4.3 Litio .....	47
5.4.4 Supercondensadores .....	49
5.4.5 Pila de combustible.....	51
5.4.6 Tanque de hidrógeno .....	52
5.4.7 Sistema de distribución de potencia .....	52
5.4.8 Distribución de la potencia de la pila de combustible .....	55
5.4.9 Bloque de activación de la pila de combustible según el SOC del litio .....	56
5.4.10 Parada de la simulación .....	57
6 RESULTADOS .....	58
6.1 Consideraciones para la simulación .....	58
6.1.1 Velocidad.....	58
6.1.2 Batería de litio .....	58
6.1.3 Pila de combustible.....	59
6.1.4 Supercondensadores .....	59
6.1.5 Vehículo .....	60
6.2 Resumen de las simulaciones realizadas .....	61
6.3 Batería de ion litio .....	62
6.3.1 Simulaciones con ciclo NEDC .....	62
6.3.2 Simulaciones a velocidad constante .....	65
6.4 Batería de ion litio y pila de combustible .....	67
6.4.1 Funcionamiento constante (NEDC).....	67
6.4.2 Funcionamiento constante (velocidad cte.) .....	77
6.4.3 Funcionamiento entre dos valores de SOC de la batería de litio (NEDC) ....	85
6.3 Supercondensadores .....	92
6.4 Combinación de las tres fuentes de energía.....	101
7. CONCLUSIONES.....	104
7.1 Fuentes de energía de apoyo.....	104
7.1.1 Pila de combustible.....	104
7.1.2 Supercondensadores .....	105
7.2 Combinación de las tres fuentes de energía.....	106
Bibliografía.....	108

## Lista de tablas:

Tabla 1. Características de los diferentes tipos de baterías de ion de litio [21].....	16
Tabla 2: Comparación de los distintos tipos de “Fuel cell” con respecto a su química [22] .....	20
Tabla 3: Comparación de características de un supercondensador y una celda de litio [24] .....	23

## Lista de figuras:

Figura 1: Diferencia de emisión de CO <sub>2</sub> entre un coche de gasolina y uno híbrido [8] ..	5
Figura 2: Batería de la segunda generación del Toyota Prius[37].....	6
Figura 3: Ejemplo de una celda electrolítica (en carga) [38] .....	13
Figura 4. Debilidades y fortalezas de los diferentes tipos de baterías de ion-litio [21]..	16
Figura 5. Esquema de una celda de una pila de combustible con electrolito ácido [22]	18
Figura 6. Esquema de una celda de una pila de combustible con electrolito alcalino [22] .....	19
Figura 7. Gráfico de la energía según el estado de la reacción de una pila de combustible [22] .....	20
Figura 8: Perfil de carga de un supercondensador [23].....	23
Figura 9: Perfil de descarga de un supercondensador [23].....	23
Figura 10: Energía específica de la pila de combustible y otras fuentes electroquímicas [25] .....	26
Figura 11: Autonomía de vehículos de “fuel cell” comparado con otras fuentes electroquímicas [25] .....	27
Figura 12: Primera parte del nivel superior modelo.....	32
Figura 13: Segunda parte del nivel superior del modelo. ....	33
Figura 14: Constantes paramétricas del vehículo a estudiar (inspiradas en el Nissan Leaf). .....	33
Figura 15: Parámetros del ambiente que afectan a la dinámica del vehículo.....	34
Figura 16: Valores empíricos del vehículo a estudiar. ....	34
Figura 17: Modelo para el cálculo de la potencia y energía.....	35
Figura 18: Modelo para el cálculo de la potencia y energía consumida por la fuerza aerodinámica.....	36

Figura 19: modelo para el cálculo de la potencia y energía debidas a la fuerza de la gravedad.....	37
Figura 20: modelo para el cálculo de la potencia y energía debido a la resistencia por rodadura.....	37
Figura 21: Cálculo de potencia y de valores relativos del motor .....	39
Figura 22: Máscara del bloque de rendimiento de la máquina con los valores empíricos. ....	41
Figura 23: Modelo para el cálculo del rendimiento de la máquina eléctrica.....	41
Figura 24: Máscara para el bloque del rendimiento del inversor con las constantes empíricas del mismo.....	42
Figura 25: Modelo del bloque para el cálculo del rendimiento del inversor. ....	42
Figura 26: Máscara del bloque de rendimiento del convertor con los valores empíricos necesarios para su cálculo.....	43
Figura 27: Modelo del bloque para el cálculo del rendimiento del convertor del vehículo. ....	43
Figura 28: Primera parte de la máscara, selección de las fuentes a usar. ....	44
Figura 29: Segunda parte de la máscara, parámetros de la batería de litio.....	45
Figura 30: Tercera parte de la máscara, parametrización de la pila de combustible y la operación de la misma. ....	45
Figura 31: Cuarta parte de la máscara, parámetros de los supercondensadores y su modo de operación,.....	46
Figura 32: Modelo para el bloque de las fuentes de energía. ....	47
Figura 33: Modelo de Shepherd para el bloque de batería de litio de Simscape [32]....	48
Figura 34: Modelo del bloque para el cálculo del SOC de la batería de ion litio.....	48
Figura 35: Circuito equivalente de un supercondensador [32].....	50
Figura 36: Bloque para el cálculo del SOC de la batería de supercondensadores.....	50
Figura 37: Circuito equivalente de una pila de combustible [32].....	51
Figura 38: Bloque para el cálculo del consumo de H <sub>2</sub> de la pila de combustible. ....	51
Figura 39: Bloque para el cálculo del porcentaje de hidrógeno restante en el tanque. ..	52
Figura 40: Modelo para el bloque de la distribución de la potencia.....	52
Figura 41: Bloque para el modo de funcionamiento. ....	53
Figura 42: Bloque de la distribución cuando el sistema está en demanda. ....	54
Figura 43: Bloque para la distribución de la potencia en recarga. ....	54
Figura 44: Modelo para la activación de la pila de combustible.....	55

Figura 45: Modelo del bloque de activación de la pila de combustible según el SOC de la batería de litio. ....	56
Figura 46: Ciclo NEDC .....	58
Figura 47: Potencia demandada por el ciclo NEDC.....	60
Figura 48: Perfil de descarga de la batería de ion litio de 40 kWh ante un ciclo NEDC	62
Figura 49: Zoom en perfil de descarga de la batería de ion litio de 40 kWh ante un ciclo NEDC .....	63
Figura 50: Zoom en la curva de potencia demandada.....	63
Figura 51: Variación de la autonomía del vehículo con respecto a la capacidad de la batería de litio ante una simulación con un ciclo NEDC.....	64
Figura 52: Potencia demandada por el sistema a una velocidad cte. de 80 km/h.....	65
Figura 53: Perfil de descarga de la batería de litio a una velocidad cte. de 80 km/h ....	65
Figura 54: Variación de la autonomía del vehículo con respecto a la capacidad de la batería de litio ante una velocidad constante de 80 km/h.....	66
Figura 55: Perfil de descarga de la batería de litio (40 kWh) (220 km) .....	68
Figura 56: Perfil de descarga (NEDC) de la batería de litio (36,5 kWh) e hidrógeno, 3,8 L H <sub>2</sub> , 0,45 kW (220 km).....	68
Figura 57: Perfil de descarga (NEDC) de la batería de litio (36,5 kWh) e hidrógeno, 3,8 L H <sub>2</sub> , 2 kW (220 km).....	69
Figura 58: Perfil de descarga (NEDC) de la batería de litio (36,5 kWh) e hidrógeno, 3,8 L H <sub>2</sub> , 0,2 kW (208 km).....	70
Figura 59: Perfil de descarga (NEDC) de la batería de litio (36,5 kWh) e hidrógeno, 1 L H <sub>2</sub> , 0,2 kW (206 km) .....	71
Figura 60: Perfil de descarga (NEDC) de la batería de litio (32,4 kWh) e hidrógeno, 7,5 L H <sub>2</sub> , 0,9 kW (220 km).....	72
Figura 61: Perfil de descarga (NEDC) de la batería de litio (28,4 kWh) e hidrógeno, 11,3 L H <sub>2</sub> , 1,3 kW (220 km).....	72
Figura 62: Perfil de descarga (NEDC) de la batería de litio (24,3 kWh) e hidrógeno, 15,1 L H <sub>2</sub> , 1,8 kW (220 km).....	72
Figura 63: Perfil de descarga (NEDC) de la batería de litio (20,3 kWh) e hidrógeno, 29 L H <sub>2</sub> , 2,2 kW (220 km) .....	73
Figura 64: Perfil de descarga (NEDC) de la batería de litio (26,2 kWh) e hidrógeno, 22,9 L H <sub>2</sub> , 2,5 kW (220 km).....	74

Figura 65: Perfil de descarga (NEDC) de la batería de litio (12,2 kWh) e hidrógeno, 27,5 L H <sub>2</sub> , 2,9 kW (220 km).....	74
Figura 66: Perfil de descarga (NEDC) de la batería de litio (8,1 kWh) e hidrógeno, 32,2 L H <sub>2</sub> , 3,5 kW (220 km).....	74
Figura 67: Variación de la cantidad de hidrógeno necesaria para mantener una autonomía de 220 km con respecto a la capacidad de la batería de litio ante un ciclo NEDC. ....	75
Figura 68: Variación de la intensidad de funcionamiento de la pila de combustible con respecto a la capacidad de la batería de litio ante un ciclo NEDC. ....	76
Figura 69: Perfil de descarga de la batería de litio de 40 kWh a una velocidad cte. de 80 km/h.....	77
Figura 70: Perfil de descarga (80km/h) de la batería de litio (36,5 kWh) e hidrógeno, 3,8 L H <sub>2</sub> , 2 kW (116,7 km).....	77
Figura 71: Perfil de descarga (80km/h) de la batería de litio (36,5 kWh) e hidrógeno, 3,8 L H <sub>2</sub> , 0,5 kW (108 km).....	78
Figura 72: Perfil de descarga (80km/h) de la batería de litio (36,5 kWh) e hidrógeno, 3,8 L H <sub>2</sub> , 15 kW (116,7 km).....	78
Figura 73: Perfil de descarga (30km/h) de la batería de litio (36,5 kWh) e hidrógeno, 3,8 L H <sub>2</sub> , 15 kW.....	79
Figura 74: Perfil de descarga (80km/h) de la batería de litio (36,5 kWh) e hidrógeno, 1 L H <sub>2</sub> , 15 kW (108 km).....	80
Figura 75: Perfil de descarga (80km/h) de la batería de litio (32,4 kWh) e hidrógeno, 7,6 L H <sub>2</sub> , 3,7 kW (116,7 km).....	81
Figura 76: Perfil de descarga (80km/h) de la batería de litio (28,4 kWh) e hidrógeno, 11,5 L H <sub>2</sub> , 5,5 kW (116,7 km).....	81
Figura 77: Perfil de descarga (80km/h) de la batería de litio (24,3 kWh) e hidrógeno, 15,6 L H <sub>2</sub> , 7,1 kW (116,7 km).....	81
Figura 78: Perfil de descarga (80km/h) de la batería de litio (20,3 kWh) e hidrógeno, 19,9 L H <sub>2</sub> , 9 kW (116,7 km).....	82
Figura 79: Perfil de descarga (80km/h) de la batería de litio (16,2 kWh) e hidrógeno, 24,2 L H <sub>2</sub> , 11 kW (116,7 km).....	82
Figura 80: Perfil de descarga (80km/h) de la batería de litio (12,2 kWh) e hidrógeno, 28,7 L H <sub>2</sub> , 12,6 kW (116,7 km).....	82
Figura 81: Perfil de descarga (80km/h) de la batería de litio (8,1 kWh) e hidrógeno, 33,3 L H <sub>2</sub> , 14,3 kW (116,7 km).....	83

Figura 82: Variación de la cantidad de hidrógeno necesaria para mantener una autonomía de 220 km con respecto a la capacidad de la batería de litio a velocidad constante .....	84
Figura 83: Variación de la intensidad de funcionamiento de la pila de combustible con respecto a la capacidad de la batería de litio a velocidad constante. ....	85
Figura 84: Perfil de descarga (NEDC) de la batería de litio (36,5 kWh) e hidrógeno, 3,8 L H <sub>2</sub> , 0,45 kW (220 km) .....	86
Figura 85: Perfil de descarga (NEDC) de la batería de litio (36,5 kWh) e hidrógeno, 3,8 L H <sub>2</sub> , 2 kW (220 km) .....	86
Figura 86: Perfil de descarga (NEDC) de la batería de litio (36,5 kWh) e hidrógeno, 15 L H <sub>2</sub> , 10 kW (282 km) .....	87
Figura 87: Perfil de descarga (NEDC) de la batería de litio (36,5 kWh) e hidrógeno, 15 L H <sub>2</sub> , 5 kW (282 km) .....	87
Figura 88: Perfil de descarga (NEDC) de la batería de litio (36,5 kWh) e hidrógeno, 15 L H <sub>2</sub> , 15 kW (282 km) .....	88
Figura 89: Perfil de descarga (NEDC) de la batería de litio (24,3 kWh) e hidrógeno, 16,6 L H <sub>2</sub> , 10 kW (220 km) .....	89
Figura 90: Perfil de descarga (NEDC) de la batería de litio (24,3 kWh) e hidrógeno, 50 L H <sub>2</sub> , 10 kW (403,8 km) .....	89
Figura 91: Perfil de descarga (NEDC) de la batería de litio (24,3 kWh) e hidrógeno, 75 L H <sub>2</sub> , 10 kW (537 km) .....	90
Figura 92: Perfil de descarga (NEDC) de la batería de litio (24,3 kWh) e hidrógeno, 100 L H <sub>2</sub> , 10 kW (671 km) .....	90
Figura 93: Perfil de descarga (NEDC), batería de 1 supercondensador, funcionamiento a partir de 38 kW .....	92
Figura 94: Perfil de descarga (NEDC), batería de 2 supercondensadores, funcionamiento a partir de 36 kW .....	93
Figura 95: Perfil de descarga (NEDC), batería de 3 supercondensadores, funcionamiento a partir de 35 kW .....	93
Figura 96: Perfil de descarga (NEDC), batería de 4 supercondensadores, funcionamiento a partir de 34 kW .....	93
Figura 97: Perfil de descarga (NEDC), batería de 5 supercondensadores, funcionamiento a partir de 33 kW .....	94
Figura 98: Perfil de descarga (NEDC), batería de 10 supercondensadores, funcionamiento a partir de 30 kW .....	94

Figura 99: Perfil de descarga (NEDC), batería de 15 supercondensadores, funcionamiento a partir de 28 kW .....	94
Figura 100: Perfil de descarga (NEDC), batería de 20 supercondensadores, funcionamiento a partir de 25 kW .....	95
Figura 101: Fracción de los picos de potencia que absorben los supercondensadores ..	95
Figura 102: Zoom en perfil de descarga de la batería de ion litio de 40 kWh ante un ciclo NEDC .....	96
Figura 103: Perfil de descarga de la batería de litio cuando se combina con 20 supercondensadores .....	96
Figura 104: Recarga de una batería de 20 supercondensadores con 1/5 de la frenada regenerativa .....	97
Figura 105: Perfil de descarga (NEDC), batería de 30 supercondensadores, funcionamiento a partir de 22 kW .....	97
Figura 106: Perfil de descarga (NEDC), batería de 50 supercondensadores, funcionamiento a partir de 20 kW .....	98
Figura 107: Cambio en la autonomía del vehículo con respecto al número de condensadores acoplados en serie. ....	99
Figura 108: Cambio en la autonomía del vehículo con respecto al número de condensadores acoplados en serie. ....	99
Figura 109: Potencia a la cual los supercondensadores entran en funcionamiento con respect al número de los mismos acoplados en serie.....	100
Figura 111: Cambio en la fracción de energía de frenada regenerativa usada por los supercondensadores con respecto al número de los mismos conectados en serie.....	101
Figura 112: Característica de descarga (evolución del SOC %) de las tres fuentes de energía combinadas. ....	102
Figura 113: Simulación de la batería de ion litio en combinación con supercondensadores. ....	103



# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 Introducción

Es un hecho que el uso de vehículos eléctricos (EV's por sus siglas en inglés) está en crecimiento a la vez que el mundo va siendo consciente de la importancia del cuidado del medio ambiente. Esto provoca la necesidad de estudios exhaustivos sobre la mejora tecnológica en el ámbito de las fuentes de energía de los vehículos eléctricos.

La fuente más usada en los vehículos eléctricos comercializados actualmente es la batería de litio. Pero, como se explicará más adelante, esta tecnología no es completamente limpia, es decir, pese a que su uso no emite ningún contaminante, su fabricación y su desecho al final de su vida útil sí es contaminante.

Además, el público demanda que la autonomía de estos vehículos sea mayor o que la recarga de las fuentes de energía del vehículo duren un tiempo mínimo. Las distancias que los vehículos eléctricos de hoy en día recorren son muy limitadas, con la autonomía teórica más alta siendo la del Tesla model S 100D con 540 km de autonomía según la EPA (La agencia de protección medioambiental de los Estados Unidos). [1]

Es por esto que, desarrollando este sistema de distribución de energía, se quiere estimar la posibilidad de introducir otra u otras tecnologías que se adecúen mejor a estos aspectos mencionados sin necesidad de instaurar una nueva infraestructura.

## 1.2 Objetivos

El objetivo principal de este trabajo se centra en la optimización de un sistema de distribución de energía, el cual permita el uso combinado de baterías de litio con otro tipo de fuente de energía como pueden ser supercondensadores o pilas de combustible.

Con esto se pretende estudiar la viabilidad del sistema para así introducir, de forma factible, una nueva tecnología que solucione los problemas que tiene la de uso común en la actualidad.

## 2 VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

Para poder entender la necesidad del estudio exhaustivo en las tecnologías de alimentación para vehículos eléctricos es necesario conocer el mercado actual y sus limitaciones.

### 2.1 “Full electric”

El estudio en este proyecto va a tener como base este tipo de vehículos, de los cuales, la mayoría, operan con baterías de ion-litio y se recargan por medio de la red eléctrica además de la frenada regenerativa. Es, por tanto, importante conocer las capacidades y limitaciones de los vehículos en el mercado actual para poder comparar los resultados finales con los anteriores.

#### a) **Tesla Model S**

Tesla es una marca que está revolucionando el mercado de los vehículos en general en estos últimos años. Su alimentación consiste de baterías de litio.

Dentro de este modelo Tesla ofrece distintas variantes según su capacidad y motor como el 75D (batería de 75 kWh), que ofrece una autonomía teórica de 490 km (ciclo NEDC) o el 100D (batería de 100 kWh), con una autonomía teórica de 613 km (ciclo NEDC). Por lo general la batería opera a un potencial de 400 V.

La batería de 85 kWh que ofrecían en el modelo 85 y 85D, pesa unos 540 kg y contiene 7.104 celdas de ion-litio agrupadas en 16 módulos en serie. [2]

#### b) **Tesla Model 3**

Recientemente la marca estadounidense ha lanzado al mercado un modelo más asequible dentro del mercado automovilístico eléctrico.

Este modelo ofrece dos variantes, la estándar con una batería de 50 kWh y la “Long range” con una batería de 75 kWh. Las variantes ofrecen una autonomía teórica de 350 km (EPA) y 500 km (EPA) respectivamente.

Las baterías se componen de 2.976 celdas de ion-litio en grupos de 31 celdas en el modelo estándar y 4.416 celdas en grupos de 46 celdas en el modelo “long range”. [3]

#### **c) Nissan Leaf**

Nissan ha creado uno de los coches más competentes dentro del mercado eléctrico. Su producción empezó en 2011 con una batería de 24 kWh y una autonomía de 175 km (ciclo NEDC). En el año 2016 lanzaron una versión con 30 kWh y en el 2018 la han aumentado a los 40 kWh y una autonomía de 241 km según la EPA. [4]

La batería de este último se compone de 192 celdas planas de ión-litio de 3,65 V y 56,3 Ah, distribuidas a lo largo de dos módulos en paralelo. Con un peso total aproximado de unos 175,5 kg sin contar con el cableado y la carcasa. [5]

#### **d) BMW i3**

BMW sacó su modelo completamente eléctrico en el año 2014. La batería de la variante de 94 Ah es de 27.2 kWh y ofrece una autonomía de 156 km según la EPA.

Este coche tiene la opción de incorporar un “range extender”, un motor de scooter de 647 cc que recarga la batería y aumenta su autonomía hasta unos 320 km. [6]

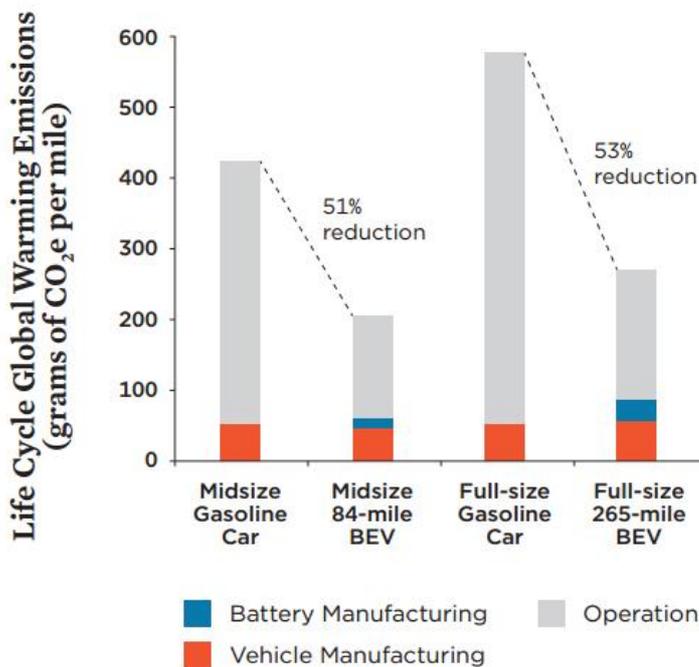
## **2.2 Híbridos**

Este tipo de vehículo, que combina un motor de combustión con uno eléctrico para picos de potencia y para circulación a bajas velocidades, se hizo popular hace unos años como alternativa más ecológica a los coches de combustión. El motor eléctrico está

alimentado por baterías, normalmente de ion-litio, que se recargan, bien enchufándolas a la red eléctrica por medio de un cargador, o con la frenada regenerativa del coche.

Según un estudio realizado por la “Union of concerned scientists” en Estados Unidos, los coches híbridos con esta tecnología reducen en aproximadamente un 50%, las emisiones de CO2 a lo largo de toda su vida útil. [8]

**Life Cycle Global Warming Emissions from the Manufacturing and Operation of Gasoline and Battery-Electric Vehicles**



Note: We assume that the midsize vehicles are driven 135,000 miles over their lifetimes and the full-size vehicles 179,000 miles. The difference in the two mileages derives from the dissimilar uses of 84-mile-range and 265-mile-range battery-electric cars, as described in Chapter 2. We further assume that a consumer buying a BEV would drive it the same total of miles as a corresponding gasoline vehicle. We use U.S. average electricity grid emissions to estimate manufacturing emissions, while the average electricity grid emissions intensity during vehicle operation are based on a sales-weighted average of where EVs are being sold today.

Learn more at: [ucsusa.org/EVlifecycle](http://ucsusa.org/EVlifecycle)

© Union of Concerned Scientists

Figura 1: Diferencia de emisión de CO2 entre un coche de gasolina y uno híbrido [8]

**a) Toyota Prius**

Es uno de los híbridos más populares del mercado automovilístico actual. Su segunda generación compone de un motor de combustión y otro eléctrico de imanes permanentes. La batería que alimenta el motor eléctrico se compone de celdas NiMH de 1,2 V. En total hay 168 celdas repartidas en 28 módulos (6 celdas por módulo) que ofrecen un voltaje nominal de 201,6 V y una capacidad nominal de 6,5 Ah, que dan a la batería un total de 1,3 kWh. [8]

El sistema electrónico del coche mantiene el SOC de la batería alrededor del 60%, nunca superando el 82% ni bajando del 38%, ya que quedaría inutilizable.



*Figura 2: Batería de la segunda generación del Toyota Prius[37]*

**b) Chevrolet Volt**

La segunda generación del Chevrolet Volt (2016), aparte de su motor de combustión, posee un segundo motor, eléctrico, alimentado por una batería de unos 183 kg. Esta batería se compone de 192 celdas de ión-litio LMO de 14 kWh, repartidas en 7 módulos y ofreciendo un voltaje nominal total de 360 V. [9]

La autonomía de la segunda generación del Chevrolet Volt es de 680 km según la EPA. [10]

## 2.3 Fuel cell

No existe una gran cantidad de vehículos comercializados de pila de combustible o fuel cell, esto es debido a que la tecnología tiene mayores dificultades para ser adaptada al mercado automovilístico que otro tipo de baterías. Además, la infraestructura para repostar hidrógeno es casi inexistente. Aun así, en los últimos años se han dado grandes avances en este campo y subcategorías, como el flujo redox, tienen un gran potencial.

Como responde Umbra Fisk a un usuario que pregunta por qué apenas hay coches de pila de hidrógeno en el mercado, “Si los vehículos de fuel cell fuese uno de mis alumnos, sacaría un bolígrafo y escribiría “tiene muchísimo potencial, pero necesita trabajar duro y aplicarse en clase para tener éxito” en su expediente”. [11]

Es por esta misma razón que este proyecto pretende ayudar a dar una visión que promueva el desarrollo y el potencial del hidrógeno.

### a) **Hyundai ix35 fuel cell**

Este vehículo, a parte del tanque de hidrógeno y la pila de combustible, tiene una “pequeña” batería de litio como ayuda en picos de potencia al acelerar y para almacenar la energía de la frenada regenerativa.

Esta batería de la versión de 2012 es de 24 kWh, pesa 47 kg y se compone de 48 celdas, ofreciendo un voltaje nominal de 180 V y una autonomía de 594 km (NEDC). El tanque de hidrógeno es de 700 bares que pueden almacenar 5,63 kg (144L) de hidrógeno y tiene una eficiencia de entre 68 km/kgH<sub>2</sub> y 82 km/kgH<sub>2</sub>. [12]

### b) **Toyota Mirai**

Al igual que el Hyundai ix35, el Toyota Mirai tiene una batería, en este caso un híbrido de Níquel-metal, como el Prius, de 34 celdas, un voltaje nominal de 244 V y 6,5 Ah (1,6 kWh).

Los dos tanques de hidrógeno tienen una capacidad combinada de 122.4 L (5 kg aproximadamente) y un consumo combinado de 0,76 kWh<sub>2</sub>/100 km. (131,6 km/kgH<sub>2</sub>) lo que le da una autonomía aproximada de 550 km (NEDC).

El vehículo tiene un peso de 1.850 kg. [13]

**c) Honda FCX Clarity Fuel Cell**

El Honda FCX Clarity tiene un tanque de hidrógeno de 171 L a 35 Mpa (lleno). Al igual que el resto tiene una batería de apoyo, en este caso de ion-litio con un voltaje nominal de 288 V. El vehículo tiene un peso de 1.625 kg. [14]

## 3 FUENTES DE ENERGÍA

La fuente de energía es el componente principal de un vehículo eléctrico que más está siendo estudiado actualmente, esto se debe a que uno de los problemas primordiales de los vehículos eléctricos de hoy en día es la escasa autonomía y alto tiempo de recarga que pueden proporcionar comparado con sus competidores de combustibles fósiles. Por ello es indispensable buscar una solución a este inconveniente, causante de que gran mayoría del público potencial no se decida a hacer el cambio a la movilidad eléctrica sostenible.

Es importante tener en cuenta de que, si bien el vehículo está alimentado en su totalidad por energía eléctrica recargable y no produce gases contaminantes perjudiciales o de efecto invernadero, la recarga de dichas fuentes de energía proviene, normalmente, del mix eléctrico, cuya generación sí que tiene emisiones. Además, la fabricación y el desecho de las mismas también producen riesgos para la salud y el medio ambiente dependiendo de qué elementos se usen para su fabricación.

### 3.1 Fundamentos

Las baterías se caracterizan, principalmente, por tres conceptos, los cuales se han de conocer para entender, más adelante, como se pueden dimensionar dichas baterías para conseguir que un vehículo eléctrico cumpla con los requisitos que se quieran alcanzar.

#### 3.1.1 Voltaje nominal

El voltaje nominal es el potencial al que operará la batería. Normalmente las baterías se componen de un número determinado de celdas (unidades mínimas) que suelen tener un voltaje bajo (entre 1 V y 5 V normalmente). Estas celdas se conectan en serie hasta alcanzar el voltaje deseado para la alimentación, en este caso, del sistema eléctrico del vehículo.

#### 3.1.2 Capacidad

La capacidad de las baterías se mide en Ah (amperios-hora) o en kWh (kilovatios-hora). Esta cifra indica la potencia, o número de amperios, que una batería puede ofrecer durante una hora. Si el fabricante de una batería especifica que tiene 50 Ah, esto significará que la batería podrá estar funcionando a 50 A durante una hora antes de agotarse.

Esto no quiere decir que la batería no pueda superar dicha cantidad en algún momento, por ejemplo, la misma batería que antes de 50 Ah, si sus características lo permitieran, podría funcionar a 100 A durante la mitad de tiempo, media hora, y a 25 Ah durante el doble, dos horas.

La capacidad de la batería está directamente relacionada con la autonomía del vehículo y la capacidad para otorgar potencia suficiente en un momento dado.

### 3.1.3 SOC

Es necesario mencionar que las baterías eléctricas solo pueden operar en un rango definido y menor que todo su potencial, es decir, el SOC (estado de carga por sus siglas en inglés) no puede superar ni bajar de ciertos valores. Estos suelen rondar el 80% y el 20% respectivamente y vienen dados por el fabricante. Una sobrecarga puede ocasionar un serio problema ya que, no solo la batería dejaría de funcionar, sino que, si los compuestos son altamente reactivos como el litio, pueden entrar en combustión con el aire o elementos del vehículo y causar un serio peligro de seguridad. Si baja del valor mínimo de SOC, la batería queda inutilizable e irrecuperable y se considera “muerta”. [15]

### 3.1.4 SOH

El SOH es el estado de salud, por sus siglas en inglés, de una fuente de energía. El estado de salud está directamente relacionado con la vida útil de una batería y refleja la condición general de una batería y su capacidad de funcionamiento comparada con una batería nueva.

El SOH tiene en cuenta factores como la resistencia interna, el voltaje y la auto-descarga de la batería. Es una medida de la capacidad de la batería y da una “indicación”, no es una medida absoluta, de cuanta capacidad de la total útil de la batería ha sido consumida y cuanta queda, de nuevo, aproximadamente. [16]

### 3.1.5 Energía específica

También llamada densidad energética, es la cantidad de energía que la fuente permite almacenar por unidad de peso (Wh/kg). Esta medida puede variar dependiendo del tipo de reacción y de los compuestos usados para las mismas. [17]

## 3.2 Dimensionamiento

La fuente de energía del vehículo debe de ser dimensionada correctamente para que pueda almacenar la cantidad de energía necesaria para una buena autonomía del vehículo (kWh) y proporcionar potencia suficiente en los instantes de alta demanda del sistema motriz (kW), facilitando así una correcta aceleración. Además, debe cumplir unas características de vida útil. Estas características se determinan en base al tipo de fuente de energía usada (baterías, pilas de combustible, ultracondensadores o un sistema híbrido) y a las especificaciones del vehículo.

Por otra parte, también es necesario dimensionar correctamente el peso, volumen y el coste energético del sistema de alimentación para un vehículo eléctrico. Este proceso es clave y uno de los retos más desafiantes a la hora de diseñar el vehículo. Evidentemente existen límites a la hora de dimensionar este sistema correctamente, pero las maneras de abordar este tema de forma práctica son, en su mayoría, arbitrarias.

Normalmente existen dos factores limitantes a la hora de diseñar el sistema de almacenamiento energético de un vehículo. El primero es la cantidad total de energía que puede proveer el sistema y el segundo es la potencia que puede ofrecer.

La cantidad de energía que la batería puede proporcionar se dimensiona de tal manera que el vehículo tenga la autonomía deseada por el fabricante. El peso y volumen

de la fuente de energía se calculan fácilmente a partir del consumo del vehículo (Wh/km) y la energía específica de la batería (Wh/kg). La potencia necesaria para la correcta aceleración y velocidad punta del vehículo se cumple, en la mayoría de casos, después de haber calculado la energía necesaria para la autonomía del vehículo y no son necesarios cálculos adicionales.

Las fuentes de energía en los vehículos eléctricos tienen, por lo general, ciclos muy intensos de carga y descarga. Por lo tanto, la batería deberá cumplir unos requisitos de vida útil. [18]

### 3.3 Fuentes electroquímicas

Las baterías electroquímicas están compuestas, principalmente, por dos electrodos, uno positivo y otro negativo, sumergidos en un electrolito y separados por una membrana o un puente salino. El voltaje que puede producir una batería de este tipo depende de la reacción química que se dé dentro de cada celda, la cual generará una diferencia de potencial concreta entre los electrodos.

Dichas celdas se clasifican en dos tipos o modos dependiendo de si se están cargando o descargando. Las celdas galvánicas son aquellas que convierten energía química en energía eléctrica, por el contrario, las celdas electrolíticas son aquellas que convierten energía eléctrica en química.

En el cátodo, dependiendo de si se está cargando o descargando, se produce una reacción de oxidación o reducción (absorción de electrones) respectivamente. En el ánodo lo contrario ocurre, si se está cargando la celda se produce una reacción de oxidación y si se está descargando, una reacción de reducción. Para eliminar confusiones, ya que dependiendo de si se carga o se descarga una celda, su ánodo y su cátodo actúan de maneras distintas y opuestas, normalmente se refiere al ánodo como el polo o electrodo negativo y al cátodo como el electrodo positivo.

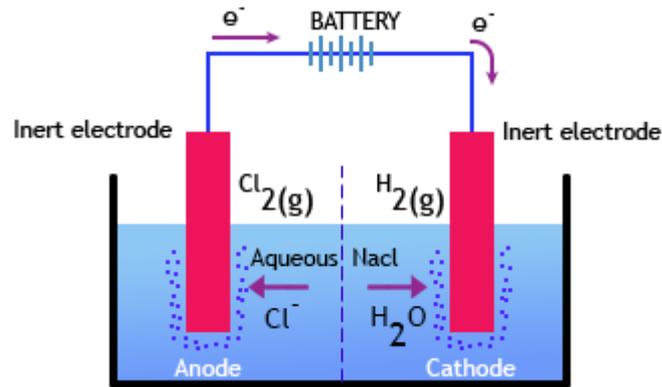


Figura 3: Ejemplo de una celda electrolítica (en carga) [38]

Como se puede apreciar en la figura 3, la disolución de NaCl se descompone en cloro gaseoso e hidrógeno debido a la reacción generada en los electrodos por la energía eléctrica de la batería mostrada. El cátodo liberará electrones, oxidándose, mientras que el ánodo los absorberá [19].

En este proyecto se estudiarán únicamente dos tipos de fuentes electroquímicas en este proyecto, las baterías de ion de litio y las pilas de combustible de hidrógeno, las cuales han sido elegidas debido a sus aplicaciones actuales y su proyección a futuro en la industria de los vehículos eléctricos.

### 3.3.1 Baterías de ion de litio

Las baterías de ion de litio son las más comunes hoy en día [20], no solo en el sector automovilístico sostenible, sino en cualquier dispositivo eléctrico o electrónico con autonomía energética. Esto se debe a su buena energía específica, ligereza, durabilidad y ciclos rápidos de carga/descarga. Las baterías de litio se componen de un ánodo de grafito, un cátodo de óxido de metal de litio ( $\text{LiCoO}_2$ ,  $\text{LiMO}_2$ ,  $\text{LiNO}_2$ , etc.) y el correspondiente electrolito compuesto, generalmente, por una solución salina de litio ( $\text{LiPF}_6$ ).

El funcionamiento de este tipo de baterías difiere de otros tipos de fuentes electroquímicas. La carga de la batería funciona de tal manera que los átomos de litio del cátodo se convierten en iones de litio que pasan por el electrolito hasta el ánodo de grafito, en el cual los iones se recombinan con el carbón formando átomos de litio de nuevo. La descarga funciona igual en sentido contrario.

Existen distintos tipos de baterías según la composición de su cátodo y ánodo. Cada tipo de batería tiene sus ventajas e inconvenientes, tanto eléctricos como económicos:

#### **A. Base de óxido de cobalto litio**

Este tipo de batería ( $\text{LiCoO}_2$ ), también conocida como LCO, es una tecnología madurada y caracterizada por una larga vida útil y una gran densidad energética. Además, es la tecnología más popular en cuanto a aparatos electrónicos portátiles se refiere, debido a su gran velocidad de carga y descarga. Este tipo de baterías son, por lo general, de 3,7 V.

Sin embargo, el alto precio del cobalto, sus grandes variaciones de temperatura y por razones de seguridad, estas baterías no son adecuadas para su uso en el sector automovilístico.

*Fabricantes: Sony, Kokam.*

#### **B. Base de óxido de manganeso**

Esta batería ( $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ), a la que se le refiere también como LMO, tiene un voltaje nominal más alto que las celdas LCO, el cual suele encontrarse entre los valores 3.8 V y 4 V. Aun así, tiene aproximadamente una densidad energética un 20% menor que la LCO. Otros factores a destacar son su alta estabilidad frente a cambios de temperatura, bajo coste y mayor seguridad. Aún con estas aparentes ventajas este tipo de batería no se usa en el sector automovilístico debido a su corta vida y sus pérdidas.

*Fabricantes: Hitachi, Sanyo, GS Yuasa, LG Chem, Samsung, Toshiba, Altairnano.*

#### **C. Base de óxido de níquel litio**

La batería a base de óxido de níquel litio ( $\text{LiNiO}_2$ ), también referida como LNO, es más barata y posee mejor densidad energética (15% en volumen y 20% en peso), pero es menos estable que la LCO. El voltaje nominal de estas baterías no supera los 3,6 V y es complejo fabricar el compuesto del cual están hechas, lo que la hacen una peor candidata para el sector automovilístico.

**D. Base de óxido de níquel-cobalto-aluminio**

Conocida también como NCA ( $\text{LiNiCoAlO}_2$ ), esta batería tiene un menor voltaje nominal y una mejor seguridad comparada con la LCO. Además, las NCA tienen buenas características en cuanto a densidad energética y vida útil. Sus desventajas son su baja seguridad y su alto coste de fabricación.

*Fabricantes: SAFT, PEVE, AESC.*

**E. Base de óxido de níquel-cobalto-manganeso**

La batería NMC ( $\text{LiNiMnCoO}_2$ ) tiene un cátodo compuesto por cantidades equitativas de cada metal. Se caracteriza por su alta capacidad, sus buenas tasas de carga y descarga y su alto voltaje nominal.

*Fabricantes: PEVE, EIG, Hitachi, Sanyo, LG Chem, Samsung, GS Yuasa, Kokam.*

**F. Base de fosfato de hierro**

Conocidas como LFP, este tipo de baterías ( $\text{LiFePO}_4$ ) son atractivas químicamente hablando debido a sus buenas características como su gran capacidad, menor coste que las LCO, buena estabilidad del voltaje en la descarga y su bajo impacto medioambiental. Su funcionamiento es similar al de las NCA, pero con un mayor grado de seguridad. Además, estas baterías se consideran adecuadas para su uso en aplicaciones automovilísticas debido a sus buenas características, como la estabilidad frente a cambios de temperatura, larga vida útil y baja auto descarga.

