



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

Estudio de la implementación de un sistema híbrido pila de combustible-batería en un vehículo para personas con movilidad reducida

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Química

AUTOR/A: Vallejo Virtus, María

Tutor/a: Montero Reguera, Álvaro Enrique

Cotutor/a: Sánchez Díaz, Carlos

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIERÍA
INDUSTRIAL VALENCIA

TRABAJO FIN DE MASTER EN INGENIERÍA QUÍMICA

ESTUDIO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA HÍBRIDO "PILA DE COMBUSTIBLE + BATERÍA" EN UN VEHÍCULO PARA PERSONAS CON MOVILIDAD REDUCIDA.

AUTORA: MARÍA VALLEJO VIRTUS

TUTOR: ÁLVARO ENRIQUE MONTERO REGUERA

COTUTOR: CARLOS GARCÍA DÍAZ

Curso Académico: 2021-22

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Álvaro E. Montero Reguera y al Dr. Carlos Sánchez Díaz por ser mis tutores en este Trabajo Final de Máster. Quiero agradecerles el tiempo que me han dedicado y los muchos conocimientos que he adquirido, más allá del objetivo de este proyecto. Muchas gracias por vuestra plena predisposición Me gustaría poner en valor la labor científica que desempeñan y la ilusión por el conocimiento que transmiten.

Además, quiero aprovechar la ocasión para agradecer el apoyo de mis amigos aquí en Valencia, han sido una familia para mí estos tres últimos años, en particular a Laura, Bea, Carlos, y especialmente a Jorge. Muchas gracias por tu cariño. Asimismo, no puedo olvidar en este momento a mi familia, sobre todo a mis padres y a mi hermano, que, aunque desde la distancia, sé que tengo su máximo apoyo en todo momento.

Para finalizar me gustaría agradecer a Antía, Glo y Gema, por el día a día.

RESUMEN

El agotamiento de los combustibles fósiles y el cambio climático han impulsado el desarrollo de fuentes de energía alternativas. Una opción para reducir la presencia de los combustibles tradicionales se relaciona con la economía del hidrógeno, H_2 , debido a su elevada densidad energética. Además, si se obtiene a partir de fuentes limpias, no produce ningún residuo contaminante, ya que en su combustión el único subproducto es el agua.

El objetivo de este Trabajo Final de Máster es estudiar la implementación de un sistema híbrido “pila de combustible + batería” que proporcione la potencia necesaria para un vehículo para personas con movilidad reducida. El vehículo elegido requiere una potencia pico de 500W. En los vehículos actuales esta potencia es suministrada únicamente por la batería, lo que limita su autonomía y la hace pesada y difícil de manejar.

Por todo ello se ha estudiado la implementación de una pila de hidrógeno como fuente de energía. No obstante, este elemento no responde adecuadamente ante las variaciones de potencia requeridas en los momentos de arranque y picos de demanda. Debido a estas limitaciones, se propone su hibridación con una pequeña batería.

En primer lugar, se presenta el estado del arte de las dos fuentes energéticas involucradas y sus modelos de comportamiento. Posteriormente, se plantean dos configuraciones del circuito eléctrico (en serie y en paralelo) y se establece la estrategia energética en cada caso. Se realiza la simulación de las configuraciones a partir de los modelos y de la curva de demanda de potencia empíricos para una autonomía objetivo.

En base a los resultados se analiza cuál de las configuraciones estudiadas es la más conveniente para el caso de aplicación; y se hace un dimensionamiento de los dos dispositivos para escogerlos entre los disponibles comercialmente. Finalmente se analiza las ventajas e inconvenientes del sistema propuesto.

Palabras Clave: Batería; Pila de combustible; Hidrógeno; Modelado y simulación; Autonomía; Emisiones.

RESUM

L'esgotament dels combustibles fòssils i el canvi climàtic han impulsat el desenvolupament de fonts d'energia alternatives. Una opció per a reduir la presència dels combustibles tradicionals es relaciona amb l'economia de l'hidrogen, H_2 , a causa de la seua elevada densitat energètica. A més, si s'obté a partir de fonts netes, no produeix cap residu contaminant, ja que en la seua combustió l'únic subproducte és l'aigua.

L'objectiu d'aquest Treball Final de Màster és estudiar la implementació d'un sistema híbrid “pila de combustible+ bateria” que proporcione la potència necessària per a un vehicle per a persones amb mobilitat reduïda. El vehicle triat requereix una potència pique de 500W. En els vehicles actuals aquesta potència és subministrada únicament per la bateria, la qual cosa limita la seua autonomia i la fa pesada i difícil de manejar.

Per tot això s'ha estudiat la implementació d'una pila d'hidrogen com a font d'energia. No obstant això, aquest element no respon adequadament davant les variacions de potència requerides en els moments d'arrancada i pics de demanda. A causa d'aquestes limitacions, es proposa la seua hibridació amb una xicoteta bateria.

En primer lloc, es presenta l'estat de l'art de les dues fonts energètiques involucrades i els seus models de comportament. Posteriorment, es plantegen dues configuracions del circuit elèctric (en sèrie i en paral·lel) i s'estableix l'estratègia energètica en cada cas. Es realitza la simulació de les configuracions a partir dels models i de la corba de demanda de potència empírics per a una autonomia objectiu.

Sobre la base dels resultats s'analitza quin de les estratègies estudiades és la més convenient per al cas d'aplicació; i es fa un dimensionament dels dos dispositius per a triar-los entre els disponibles comercialment. Finalment s'analitza els avantatges i inconvenients del sistema proposat.

Paraules clau: Pila de combustible; Hidrogen; Modelatge i simulació; Autonomia; Emissions.

ABSTRACT

Depletion of fossil fuels and climate change have driven the development of alternative energy resources. An option to reduce the presence of traditional fuels is related to hydrogen, H₂, due to his power density. If the H₂ is produced using clean and renewable energy sources, it does not produce any contaminant, since water is the only subproduct in its combustion.

The objective of this Final Master Project is to study the implementation of a hybrid system “fuel cell + battery” that supplies the necessary power to move a vehicle for people with reduced mobility. The chosen vehicle requires a peak power of 500W. In the current vehicles the power is supplied only by the battery, what limits its autonomy and makes it heavy and unwieldy.

Due to all these reasons, the implementation of a fuel cell as an energy source has been studied. However, this device does not adequately respond to power variations, which are required in starting toques and demand peaks. Due to these limitations, its hybridization with a small battery is proposed.

First, the state of the art in the two energy sources involved and their descriptive models are presented. Afterwards, two possible configurations of the electrical circuit are proposed (series and parallel circuit) and the energy strategy is set for each case. The simulation of the configurations is done based on the models and the empirical power demand curve for a targeted autonomy.

On the basis of the results obtained, the most suitable configuration is chosen for this application; and the equipment sizing is done to choose them among the commercially available. Finally, the advantages and disadvantages of the proposed system are analysed.

Keywords: Battery; Fuel cell; Hydrogen; Modelling and simulation; Autonomy; Emissions.

ÍNDICE GENERAL DEL TRABAJO FINAL DE **MÁSTER**

- Memoria
- Presupuesto
- Anexos



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCOLA TÈCNICA
SUPERIOR ENGINYERIA
INDUSTRIAL VALÈNCIA

MEMORIA

ESTUDIO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA HÍBRIDO
“PILA DE COMBUSTIBLE + BATERÍA” EN UN VEHÍCULO PARA
PERSONAS CON MOVILIDAD REDUCIDA

ÍNDICE DE LA MEMORIA

1	OBJETIVOS Y ALCANCE DEL PROYECTO	1
1.1	Objetivos	1
1.1.1	Objetivo general del proyecto.....	1
1.1.2	Objetivos específicos del proyecto.....	1
1.1.3	Objetivos académicos del proyecto.	2
1.2	Alcance	2
1.3	Estructura del Trabajo Final de Máster	2
2	INTRODUCCIÓN.....	3
2.1	Energía.....	3
2.1.1	Primer principio de conservación de la energía.....	3
2.1.2	Tipos de energía	4
2.1.3	Papel de la energía en la humanidad	4
2.1.4	Energía primaria y secundaria.....	5
2.1.5	Consumo energético	11
2.1.6	Necesidad de una transición energética	13
2.2	Situación actual de las energías alternativas	15
2.2.1	Almacenamiento energético	16
2.2.2	Tipos de almacenamiento de energía	18
2.3	Baterías y condensadores	25
2.3.1	Tipos de baterías	26
2.3.2	Supercondensadores.....	30
2.4	Celdas de combustible	31
2.4.1	Tipos de celdas de combustible	32
2.4.2	Ventajas de la pila de combustible de hidrógeno	35
2.4.3	Inconvenientes de la pila de combustible de hidrógeno	35
2.4.4	Pila de combustible vs batería vs supercondensador	36
2.5	Motor eléctrico aplicado a movilidad	37
2.5.1	Sistema de propulsión híbrido (HEV)	38
2.5.2	Motor de combustión empleando hidrógeno.....	39
2.6	Sistemas de propulsión FC-HEV.	41
2.6.1	Pila de combustible + batería.....	42

Estudio de la implementación de un sistema híbrido “pila de combustible + batería” en un vehículo para personas con movilidad reducida.

2.6.2	Pila de combustible + supercondensador	42
2.6.3	Pila de combustible + batería + supercondensador	42
2.6.4	Estrategias de gestión de energía.	43
2.7	Estado del arte de los vehículos para personas con movilidad reducida.	44
3	MODELO DESCRIPTIVO DE LOS ELEMENTOS DEL SISTEMA	51
3.1	Modelo descriptivo de la pila de combustible	51
3.1.1	Termodinámica del sistema	51
3.1.2	Potencial energético de una PEMFC	52
3.1.3	Efecto de la temperatura, presión y la concentración en el potencial de celda.	54
3.1.4	Cinética electroquímica.....	56
3.2	Modelo descriptivo de la batería	63
3.2.1	Tasas de carga y descarga de una batería.....	64
4	ESPECIFICACIONES DEL VEHÍCULO Y DESCRIPCIÓN DE LA CURVA DE DEMANDA	67
4.1	Dispositivo estudiado	67
4.1.1	Justificación del estudio	68
4.2	Elementos del sistema	69
4.3	Frenada regenerativa	71
4.4	Curva de demanda	72
4.4.1	Curva de demanda en una ciudad tipo Valencia.....	73
4.4.2	Curva de demanda en una ciudad tipo Bilbao	74
5	SIMULACIÓN DEL PROCESO, SELECCIÓN DE EQUIPOS Y CONSUMO DE HIDRÓGENO.....	77
5.1	Configuraciones del circuito eléctrico	77
5.1.1	Estrategia energética.....	77
5.2	Selección de equipos.....	79
5.2.1	Batería	79
5.2.2	Dimensionamiento de la pila de combustible PEMFC y de la botella de H ₂	85
5.3	Cálculo de hidrógeno consumido.....	88
5.3.1	Colocación de los elementos en el vehículo	91
5.4	Cálculo de los contaminantes no emitidos	91
6	CONCLUSIONES	93
6.1	Conclusiones.....	93
6.2	Líneas futuras de trabajo.....	94
7	BIBLIOGRAFÍA.....	95

TABLA DE FIGURAS

Figura 1 Tipos de energía primaria y secundaria. Traducido de (Demirel, 2016).	5
Figura 2 Esquema general de una central térmica para la producción de electricidad (Sánchez Pérez, n.d.).	6
Figura 3 Resultado de la fisión nuclear (Planas, 2021).....	7
Figura 4 Esquema de una central hidroeléctrica de embalse (Ingoexpert, 2018).	8
Figura 5 Colector térmico (Rivas, 2013).	9
Figura 6 Parque eólico (Echeverri Londoño, 2017).	9
Figura 7 a) Planta energética geotérmica (Bergamo, 2016). b) Bomba de calor para calefacción de un hogar (Gómez de Agüero, 2019).	10
Figura 8 Consumo energético, histórico y previsión para los próximos 30 años (IEO, 2021).	12
Figura 9 Gráfico circular de las fuentes energéticas de electricidad en 2019 (AIE, 2019).	12
Figura 10 Evolución de obtención de energía renovable por fuentes (Ritchie & Roser, 2020). .	15
Figura 11 Energía solar promedio anual generada en la ciudad de Dhanka (Bangladesh) (Jahid et al., 2019).	16
Figura 12. Aplicaciones del ESS (Traducido de Koohi-Fayegh & Rosen, 2020).	17
Figura 13 a) Componentes de un sistema de almacenamiento energético. (Akinyele & Rayudu, 2014).	17
Figura 14 Tipos de almacenamiento de energía (Traducido de Koohi-Fayegh & Rosen, 2020). 18	
Figura 15 Sistema de energía hidráulica de bombeo (Ould Amrouche et al., 2016).	19
Figura 16 Central eléctrica funcionando con aire comprimido (Ould Amrouche et al., 2016). ..	20
Figura 17 Esquema básico de una celda galvánica (Díaz Baizán, 2016).	21
Figura 18 Obtención de hidrógeno a partir de energía renovable (Wood Mackenzie, 2020).	23
Figura 19 Tipos de almacenamiento energético según su función (H. Chen et al., 2009).	24
Figura 20. Esquema de una batería recargable (Vishnumurthy & Girish, 2021).	26
Figura 21 Esquema de una batería de iones de litio y cátodo de LiCoO ₂ (Song et al., 2011).	28
Figura 22 Esquema de los diferentes tipos de condensadores (Akinyele & Rayudu, 2014).	31
Figura 23 Esquema PEMFC (izquierda), ejemplo de celda real (derecha).	32
Figura 24 Rango de aplicación de cada tipo de celda de combustible (Antig, n.d.).	34
Figura 25 Gráfico Ragone de almacenamiento de energía (Hall & Bain, 2008).	36
Figura 26 Izquierda: Esquema de un coche eléctrico (Helmers & Marx, 2012). Derecha: Esquema de un motor eléctrico (Sanabria Betancur et al., 2016).	37
Figura 27 Posibles configuraciones de propulsión híbridos (López Martínez, 2018).	39

Figura 28 Esquema de PEMFC-batería PEMFC-batería (Bouquain et al., 2008).	45
Figura 29 Silla de ruedas alimentada por PEMFC-batería (F. C. Wang & Chiang, 2012).	46
Figura 30 Sistema de energía (F. C. Wang & Chiang, 2012).	47
Figura 31 Esquema en serie (F. C. Wang & Chiang, 2012).	47
Figura 32 Curvas de velocidad y potencia (Morgado Ramirez et al., 2019).....	49
Figura 33 Variación del potencial de celda H ₂ /O ₂ con la temperatura (SEG & G Services, Ralph M. Parsons Company, 2000)	55
Figura 34 Curvas de polarización en PEMFC (SEG & G Services, Ralph M. Parsons Company, 2000)	56
Figura 35 Origen de los sobrepotenciales (SEG & G Services, Ralph M. Parsons Company, 2000).	57
Figura 36 Etapas de una reacción electroquímica catódica.....	58
Figura 37 Polarización de activación catódica y anódica (O’Hayre et al., 2016b).....	59
Figura 38 Diagrama V-I de la FC según el modelo empleado.....	63
Figura 39 Tiempo de descarga de una batería con diferentes tasas de descarga (Machado, 2021).	65
Figura 40 Variación del potencial de la pila con estado de carga a diferentes tasas de descarga (Olmo Esteban, 2019).....	65
Figura 41 Scooter Libra de Mobiclinic.	67
Figura 42 Esquema de sistema híbrido ‘pila de combustible + batería’ aplciado a un dron.	69
Figura 43 Motor eléctrico de reducción de engranajes de 250W de Focket.....	71
Figura 44 Curva de velocidad y demanda de potencia en una ciudad tipo Valencia (diseño propio).....	73
Figura 45 Esquema de fuerzas de un cuerpo en una pendiente.....	74
Figura 46 Curvas de velocidad y de demanda de potencia en una ciudad tipo Bilbao (elaboración propia).....	75
Figura 47 Altura subida a lo largo del circuito en cada ciudad (elaboración propia).....	76
Figura 48 Potencia proporcionada por cada fuente de alimentación en una ciudad tipo Valencia.	78
Figura 49 Potencia proporcionada por cada fuente de alimentación en una ciudad tipo Bilbao.	79
Figura 50 Batería 100Ah de XTech Battery	80
Figura 51 Intensidad proporcionada por la batería en un sistema de propulsión de dos baterías de LiFePO ₄ (elaboración propia).....	81
Figura 52 Evolución del estado de carga y del voltaje con el tiempo (elaboración propia).	81

Figura 53 Batería litio polímero modelo Gens ACE Soaring Mini 4s 14.8V.....	82
Figura 54 Intensidad proporcionada por la batería a lo largo del trayecto en las dos ciudades (elaboración propia).....	83
Figura 55 Evolución del estado de carga y del voltaje con el tiempo (elaboración propia).	83
Figura 56 Batería modelo <i>12V 20Ah Li-Ion Battery - NMC Lithium Ion Deep Cycle Aegis Battery</i>	84
Figura 57 Evolución del estado de carga y del voltaje con el tiempo (elaboración propia).	85
Figura 58 Evolución del estado de carga y del voltaje con el tiempo (elaboración propia).	85
Figura 59 Potencia proporcionada por la pila en las dos ciudades (elaboración propia).	86
Figura 60 Celda de combustible de hidrógeno de cátodo abierto modelo H-200 de 200W de Horizon Fuel Cell.	86
Figura 61 Curvas P-I y V-I de la pila de combustible elegida.....	87
Figura 62 Evolución del estado de carga de la botella en las dos ciudades.....	90
Figura 63 Posición de los elementos en el espacio disponible.	91

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Tipos de baterías de iones de litio y sus características (RELiON, n.d.).....	29
Tabla 2 Tipos de FC y características, ventajas, desventajas y aplicaciones. Traducido de (Abdelkareem et al., 2021).....	34
Tabla 3 Entalpías estándar de formación y entropía (Smith et al., 2007).....	52
Tabla 4 Potenciales de reducción de las semirreacciones de los electrodos (Ver Anexo A).	53
Tabla 5 Especificaciones técnicas de la Scooter Libra de Mobiclinic.	67
Tabla 6 Características del motor de 250W de Focket.	71
Tabla 7 Características de la batería 100 Ah de XTech Battery.....	80
Tabla 8 Propiedades de la batería litio polímero modelo Gens ACE Soaring Mini 4s 14.8 V.....	82
Tabla 9. Características de la batería <i>12V 20Ah Li-Ion Battery - NMC Lithium Ion Deep Cycle Aegis Battery</i>	84
Tabla 10 Propiedades de la celda de combustible H-200 de 200 W de Horizon Fuel Cell.....	87
Tabla 11 Hidrógeno consumido calculado y teórico.	89
Tabla 12 Características de la botella de hidrógeno modelo F7.2 de HES Energy Systems.....	89
Tabla 13 Autonomía del sistema propuesto.	90
Tabla 14 Síntesis de los resultados (Ver pág. 81 y Tabla 13).....	93

LEYENDA DE ACRÓNIMOS:

AEMFC: celda de combustible de membrana de intercambio aniónico

AFC: celda de combustible alcalina

AGNU: Asamblea general de las Naciones Unidas

AIE: Agencia internacional de energía

BEV: motores eléctricos alimentados por batería

BI: Beneficio industrial

BOP: balance de planta

CA: corriente alterna

CAES: Sistema de aire comprimido

CC: Corriente continua

CCS: Almacenamiento de carbono

CNMC: comisión nacional de los mercados y la competencia

COVs: Compuestos orgánicos volátiles

CSP: Sistema de concentración de energía solar

ECSA: Área de superficie electrónicamente activa

EES: Almacenamiento de energía eléctrica

EMS: Estrategia de gestión de la energía

EOD: Robot de eliminación de explosivos

EVs: Vehículos eléctricos

FC: Celda de combustible

FCEV: Vehículos eléctricos alimentados por celdas de combustible

HC: Hidrocarburos sin quemar

HES: Almacenamiento de energía en hidrógeno

HEV: Vehículos eléctricos híbridos

HHV: Poder calorífico superior de hidrogeno

HVAC: Sistemas de calefacción ventilación y aire acondicionado

I+D+I: Investigación, Desarrollo e Innovación

LHV: Poder calorífico inferior de hidrogeno

NMC: Bateria de Niquel-manganeso-cobalto

MCFC: Pilas de combustible de carbonato fundido

MCIA: Motor de combustión interna alternativo
MEA: Ensamblaje de electrodos de membrana
ODS: Objetivos de Desarrollo Sostenible
PAFC: Pilas de combustible de ácido fosfórico
PCM: Almacenamiento de calor latente
PEC: Presupuesto de ejecución por contrata
PEMFC: Pila de combustible de membrana de intercambio protónico
PHS: Sistema de bombe hidroeléctrico
PNUD: Programa de Naciones unidas para el desarrollo
PMSM: Motor síncrono de imán permanente trifásico
PV: Energía solar fotovoltaica
SC: Supercondensador
SMES: Almacenamiento de energía magnética por superconducción
SOC: Estado de carga
SOFC: Pila de combustible de óxido solido
TFM: Trabajo final de máster
TCS: Almacenamiento termoquímico
TES: Almacenamiento de energía Térmica
UPS: Sistemas de alimentación ininterrumpida
UPV: Universitat Politècnica de Valencia

1 OBJETIVOS Y ALCANCE DEL PROYECTO

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general del proyecto

El objetivo general de este Trabajo Final de Máster es el prediseño de un sistema híbrido “pila de combustible + batería” que cumpla con las necesidades de demanda de un vehículo para personas con movilidad reducida.

Actualmente estos vehículos funcionan con baterías de plomo ácido, lo que las hace pesadas y limitan su autonomía. Para aumentar esta autonomía y reducir los largos tiempos de carga que requieren se ha estudiado la implementación de un sistema de propulsión híbrido “pila de combustible + batería”. La estrategia seguida es que la fuente de alimentación principal sea la celda de combustible y la batería sea el elemento de apoyo en aquellos momentos en los que la pila de combustible no pueda proporcionar la potencia deseada. Para realizar el estudio se han empleado datos empíricos de demanda de potencia de este tipo de vehículos.

1.1.2 Objetivos específicos del proyecto

Para alcanzar el objetivo principal se han tenido que llevar a cabo otros objetivos específicos o secundarios:

- Conocer el panorama energético y la situación medioambiental actuales. Esto nos lleva al uso del hidrógeno como fuente de obtención de energía libre de emisión de contaminantes.
- Ampliación de conocimientos de sistemas de almacenamiento energético y sus aplicaciones. Aplicar para el caso de estudio de un vehículo para personas con movilidad reducida. El TFM se centra en la descripción de los tipos de baterías y tipos de celdas de combustibles.
- Aprender el comportamiento físico químico de las pilas de combustible y de las baterías, con el objetivo de plantear un modelo descriptivo de ambos comportamientos.
- Búsqueda de datos de curvas de velocidad y de demanda de potencia de un vehículo de estas características. A partir de los datos disponibles se han propuesto dos curvas de demanda distintas con diferentes geografías y requisitos para aumentar el rango de aplicabilidad del estudio.
- Proponer un método de cálculo para cuantificar la energía recuperada en el frenado regenerativo para obtener un diseño más eficiente.
- Descripción de la estrategia energética que defina cuál de los dos elementos alimente el sistema de propulsión del vehículo en todo momento. Con esto se especifican los requerimientos de la batería y de la celda de combustible y se pueden seleccionar entre los comercialmente disponibles.

1.1.3 Objetivos académicos del proyecto.

A parte de los objetivos técnicos de este Trabajo Final de Máster, también hay algunos objetivos de carácter académico. Los más relevantes son los siguientes:

- Ampliar los conocimientos sobre el sector energético, el cual es de gran repercusión global y de interés personal.
- Ampliar los conocimientos sobre el alcance de la Ingeniería Química en algunos sectores como el de sistemas de almacenamiento energético y el hidrógeno, los cuales se encuentran actualmente en auge.
- Modelado de sistemas electroquímicos
- Concienciación de la situación medioambiental y fomento de búsqueda de soluciones técnicas para afrontar la crisis medioambiental a la que se enfrenta el planeta.
- Aplicación de nuevas tecnologías a aplicaciones que mejoran la calidad de vida de las personas.

1.2 Alcance

Este proyecto se ha centrado en la búsqueda de una solución técnica de un sistema híbrido “pila de combustible + batería”. No se han desempeñado experimentos de laboratorio ni se ha llevado a cabo el estudio económico, sino que la elección de los elementos se ha basado en los requerimientos técnicos del sistema. El proyecto pretende ser un punto de partida para estudiar la posibilidad de aplicar el hidrógeno como fuente energética en este caso concreto. Para ello se ha escogido un vehículo único representativo y han descrito dos curvas de demanda de potencia para dos tipos de ciudades.

1.3 Estructura del Trabajo Final de Máster

En primer lugar, se presenta una introducción al tema en el Capítulo 2. En él se expone de forma breve el concepto de energía: tipos e importancia en la sociedad, y se describen los tipos de almacenamiento energético. Posteriormente se exponen en mayor profundidad las baterías y las pilas de hidrógeno; y se finaliza describiendo sistemas híbridos de estos elementos.

Posteriormente en el Capítulo 3 se exponen los fenómenos fisicoquímicos principales que tienen lugar en las celdas de combustible, elemento principal del sistema estudiado. El objetivo de este capítulo es llegar a una expresión que describa el comportamiento de la celda y de la batería para poder emplearlas como modelos predictivos en la simulación del sistema.

En el Capítulo 4 se describen las curvas de demanda de potencia en dos ciudades con diferente geografía para analizar las variaciones en la demanda. Además, se describe un modelo para cuantificar el frenado regenerativo.

En el Capítulo 5 se describe la estrategia energética seguida para el circuito planteado, y se presentan los resultados de la simulación, se discute las dimensiones idóneas de los equipos y se seleccionan entre los comercialmente disponibles.

Finalmente, en el Capítulo 6, se analizan los resultados obtenidos, se discute si se han alcanzado los objetivos planteados inicialmente y se proponen diferentes líneas de investigación futuras.

2 INTRODUCCIÓN

En esta introducción se pone en contexto el papel del hidrógeno y de las baterías dentro del sistema energético global. Se describen las fuentes energéticas, el panorama actual, y se describen las fuentes de almacenamiento energético, centrando la atención en las dos de interés para este Trabajo Final de Máster.

2.1 Energía

2.1.1 Primer principio de conservación de la energía

La termodinámica es la rama de la física que estudia las transformaciones de la energía; y sus leyes proporcionan expresiones matemáticas de algunos hechos de la naturaleza descubiertos empíricamente. La primera ley es el principio de conservación de energía. A continuación se va a exponer un breve resumen del desarrollo de esta ley, extraído del libro *Introducción a la termodinámica para ingenieros químicos* (Smith et al., 2007).

Los experimentos iniciales se llevaron a cabo mediante elevación y aceleración de cuerpos. En cada caso el trabajo realizado puede recuperarse revertiendo el proceso y regresando el cuerpo a su condición original. Esta observación conduce a la idea de que, si el trabajo hecho sobre un cuerpo en aceleración o en ascenso puede recuperarse después, entonces el cuerpo, en virtud de su velocidad o altura, contiene la capacidad para hacer trabajo (Smith et al., 2007). Este concepto ha demostrado ser tan útil en la mecánica de cuerpos rígidos que, a la capacidad de un cuerpo para hacer trabajo se le dio el nombre de energía, palabra derivada de un vocablo griego que significa “en trabajo”.

Esto condujo a la generalización del principio de conservación de la energía para todos los procesos puramente mecánicos. Esta ley se puede plantear de diversas formas, entre ellas:

Aunque la energía tome muchas formas, la cantidad total de energía es constante, y cuando la energía desaparece en una forma, aparece simultáneamente en otras formas.

Esto quiere decir que la energía ni se crea ni se destruye, se conserva. La energía se puede transformar de una forma a otra. No hay medida absoluta de energía, porque la energía se define como el trabajo que el sistema hace, o puede hacer, en otro. Por tanto, sólo la transición de un sistema desde un estado a otro puede definirse y, por tanto, medirse.

El trabajo (W) es energía en tránsito y no se considera como residente en un cuerpo. Lo mismo ocurre con el calor (Q). Estos, en el sentido termodinámico, nunca se consideran como algo almacenado en un cuerpo, sino como energía en tránsito de un cuerpo a otro. Cuando se añade energía a un cuerpo en forma de calor, éste se almacena no como calor sino como energía cinética y potencial en los átomos y moléculas que forman el cuerpo.

Al aplicar la primera ley a un proceso, esta se aplica al sistema y sus alrededores, no únicamente al sistema. Si el sistema es cerrado, esto quiere decir que la frontera del sistema no permite el transporte de materia entre este y el sistema, la primera ley de la termodinámica queda así:

$$\Delta U^t + \Delta E_p + \Delta E_k = \pm Q \pm W \quad (\text{Ec. 1})$$

La energía se almacena en forma de energía cinética (ΔE_k), potencial (ΔE_p) e interna (ΔU^t); éstas residen en los objetos materiales y existen debido a la posición, configuración y movimiento de la materia. A continuación, se desglosan estas familias en subtipos.

2.1.2 Tipos de energía

Los tipos de energía se pueden clasificar en la siguiente forma (Chandra, 2018):

Energía potencial: son la energía almacenada en los cuerpos sumado a la energía debida a la posición (gravitacional). Hay diferentes subtipos:

- Energía química: es la energía almacenada en los enlaces entre átomos y moléculas. Es el caso de los combustibles orgánicos, al quemarlos se rompen los enlaces y se obtiene energía.
- Energía nuclear: es la energía almacenada en los núcleos atómicos, y es la que mantiene unidos los nucleones. Puede liberarse a través de su rotura, lo que se conoce como fisión. También se emplea para generar electricidad.
- Energía mecánica almacenada: es la almacenada en objetos por la aplicación de una fuerza.
- Energía gravitacional: es la energía disponible en un objeto por su posición.

Energía cinética: Es la energía debida al movimiento. Se diferencian en los siguientes subtipos:

- Energía radiante: es la energía que poseen las ondas electromagnéticas, como la luz visible, las ondas de radio, los rayos ultravioletas etc. El sol es fuente de este tipo de energía.
- Energía térmica: es la parte de la energía interna de las sustancias debida a su temperatura.
- Energía del movimiento: el movimiento de los cuerpos de una posición a otra. Como ejemplos tenemos la energía eólica.
- Energía sonora: es la energía que se genera cuando un objeto vibra y se desplazan por un medio físico.
- Energía eléctrica: es el movimiento de electrones cuando se conectan dos puntos con diferente potencial con un conductor eléctrico.

2.1.3 Papel de la energía en la humanidad

Inevitablemente, todos los organismos dependen, directa o indirectamente, de la energía solar para su supervivencia. La vida en la tierra sería imposible sin la conversión fotosintética de la energía solar en biomasa vegetal (Smil, 2019). En la cadena alimentaria, los flujos de energía solar se capturan y convierten a través del complejo proceso de fotosíntesis. Los organismos utilizan parte de esta energía, mientras que una gran proporción se pierde en forma de calor y una pequeña parte se transmite a lo largo de la cadena alimentaria cuando un organismo digiere a otro. La energía siempre ha estado entre los elementos más fundamentales para la supervivencia, reproducción y evolución de la sociedad humana (Bithas & Kalimeris, 2016). Ha jugado un papel esencial para el desarrollo económico-social y la mejora de la calidad de vida en todos los países (Bilgen et al., 2008).

El uso de la energía por parte de la humanidad comenzó con el dominio del fuego, empleado para cocinar, calentarse y como luz. Para ello nuestros antepasados quemaban biomasa,

(principalmente madera) como combustible (Bithas & Kalimeris, 2016). Esto dio lugar a la aparición de hornos, con usos como la producción de cerámica, refinación de metales a partir de minerales, etc. Posteriormente llegó la revolución Agrícola, lo que aumentó la cantidad de alimentos disponibles, permitiendo los asentamientos permanentes, y el aumento de la población humana. El agua y los molinos de viento fueron los siguientes pasos, permitían a los humanos satisfacer las necesidades de trituración de granos para producir otros alimentos.

Sin embargo, el rápido crecimiento de la población y la disponibilidad limitada de tierras provocó la transición hacia un nuevo régimen energético: la era de los combustibles fósiles, conocida como la Revolución Industrial. El invento que caracterizó esta era fue la máquina de vapor, en ella se convertía la energía química en energía mecánica (McNeill, 2000). La primera máquina de vapor se empleó para bombear agua de las minas de carbón, pero se convirtió en una valiosa herramienta gracias a James Watt, impulsó la industria manufacturera y sentó las bases para los sistemas energéticos intensivos de hoy. El uso a gran escala de combustibles fósiles comenzó a principios del siglo XVIII.

En la actualidad, existe un sistema energético muy complejo. Para profundizar en el tema de almacenamiento energético, clave en el desarrollo de este Trabajo Final de Máster, primero se va a definir los conceptos de energía primaria y secundaria.

2.1.4 Energía primaria y secundaria.

La energía primaria es toda fuente natural de obtención de energía, como los combustibles fósiles, o el sol; mientras que las secundarias se obtienen tras un proceso de transformación a partir de las primarias; y son consumidas por los sectores de uso final, como, la electricidad o los combustibles (Demirel, 2016). En la Figura 1 se pueden ver los tipos de energía primaria y secundaria principales.

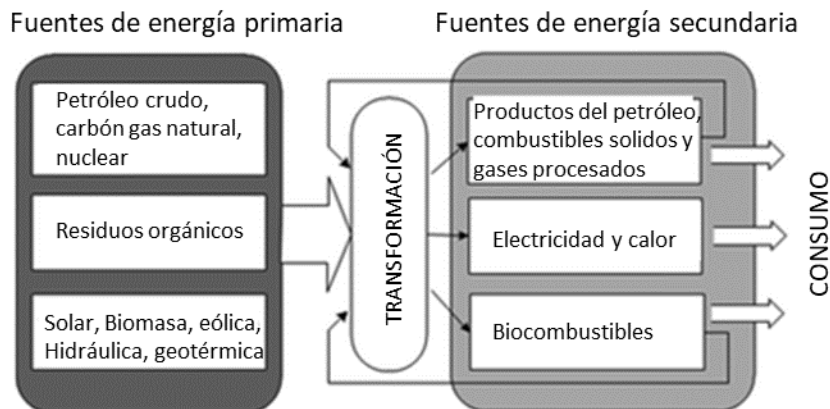


Figura 1 Tipos de energía primaria y secundaria. Traducido de (Demirel, 2016).

Por tanto, cuando hablamos de lo que consume la sociedad (consumo energético) hablamos de energía secundaria, y principalmente se refiere a combustible para transporte, electricidad, calor y maquinaria; y cuando hablamos de energía primaria nos referimos a de dónde procede esa energía. Las fuentes de energía primarias mostradas en la Figura 1 se pueden dividir en dos grandes familias:

- No renovables
- Renovables

A continuación, se exponen brevemente las fuentes de energía que existen.

2.1.4.1 Fuentes de energía no renovables

Estas se pueden subdividir en dos grupos: combustibles fósiles y combustible nuclear; y se denominan así porque son recursos naturales limitados en la tierra.

Los combustibles fósiles se han formado a partir de los restos de plantas y animales muertos por exposición al calor y la presión en la corteza terrestre durante millones de años (Demirel, 2016). Estos fósiles contienen altos porcentajes de carbono y su composición le da al combustible sus propiedades características, tales como punto de ebullición, punto de fusión, densidad y viscosidad. Encontramos tres tipos principales:

- Carbón. Son rocas sedimentarias que contienen materias combustibles y no combustibles, como el agua. El carbón fue el primer combustible fósil empleado para generar electricidad para hogares y fábricas. En la Figura 2 se muestra un esquema de una central térmica convencional en la que se genera electricidad a partir de combustión.
- Petróleo. Es una sustancia compuesta por una mezcla de hidrocarburos de color oscuro y olor fuerte (Demirel, 2016). El petróleo se refina y se separa en una gran cantidad de productos básicos, desde gasolina y queroseno hasta asfalto y reactivos químicos utilizados para fabricar plásticos y productos farmacéuticos.
- Gas natural. El gas natural es una mezcla de gases constituido principalmente por metano. Es una fuente importante de producción de electricidad mediante el uso de turbinas de gas y turbinas de vapor (Ver Figura 2).

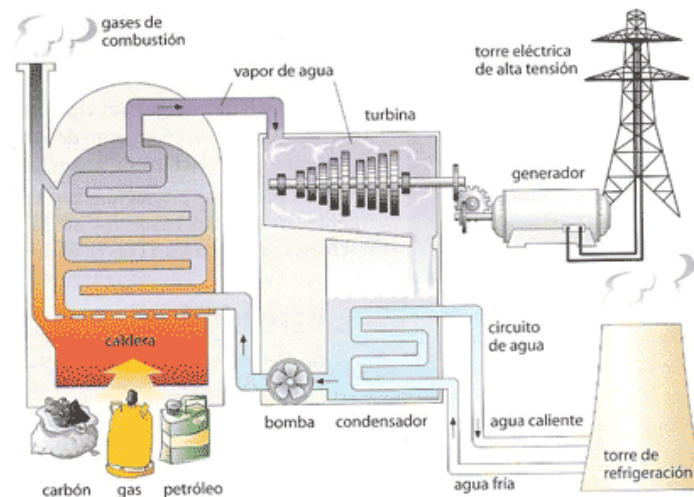


Figura 2 Esquema general de una central térmica para la producción de electricidad (Sánchez Pérez, n.d.).

En una central térmica convencional el combustible se quema en una caldera, la combustión es un proceso exotérmico en el que se libera energía química almacenada en los reactivos, en este caso los combustibles, esta energía se libera en forma de energía térmica empleada para calentar agua que circula por un circuito cerrado (Sheykhi et al., 2019). El agua se transforma en vapor a una presión muy elevada. Este vapor hace girar una gran turbina, convirtiendo la energía calorífica en energía mecánica que, posteriormente, se transforma en energía eléctrica en el alternador. La electricidad pasa por un transformador que aumenta su tensión y permite

transportarla reduciendo las pérdidas por Efecto Joule. El vapor que sale de la turbina se envía a un condensador para convertirlo en agua y devolverlo a la caldera para empezar un nuevo ciclo de producción de vapor, cerrando el circuito.

Por otro lado, *las plantas de energía nuclear* producen electricidad a través de la fisión de combustible nuclear, como el uranio. En la *fisión nuclear* el núcleo de un átomo se divide en partes más pequeñas (Ver Figura 3), a menudo produciendo neutrones y fotones libres en forma de rayos gamma y liberando grandes cantidades de energía.

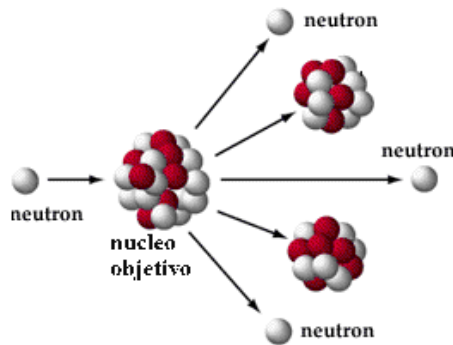


Figura 3 Resultado de la fisión nuclear (Planas, 2021).

Los neutrones generados conducen a una reacción en cadena autosostenida que libera energía a un ritmo controlado en un reactor nuclear. Este calor se utiliza para producir vapor que se utilizará en una turbina para producir electricidad, al igual que en las centrales térmicas. Los productos de la fisión nuclear son mucho más radiactivos que los elementos pesados que normalmente se fisionan como combustible, y permanecen así durante un período de tiempo considerable, lo que da lugar a un problema de desechos nucleares (Demirel, 2016).

2.1.4.2 Fuentes renovables

Existen diferentes tipos: bioenergía, energía solar directa, energía geotérmica, energía hidroeléctrica, eólica y oceánica. Se enfocan en la obtención de electricidad, pero algunas también pueden emplearse para proporcionar calor. A continuación, se describen estas fuentes de energía:

- Energía hidroeléctrica. Proviene del agua en movimiento. Las turbinas instaladas funcionan con eficiencias muy altas del 80 al 90% (Egré & Milewski, 2002). Es la fuente de electricidad más eficiente, confiable y versátil. Actualmente se dividen en tres tecnologías principales:
 - o Centrales de embalse: se utiliza un embalse aguas arriba, que puede ser natural (lago) o construido (presa). El agua se transporta a través de tuberías hasta las turbinas, que generan energía mecánica por rotación que luego se convierte en electricidad en el generador eléctrico rotatorio (Ver Figura 4). Por tanto, la energía primaria la proporciona la gravedad y la altura (energía potencial) que al caer se transforma en energía cinética, posteriormente se convierte en energía mecánica en la turbina, y finalmente en energía eléctrica.

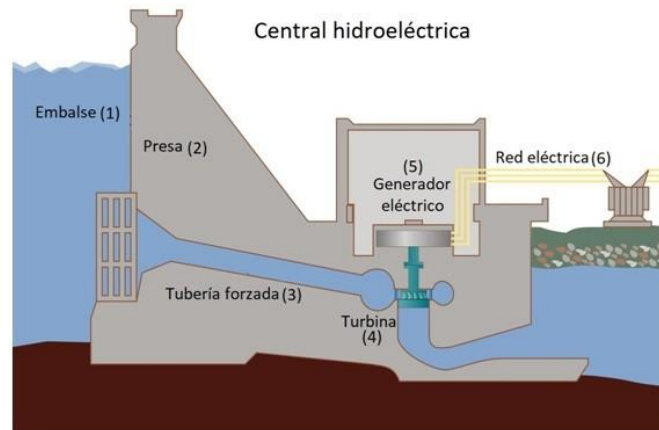


Figura 4 Esquema de una central hidroeléctrica de embalse (Ingoexpert, 2018).

- Centrales de bombeo o reversibles: tienen dos embalses a diferentes alturas, uno aguas arriba y otros aguas abajo; actuando como reserva de energía. Durante las horas de menor demanda de energía, el agua se bombea desde el embalse aguas abajo hasta el embalse aguas arriba mediante una estación de bombeo, lo que permite lidiar con seguridad con los momentos de mayor demanda energética.
 - Centrales de agua fluyente: se utiliza la velocidad del caudal natural de un río situado en dos niveles diferentes. El agua se transporta a través de un túnel de derivación sin la ayuda de tuberías forzadas y llega hasta las turbinas. La potencia de la central depende principalmente de la velocidad del agua que pasa de un nivel a otro, el llamado salto, y del caudal del río.
- Energía solar directa. Las tecnologías solares aprovechan directamente el poder del sol y usar esa energía para producir calor y electricidad (Tromly, 2001). El sol emite $3,8 \times 10^{23} \text{ kW}\cdot\text{s}^{-1}$, y la radiación solar que llega a la superficie de la tierra en un año es equivalente a 7.500 veces el consumo total anual de energía primaria del mundo (Council, 2013). Generalmente, hay dos formas de utilización de la energía solar: solar térmica y solar fotovoltaica (PV).
- La energía solar fotovoltaica (PV) convierte la luz en electricidad utilizando materiales semiconductores cuando son iluminados con fotones (Hegedus, 2011). El componente básico de un sistema fotovoltaico es el módulo solar, que consta de una serie de células solares.
 - Termosolar. La radiación solar es absorbida por un colector solar como calor que luego se transfiere a su fluido de trabajo (aire, agua o aceite). El calor transportado por el fluido de trabajo se puede utilizar para proporcionar agua caliente sanitaria/calefacción o para cargar un depósito de almacenamiento de energía térmica del que se puede extraer el calor para su uso posterior durante la noche o los días nublados (Tian & Zhao, 2013).
Este principio también se emplea en centrales energéticas, en las que el fluido calentado se emplea para mover una turbina de vapor o motor térmico para impulsar un generador eléctrico. Estos sistemas de concentración de energía solar (CSP) también podrían permitir la producción de combustibles químicos para transporte, almacenamiento y procesos industriales (Meier & Steinfeld, 2010).