*Fabricantes: A123, BYD, GS Yuasa, SAFT, EIG, Lishen.*

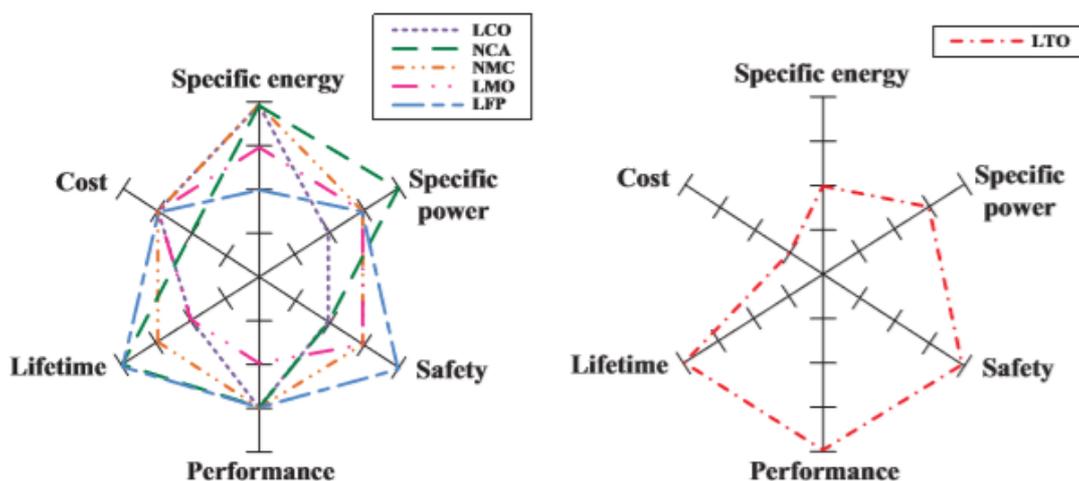
**G. Base de óxido de titanato**

Las baterías de óxido de titanato ( $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ ), conocidas también como LTO, usan nanocristales de titanato de litio en la superficie del ánodo en vez de carbón. Esto significa que las baterías pueden liberar iones más rápido cuando la demanda es alta. Estas baterías ofrecen ventajas con respecto a la seguridad debido a su menor voltaje nominal. Las LTO son características por su alta estabilidad cíclica, descomposición nula del electrolito y por lo tanto ninguna formación de electrolito sólido, gran capacidad y estabilidad de carga y descarga, y buen funcionamiento a bajas temperaturas. Esto hace que las LTO tengan una gran aplicación en operaciones de almacenamiento de energía estacionario.

*Fabricantes: Altairnano, EIG, Leclanché.*

Material	Capacidad específica [mAh/g]	Voltaje nominal [V]	Densidad energética [Wh/kg]	Vida útil [ciclos]
LCO	140	3.7	110 – 190	500 – 1000
LMO	146	3.8	100 – 120	1000
NCA	180	3.6	100 – 150	2000 – 3000
NMC	145	3.6	100 – 170	2000 – 3000
LFP	170	3.3	90 – 115	> 3000
LTO	170	2.2	60 – 75	> 5000

Tabla 1. Características de los diferentes tipos de baterías de ion de litio [21]



a) Baterías con diferentes cátodos

b) Batería con ánodo basado en LTO

Figura 4. Debilidades y fortalezas de los diferentes tipos de baterías de ion-litio [21]

En los gráficos de la figura 4. se puede observar que ninguno de los tipos de baterías de litio expuestas destaca sobre los otros en todos los aspectos. Esto quiere decir que, dependiendo de la aplicación que se le quiera dar a las baterías, se deberá escoger un tipo de batería distinto.

En este momento están emergiendo nuevas tecnologías para las baterías de litio:

**A. Baterías Litio – Aire**

Las baterías Li-Air, por su nombre en inglés ( $\text{Li}_2\text{O}_2$ ), están en fase de desarrollo inicial y tienen una densidad energética muy similar a la de los combustibles fósiles, por lo que la podría hacer una muy buena candidata para aplicaciones automovilísticas. Esta batería consiste de un electrodo positivo de carbón poroso y un electrodo negativo de litio. Al reaccionar el litio directamente con el oxígeno del aire ( $\text{O}_2$ ) se puede obtener una alta capacidad energética (1200 mAh/g). Ninguna de las tecnologías del litio actuales es capaz de proveer una capacidad tan alta.

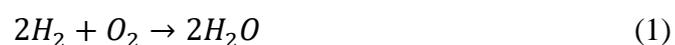
**B. Baterías Litio – Azufre**

Estas baterías ( $\text{Li}_2\text{S}$ ) también son otra gran candidata por su alta capacidad energética. Su electrodo negativo es de litio y su electrodo positivo contiene azufre en vez de oxígeno. La única diferencia es que el azufre, al contrario que el oxígeno, es sólido, por lo que poseen una mejor vida útil y una mayor eficiencia que las Li – Air, pero una menor capacidad energética. Debido al bajo coste del azufre, estas baterías tienen el potencial para reemplazar a las tecnologías de litio existentes actualmente en aplicaciones automovilísticas.

Aunque ya se estén desarrollando estas nuevas tecnologías de litio, es indispensable seguir investigando sobre estas y otras fuentes de energía potenciales que permitan una mayor autonomía o un tiempo mínimo de recarga [21].

### 3.3.2 Pilas de combustible

La pila de combustible, o pila de hidrógeno, es una tecnología antigua que está tomando gran importancia en los últimos años con respecto a la movilidad sostenible. Su funcionamiento es muy simple, el hidrógeno ( $\text{H}_2$ ) reacciona con el oxígeno ( $\text{O}_2$ ) para formar agua [22].



Esta reacción, en vez de producir energía en forma de calor, produce energía en forma de corriente eléctrica con la ayuda de electrodos y electrolito. En estos electrodos se producen las siguientes reacciones por separado:

En el ánodo de una pila de combustible con electrolito ácido, el hidrógeno se ioniza, liberando electrones y creando iones  $H^+$  (protones).



En el cátodo, el oxígeno reacciona con los electrones que se han generado de la reacción anterior, que han llegado hasta el electrodo por medio de una conexión eléctrica entre este y el ánodo, y con el  $H^+$  del electrolito, formando agua.



Estas reacciones en conjunto generan energía eléctrica, liberando 0 contaminantes. El inconveniente de estas pilas es que la energía generada por los electrodos es muy pequeña, por lo que hacen falta numerosos electrodos planos y porosos para facilitar un mejor contacto.

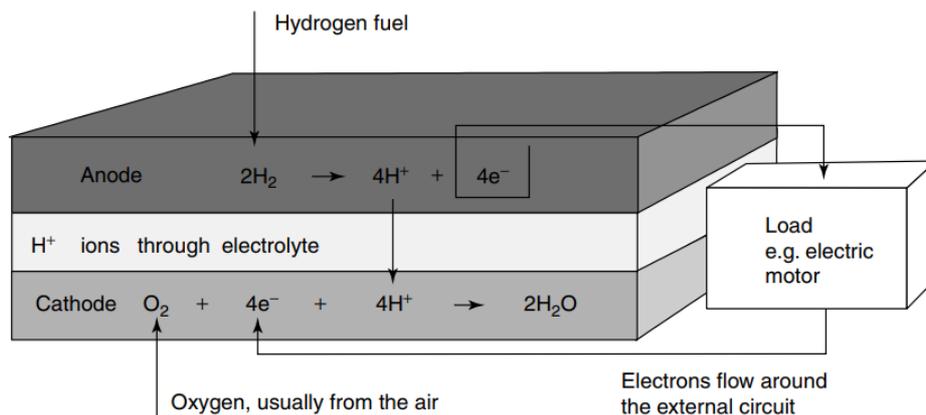
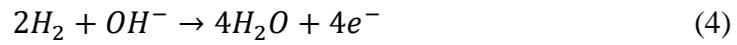


Figura 5. Esquema de una celda de una pila de combustible con electrolito ácido [22]

En una pila de combustible con un electrolito alcalino la reacción global es la misma, mientras que en los electrodos son distintas:

En el ánodo, los iones de hidroxilo ( $\text{OH}^-$ ) libres del electrolito reaccionan con en hidrógeno formando agua y liberando electrones.



En el cátodo los electrones que llegan del ánodo reaccionan con el oxígeno y el agua formada para generar nuevos iones  $\text{OH}^-$ .

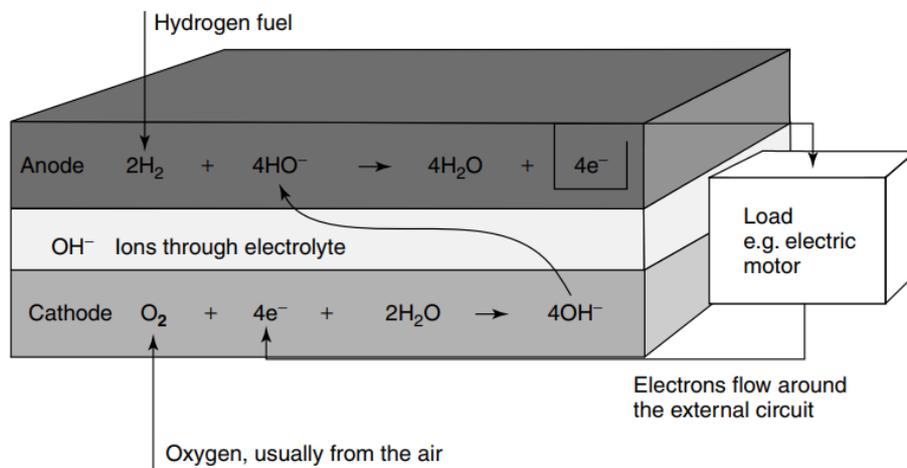
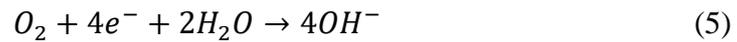


Figura 6. Esquema de una celda de una pila de combustible con electrolito alcalino [22]

Hay que destacar que, aunque la energía sea liberada, la reacción sigue una forma de energía que requiere de una “energía de activación” para que la reacción alcance un estado óptimo y continuo.

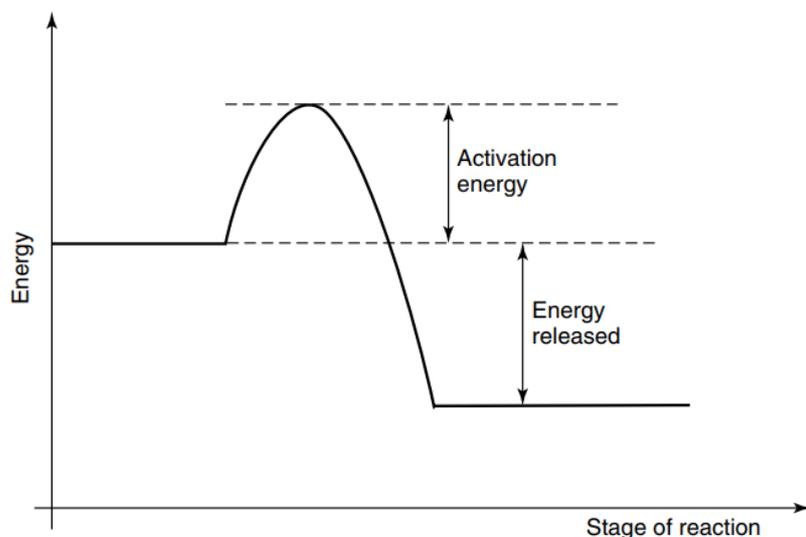


Figura 7. Gráfico de la energía según el estado de la reacción de una pila de combustible [22]

Este inconveniente se puede solucionar de varias maneras, con el uso de catalizadores, elevando la temperatura o incrementando el área de contacto de los electrodos. Además, el voltaje producido por una pila de combustible es muy bajo, por lo que, para producir un voltaje apto para el uso, en este caso, en vehículos eléctricos, se necesitan varias celdas en serie, al igual que las baterías de litio.

La siguiente tabla muestra los diferentes tipos de pilas de combustible según el electrolito usado y, por consiguiente, el ion que reacciona con los electrodos.

Fuel cell type	Mobile ion	Operating temperature	Applications and notes
Alkaline (AFC)	$\text{OH}^-$	50–200°C	Used in space vehicles, e.g. Apollo, Shuttle.
Proton exchange membrane (PEMFC)	$\text{H}^+$	30–100°C	Vehicles and mobile applications, and for lower power CHP systems
Direct methanol (DMFC)	$\text{H}^+$	20–90°C	Suitable for portable electronic systems of low power, running for long times
Phosphoric acid (PAFC)	$\text{H}^+$	~220°C	Large numbers of 200-kW CHP systems in use.
Molten carbonate (MCFC)	$\text{CO}_3^{2-}$	~650°C	Suitable for medium- to large-scale CHP systems, up to MW capacity
Solid oxide (SOFC)	$\text{O}^{2-}$	500–1000°C	Suitable for all sizes of CHP systems, 2 kW to multi-MW.

Tabla 2: Comparación de los distintos tipos de “Fuel cell” con respecto a su química [22]

Cabe destacar que se están desarrollando nuevas tecnologías basadas en esta mecánica [22]:

### **Pilas de combustible orgánicas:**

Esta tecnología, la cual está aún muy poco desarrollada, se basa en la sustitución de catalizadores convencionales por encimas.

### **Pilas metal-aire:**

En el electrodo negativo el metal reacciona con un electrolito alcalino para formar óxido de dicho metal y liberar electrones. Los electrones liberados pasan, por medio de un circuito eléctrico al otro electrodo, donde se reacciona agua y oxígeno para formar iones de hidroxilo.

Estas pilas tienen muy buena densidad energética, además tienen la ventaja de que para recargarlas se puede cambiar el metal el ánodo con metal y electrolito nuevo.

### **Pilas de flujo redox:**

Este tipo de pilas se usan para fabricar baterías recargables de alta capacidad para instalaciones eléctricas. Esta tecnología se basa en el almacenamiento del electrolito usado y el suministro de nuevo electrolito necesario para generar la reacción, por lo que la recarga de estas baterías podría simplemente ser el cambio de los tanques de electrolito usado por nuevo electrolito. El electrolito usado puede, entonces, ser revertido a su estado original separadamente, lo cual puede ser una gran ventaja para los vehículos eléctricos.

### 3.4 Supercondensadores

Los supercondensadores [23, 24], también conocidos como ultracondensadores o condensadores de doble capa, se diferencian de los condensadores normales por su alta capacitancia. Un condensador almacena energía por medio de carga estática, aplicando una diferencia de potencial entre las placas negativa y positiva el condensador se carga.

Existen tres tipos de condensadores, el primero y más simple es el condensador electrostático. Este tipo de condensador tiene muy baja capacitancia y se usan en electrónica de frecuencia como filtros. Su capacitancia varía de picofaradios (10<sup>-12</sup>) a microfaradios (10<sup>-6</sup>).

El segundo es el condensador electrolítico, llamado así por su separador húmedo. Este ofrece una mayor capacitancia que el anterior, aunque baja, ronda los microfaradios.

El tercero y último es el supercondensador, estos tienen una capacitancia medida en faradios, cientos de miles de veces mayor que los condensadores electrolíticos. Su aplicación se usa para ciclos de cargas y descargas rápidas a alta intensidad.

El supercondensador más comúnmente fabricado hoy en día está basado en carbón y tiene un electrolito orgánico.

Los supercondensadores tienen un rango de voltaje limitado, entre 2,5 V y 2,7 V. Al igual que las baterías, los condensadores se agrupan en serie para conseguir el voltaje deseado, esto reduce la capacitancia total y aumenta la resistencia interna. Al tener un voltaje tan limitado, es necesario un balanceo individual más estricto para evitar la sobrecarga.

La densidad energética de los condensadores varía entre 1 Wh/kg y 30 Wh/kg, esto es, 10 – 50 veces menos que las celdas de litio. Además, su curva de descarga es otra desventaja, mientras una batería electroquímica ofrece un voltaje uniforme durante su fase de descarga, en el supercondensador, el voltaje disminuye linealmente, reduciendo enormemente el rango de uso.

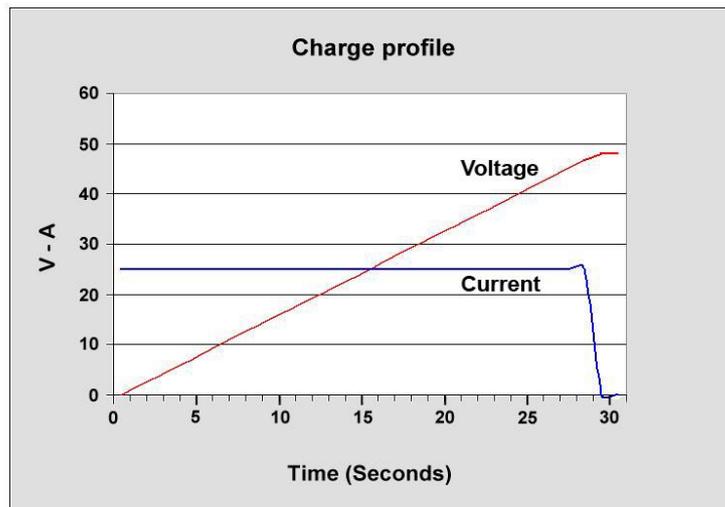


Figura 8: Perfil de carga de un supercondensador [23]

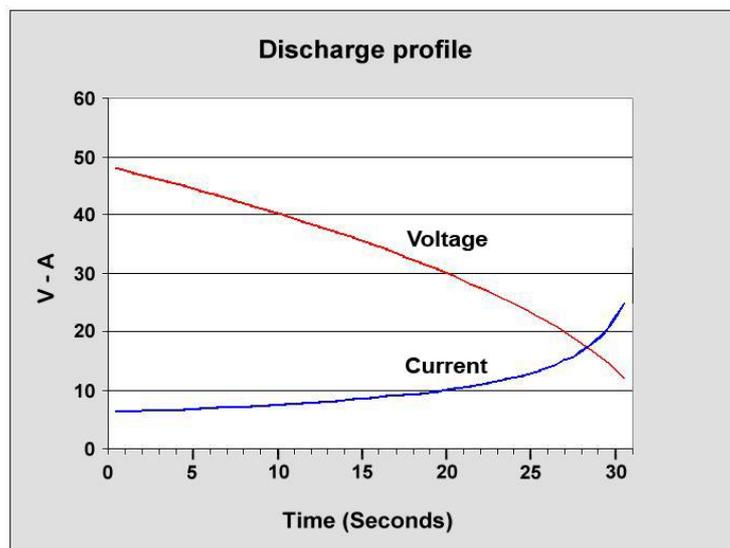


Figura 9: Perfil de descarga de un supercondensador [23]

La siguiente tabla muestra las diferencias clave entre un supercondensador y una batería de litio:

Característica	Supercondensador	Pila de litio
Tiempo de carga	1 – 10 segundos	10 – 60 minutos
Vida útil (ciclos)	1 millón	1.000
Voltaje de celda	2,3 – 2,75 V	3,6 V
Energía específica (Wh/kg)	5	120 – 240
Potencia específica (W/kg)	10.000	1.000 – 3.000
Coste por cada kWh	10.000 \$	250 – 1.000 \$

Tabla 3: Comparación de características de un supercondensador y una celda de litio [24]

En la tabla anterior se puede observar que mientras la batería de litio tiene una vida en ciclos limitada, el supercondensador puede ser cargado y descargado casi un número ilimitado de veces. Además, el supercondensador aguanta mejor las temperaturas altas, más adelante se valorará esta característica.

Los supercondensadores aplicados a automoción sostenible se llevan desarrollando desde 1990. La mayoría de dicho desarrollo ha sido en los condensadores de doble capa que tienen carbón microporoso en sus dos electrodos. El objetivo era alcanzar una densidad energética de 5 Wh/kg y una vida útil de, por lo menos, 500.000 ciclos de descarga.

La aplicación actual de supercondensadores en vehículos eléctricos es la de combinarlos, como fuente de apoyo, con una batería de litio principal o pila de combustible.

## 4 MOTIVACIÓN

Sin el estudio previo acometido, no sería sencillo entender la motivación detrás de este proyecto. Por lo tanto, después de todo lo previamente explicado, es importante conocer la motivación detrás de este estudio antes de seguir adelante con las explicaciones técnicas del proyecto en sí.

Las tecnologías de fuentes de energía seleccionadas para este estudio son las previamente expuestas. La motivación detrás de este proyecto se basa en, además de alargar la autonomía y la optimización de un vehículo eléctrico, se plantea la introducción de la pila de hidrógeno en el mercado sin que la falta de infraestructura comprometa el uso del vehículo. Introduciendo así, una tecnología que indudablemente tiene ventajas sobre las que son más utilizadas en el mercado automovilístico sostenible actual.

Las fuentes de almacenamiento de energía, previamente mencionadas y expuestas, han sido escogidas en base a los siguientes razonamientos que se exponen por cada tipo de tecnología individualmente y a continuación.

### 4.1 Litio

La batería principal estará compuesta por celdas de ion de litio. Esta decisión se toma en base a la versatilidad de la tecnología. A parte de tener una buena densidad energética, el litio se adapta mejor que las otras tecnologías a la demanda del sistema. Esto se debe a la característica de descarga ya mencionada, que su modelo de descarga sea constante en voltaje en un rango amplio de SOC. Supondría una ventaja en distintas fases de conducción frente a las otras tecnologías.

La batería de litio es, también, la tecnología energética más estudiada en los últimos años, por lo que ya existe una infraestructura importante que permite usar los vehículos equipados solamente con esta tecnología. Su precio es asequible y las celdas son de fácil adquisición en la mayor parte del mundo.

## 4.2 Pila de combustible

El hidrógeno se encuentra dentro de las energías más limpias del mercado. Esto se debe al tipo de reacción que deja como producto agua. Los electrolitos son, además, muy poco contaminantes.

Debido a la poca infraestructura y con el fin de introducir la pila de combustible de una manera asequible y poco disruptiva, la pila de combustible se plantea como un “range extender”. La pila será la encargada de recargar o apoyar a la batería de litio, intentando, así, alargar lo máximo posible la duración de la primera ya que, mientras la batería de litio tarda más en recargarse, una pila de combustible se recarga con el repostaje de hidrógeno en el tanque, el cual lleva un tiempo mínimo.

Otra ventaja del hidrógeno es que su densidad energética. Aun incluyendo el peso de todo el sistema “fuel cell”, este posee una mayor densidad energética, entre ocho y catorce veces mayor, que la de cualquier otra batería electroquímica actual. La figura 10 muestra esta característica diferencia. Por lo que supondría una solución a uno de los mayores problemas que conciernen al mercado automovilístico sostenible actual: la autonomía del vehículo y su lentitud de recarga.

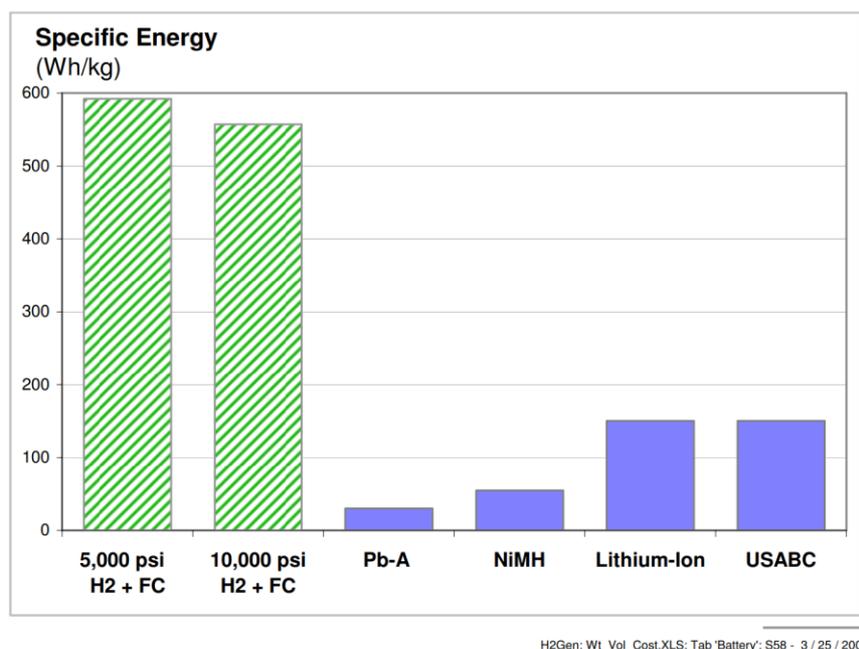
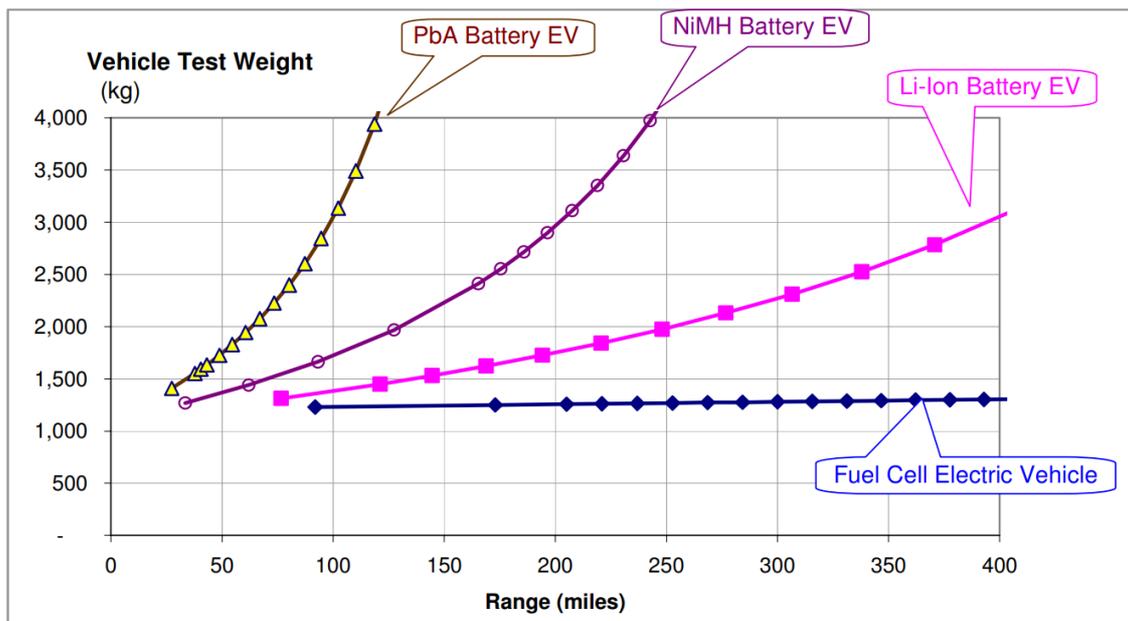


Figura 10: Energía específica de la pila de combustible y otras fuentes electroquímicas [25]



BPEV.XLS; 'Compound' AF142 3/25 /2009

Figura 11: Autonomía de vehículos de “fuel cell” comparado con otras fuentes electroquímicas [25]

Como resulta obvio, a una mayor densidad energética, mayor será la energía potencial que se pueda almacenar en la fuente de energía. En la figura 11 se compara la autonomía de las diferentes fuentes de energía electroquímicas con respecto a los distintos pesos de vehículos eléctricos. Se aprecia una clara ventaja de la pila de combustible con respecto a las demás fuentes de energía electroquímicas. Además, se puede observar que, cuanto más peso tenga el vehículo, más eficiente es la pila de combustible con respecto a las demás fuentes electroquímicas. Por lo tanto, este caso sería aún más interesante para vehículos de carga y transporte público.

Aunque se ha avanzado mucho en esta área, la pila de combustible no se adapta demasiado bien al cambio en la demanda de intensidad y opera de una manera más eficiente cuando la demanda es fija y continua. De hecho y como se ha expuesto previamente, los coches actuales que operan con esta tecnología necesitan de una pequeña batería de litio para absorber estos cambios y para almacenar la energía de la carga regenerativa.

Por este motivo se ha decidido darle el uso de “range extender”, esto es, durante el periodo de recarga de la batería de litio, la pila de combustible ofrecerá la intensidad de forma continua durante un largo periodo.

El hidrógeno tiene un futuro prometedor en el sector automovilístico. El problema principal viene de la ausencia total de infraestructura y de la centralización de los estudios en las tecnologías de litio. Es por esto por lo que, al incluir la pila de combustible como un “range extender” y no ser necesaria para la conducción del vehículo, se promueve una introducción factible de la tecnología en el mercado con las ventajas que ello conlleva [25].

### 4.3 Supercondensadores

Los supercondensadores, con el fin de aumentar la eficiencia y, sobre todo, la vida útil de la batería de litio, serán los encargados de absorber la energía de los picos de potencia del sistema, evitando, así, cambios bruscos en la intensidad de la batería de litio principal y la consiguiente aceleración de su desgaste a lo largo del tiempo.

Como ya se ha mencionado, los supercondensadores son excelentes absorbiendo y ofreciendo una gran cantidad de energía en tiempos cortos. Esta es una característica que, ni la batería de litio, ni mucho menos la pila de hidrógeno, son capaces de manejar siendo tan eficientes como un supercondensador.

Por lo tanto, será en periodos de la conducción específicos, como grandes aceleraciones o frenadas regenerativas, donde los supercondensadores entrarán en funcionamiento para reducir el estrés en las otras fuentes de energía y maximizar la eficiencia del sistema eléctrico del vehículo.

Los supercondensadores, al combinarlos con una batería de litio, son capaces de alcanzar reducciones en los picos de la intensidad demandada por el sistema de entre un 49%, usando supercondensadores pequeños de 600 faradios, y un 80%, usando supercondensadores de mayor tamaño de 600 faradios. Esto tiene el potencial de aumentar drásticamente la vida útil de una batería de litio, ya que existe una relación entre la reducción del estrés en una batería electroquímica y el aumento de su vida útil. Entre un 137% y un 253%. [26]

#### 4.4 Impacto medioambiental

Otro gran factor que motiva este proyecto es la contaminación de las distintas fuentes de energía. No se va a entrar en detalle en este apartado, pero sí es necesario hacer una breve mención de los detalles más generales de la contaminación que generan de las distintas fuentes de energía usadas en este proyecto.

La fuente de energía más comercializada actualmente, las baterías de litio, tienen un importante impacto en el medio ambiente, no solo debido a la fabricación de las celdas de ion litio, ya que al fin y al cabo, las pilas de combustible y los supercondensadores requieren de una fabricación que también tiene un impacto en el medio ambiente; sino por el minado del litio, elemento que no necesariamente abunda en el planeta, y por la gran contaminación que se genera cuando las baterías de ion litio se consideran “muertas” y el riesgo de almacenaje que la gran inestabilidad y riesgo de combustión que el litio genera [27].

Los supercondensadores tienen una complejidad de fabricación que también los hace contaminantes, así como su almacenaje al final de su vida útil. La diferencia con respecto a las baterías de litio es que los supercondensadores, como ya se ha explicado, poseen una vida útil muy superior a la de las baterías de litio y sus componentes no son tan contaminantes como los que forman parte de estas últimas.

La fuente de energía que tiene el mayor potencial como fuente de energía “limpia” es la pila de combustible o “fuel cell”. Este sistema no solo apenas genera contaminación, ya que como se ha podido comprobar su único producto de la reacción es el agua, aparte de que los residuos que se generan al final de su vida útil tienen el potencial de ser reciclados completamente, sino que también usa el elemento que, no solo es el más abundante en el planeta, sino que es el más abundante en el universo [28].

El hidrógeno además se puede conseguir como subproducto de otros procesos industriales como la producción en masa de gas natural, o en procesos beneficiosos para el medio ambiente como la reacción del agua con el monóxido de carbono, de alto riesgo para la salud y el medio ambiente, formando dióxido de carbono e hidrógeno. Evitando

así el consumo energético que generaría la producción de hidrógeno a partir de la separación de elementos del agua [29].

Es por esto, que en este proyecto no solo se busque suplantar una tecnología introduciendo, de manera poco disruptiva y asequible, con otra distinta, sino que también es importante la búsqueda de un modelo que permita el aumento de la vida útil de las fuentes de energía que generan un mayor impacto en el medio ambiente, así como un potencial reciclaje de las mismas.

## 5 MODELIZACIÓN

El proyecto se ha realizado en MATLAB Simulink, la herramienta de simulación de MATLAB. Parte del trabajo, principalmente la sección del cálculo de parámetros de demanda del sistema eléctrico del vehículo, se ha modelizado directamente en Simulink, mientras que la sección del cálculo de los parámetros de las fuentes de energía se ha realizado en una combinación de este último junto con Simscape. Simscape es un entorno de MATLAB Simulink que permite crear modelos de sistemas físicos, interconectando bloques de este entorno, como motores eléctricos, actuadores hidráulicos, etc [30]. Este entorno será de ayuda a la hora de simular las fuentes de energía del modelo.

### 5.1 Perspectiva general

El nivel superior del proyecto se compone de dos partes, la primera [19] siendo el cálculo de potencia demandada por el motor y la segunda la simulación de los distintos sistemas de fuentes de energía planteados a partir de la potencia demandada.

La simulación comienza con un ciclo NEDC de varios a elegir según los requisitos de la simulación, además de la opción de evaluar el sistema a una velocidad constante en kilómetros por hora.

Un display mostrará la distancia instantánea según el modelo se va ejecutando hasta mostrar la final cuando el modelo ya ha sido ejecutado del todo. Esto se consigue mediante la integración de la velocidad impuesta y ofrecerá información crítica de la autonomía del vehículo.

A partir de la velocidad y los datos del motor y del vehículo, se procede a hallar la potencia instantánea. Esta potencia es la potencia teórica que demanda el motor. Por este motivo es necesario calcular la potencia real con las diferentes eficiencias del sistema eléctrico.

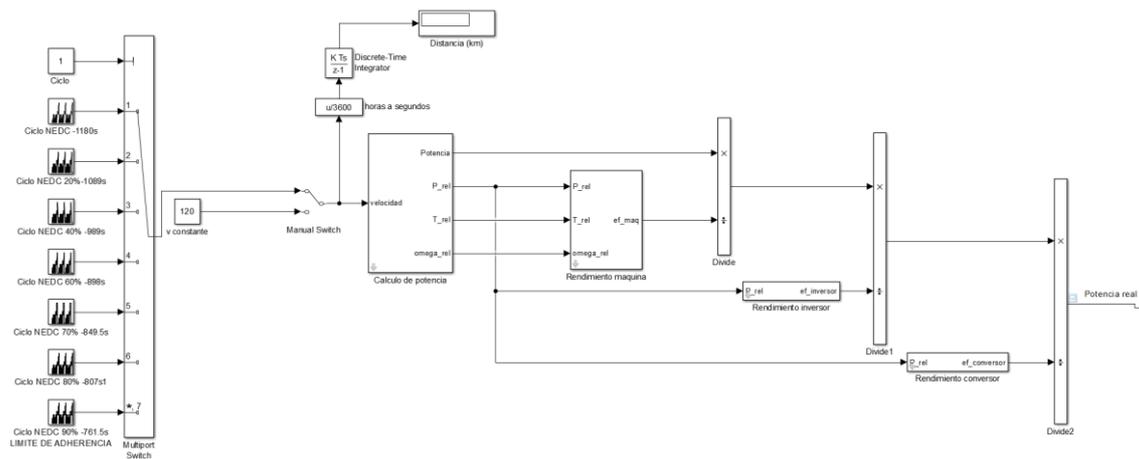


Figura 12: Primera parte del nivel superior modelo

La segunda parte del nivel superior, que representa la parte de desarrollo principal de este proyecto, se encarga de recibir la potencia demandada por el sistema y calcular los parámetros de las fuentes de energía con tres tecnologías distintas a elegir. Para ello se ha creado un bloque en el que se ha incluido una máscara para seleccionar qué fuentes de energías se desean usar en la simulación y sus parámetros necesarios para la misma.

Dicho bloque calcula el SOC, que es la variable a tener en cuenta en este proyecto, de las tres tecnologías por separado y lo representa en un “display” del entorno de Simulink. El criterio para la parada de la simulación, en este caso en específico, es el SOC de la batería de ion litio. La simulación cesará cuando dicho SOC llegue a un valor especificado en el bloque de comparador con una constante, en este caso el SOC deseado, que parará la simulación por medio de un bloque de parada.

El bloque “scope” permitirá el estudio de la característica de descarga de cada fuente de energía por separado. Ofreciendo así, una base para modificar los parámetros del bloque de fuentes de energías según lo desee el usuario.

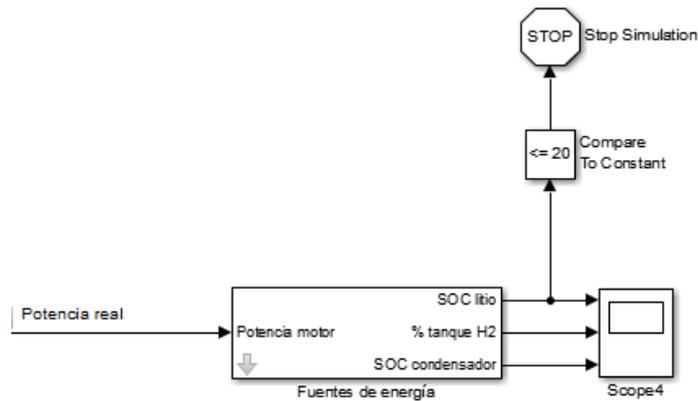


Figura 13: Segunda parte del nivel superior del modelo.

## 5.2 Cálculo de potencia

Para el cálculo de la potencia demandada por el motor a partir de la velocidad es necesario definir previamente unas constantes que determinen las características del sistema “powertrain” del vehículo. Para obtener las constantes de este proyecto se ha tomado como referencia el “powertrain” del Nissan Leaf.

Estas constantes se dividen en 3 secciones. La primera contiene las constantes relacionadas con el vehículo en sí:

Parámetros del vehículo	
masa (kg)	<input type="text" value="1500"/>
Área frontal (m2)	<input type="text" value="2.276124"/>
Coefficiente de rozamiento	<input type="text" value="0.724644/2"/>
Radio de las ruedas (m)	<input type="text" value="0.316"/>
Par nominal del motor (N-m)	<input type="text" value="280"/>
Velocidad nominal del motor (rpm)	<input type="text" value="1221"/>

Figura 14: Constantes paramétricas del vehículo a estudiar (inspiradas en el Nissan Leaf).

Para hallar la masa del vehículo es necesario introducir un valor distinto para cada sistema a simular debido a que esta cambiará según las tecnologías de fuentes de alimentación montadas en él. El resto de valores no necesitan mayor explicación.

La segunda sección se compone de los valores del ambiente que afectan a la dinámica del vehículo.

Parámetros del ambiente	
Densidad del aire	<input type="text" value="1.1"/>
Gravedad (m/s <sup>2</sup> )	<input type="text" value="9.81"/>
Pendiente del recorrido	<input type="text" value="0"/>

Figura 15: Parámetros del ambiente que afectan a la dinámica del vehículo.

La tercera y última sección se compone de los valores empíricos del vehículo.

Valores empíricos	
Relación de marcha	<input type="text" value="7.94"/>
J <sub>mot</sub> (kgm <sup>2</sup> )	<input type="text" value="1.2"/>
J <sub>kol</sub> (kgm <sup>2</sup> )	<input type="text" value="8"/>

Figura 16: Valores empíricos del vehículo a estudiar.

Para poder hallar la potencia demandada por el vehículo durante el ciclo es necesario calcular la energía necesaria para que el vehículo se mueva acorde con el ciclo o velocidad propuesta. Esta energía necesaria proviene de cuatro fuerzas distintas:

- Fuerza de propulsión
- Fuerza aerodinámica
- Fuerza de la gravedad (en pendiente)
- Fuerza de rozamiento

### 5.2.1 Energía requerida para la propulsión del vehículo

Esta es la energía que necesita el vehículo para poder superar su inercia y ser propulsado. Las variables de entrada son la masa del vehículo y la velocidad. Para hallar la fuerza de propulsión necesaria se sigue la ecuación

$$\sum F_i = m * a \quad (6)$$

Esta fuerza, en newtons, multiplicada por la velocidad dará como resultado una potencia que ha de ser multiplicada por una ganancia theta el cual sigue la ecuación

$$\frac{1 + J_{mot} * ig^2}{0,95 + J_{kol}} \frac{1}{m * Rrueda^2} \quad (7)$$

Donde  $ig$  es la relación de marchas del vehículo.

Integrando la potencia resultante se halla la energía necesaria para la propulsión.