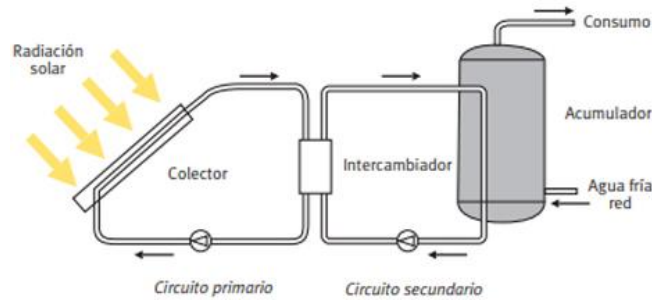


Figura 5 Colector térmico (Rivas, 2013).

- Eólica. La energía eólica es la energía que se obtiene del viento, y para ello se emplean turbinas eólicas que convierten la energía cinética de las corrientes de aire en eléctrica, a través de un generador eléctrico (Jacobson & Archer, 2012). Las turbinas individuales no pueden extraer más del 59,3 % de la energía cinética del viento (Jacobson & Archer, 2012).

Las turbinas eólicas generalmente se agrupan en parques eólicos para la producción a gran escala de electricidad.

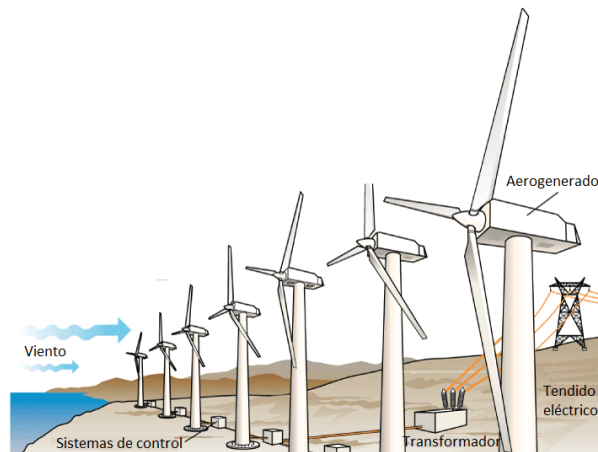


Figura 6 Parque eólico (Echeverri Londoño, 2017).

- Oceánica. Energía almacenada en los mares como energía cinética del movimiento de las olas y las corrientes (Turkenburg et al., 2012). Además, el agua del océano se puede utilizar con fines de refrigeración. Según la Agencia Internacional de Energía (AIE), la energía oceánica se puede explotar utilizando las siguientes cinco tecnologías diferentes: subida y bajada de las mareas (barreras); corrientes de marea/oceánicas; olas; gradientes de temperatura; y gradientes de salinidad

La energía de las mareas (mareomotriz) se presenta en dos formas: energía potencial de las mareas y energía de las corrientes de las mareas:

- Energía de las corrientes marinas. Consiste en aprovechar la energía generada cuando las diferencias de elevación entre las mareas altas y bajas producen fuertes corrientes (similares a la energía eólica) que mueven una turbina para producir electricidad (Melikoglu, 2018).
- Energía potencial de las mareas, se extrae mediante la construcción de una presa o dique a lo largo de un estuario o río, aprovechándose la diferencia de energía entre mareas altas y bajas.

Por otro lado, encontramos los otros tres tipos de explotación energética de las mareas:

- Energía olamotriz. El viento que sopla sobre la superficie del océano crea olas (Melikoglu, 2018). La energía mecánica de las olas se puede extraer de las olas superficiales o de las fluctuaciones de presión debajo de la superficie.
 - Energía térmica oceánica. Se ha propuesto el uso de alguna forma de una máquina térmica para aprovechar las diferencias de temperatura en el océano (Boyle, 1996). Para que el sistema sea factible se requiere una diferencia de temperatura de unos 20 °C. Las aguas profundas del océano también se pueden usar para enfriar edificios en zonas costeras.
 - Energía del gradiente de salinidad, también conocido como poder osmótico. Es la que se obtiene por la diferencia de concentraciones de sal entre el agua del mar y el agua de río que desemboca sobre este.
- Geotérmica. En el núcleo de la Tierra se alcanzan temperaturas de 5000 °C. Este calor calienta el área circundante, lo que da lugar a la formación de depósitos de agua caliente y vapor bajo tierra (Tromly, 2001). El potencial de la energía geotérmica en los 10 primeros km superiores de la corteza terrestre asciende a 50.000 veces la energía de todos recursos de petróleo y gas en el mundo. Estos depósitos se pueden aprovechar para generar electricidad o calentamiento de edificios.
- Producción de electricidad. Las plantas de energía geotérmica acceden al vapor subterráneo, o al agua caliente, de los pozos y se canaliza para impulsar una turbina de vapor, que alimenta un generador eléctrico. Esta agua se devuelve al suelo para recargar el embalse y completar el ciclo. Se considera de alta temperatura si se encuentra a >150 °C; y término medio de temperatura si está en el rango 100-150 °C, en este caso se necesita un fluido intermedio, obteniéndose un menor rendimiento.

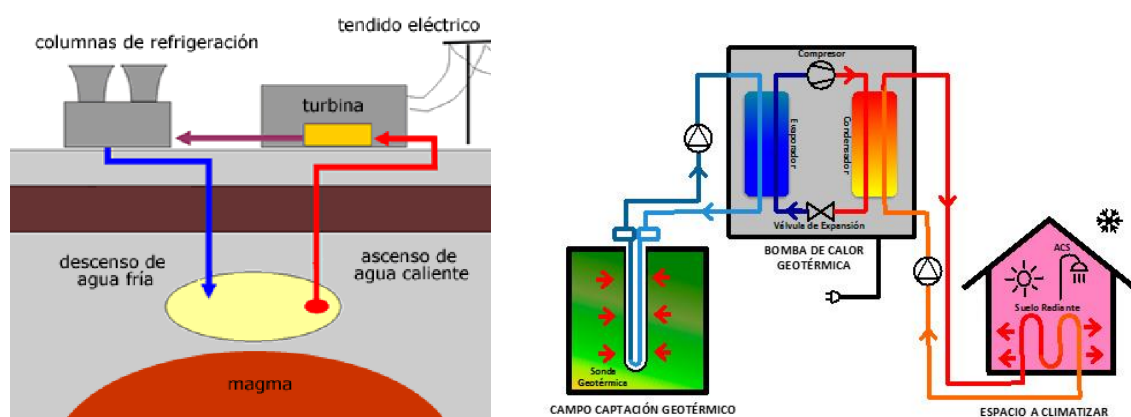


Figura 7 a) Planta energética geotérmica (Bergamo, 2016). b) Bomba de calor para calefacción de un hogar (Gómez de Aguëro, 2019).

- Consumo directo de la energía geotérmica. Para usos como la calefacción y refrigeración de espacios, la industria, los invernaderos, la piscicultura y los balnearios (Fridleifsson, 2001). Existen dos tipos:
 - De muy baja temperatura. Son los primeros metros por debajo de la superficie del suelo (15 °C a 19 °C). Se suelen utilizar como intercambiador térmico en sistemas de climatización mediante bomba de calor (Figura 7),

- que utilizan la tierra como fuente de calor para calefacción o como disipador de calor para refrigeración, según la temporada (Pardo et al., 2010).
- De baja temperatura entre 30 y 100 °C. Su utilización se centra en usos térmicos en sistemas de calefacción urbanos sin necesidad de bomba de calor, en procesos industriales y en balnearios.
- Bioenergía y biocombustibles. La bioenergía es la energía derivada de la biomasa (materia orgánica), como las plantas, que se conocen como biocombustibles (Guo et al., 2015). Esta materia orgánica se transforma en energía mediante procesos termoquímicos (combustión, pirólisis y gasificación) o bioquímicos (digestión, anaerobia y fermentación). Al igual que los combustibles fósiles, los biocombustibles existen en forma sólida, líquida y gaseosa (Guo et al., 2015):
- Sólidos: La madera (leña, astillas de madera y gránulos de madera) y otros materiales vegetales.
 - Líquidos:
 - Bioetanol: Se produce bioetanol (alcohol) mediante la fermentación de azúcares simples derivados de la biomasa vegetal (glucosa, fructosa y otros monosacáridos). El etanol se puede utilizar como sustituto de la gasolina.
 - Biodiesel: líquido derivado de aceite vegetal, grasas animales, lípidos de algas o grasa de desecho mediante “transesterificación” en presencia de alcohol y catalizador alcalino, se produce comercialmente y es sustituto del diésel.
 - Biogás: combustible gaseoso renovable alternativo al gas natural. Se genera por digestión anaeróbica de desechos orgánicos. El biogás crudo consta de 60 a 65 % de metano (CH₄), 30 a 35 % de CO₂ y pequeños porcentajes de vapor de agua, H₂ y H₂S.

2.1.5 Consumo energético

El continuo crecimiento de la población mundial y la economía, junto con la rápida urbanización, ha resultado en un aumento significativo en la demanda de energía (Nations, 2019, Alanne & Cao, 2019). La tendencia clásica del suministro de energía depende de los recursos energéticos de hidrocarburos (petróleo, carbón y el gas natural) que son limitados y a su vez están limitados por la distribución geográfica y la facilidad de extracción. Como se ha visto anteriormente, la quema de estos para generar electricidad ha supuesto un motor fundamental para el progreso tecnológico, social, económico y de desarrollo (Ritchie & Roser, 2020).

Según la evaluación del Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) de 2010 (Sime Poma, 2010), se espera que la población mundial crezca un 0,76 % en promedio durante el período 2010-2050, de 6800 millones de personas en 2010 a casi 9400 millones en 2050 (Karatayev et al., 2019). Se estima que el consumo total de energía primaria aumente casi un 50% en los próximos 50 años (Ver Figura 8). La disminución del consumo energético durante el año 2020 se corresponde al año de pandemia.

Los tres sectores principales que consumen esta energía son el transporte (29%) y la electricidad para uso industrial (29%) y residencial (21%), según la Agencia Internacional de la Energía (AIE, 2019).

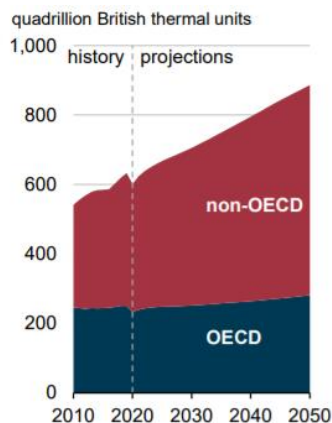


Figura 8 Consumo energético, histórico y previsión para los próximos 30 años (IEO, 2021).

En cuanto a la producción de electricidad mundial, entorno al 64 % provino en 2019 de la combustión, principalmente del carbón y el gas (Ver Figura 9), mientras que el consumo del petróleo va destinado principalmente al transporte. En la Figura 9 se pueden observar las fuentes de energía primaria con las que se genera electricidad. Los combustibles fósiles representan en la actualidad más del 80 % del consumo energético mundial (Hassan et al., 2021; Ritchie & Roser, 2020). En 2019, el consumo de petróleo de EE. UU. fue alrededor de 20,54 millones de barriles por día, de los cuales casi el 70 % del consumo de petróleo correspondió al transporte (Vishnumurthy & Girish, 2021).

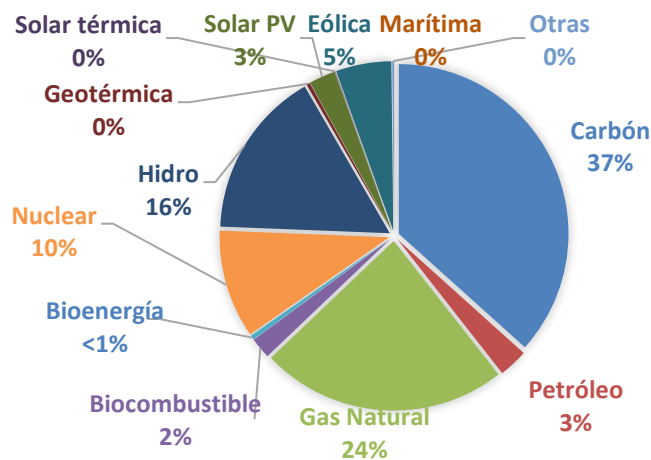


Figura 9 Gráfico circular de las fuentes energéticas de electricidad en 2019 (AIE, 2019).

El desarrollo de la población es un factor clave en la construcción de escenarios energéticos porque el tamaño de la población afecta al tamaño y a la composición de la demanda de energía, directa e indirectamente, a través de su impacto en el crecimiento económico y el desarrollo. El patrón actual de suministro de energía no puede sostenerse en un futuro cercano debido al agotamiento de las reservas de combustible y a los impactos ambientales que conllevan (Bhattacharya, 2002). El principal problema que va a tener que hacer frente nuestra sociedad en el siglo XXI es generar la energía necesaria para cubrir la creciente demanda, teniendo presente los problemas de contaminación y el calentamiento global. En el siguiente apartado se describen las causas de esta transición energética.

2.1.6 Necesidad de una transición energética

En resumen a lo comentado en el apartado anterior, se puede afirmar que la búsqueda actual por desarrollar fuentes de energía alternativas diferentes a los combustibles fósiles es una consecuencia de cuatro tendencias globales (Londoño-Pulgarin et al., 2021):

a) Agotamiento

Como se ha comentado, las fuentes no renovables son un recurso limitado. Aunque las estimaciones sobre las reservas mundiales de combustibles fósiles difieren y no se puede predecir exactamente cuándo se agotarán (Shafiee & Topal, 2009). Se afirma que el petróleo se agotará antes que los otros tipos de combustibles fósiles y que el carbón durará más tiempo que el petróleo y el gas (Rühl, 2008).

b) Crisis medioambiental y salud humana

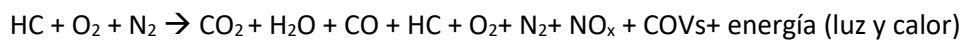
Es inevitable que cualquier sistema de conversión de combustible tenga efectos secundarios dañinos. En los últimos años, el problema de la contaminación atmosférica ha alcanzado límites de peligrosidad considerable tanto para la salud humana como para el medio ambiente que los rodea (Churchill, 1997). Esto es debido a los productos de reacción que se generan durante la combustión de los combustibles fósiles.

En una situación ideal, la reacción de combustión que tiene lugar si la mezcla entre aire y combustible es estequiométrica, es la siguiente:

Combustión estequiométrica: $\text{Combustible (HC)} + \text{O}_2 + \text{N}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{N}_2 + \text{energía}$

Sin embargo, las condiciones dentro de los reactores térmicos, y la presencia de otros compuestos a parte del HC y O₂, hacen que tenga lugar otras reacciones secundarias que dan lugar a subproductos:

Combustión real:



A continuación, se describen estos subproductos y los problemas que causan:

- Hidrocarburos sin quemar (HC): Si no hay O₂ suficiente, no se oxidarán todos los enlaces de hidrocarburos y será expulsado con el resto de los gases de escape.
- Dióxido de Carbono (CO₂): Se produce por la combustión completa del carbono. Aunque no es nocivo para los seres vivos, su incremento desmesurado en la atmósfera produce el llamado efecto invernadero, que es el principal causante del incremento de la temperatura media terrestre (Nicoletti et al., 2015).
- Monóxido de Carbono (CO): en concentraciones altas (>0,3 % en volumen) y tiempos largos de exposición puede provocar en la sangre la transformación irreversible de la hemoglobina, molécula encargada de transportar el oxígeno desde los pulmones a las células del organismo. Se forma debido a la falta de oxígeno en la combustión (combustión incompleta), se forma CO en vez de CO₂.
- Compuestos orgánicos volátiles (COVs): Los hidrocarburos, dependiendo de su estructura molecular, presentan diferentes efectos nocivos. Encontramos, por ejemplo, el benceno, aldehídos y fenoles Su presencia se debe a los componentes incombustibles

de la mezcla o a las reacciones intermedias del proceso de combustión. La presencia simultánea de hidrocarburos, óxidos de nitrógeno, rayos ultravioletas y la estratificación atmosférica conduce a la formación del smog fotoquímico, muy grave para la salud de los seres vivos.

- Los óxidos de nitrógeno (NO_x): El nitrógeno se oxida formando pequeñas cantidades de óxidos de nitrógeno debido a las altas temperaturas dentro del motor. Irritan la mucosa, y en combinación con los hidrocarburos contenidos en el smog y con la humedad del aire producen ácidos nitrosos, que caen sobre la tierra en forma de lluvia ácida.
- El plomo: es el metal más peligroso contenido en los aditivos del combustible. Inhalado puede provocar la formación de coágulos o trombos en la sangre.

Según la *Agencia Internacional de la Energía (IEA)* se consideran tres posibles futuros energéticos, cuyos límites están establecidos por las emisiones totales de CO₂ relacionadas con la energía: (a) El Escenario de 6°C (6DS), una extensión de las tendencias actuales que parte de la premisa de que no se toman nuevas medidas políticas para abordar el cambio climático. En este escenario la temperatura global promedio aumentaría al menos 6°C a largo plazo; (b) El Escenario de 4°C (4DS), que supone un esfuerzo acordado para cambiar las tendencias y tecnologías actuales, con el objetivo de reducir tanto la demanda de energía como las emisiones con respecto al 6DS; (c) El Escenario de 2°C (2DS), que describe una visión de un sistema de energía sostenible y una trayectoria de emisiones que daría un 80% de posibilidades de limitar el aumento de la temperatura global promedio a 2°C.

El escenario 2DS refleja un esfuerzo que se debe acordar entre los países del mundo para reducir el consumo global y reemplazar los combustibles fósiles por recursos de energía renovable y mejoras en términos de eficiencia energética. En este escenario 2DS, el suministro total de energía primaria aumentaría entorno a un 37% entre 2010 y 2050 (Karatayev et al., 2019). Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), adoptados por la Asamblea General de las Naciones Unidas (AGNU) en 2015, proporcionan un marco poderoso para la cooperación internacional para lograr un futuro sostenible para el planeta (Anderson et al., 2016).

c) Precio de los combustibles:

Las dos causas anteriores derivan en un aumento del precio de estos combustibles. Es una cuestión de la ley de la oferta y la demanda. Ocho países tienen el 81% de todas las reservas mundiales de petróleo crudo, seis países tienen el 70% de todas las reservas de gas natural y ocho países tienen el 89% de todas las reservas de carbón (Boudghene Stambouli & Traversa, 2002).

d) Auge de nuevas tecnologías e innovación respetuosas con el medioambiente

Para asegurar la eventual eliminación de las emisiones de dióxido de carbono se requerirán nuevas tecnologías e innovación, especialmente para los sectores del transporte y de fabricación. Como solución a esta crisis, los vehículos eléctricos (EVs) parecen ser una de las soluciones ideales a la crisis energética y el calentamiento global en la sociedad actual. Los recursos de energía renovable desempeñarán un papel clave en la transición hacia un sistema energético limpio y sostenible (Gielen et al., 2019).

2.2 Situación actual de las energías alternativas

Para hacer frente a esta crisis climática, se plantean dos estrategias que permiten limitar las emisiones de los compuestos nocivos de la combustión, capaces de abastecer la demanda energética de la sociedad. En estas estrategias encontramos la energía nuclear y las energías renovables.

La energía nuclear se ha adoptado en varios países como una opción limpia para la producción de electricidad, ya que es libre de carbono. Más de 400 centrales nucleares que operan en 25 países suministran casi el 17% de la electricidad mundial. Sin embargo, los recursos limitados de materiales radiactivos adecuados, la eliminación de los desechos radiactivos, el alto costo de construcción, el mantenimiento y las consideraciones de seguridad junto con el historial de desastres en las centrales nucleares son los impedimentos principales el establecimiento de nuevas centrales nucleares (Steinhauser et al., 2014).

En cuanto a las energías renovables, según el informe de *Our World in Data* (Ritchie & Roser, 2020), en 2019 alrededor del 11% de la energía primaria mundial provino de tecnologías renovables. Según este informe, y tal y como se puede observar en el siguiente gráfico, se concluye que a nivel mundial la energía hidroeléctrica es, con mucho, la fuente renovable más contribuyente, pero también vemos que la energía eólica y solar están creciendo rápidamente.

Según (Lu & McElroy, 2017) la eólica parece ser en la actualidad la más viable económicamente, pero también la de mayor variabilidad y la más difícil de predecir. Por lo tanto, la presencia de altos niveles de energía eólica en la combinación de generación está desafiando la operación de los sistemas de energía.

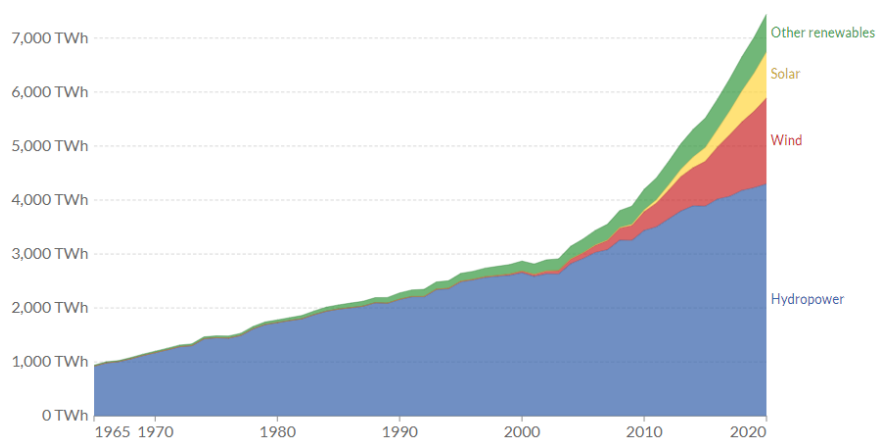


Figura 10 Evolución de obtención de energía renovable por fuentes (Ritchie & Roser, 2020).

La participación de las energías renovables en la combinación energética mundial será del 43% en el 2DS, del 30% en el 4DS y del 15% en el 6DS en 2050. En todos los escenarios, los combustibles fósiles seguirán siendo una parte importante del sistema energético mundial hasta 2050 (Karatayev et al., 2019).

2.2.1 Almacenamiento energético

Las energías renovables son "energías obtenidas de flujos naturales y persistentes de energía que ocurren en el entorno inmediato", con un enorme potencial para la generación de electricidad (Twidell, 2021).

No obstante, presentan complicaciones como que son fuentes variables debido a la variabilidad de los recursos primarios, por ejemplo, durante la noche no se puede recolectar energía solar (Ver Figura 11), son difíciles de predecir y están restringidos por ubicación (Sinsel et al., 2020).

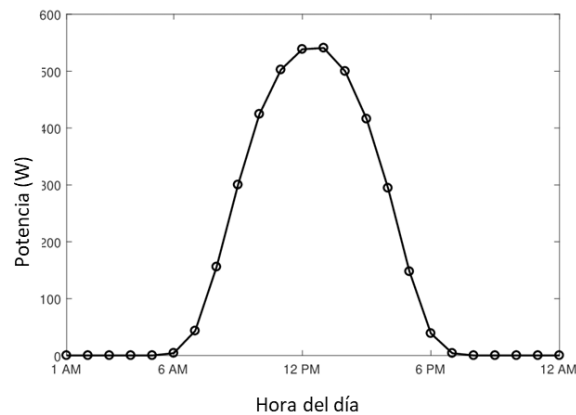


Figura 11 Energía solar promedio anual generada en la ciudad de Dhanka (Bangladesh) (Jahid et al., 2019).

Estas características hacen que su implementación en la red eléctrica sea un desafío debido a la falta de capacidad de la red de transmisión; o la insuficiente generación de energía para satisfacer la demanda en todo momento, pues el momento pico de la generación de esta energía por las condiciones medioambientales puede no coincidir con el momento pico de la demanda, lo que desemboca en desabastecimiento. Sin embargo, las fuentes de energía como los combustibles fósiles se pueden utilizar para proporcionar energía de acuerdo con la demanda, es decir, se pueden almacenar fácilmente y quemarse cuando se necesitan. Mientras que otras fuentes, como la energía solar y eólica, deben recolectarse cuando estén disponibles y almacenarse hasta que se necesiten (Koochi-Fayegh & Rosen, 2020).

Una posible solución a estos problemas es utilizar sistemas híbridos de energía renovable integrando varios de ellos (Luna-Rubio et al., 2012). En estos sistemas los periodos con baja generación de un recurso se compensan con otra fuente que se encuentre en su periodo de alta generación. No obstante, en la mayoría de los sistemas híbridos todavía se requiere un generador convencional para garantizar la confiabilidad y la estabilidad (Y. Yang et al., 2018).

Otra alternativa para facilitar y maximizar la inserción de las fuentes renovables son los **Sistemas de almacenamiento de energía**. El almacenamiento de energía eléctrica (EES) se refiere a un proceso de conversión de energía eléctrica en una forma de energía que se pueda almacenar, para convertirla nuevamente en energía eléctrica cuando sea necesario (Baker & Collinson, 1999). Esto permite producir electricidad en momentos de baja demanda, de bajo costo de generación o a partir de fuentes de energía intermitentes, y utilizarse en momentos

de alta demanda, alto costo de generación o cuando no se dispone de otros medios de generación (Mclarnon & Cairns, 1989).

Los sistemas de almacenamiento de energía surgen a principios del siglo XX, cuando las centrales eléctricas solían cerrarse durante la noche y las baterías de plomo-ácido suministraban las cargas residuales en las redes de corriente continua (H. Chen et al., 2009).

Los EES tienen numerosas aplicaciones que incluyen dispositivos portátiles, vehículos de transporte y recursos energéticos estacionarios (Ver Figura 12). Estos sistemas tienen un papel clave para convertir la energía de diversas fuentes, y transformarla en otros tipos de energía para diversos sectores, como servicios públicos, industria, construcción y transporte (Whittingham, 2012).

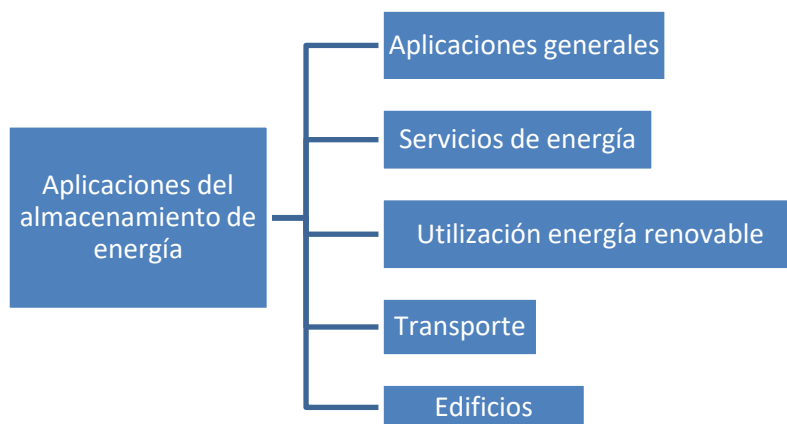


Figura 12. Aplicaciones del ESS (Traducido de Koochi-Fayegh & Rosen, 2020).

Un sistema ESS consta de cuatro componentes principales (Ver Figura 13):

- Medio de almacenamiento: es un medio o sistema a través del cual se almacena energía, descritos en el siguiente apartado.
- Carga: esta unidad permite el flujo de energía desde la red eléctrica hasta el medio de almacenamiento.
- Descarga: asegura la entrega de la energía almacenada cuando se demanda.
- Control: gobierna todo el sistema de almacenamiento.

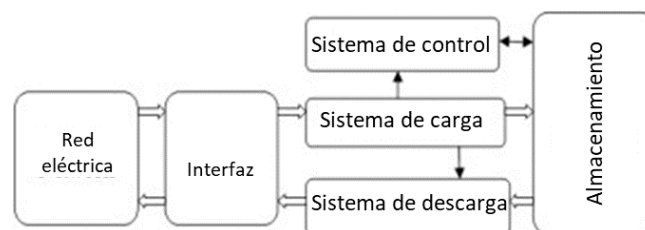


Figura 13 a) Componentes de un sistema de almacenamiento energético. (Akinyele & Rayudu, 2014).

2.2.2 Tipos de almacenamiento de energía

Existen muchos tipos de almacenamiento de energía, y aunque algunas de estas tecnologías están muy avanzadas, otras aún se encuentran en desarrollo y requieren más investigación. Bien porque requieran mejorar su rendimiento a un menor costo; o bien para que afecten menos al medio ambiente y/o a la salud humana, dado que emplean elementos nocivos, como son las baterías de Ni-Cd (Akinyele & Rayudu, 2014).

Hay dos criterios para categorizar los distintos EES: función y forma (H. Chen et al., 2009). En cuanto a la forma de almacenamiento encontramos las siguientes:

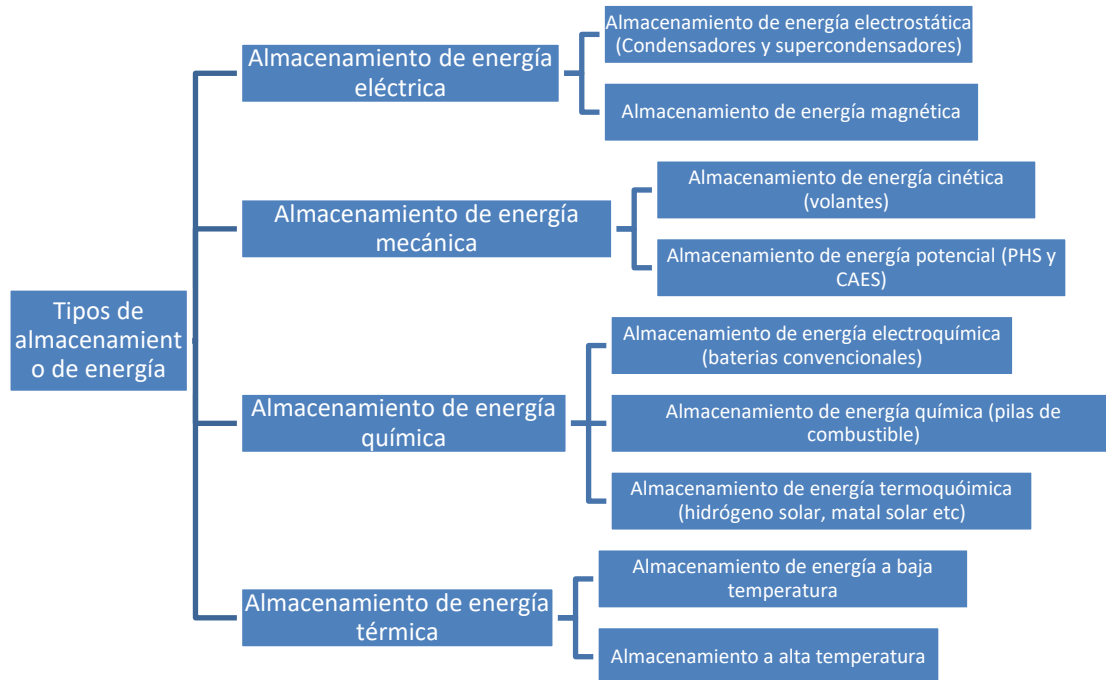


Figura 14 Tipos de almacenamiento de energía (Traducido de Koohi-Fayegh & Rosen, 2020).

A continuación, se muestra una breve descripción de dichas formas de almacenamiento:

Almacenamiento de energía eléctrica

- Energía electrostática: Condensadores y supercondensadores

Los condensadores almacenan la energía en forma de campo eléctrico, en decir, almacenan cargas en reposo o estáticas. Está compuesto por superficies conductoras separadas por un material dieléctrico (aislante). Cuando conectamos estas láminas a una fuente de energía o las sometemos a una diferencia de potencial, una lámina comienza a cargarse negativamente (se llena de electrones) haciendo que la otra tenga que liberar electrones, y quedando así cargada positivamente. Al desconectar la fuente de energía las placas se mantienen cargadas muy cerca entre una y otra gracias al material aislante. Esto hace que las cargas tiendan a atraerse y se mantengan en las placas, almacenando energía eléctrica para ser utilizada cuando se requiera.

Los supercondensadores, o supercapacitores, son un nuevo tipo de dispositivo de almacenamiento de energía entre el condensador tradicional y la batería recargable, se describen en mayor profundidad en el siguiente apartado.

- Magnético (SMES)

Almacena energía eléctrica en forma de corriente eléctrica continua que pasa a través de un inductor (bobina) hecho de un material superconductor de manera que la corriente puede circular indefinidamente con pérdidas casi nulas. También se puede utilizar para almacenar energía como el campo magnético creado por el flujo de corriente eléctrica (H. Chen et al., 2009).

Mecánica:

Cinética:

- Volante: Se basa en un cilindro con un eje conectado a un generador eléctrico, el cual convierte la energía eléctrica en energía cinética que se almacena al aumentar la velocidad de rotación del volante. La energía almacenada se convierte a posteriori en energía eléctrica a través del generador, reduciendo la velocidad de rotación del volante (Ould Amrouche et al., 2016). La energía depende del tamaño y la velocidad del rotor, y la potencia nominal depende del motor-generador (H. Chen et al., 2009).

Potencial:

- Sistema de bombeo hidroeléctrico (PHS): El agua se bombea hasta la zona superior de los lagos (presas) en las horas valle de demanda y cuando hay un pico se deja fluir a través de las turbinas. La eficiencia de este viaje de ida y vuelta del agua ronda el 70% con las turbinas modernas (Whittingham, 2012). Es una tecnología madura con gran volumen, largo período de almacenamiento, alta eficiencia y costo de capital relativamente bajo por unidad de energía.

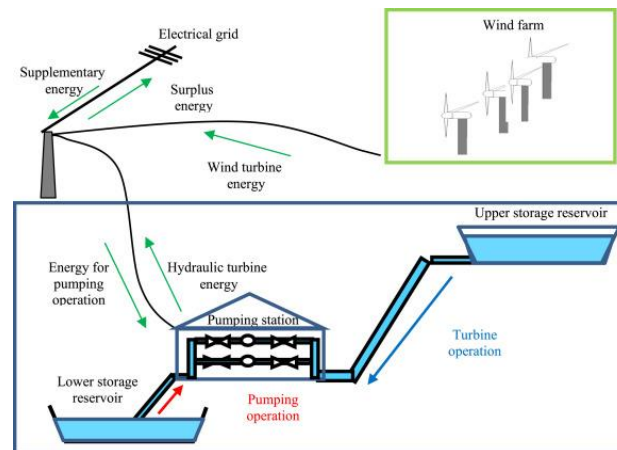


Figura 15 Sistema de energía hidráulica de bombeo (Ould Amrouche et al., 2016).

- Sistema de aire comprimido:

A parte del PHS, es la única tecnología comercialmente disponible capaz de proporcionar una gran capacidad de almacenamiento de energía (superior a 100 MW con una sola unidad). Estos sistemas almacenan energía en forma de aire comprimido en cavernas subterráneas, tras extraerlo, se calienta y luego se expande a través de una turbina de alta presión, que captura parte de la energía del aire comprimido (Gomis-Bellmunt et al., 2012). Luego, el aire se mezcla con combustible y se quema con el escape expandido a través de una turbina de baja presión. Tanto las turbinas de alta como de baja presión están conectadas a un generador para

producir electricidad. Existe diferentes tipos: adiabático, isotérmico, de pequeña-mediana escala, submarino-oceánico (Akinyele & Rayudu, 2014).

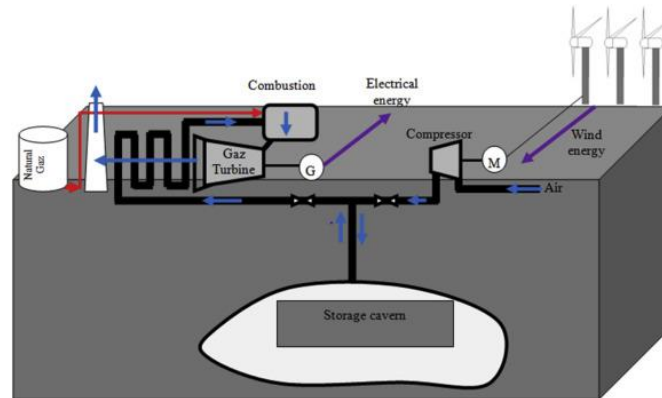


Figura 16 Central eléctrica funcionando con aire comprimido (Ould Amrouche et al., 2016).

Energía térmica

Los edificios de viviendas y servicios constituyen uno de los sectores líderes en el consumo de energía. Además, el consumo de energía de los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC) sigue aumentando con la creciente demanda de confort térmico. Bajo esta circunstancia, los sistemas de almacenamiento de energía térmica con alto potencial para ahorrar energía en los edificios han ganado cada vez más atención (Zhou et al., 2012). Entorno al 40 % de las emisiones de gases de efecto invernadero en los países desarrollados provienen de los edificios, donde aproximadamente el 60 % son producidos por los sistemas de refrigeración y calefacción (Orme, 2001).

El almacenamiento de energía térmica (TES) se refiere al almacenamiento de calor o "frío" en un medio de almacenamiento. Los sistemas de almacenamiento térmico suelen constar de un medio de almacenamiento y un equipo para la inyección y extracción de calor hacia/desde el medio (Koohi-Fayegh & Rosen, 2020). El medio de almacenamiento puede ser un espacio natural, como el suelo; o puede fabricarse artificialmente utilizando un recipiente que evite la pérdida o ganancia de calor del entorno (tanques de agua).

Los sistemas TES también se pueden utilizar para mitigar la intermitencia de las fuentes de energía renovable, mediante el almacenamiento de calor en tanques de agua, sales fundidas u otro material. El calor/frío recuperado de TES es utilizado por un motor térmico para producir energía eléctrica.

Los tres tipos principales de TES se basan en almacenamiento de calor sensible, almacenamiento de calor latente y almacenamiento termoquímico (Ould Amrouche et al., 2016):

- Almacenamiento de calor sensible: Es la tecnología más simple y se basa en calentar o enfriar un medio de almacenamiento líquido o sólido. El medio más utilizado es el agua caliente. Ejemplos de este tipo de almacenamiento de energía incluyen almacenamiento de agua caliente (hidro acumulación) o almacenamiento subterráneo de energía térmica (acuífero, pozo, caverna, conductos en el suelo, pozo).
- Almacenamiento de calor latente (PCM): La tecnología de almacenamiento de calor latente aumenta la densidad de almacenamiento de energía mediante el uso de

materiales de cambio de fase (PCM), normalmente entre las fases sólida y líquida, aunque también están disponibles los cambios de fase sólido-gas, líquido-gas y sólido-sólido.

- Almacenamiento termoquímico (TCS): Ofrece una mayor capacidad de almacenamiento (300 kWh/m^3) que los sistemas de almacenamiento de calor sensible y PCM. El TCS se puede utilizar para almacenar y liberar calor y frío mediante un proceso termoquímico reversible, como la adsorción (adhesión de un material a la superficie de otra sustancia). Aunque este proceso es altamente eficiente (75-100 %), todavía está en la fase de desarrollo y se debe hacer un esfuerzo considerable para superar algunas barreras importantes, como la corrosión, el bajo rendimiento de transferencia de calor y masa.

Las principales aplicaciones del sistema TES son:

- Refrigeración industrial (por debajo de $-18 \text{ }^\circ\text{C}$)
- Refrigeración de edificios (a $0\text{--}12 \text{ }^\circ\text{C}$),
- Calefacción de edificios (a $25\text{--}50 \text{ }^\circ\text{C}$)
- Almacenamiento de calor industrial (superior a $175 \text{ }^\circ\text{C}$).

Almacenamiento como energía química

Electroquímica:

Las fuentes de energía electroquímica convierten la energía almacenada directamente en electricidad, a diferencia de otros tipos como las centrales térmicas, donde el combustible se convierte primero en energía térmica (en hornos o cámaras de combustión), luego en energía mecánica, y finalmente en energía eléctrica por medio de generadores (Linden, 2002). Como consecuencia, los sistemas electroquímicos tienen mayor eficiencia energética.

La batería recargable/secundaria es la forma más antigua de almacenamiento de electricidad (McLarnon & Cairns, 1989), que almacena electricidad en forma de energía electroquímica.

El elemento más simple del que consta una celda electroquímica es la llamada celda galvánica, cada una de ellas está formada por dos electrodos, uno positivo y otro negativo, un electrolito y un separador. Durante la descarga, tienen lugar reacciones electroquímicas espontáneas en los dos electrodos generando un flujo de electrones a través de un circuito externo. Las reacciones de este tipo de baterías son reversibles, lo que permite recargar la batería aplicando un voltaje externo a través de los electrodos (H. Chen et al., 2009).

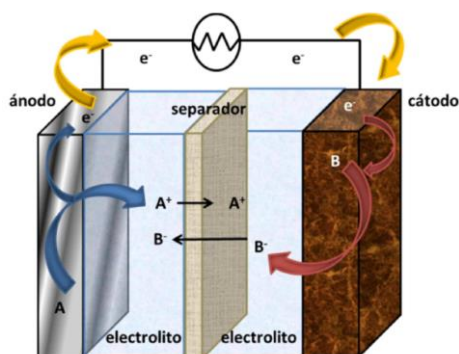


Figura 17 Esquema básico de una celda galvánica (Díaz Baizán, 2016).

La batería se obtiene cuando se conectan dos o más celdas en una disposición adecuada en serie y en paralelo, para obtener el voltaje de operación y la capacidad requerida para una determinada carga (Ould Amrouche et al., 2016).

Las baterías tienen grandes ventajas para aplicaciones de almacenamiento de energía eléctrica:

- Responden muy rápido a los cambios de carga y aceptan energía cogenerada y/o de terceros.
- Las baterías suelen tener pérdidas en espera muy bajas y pueden tener una alta eficiencia energética (60-95 %).

Sin embargo, el almacenamiento de baterías de servicios públicos a gran escala ha sido poco común hasta hace relativamente poco tiempo debido a las bajas densidades de energía, los altos costos de mantenimiento, un ciclo de vida corto y una capacidad de descarga limitada. Además, la mayoría de las baterías contienen materiales tóxicos.

Químico e hidrógeno

Una opción para el almacenamiento y la conversión de grandes cantidades de energía se relaciona con la economía del hidrógeno (HES), H₂ (Taljan et al., 2008). Es el elemento más ligero y simple que consta de un electrón y un protón. Es un gas incoloro, inodoro e inflamable.

El hidrógeno es el combustible con mayor energía por masa, en comparación con los demás (alrededor de tres veces más que la gasolina). Su poder calorífico superior es de 141,8 MJ/kg a 298 K y su poder calorífico inferior del hidrógeno es de 120 MJ/kg a 298 K, que es mucho mayor que el de la mayoría de los combustibles, la gasolina contiene 44 MJ/kg a 298 K (Sherif et al., 2005). Sin embargo, el hidrógeno líquido tiene menos densidad de energía por volumen a temperatura ambiente que los combustibles de hidrocarburos como la gasolina por un factor de aproximadamente cuatro. Tienen una densidad de 8 MJ/l mientras que la gasolina tiene una densidad de 32 MJ/l (Brandon & Kurban, 2017). Es por esto que se requiere el desarrollo de tecnologías avanzadas para el almacenamiento del gas; para alcanzar una mayor densidad energética (Ould Amrouche et al., 2016).