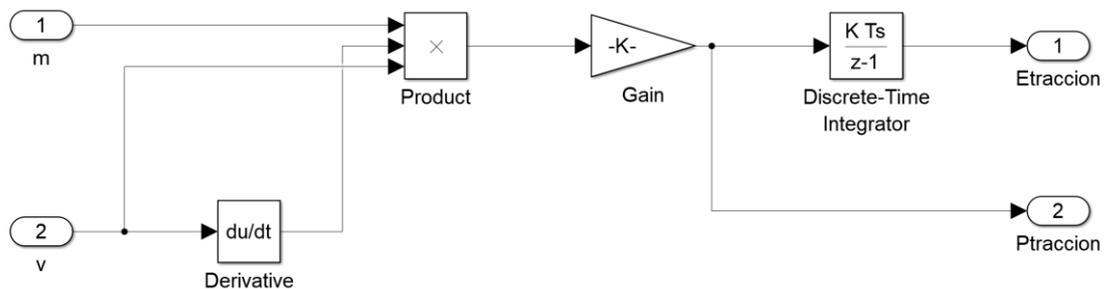


Figura 17: Modelo para el cálculo de la potencia y energía.

### 5.2.2 Energía consumida por la fuerza aerodinámica

Este modelo calcula la energía consumida por la resistencia aerodinámica cuando el vehículo está en movimiento. Se considera que la fuerza aerodinámica normal es mucho mayor que la de cizallamiento por lo que esta última se desprecia. El modelo se basa en la ecuación

$$F_{aerodinámica} = \frac{1}{2} * \rho_{aire} * A_{frontal} * C_{roz} * (v + v_v)^2 \quad (8)$$

Donde:

- $\rho_{aire}$ : densidad del aire
- $A_{frontal}$ : área frontal del vehículo
- $C_{roz}$ : Coeficiente de rozamiento de la calzada con las ruedas
- $v$ : Velocidad longitudinal del vehículo
- $v_v$ : Velocidad del viento

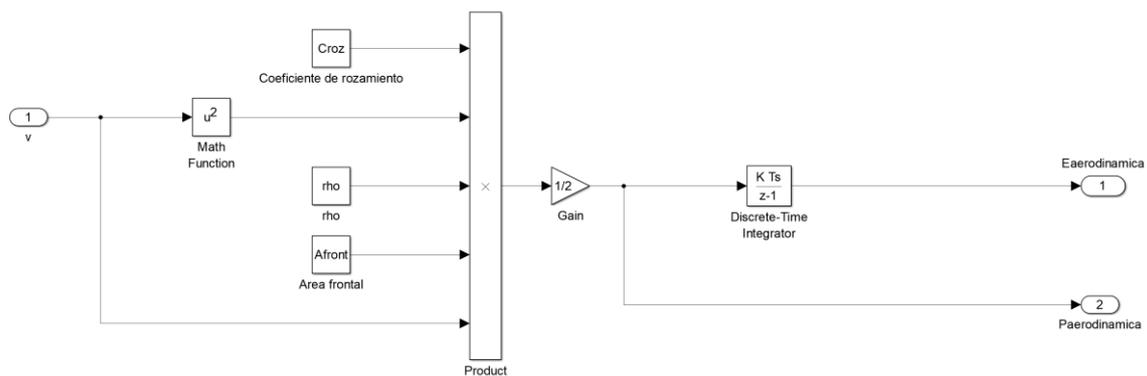


Figura 18: Modelo para el cálculo de la potencia y energía consumida por la fuerza aerodinámica

### 5.2.3 Energía consumida por la gravedad en pendiente

Esta energía es la necesaria para que el vehículo supere la fuerza ejercida por la aceleración de la gravedad cuando este está en pendiente. Destacar que si la pendiente es negativa será una fuerza que ayudará al coche a moverse. El modelo para hallar la potencia de esta fuerza sigue la ecuación

$$F_{gravedad} = m * g * \text{sen}(\text{pendiente}) \quad (9)$$

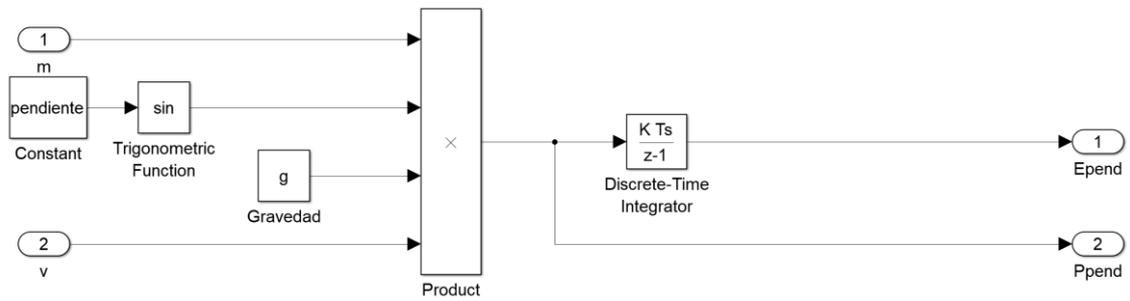


Figura 19: modelo para el cálculo de la potencia y energía debidas a la fuerza de la gravedad

### 5.2.4 Energía consumida por la resistencia a la rodadura

Esta es la energía consumida por la fuerza de rozamiento entre los neumáticos del vehículo y la calzada. El modelo para hallar la potencia necesaria para que el vehículo supere esta fuerza sigue la ecuación:

$$F_{rozamiento} = C_{rod} * m * g \tag{10}$$

Donde  $C_{rod}$  es el coeficiente de resistencia a la rodadura entre los neumáticos y la calzada, este valor suele estar entre 0,01 y 0,035.

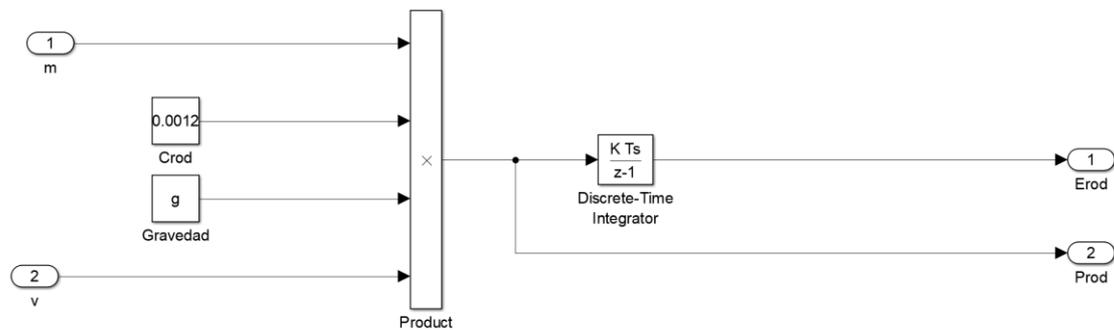


Figura 20: modelo para el cálculo de la potencia y energía debido a la resistencia por rodadura

### 5.2.5 Visión general del modelo de cálculo de potencia

Estas potencias se suman para sacar la potencia total bruta necesaria para que el coche siga el ciclo propuesto superando las fuerzas de resistencia al movimiento expuestas.

Además, a partir de las energías calculadas de estas cuatro fuerzas, se obtienen la potencia relativa ( $P_{rel}$ ), el torque o par relativo ( $T_{rel}$ ) y la velocidad del motor relativa ( $\omega_{rel}$ ). Estos tres valores serán necesarios para el cálculo de los rendimientos del sistema para, con ellos, obtener la potencia neta demandada por el sistema. El modelo para el cálculo de estos tres valores sigue las ecuaciones

$$P_{rel} = T_{rel} * \omega_{rel} \quad (11)$$

$$T_{rel} = \frac{T_{instantaneo}}{T_{nominal} * ig} \quad (12)$$

$$\omega_{rel} = \frac{\omega_{instantaneo} * ig}{\omega_{nominal}} \quad (13)$$



### 5.3 Rendimientos

La potencia hallada mediante los cálculos de simulación explicados en el apartado 5.2 no es la potencia real demandada por todo el sistema y que las fuentes de energía proveen. Esta es la potencia bruta calculada a partir del ciclo y de la dinámica del vehículo.

Existen tres rendimientos claves que son necesarios para el cálculo de la potencia real que se demanda a las fuentes de alimentación.

#### 5.3.1 Rendimiento de la máquina

Una máquina es un componente electromecánico, que convierte energía eléctrica en energía cinética o viceversa. Idealmente estos aparatos no tienen pérdidas, pero en el mundo real existen diferentes factores que son causa de pérdidas en la máquina eléctrica. Las sumas de estas pérdidas se pueden medir como la relación entre el valor de potencia de entrada del motor y el de salida. Esta relación es el rendimiento de la máquina.

La ecuación para el cálculo del rendimiento de la máquina eléctrica es la siguiente.

$$\eta_{maquina} = \frac{P_{rel}}{P_{rel} + m_1 * T_{rel}^2 + m_2 * \omega_{rel}^{1.8}} \quad (14)$$

Las constantes empíricas m1 y m2 también se han tomado de la máquina del Nissan Leaf y se pueden cambiar en la máscara del bloque de rendimiento de la máquina.

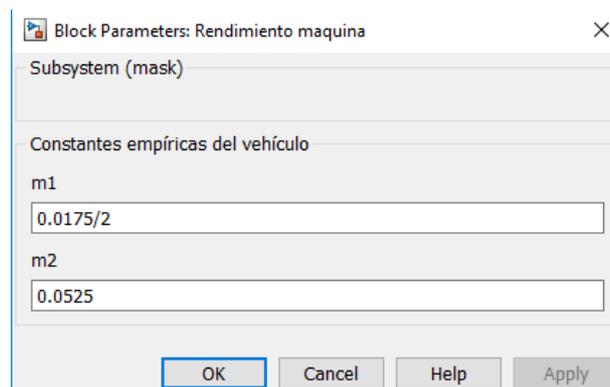


Figura 22: Máscara del bloque de rendimiento de la máquina con los valores empíricos.

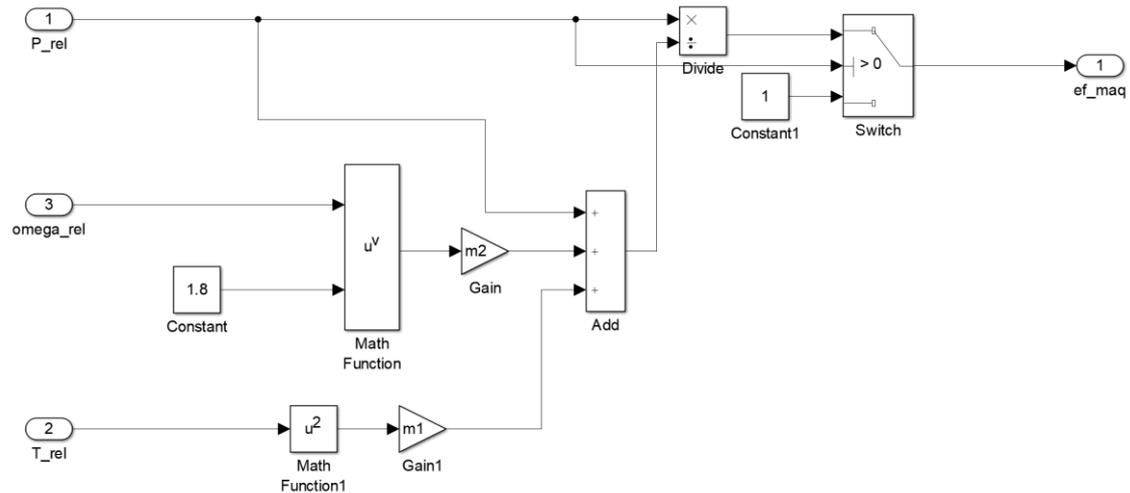


Figura 23: Modelo para el cálculo del rendimiento de la máquina eléctrica.

### 5.3.2 Rendimiento del inversor

El inversor es uno de los componentes electrónicos principales del sistema de potencia de un coche eléctrico. Un inversor es un dispositivo que se encarga de convertir la corriente monofásica que llega de la fuente de energía a trifásica para alimentar el motor, así como la inversa.

Existe una gran cantidad de topologías y de esquemas de diferentes inversores en el mercado. Este proyecto se limita a estudiar las capacidades de las distintas tecnologías para fuentes de alimentación. Por este motivo y con el fin de simplificar el modelo, se usará una ecuación general de rendimiento para el inversor de este modelo.

$$\eta_{inversor} = \frac{P_{rel}}{i_1 * P_{rel} + i_2} \quad (15)$$

Al igual que el bloque del rendimiento de la máquina, el del rendimiento del inversor también tiene una máscara que permite cambiar los valores empíricos,  $i_1$  e  $i_2$  para acomodarlos a distintos tipos de vehículos.

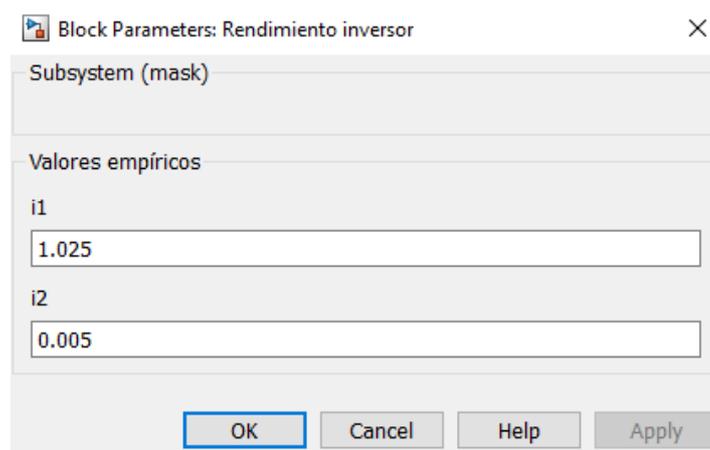


Figura 24: Máscara para el bloque del rendimiento del inversor con las constantes empíricas del mismo.

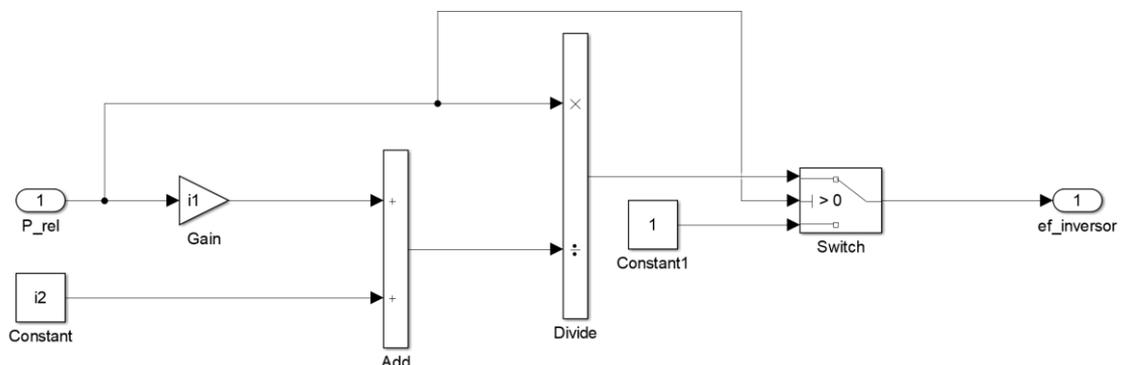


Figura 25: Modelo del bloque para el cálculo del rendimiento del inversor.

### 5.3.3 Rendimiento del conversor

El conversor, en este caso un DC/DC, es un aparato que altera el valor de un voltaje de llegada. Normalmente, el voltaje al que opera la máquina eléctrica es distinto del que provee la fuente de alimentación del vehículo, por este motivo es necesario cambiar su valor a uno que se adecúe al motor.

Además, las fuentes de energía no ofrecen un valor de voltaje constante, sino que este varía dependiendo de factores como el estado de carga, la temperatura, el estado de salud, vida útil, etc.; como se puede comprobar en la sección 2 de este proyecto.

El cálculo del rendimiento del conversor es muy similar al del inversor, y sigue la ecuación:

$$\eta_{conversor} = \frac{P_{rel}}{c_1 * P_{rel} + c_2} \quad (16)$$

Donde  $c_1$  y  $c_2$  son valores empíricos del sistema y, como en los anteriores bloques, se pueden ajustar por medio de una máscara. Los valores usados en este modelo se pueden ver en la figura

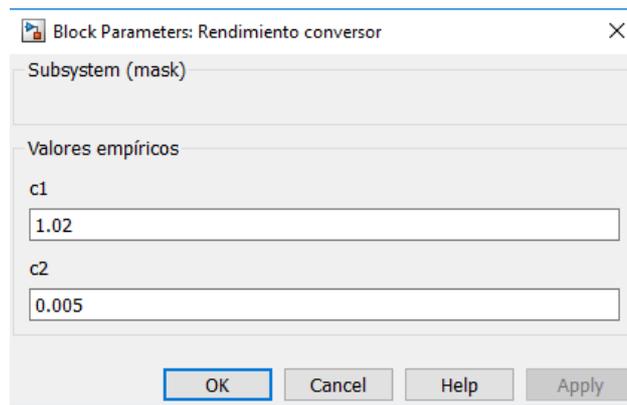


Figura 26: Máscara del bloque de rendimiento del conversor con los valores empíricos necesarios para su cálculo.

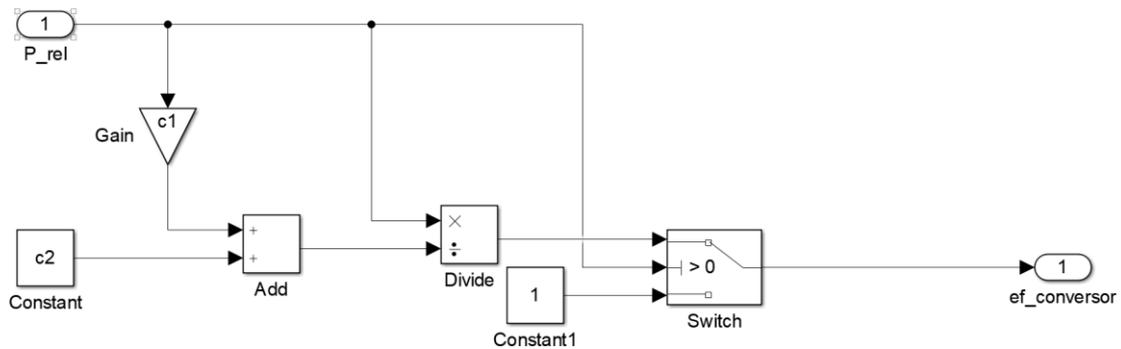


Figura 27: Modelo del bloque para el cálculo del rendimiento del conversor del vehículo.

## 5.4 Fuentes de energía

En este proyecto se han planteado varios tipos de combinaciones usando las tres fuentes de energía analizadas, con el fin de crear y optimizar un sistema de distribución de energía entre los distintos tipos de fuentes de energía.

El bloque incluye los tres tipos de tecnologías mencionados además de un sistema de distribución energética, tanto para carga como descarga de las mismas, orientado a la batería de litio y el bloque de supercondensadores. También incorpora otro bloque para el apoyo a la batería de litio con la pila de combustible.

### 5.4.1 Análisis de la máscara del bloque

Por medio de la máscara creada para este bloque se pueden cambiar los datos necesarios para la parametrización de las fuentes de energía, así como de los sistemas de distribución energética.

La primera parte de la máscara permite al usuario seleccionar qué fuentes de energía, a parte de la batería de litio, se desean usar en combinación con esta última.

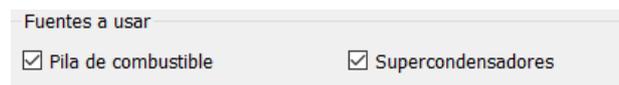
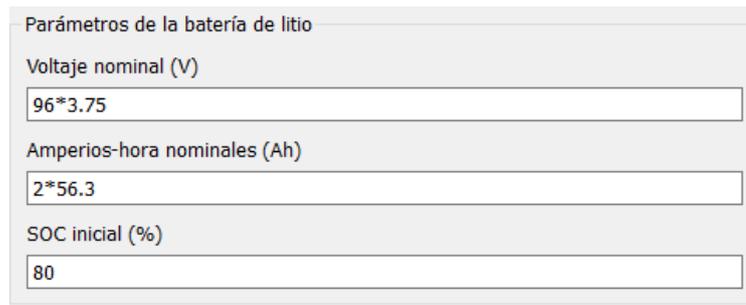


Figura 28: Primera parte de la máscara, selección de las fuentes a usar.

La segunda parte engloba los parámetros nominales de la batería de ion litio. Estos son tres, el voltaje nominal, los amperios-hora y el SOC inicial de la batería. Es importante recordar que las baterías de litio no operan entre los SOC de 100% y 0% sino que lo hacen en un rango acortado. Este rango puede oscilar dependiendo de la tecnología de litio usada, en este modelo se ha concretado un 80% como límite superior y 20% como límite inferior. El voltaje nominal y los amperios-hora se han obtenido de la batería del Nissan Leaf del año 2018.

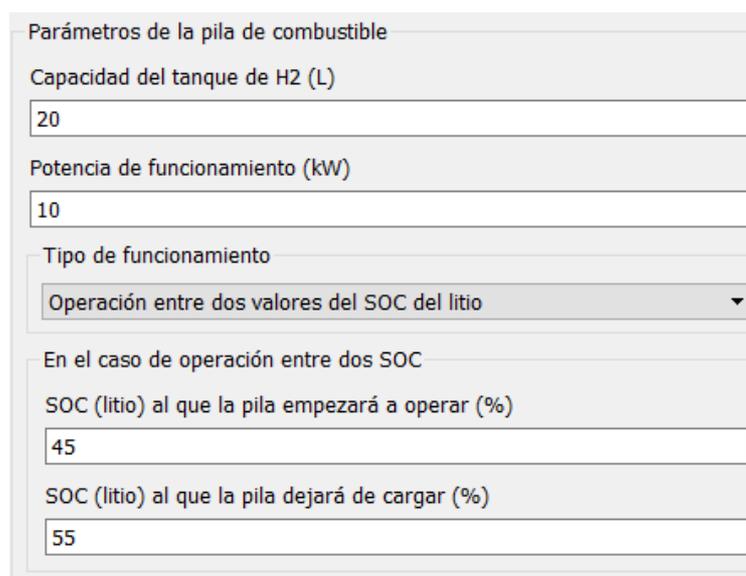


Parámetros de la batería de litio	
Voltaje nominal (V)	96*3.75
Amperios-hora nominales (Ah)	2*56.3
SOC inicial (%)	80

Figura 29: Segunda parte de la máscara, parámetros de la batería de litio.

La tercera parte de la máscara engloba todos los parámetros relacionados con la pila de combustible, empezando por la capacidad del tanque de hidrógeno en litros. También se puede modificar la potencia de funcionamiento de la pila de combustible, que va directamente relacionada con la intensidad de funcionamiento de la misma. Esto se ha realizado de esta manera porque, como se ha mencionado anteriormente, la pila de combustible es más eficiente si sin grandes cambios en la potencia demandada.

Se incluye también el tipo de funcionamiento de la pila. Esta puede operar a una intensidad constante durante toda la simulación y desde el momento de arranque del vehículo o bien puede hacerlo entre dos valores del SOC de la batería de litio. Esto último funciona de tal manera que cuando la batería de litio baje hasta un cierto SOC, descrito también en la máscara, la pila de combustible entrará en funcionamiento y no cesará hasta que el SOC de la batería de litio alcance un valor definido, también, en la misma máscara.



Parámetros de la pila de combustible	
Capacidad del tanque de H2 (L)	20
Potencia de funcionamiento (kW)	10
Tipo de funcionamiento	Operación entre dos valores del SOC del litio
En el caso de operación entre dos SOC	
SOC (litio) al que la pila empezará a operar (%)	45
SOC (litio) al que la pila dejará de cargar (%)	55

Figura 30: Tercera parte de la máscara, parametrización de la pila de combustible y la operación de la misma.

La última parte de la máscara engloba todos los parámetros relacionados con los supercondensadores. El primer valor a parametrizar es la capacitancia, en faradios, de los supercondensadores. Después se define el voltaje nominal, así como el número de condensadores conectados en serie y en paralelo.

Por último, se definen los valores del sistema de distribución energética relacionado con los supercondensadores. Estos son el valor de la potencia, por encima de la cual los supercondensadores se encargan de suministrar la energía, la fracción de la potencia regenerativa del coche que se provee a los supercondensadores para la carga de los mismos y el SOC de los supercondensadores a partir del cual se empiezan a recargar por medio de la frenada regenerativa del vehículo.

Parámetros de los supercondensadores	
Capacitancia nominal (F)	165
Voltaje nominal (V)	48
Número de condensadores en serie	50
Potencia a la que entrarán en funcionamiento los supercondensadores (kW)	20
Fracción de la potencia de carga regenerativa	1/2.5
SOC al que se empiezan a recargar	60

Figura 31: Cuarta parte de la máscara, parámetros de los supercondensadores y su modo de operación,

## 5.4.2 Esquema del bloque

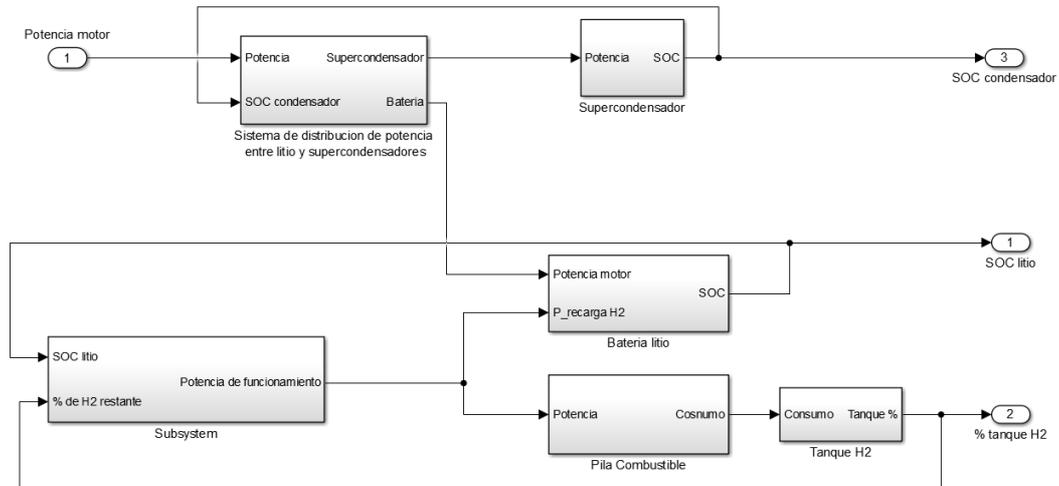


Figura 32: Modelo para el bloque de las fuentes de energía.

El bloque se compone de varias fases. La primera es la distribución de potencia calculada entre los supercondensadores y la batería de litio. La segunda es el modo de funcionamiento de la pila de combustible, si recarga constantemente durante toda la simulación o solamente entre dos valores del SOC de la batería de litio.

Una vez determinado el funcionamiento de la pila de combustible, se procede a la simulación de la descarga de la misma y de la carga de la batería de litio, además del cálculo de la capacidad restante del tanque de hidrógeno.

## 5.4.3 Litio

Para la simulación de la batería de litio se han tomado como parámetros iniciales de la misma los datos de la batería usada en el modelo Nissan Leaf del 2018. Estos parámetros se pueden ver en la sección 2 de este documento.

Para facilitar la introducción de dichos datos y como se ha mencionado en el apartado anterior, se provee al bloque de una máscara con un apartado para la introducción de los datos necesarios para el bloque de la batería de litio: Voltaje nominal de la batería, amperios-hora de la batería y el SOC inicial de la batería. Como se verá más

adelante, el SOC de la batería de litio, el cual hará parar la simulación, se introducirá en un bloque para la finalización de la simulación.

La batería de litio se ha simulado en Simscape con un bloque de su propia librería [32]. Este bloque tiene la capacidad de simular distintos tipos de baterías electroquímicas. En este caso se ha seleccionado la batería de ion de litio. Para el cálculo de las distintas variables de carga y descarga como el SOC, el voltaje o la corriente generada, el bloque usa el modelo de Shepherd.

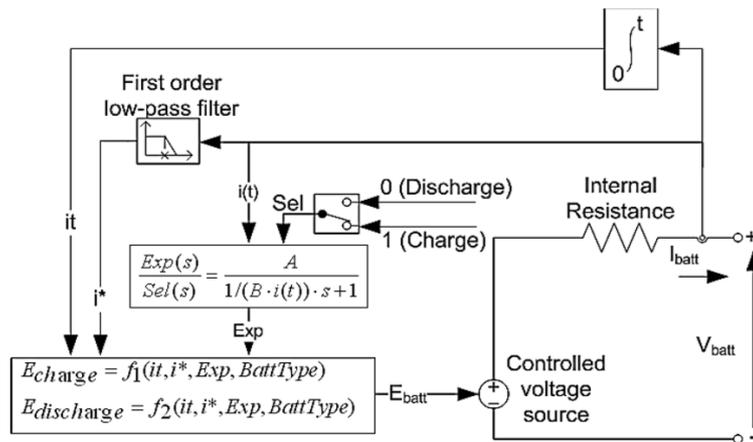


Figura 33: Modelo de Shepherd para el bloque de batería de litio de Simscape [32]

El bloque está diseñado para conectarse a una toma de corriente del entorno de Simscape. Para poder pasar de dicho entorno al de Simulink se usa el bloque “Fuente de corriente controlada”. Este bloque permite pasar de un valor de intensidad, definido como una señal de Simulink, a una conexión del entorno de Simscape.

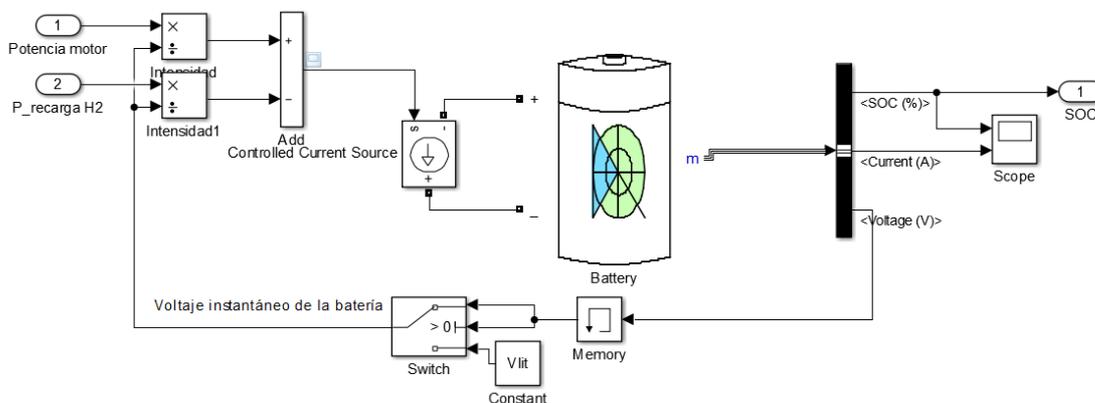


Figura 34: Modelo del bloque para el cálculo del SOC de la batería de ion litio.

A este último bloque le llega una potencia demandada por el sistema, a partir de la cual se calcula la intensidad, dividiendo la potencia calculada en el sistema de distribución de potencia entre supercondensadores y batería de litio. Esta potencia no tiene por qué ser la misma que la que llega del sistema, ya que, dependiendo del caso, parte de esta irá a los supercondensadores cuando la potencia supere un valor determinado.

En el primer instante, el voltaje calculado por el bloque de la batería de litio no tiene un valor definido, así que se introduce el voltaje nominal de la batería hasta que este empiece a generar un valor propio. Esto se logra colocando un bloque de memoria y combinándolo con un “switch” como se puede apreciar en la figura 34.

A esta intensidad calculada se le resta la intensidad que llega de la pila de combustible, en el caso de estar activada, y que da lugar a la intensidad “real” que recibe la batería de litio. A partir de la intensidad demandada el bloque de la batería de litio de Simscape se encarga de calcular el voltaje, como ya se ha mencionado en el párrafo anterior, la corriente generada y el SOC de la batería en cada instante. Debido a la naturaleza del estudio de este proyecto, es el último valor el único que tiene relevancia en el modelo ya que muestra la descarga la batería a lo largo del tiempo.

#### 5.4.4 Supercondensadores

El bloque para el cálculo del SOC de los supercondensadores es similar al de la batería de litio previamente expuesto. Existe un bloque de Simscape que simula una batería de supercondensadores. El bloque se basa en el circuito equivalente del modelo genérico de los tipos de supercondensadores más populares [33].

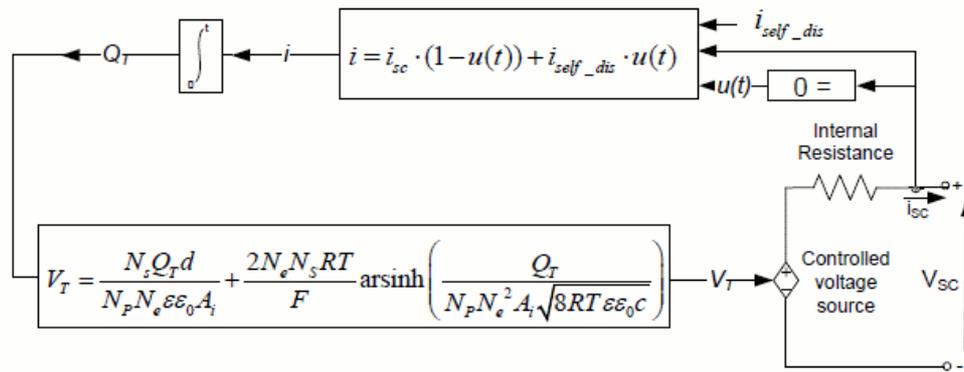


Figura 35: Circuito equivalente de un supercondensador [32]

La dinámica para la parametrización de dicho bloque es similar a la de la batería de litio en que esta también necesita una fuente de corriente controlada. A dicha fuente le llega la intensidad que es calculada dividiendo la potencia, la cual se obtiene del sistema de distribución de la misma. El voltaje instantáneo para el cálculo de la intensidad a partir de la potencia se calcula de igual manera que la batería de litio.

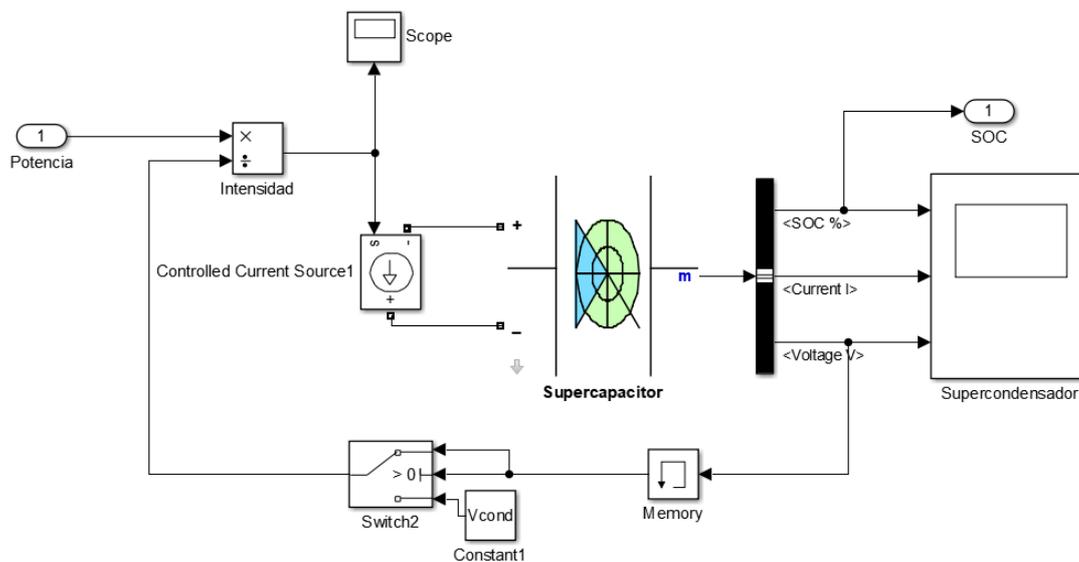


Figura 36: Bloque para el cálculo del SOC de la batería de supercondensadores.

Con estos datos el bloque de Simscape para la batería de supercondensadores se encarga de calcular el SOC de los mismos.

5.4.5 Pila de combustible

La pila de combustible se simula, también, con un bloque de Simscape diseñado para la misma. Este bloque se basa en el circuito equivalente para una pila de combustible como se muestra en la figura 37 [33].

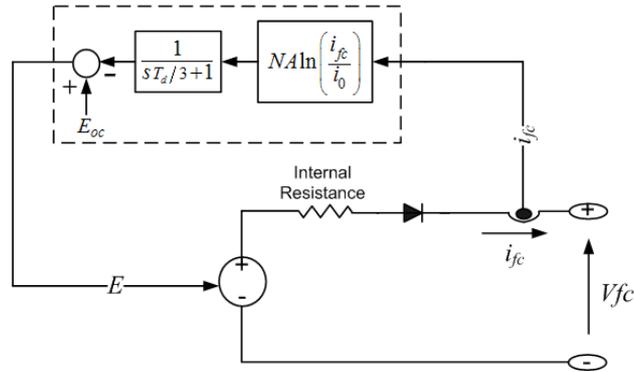


Figura 37: Circuito equivalente de una pila de combustible [32]

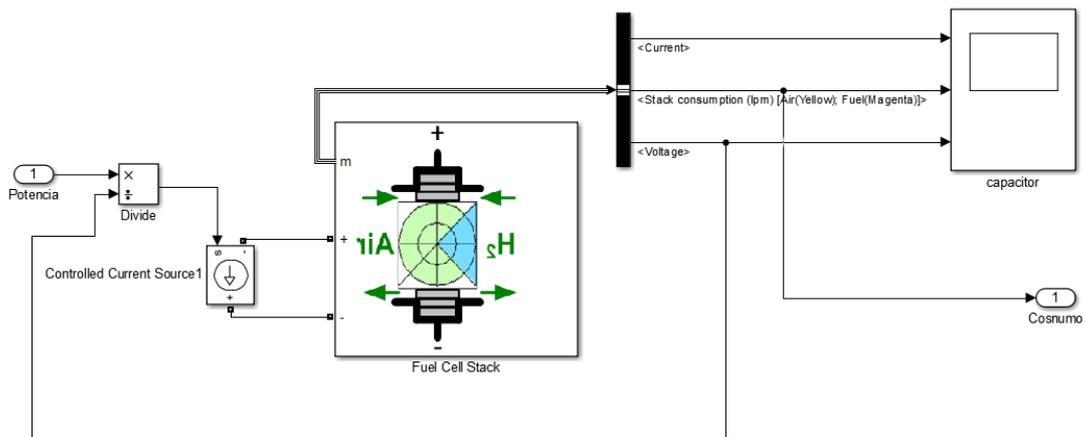


Figura 38: Bloque para el cálculo del consumo de H<sub>2</sub> de la pila de combustible.

Este bloque, aparte de calcular la corriente y la tensión, calcula el dato que es de mayor interés para este proyecto y es el consumo de hidrógeno, en litros por minuto. Este dato va incorporado en una señal junto con el consumo de oxígeno, el cual descartamos por considerar que se obtiene del aire atmosférico.

### 5.4.6 Tanque de hidrógeno

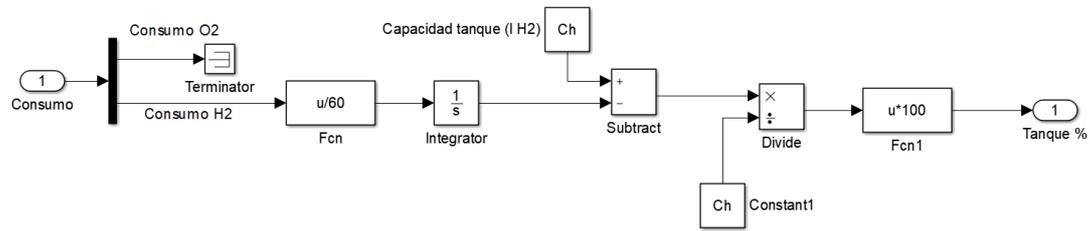


Figura 39: Bloque para el cálculo del porcentaje de hidrógeno restante en el tanque.