Es el elemento más abundante en el universo, pero no está fácilmente disponible en la Tierra en forma elemental, sino que se encuentra principalmente en el agua y en compuestos orgánicos (Dawood et al., 2020). Por lo tanto, no es un recurso energético, sino un portador de energía secundaria. Actualmente, los combustibles fósiles constituyen las principales fuentes para la producción de hidrógeno, especialmente a partir del metano (Baykara, 2018).

Las tecnologías de generación de hidrógeno se codifican en un esquema basado en diferentes colores (Noussan et al., 2020):

- Hidrógeno gris (o marrón/negro), producido a partir de materia primas de hidrocarburos, principalmente por reformado de gas natural; o empleando carbón. De esta forma se emite dióxido de carbono en el proceso.
- Hidrógeno azul, a través de la combinación de hidrógeno gris y captura y almacenamiento de carbono (CCS), para evitar la mayoría de las emisiones de gases de efecto invernadero del proceso.

- Hidrógeno turquesa, a través de la pirólisis de un combustible fósil, donde el subproducto es carbono sólido.
- Hidrógeno verde: se produce mediante electrolizadores alimentados por electricidad renovable y en algunos casos a través de otras vías a base de bioenergía, como la reforma de biometano o la gasificación de biomasa sólida. El electrolizador emplea el exceso de energía eléctrica procedente de cualquier fuente renovable (paneles solares, turbinas eólicas) en momentos de baja demanda, en romper moléculas de agua y disociarlas en oxígeno e hidrógeno (Ver Figura 18). Este hidrógeno se almacena hasta que hay escasez de energía eléctrica y luego es reconvertido por una celda de combustible en electricidad (Ould Amrouche et al., 2016). Los niveles de eficiencia para la electrólisis del agua pueden variar del 70 al 90 % (Staffell et al., 2019).
- Hidrógeno rosa (o morado), cuando se produce mediante electrolizadores alimentados con electricidad procedente de centrales nucleares.
- Hidrógeno amarillo, cuando se produce mediante electrolizadores alimentados con electricidad procedente de fuentes mixtas entre las que se incluye la quema de combustibles.

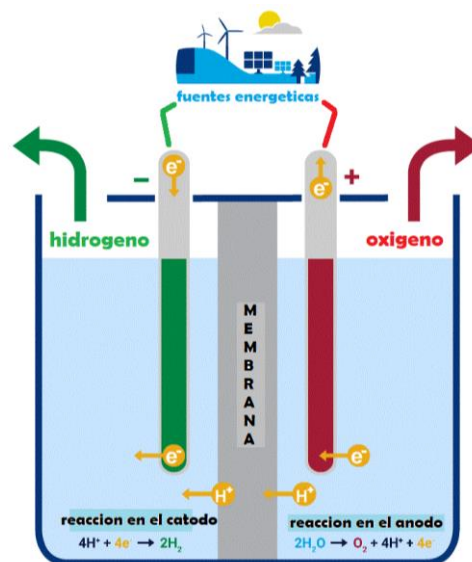


Figura 18 Obtención de hidrógeno a partir de energía renovable (Wood Mackenzie, 2020).

La cuestión de la economía del hidrógeno gana en los últimos años una importancia y una atención cada vez mayores, especialmente en relación con el transporte terrestre eléctrico, por ejemplo, coches eléctricos propulsados por pilas de combustible.

Termoquímica

Los combustibles solares se encuentran en una etapa más temprana de desarrollo, pero han atraído la atención de algunos científicos. Concentran la luz solar que incide sobre un área pequeña con la ayuda de espejos parabólicos y capturan la energía radiactiva. Usando receptores y reactores adecuados, se puede obtener calor a altas temperaturas para llevar a cabo una transformación química endotérmica y producir un combustible almacenable y transportable (H. Chen et al., 2009).

Como se ha comentado, existen numerosas aplicaciones de almacenamiento energético, dependiendo de la aplicación se recurre a un tipo u otro. En ocasiones se emplea almacenamiento de energía híbrido (que combina dos o más tipos de almacenamiento de energía), generalmente cuando ninguna tecnología de almacenamiento de energía puede satisfacer todos los requisitos de la aplicación de manera efectiva. La masa necesaria del equipo para almacenar la energía deseada suele ser un parámetro importante en las aplicaciones debido a las limitaciones de peso y coste, mientras que el volumen de almacenamiento es importante cuando el sistema se encuentra en un área con restricciones de espacio.

Las tecnologías EES también se pueden clasificar según su función en dos destinos principales (Ver Figura 19):

- Aquellas que están destinadas a aplicaciones que requieren energía de alta calidad y confiable (power quality) con un contenido de energía relativamente pequeño. Este tipo de aplicaciones requieren tiempo de respuesta rápidos y alta seguridad de suministros como los UPS (sistemas de alimentación ininterrumpida) o dispositivos electrónicos. En este grupo encontramos los condensadores/supercapacitores, SMES, volantes y baterías.
- Por otro lado, tenemos los diseñados para la gestión de la energía (power management). Para estas aplicaciones se requieren grandes cantidades de almacenamiento de energía, como puede ser la red pública de energía. Para ello se emplean los sistemas PHS, CAES, TES, baterías a gran escala, baterías de flujo, pilas de combustible, combustible solar.

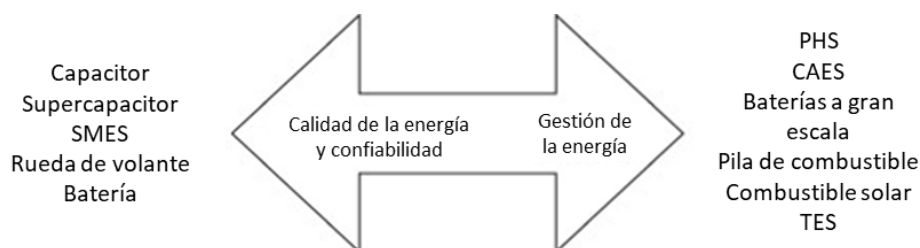


Figura 19 Tipos de almacenamiento energético según su función (H. Chen et al., 2009).

En este caso el objeto de estudio es aumentar la autonomía de una scooter empleada por personas con movilidad reducida. Estos tipos de vehículos funcionan comúnmente con una batería, que es un elemento que como se puede ver en la tabla tiene alta densidad de potencia, pero no de energía, lo que limita su autonomía. Si quisiéramos tener una batería con mayor autonomía el vehículo sería más pesado y difícil de manejar. Para aumentar la autonomía se ha estudiado su hibridación con una pila de combustible, ya que como hemos visto, el hidrógeno cuenta con una elevada densidad energética, consiguiendo así disminuir el tamaño de la batería. A continuación, se describen estas dos tecnologías en mayor profundidad, centrandó la atención en las empleadas para este tipo de aplicaciones. Posteriormente se hace un breve análisis de los motores híbridos empleados en transporte, para luego centrarnos en nuestro caso de estudio.

2.3 Baterías y condensadores

Dependiendo del principio de funcionamiento, las celdas electroquímicas se clasifican de la siguiente manera (H. Chen et al., 2009):

- 1) Las celdas primarias son celdas no recargables en las que la reacción electroquímica es irreversible. Contienen una cantidad fija de los compuestos que reaccionan y sólo se pueden descargar una vez. Los compuestos reaccionantes son consumidos en la descarga, y la celda no se puede volver a utilizar. El ejemplo más conocido es la celda de Daniell, que constituida por zinc y cobre.
- 2) Las celdas secundarias son recargables varias veces. Sólo las reacciones electroquímicas reversibles ofrecen esta posibilidad. Después de que la celda se descargue, si se aplica una fuerza eléctrica inversa al proceso electroquímico los reactivos se regeneran a su forma original, y el sistema de almacenamiento energético se puede volver a utilizar. El proceso puede invertirse cientos o incluso miles de veces. Esta es una ventaja fundamental, principalmente porque el costo de una celda secundaria es normalmente mucho más alto que el de una celda primaria.
- 3) Pilas de combustible: Funcionan en un proceso continuo. Los reactivos, normalmente hidrógeno y oxígeno, se alimentan continuamente a la celda desde el exterior. Las pilas de combustible no son sistemas reversibles. En el apartado 2.44 se comenta en profundidad este tipo de celda electroquímica.

La batería secundaria es la forma más antigua de almacenamiento de electricidad, en ellas se almacena electricidad en forma de energía química. Las baterías están compuestas por dos electrodos conectados por un material conductor iónico llamado electrolito. Los dos electrodos tienen diferentes potenciales químicos, que es la capacidad de un átomo a perder electrones (Tarascon, 2008). Cuando estos electrodos se conectan por medio de un circuito externo, los electrones fluyen espontáneamente desde el potencial más negativo al más positivo (Ver Figura 20). Los iones se transportan a través del electrolito, manteniendo el equilibrio de carga, y el circuito externo puede aprovechar la energía eléctrica. Cuando se aplica un mayor voltaje en la dirección opuesta la batería se recarga.

El progreso actual en la investigación de baterías se encuentra en la elección de materiales adecuados para los electrodos y el electrolito. Además, el inconveniente de la disponibilidad de recursos, la procesabilidad y los factores económicos de los materiales utilizados en las baterías, requieren el desarrollo de tecnologías avanzadas con materiales alternativos que sean abundantes, de bajo costo y ambientalmente sostenibles (Vishnumurthy & Girish, 2021).

Los principales parámetros a considerados al elegir un batería son (Burke, 2007):

- *La densidad de energía:* es la cantidad de energía por unidad de volumen (kWh/m³).
- *La energía específica* es la cantidad de energía por unidad de masa (kWh/kg). (Demirel, 2016).
- *La densidad de potencia (W/kg):* tasa de transferencia de energía por unidad de masa.
- El ciclo de vida: Es el número de ciclos de carga y descarga que una batería puede completar antes de perder rendimiento (García, 2021).
- El coste.
- La seguridad ambiental.

- Efecto memoria: si las baterías se recargan repetidamente después de haberse descargado solo parcialmente, pierden gradualmente capacidad utilizable debido a una tensión de trabajo reducida. Este efecto de memoria conduce a una reducción en la capacidad práctica de la celda a un voltaje de corte fijo y/o a una estimación incorrecta del estado de carga (SOC) de la celda (Sasaki et al., 2013).
- Estado de carga (SOC): nivel de carga con respecto a su capacidad.

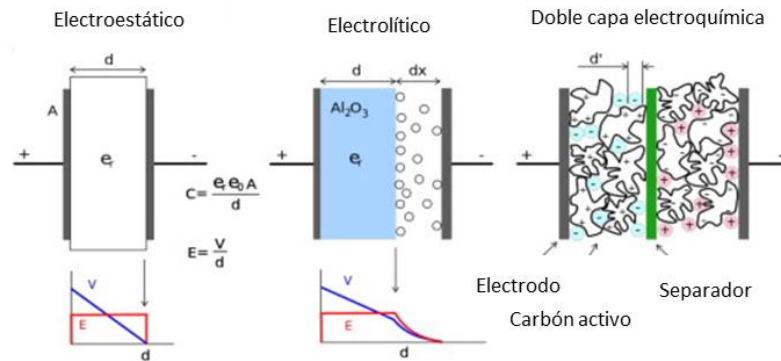


Figura 20. Esquema de una batería recargable (Vishnumurthy & Girish, 2021).

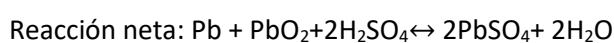
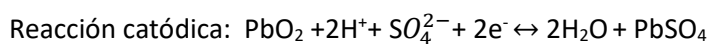
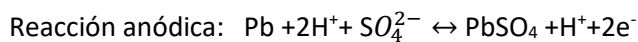
2.3.1 Tipos de baterías

Los tipos existentes de batería se definen según la naturaleza de la reacción química, características estructurales y diseño. Esta gran variedad se traduce en un gran número de aplicaciones posibles. En este caso se ha centrado en describir el tipo de baterías según las reacciones químicas que ocurren en su interior.

Cientos de pares electroquímicos fueron propuestos durante el siglo XIX. Actualmente las más empleadas para aplicaciones de almacenamiento de energía se encuentran las de plomo ácido, níquel cadmio, azufre de sodio, cloruro de níquel de sodio y de litio. A continuación, se describen brevemente estos pares electroquímicos:

- Batería de plomo ácido

Las baterías de plomo ácido, inventadas en 1859, son los dispositivos electroquímicos recargables más antiguos y ampliamente utilizados. Una batería de plomo-ácido consta de (en estado cargado) electrodos de plomo metálico y óxido de plomo en un electrolito de aproximadamente 37% (5,99M) de ácido sulfúrico. En estado descargado, ambos electrodos se convierten en sulfato de plomo y el electrolito pierde su ácido sulfúrico disuelto y se convierte principalmente en agua. Las reacciones químicas que tienen lugar son:



La batería de plomo ácido tiene un bajo costo (\$300–600/kWh) y una alta fiabilidad y eficiencia (70–90%). Se emplean comúnmente en aplicaciones de calidad de la energía, UPS y algunas aplicaciones de reserva giratoria. Sin embargo, su aplicación para la gestión de la energía ha

sido muy limitada debido a su breve ciclo de vida (500 a 1000 ciclos) y baja densidad de energía (30 a 50 Wh/kg) debido a la alta densidad del plomo. Las baterías de plomo ácido también tienen un bajo rendimiento a baja temperatura y, por lo tanto, requieren un sistema de gestión térmica (H. Chen et al., 2009). Por lo general, tienen un tamaño grande y son pesadas, lo que limita su uso en dispositivos electrónicos portátiles. Pero son atractivas para su uso en automóviles, carros de golf y montacargas (Liang et al., 2019).

- Batería de níquel-cadmio

Las baterías de níquel-cadmio (NiCd) han sido ampliamente estudiadas y tienen una popularidad similar a la de plomo-ácido. Las baterías de NiCd contienen una placa de electrodo positivo de hidróxido de níquel, una placa de electrodo negativo de cadmio, un separador y un electrolito alcalino de KOH. Las reacciones que ocurren son:

Reacción anódica: $\text{Cd} + 2\text{OH}^- \leftrightarrow \text{Cd}(\text{OH})_2 + 2\text{e}^-$

Reacción catódica: $\text{NiO}(\text{OH}) + 2\text{H}_2\text{O} + \text{e}^- \leftrightarrow \text{Ni}(\text{OH})_2 + \text{OH}^-$

Reacción neta: $2 \text{NiO}(\text{OH}) + \text{Cd} + 2\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow 2 \text{Ni}(\text{OH})_2 + \text{Cd}(\text{OH})_2$

Las baterías de NiCd tienen una alta densidad de energía (50–75 Wh/kg), alta fiabilidad y requieren pocas labores de mantenimiento. En cuanto a inconvenientes, poseen un ciclo de vida relativamente bajo (2000–2500) (H. Chen et al., 2009). No obstante, ofrece varias ventajas sobre la batería de plomo-ácido, como una vida útil más larga, un mejor rendimiento a baja temperatura, tasas de carga y descarga más altas y un tamaño versátil que va desde pequeños portátiles a grandes celdas ventiladas. Debido a estas características excepcionales, la batería Ni-Cd fue una vez la opción de batería dominante para fuentes de energía portátiles y de reserva como para herramientas eléctricas, dispositivos portátiles, iluminación de emergencia, telecomunicaciones y arranque de generadores. Sin embargo, los dispositivos portátiles como los teléfonos móviles y las computadoras portátiles han sido efectivamente desplazados de estos mercados por otros pares electroquímicos.

El principal inconveniente de las baterías de NiCd es el costo relativamente alto debido a que requiere un costoso proceso de fabricación. Además, el cadmio es un metal pesado tóxico, por lo que se le suman problemas asociados con la eliminación de las baterías de NiCd. Las baterías de NiCd también sufren el “efecto memoria”, en el que las baterías solo se cargan por completo después de una serie de descargas completas.

- Batería de hidruro de níquel-metal

Su configuración es muy similar a la de la batería Ni-Cd, usan los mismos materiales de cátodo y electrolito, pero en lugar de Cd, se usa una aleación absorbente de hidrógeno como ánodo (Liang et al., 2019). Las reacciones son las siguientes:

Reacción anódica: $\text{MH} + \text{OH}^- \leftrightarrow \text{M} + \text{H}_2\text{O} + \text{e}^-$

Reacción catódica: $\text{NiO}(\text{OH}) + \text{H}_2\text{O} + \text{e}^- \leftrightarrow \text{Ni}(\text{OH})_2 + \text{OH}^-$

Reacción neta: $\text{NiO}(\text{OH}) + \text{MH} \leftrightarrow \text{Ni}(\text{OH})_2 + \text{M}$

Este tipo de baterías son muy utilizadas en dispositivos portátiles. Son más baratas y ecológicas que las baterías de Ni-Cd. Además, tienen otras ventajas como, un efecto de memoria menor, un ciclo de vida superior, un excelente rendimiento en un rango más amplio de temperaturas

de funcionamiento, altas tasas de carga y mayor densidad de energía. Su densidad de energía es más del doble que la de las baterías de plomo-ácido, aproximadamente un 50% más alta que la de las baterías de Ni-Cd, e incluso puede acercarse a la de las baterías de iones de litio. El ciclo de vida promedio puede alcanzar los 500 ciclos en una batería Ni-MH de alta capacidad y casi 3000 ciclos en una de baja capacidad. La batería Ni-MH también ofrece una capacidad de carga rápida (Liang et al., 2019). Su mayor inconveniente es su alta tasa de autodescarga, que es hasta tres veces mayor que la de las baterías de Ni-Cd, e incluso más veces mayor que la de las baterías de Li-ion y de plomo-ácido.

- Batería de iones de litio

Son las baterías recargables más utilizadas en la actualidad, son las más empleadas en dispositivos electrónicos personales (Tarascon, 2008).

Están constituidas por un cátodo de óxido de metal litiado (LiFePO_4 , LiCoO_2 , LiMO_2 , LiNiO_2 , LiPo , etc.) y el ánodo está hecho de carbono grafitico con una estructura de capas, que se unen libremente de forma que los iones de litio pueden almacenarse ahí. El grafito es el medio, pero no interactúa. Por otro lado, el electrolito permite sólo el paso de los iones, y normalmente es una sal de litio (como LiPF_6) disueltas en carbonatos orgánicos (Ver Figura 21).

De entre todos los metales, el litio es el que tiene la mayor tendencia a perder electrones. Sólo tiene un electrón en su capa de valencia, lo que lo hace muy reactivo. Sin embargo, cuando forma parte de un óxido metálico es estable.

Durante el proceso de carga, la batería se conecta a una fuente de energía y los electrones fluyen a través del circuito externo hasta el cátodo, ya que no pueden atravesar el electrolito. Los iones de litio cargados positivamente serán atraídos y atraviesan el electrolito hasta los huecos de la capa de grafito. De esta forma la celda está cargada. Este es un estado inestable, pues los iones de litio son inestables, mientras que en forma de óxido metálico sí son estables. Cuando se conecta una carga, los iones de litio pasan a través del electrolito y los electrones a través de circuito externo proporcionando electricidad. Las reacciones del proceso son las siguientes (Ver Figura 21):

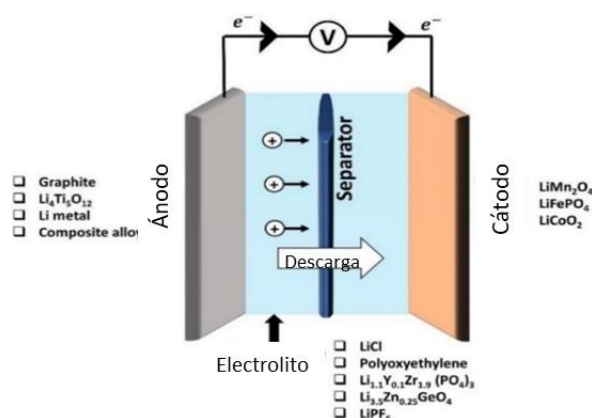
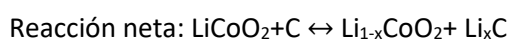
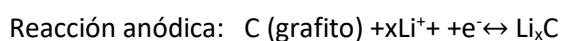


Figura 21 Esquema de una batería de iones de litio y cátodo de LiCoO_2 (Song et al., 2011).

Tienen una alta energía específica (normalmente el doble que las baterías estándar de Ni-Cd), baja tasa de autodescarga, alto voltaje de alrededor de 3,6 V (tres veces mayor que la batería típica basada en Ni), libre de mantenimiento, liviana, buena seguridad y excelente rendimiento de ciclo. Estas características ventajosas hacen que las baterías de iones de litio sean la mejor opción de almacenamiento de energía para dispositivos electrónicos portátiles de tamaño pequeño, como teléfonos móviles, computadoras portátiles, cámaras digitales y otros, que antes eran predominantemente baterías de Ni-MH y Ni-Cd. No obstante, las baterías de iones de litio también están creciendo en popularidad para usos militares, vehículos eléctricos y aplicaciones aeroespaciales (Liang et al., 2019).

Aunque las baterías de iones de litio ocupan más del 50 % del mercado de dispositivos portátiles pequeños, presentan aspectos a mejorar como el alto coste debido al empaque especial y los circuitos internos de protección contra sobrecargas.

El cátodo es la fuente principal de todos los iones de litio activos, por lo que, para proporcionar una elevada capacidad energética, este material debe ser capaz de incorporar una gran cantidad de litio en su fabricación (X. Chen et al., 2012).

Por otro lado, encontramos las baterías de polímero de litio, que, a diferencia de las baterías de iones de litio, su electrolito no se encuentra en estado líquido, sino que es una película constituida por una base de polímeros que tiene una consistencia similar a la de un gel. Esta estructura hace posible que se pueda fabricar las baterías con un tamaño muy reducido (menos de 0,1 mm de grosor) y con distintos diseños. Estas baterías son muy potentes, pero como desventaja presentan que son mecánica, eléctrica y térmicamente sensibles (Jungheinrich PROFISHOP, 2022).

En la siguiente tabla se muestran las propiedades de las baterías de iones de litio más empleadas y de las pilas de iones de polímero. Podemos ver que según la aplicación deseada se emplean más unas u otras.

Tabla 1 Tipos de baterías de iones de litio y sus características (RELION, n.d.).

	LFP (LiFePO ₄)	NMC (LiNiMnCoO ₂)	LCO (LiCoO ₂)	LMO (LiMO ₂)	LTO (Li ₄ Ti ₅ O ₁₂)	LiPo
Voltaje nominal rango de operación	3,2 V 2,5-3,65 V	3,6V (3-4,2V)	3,6V (3-4,2V)	3,7V (3-4,2V)	2,4V 1,8-2,85V	3,7V -4,2V
Energía específica (Wh/kg)	90-120	150-220	150-200	100-150	50-80	130-200
Densidad energética (Wh/l)	333	580	560	420	177	300

Estudio de la implementación de un sistema híbrido “pila de combustible + batería” en un vehículo para personas con movilidad reducida.

	LFP (LiFePO ₄)	NMC (LiNiMnCoO ₂)	LCO (LiCoO ₂)	LMO (LiMO ₂)	LTO (Li ₄ Ti ₅ O ₁₂)	LiPo
Ratio de carga/ Voltaje de carga	1C/ 3,5-3,65 V	0,7-1C/ 4,2V	0,7-1C/ 4,2	0,7-1C (Máx 3C) / 4,2 V	1C(Máx 5C) /2,85V	1C
Ratio de descarga/ Voltaje de corte	1C (300C celdas de potencia). /2V	1C (2C algunas) /2,5V	1C /2,5V	1C /2,5V	10C (30C 5s)/ 1,8V	Elevados <100C
Ciclos de vida	2000-4000	1000-2000	500-1000	300-700	3000-7000	>1000
Aplicaciones	Sistemas de propulsión y de carga estacionaria que requieran grandes cantidades de corriente	E-Bicis, equipos médicos e industriales	Móviles, ordenadores, tablets, cámaras	Equipos médicos, trenes de energía eléctrica	UPS, trenes de energía eléctrica, alumbrado público	Alto consumo en poco espacio y peso

2.3.2 Supercondensadores

Los capacitores son dispositivos capaces de almacenar electricidad a un ritmo muy rápido, poseen varios miles de ciclos de carga/descarga sin degradación del material en comparación con las baterías, y son adecuados para aplicaciones de estabilidad de voltaje transitorio.

Sin embargo, los capacitores convencionales están limitados por su baja densidad de energía; lo que ha propulsado el desarrollo de los llamados supercondensadores (SC). Estos sistemas poseen valores de capacitancia y densidad de energía miles de veces superiores a los de los convencionales, debido a su mayor área superficial (Akinyele & Rayudu, 2014). También poseen un rango de temperatura de funcionamiento más amplio y una vida útil mucho más larga. En comparación con una batería, tiene una potencia específica superior y son más respetuosos con el medio ambiente (Lü, Qu, et al., 2018). Los capacitores pueden cargarse mucho más rápido que las baterías convencionales y pueden funcionar decenas de miles de veces con una alta eficiencia.

Los condensadores electrolíticos convencionales almacenan energía a través de dos placas paralelas separadas por un material dieléctrico, mientras que los SC utilizan capas de líquido polarizado entre el electrolito iónico conductor y el electrodo conductor para aumentar la capacitancia (Ould Amrouche et al., 2016). La energía se almacena a través de una solución

electrolítica (carbonato de propileno) entre dos placas, en lugar del dieléctrico entre electrodos que se emplea en los condensadores convencionales.

Dado que la energía entregada por el capacitor electroquímico depende del valor de la capacitancia y el voltaje de operación al cuadrado, las líneas de investigación van orientadas a mejorar la capacitancia o el empleo del electrolito con una ventana electroquímica amplia.

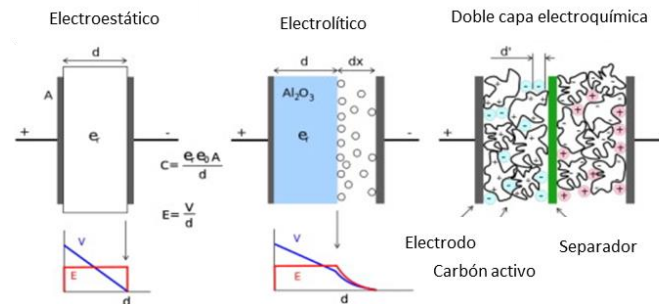


Figura 22 Esquema de los diferentes tipos de condensadores (Akinyele & Rayudu, 2014).

Por estos motivos se usan en sistemas híbridos de almacenamiento de energía para complementar las baterías. Por lo tanto, es esencial tener en cuenta que los supercondensadores no ofrecen una alternativa a las baterías y que existe una sinergia entre las dos tecnologías para hacer frente a los desafíos de los sistemas de suministro de energía (Hall & Bain, 2008).

2.4 Celdas de combustible

Una celda de combustible, FC, del inglés *Fuel Cell*, es un dispositivo electroquímico que transforma la energía química de los combustibles en energía eléctrica, lo que proporciona una eficiencia de conversión mucho más alta que cualquier sistema termomecánico convencional, extrayendo así más electricidad de la misma cantidad de combustible. Funcionan sin combustión y tienen un funcionamiento más silencioso ya que no hay partes móviles (Boudghene Stambouli & Traversa, 2002).

Presentan las siguientes características:

- El combustible y el oxígeno (agente oxidante) reaccionan a través de un mecanismo electroquímico, produciendo energía eléctrica, H₂O y dependiendo del combustible CO₂; y algo de calor residual, que es mucho menor que en la combustión convencional (Schäfer et al., 2006).
- Una FC se compone de dos electrodos, ánodo y cátodo (Ver Figura 23). El combustible pasa a través de las placas bipolares del ánodo mientras que el oxígeno fluye en el cátodo. Cada compuesto se encuentra en uno de los electrodos y se dispone de un electrolito conductor de iones.
- A diferencia de las baterías recargables, el agente reductor y el oxidante se deben reponer continuamente para permitir un funcionamiento continuo.
- Los FC que funcionan en condiciones de baja temperatura requieren un catalizador para acelerar la reacción química (Abdelkareem et al., 2021). El catalizador más adecuado es el platino (Pt), lo que incrementa significativamente el coste. Los FC de alta temperatura no requieren Pt para acelerar la reacción.

- Entre los combustibles que se pueden emplear, el hidrógeno es el más prometedor debido a la rápida reacción electroquímica y su alta energía específica.

Los FC se diferencian según el electrolito utilizado, las condiciones de funcionamiento, la carga requerida, el combustible disponible, el tiempo de arranque y la aplicación para la que se utiliza. Estas celdas normalmente reciben el nombre de acuerdo con el electrolito que se utiliza.

2.4.1 Tipos de celdas de combustible

- Pilas de combustible de membrana de intercambio protónica (PEMFC).

Una PEMFC utiliza hidrógeno como combustible y su electrolito se presenta como un polímero sólido (membrana), debe permitir el flujo de protones, es decir, H^+ del ánodo al cátodo.

Con esta pila de combustible se puede trabajar a una temperatura de funcionamiento entre 70 y 90 °C y una presión de 1-2 bar.

El combustible de hidrógeno se alimenta al ánodo de la celda de combustible, y el oxígeno, normalmente del aire, ingresa a la celda a través del cátodo. El hidrógeno, bajo la acción del catalizador, se divide en protones (iones de hidrógeno) y electrones, que toman diferentes caminos hacia el cátodo. El protón pasa a través del electrolito y el electrón crea una corriente separada que puede usarse antes de llegar al cátodo, posteriormente se junta con el hidrógeno y el oxígeno para formar una molécula de agua pura; y calor como se muestra en la Figura 23. Las reacciones que ocurren son las siguientes:

Reacción anódica: $2H_2 \rightarrow 4H^+ + 4e^-$

Reacción catódica: $O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$

Reacción neta: $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O + \text{electricidad} + \text{calor}$

- Celda de combustible alcalina (AFC).

También emplea H_2 como combustible, pero trabaja con una solución de base alcalina como NaOH o KOH como electrolito y funciona a bajas temperaturas. Una variante de estas FC utiliza una membrana de intercambio aniónico (AEMFC) como electrolito. El KOH es el electrolito más utilizado debido a su alta conductividad. Tienen una actividad más alta que las PEMFC. Su principal desventaja es su intolerancia al CO_2 , debido a que el CO_2 consume el electrolito formando sal de carbonato.

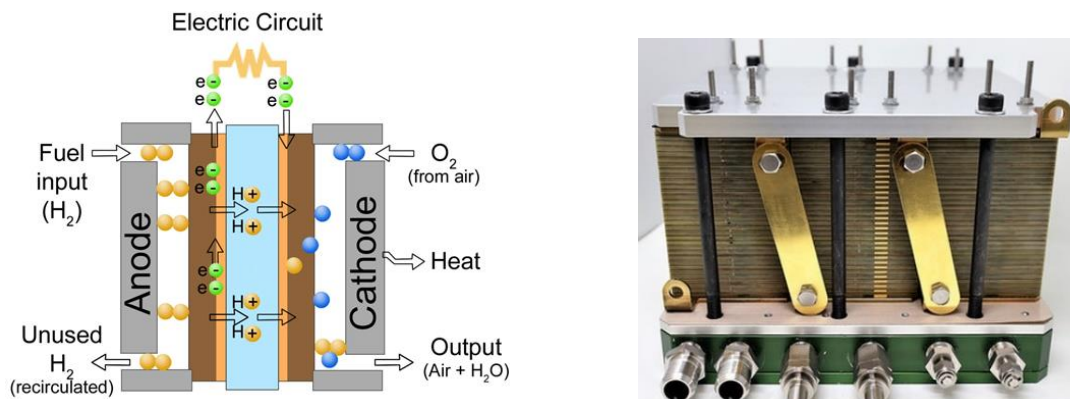


Figura 23 Esquema PEMFC (izquierda), ejemplo de celda real (derecha).

- Celdas de combustible de metanol directo (DMFC).

Permiten emplear una amplia gama de alcoholes como combustibles, como el metanol y el etanol. También funcionan a bajas temperaturas y se utilizan principalmente para aplicaciones de energía portátil por debajo de 250W. El principal problema que presentan es el cruce de combustible. A medida que el combustible se mueve del ánodo al cátodo debido a la diferencia de concentración, genera un potencial mixto, lo que a su vez reduce el rendimiento general y envenena el cátodo. En consecuencia, se usa una concentración de alcohol más baja, lo que reduce la densidad de energía.

- Celdas de combustible de ácido fosfórico (PAFC).

Emplea hidrógeno como combustible y es una celda de combustible de temperatura intermedia (150 y 220 °C). El electrolito de la celda es ácido fosfórico H_3PO_4 . PAFC es el FC más utilizado con fines comerciales, con un nivel de madurez más alto en comparación con otros. Presenta mayor tolerancia al envenenamiento por CO y una menor demanda de catalizadores de Pt en comparación con los PEMFC debido a la mayor actividad, lo que reduce su coste. Además, el calor residual se puede aprovechar para calentarse, ya que funcionan a temperaturas más altas. Las desventajas de los PAFC, aunque requieran menos cantidad de Pt, siguen requiriendo este material aumentando su coste; el largo tiempo de arranque y la menor conductividad iónica. Además, dado que es un FC de temperatura intermedia, existe una gama limitada de materiales de construcción.

- Celdas de combustible de carbonato fundido (MCFC).

Funciona a alta temperatura (550 - 700 °C). Se pueden emplear diferentes combustibles como gas natural o H_2 ; y diferentes oxidantes como oxígeno o dióxido de carbono (lo que significa que pueden usarse para la captura y almacenamiento de carbono). El electrolito para este tipo de FC se compone de sales de carbonato fundidas, principalmente carbonatos de litio y potasio. Tanto para el ánodo como para el cátodo se emplean polvos a base de níquel (Wu et al., 2016). Presentan una alta eficiencia y no requiere metales nobles. La principal limitación de los MCFC es la corrosión debido a las altas temperaturas, el largo tiempo de puesta en marcha, las opciones limitadas de materiales de construcción y el manejo complejo del líquido de carbonato fundido.

- Celdas de combustible de óxido sólido (SOFC).

Puede utilizar los mismos combustibles que la MCFC (metanol, biogas etc) y también funcionan a alta temperatura. Su electrolito sólido suele estar compuesto de zirconio estabilizado con itrio. Hay requisitos específicos que deben tenerse en cuenta para que un material se utilice como cátodo: estabilidad térmica, la conductividad iónica estable y la actividad catalítica, como el $(La,Sr)MnO_3$. El ánodo también puede estar compuesto por YSZ a base de níquel, lo que acelera la reacción de oxidación del hidrógeno. La eficiencia de este tipo de FC suele ser alta y el exceso de calor producido durante la reacción puede utilizarse para la cogeneración. Estos FC funcionan en ausencia de metales nobles, lo que los hace asequibles, con un largo tiempo de operación, de hasta 80.000 h. La principal desventaja de las SOFC se debe a la alta

Estudio de la implementación de un sistema híbrido “pila de combustible + batería” en un vehículo para personas con movilidad reducida.

temperatura de la celda, ya que sólo una selección limitada de materiales puede ser térmica, catalítica y conductivamente estable a temperaturas tan altas.

En la siguiente tabla se muestran las principales características de los tipos de celdas de combustibles.

Tabla 2 Tipos de FC y características, ventajas, desventajas y aplicaciones. Traducido de (Abdelkareem et al., 2021)

Tipo	PEMFC	AFC	PAFC	DMFC	MCFC	SOFC
Capa de catalizador	Pt	Aleación de Pt o Ni	Pt	Pt/Ru(1:1)	Ni o aleaciones basadas en Ni y otros metales de transición	
Electrolito	Membrana de polímero sólido (Nafion)	Solución líquida alcalina	Ácido fosfórico	Nafion	Carbonato fundido	Circonia estabilizada con itrio, YSZ
Combustible	H ₂			Metanol, etanol...	H ₂ , CO/CH	
Temperatura óptima de operación (°C)	50-100	23-70	180	>60	550-700	700-1000
Eficiencia celda (%)	50-70	60-70	55	20-30	55	60-65
Eficiencia del sistema (%)	30-50	62	40 Co-gen 90%	10-25	45-55	55-60

En la siguiente figura se muestra gráficamente en qué rango de potencia opera cada una de las celdas, lo que sirve como orientación para elegir qué celda es la ideal para una aplicación concreta.

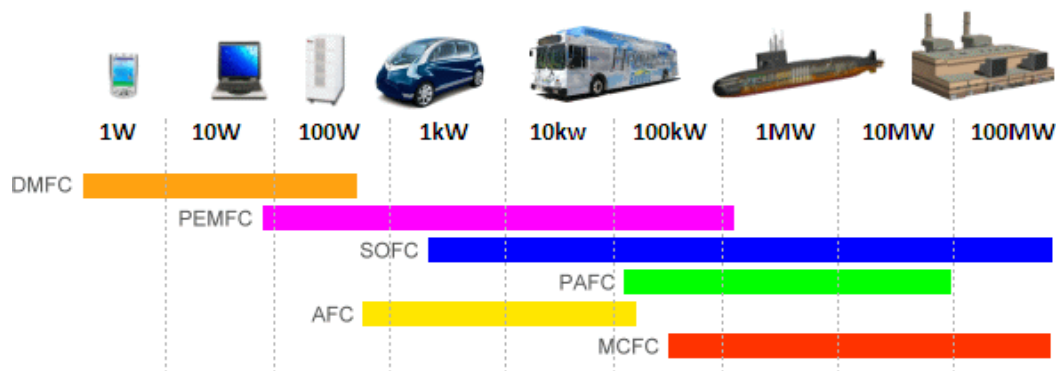


Figura 24 Rango de aplicación de cada tipo de celda de combustible (Antig, n.d.).

Para aplicaciones de media y gran potencia las mejores opciones son MCFC y SOFC (Ver Figura 24). Las SOFC operan a la temperatura más alta entre todas las celdas de combustible por lo

que brindan una eficiencia muy alta y proporcionan calor de alta calidad para la cogeneración. Da como resultado que la eficiencia del sistema aumente hasta en un 80% con operaciones combinadas de cogeneración y baja emisión de gases de efecto invernadero, pero su alto costo inicial es el principal inconveniente.

En el objeto de estudio de este Trabajo Final de Máster: un vehículo para personas con movilidad reducida, el sistema requiere una potencia máxima de propulsión de 500 W, esto se explica más detalladamente en el Capítulo 4. En la Figura 24 se observa que, para esta magnitud de potencia las pilas más idóneas son la PEMFC y la DMFC. Además, ambas cuentan con baja temperatura de trabajo (50–100 °C) y arranque rápido. No obstante, hay diferencias entre ellas:

- En una celda que utiliza alcohol como combustible se obtiene CO₂ como subproducto
- El peso de ambas es otro factor diferencial. En la DMFC el combustible (el alcohol) se encuentra en estado líquido, lo que la hace más segura pero también más pesada. En algunos casos, como en drones, que sea lo más ligera posible es un requisito.
- La eficiencia de las DMFC se encuentra en torno al 20 %, mientras que las PEMFC cuentan de media 45 %.

Para el caso en cuestión el peso no es un factor limitante, dado que es un vehículo que circula por el suelo. No obstante, se ha elegido estudiar la incorporación de una PEMFC debido a que genera cero emisiones a la atmósfera y cuenta con un mayor rendimiento. Además, este tipo de celdas de combustible son las preferidas para su uso en automóviles (Alkire et al., 2008).

2.4.2 Ventajas de la pila de combustible de hidrógeno

- Alta densidad energética
- Eficiencia. La principal ventaja es su alta eficiencia en comparación con otros dispositivos de conversión de energía. Esto permite que la eficiencia de un vehículo de pila de combustible que utilice FC de hidrógeno directo sea el doble que la de un vehículo de gasolina.
- Emisiones- Utilizando FC de hidrógeno directo, se puede eliminar el problema de las emisiones locales en áreas densamente urbanas. Además, se elimina toda contaminación si el hidrógeno se ha obtenido a partir de energías renovables.
- Temperatura de funcionamiento. La temperatura de funcionamiento se encuentra por debajo de 80°C (Ver Tabla 2). El coste de los materiales es menor que el de las pilas de combustible de alta temperatura (excepto el catalizador, que es a base de platino) y su funcionamiento es más seguro.
- El hidrógeno no es tóxico y es mucho más liviano que el aire; se disipa rápidamente cuando se libera, lo que permite una dispersión relativamente rápida del combustible en caso de fuga, lo que lo hace relativamente más seguro que otros combustibles derramados (Dawood et al., 2020).
- El tiempo de recarga es comparable al del combustible tradicional.

2.4.3 Inconvenientes de la pila de combustible de hidrógeno

- La principal desventaja de las pilas de combustible es su elevado coste y el elevado coste de producción del hidrógeno (Feroldi & Basualdo, 2012). La idea actual es que a largo plazo se obtenga a partir de la electrólisis del agua empleando energía

renovable. Se espera que el costo de las pilas de combustible y el hidrógeno disminuya con el progreso tecnológico (Feroldi & Basualdo, 2012).

- Difícil de almacenar. Al ser un gas muy ligero, que se almacena, distribuye y consume en estado gaseoso, su almacenamiento y transporte es muy complejo. Como se ha comentado, tiene una densidad mucho más baja que el propio gas natural, lo que hace que el poder calorífico en volumen del combustible sea inferior. Esto da lugar a que, para obtener la misma energía, el volumen consumido sea mayor. Como consecuencia se necesitan depósitos más grandes y tuberías más gruesas.
- Peligrosidad. Es inflamable. Al ser incoloro e inodoro, por lo que si no se detecta una fuga y el gas se acumula en un espacio confinado, puede encenderse y causar una explosión.
- Actualmente no existe una infraestructura capaz de abastecer la demanda.

2.4.4 Pila de combustible vs batería vs supercondensador

Las características de los tipos de almacenamiento de energía electroquímica a menudo se presentan en un gráfico de Ragone en términos de densidad de energía y potencia específica (Ver Figura 25).

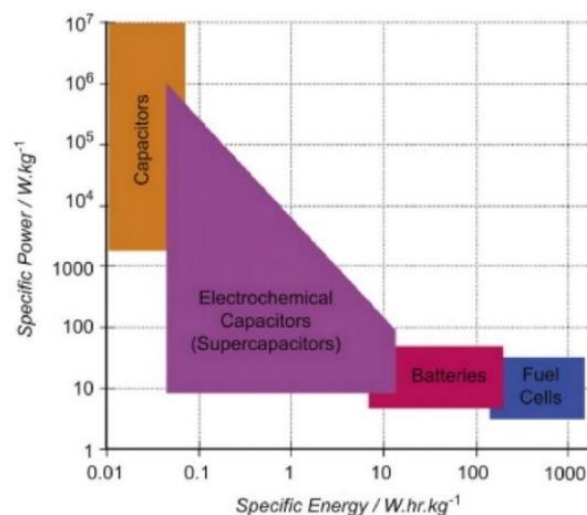


Figura 25 Gráfico Ragone de almacenamiento de energía (Hall & Bain, 2008)

Cuando se requiere energía durante un período prolongado, es necesario un dispositivo de alta densidad de energía que pueda almacenar grandes cantidades de energía. Cuando existen fluctuaciones de carga/descarga durante períodos cortos, como el arranque de un coche o un frenado, se necesita un dispositivo de alta densidad de potencia (Koohi-Fayegh & Rosen, 2020).

En la última década han surgido numerosas investigaciones para presentar sistemas híbridos de estos equipos para aprovechar las características de ambos: alta densidad de potencia y alta densidad energética, que se pueden aprovechar para numerosas aplicaciones como vehículos o aumentar la autonomía de otros equipos electrónicos como una silla de ruedas, que es lo que se plantea en este Proyecto Final de Máster. A continuación, se presenta la aplicación de los motores eléctricos en vehículos terrestres.