El bloque que simula el tanque de hidrógeno se encarga de realizar el cálculo del porcentaje de la capacidad instantánea del tanque disponible. Esto se consigue a partir del consumo de hidrógeno calculado mediante los procesos descritos en el apartado anterior.

Dicho consumo, en litros por minuto, se pasa a litros por segundo y se integra para calcular el total de litros consumidos en cualquier instante. Se resta este dato a la capacidad total del tanque definida inicialmente, en litros y a partir de la cual se calcula el porcentaje de hidrógeno disponible en el tanque.

### 5.4.7 Sistema de distribución de potencia

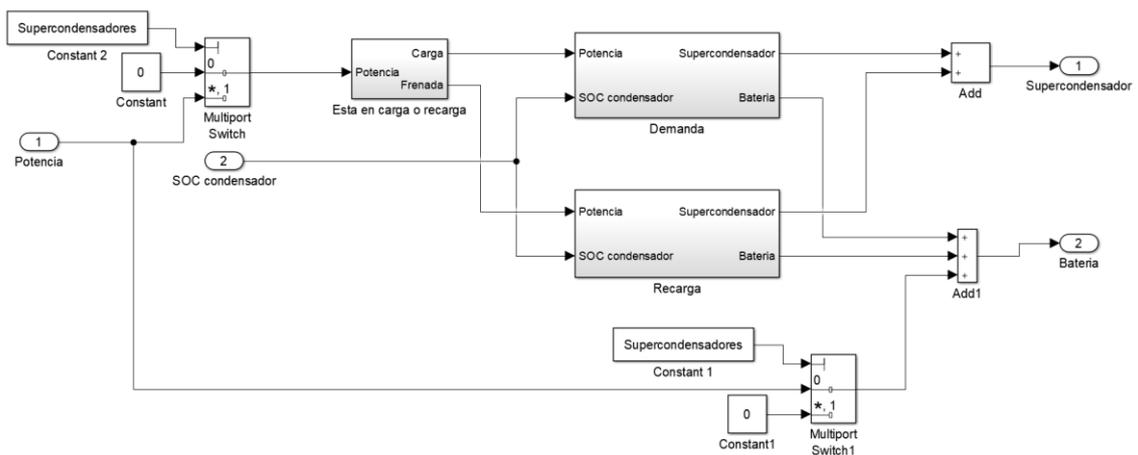


Figura 40: Modelo para el bloque de la distribución de la potencia.

Lo primero que se ha de destacar de este modelo es que hace uso de los “Switch multipuerto” para la activación o desactivación de este sistema, o lo que es lo mismo, para la activación o desactivación del uso de los supercondensadores en el sistema.

El sistema de distribución de potencia opera de dos formas. La primera es distribuyendo la potencia que recibe del sistema, cuando esta es positiva, para la alimentación del mismo por medio de las dos fuentes de energía, batería de litio y supercondensadores. La segunda entra en funcionamiento cuando la potencia es negativa, es decir, cuando el vehículo está funcionando en modo de carga regenerativa.

La selección del modo de funcionamiento correspondiente se realiza por medio de un bloque que se encarga de separar la potencia. Cuando esta es positiva la manda por un canal y cuando es negativa la manda por otro. Esta operación se lleva a cabo por medio de un bloque “if” de Simulink.

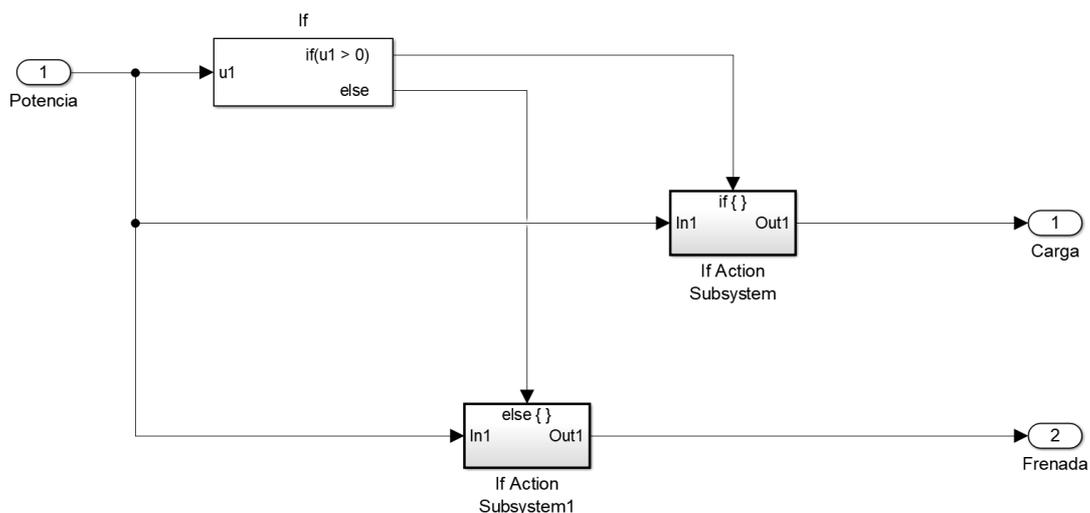


Figura 41: Bloque para el modo de funcionamiento.

El bloque de demanda se encarga de distribuir la potencia demandada, es decir, potencia positiva, bien a la batería de litio o a los supercondensadores. Esta operación se realiza siempre que el SOC de la batería de supercondensadores esté por encima del 10%.

Cuando la potencia supera el valor definido en la máscara del bloque de las fuentes de energía, dicho valor definido es el que llega a la batería de litio y toda la potencia por

encima de ese valor, es decir, la potencia instantánea menos el valor predefinido, se manda a los supercondensadores.

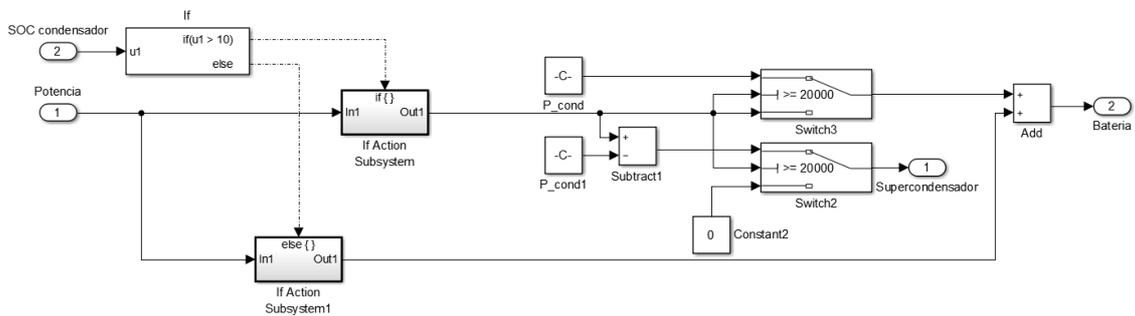


Figura 42: Bloque de la distribución cuando el sistema está en demanda.

El bloque de recarga funciona de forma similar. Cuando el sistema está en carga regenerativa, la potencia llega a este bloque. Si el SOC de los supercondensadores es menor que un valor predefinido en la máscara, una fracción de la potencia de recarga, también definida en la máscara del bloque de fuentes de alimentación, irá a la recarga de los supercondensadores, mientras que el resto irá con el fin de recargar la batería de litio.

Si el SOC de los supercondensadores es mayor que el valor predefinido, la potencia de recarga irá, en su totalidad, a la batería de litio.

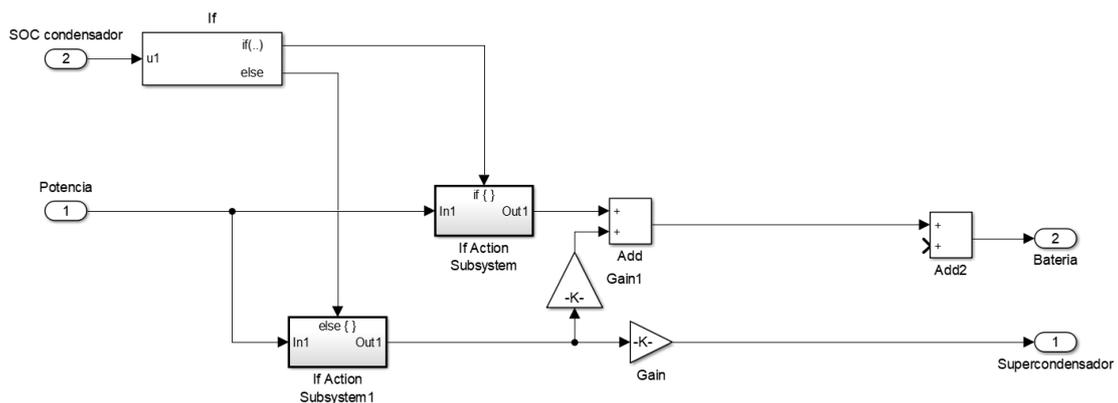


Figura 43: Bloque para la distribución de la potencia en recarga.

## 5.4.8 Distribución de la potencia de la pila de combustible

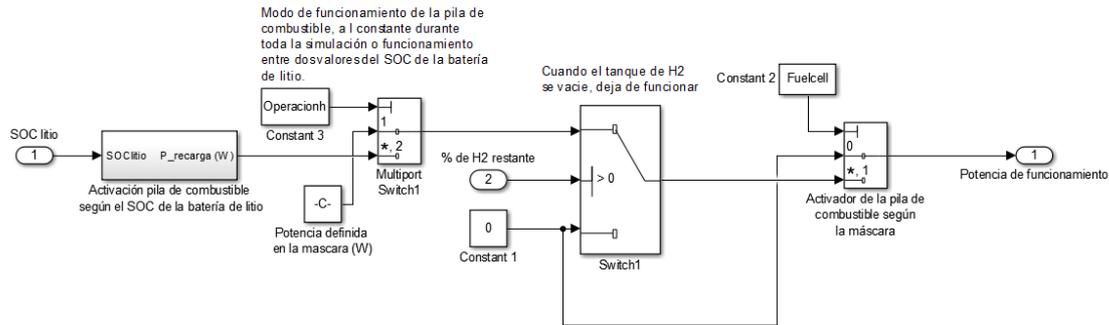


Figura 44: Modelo para la activación de la pila de combustible

La pila de combustible opera de manera que ofrece una potencia constante para la recarga de la batería de litio. La pila puede ser activada de dos formas, bien por un margen de valores del SOC de la batería de litio o bien durante toda la simulación hasta el agotamiento del combustible.

Para hacer dicha selección se hace uso de un “Switch multipuerto”, el cual, según lo seleccionado en la máscara del bloque, activa la potencia definida en la máscara durante toda la simulación o da paso a la potencia “liberada” en el bloque de activación de la pila de combustible según el SOC de la batería de litio (ver apartado 5.4.9).

Esta potencia llega a un “switch” el cual, si el valor de la capacidad restante del tanque de hidrógeno es mayor que 0, o lo que es lo mismo, si sigue habiendo hidrógeno en el tanque, pasará la potencia a la salida para que la pila de combustible funcione.

Por último, se usa un “switch multipuerto” para que la pila de combustible sea usada o no, según lo seleccionado en la máscara.

## 5.4.9 Bloque de activación de la pila de combustible según el SOC del litio

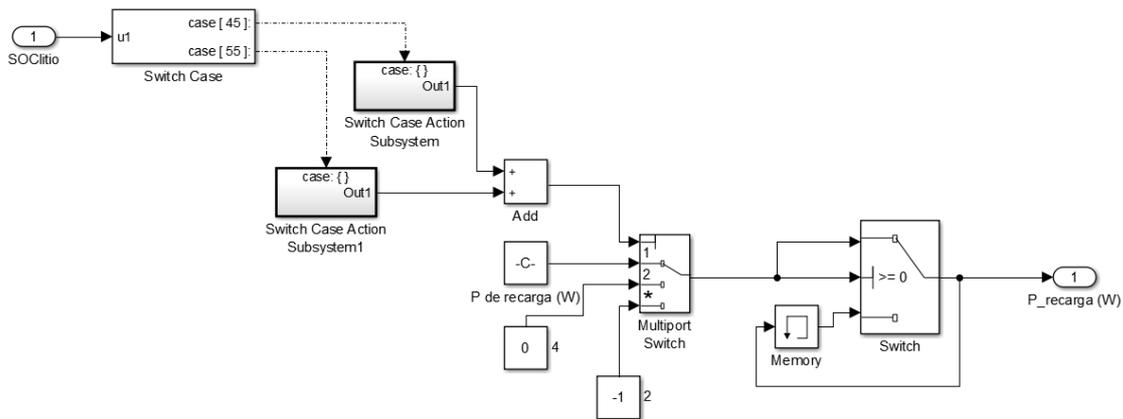


Figura 45: Modelo del bloque de activación de la pila de combustible según el SOC de la batería de litio.

La función de este bloque es ofrecer el valor de la potencia predefinido en la máscara solamente cuando el SOC de la batería haya llegado a un límite inferior. El bloque no cesará de ofrecer dicho valor hasta que el SOC de la batería vuelva a aumentar hasta un límite superior también definido.

Este modo de operación se consigue mediante un “switch” junto con un bloque de memoria, un “switch multipuerto” y un “switch case”, todos bloques del entorno de simulink. Cuando la batería se descarga hasta llegar al valor del SOC inferior definido, el “switch case” activa un 1, el cual llega al “switch multipuerto” y pasa a la salida la potencia definida en la máscara.

La potencia entonces pasa al “switch” y al bloque de memoria, una vez el SOC de la batería de litio cambie de valor, el “switch case” dará un 0, lo que hará que el “switch multipuerto” pase a la salida el valor -1. Como este valor es menor que 0, el “switch” pasará a la salida el bloque de memoria que contiene el valor de la potencia definida.

Una vez el SOC de la batería de litio llegue al límite superior el “switch case” dará un 2, esto hará que el “switch multipuerto” pase a la salida un 0, como 0 es menor o igual que 0, el “switch” pasará a la salida el valor del “switch multipuerto”, que es 0 y por lo tanto dejará de ofrecer la potencia definida y la pila de combustible dejará de funcionar.

#### 5.4.10 Parada de la simulación

La parada de la simulación se realiza con un bloque de parada. Este bloque recibe una señal lógica, es decir, un 1 (parada) o un 0 (no parada), que le llega de un bloque comparador. Este último compara la señal del SOC de la batería de litio con una constante. En este caso se ha definido la constante como 10. Así que, cuando el SOC de la batería de litio baje hasta alcanzar el 10%, la simulación parará.

## 6 RESULTADOS

### 6.1 Consideraciones para la simulación

#### 6.1.1 Velocidad

La potencia del sistema es calculada a partir de una velocidad. Dicha velocidad se simulará de dos maneras. La primera es conectando un bloque de un ciclo NEDC. En este proyecto únicamente se ha utilizado el bloque NEDC de 1180 s. Además, existirán casos en los que se realicen simulaciones a una velocidad constante.

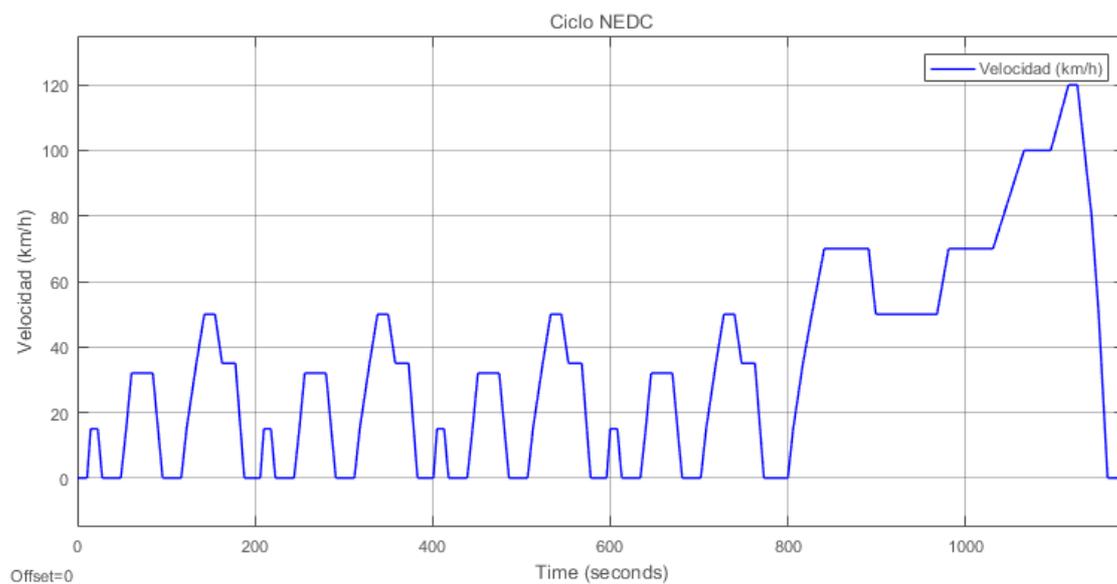


Figura 46: Ciclo NEDC

#### 6.1.2 Batería de litio

Se usarán distintas baterías de ion litio. Se tomará como base la batería del Nissan Leaf, concretamente la usada en el modelo del 2018, con un voltaje nominal de 360 V. Se modificará, en cada caso, los amperios-hora de la batería para simular distintas baterías de diferentes capacidades.

El SOC de la batería siempre se inicializará en 80 % y la simulación parará, como ya se ha explicado en el apartado 5.4.10, cuando el SOC baje hasta 20 %. Esto no solo es

debido a los límites de SOC de seguridad, los cuales son necesarios para que una batería no se sobrecargue ni se quede sin energía, quedando inutilizada, sino que también se han fijado dichos valores para tener un margen para poder comprobar fallos en el sistema y sobrecargas.

Es por tanto importante tener esto en cuenta ya que, si se define una capacidad de la batería, en realidad será usada un 60% de la misma, ya que hay un 40% de SOC teórico que no será aprovechado.

### 6.1.3 Pila de combustible

Se ha especificado la pila de combustible como una pila de 15 kW y 360 V nominales. Asimismo, la capacidad del tanque de hidrógeno, así como la potencia y el tipo de funcionamiento de la pila son los valores que se podrán variar en cada caso.

La pila de combustible irá conectada al bus de potencia del sistema mediante un convertor DC/DC. La eficiencia de dicho convertor no se ha tenido en cuenta con el fin de simplificar la simulación. La de flujo de hidrógeno en la pila de combustible se ha definido como 35 Mpa. Este valor es crucial para la correcta simulación de la pila de combustible.

### 6.1.4 Supercondensadores

Los supercondensadores se han simulado como una batería de los mismos conectados en serie. El número de supercondensadores conectados en serie, así como el valor de la potencia demandada a partir del cual entran en funcionamiento, la fracción de la energía de frenada regenerativa y el SOC al que se empiezan a recargar, son los valores que podrán ser variados, para simular distintos casos, en la máscara del bloque de fuentes de energía.

Se ha simulado la batería de supercondensadores como varios ultracondensadores conectados en serie, de 165 F y 48 V nominales cada uno. Están conectados al bus de potencia mediante un convertor DC/DC, del cual no se ha tenido en cuenta el rendimiento

para la simplificación del modelo. Estos ultracondensadores tienen una impedancia interna de 6,3 mOhms y tienen un peso de unos 13 kg cada uno [34].

### 6.1.5 Vehículo

Por razones de simplificación del modelo, se ha decidido no variar ninguno de los valores del vehículo necesarios para el cálculo de potencia del mismo. De hacer esto entrarían en juego demasiadas variables para sacar en claro los resultados. Además, el estudio de este proyecto se centra en las fuentes de energía, así que los ciclos de potencia demandada por el sistema del vehículo será la misma en todos los casos. Se han hecho las máscaras en el modelo para futuros estudios donde sí que se requiera variar estos valores.

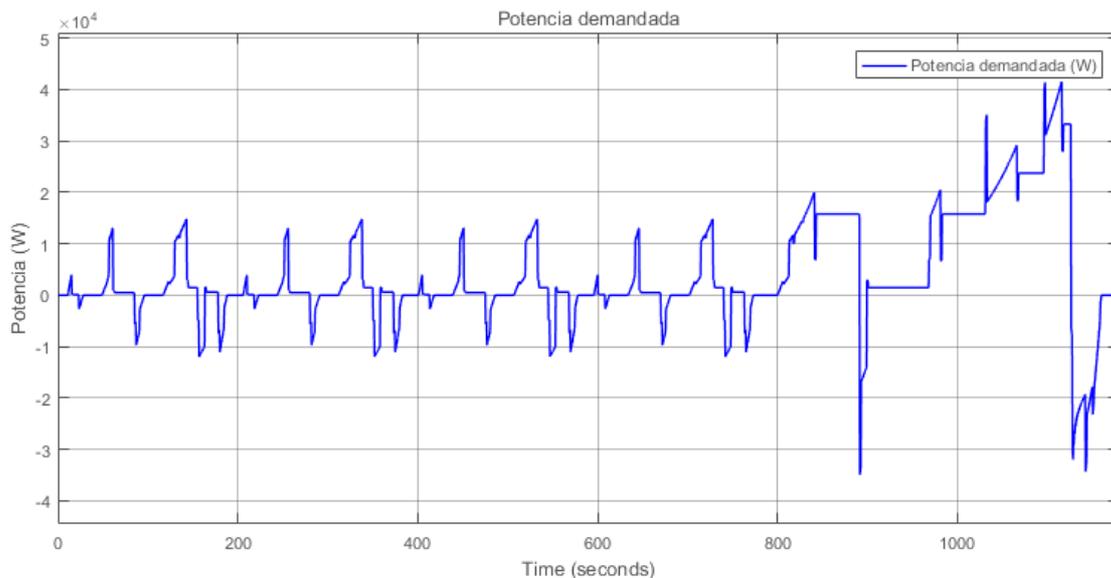


Figura 47: Potencia demandada por el ciclo NEDC

La potencia negativa de la Figura 47 corresponde a la energía generada por la frenada regenerativa del vehículo. Esta energía será distribuida, también, entre las distintas fuentes de litio como ya se ha explicado en la sección de modelización.

## 6.2 Resumen de las simulaciones realizadas

1. Simulación de la batería de litio únicamente, variando su capacidad o energía, para comprobar cómo cambia la autonomía con la capacidad y comprender su comportamiento.
2. Simulación, por medio de un ciclo NEDC, de diferentes capacidades de baterías de litio en combinación con la pila de combustible, que funciona como “range extender” a una intensidad constante desde el inicio hasta el fin de la simulación, hasta agotar ambas fuentes para comprender su comportamiento. Estimar, en cada caso, cuántos litros de hidrógeno y qué otros parámetros de la pila de combustible son necesarios transformar para conseguir un valor de autonomía determinado.
3. Simulación similar a la anterior, en esta ocasión se hará a velocidad constante en vez de un ciclo NEDC.
4. Simulación, por medio de un ciclo NEDC, de diferentes capacidades de baterías de litio en combinación con la pila de combustible, funcionando como “range extender” entre dos valores del SOC de la batería de litio determinados.
5. Simulación, por medio de un ciclo NEDC, de una determinada batería de ion litio en combinación con diferentes baterías de supercondensadores con el fin de comprender su comportamiento.
6. Simulación, por medio de un ciclo NEDC además de a velocidad constante, de un caso en concreto, combinando batería de litio, pila de combustible y supercondensadores. Los distintos valores nominales de las fuentes de energía se asumirán teniendo en cuenta las simulaciones anteriores.

## 6.3 Batería de ion litio

### 6.3.1 Simulaciones con ciclo NEDC

Se han simulado varios casos en los cuales se ha usado únicamente la batería de litio para comprender su relación entre capacidad energética, que es la cantidad de energía que puede proveer, y la autonomía del vehículo. Para ello, se ha utilizado una batería de litio con las mismas características que la batería que lleva incorporada el modelo Nissan Leaf de 2018. La batería tendrá una capacidad total de 40 kWh y operará con un voltaje nominal de 360 V.

La batería se ha inicializado con un SOC del 80%. Se ha parametrizado de esta manera, más que por problemas de seguridad y de operación de la batería, sino que se ha llevado a cabo de esta forma para tener un margen en caso de recarga inmediata tras comenzar la simulación en los casos más extremos, evitando así un techo, al usarla en combinación con las otras fuentes de energía. La simulación cesará cuando la batería se descargue hasta alcanzar un SOC del 20%.

El resultado de la simulación de la batería de ion litio con estos valores se puede ver en la Figura 48.

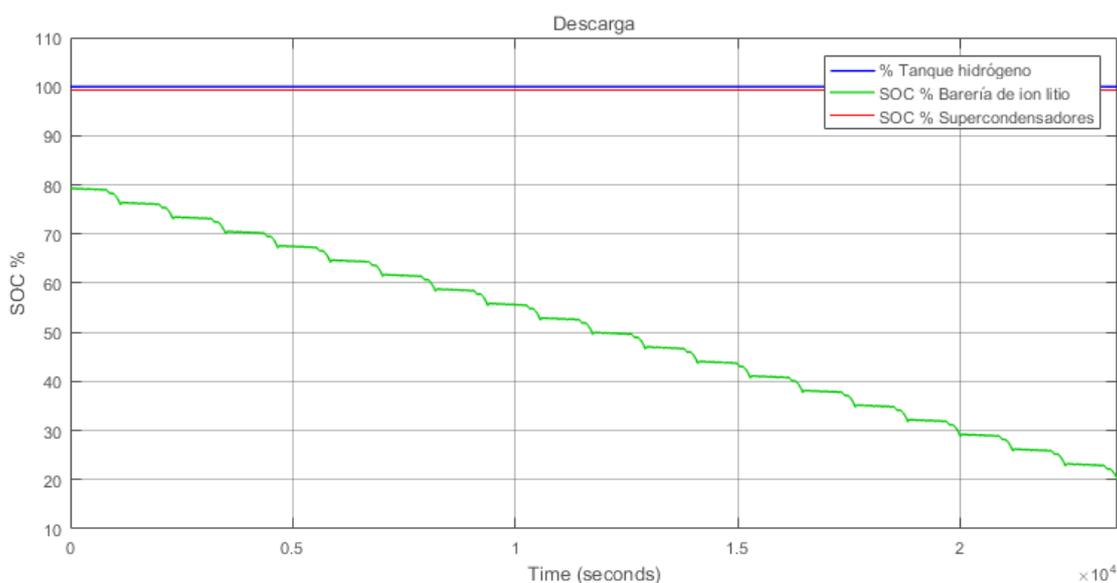


Figura 48: Perfil de descarga de la batería de ion litio de 40 kWh ante un ciclo NEDC

Si se realiza un aumento visual en la curva de descarga y se compara con la curva de potencia demandada se puede ver, claramente, el comportamiento de la batería de ion litio ante la potencia demandada:

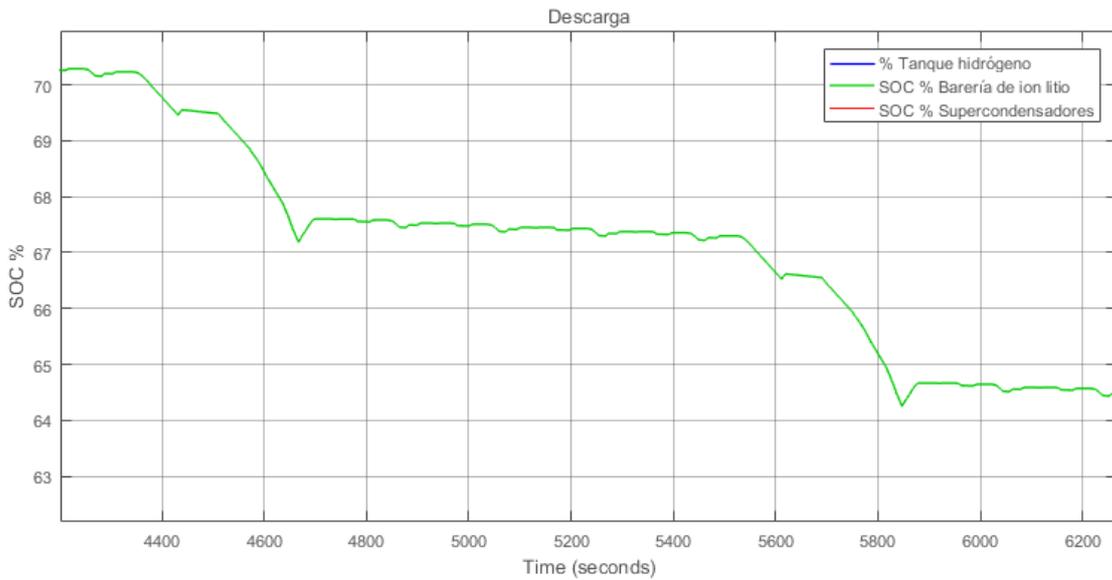


Figura 49: Zoom en perfil de descarga de la batería de ion litio de 40 kWh ante un ciclo NEDC

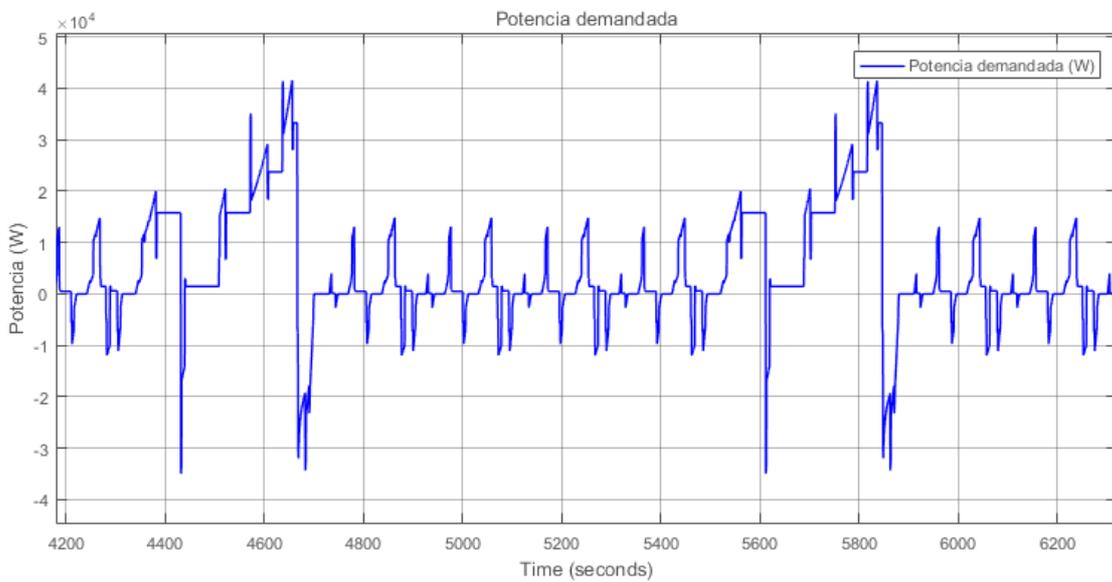


Figura 50: Zoom en la curva de potencia demandada

Se aprecia que, a mayor potencia demandada por el sistema, mayor es la velocidad de descarga de la batería de ion litio. Lo mismo ocurre cuando la demanda es negativa,

es decir, cuando se está en frenada regenerativa, a mayor potencia de recarga por frenada, mayor es la velocidad de recarga de la batería.

Esto permite una comprensión del estrés al que se somete la batería de ion litio frente a los cambios bruscos de intensidad. Las baterías, como ya se ha explicado previamente, se adaptan bien a grandes cambios en la intensidad demandada, aunque hay que tener en cuenta que los cambios bruscos en el SOC de la batería reducen su vida útil.

A continuación, se han simulado diez casos distintos, en cada uno se ha reducido la capacidad de la batería en un 10% y se ha registrado dicho valor además de la autonomía del vehículo, dando como resultado la Figura 51.

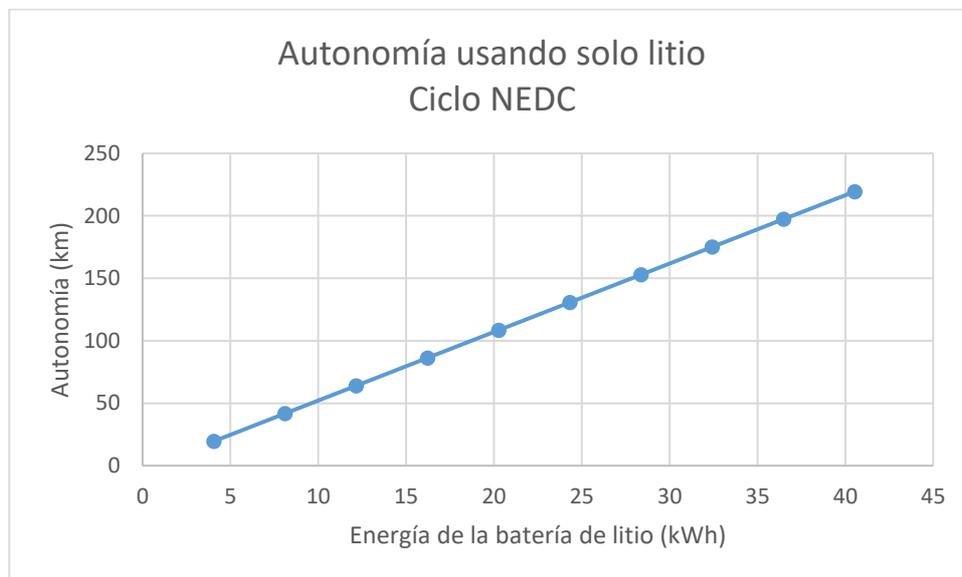


Figura 51: Variación de la autonomía del vehículo con respecto a la capacidad de la batería de litio ante una simulación con un ciclo NEDC.

Como se puede comprobar en la Figura 51, la autonomía usando la batería de litio sigue una regresión lineal con respecto a la capacidad de la misma. Más concretamente, la batería del vehículo permite recorrer 5,48 km por cada kWh aproximadamente.

## 6.3.2 Simulaciones a velocidad constante

Se han realizado las mismas simulaciones que en el anterior apartado aplicando, en este caso, una velocidad constante de 80 km/h en vez de un ciclo NEDC.

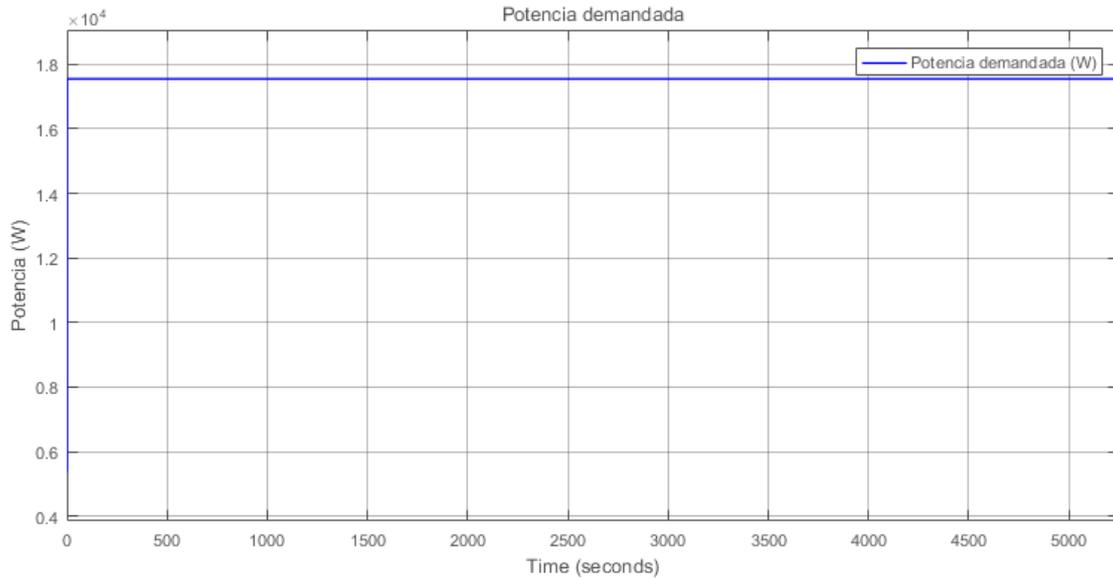


Figura 52: Potencia demandada por el sistema a una velocidad cte. de 80 km/h

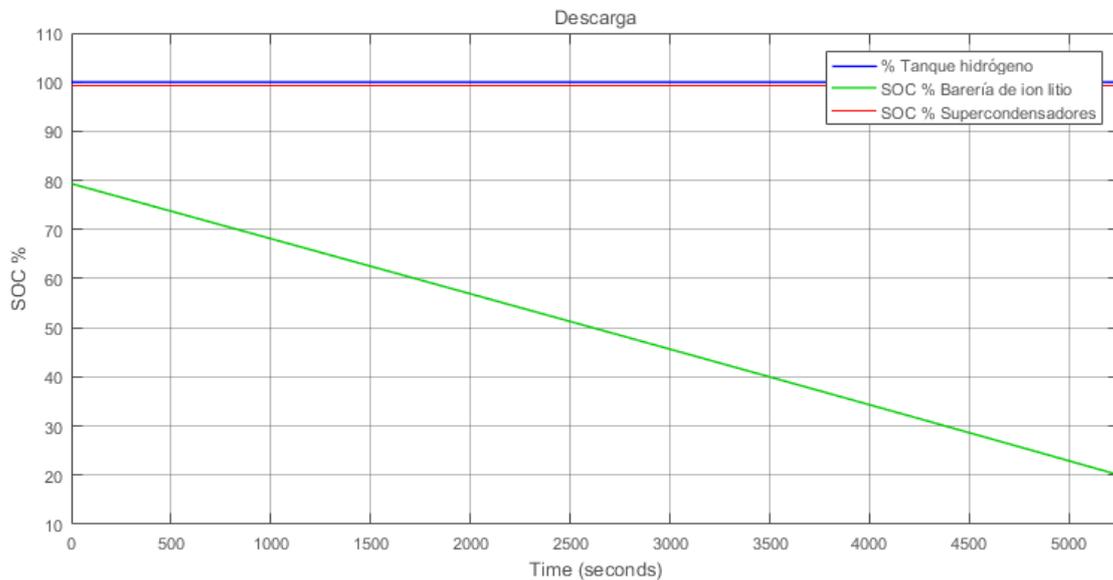


Figura 53: Perfil de descarga de la batería de litio a una velocidad cte. de 80 km/h

La Figura 53 muestra que una velocidad de 80 km/h causará en el sistema una demanda de potencia de unos 17,5 kW aproximadamente. Además, se aprecia que, a una potencia o intensidad constante de demanda, la batería se descargará al mismo ritmo durante la simulación.

Se han realizado las mismas diez simulaciones que en el apartado anterior, esto es, disminuyendo la energía de la batería de ion litio en un 10% cada vez, los resultados de autonomía de estas simulaciones se pueden observar en la Figura 54.

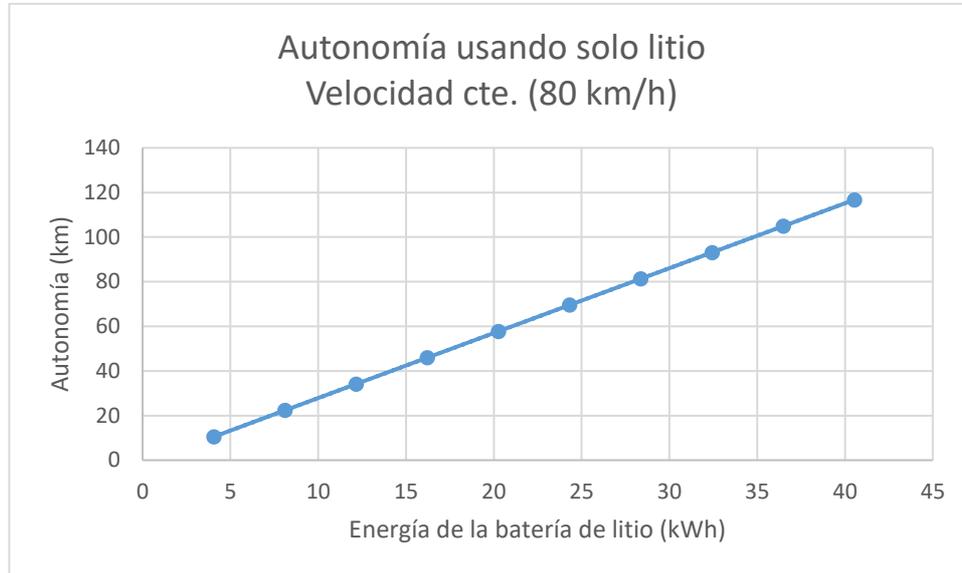


Figura 54: Variación de la autonomía del vehículo con respecto a la capacidad de la batería de litio ante una velocidad constante de 80 km/h

El comportamiento es idéntico al resultado obtenido aplicando un ciclo NEDC. La autonomía disminuye linealmente con la disminución de la capacidad energética de la batería. En este caso 2,91 km por cada kWh de la batería aproximadamente.