2.5 Motor eléctrico aplicado a movilidad

En 1834, el inventor estadounidense Thomas Davenport construyó el primer coche eléctrico (EV). A principios de 1900 se fabricaron más vehículos eléctricos que de combustión, pero debido a la capacidad limitada de la batería de estos vehículos, no fue posible igualar la velocidad y el rango de conducción de los vehículos de combustión interna (Alamoudi et al., 2019). Actualmente se presentan como una de las soluciones ideales a la crisis energética y el calentamiento global (Lü, Qu, et al., 2018).

El motor eléctrico funciona con un conjunto de bobinas y trabaja con inversión de campos magnéticos. Un motor eléctrico de corriente continua DC clásico es el motor brushed (con escobillas). Este motor tiene un estator (parte fija) y un rotor (parte móvil) que cuenta con una bobina eléctrica. Cuando dicha bobina se conecta a la batería, que produce una corriente eléctrica continua, genera un campo magnético que hace girar el rotor hasta que sus polos se encuentren con los polos opuestos del estator (positivo del rotor junto a negativo del estator y negativo del rotor junto a positivo del estator). Para mantener este movimiento, la polaridad de la bobina se va alternando. Existen motores eléctricos tanto de CA como de CC contruidos con y sin imanes permanentes, según el uso individual (Helmerts & Marx, 2012).

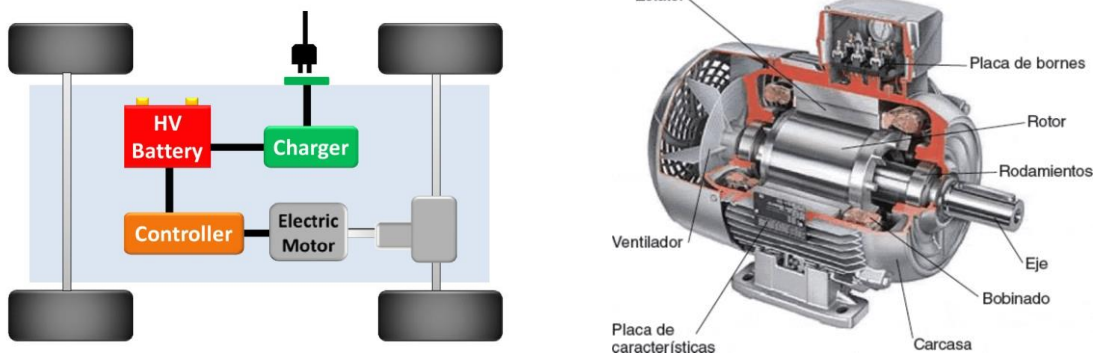


Figura 26 Izquierda: Esquema de un coche eléctrico (Helmerts & Marx, 2012). Derecha: Esquema de un motor eléctrico (Sanabria Betancur et al., 2016).

La batería se carga con electricidad cuando se conecta a la red eléctrica a través de un dispositivo de carga o durante el frenado a través de la recuperación. El cargador es un componente crucial ya que su eficiencia puede variar hoy en día entre el 60 % y el 97 %, desperdiciando entre el 3 % y el 40 % de la energía de la red en forma de calor. El controlador de motor suministra al motor eléctrico una potencia variable en función de la situación de la carga. El motor eléctrico convierte la energía eléctrica en energía mecánica y, cuando se usa dentro de un tren motriz, en par (Helmerts & Marx, 2012). Los vehículos eléctricos que se encuentran actualmente en el mercado se pueden diferenciar entre vehículos eléctricos puros, y vehículos híbridos.

Los vehículos eléctricos puros actuales se mueven a través de la energía almacenada en sus baterías. Se enchufan para cargar la batería y su velocidad de carga depende de la potencia de los cargadores a los que se pueda conectar (potencia máxima soportada). Por ejemplo, el Tesla Model S o el Nissan Le. El principal problema que presentan es la autonomía (unos 200 km), tiempo de recarga, amperaje, potencia contratada y el coste de adquisición actual. Para maximizar la autonomía, recurren a la frenada regenerativa en deceleraciones. Aun así, las

baterías presentan desventajas como una densidad de energética muy inferior al petróleo, tiempo de recarga mayor que llenar un depósito, red de recarga insuficiente, la capacidad de recarga va mermando, son caras de fabricar y requieren de instalación de garaje.

Por otro lado, encontramos los vehículos eléctricos híbridos (HEV), que son los EV más populares en el mercado actual. A continuación, se exponen brevemente para tomarlo como punto de partida al sistema híbrido celda de combustible + batería.

2.5.1 Sistema de propulsión híbrido (HEV)

Este tipo de vehículos combina diferentes fuentes de energía a bordo del vehículo. Cuenta con un motor eléctrico y un motor de combustión interna (casi siempre de gasolina) los cuales se combinan de tal manera que se obtienen las características más deseables de cualquiera de ellos a la vez durante la conducción (Alamoudi et al., 2019).

Se clasifican en: híbridos en serie, en paralelo, serie-paralelo e incluso híbridos complejos. También existe otra forma de describir los híbridos en función de las características operativas y los niveles de potencia, como los microhíbridos, y los híbridos completos. A continuación, se describen estas formas de configuraciones (López Martínez, 2018):

- Serie: En este tipo de configuración sólo el motor eléctrico, alimentado por la batería, proporciona la potencia propulsiva a las ruedas (Alamoudi et al., 2019). El motor de combustión interna alternativo (MCIA) acciona un generador sin estar acoplado al tren propulsor y su rango de operación se puede limitar de manera que evite variaciones bruscas de la carga con la consiguiente disminución del consumo y de las emisiones contaminantes.
- Paralelo: En este tipo tanto el motor de combustión como el motor eléctrico están acoplados y conectados directamente a las ruedas, donde comparten la operación de conducción del vehículo. Los requerimientos de potencia para el motor eléctrico son menores que en la configuración en serie o que en un VE, ya que el motor de combustión complementa la potencia total requerida. La potencia propulsiva se puede suministrar bien por el MCIA, bien por el motor eléctrico o bien por combinación de ambos sistemas, por lo que sus tamaños son más pequeños. El motor de combustión actúa como un generador para cargar la batería. Sin embargo, solo puede operar como motor o como generador en cualquier instante (López Martínez, 2018).
- Serie-paralelo. Es este caso el motor de combustión proporciona la potencia al vehículo, pero también se utiliza para cargar la batería. Hay una conexión más entre el generador y el motor eléctrico, en comparación con la configuración en serie, y un generador más comparado con el híbrido en paralelo.
- Complejos. Utiliza una combinación serie-paralelo pero introduciendo un tren planetario que conecta el motor térmico y el motor/generador y, a través del anillo, se acopla a otro motor/generador (López Martínez, 2018). En ellos se puede desconectar el motor térmico de la tracción del vehículo y de forma que el vehículo funciona en modo puramente eléctrico. No obstante, en la mayoría de los puntos operativos coexisten ambos flujos de energía como en la configuración en paralelo.

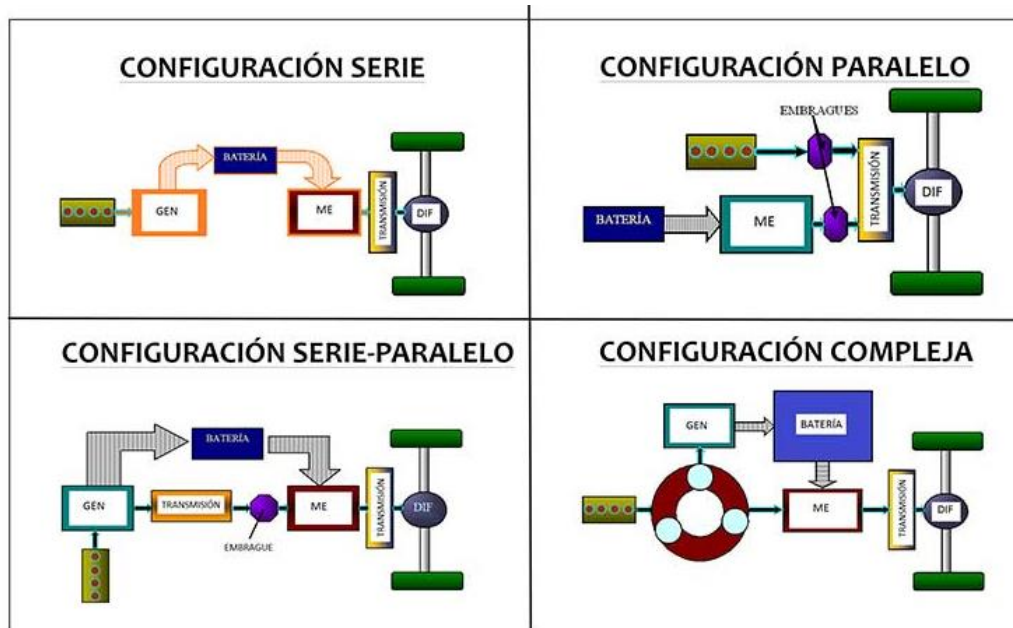


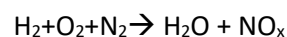
Figura 27 Posibles configuraciones de propulsión híbridos (López Martínez, 2018).

Aunque estos motores van a ser importantes en la lucha contra el cambio climático, aún siguen dependiendo de los combustibles fósiles. Por esto se están desarrollando modelos de vehículos que funcionen sólo con motores eléctricos, algunos de ellos ya están presentes en las calles. No obstante, las baterías todavía presentan problemas de costes ambientales de fabricación, funcionamiento y tratamiento de residuos de los vehículos eléctricos, la falta de infraestructura de recarga, el rendimiento limitado de las baterías, y la escasez de materiales para producir las baterías. Esto ha derivado en otras alternativas como utilizar motores de combustión alimentados con hidrógeno (Boretti, 2020).

2.5.2 Motor de combustión empleando hidrógeno

Este tipo de motores se plantean tanto en motores de encendido provocado (motores de bujía), como en motores de autoignición (Diesel).

En el caso de motores de encendido provocado se introduce el hidrógeno y el aire por separado y se aporta la energía necesaria para comenzar la reacción con una chispa. En el caso de los motores de autoignición se introduce la mezcla directamente en el motor y se comprime hasta que se auto enciende. En ambos casos la reacción que tiene lugar es la siguiente (Ghayad, 2021):



Se puede observar que aparecen los NO_x de la misma forma que en los motores de combustión de compuestos orgánicos debido a las altas temperaturas.

2.5.2.1 Inconvenientes que presentan

- Preignición

En el caso de los motores de bujía, la energía de ignición de las mezclas de hidrógeno y aire son aproximadamente un orden de magnitud más bajas que las de las mezclas de hidrocarburos y aire. Eso puede dar lugar a preignición antes de la descarga de la chispa, lo cual conlleva

adelantar el inicio de la combustión y producir una mayor tasa de liberación de calor químico que conduce a temperaturas más altas en la superficie del cilindro, lo que puede provocar un efecto descontrolado que provoca un fallo del motor (White et al., 2006). Para evitar este problema y la detonación de la mezcla, se trabaja con una mezcla pobre en combustible, lo cual baja la potencia del motor, pero supone menos emisiones de NO_x y consume menos combustible. Esto también conlleva a que la velocidad del frente de llama, la cual se acerca al motor ideal cuando la mezcla es rica en hidrógeno, baja significativamente y aumenta el tiempo de combustión.

- Límites de inflamabilidad

Los límites de inflamabilidad en el aire (vol%) son entre el 4 y el 75%. En masa es de 34:1 (aire/combustible) hasta 180:1, mientras que en la gasolina es 14,7:1-37,1:1 (Verhelst & Wallner, 2009).

- Densidad el hidrógeno

Una de las mayores desventajas del hidrógeno es su baja densidad, lo cual afecta a cuánta energía hay en el volumen de la cámara. La relación de volumen aire/hidrógeno es 2,4 lo que quiere decir que sólo el 30% de la cámara es hidrógeno y el 70% es aire (Ghayad, 2021). Mientras que en la gasolina 1-2% es combustible, por lo que para obtener la misma potencia hay que quemar más hidrógeno (Ghayad, 2021). Para solucionar esto se suele introducir el H₂ a mucha presión (White et al., 2006).

2.5.2.2 *Ventajas*

- En cuanto a los motores de autoignición, el pistón debe subir más para que auto combusione. Un radio de compresión mayor hace que se tenga mayor potencia y sea más eficiente (Ghayad, 2021).
- Presenta la gran ventaja de que la difusividad del hidrógeno es alta (White et al., 2006). Esto quiere decir que se diluye rápido y crea una mezcla uniforme. Es más fácil que la combustión sea completa y más eficiente.
- La distancia Quenching (distancia desde entre el final de la llama y la pared de la cámara de combustión es muy pequeña, lo que da la ventaja de que se va a quemar todo el combustible de la mezcla, pero también hace que los puntos de salida de la cámara corran más peligro (Ghayad, 2021).

Estos motores cuentan con la ventaja de poder seguir empleado la flota de vehículos que tenemos actualmente, y que cuando no hay disponibilidad de hidrógeno se puede emplear el combustible fósil (Ghayad, 2021). No obstante, una de las razones principales por las que la investigación se orienta a las pilas de combustible es por la mayor eficiencia del combustible. Las enormes mejoras en la electrónica de potencia, las máquinas eléctricas y el avance de las baterías de iones de litio en las últimas dos décadas han dado lugar a un tremendo comienzo para que los vehículos eléctricos compitan con los convencionales (Alamoudi et al., 2019). Durante la última década se han propuesto motores eléctricos alimentados por batería (BEV) y celdas de combustible (FCEV) y vehículos eléctricos híbridos FC-HEV. Estos últimos usan una

combinación de FC y batería/SC como ESS para alimentar el vehículo (Halbleib et al., 2012). A continuación, se va a hacer un resumen de cómo funcionan este tipo de vehículos híbridos.

2.6 Sistemas de propulsión FC-HEV.

Los motores híbridos que se plantean con celdas de combustibles FCHEV presenta mejores ventajas en comparación con un HEV tradicional o un vehículo con motor de combustión interna porque utiliza sólo un motor eléctrico, por lo que no solo satisface los problemas ambientales, sino que también es más eficiente (Fathabadi, 2019).

Como se comentó en el apartado 2.4, la celda de combustible presenta las ventajas de poseer una alta densidad energética, emisión reducida de gases de efecto invernadero, alta eficiencia, temperatura y presión de funcionamiento relativamente bajas, por lo que se considera un candidato para hacer funcionar vehículos de larga distancia. Sin embargo, usar solo una PEMFC en un motor hará que este tenga una vida útil corta del sistema debido a dos inconvenientes principales que presenta en la operación diaria del vehículo.

El primer inconveniente es que la FC no proporciona una respuesta adecuada a las variaciones repentinas en la demanda de carga del vehículo. Por ejemplo, la pila FC no puede responder de manera eficiente a la repentina necesidad de energía durante la aceleración/desaceleración y la considerable cantidad de energía eléctrica requerida para arrancar el vehículo (Fathabadi, 2019). Esto se debe a que los cambios frecuentes y rápidos en la demanda de carga pueden provocar la tensión de la membrana, debido a la oscilación de presión y a la necesidad de oxígeno, lo que supone una disminución en la vida de la PEMFC (Lü et al., 2018). El segundo inconveniente es que la FC no puede almacenar la energía regenerativa producida durante la desaceleración y el frenado, pues no son reversibles, por lo que se necesita un dispositivo de almacenamiento de energía adicional, como una batería recargable o un supercondensador (SC), los cuales pueden manejar picos de potencia, y recuperar energía durante las fases de frenado (Powers & Nicastri, 2000).

Por estos motivos los estudios se centran en proponer modelos híbridos de PEMFC con supercondensadores y/o baterías con el fin de mejorar su rendimiento y su vida útil (Lü, Qu, et al., 2018). Por otra parte, los vehículos de pila de combustible que funcionan con hidrógeno tienen la ventaja de un tiempo de repostaje y una autonomía comparables a los vehículos de combustibles fósiles (Thomas, 2009).

Sin embargo, el ciclo de vida limitado de la batería y el rango de conducción después de la carga de la batería se convierten en el principal obstáculo para la comercialización de PEMFC-HEV. Por otro lado, si se utiliza un supercondensador como fuente de energía auxiliar, la asignación de potencia entre los módulos PEMFC y SC es un problema básico para lograr un buen rendimiento. Los SC tiene las ventajas de poseer una alta capacidad de descarga de corriente, una alta eficiencia de conversión de energía y las pérdidas son bajas. Sin embargo, la densidad de energía no es alta y no se puede descargar durante mucho tiempo.

Al combinar las dos fuentes de energía en paralelo, se logran los beneficios de las dos como una fuente de energía completa. A continuación, se van a describir por separados los tres modelos híbridos.

2.6.1 Pila de combustible + batería

Estas configuraciones emplean generalmente una PEMFC como fuente de energía principal y la batería como sistema de energía auxiliar. Cuando la PEMFC no puede suministrar toda la energía, la batería proporciona el exceso de energía requerido. Cuando el suministro de energía PEMFC es mayor a la demanda, el exceso de energía se almacena en la batería (Lü, Qu, et al., 2018). La energía regenerativa se absorbe en la batería durante el proceso de frenado (Njoya Motapon et al., 2014).

Por ejemplo, el Toyota Mirai está equipado con una pila de celdas de combustible de 113 kW y un paquete de baterías de hidruro metálico de níquel de 1,6 kWh. Estas configuraciones están destinadas a permitir que la pila de celdas de combustible proporcione la mayor parte de la demanda de energía y use la batería simplemente como un dispositivo de amortiguación para la demanda de energía transitoria alta.

El tamaño de la celda de combustible está determinado por los requisitos de potencia de la carga (Lü, Miao, et al., 2018) y el tamaño de la batería está determinado por las fluctuaciones de energía. Si las fluctuaciones de energía del sistema son acusadas, se necesita una batería de mayor tamaño para ajustar el sistema de energía.

Uno de los principales inconvenientes de este modelo híbrido es que la conexión entre PEMFC y la batería de litio es compleja debido a su propio voltaje de celda, el voltaje de PEMFC y la batería de litio no coinciden completamente. Por lo tanto, las conexiones suelen pasar a través de convertidores de potencia, como un regulador de corriente o voltaje. Los sistemas comerciales suelen utilizar circuitos de carga de baterías. El sistema generalmente se ve afectado por la pérdida de potencia en los convertidores en cascada y la pérdida de energía durante los ciclos de carga y descarga de la batería (Lü, Qu, et al., 2018). Otro inconveniente notable es el ciclo de vida limitado de la batería, en el caso de la batería de litio es aproximadamente de 300 a 400 ciclos de carga y descarga.

2.6.2 Pila de combustible + supercondensador

De manera similar a los HEV con batería, en esta configuración, cuando la PEMFC no suministra suficiente energía, el supercondensador proporciona este exceso; y cuando el suministro de energía de PEMFC es superior al requerido, el exceso de energía se almacena en SC (Aouzellag et al., 2015).

En comparación con una batería de litio, los supercondensadores proporcionan una salida de energía más alta y una carga y descarga más rápidas. Los supercondensadores pueden proporcionar energía transitoria para satisfacer rápidamente la demanda de carga; sin embargo, proporcionan una capacidad de almacenamiento de energía relativamente baja (Yeetsorn et al., 2020). Además, el mecanismo de almacenamiento de energía de SC no requiere una reacción química y puede completar miles de ciclos de carga y descarga (Yu et al., 2011).

2.6.3 Pila de combustible + batería + supercondensador

Esta tecnología se encuentra actualmente en desarrollo. Esta hibridación está diseñada para proporcionar energía para la demanda de energía máxima en un período corto durante el arranque o la aceleración. La aceleración instantánea requiere alta energía y alta densidad de

potencia (Behdani & Naseh, 2017) . El ESS híbrido la batería + SC es más confiable que ambos por separado, ya que la batería tiene una densidad de energía alta y una densidad de potencia baja, mientras que el SC tiene una densidad de energía baja y una densidad de potencia alta, es decir, se complementan.

El principal problema de todos estos modelos híbridos es la estrategia de gestión de energía (EMS) y cómo usar métodos de control de manera efectiva (Lü, Qu, et al., 2018), pues su algoritmo de control afecta directamente el tamaño, costo y eficiencia de todo el sistema (Segura et al., 2011).

2.6.4 Estrategias de gestión de energía.

Los métodos de control del sistema de potencia híbrido se enfocan en mejorar las características dinámicas del sistema. El principio de control describe cómo realizar la transición rápida de la potencia de la pila de combustible y la potencia de la batería, y evitar grandes fluctuaciones en la potencia de salida de la pila de combustible (Lü, Miao, et al., 2018).

Fathabadi (2019) emplea un convertidor CC/CC unidireccional conectado a la pila PEMFC, un convertidor elevador-reductor CC/CC bidireccional conectado a la batería de iones de litio, un inversor de CC/CA PWM bidireccional trifásico conectado al motor de tracción que es un motor de inducción trifásico, en la práctica, un motor síncrono de imán permanente trifásico (PMSM), y una unidad de control de potencia. Se emplea un vehículo de 1880 kg y la fuente de energía híbrida propuesta alcanza una velocidad máxima y un rango de crucero de, respectivamente, 155 km/h y alrededor de 530 km. Obtuvieron una eficiencia energética del 96,1 % alrededor de la potencia nominal. La regulación de voltaje del enlace de CC de alta precisión y el suministro de una corriente trifásica adecuada mediante el uso de la técnica PWM, que se suministra al estator de la tracción motor.

La estrategia de administración de energía que presenta Y. Wang et al. (2019) incluye un modelo de degradación física del área de superficie electroquímicamente activa (ECSA) de la celda de combustible, así como un modelo para el deterioro de la capacidad de la batería. También tiene en cuenta la degradación del catalizador, que contribuye significativamente a la pérdida de rendimiento de la pila de combustible con el tiempo.