Es importante tener en cuenta que se ha estudiado únicamente un valor de velocidad constante, en este caso 80 km/h. De esto se puede deducir que la variación de la autonomía del vehículo, con respecto a su energía o capacidad, es lineal. El valor de distancia recorrida por cada kWh disponible no será el mismo para cada caso, ya que la potencia demandada variará con la velocidad.

## 6.4 Batería de ion litio y pila de combustible

Se han realizado varias simulaciones, combinando la batería de litio con la pila de combustible, en las cuales se han variado distintos valores, tanto de la capacidad de la batería de ion litio como de la pila de combustible. Estas simulaciones tienen como fin averiguar la cantidad de hidrógeno necesaria para alcanzar una autonomía determinada en combinación con una batería de ion litio de una capacidad determinada.

En este caso no se busca un uso práctico del sistema. Simplemente se pretende obtener una mejor comprensión del comportamiento de la combinación de estas dos fuentes de energía. El objetivo de esto es averiguar los valores de las fuentes de energía para poder crear un sistema realista que combine las dos.

### 6.4.1 Funcionamiento constante (NEDC)

Se han realizado diez pruebas de índole similar al apartado 6.3.1, donde se ha ido reduciendo la capacidad de la batería de litio en un 10% cada vez, tomando como el 100% los 40 kWh. En cada caso se ha ido aumentando la capacidad del tanque de hidrógeno, junto con su potencia de funcionamiento, hasta alcanzar la misma autonomía que ofrecía la batería de litio inicial (220 km). Más adelante se explica por qué ha sido necesario modificar estos dos valores a la vez.

En este caso, se ha seleccionado la función que permite a la pila de combustible funcionar durante toda la simulación. La potencia de funcionamiento de la pila de hidrógeno, además de la capacidad del tanque de hidrógeno, se ha parametrizado y optimizado de tal manera que el tanque de hidrógeno se agote antes de que el valor del SOC de la batería de litio llegue a su SOC mínimo, en este caso 20%. Esto se ha realizado para agotar el tanque de hidrógeno y así asegurar un aprovechamiento de toda la energía que la pila de combustible es capaz de ofrecer.

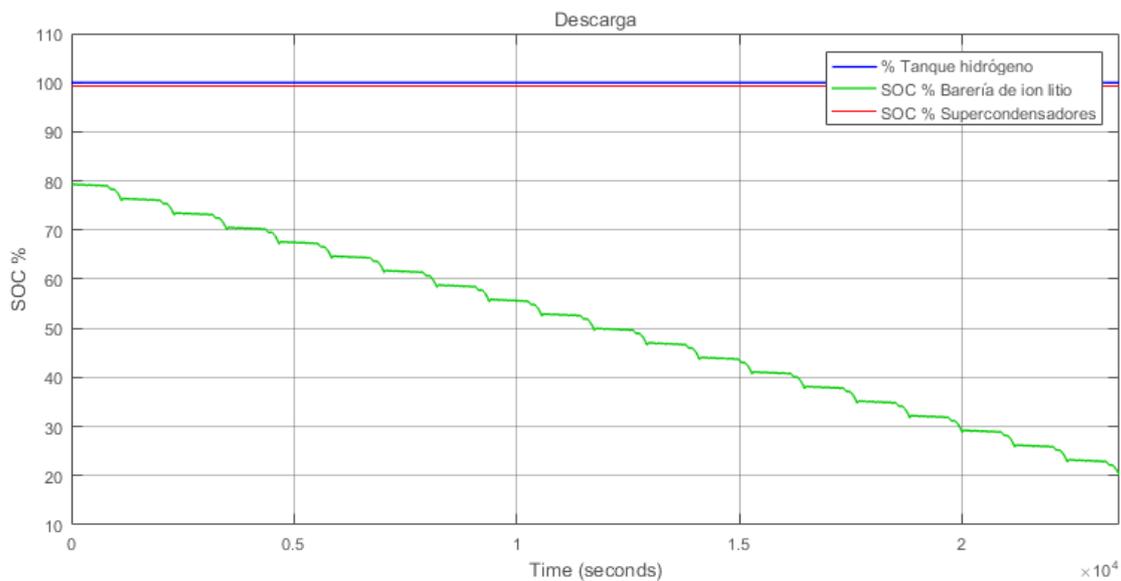


Figura 55: Perfil de descarga de la batería de litio (40 kWh) (220 km)

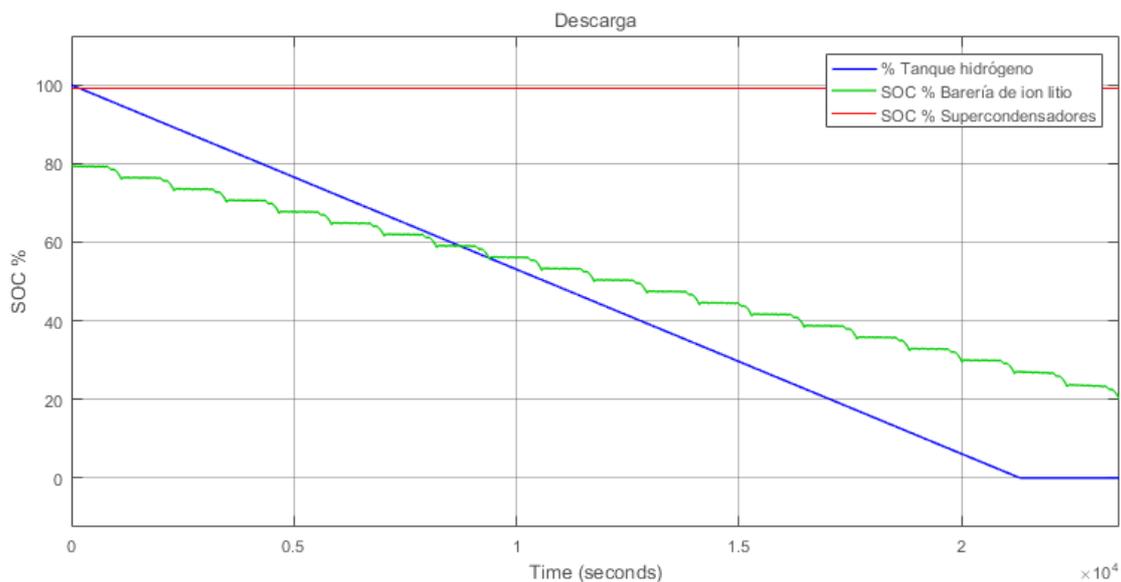


Figura 56: Perfil de descarga (NEDC) de la batería de litio (36,5 kWh) e hidrógeno, 3,8 L H<sub>2</sub>, 0,45 kW (220 km)

La batería de 36,5 kWh (90% de 40 kWh) necesitaría de una pila de combustible que pueda compensar los 3,5 kWh de diferencia. Del apartado 6.3.1 se sabe que esta batería, actuando sola, ofrece una autonomía de 197,3 km. Por lo tanto, la pila de combustible deberá compensar los 22,7 km de diferencia con la autonomía inicial. Para ello, se ha estimado que serían necesarios 3,8 L de hidrógeno.

A continuación, únicamente se varía la potencia de funcionamiento de la pila de combustible en el mismo caso:

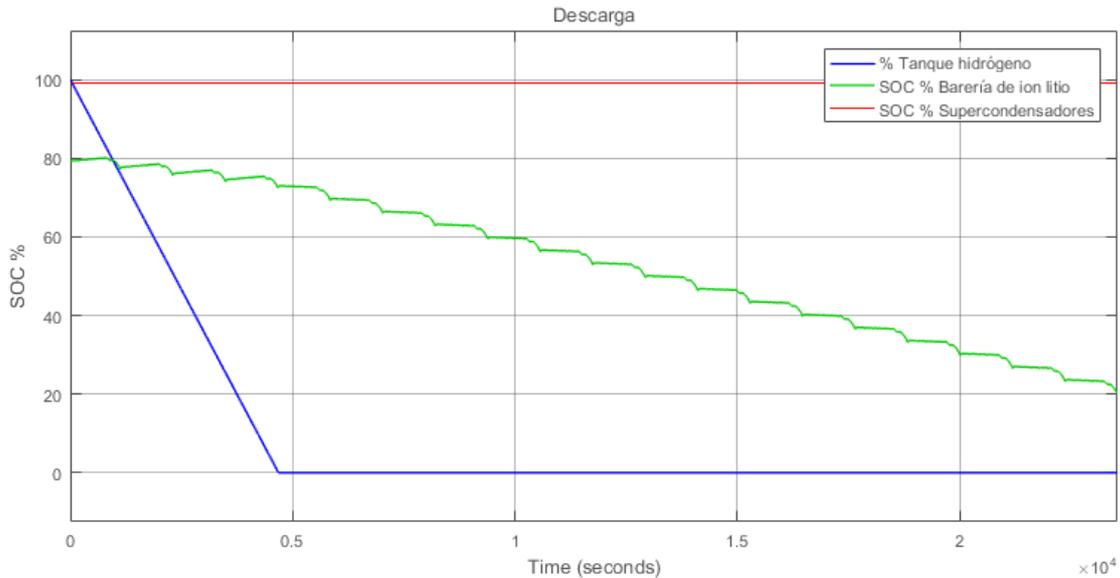


Figura 57: Perfil de descarga (NEDC) de la batería de litio (36,5 kWh) e hidrógeno, 3,8 L H<sub>2</sub>, 2 kW (220 km)

La Figura 57 muestra la misma simulación realizada con una potencia de funcionamiento de la pila de combustible distinta, en este caso 2 kW. La autonomía lograda es la misma (220 km). Esto se debe a que la energía total ofrecida por la pila de combustible es la misma en este caso que en el de la Figura 57, la diferencia recae en la velocidad en que dicha energía es liberada. Mientras la batería de litio sea capaz de absorber dicha energía, la autonomía seguirá siendo la misma.

En este caso en concreto, se aprecia una ligera recarga de la batería de litio al principio. Esto se debe a lo que se ha mencionado en el párrafo anterior. Al aumentar la potencia ofrecida por la pila de combustible, se ha sobrepasado el valor de potencia que demanda el sistema en ese momento. Esa energía, que no es aprovechada por el sistema, termina en la batería de ion litio y causa una recarga de la misma.

Que la batería de ion litio se recargue nada más empezar el ciclo no es aceptable. En este caso la batería de litio comienza con un SOC inicial de 80%, si este fuese el SOC de seguridad superior de la batería, se estaría sobrepasando y se pondría en riesgo de sobrecarga. Es por esto por lo que, como ya se ha explicado al principio del apartado 6.4, este caso de estudio es una simulación simplificada para comprender el funcionamiento de la combinación de ambas fuentes y no tiene como fin ser aplicable al mundo real.

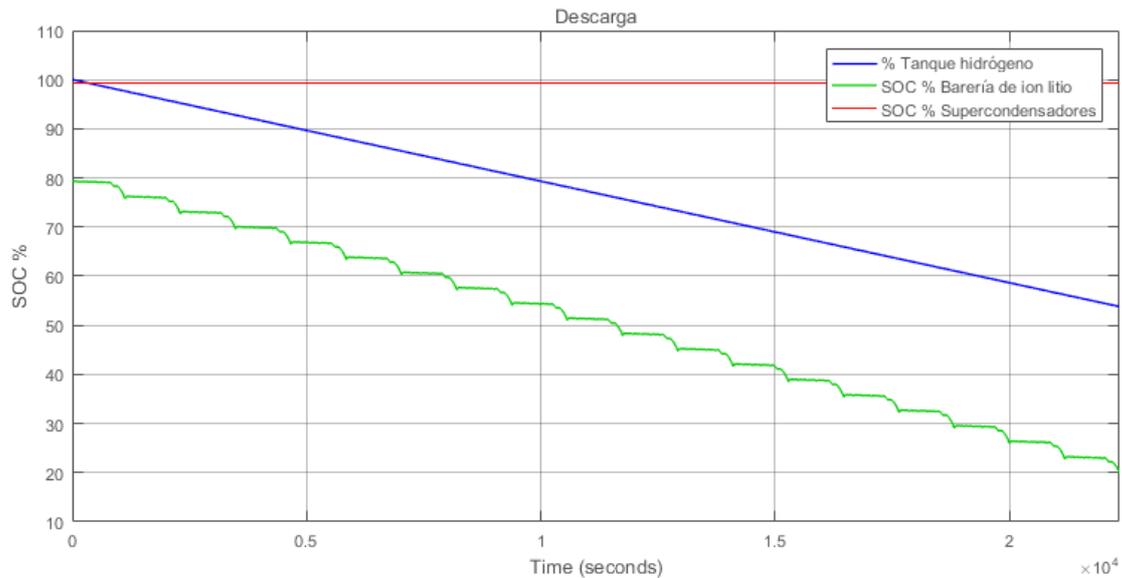


Figura 58: Perfil de descarga (NEDC) de la batería de litio (36,5 kWh) e hidrógeno, 3,8 L H<sub>2</sub>, 0,2 kW (208 km)

En la simulación realizada que muestra la Figura 58, se ha reducido la potencia de funcionamiento a 0,2 kW. Esto provoca que la pila de combustible opere a menor intensidad y por lo tanto el consumo de hidrógeno no sea tan rápido como en las otras simulaciones. Al contrario que en la simulación de la Figura 57, donde, aun aumentando la potencia de funcionamiento se alcanzaba la misma autonomía, en este caso, al no gastarse todo el hidrógeno disponible, la pila de combustible no libera toda su energía potencial. Esto causa que dicha energía no sea aprovechada por el sistema y la autonomía disminuya, de 220 km a 208 km.

Este comportamiento puede ser interesante cuando se quiera preservar el hidrógeno del que dispone el vehículo por ejemplo cuando no se disponga de un surtidor, pero sí de una toma de corriente para recargar la batería de ion litio. De nuevo, este apartado en concreto no tiene como fin buscar un uso aplicable, sino comprender mejor el comportamiento de la combinación de ambas fuentes de alimentación.

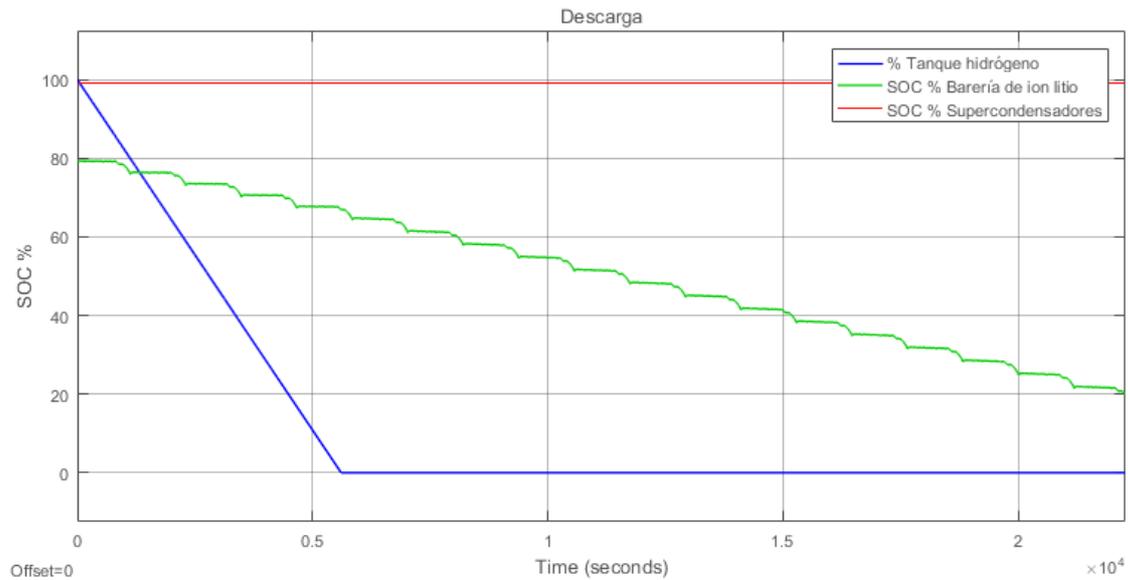


Figura 59: Perfil de descarga (NEEDC) de la batería de litio (36,5 kWh) e hidrógeno, 1 L H<sub>2</sub>, 0,2 kW (206 km)

En la simulación de la Figura 59 se ha disminuido la cantidad de hidrógeno del tanque a 1 L. Esto provoca, como era de esperar, que el tanque se vacíe antes y que se consiga una menor autonomía, de 206 km en vez de 220. Habrá que estimar el hidrógeno, en cada caso, para conseguir la autonomía deseada.

Se procede a hacer el resto de simulaciones, donde se sigue reduciendo en un 10% cada vez la capacidad o energía de la batería de litio inicial (40 kW) y aumentando la capacidad del tanque de hidrógeno para compensar esta energía y alcanzar la misma autonomía constantemente (220 km).

Para ello se plantea un gasto de toda la cantidad de hidrógeno disponible por la pila de combustible en todos los casos, asegurando así, que el sistema aproveche toda la energía potencial de esta fuente de energía.

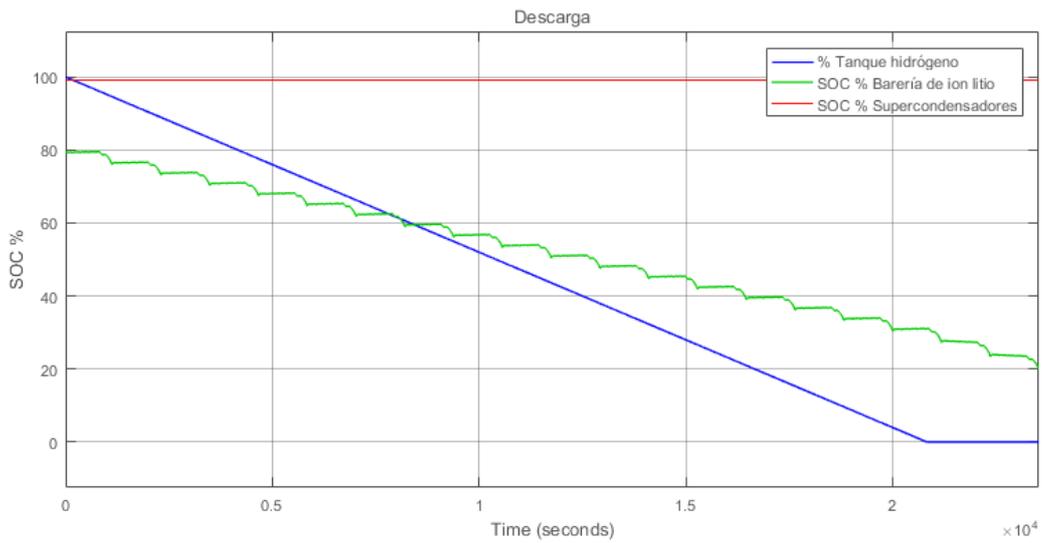


Figura 60: Perfil de descarga (NEDC) de la batería de litio (32,4 kWh) e hidrógeno, 7,5 L H<sub>2</sub>, 0,9 kW (220 km)

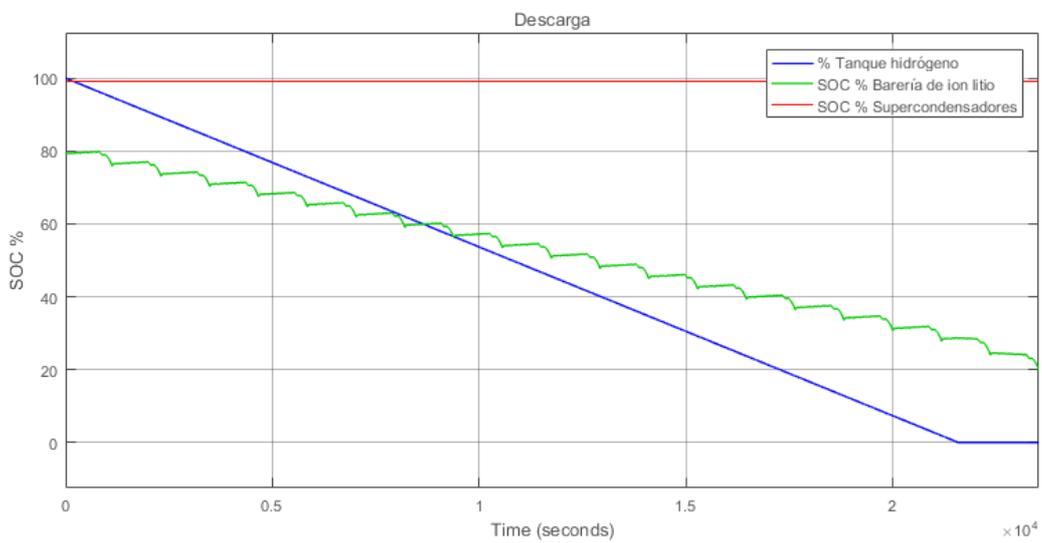


Figura 61: Perfil de descarga (NEDC) de la batería de litio (28,4 kWh) e hidrógeno, 11,3 L H<sub>2</sub>, 1,3 kW (220 km)

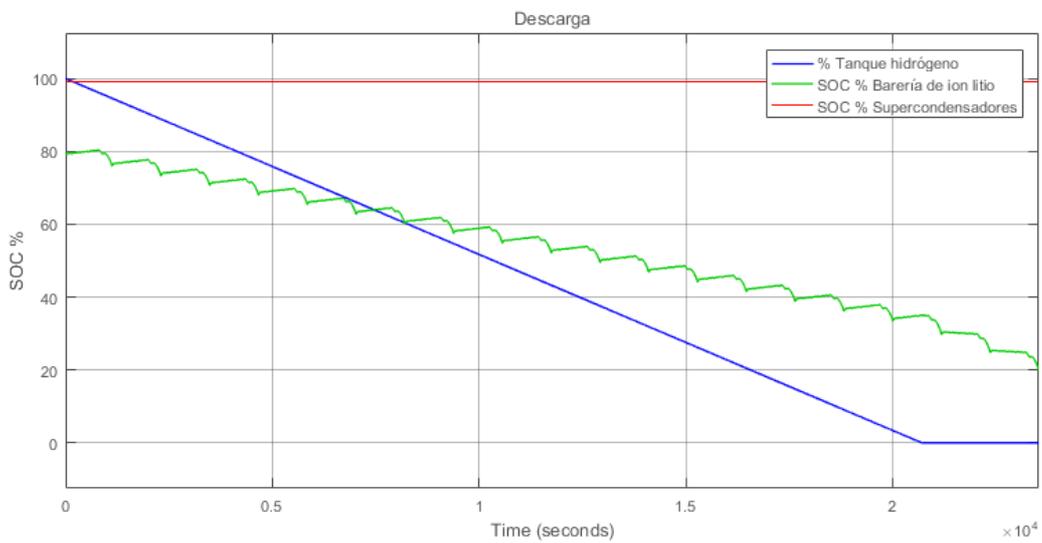


Figura 62: Perfil de descarga (NEDC) de la batería de litio (24,3 kWh) e hidrógeno, 15,1 L H<sub>2</sub>, 1,8 kW (220 km)

La Figura 62 muestra que, a partir de 24,3 kWh (60% de 40 kWh) para la batería de ion litio, es notable una recarga de la batería en ciertos momentos del ciclo NEDC. Por lo tanto, se puede afirmar que, en este caso en particular, para baterías de 24,3 kWh o menores, no se podrá aprovechar todo el hidrógeno disponible sin recargar, en algún punto del recorrido, la batería de ion litio.

De nuevo, es importante reiterar que este apartado específico no plantea ninguna aplicación práctica, sino que pretende mostrar las características de la descarga de las dos fuentes de energía al combinarlas, obteniendo así, más información sobre las mismas para poder comprender qué valores nominales podrían aplicarse a las fuentes de energía para que se puedan combinar de una manera aceptable.

Se terminan las últimas simulaciones de este apartado:

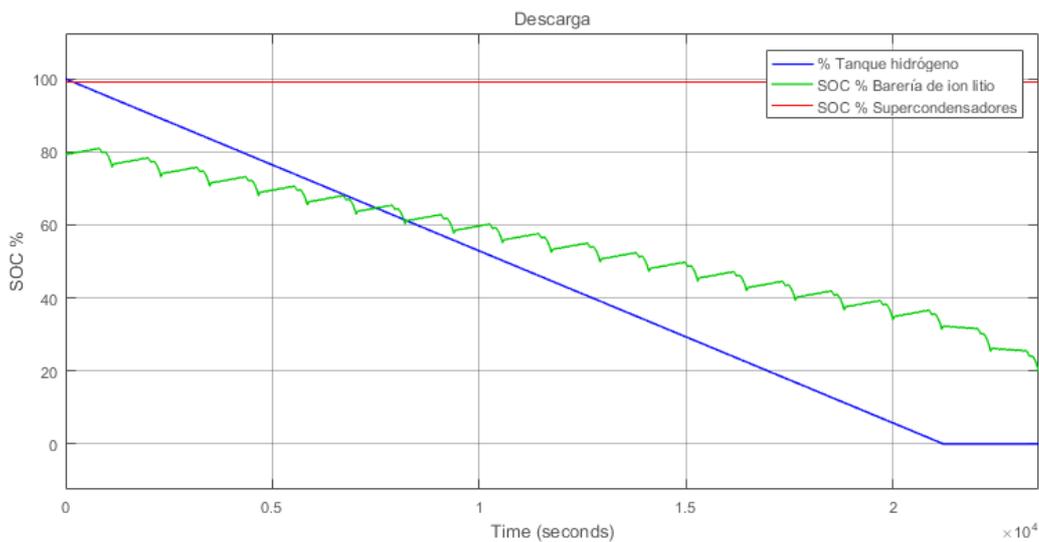


Figura 63: Perfil de descarga (NEDC) de la batería de litio (20,3 kWh) e hidrógeno, 29 L H<sub>2</sub>, 2,2 kW (220 km)

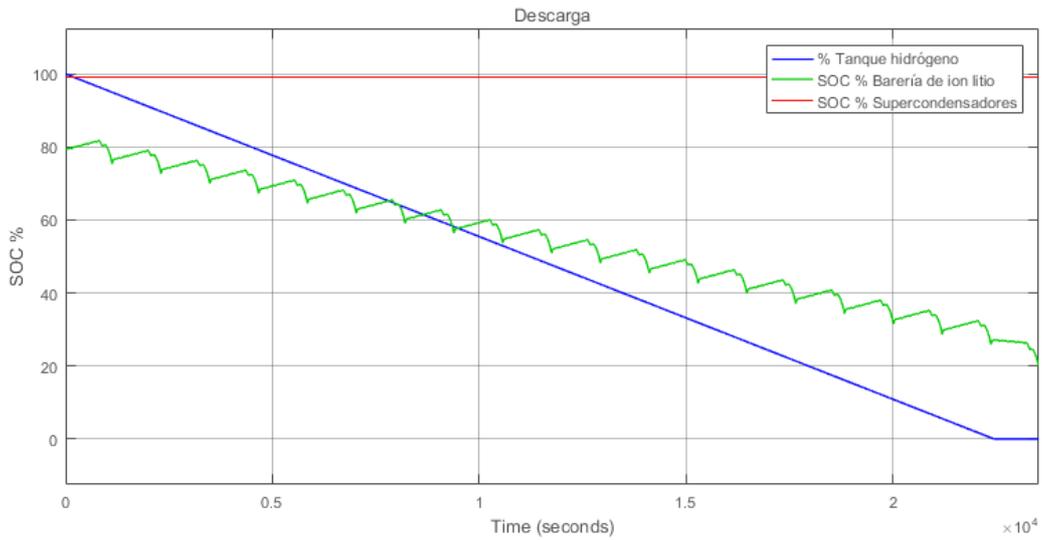


Figura 64: Perfil de descarga (NEDC) de la batería de litio (26,2 kWh) e hidrógeno, 22,9 L H<sub>2</sub>, 2,5 kW (220 km)

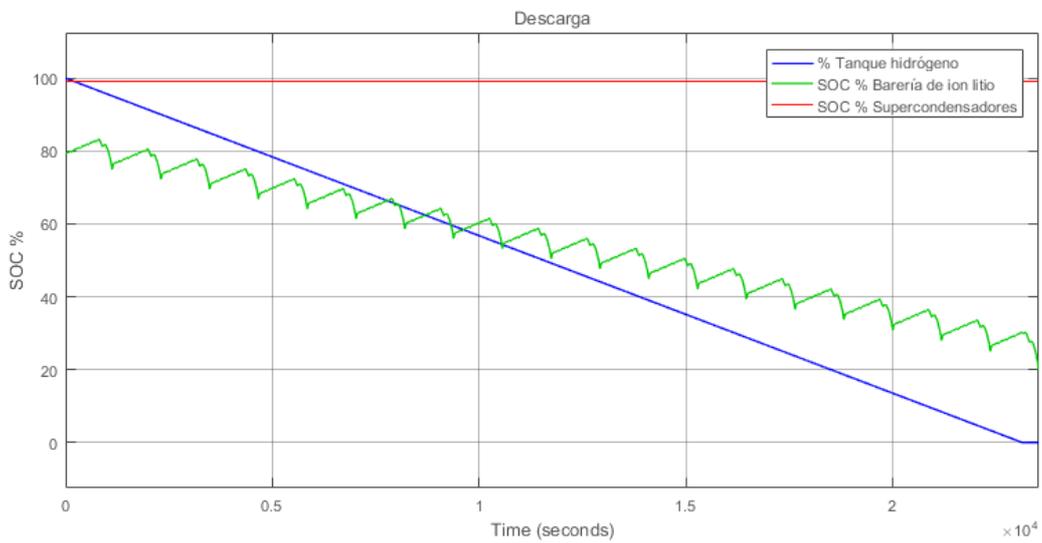


Figura 65: Perfil de descarga (NEDC) de la batería de litio (12,2 kWh) e hidrógeno, 27,5 L H<sub>2</sub>, 2,9 kW (220 km)

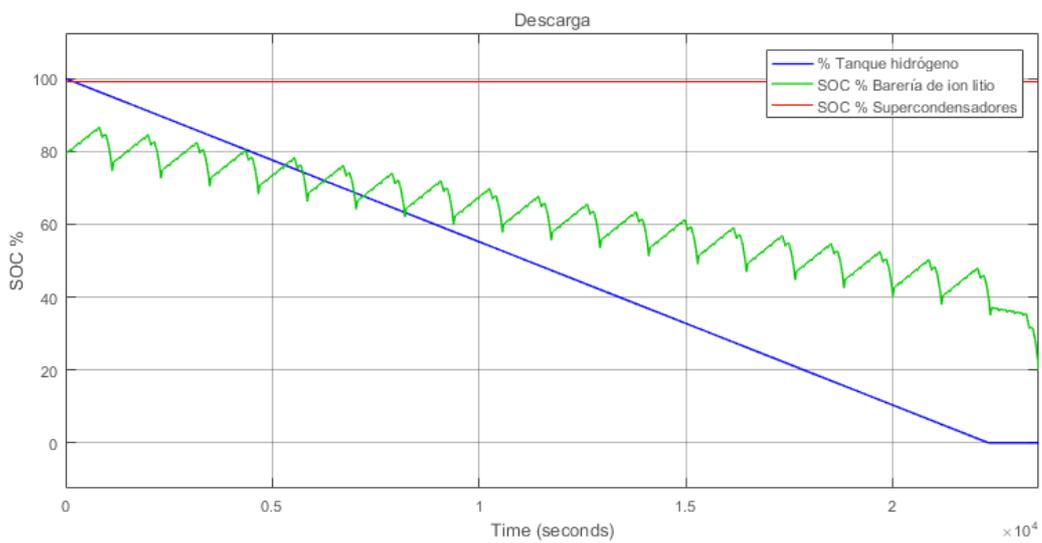


Figura 66: Perfil de descarga (NEDC) de la batería de litio (8,1 kWh) e hidrógeno, 32,2 L H<sub>2</sub>, 3,5 kW (220 km)

Como se puede apreciar en las gráficas de los distintos perfiles de descarga de la batería de ion litio y la pila de combustible, cuanto menor es la capacidad de la batería de ion litio, esta sufre cambios más bruscos en su SOC. Esto quiere decir que la batería de ion litio es sometida a más estrés y por lo tanto a más desgaste. Habrá que tener esto en cuenta a la hora de diseñar un sistema aplicable al mundo real.

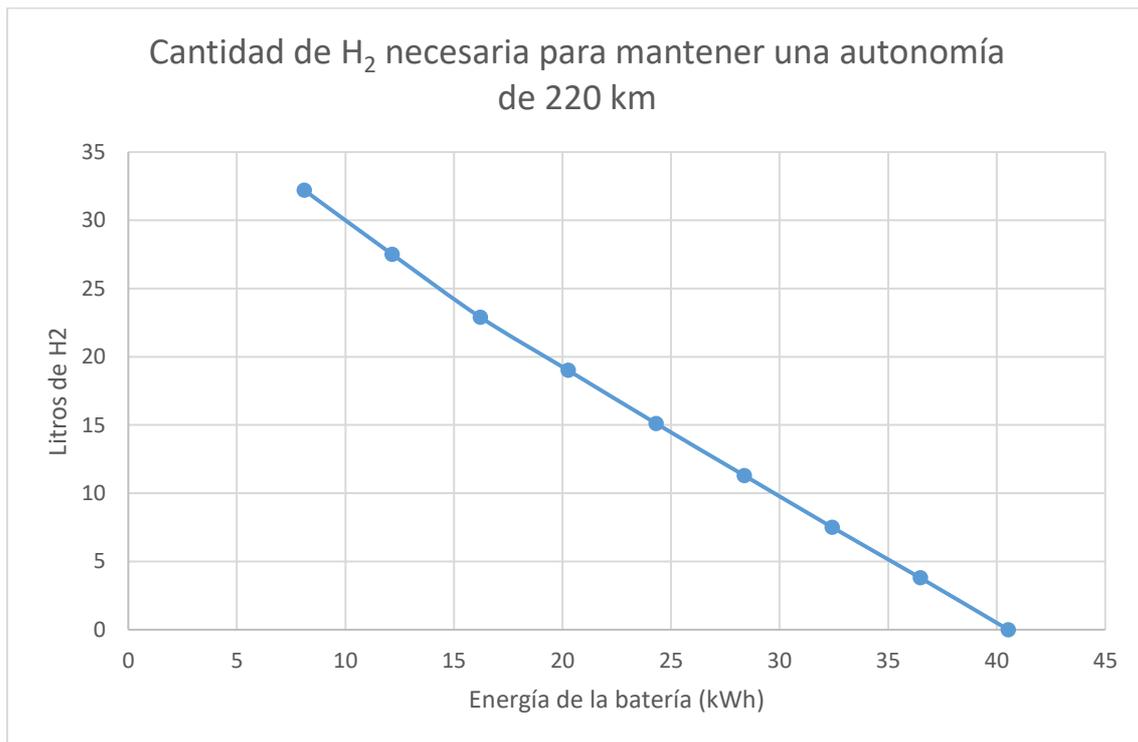


Figura 67: Variación de la cantidad de hidrógeno necesaria para mantener una autonomía de 220 km con respecto a la capacidad de la batería de litio ante un ciclo NEDC.

El gráfico de la Figura 67 muestra cómo varía la cantidad de hidrógeno necesaria para mantener una autonomía de 220 km con distintas baterías de ion litio. Lo primero que se aprecia es una variación lineal de los litros de hidrógeno necesarios. Esto significa que, en el caso de este tipo de batería y pila de combustible en concreto, se puede predecir fácilmente cuánto hidrógeno sería necesario, agotándolo completamente, para conseguir una autonomía conociendo la capacidad de una batería de litio. Para hallar esta relación se ha realizado una regresión lineal:

$$\text{Hidrógeno (L)} = -0,98 * \text{Capacidad litio (kWh)} + 39,32 \quad (17)$$

$$R^2 = 0,9983$$

Esta ecuación define los litros de hidrógeno necesarios para mantener una autonomía de 220 km conociendo la capacidad de la batería de ion litio. Estima también, que se necesitarían aproximadamente 39,32 L de hidrógeno, usando una pila de combustible de 15 kW para suplantar por completo a la batería de ion litio de 40 kWh. Por cada kWh añadido por la batería de ion litio se puede reducir la capacidad del tanque de hidrógeno en 0,98 L aproximadamente.

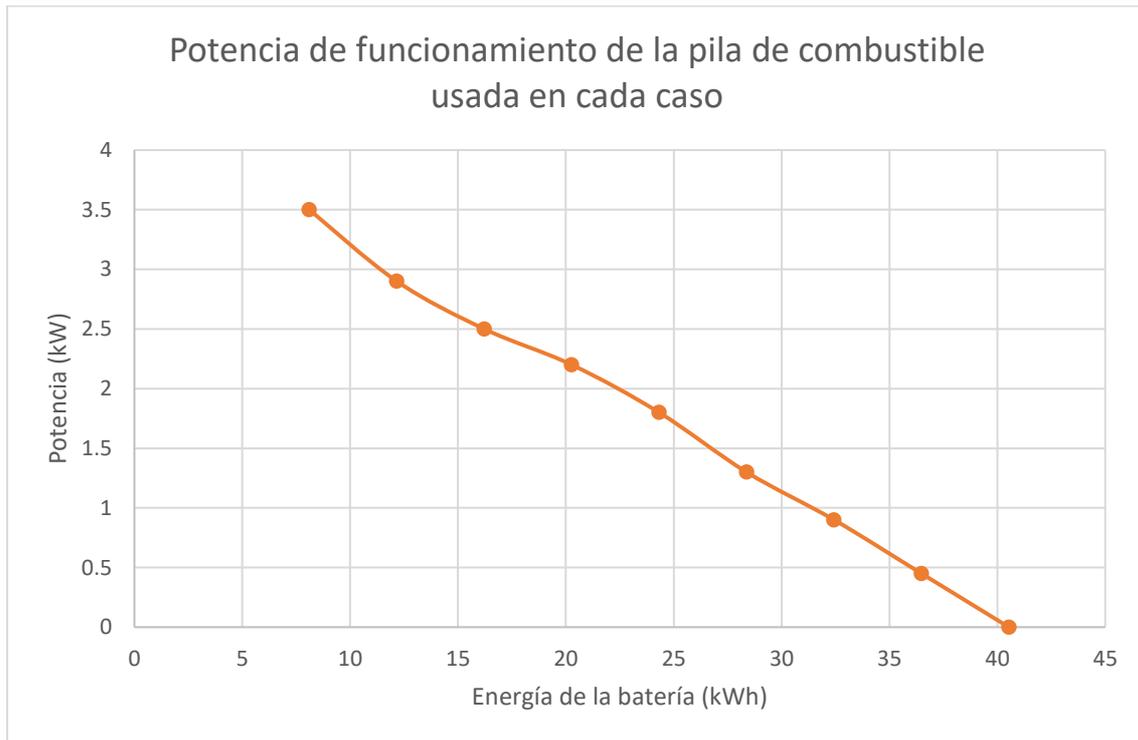


Figura 68: Variación de la intensidad de funcionamiento de la pila de combustible con respecto a la capacidad de la batería de litio ante un ciclo NEDC.

Es también apreciable la linealidad de la variación de la potencia de funcionamiento de la pila de combustible en este caso. Esta potencia es la necesaria, en cada caso y aproximadamente, para agotar todo el hidrógeno del tanque. Cuanta menos capacidad de la batería de ion litio, más intensidad de trabajo de la pila de combustible será necesaria para agotar todo el hidrógeno del tanque, ya que, cuanto menos capacidad tenga la batería de ion litio, más litros de hidrógeno tendrá el tanque para compensar y por lo tanto más potencia demandada requerirá la pila de combustible para poder agotar todo el hidrógeno.

Esto no quiere decir que, en un caso real, no se pueda reducir la potencia de operación de la pila de combustible. En cada caso será necesario valorar si se quiere, por

ejemplo, preservar el hidrógeno. De ser así se disminuiría la potencia y el tiempo de operación.

6.4.2 Funcionamiento constante (velocidad cte.)

Se ha repetido el mismo proceso de simulación, esta vez, aplicando una velocidad constante de 80 km/h. En el apartado 6.3.2 se comprobó la autonomía que podía lograr la batería de ion litio de 40 kWh era de 116,7 km. Por lo tanto, se buscará, en cada caso, alcanzar este valor de autonomía añadiendo más cantidad de hidrógeno cada vez.

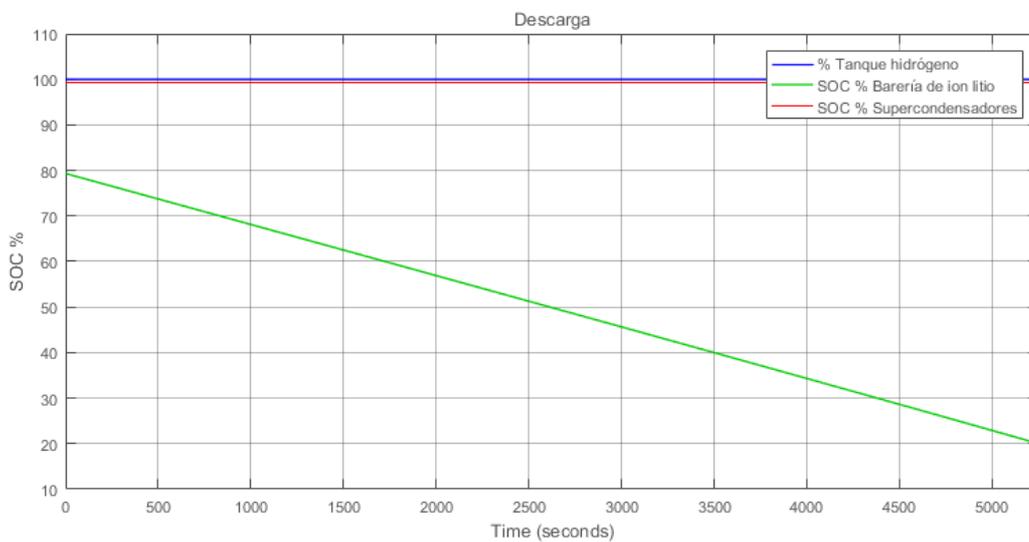


Figura 69: Perfil de descarga de la batería de litio de 40 kWh a una velocidad cte. de 80 km/h

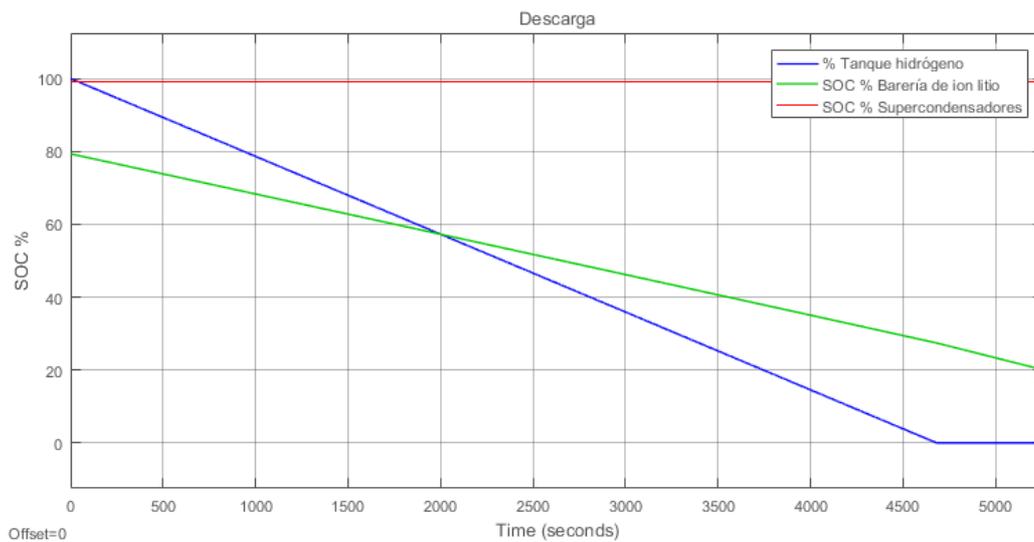


Figura 70: Perfil de descarga (80km/h) de la batería de litio (36,5 kWh) e hidrógeno, 3,8 L H2, 2 kW (116,7 km)

Comparando el perfil de descarga de la batería de ion litio de 40 kWh de la Figura 69 con el de la Figura 70, es apreciable que la pila de combustible consigue compensar la diferencia de energía entre las dos baterías y se alcanza la misma autonomía en las dos simulaciones.

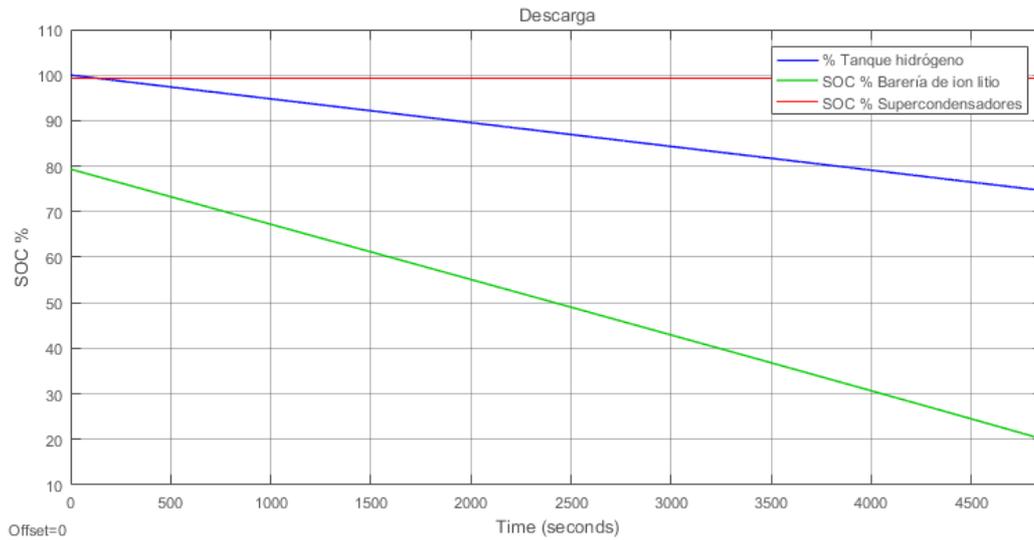


Figura 71: Perfil de descarga (80km/h) de la batería de litio (36,5 kWh) e hidrógeno, 3,8 L H<sub>2</sub>, 0,5 kW (108 km)

De nuevo, la Figura 71 muestra que, si se reduce la potencia de funcionamiento de la pila de combustible, de tal manera que el hidrógeno del tanque no se gaste por completo, la autonomía que se pueda alcanzar disminuirá. En este caso se queda en 108 km.

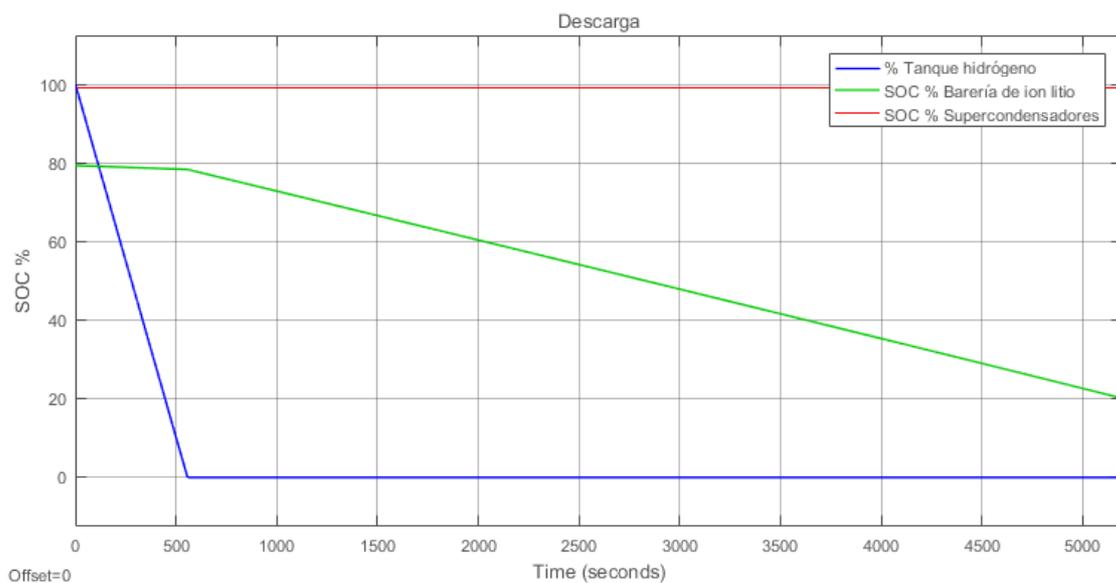


Figura 72: Perfil de descarga (80km/h) de la batería de litio (36,5 kWh) e hidrógeno, 3,8 L H<sub>2</sub>, 15 kW (116,7 km)

Por el contrario, si se aumenta la potencia de funcionamiento de la pila de combustible, el hidrógeno del tanque se agotará antes. En el caso de la Figura 72 se ha maximizado la potencia de funcionamiento (15 kW de los 15 kW a los que puede operar la pila de combustible). Esta potencia no es suficiente para recargar la batería de ion litio del vehículo operando a esta velocidad de 80 km/h, pero podría suponer un riesgo de sobrecarga si la demanda del sistema fuese menor:

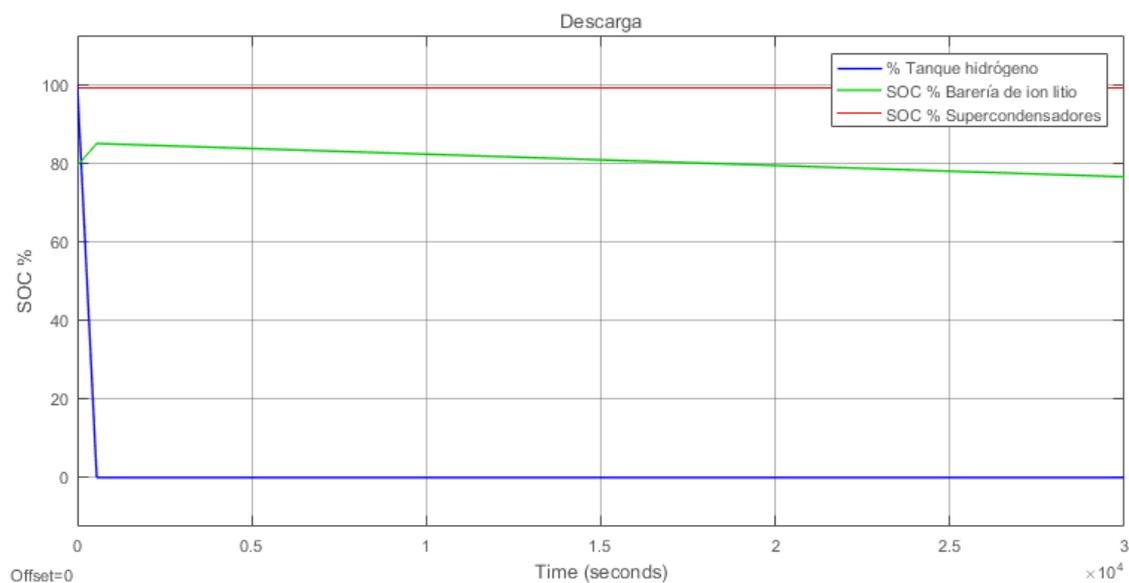


Figura 73: Perfil de descarga (30km/h) de la batería de litio (36,5 kWh) e hidrógeno, 3,8 L H<sub>2</sub>, 15 kW

En la Figura 73 se observa cómo, al reducir la velocidad y por lo tanto la demanda del sistema, la pila de combustible recarga la batería de ion litio hasta que el hidrógeno se acaba. Con esto se confirma, al igual que en el apartado 6.4.1, que la potencia de funcionamiento ha de ser controlada para no sobrecargar la batería en ningún momento.

Se comprueba también que ocurre si se redujese la cantidad de hidrógeno disponible:

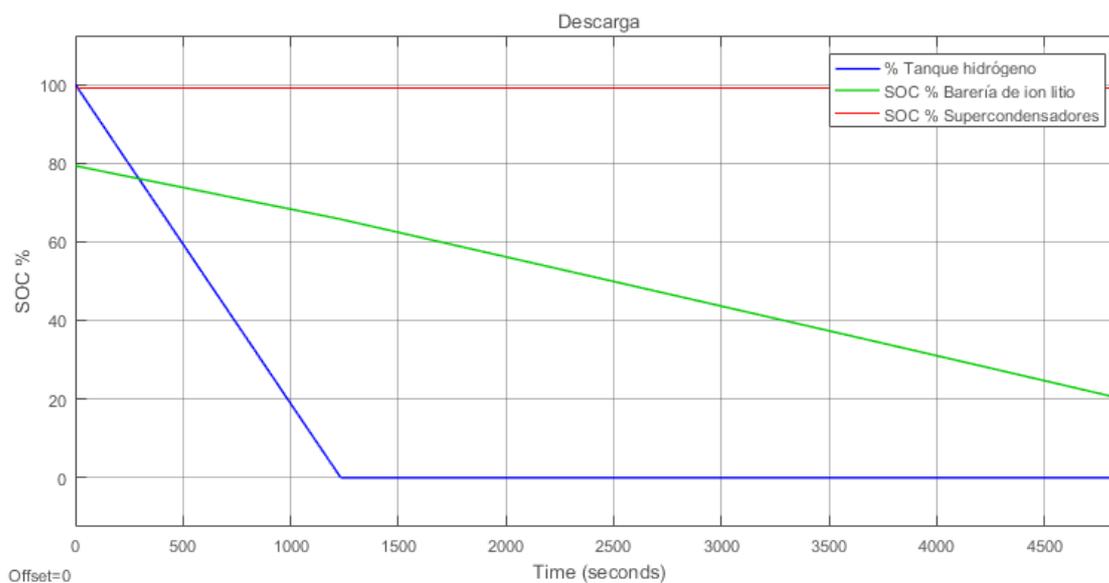


Figura 74: Perfil de descarga (80km/h) de la batería de litio (36,5 kWh) e hidrógeno, 1 L H<sub>2</sub>, 15 kW (108 km)

Al reducir la cantidad de hidrógeno a 1 L en la simulación de la Figura 74, se comprueba, como era de esperar, que la autonomía del vehículo no alcanza los 116,7 km deseados.

El objetivo de este apartado, al igual que el anterior, no es buscar un uso práctico de la combinación de ambas fuentes de energía, sino que se pretende tener una mayor comprensión del funcionamiento de la combinación de ambas. Por lo tanto y al igual que en el apartado anterior, en adelante se realizarán las simulaciones aumentando la potencia de funcionamiento de la pila de combustible cada vez, permitiendo el consumo del total del hidrógeno del tanque y su consiguiente energía.

Se procede, por tato, a simular el resto de casos, reduciendo en un 10% cada vez la capacidad de la batería de litio, agotando por completo el tanque de hidrógeno en cada caso:

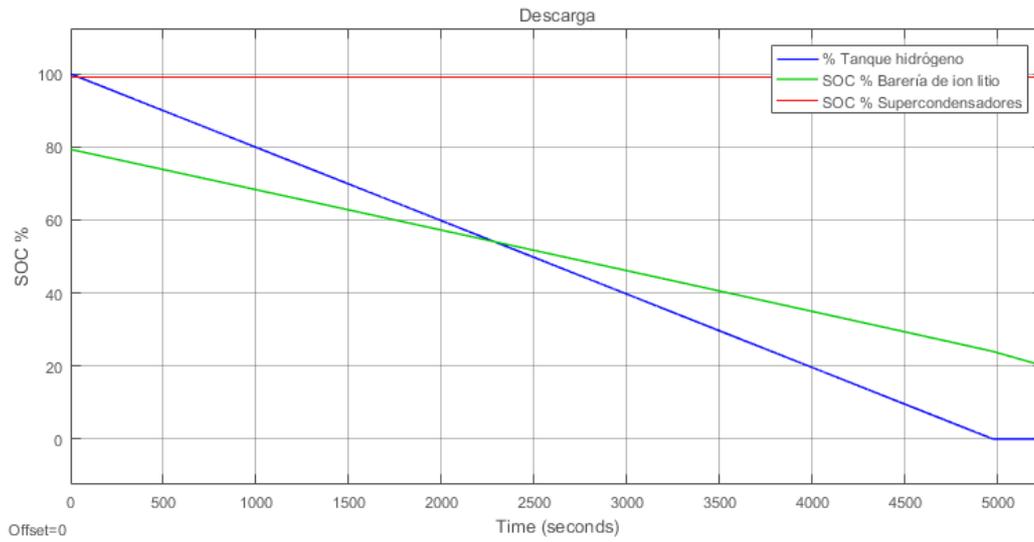


Figura 75: Perfil de descarga (80km/h) de la batería de litio (32,4 kWh) e hidrógeno, 7,6 L H<sub>2</sub>, 3,7 kW (116,7 km)

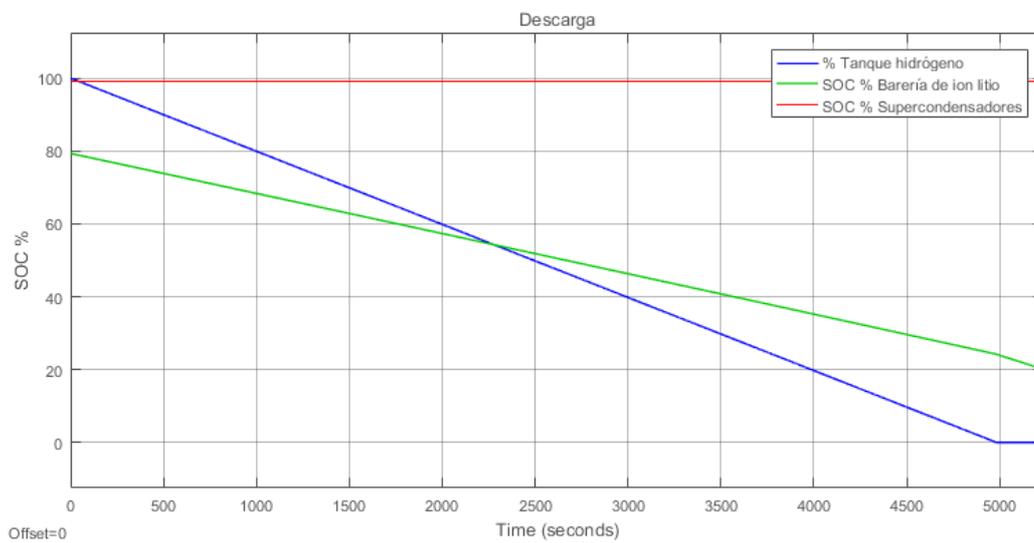


Figura 76: Perfil de descarga (80km/h) de la batería de litio (28,4 kWh) e hidrógeno, 11,5 L H<sub>2</sub>, 5,5 kW (116,7 km)

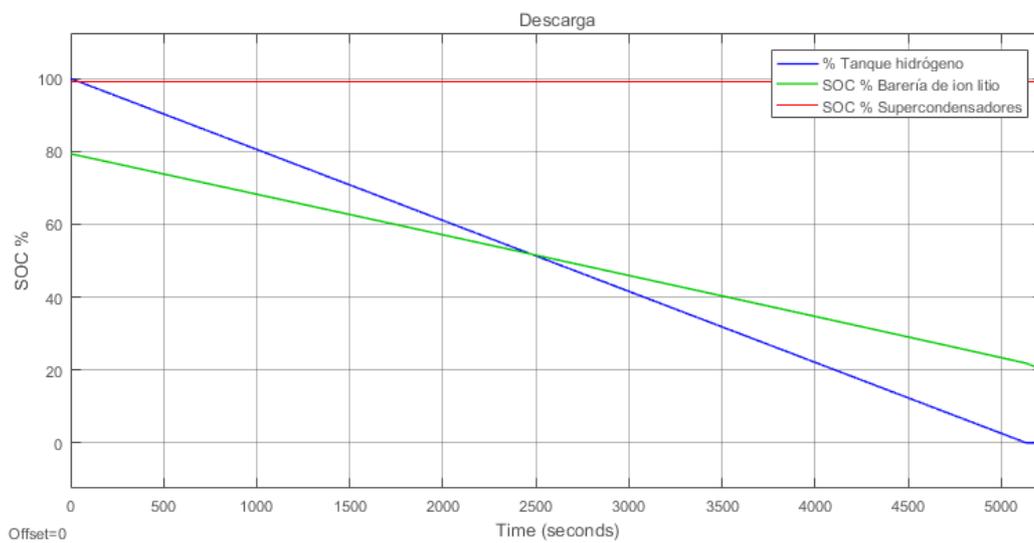


Figura 77: Perfil de descarga (80km/h) de la batería de litio (24,3 kWh) e hidrógeno, 15,6 L H<sub>2</sub>, 7,1 kW (116,7 km)

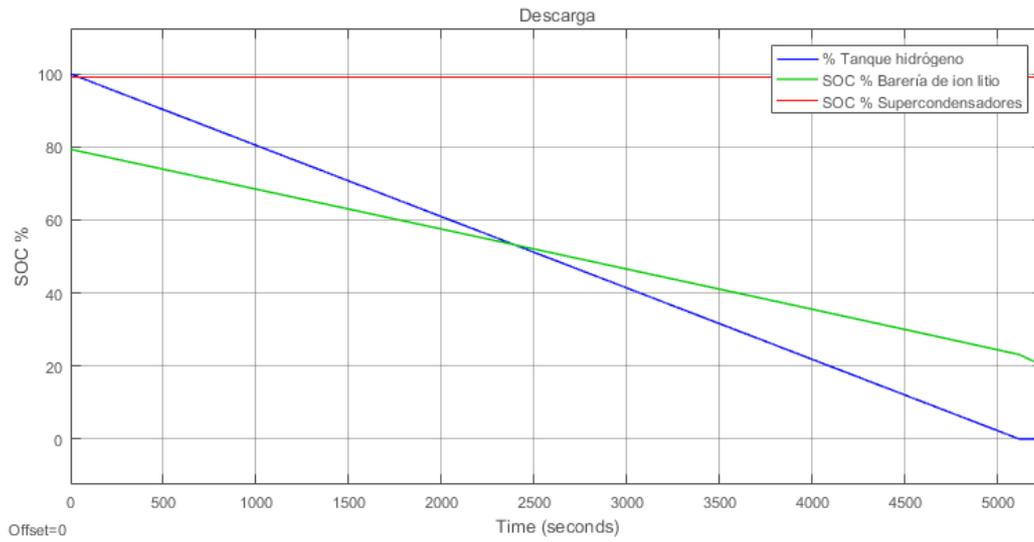


Figura 78: Perfil de descarga (80km/h) de la batería de litio (20,3 kWh) e hidrógeno, 19,9 L H<sub>2</sub>, 9 kW (116,7 km)

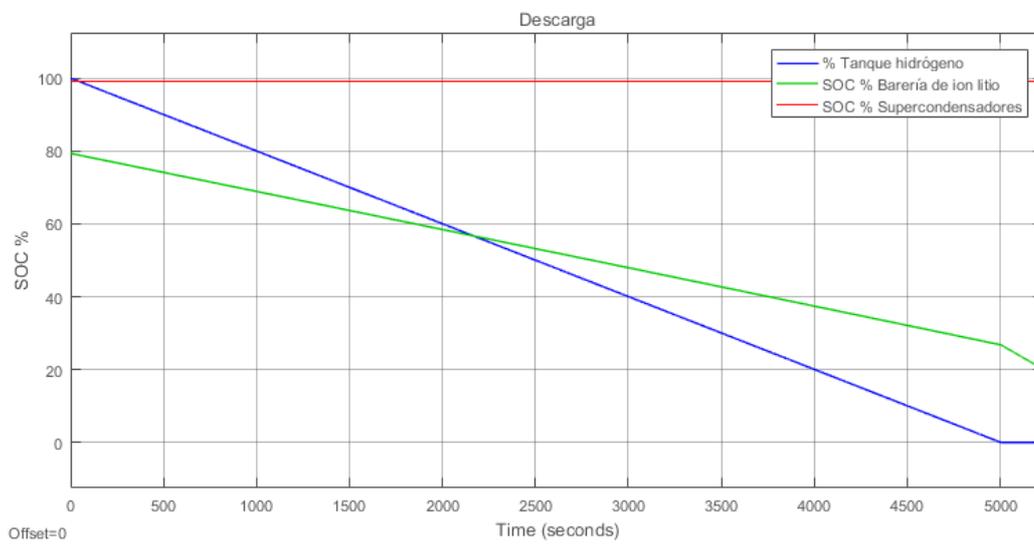


Figura 79: Perfil de descarga (80km/h) de la batería de litio (16,2 kWh) e hidrógeno, 24,2 L H<sub>2</sub>, 11 kW (116,7 km)

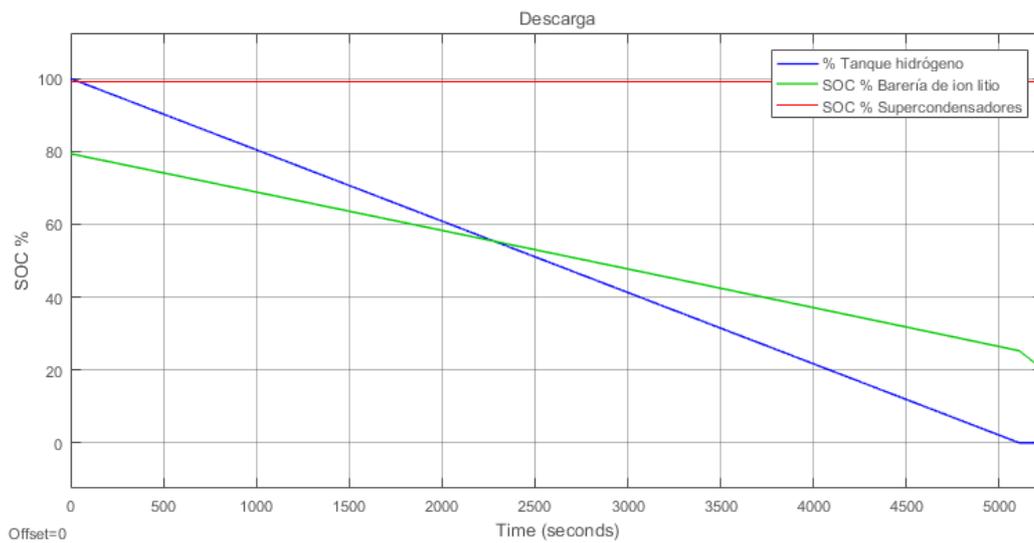


Figura 80: Perfil de descarga (80km/h) de la batería de litio (12,2 kWh) e hidrógeno, 28,7 L H<sub>2</sub>, 12,6 kW (116,7 km)

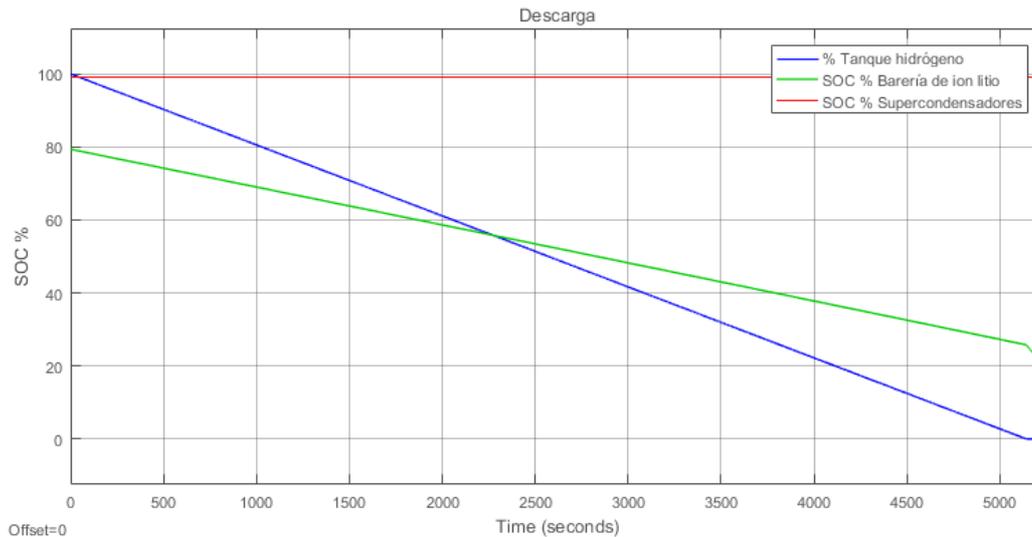


Figura 81: Perfil de descarga (80km/h) de la batería de litio (8,1 kWh) e hidrógeno, 33,3 L H<sub>2</sub>, 14,3 kW (116,7 km)

En los perfiles de descarga a velocidad constante se aprecia un cambio lineal, en el SOC de la batería de litio. Esto significa que, a velocidades constantes, la batería de litio no sufrirá tanto estrés como en fases de aceleración y frenada. Esto se debe a que la potencia demandada por el sistema en estas condiciones es constante. La descarga más rápida de la batería de ion litio es compensada con el aumento en la potencia de funcionamiento de la pila de combustible y la capacidad del tanque de hidrógeno. Este comportamiento es el mismo que se ha comprobado en el análisis de los perfiles de descarga del ciclo NEDC.

Al igual que en el apartado 6.4.1, se analiza este aumento de la cantidad de hidrógeno en detalle:

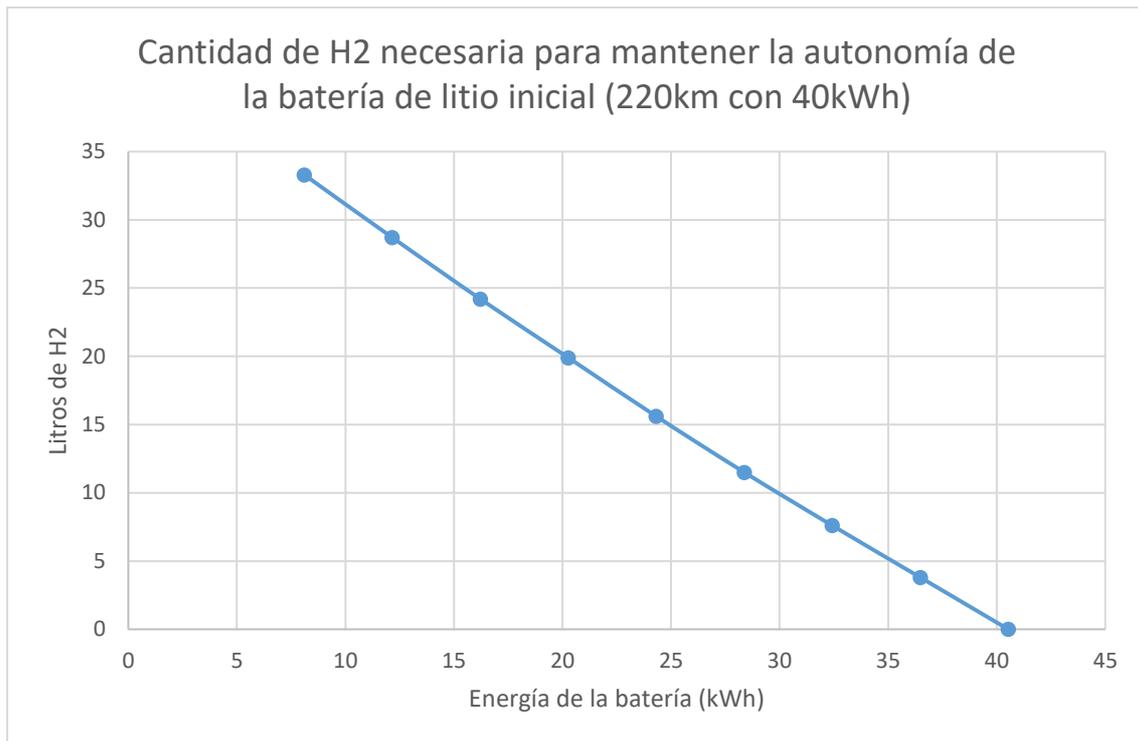


Figura 82: Variación de la cantidad de hidrógeno necesaria para mantener una autonomía de 220 km con respecto a la capacidad de la batería de litio a velocidad constante

Los resultados a una velocidad constante, en este caso de 80 km/h, son idénticos, en comportamiento, a los del ciclo NEDC. La capacidad del tanque de hidrógeno ha de aumentar proporcionalmente, con la disminución de la capacidad energética de la batería de litio, para mantener la misma autonomía. Este caso en específico (40 kWh de batería de litio y 15 kW de pila de combustible) ha arrojado la siguiente relación:

$$\text{Hidrógeno (L)} = -1,03 * \text{Capacidad litio (kWh)} + 41,02 \quad (18)$$

$$R^2 = 9988$$

Esto quiere decir que se necesitarían aproximadamente 41,02 L de hidrógeno para suplantar por completo la batería de ion litio de 40 kWh, usando una pila de combustible de 15 kW. Este valor es cercano a los 39,2 L de hidrógeno que se estimaron necesarios en el apartado 6.4.1. Por cada kWh añadido por la batería de ion litio se puede reducir la capacidad del tanque de hidrógeno en 1,03 L aproximadamente.

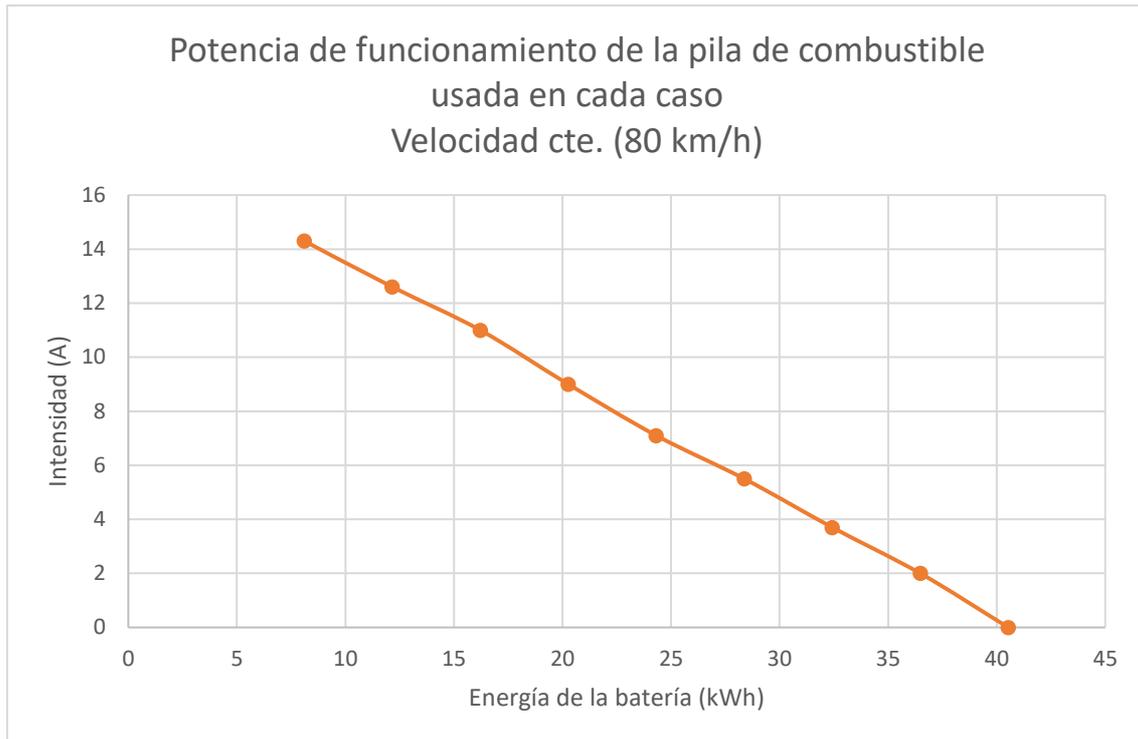


Figura 83: Variación de la intensidad de funcionamiento de la pila de combustible con respecto a la capacidad de la batería de litio a velocidad constante.

La relación de potencia de funcionamiento de la pila de combustible, mínima necesaria para consumir todo el hidrógeno en cada caso, es también lineal. Esto quiere decir que, para consumir todo el combustible, habrá que aumentar la potencia de funcionamiento de la pila de combustible proporcionalmente con la cantidad de energía que se reduzca de la batería de ion litio.

#### 6.4.3 Funcionamiento entre dos valores de SOC de la batería de litio (NEDC)

Por último, se ha procedido a analizar el otro tipo de funcionamiento de la pila de combustible, en el que se hace funcionar a la misma únicamente cuando la batería de ion litio se encuentre entre dos SOC de la misma. Para ello se han establecido los siguientes SOC de la batería de litio entre los que operará la pila de combustible:

- 45% SOC litio
- 55% SOC litio

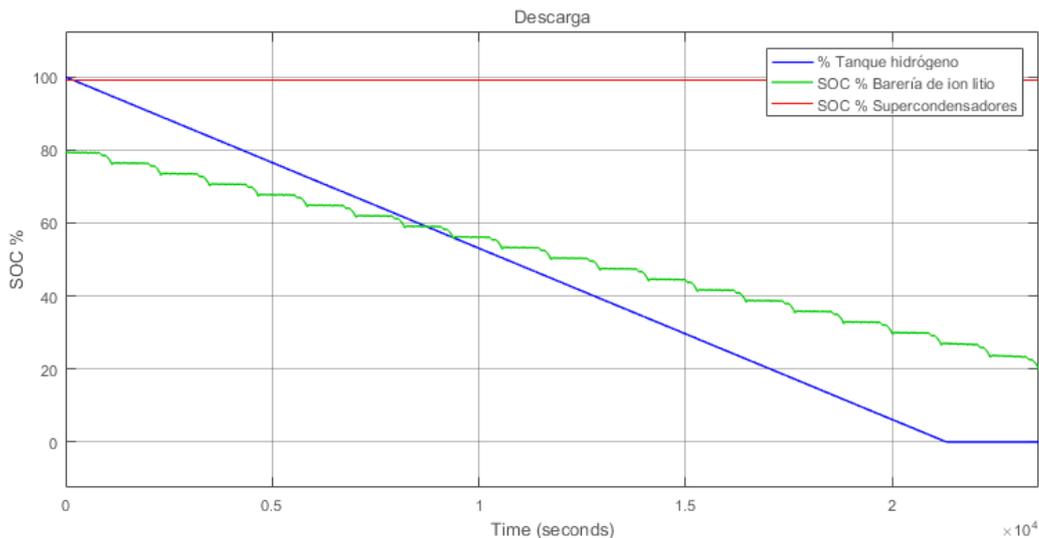


Figura 84: Perfil de descarga (NEDC) de la batería de litio (36,5 kWh) e hidrógeno, 3,8 L H<sub>2</sub>, 0,45 kW (220 km)

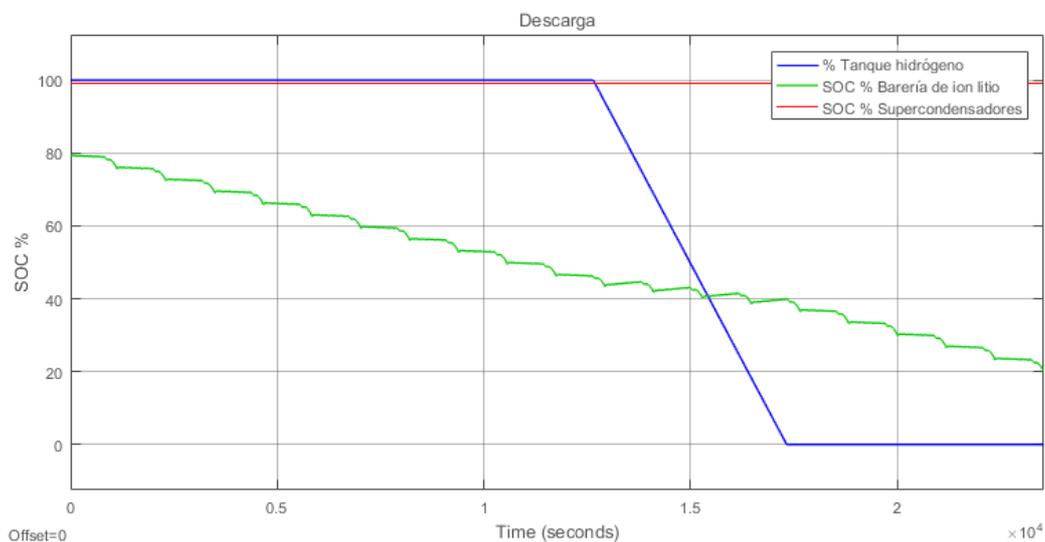


Figura 85: Perfil de descarga (NEDC) de la batería de litio (36,5 kWh) e hidrógeno, 3,8 L H<sub>2</sub>, 2 kW (220 km)

Comparando el resultado de este funcionamiento (Figura 85) con otro con las mismas propiedades del apartado 6.4.1 (Figura 84), se observa que se obtiene la misma autonomía en ambos casos. Esto se debe a lo explicado en el apartado 6.4.1, la velocidad de consumo de hidrógeno no importa, la diferencia de eficiencia entre distintas potencias de funcionamiento es mínima, por lo que la energía total proveída por la pila de combustible es la misma en ambos casos.

La única diferencia que se puede concluir comparando estas dos simulaciones, es que, al controlar el funcionamiento de la pila de combustible con el SOC de la batería de ion litio, ya no se corre el riesgo de sobrecargar esta última.

Para la mejor visualización de cómo opera este sistema, se ha aumentado la capacidad del tanque de hidrógeno, así como la potencia de funcionamiento de la pila de combustible:

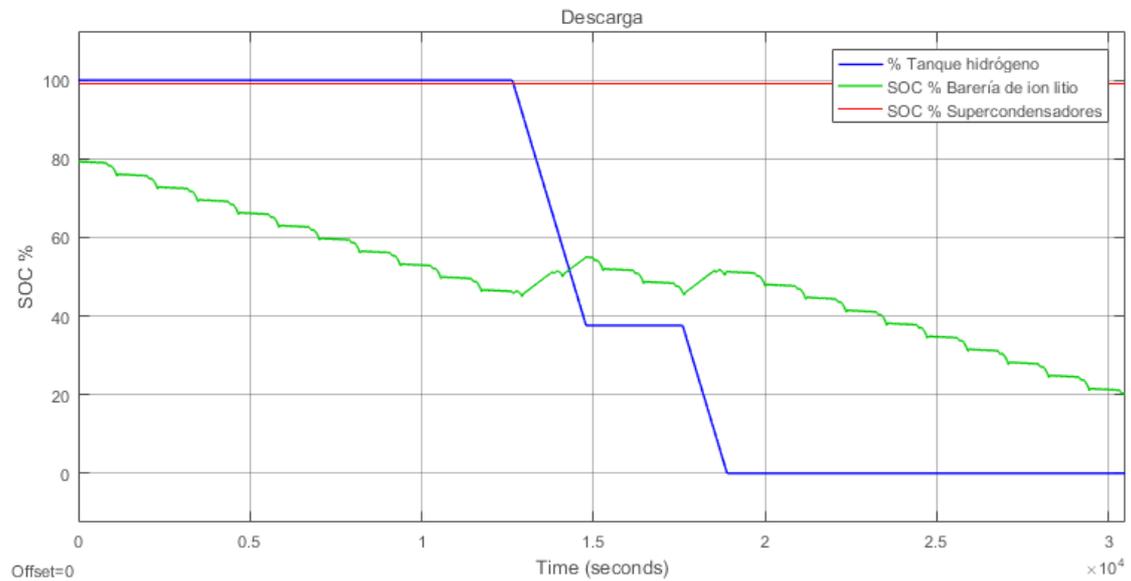


Figura 86: Perfil de descarga (NEDC) de la batería de litio (36,5 kWh) e hidrógeno, 15 L H<sub>2</sub>, 10 kW (282 km)

En la Figura 86 se aprecia cómo, cuando el SOC de la batería de ion litio llega al 45%, la pila de combustible comienza a funcionar y no para hasta que el SOC alcance de nuevo el 55%. Con 15 L de hidrógeno y 10 kW de funcionamiento, la pila de combustible es capaz de recargar casi dos veces la batería de litio en un 10% de SOC.

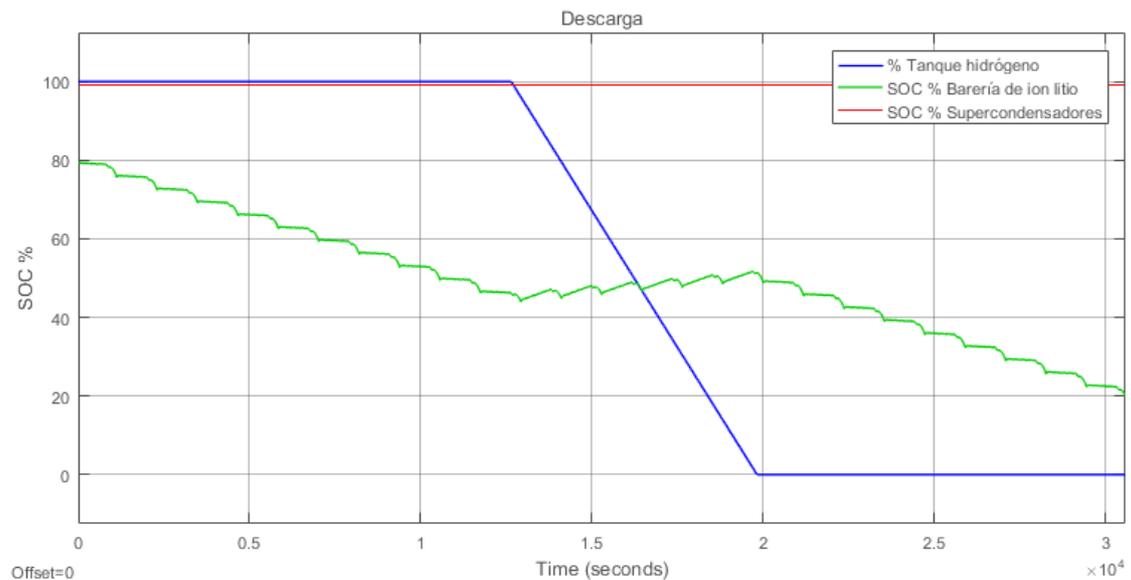


Figura 87: Perfil de descarga (NEDC) de la batería de litio (36,5 kWh) e hidrógeno, 15 L H<sub>2</sub>, 5 kW (282 km)

En la simulación realizada de la Figura 87 se ha reducido la potencia de funcionamiento de la pila de combustible a 5 kW, esto provoca una recarga más lenta en la batería de ion litio. La autonomía se mantiene.

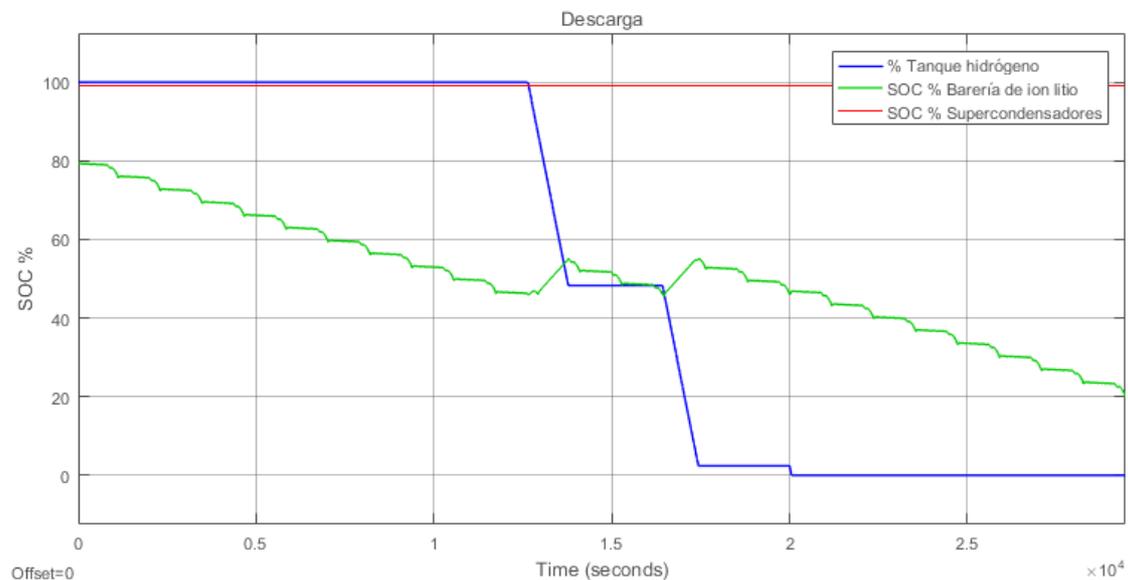


Figura 88: Perfil de descarga (NEEDC) de la batería de litio (36,5 kWh) e hidrógeno, 15 L H<sub>2</sub>, 15 kW (282 km)

En la simulación realizada de la Figura 87 se ha aumentado la potencia de funcionamiento de la pila de combustible a 15 kW (máxima potencia de la pila de combustible), esto provoca picos de recarga en la batería de ion litio y, por consecuencia, un mayor estrés en la misma. Habrá que tener esto en cuenta a la hora de parametrizar la pila de combustible para no reducir la vida útil de la batería de ion litio al someterla a cambios tan bruscos en su SOC. La autonomía se mantiene.

Se procede a hacer varias simulaciones con una batería de litio de 24,3 kWh (60% de 40 kWh). Se ha escogido esta batería ya que es capaz de otorgar una autonomía de 130 km (SOC de 80% a 20%) por sus propios medios. Esta autonomía es más que suficiente para un uso diario en caso de no disponer de hidrógeno.

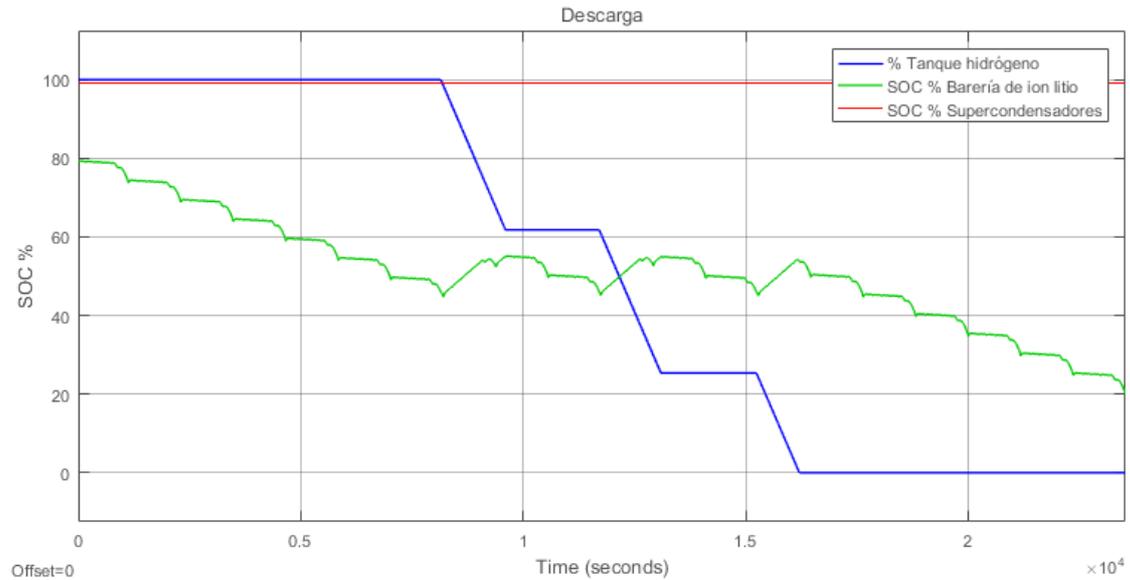


Figura 89: Perfil de descarga (NEDC) de la batería de litio (24,3 kWh) e hidrógeno, 16,6 L H<sub>2</sub>, 10 kW (220 km)

De la simulación realizada en la Figura 87 se puede concluir que para alcanzar la misma autonomía que la batería de 40 kWh con una de 24,3 kWh, son necesarios 16,6 L de hidrógeno.

El tanque de un vehículo de “fuel cell” comercializado suele rondar los 100-170 L como se ha visto en el apartado 2.3 de este proyecto. Se simularán casos con varias capacidades del tanque de hidrógeno:

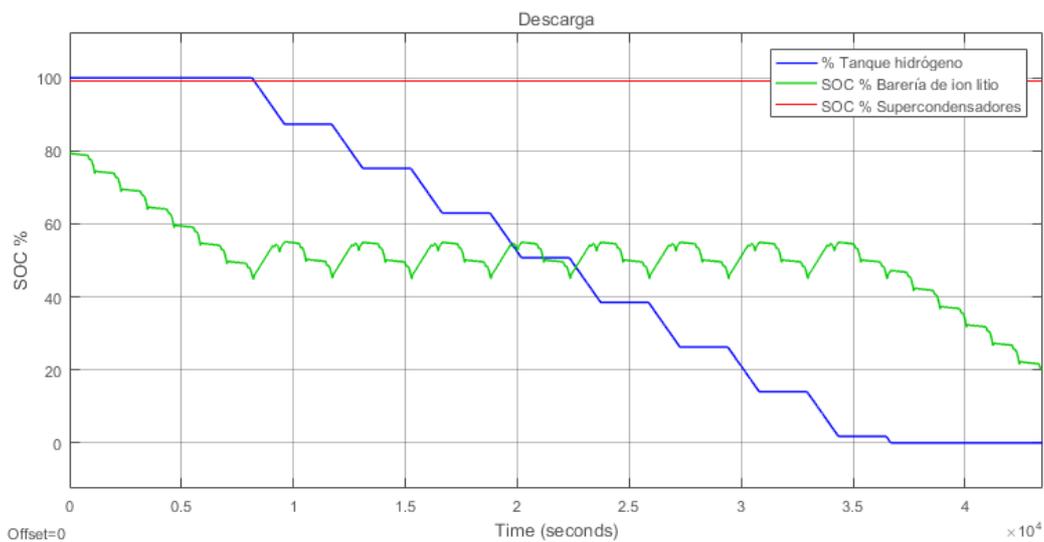


Figura 90: Perfil de descarga (NEDC) de la batería de litio (24,3 kWh) e hidrógeno, 50 L H<sub>2</sub>, 10 kW (403,8 km)

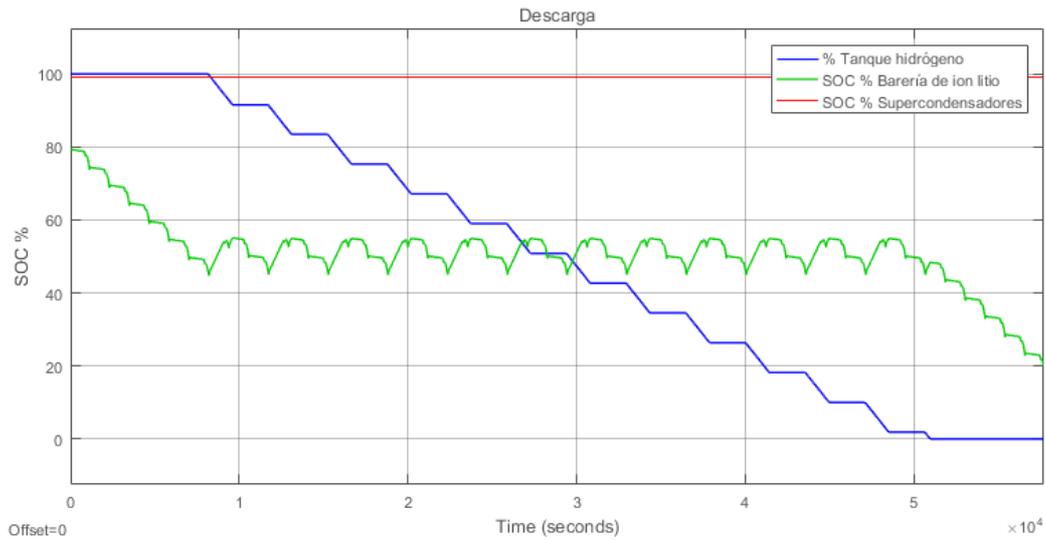


Figura 91: Perfil de descarga (NEDC) de la batería de litio (24,3 kWh) e hidrógeno, 75 L H<sub>2</sub>, 10 kW (537 km)

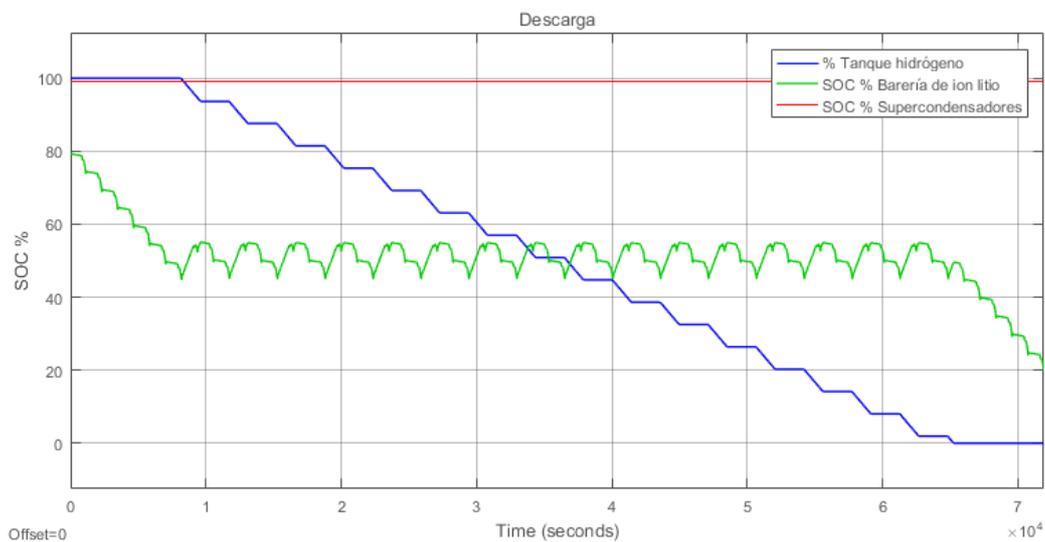


Figura 92: Perfil de descarga (NEDC) de la batería de litio (24,3 kWh) e hidrógeno, 100 L H<sub>2</sub>, 10 kW (671 km)

Al observar las autonomías obtenidas en las simulaciones de las Figuras 88, 89 y 90, como no se desea aumentar innecesariamente el peso ni ocupar demasiado volumen del vehículo debido a que se quieren introducir, a parte de la batería de ion litio, los supercondensadores, se plantea como buena opción un tanque de 50 L a 700 bar. Esta opción otorgará al vehículo de una autonomía >400 km. Es importante recordar que estas simulaciones están realizadas entre el 80% y 20% de SOC del vehículo y que se está desaprovechando un 40% para la simplificación y el margen de error de la simulación.

Las simulaciones realizadas seleccionando este tipo de funcionamiento de la pila de hidrógeno, en el que a la pila de hidrógeno opera entre dos valores de SOC de la batería de litio, han arrojado la misma relación entre autonomía conseguida y litros de hidrógeno disponibles.

Independientemente de la intensidad de funcionamiento de la pila de combustible usada, se han obtenido los mismos valores de autonomía que con el otro funcionamiento a las mismas capacidades de la batería de ion litio. Esto se debe a que la energía proveída por la pila de combustible usando ambos tipos de funcionamiento es la misma, independientemente del margen de SOC de la batería de litio y de la intensidad usada.

Este tipo de funcionamiento de la pila de combustible puede mostrarse útil en aplicaciones reales. Mientras que en este proyecto la operación es sencilla, este sistema tiene el potencial para que se puedan aplicar algoritmos o incluso una red neuronal (inteligencia artificial).

Esta podría predecir, por ejemplo, el recorrido que un usuario va a realizar por medio de datos recogidos todos los días, o por el recorrido a realizar por GPS. Estimando, así, el ciclo al que se va a someter el vehículo y calculando los mejores momentos para activar y desactivar la pila de combustible en función de la fuente de energía que se quiera preservar. Por ejemplo, si un usuario no tiene acceso fácil a una recarga de hidrógeno, pero sí a una recarga de la batería de litio, como puede ser en la actualidad.

Esto último sería interesante tenerlo en cuenta en futuros estudios de este tipo de fuente de energía ya que tendría el potencial de aumentar notablemente la autonomía del vehículo en cada caso particular.

### 6.3 Supercondensadores

Para una mejor comprensión del comportamiento de los supercondensadores se han realizado simulaciones de tal manera que se pueda comprender si verdaderamente los supercondensadores afectan positivamente al rendimiento de la batería de ion litio, aumentando la autonomía del vehículo notablemente. Para ello, en este caso, se ha seleccionado la batería de supercondensadores como única fuente auxiliar de la batería de litio.

La fracción de la carga regenerativa y el SOC al que se recargan los supercondensadores en la máscara se han variado, en cada caso, para que el SOC de los supercondensadores permanezca alrededor del 50%, sin bajar de dicho valor. Como ya se ha visto anteriormente el voltaje de un supercondensador difiere del de una batería de litio en que disminuye constante y linealmente con el SOC. Por lo tanto, es más beneficioso para el sistema que la batería de supercondensadores opere a un SOC alto.

Destacar que las simulaciones únicamente se han realizado con el ciclo NEDC. Esto es debido a que, para comprender si los supercondensadores realmente ofrecen una ventaja a la hora de absorber los picos de potencia, es necesario que la potencia demandada tenga cambios en su valor.

Con todo lo expuesto se ha procedido a obtener los perfiles de descarga de las simulaciones:

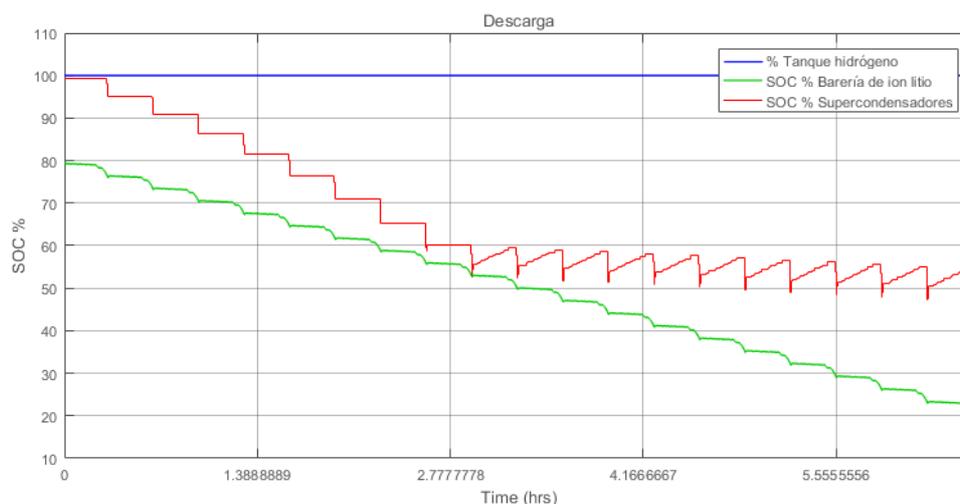


Figura 93: Perfil de descarga (NEDC), batería de 1 supercondensador, funcionamiento a partir de 38 kW

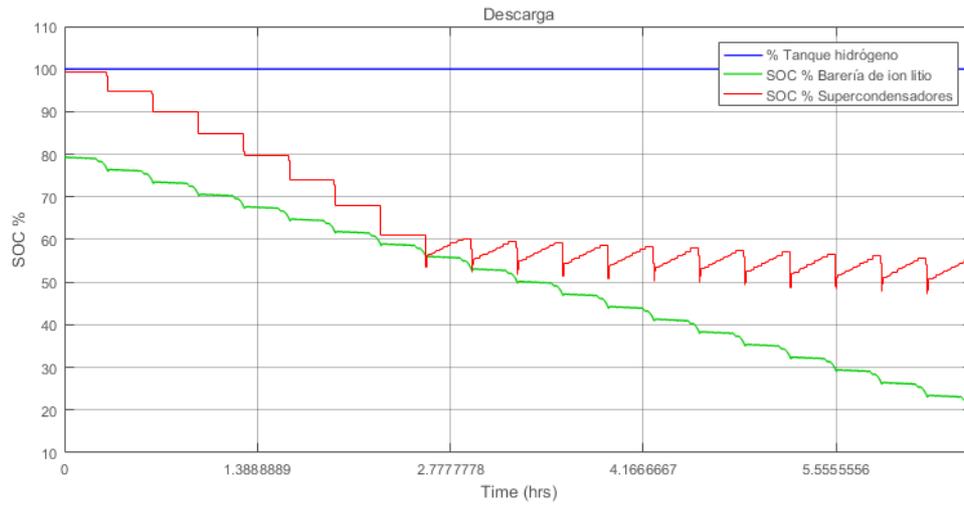


Figura 94: Perfil de descarga (NEDC), batería de 2 supercondensadores, funcionamiento a partir de 36 kW

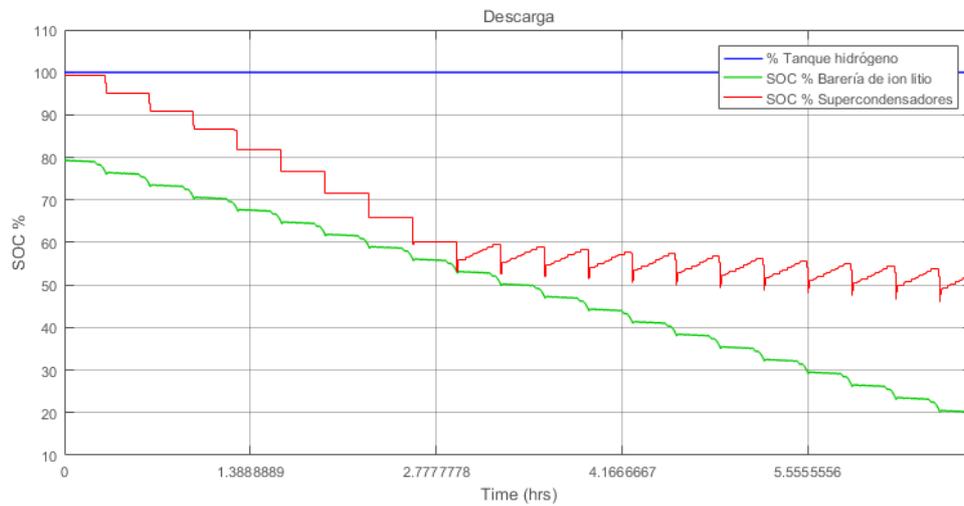


Figura 95: Perfil de descarga (NEDC), batería de 3 supercondensadores, funcionamiento a partir de 35 kW

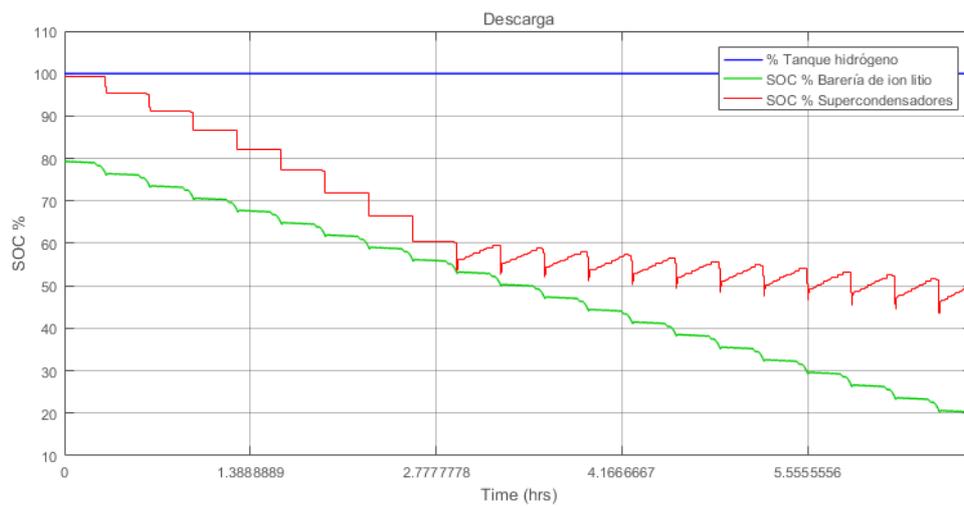


Figura 96: Perfil de descarga (NEDC), batería de 4 supercondensadores, funcionamiento a partir de 34 kW

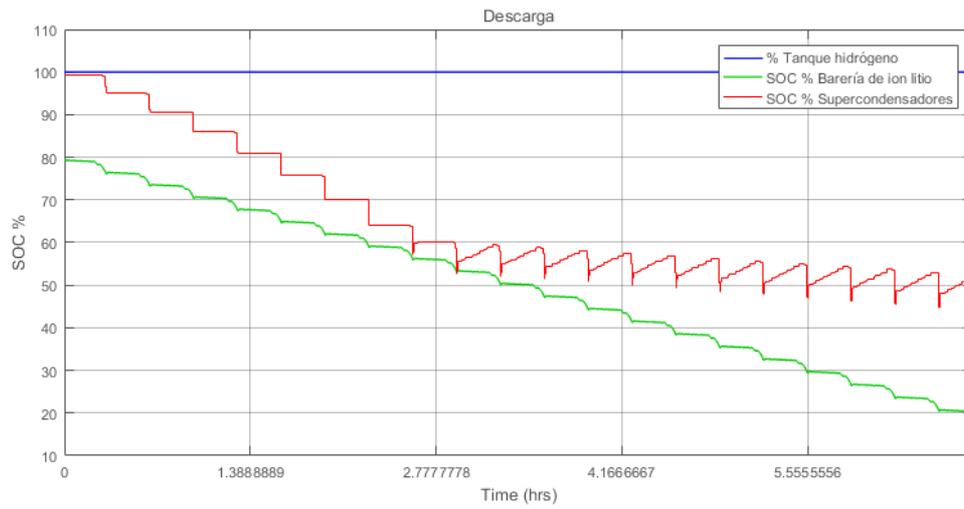


Figura 97: Perfil de descarga (NEDC), batería de 5 supercondensadores, funcionamiento a partir de 33 kW

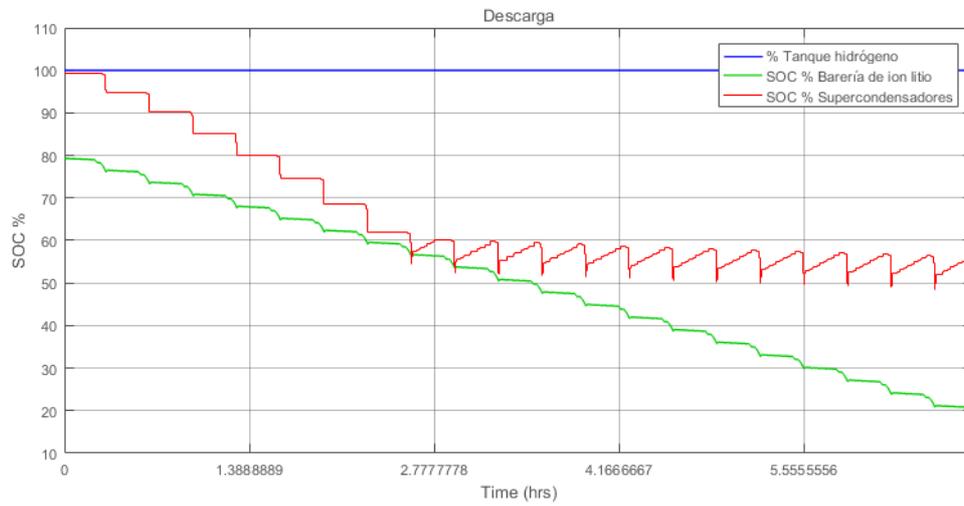


Figura 98: Perfil de descarga (NEDC), batería de 10 supercondensadores, funcionamiento a partir de 30 kW

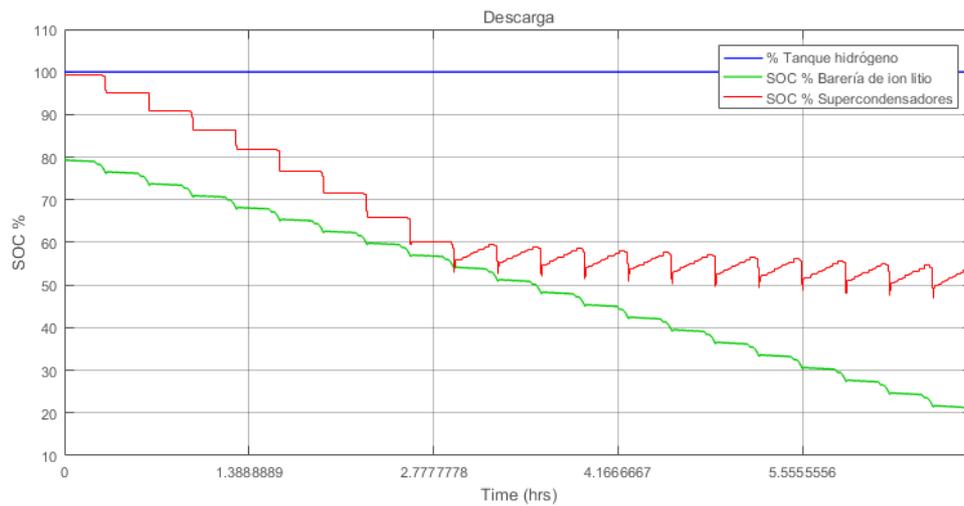


Figura 99: Perfil de descarga (NEDC), batería de 15 supercondensadores, funcionamiento a partir de 28 kW

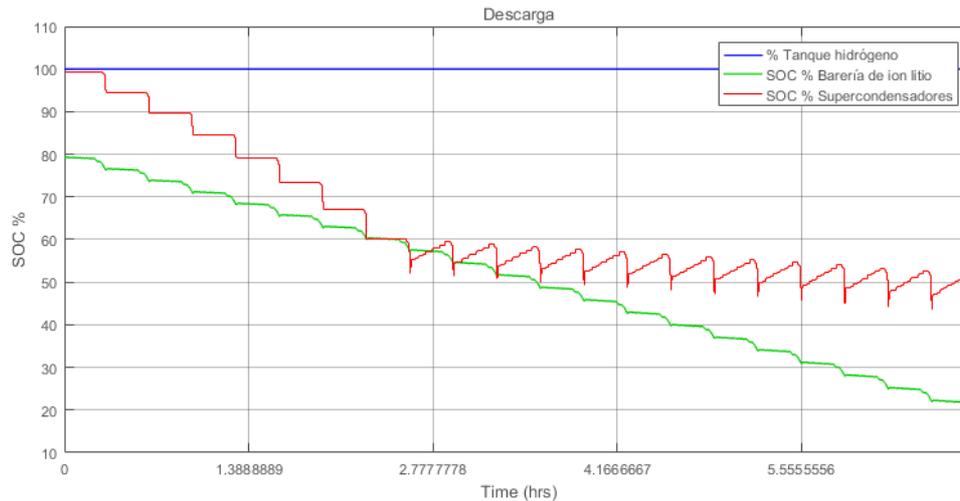


Figura 100: Perfil de descarga (NEDC), batería de 20 supercondensadores, funcionamiento a partir de 25 kW

Con la batería de 20 supercondensadores, se procede a analizar su funcionamiento. Es con esta cantidad con la que se comienza a apreciar mejor su funcionamiento.

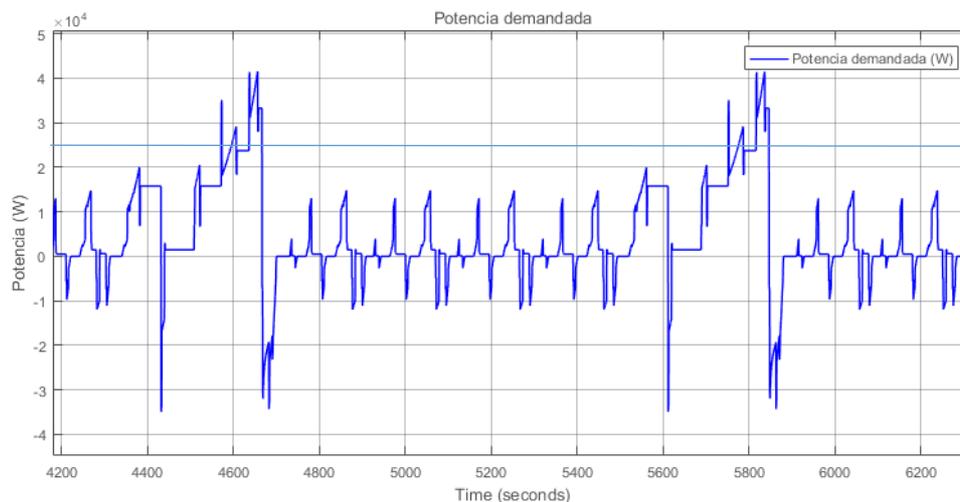


Figura 101: Fracción de los picos de potencia que absorben los supercondensadores

En la Figura 101, se ha dibujado una línea horizontal de potencia, por encima de la cual se ve la cantidad de potencia o energía que se destina a los supercondensadores. Toda la potencia inferior a esa línea es la potencia que va destinada a la batería de litio, excluyendo la parte negativa que, a partir de cierto valor del SOC de los supercondensadores, una fracción de la misma se dedica a recargarlos.

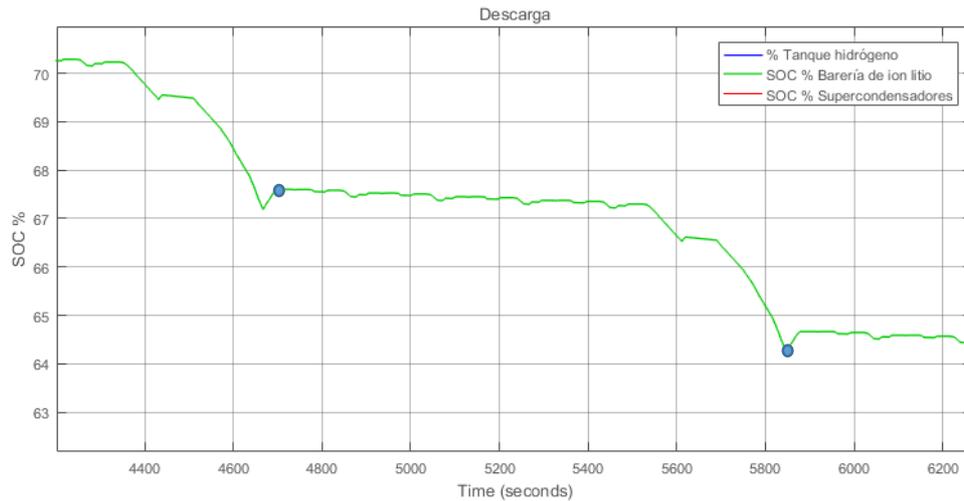


Figura 102: Zoom en perfil de descarga de la batería de ion litio de 40 kWh ante un ciclo NEDC

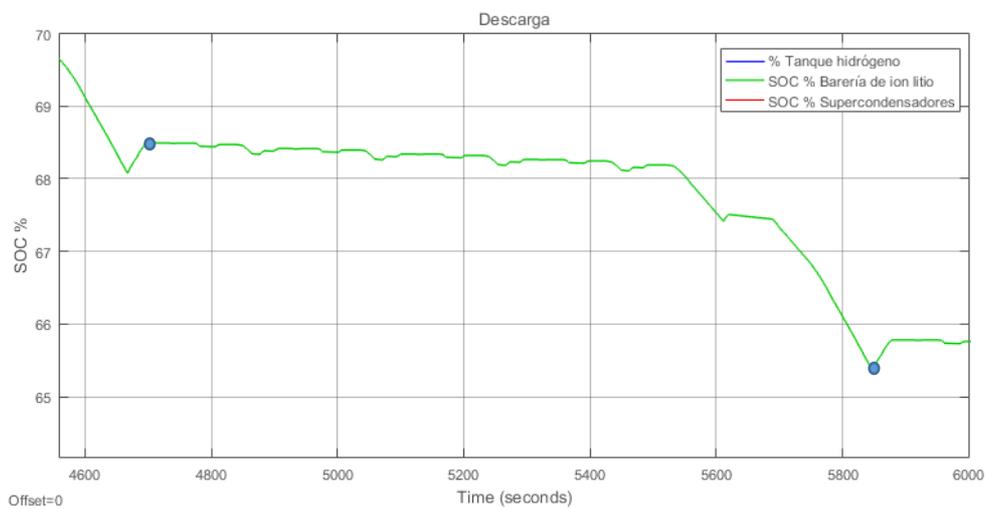


Figura 103: Perfil de descarga de la batería de litio cuando se combina con 20 supercondensadores

Comparando la Figura 102 y la 103 se aprecia un claro cambio en la evolución de su SOC. El ciclo de descarga en la Figura 102 comienza en 67,6% y termina en 64,3% aproximadamente. En la Figura 103, para el mismo ciclo, comienza en 68,4% y acaba en 65,4% aproximadamente. En el primero la diferencia es de 3,3% de SOC, mientras que en el segundo es de 3%. A parte de que el segundo comienza con un SOC mayor a causa del SOC ahorrado en los ciclos previos al mismo.

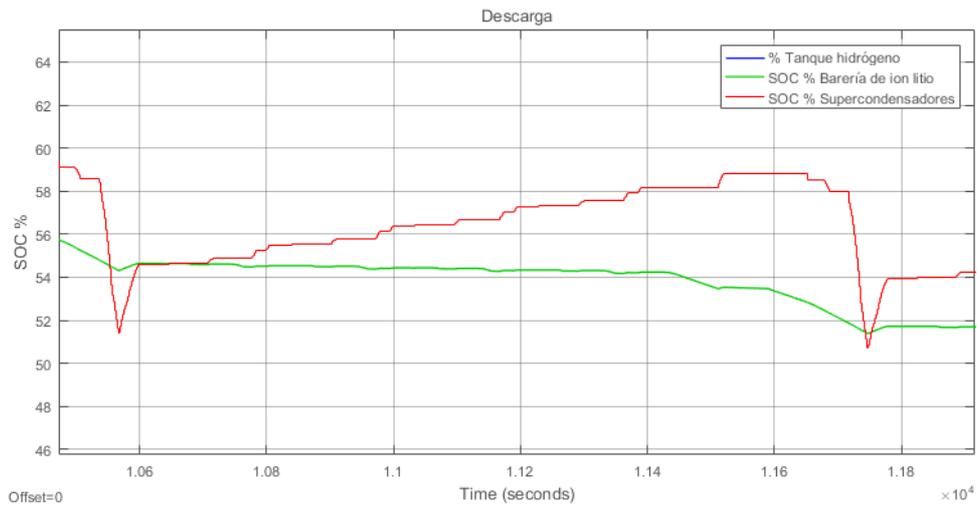


Figura 104: Recarga de una batería de 20 supercondensadores con 1/5 de la frenada regenerativa

En la Figura 104 se realiza un acercamiento sobre un ciclo de recarga de la batería de 20 supercondensadores conectados en serie. En él se puede comprobar cómo los supercondensadores son efectivos en absorber potencias o intensidades en tiempos pequeños.

A continuación, se realizan el resto de simulaciones con 30 y 50 supercondensadores:

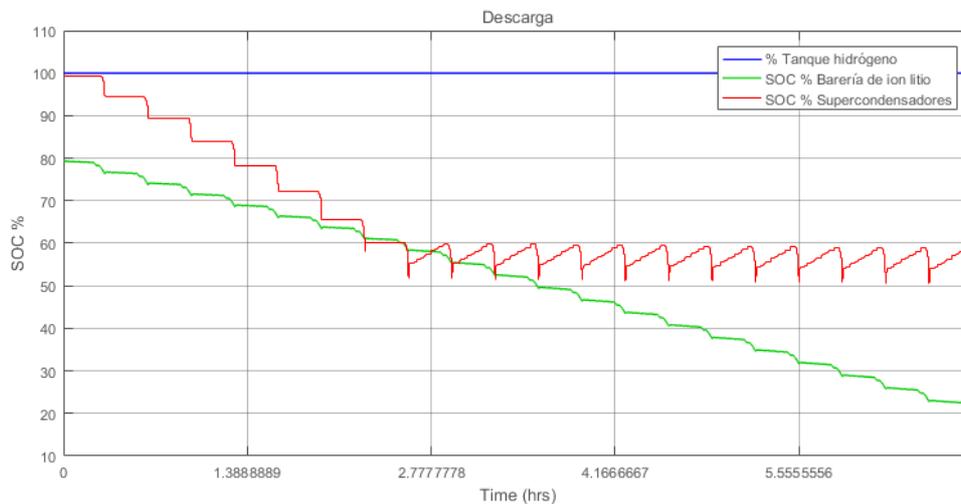


Figura 105: Perfil de descarga (NEDC), batería de 30 supercondensadores, funcionamiento a partir de 22 kW

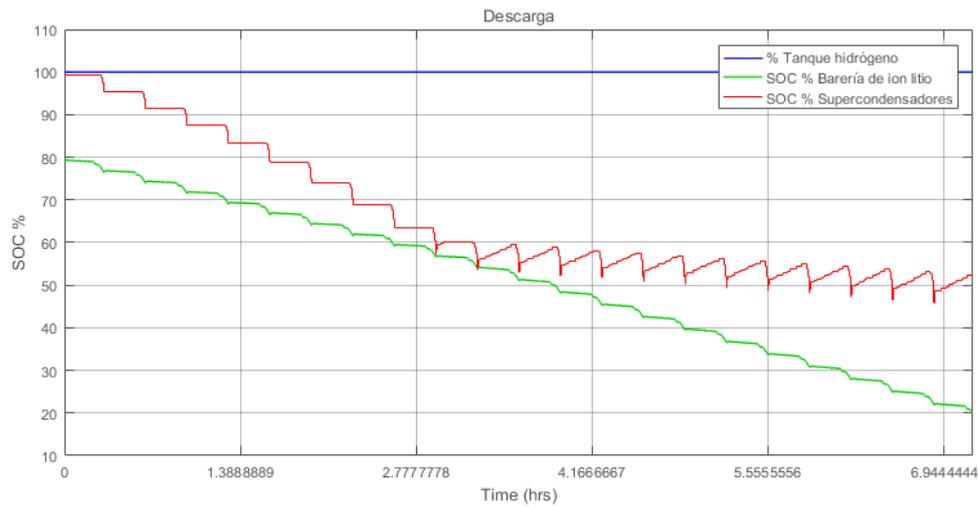


Figura 106: Perfil de descarga (NEDC), batería de 50 supercondensadores, funcionamiento a partir de 20 kW

Observando todos los perfiles de descarga de las distintas baterías de supercondensadores, se puede observar que, efectivamente, la curva de descarga del SOC de la batería de ion litio sufre un mayor aplanamiento cuanto mayor es el número de supercondensadores. Esto elimina ciertos cambios bruscos en el SOC de la batería de ion litio, causados por los picos de intensidad por la potencia demandada.

Se ha tomado nota de la autonomía lograda en cada caso, además del valor de la potencia demandada al que los supercondensadores han entrado en funcionamiento. Los resultados se muestran en los siguientes gráficos:

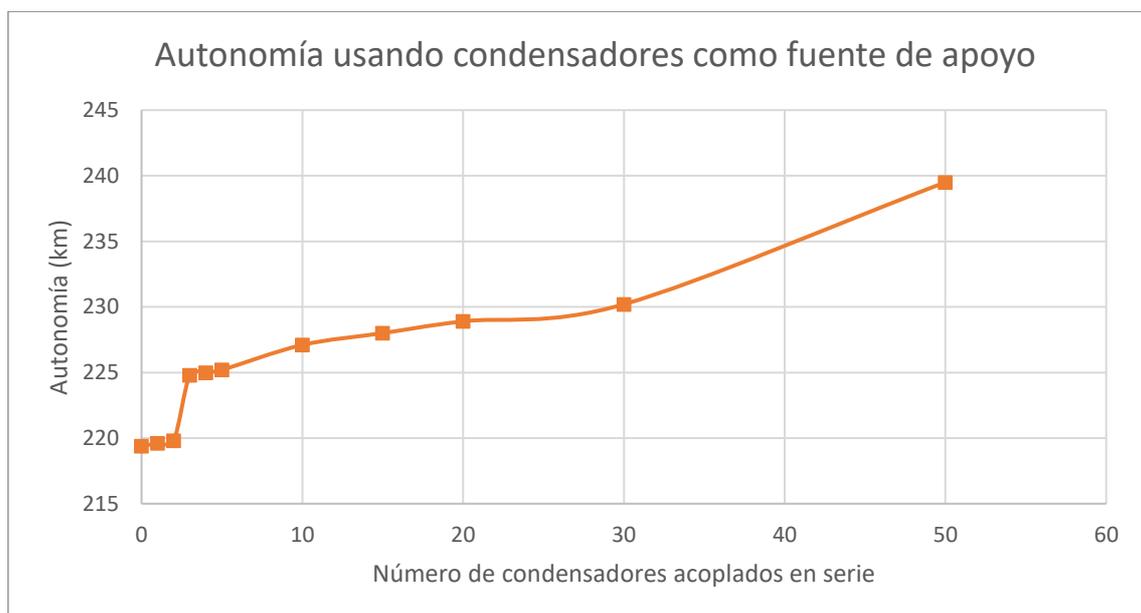


Figura 107: Cambio en la autonomía del vehículo con respecto al número de condensadores acoplados en serie.

En la figura 87, la cual muestra los resultados de las simulaciones de los supercondensadores como fuente de energía de apoyo para la batería de litio, se puede apreciar que, pese a que efectivamente los supercondensadores proporcionan una mejora en la autonomía del vehículo, esta no es significativa.

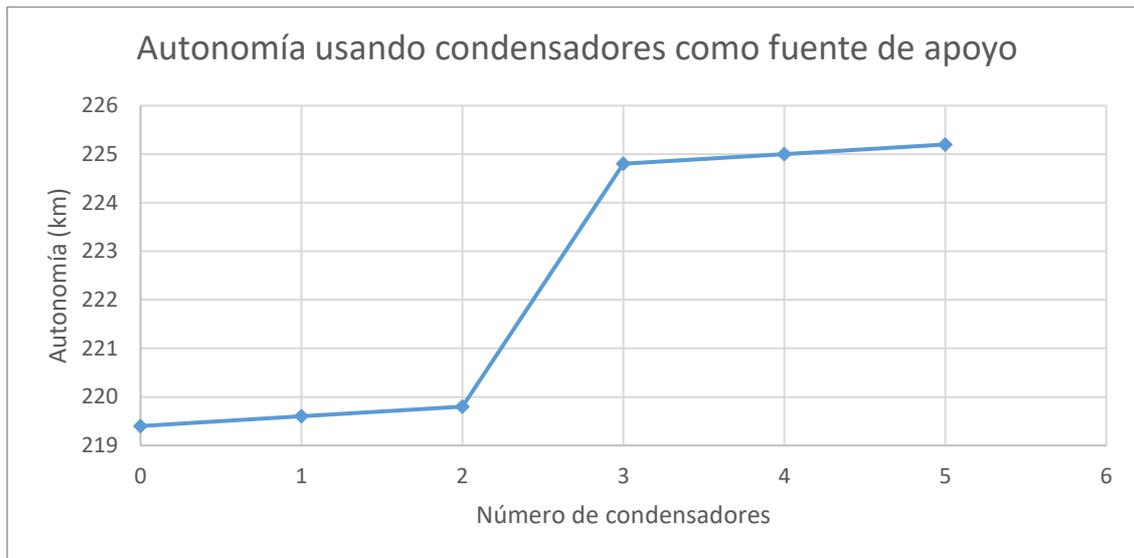


Figura 108: Cambio en la autonomía del vehículo con respecto al número de condensadores acoplados en serie.

En los dos primeros casos, donde se han usado 1 y 2 condensadores conectados en serie respectivamente, apenas se aprecia un cambio en la autonomía del vehículo. Es a partir del tercer caso, donde se han usado 3 ultracondensadores conectados en serie, donde la mejora empieza a apreciarse. Esto se ha reflejado con mayor detalle en la figura 88.

Aun así, la autonomía del vehículo no aumenta más que en 5 km, que comprende un 2,3% de mejora. La autonomía no aumenta otros 5 km hasta llegar a los 30 condensadores conectados en serie.

Se han recogido también los datos de potencia a partir de la cual los supercondensadores entran en funcionamiento en cada caso:

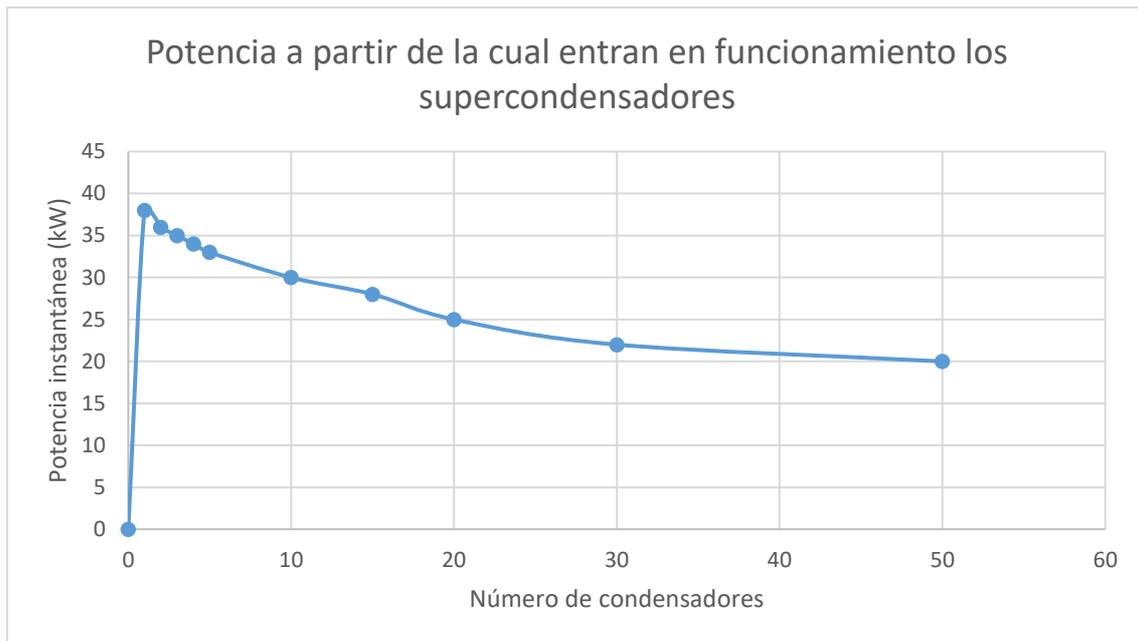


Figura 109: Potencia a la cual los supercondensadores entran en funcionamiento con respecto al número de los mismos acoplados en serie.

En la figura 89 se aprecia como la fracción de potencia de la que se encargan los supercondensadores aumentan con el número de los mismos, haciendo que el valor de la potencia demandada a la que entran en funcionamiento baje con el aumento del número de supercondensadores. La tendencia no es lineal, sino que tiende a una asíntota inferior. Esto significa que llegará un punto donde, por muchos supercondensadores que se añadan, el valor de la potencia de la que se puedan encargar no incrementará.

El causante de este comportamiento es la potencia demandada por el ciclo NEDC, mostrada en la Figura 101. En dicha curva, se aprecia que el área bajo la curva o, lo que es lo mismo, la energía demandada, se concentra en mayor cantidad a bajos valores de potencia de la curva. Esto significa que la fracción de energía, de la cual se encargan de abastecer los supercondensadores, aumentará exponencialmente con la disminución del valor de potencia a la que se activan.

Por último, se han recogido, también, los datos de la fracción de la energía de la frenada regenerativa que se implementa en la recarga de los supercondensadores a lo largo de la simulación. Dichos datos se pueden observar en la Figura 111.

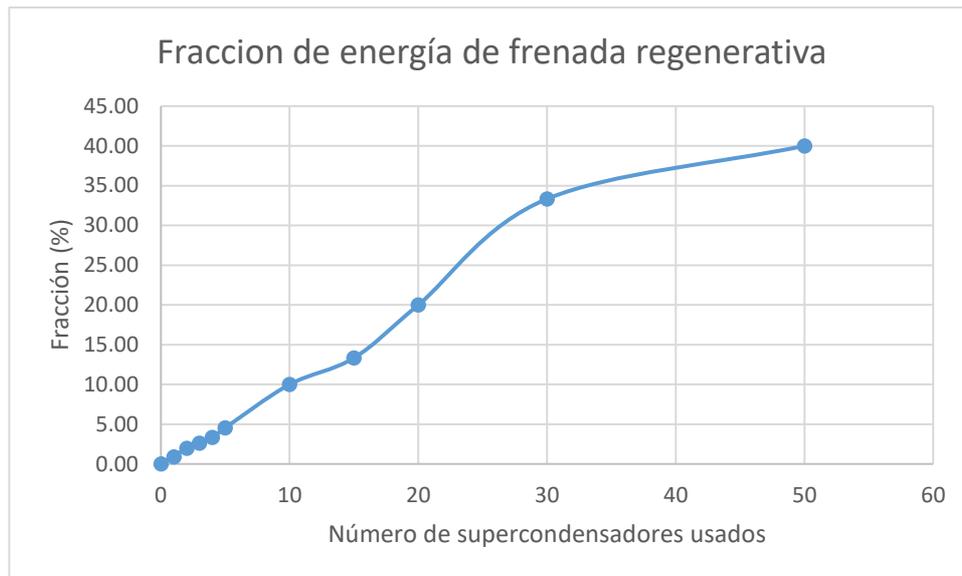


Figura 110: Cambio en la fracción de energía de frenada regenerativa usada por los supercondensadores con respecto al número de los mismos conectados en serie.

Estos datos muestran que es necesario un aumento de la energía dedicada a la recarga de los supercondensadores con el aumento del número de los mismos. La curva empieza siguiendo un patrón lineal, aunque, llegado a los 50 supercondensadores, se desvía de la tendencia hacia una menor necesidad de energía de recarga.

#### 6.4 Combinación de las tres fuentes de energía

Teniendo un mayor conocimiento de los comportamientos de las tres distintas fuentes de energía para el vehículo eléctrico, se procede a realizar varias simulaciones combinando las tres tecnologías.

La combinación está formada por:

- Batería de litio de 360 V y 25 kWh (69,4 Ah), esta vez entre 95% y 10% de SOC. Estos valores de SOC son más realistas y se han tomado del Nissan Leaf [35].
- Pila de hidrógeno de 15 kW operando entre un 45% y un 55% del SOC de la batería de ion litio a 10kW. Se le añade un tanque de hidrógeno de 50 L.

- Batería de 20 supercondensadores de 165 F y 48 V conectados en serie, activándose a partir de los 25 kW y con un aprovechamiento del 21,3% de la energía de frenada regenerativa a partir del 60% de SOC de los mismos.

La autonomía conseguida con estas características es de 471,4 km. El perfil de descarga de las distintas fuentes de energía se muestra en la Figura 112.

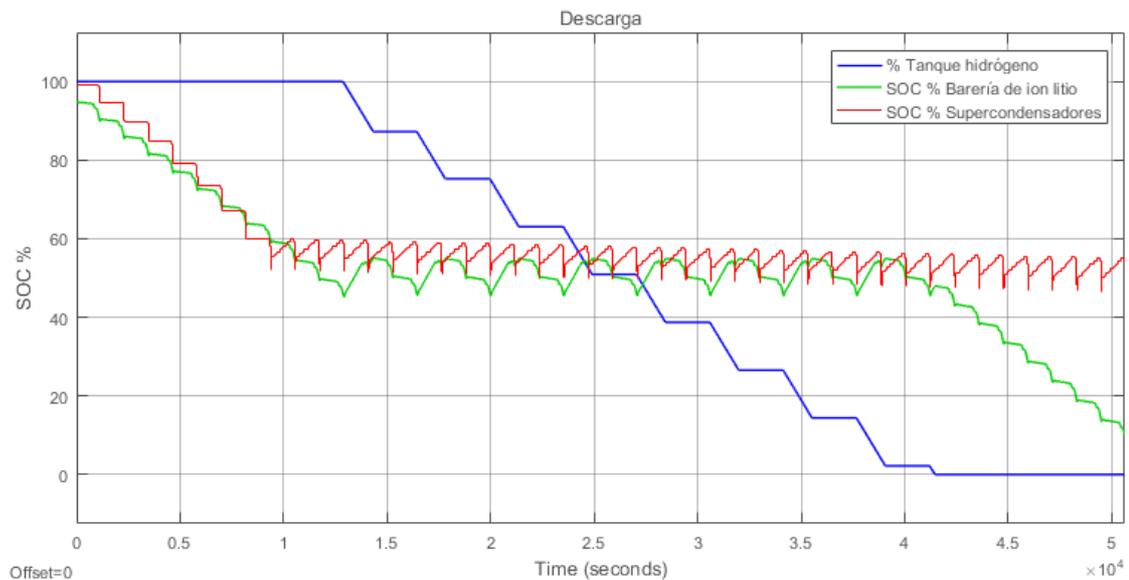


Figura 111: Característica de descarga (evolución del SOC %) de las tres fuentes de energía combinadas.

La autonomía conseguida con la combinación de las tres tecnologías es prometedora comparándola con la conseguida usando únicamente la batería de ion litio inicial de 40 kWh. La descarga de las tres fuentes de energía es adecuada y los valores paramétricos iniciales son factibles para un vehículo comercial, teniendo en cuenta los discutidos en el apartado 2.

Es necesario también, y debido a la naturaleza de este proyecto, estudiar el vehículo en el caso de que no se disponga de hidrógeno en algún momento. Para ello se ha desactivado la pila de hidrógeno en la máscara del modelo y se ha simulado la misma batería de litio usada únicamente con supercondensadores.

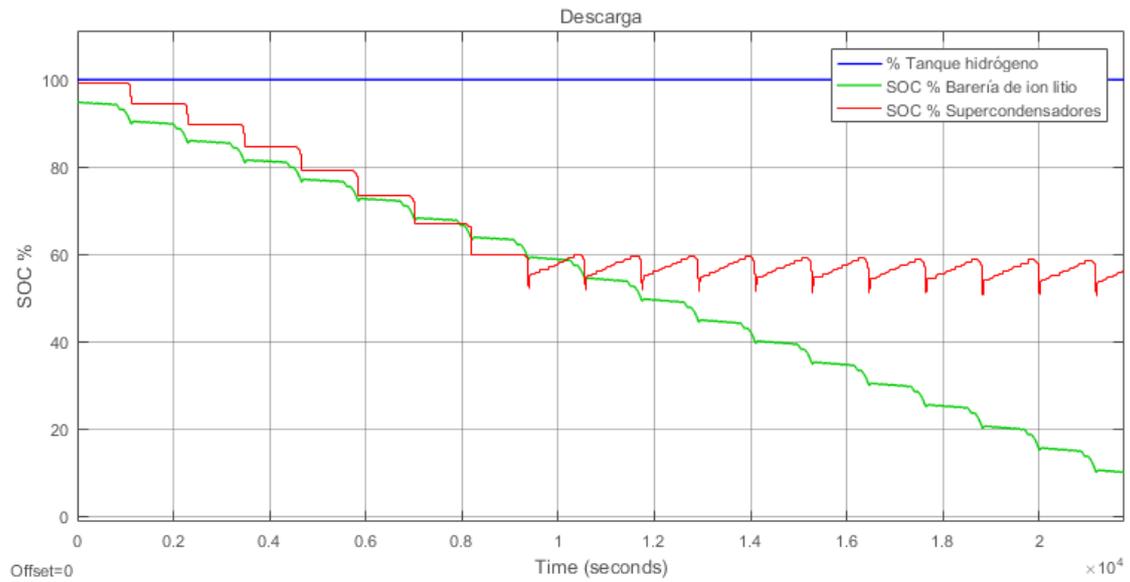


Figura 112: Simulación de la batería de ion litio en combinación con supercondensadores.

La Figura 113 muestra la descarga de la batería de litio junto con la de los supercondensadores. Esta simulación, donde no se usa la pila de combustible, simulando que el usuario no dispone de hidrógeno, o lo quiere preservar, da como resultado una autonomía de 201 km.

## 7. CONCLUSIONES

### 7.1 Fuentes de energía de apoyo

Las fuentes de energía de apoyo a la batería de litio han mostrado un aumento en la autonomía del vehículo. Mientras que este aumento en la autonomía no ha sido notable por parte de la batería de supercondensadores, la hibridación con la pila de combustible ha mostrado una mayor funcionalidad en el vehículo.

A continuación, se analizan en más detalle y por separado cada una de las fuentes de energía que han servido de apoyo a la fuente principal de litio.

#### 7.1.1 Pila de combustible

Esta es la fuente de energía que ha mostrado mejores resultados a la hora de ser una fuente de apoyo factible en el mercado. Existen ya varios vehículos comercializados en los cuales la fuente de energía principal es la pila de combustible o “fuel cell”, pero la infraestructura para la recarga de estos vehículos, como ya se ha reiterado en este proyecto, es mínima o nula en la gran mayoría de casos y países.

Por lo que los resultados han mostrado, una pila de combustible de tamaño pequeño y operando a intensidades constantes como fuente de ayuda para una batería de ion litio es una buena candidata para introducir esta tecnología en el mercado sin necesidad de una infraestructura. Esta tecnología tiene menor impacto en el medio ambiente y posee mejores propiedades en la mayoría de aspectos respecto a la batería de ion litio.

Considerando que el público que usa un vehículo diariamente no recorre, habitualmente, largas distancias, es plausible que en la mayoría de casos no llegue a agotar por completo ninguna de las fuentes de energía propuestas. Es por esto, que el usuario del vehículo, que se propone en este proyecto, tendría la capacidad de elegir qué fuente de energía quiere priorizar, dependiendo de la infraestructura a la que tenga mayor acceso.

### 7.1.2 Supercondensadores

La batería de supercondensadores no ha dado un resultado óptimo con respecto al aumento de la autonomía del vehículo. Se podría hibridar el vehículo únicamente con la pila de combustible y se obtendrían resultados similares en las simulaciones con respecto a la autonomía del vehículo, ahorrando así volumen y peso en el vehículo.

Si bien es cierto que los supercondensadores no añaden una clara ventaja con respecto a la autonomía en el vehículo, en este proyecto no se ha simulado el SOH (estado de salud por sus siglas en inglés) de la batería de litio, por lo que no quedan claros los beneficios de los supercondensadores en relación esta característica.

Un problema de las baterías de litio es su “corta” vida útil, la cual no es mucho mayor que la propia vida útil del resto de componentes de los vehículos comercializados hoy en día. Los supercondensadores, que han sido demostrados beneficiosos para la vida útil de la batería de litio, es decir, su SOH (estado de salud), tienen la capacidad de aumentar esta característica notablemente. De llevar a cabo su instalación en vehículos que operan con una batería de ion litio, supondrían una gran ventaja medioambiental, aumentando la vida útil de la batería de ion litio. Al fin y al cabo, el fin de la movilidad sostenible está orientado a la mejora del trato hacia el medio ambiente por lo que, si en vez de una batería de litio por coche se pudiese usar la misma batería, reciclándola, en múltiples vehículos, o mejor aún, aumentar también la vida útil del resto de los componentes del vehículo, supondría un gran avance hacia el mejor trato al medio ambiente.

Es destacable también, que los supercondensadores superan notablemente a la tecnología de litio en términos de vida útil. Por lo que, la vida útil de la batería de ion litio y la de los supercondensadores iría a la par. Esto no solo reduciría la contaminación, ya que se fabricaría y se desearía menos cantidad, sino también ofreciendo una gran ventaja económica a la hora de comprar un vehículo eléctrico, el cual podría tener baterías recicladas de otros vehículos cuyos componentes hayan sobrepasado su vida útil.

En el caso de que la pila de combustible se imponga como la fuente de energía principal en vehículos eléctricos, los supercondensadores no dejarían de tener una función

importante. Como ya se ha explicado anteriormente, la pila de combustible no trabaja óptimamente con variaciones de la intensidad demandada y opera más eficientemente a intensidades constantes, por lo que, si se adjuntase una batería de supercondensadores con el fin de absorber los cambios bruscos de intensidad, aumentaría la eficiencia de la pila de combustible notablemente.

## 7.2 Combinación de las tres fuentes de energía

Con respecto a la combinación de las tres tecnologías de fuentes de energía en el vehículo, los resultados son óptimos. Teóricamente, la combinación de batería de ion litio con pila de combustible y batería de supercondensadores es factible en un vehículo comercial.

Este proyecto pretende demostrar que es posible introducir la tecnología de la pila de combustible sin importar la infraestructura actual. Con el fin de promover esta fuente de energía más limpia y con claras ventajas sobre las actuales baterías de ion litio. Por lo tanto, se ha simulado dicha posibilidad, es decir, que no se disponga de hidrógeno y el tanque esté vacío.

En esta simulación, en la cual se descarta la pila de combustible, la autonomía resulta ser 201 km, una autonomía más que suficiente para la mayoría de desplazamientos, considerando que la media de distancia recorrida diaria en España era de 41,6 km en 2014 [36].

Como ya se ha explicado previamente, sería interesante el uso de una red neuronal que prediga el ciclo que se va a recorrer por medio de datos recopilados del uso del vehículo a lo largo del tiempo o bien prediciendo un ciclo por medio de una ruta por GPS. Esta inteligencia artificial podría, entonces, calcular los mejores momentos para activar y desactivar la pila de combustible, así como tener en cuenta la preferencia del usuario para preservar una fuente de energía.

También podría calcular el estado de carga óptimo de los supercondensadores y adecuar la potencia a la que son activados, así como la fracción de potencia generada en la frenada regenerativa que se destina a los mismos.

Esto optimizaría, al máximo, el sistema de combinación de fuentes de energía en su totalidad, aumentando la autonomía del vehículo y la vida útil de las tres fuentes de energía.

## Bibliografía

[1] “Fuel Economy of 2018 Tesla Vehicles”, *Fueleconomy*, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.fueleconomy.gov/feg/bymake/Tesla2018.shtml>

[2] “Tesla Model S”, *Wikipedia*, 2018. [En línea]. Disponible en: [https://en.wikipedia.org/wiki/Tesla\\_Model\\_S](https://en.wikipedia.org/wiki/Tesla_Model_S)

[3] “Tesla Model 3”, *Wikipedia*, 2018. [En línea]. Disponible en [https://en.wikipedia.org/wiki/Tesla\\_Model\\_3](https://en.wikipedia.org/wiki/Tesla_Model_3)

[4] “Nissan Leaf”, *Wikipedia*, 2018. [En línea]. Disponible en [https://en.wikipedia.org/wiki/Nissan\\_Leaf](https://en.wikipedia.org/wiki/Nissan_Leaf)

[5] “2018 Nissan Leaf battery real specs”, *Pushevs*, 2018. [En línea]. Disponible en <https://pushevs.com/2018/01/29/2018-nissan-leaf-battery-real-specs/>

[6] “BMW i3”, *Wikipedia*, 2018. [En línea]. Disponible en [https://en.wikipedia.org/wiki/BMW\\_i3](https://en.wikipedia.org/wiki/BMW_i3)

[7] “Cleaner Cars from Cradle to Grave”, *Union of Concerned Scientists*, 11-2015. [En línea]. Disponible en <http://www.ucsusa.org/EVlifecycle>

[8] “Toyota Prius technical specifications”, *Toyota UK*. [En línea]. Disponible en [http://media.toyota.co.uk/wp-content/files\\_mf/1329489972120216MTOYOTAPRIUSTECHNICALSPECIFICATIONNS.pdf](http://media.toyota.co.uk/wp-content/files_mf/1329489972120216MTOYOTAPRIUSTECHNICALSPECIFICATIONNS.pdf)

[9] “2016 Chevrolet Volt battery system”, *GM*, 2016. [En línea]. Disponible en [https://media.gm.com/content/dam/Media/microsites/product/Volt\\_2016/doc/VOLT\\_BATTERY.pdf](https://media.gm.com/content/dam/Media/microsites/product/Volt_2016/doc/VOLT_BATTERY.pdf)

- [10] “Next-gen Chevy Volt EREV is more efficient, with 50-mile electric range”, *Green Car Congress*, 12-01-2015. [En línea]. Disponible en <http://www.greencarcongress.com/2015/01/next-gen-chevy-volt-erev-is-more-efficient-with-50-mile-electric-range.html>
- [11] U. Fisk, “Why aren’t we all driving hydrogen fuel cell cars?”, *Grist*, 01-12-2014. [En línea]. Disponible en <https://grist.org/business-technology/why-arent-we-all-driving-hydrogen-fuel-cell-cars/>
- [12] P. Veenhuizen et al., “Hyundai ix35 FCEV Fuel Efficiency and Driver Experience”, *HAN Automotive Research*, 14-04-2017.
- [13] “Outline of the Mirai”, *Toyota-Europe*, 11-2014. [En línea]. Disponible en [https://www.toyota-europe.com/download/cms/euen/Toyota%20Mirai%20FCV\\_Posters\\_LR\\_tcm-11-564265.pdf](https://www.toyota-europe.com/download/cms/euen/Toyota%20Mirai%20FCV_Posters_LR_tcm-11-564265.pdf)
- [14] “Honda FCX Clarity Press Kit”, *Honda News*, 11-2007. [En línea]. Disponible en <http://hondanews.com/releases/48c81c21-37d7-c3f2-23ed-3a004c34bdb5>
- [15] “State of Charge (SOC) Determination”, *Electropaedia*. [En línea]. Disponible en <https://www.mpoweruk.com/soc.htm>
- [16] “State of Health (SOH) Determination”, *Electropaedia*. [En línea]. Disponible en <https://www.mpoweruk.com/soh.htm>
- [17] “Electrochemical Energy”, *Electropaedia*. [En línea]. Disponible en [https://www.mpoweruk.com/chemical\\_energy.htm](https://www.mpoweruk.com/chemical_energy.htm)
- [18] C. Hou, H. Wang y M. Ouyang, “Battery Sizing for Plug-in Hybrid Electric Vehicles in Beijing: A TCO Model Based Analysis”, *Energies*, vol. 7, pp. 5374-5399, jul.-ago. 2014.

- [19] V. Singh, “Simulation of Electric Vehicle Including Different Power Train Components”, Tesis de máster, Dpto. de propulsión y tracción eléctrica, Facultad de ingeniería eléctrica, Universidad Técnica Checa, Praga, República Checa, 2017.
- [20] B. Mok, “Types of Batteries Used for Electric Vehicles”, Universidad de Stanford, 2016. [En línea]. Disponible en <http://large.stanford.edu/courses/2016/ph240/mok2/>
- [21] A. Stan, M. Swierczynski, D. Stroe, R. Teodorescu y S. J. Andreasen, “Lithium Ion Battery Chemistries from Renewable Energy Storage to Automotive and Back-up Power Applications - An Overview”, *IEEE 978-1-4799-5183-3*, vol. 14, pp. 713-720, 2014.
- [22] J. Larminie y A. Dicks, *Fuel Cell Systems Explained*, 2ª ed., West Sussex: John Wiley & Sons Ltd., 2003.
- [23] “How does a Supercapacitor Work?”, *Battery university*, 21-04-2017. [En línea]. Disponible en [http://batteryuniversity.com/index.php/learn/article/whats\\_the\\_role\\_of\\_the\\_supercapacitor](http://batteryuniversity.com/index.php/learn/article/whats_the_role_of_the_supercapacitor)
- [24] A. F. Burke, “Batteries and Ultracapacitors for Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles”, *Proceedings of the IEEE*, vol. 95, pp. 806-820, 2007.
- [25] C.E. Thomas, “Fuel Cell and Battery Electric Vehicles Compared”, Reunión annual the la Asociación Nacional de Hidrógeno, Sacramento, California, 31-03-2008.
- [26] R. Carter, A. Cruden y P. J. Hall, “Optimizing for Efficiency or Battery Life in a Battery/Supercapacitor Electric Vehicle”, *IEEE Transactions on vehicular technology*, vl. 61, nº 4, 04-05-2012.
- [27] A. Westervelt, “Tesla’s new batteries may be harder on the environment than you think”, *The Guardian*, 10-06-2015. [En línea]. Disponible en <https://www.theguardian.com/vital-signs/2015/jun/10/tesla-batteries-environment-lithium-elon-musk-powerwall>

[28] “Abundancia de los elementos químicos”, *Wikipedia*, 2018. [En línea]. Disponible en [https://es.wikipedia.org/wiki/Abundancia\\_de\\_los\\_elementos\\_qu%C3%ADmicos#Abundancia\\_de\\_los\\_elementos\\_en\\_el\\_Universo](https://es.wikipedia.org/wiki/Abundancia_de_los_elementos_qu%C3%ADmicos#Abundancia_de_los_elementos_en_el_Universo)

[29] “Producción de hidrógeno”, *Wikipedia*, 2018. [En línea]. Disponible en [https://es.wikipedia.org/wiki/Producci%C3%B3n\\_de\\_hidr%C3%B3geno](https://es.wikipedia.org/wiki/Producci%C3%B3n_de_hidr%C3%B3geno)

[30] “Model and simulate multidomain physical systems”, Mathworks, 2018. [En línea]. Disponible en <https://es.mathworks.com/products/simscape.html>

[31] S. Zoroofi, “Modeling and Simulation of Vehicular Power Systems”, Tesis de master, Dpto. de Energía y Medio Ambiente, Chalmers University of Technology, Gotemburgo, Suecia, 2008.

[32] I. Baboselac, Z. Hederic y T. Bensic, “Matlab simulation model for dynamic mode of the lithium-ion batteries to power the ev”, *TEHNIČKI GLASNIK*, vol. 11, pp. 7-13, 2017.

[33] Documentación Simulink MATLAB, R2016a, The Mathworks, Inc., Natick, Massachusetts, Estados Unidos.

[34] Supercondensador BMOD0165 P048 C01, Maxwell Technologies. [En línea]. <https://www.mouser.es/ProductDetail/Maxwell-Technologies/BMOD0165-P048-C01?qs=vabgM74n7ECtM3JuI4EDEQ==>

[35] Lemon-Tea Leaf, “4’ kWh Nissan leaf 2.zero 2018 -Fully charged to 0% What does Leaf Spy have to say?”, *Youtube*, 18-03-2018. [Video en línea]. Disponible en <https://www.youtube.com/watch?v=u5DxpaQo7gI>

[36] “¿Cómo nos movemos?”, *Ministerio de agricultura, pesca y alimentación, Gobierno de España*, 11-2014. [En línea]. Disponible en <http://www.mapama.gob.es/es/ceneam/carpeta-informativa-del-ceneam/novedades/como-nos-movemos.aspx>

[37] “Batería de níquel-metal hidruro”, *Wikipedia*, 2018. [En línea].

[https://es.wikipedia.org/wiki/Bater%C3%ADa\\_de\\_n%C3%ADquel-metal\\_hidruro](https://es.wikipedia.org/wiki/Bater%C3%ADa_de_n%C3%ADquel-metal_hidruro)

[38] “Electrolytic cell”, *Tutorvista*. [En línea]. <https://chemistry.tutorvista.com/physical-chemistry/electrolytic-cell.html>