Lü, Miao, et al.(2018) diseñaron una gestión de energía para un robot autónomo basado en el control de extensión. Los robots autónomos funcionan en un entorno operativo especial, como el robot de soldadura o el robot EOD (robot de eliminación de explosivos), los cuales necesitan una velocidad de respuesta más rápida y una mayor estabilidad.

El método de control de extensión trata el problema de control desde la perspectiva de la transformación de la información, y el grado de correlación de la información de entrada actúa como salida de control, lo que hace que algunos de los parámetros del sistema de energía híbrido pasen de una región incontrolable a una región estable y controlable. La batería de iones de litio proporciona este requisito de energía adicional. El objetivo principal del diseño del controlador es regular el voltaje de la celda de combustible para rastrear el voltaje del bus de referencia y controlar la carga/descarga de la batería de iones de litio.

Zhang et al (2017) desarrolló una gestión de energía predictiva y propuso una red neuronal, que se desempeñó con un mejor rendimiento de eficiencia.

Hemi et al. (2014) presentó un controlador lógico difuso en tiempo real para determinar la potencia de salida de la celda de combustible y proteger la batería de la sobrecarga.

Kraa et al.(2015) utilizó un controlador de modo deslizante para controlar las corrientes de la celda de combustible y del supercondensador, lo que satisface los requisitos de carga con un rendimiento estable y robusto.

Xu et al. (2014) propuso una estrategia de control multimodo en tiempo real para un vehículo eléctrico de celda de combustible (FCEV), los experimentos demostraron que puede reducir la tasa de degradación de la celda de combustible.

(Geng et al., 2012) diseñó la estrategia de gestión energética de FCEV basada en el control de dos niveles y se dio cuenta del propósito de reducir el consumo de hidrógeno bajo la premisa de proteger la operación segura de la pila de celdas de combustible.

2.7 Estado del arte de los vehículos para personas con movilidad reducida.

El objeto de estudio para aplicar esta tecnología es una scooter eléctrica empleada por personas con movilidad reducida. Estos dispositivos funcionan comúnmente con baterías y tienen una autonomía limitada que depende de la duración de la batería. Esto desemboca en que permite recorrer distancias cortas entre cargas. Además, recargar las baterías lleva mucho tiempo. En este apartado se hace una revisión del estado del arte sobre la aplicación de sistemas híbridos FC- batería para el caso concreto de aplicación. De esta recopilación de información se extrae las condiciones como punto de partida para este TFM.

Un vehículo de este tipo requiere un tren motriz de unidades de almacenamiento de energía con dos características deseadas. Primero, la densidad de potencia debe ser lo más alta posible para que la silla de ruedas funcione bien con varios patrones de conducción acelerados y de crucero. En segundo lugar, la densidad de energía debe ser tan alto para la silla de ruedas tenga suficiente autonomía (Y. P. Yang et al., 2012).

La mayoría de las sillas de ruedas disponibles en el mercado todavía se limitan al uso de baterías de plomo-ácido de ciclo profundo que representan un factor restrictivo importante en el diseño, tanto por su peso como por su tamaño (Palacín & De Guibert, 2016), pues como se ha comentado anteriormente tiene una baja densidad de energía en comparación con las baterías de ion litio, por ejemplo. Sin embargo, puede manejar muy bien los picos de corriente y sigue siendo la tecnología más asequible (Bouquain et al., 2008).

Las fuentes de energía alternativas, como la energía solar y las celdas de combustible, han atraído recientemente un gran interés debido a características importantes como el bajo peso y la hibridación que permite un rápido tiempo de recarga. Existen una serie de experimentos en este campo, que se van a resumir a continuación, aunque ninguno de los sistemas propuestos ha logrado llegar al mercado y estar disponible para los usuarios. Esto se debe a la falta de madurez de las tecnologías propuestas y también a la falta de conocimientos básicos sobre los requisitos de potencia reales de las sillas de ruedas eléctricas (Morgado Ramirez et al., 2019). A continuación, se presenta un repaso de los estudios existentes.

(Bouquain et al., 2008) basa su experimento en una estructura que utiliza una pila de celdas de combustible que proporcionan una potencia máxima de unos 300 W y el voltaje oscila entre los 30 y los 58 V. Un convertidor reductor de CC/CC entre la pila y el enlace de CC permite

controlar la corriente de la pila de combustible. Dos baterías de plomo-ácido en serie imponen un voltaje de bus de CC de alrededor de 24 voltios dependiendo del estado de carga de la batería. Los convertidores de potencia para los motores de CC son completamente bidireccionales (voltaje y corriente) lo que permite el frenado regenerativo. El acondicionamiento y procesamiento de la señal y el control se realizan con un micro-autobox integrado en la silla de ruedas. Las baterías proporcionan los picos de energía y la celda de combustible está dimensionada para proporcionar la energía promedio.

En la siguiente figura se muestra un esquema del sistema que emplea.

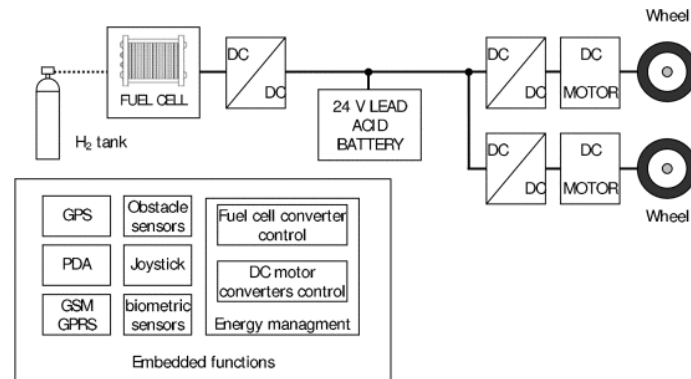


Figura 28 Esquema de PEMFC-batería PEMFC-batería (Bouquain et al., 2008).

En base a cálculos físicos obtienen que la potencia nominal total de la silla de ruedas simulada y medida es de unos 400 W. Cuando ocurren cambios repentinos en la potencia de la carga, la celda de combustible sigue funcionando en su punto de trabajo anterior y la batería proporciona la diferencia. La pila de combustible tardará en alcanzar la potencia deseada, hasta ese momento, la batería alimenta la carga (en el caso de un escalón de corriente positivo) o es cargada por la pila de combustible (en el caso de un escalón de corriente negativo).

Takahashi et al. (2008) propusieron una silla de ruedas alimentada por tres fuentes de energía: una batería, una celda solar fotovoltaica y una celda de combustible. En su artículo proponen un sistema de control de energía que es capaz de seleccionar la fuente de energía de manera óptima de acuerdo con las condiciones de funcionamiento. En sus resultados experimentales obtuvieron que la silla de ruedas robótica híbrida puede funcionar utilizando el sistema de control de energía propuesto.

F. C. Wang & Chiang (2012) en sus estudios utilizan otra forma de proporcionar un voltaje o corriente constante para cargar los conjuntos de baterías sin la necesidad de convertidores CC/CC. Esto lo hacen diseñando controladores multivariables robustos para controlar las tasas de flujo de hidrógeno y aire de la PEMFC. Esto supone una mejora tanto el costo del sistema como para su eficiencia.

Ellos plantean un tren motriz en serie, donde el PEMFC carga dos juegos de baterías LiFePO₄ con voltaje o corriente constante, y estos juegos de baterías luego impulsan directamente los motores de las sillas de ruedas (circuito en serie). Justifican este diseño basándose en que los motores de las sillas de ruedas funcionaban a 24 V con una potencia nominal de 100 a 180 W, que era mucho menor que la potencia del sistema PEMFC.

Para la selección de los equipos, parten de que la potencia nominal y la potencia máxima de la silla de ruedas son de 100–180 W y 300 W, respectivamente, por esto seleccionan una PEMFC de 500 W como fuente de alimentación principal del sistema. Cada juego de baterías constaba de veintiuna celdas (siete en serie y tres en paralelo) que proporcionaban 23,1 V y 6,9 A·h para el sistema.



Figura 29 Silla de ruedas alimentada por PEMFC-batería (F. C. Wang & Chiang, 2012).

En el circuito en serie se evitan posibles daños a la PEMFC debido a cambios abruptos en las cargas del motor. Se trata de un mecanismo más simple de los empleados en automóviles, ya que la batería es la única fuente que aporta energía al motor. La misión principal de la PEMFC es aumentar la autonomía de las baterías. Cuando la capacidad de un juego de baterías baja a un cierto nivel, otro juego de baterías proporcionaba energía a los motores y enciende el PEMFC para cargar el primer juego de baterías. El PEMFC se usó para cargar los conjuntos de baterías cuando su estado de carga (SOC) bajó a un cierto nivel (Ver Figura 30).

En sus experimentos, desarrollaron una política de carga en base a los siguientes tres aspectos: un alto voltaje de carga podría sobrecargar los conjuntos de baterías; una corriente de carga alta podría dañar el PEMFC y los juegos de baterías, y una capacidad de batería baja puede resultar en una corriente de carga alta.

En el caso de que las baterías 1 y 2 estuvieran completamente cargadas (Ver Figura 30), se enciende S2 y se deja que la batería 1 proporcionara electricidad al sistema. Cuando la capacidad de la batería 1 descendiera a un nivel establecido, se apaga S2 y se encienden S4 y S1 para que la batería 2 proporcione continuamente electricidad a los motores y el balance de planta (BOP) del PEMFC sirva para cargar la batería 1. S1 se apaga después de que la batería 1 esté completamente cargada. De igual forma, cuando la capacidad de la batería 2 cae a un nivel establecido, se apaga S4 y se encienden S2 y S3 para permitir que la batería 1 opere continuamente el sistema.

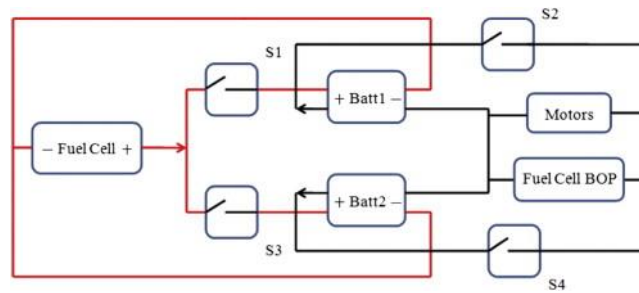


Figura 30 Sistema de energía (F. C. Wang & Chiang, 2012).

De sus experimentos obtuvieron una eficiencia de hidrógeno del 90,03 % y una eficiencia de carga del 86,50 %. Cada ciclo de carga consumía alrededor de 70 L de hidrógeno. Por lo tanto, el hidrógeno almacenado se puede utilizar hasta para siete cargas y puede hacer funcionar la silla de ruedas de forma continua con una carga media de 5 A durante unas 5 h. El contenedor de almacenamiento de hidrógeno pesaba 6,5 kg y podía almacenar unos 500 L de hidrógeno.

En un estudio posterior se hizo una comparativa con el circuito en paralelo (Ver Figura 31). La estrategia se basa en dos ideas principales:

1. Cuando el voltaje de la batería es inferior a 23 V, S1 se enciende para que el PEMFC proporcione una corriente constante de 6 A al sistema. Teniendo en cuenta que se configuró a 23 V para mantener un SOC de batería alto en la línea de alimentación, porque el tren de potencia en paralelo tiene solo un juego de baterías para proporcionar energía auxiliar. Cuando el consumo de energía es alto, tanto el PEMFC como la batería suministran energía al motor. Por otro lado, cuando el consumo de energía es bajo, el PEMFC cargará la batería y proporcionará energía al sistema.
2. Cuando el voltaje de la batería es superior a 23,5 V, es decir, la batería está completamente cargada, S1 se apaga para proteger la batería de una sobrecarga.

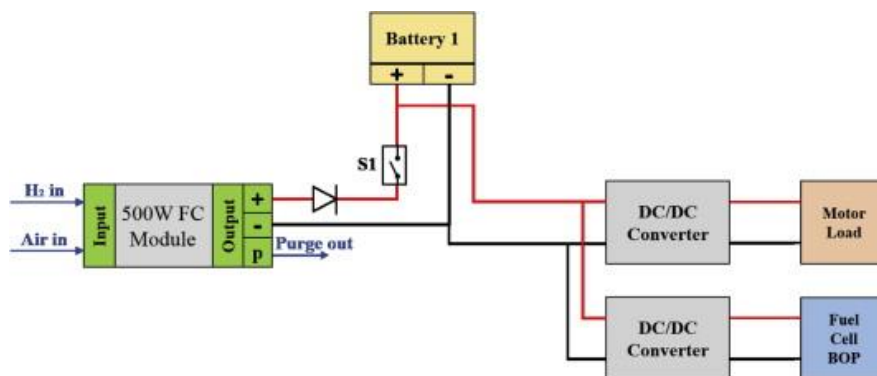


Figura 31 Esquema en serie (F. C. Wang & Chiang, 2012).

Obtuvieron que el tren de potencia en serie logra una mayor eficiencia y rendimiento, a costa de un juego de baterías más. Un sistema de propulsión en paralelo generalmente se compone de una pila de celdas de combustible de mayor potencia, una batería secundaria de menor capacidad y un convertidor CC/CC bidireccional.

Y. P. Yang et al. (2012) proponen un sistema de propulsión de celda de combustible híbrido en serie que consta de una celda de combustible de baja potencia, un convertidor CC/CC y dos paquetes de baterías secundarios.

La estrategia principal de este sistema de propulsión de celda de combustible híbrido propuesto es asignar responsabilidades independientes a la celda de combustible y los paquetes de baterías. La celda de combustible carga sólo uno de los paquetes de baterías, mientras que la otra batería se descarga. Por lo tanto, la celda de combustible es capaz de cargar la batería a un nivel de potencia estable y constante de manera que la resistencia interna de la batería varía de manera insignificante. Cuando una batería está descargando energía a la carga, la otra es cargada por la celda de combustible o inactiva. Y la batería se carga solo cuando su SOC es inferior a un valor específico. Esta propuesta va en la misma línea que observamos en los experimentos de F. C. Wang & Chiang (2012)

No obstante, en los estudios que se acaban de comentar no se profundiza en el ciclo de conducción, lo cual es fundamental para el correcto diseño del equipo Morgado Ramirez et al. (2019). Un estudio de estos ciclos sirve para estimar la potencia y demanda de energía en diferentes condiciones de conducción. Un ciclo de conducción consiste en expresar la variación de la velocidad a lo largo del tiempo, representando las diferentes condiciones de conducción que un vehículo puede encontrar en una región o ciudad específica. Primero se selecciona una ruta en base a estadísticas y luego se construye este ciclo.

Para este trabajo se he empleado como referencia el estudio de (Morgado Ramirez et al., 2019), en el cual describen una curva de potencia basada en “microviajes”. Cada microviaje consta de unas condiciones específicas. En su estudio se contemplaron 5 microviajes: a)Pendiente transversal 2,5%; b)Pendiente transversal 4%; c)Pendiente ascendente 6,1%; d)Pendiente ascendente de autobús 12%; e)Superficie plana.

La silla de ruedas eléctrica que emplearon pesa 180 kg y alcanza 10 km·h⁻¹ de velocidad máxima. Cuenta con dos baterías de plomo-ácido, las cuales se conectaron eléctricamente en serie y se clasificaron para dar 12 V, 60 Ah cada una, con un total de 1,44 kW de potencia de salida nominal.

El ciclo de conducción se calculó a partir de la velocidad calculada a partir de la distancia recorrida por la silla de ruedas. El consumo de energía se calcula a partir de la ley de Ohm. Entre cada microviaje, se supuso que la silla de ruedas se detenía por completo (Ver Figura 32). Para obtener el ciclo de potencia se lleva un control continuo del voltaje y la corriente extraídos de las baterías mientras el conductor mueve el vehículo por la ruta seleccionada.

En este estudio seleccionaron una PEMFC que suministra la potencia media con un 20% de sobredimensionamiento, 160 W, y la batería para alcanzar los picos de potencia máxima (552,4 W) con el 20% adicional 570 W. Al aumentar la potencia de la celda de combustible, se puede reducir el peso y el coste de las baterías, pero a costa de un rango de respaldo reducido si se agota el combustible de hidrógeno.

Las baterías de 12 V y 60 Ah pesan aproximadamente 40 kg, lo que representa el 20 % del peso total de la silla de ruedas.

En la siguiente figura se muestra la potencia que consume el sistema en cada tipo de microviaje:

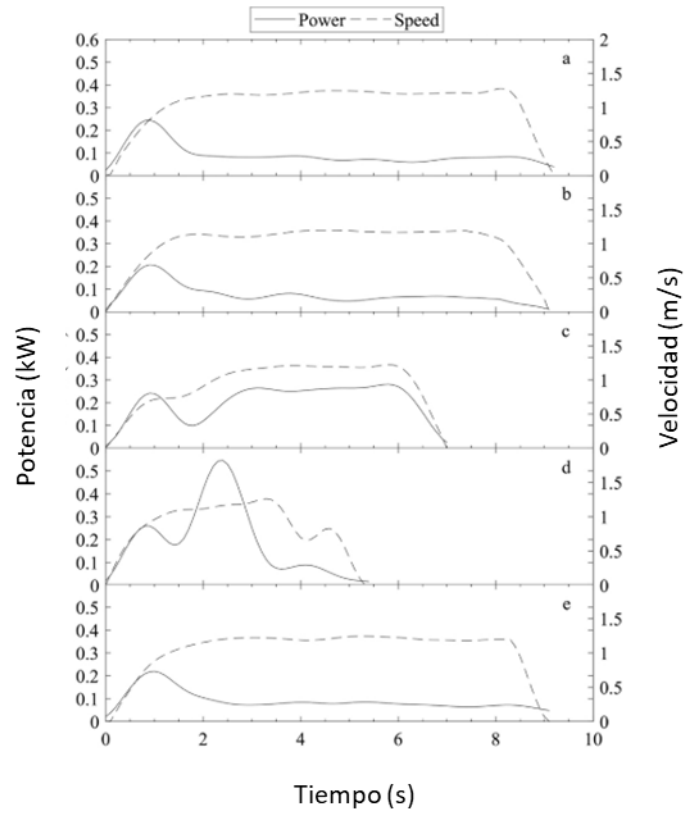


Figura 32 Curvas de velocidad y potencia (Morgado Ramirez et al., 2019)

Para incrementar mejor al eficiencia del sistema, en este TFM se ha estudiado emplear las baterías de iones de litio, que tienen un rendimiento superior a las de plomo-ácido, con una mayor densidad de potencia (1800 Wkg^{-1}), densidad de energía (100 Whkg^{-1}) y eficiencia (80%).

3 MODELO DESCRIPTIVO DE LOS ELEMENTOS DEL SISTEMA

3.1 Modelo descriptivo de la pila de combustible

Esta memoria comienza señalando que la termodinámica es la rama de la física que estudia las transformaciones energéticas de los sistemas. Este caso de estudio se centra en la transformación de la energía química en energía eléctrica en las pilas de combustibles, por tanto, es importante aplicar las leyes termodinámicas a este tipo de sistemas para predecir si la reacción planteada es espontánea, y, por tanto, se obtendrá electricidad; o no, y en ese caso habrá que aplicarle electricidad para provocar la reacción.

La termodinámica establece el límite teórico superior (caso ideal) de potencial que se puede generar en una reacción (O’Hayre et al., 2016a). La termodinámica marca el límite máximo que se puede alcanzar en el equilibrio, pero la cinética, al igual que en cualquier reacción química, marcará si se alcanzará ese máximo en un periodo de tiempo razonable. En este capítulo se expone el modelo empleado para describir el comportamiento de la pila de combustible que posteriormente se emplea para el prediseño del sistema.

3.1.1 Termodinámica del sistema

En este apartado se expone un breve desarrollo de las ecuaciones matemáticas principales de la termodinámica de reacciones electroquímicas. En el Anexo B se presentan expresiones básicas de la termodinámica, que tienen como objetivo hacer apoyo a los desarrollos teóricos de este capítulo. Los conceptos que aquí se explican son esenciales para la comprensión del fenómeno que tiene lugar en un sistema de este tipo y se pueden encontrar en libros de termodinámica básica como *Introducción a la termodinámica en Ingeniería Química* (Smith et al., 2007).

En la ((Ec. 1) se puede ver la forma general de la primera ley de la termodinámica o ley de conservación de la energía. En este tipo de sistemas la energía cinética y energía potencial no son significativas, por lo que se consideran despreciables en la ecuación. No hay trabajo mecánico y por tanto el único trabajo contemplado es el trabajo eléctrico que puede realizar la celda. Por tanto, la ecuación queda de la siguiente manera:

$$\Delta U = Q + W_{Eléc} \quad (Ec. 2)$$

Aplicando la segunda ley de la termodinámica (Ver la expresión B.2 del Anexo B), y considerando que la celda trabaja de forma reversible e isotérmica

$$Q = T\Delta S \quad \rightarrow \quad \Delta U = T\cdot\Delta S + W_{Eléc} \quad (Ec. 3)$$

Por otro lado, la energía interna se relaciona con otra propiedad termodinámica: la entalpía, según la expresión (B.13) del Anexo B. En este caso las variaciones de volumen y presión son nulas, y como consecuencia ambas propiedades toman el mismo valor y entonces la expresión anterior queda:

$$W_{Eléc} = \Delta H - T\cdot\Delta S = \Delta G \quad (Ec. 4)$$

Despejando Q, se obtiene el calor emitido a los alrededores para que el proceso sea isotérmico:

$$Q = \Delta H - \Delta G \quad (\text{Ec. 5})$$

Como se ha visto, en las celdas de hidrógeno, por cada mol de H₂ que se consume se transfieren dos electrones. Por tanto, la carga eléctrica (q) transferida entre los electrodos por mol de H₂ es:

$$q = 2 \cdot N_A(-e^-) = 2F \text{ Coulomb} \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde (-e⁻) es la carga de un electrón y N_A es el número de Avogadro (número de elementos por mol). Al producto N_A · e⁻ se le denomina constante de Faraday (F) y tiene un valor de 96,485 C·mol⁻¹. Por tanto, la carga que se transfiere es 2F.

El trabajo eléctrico es el producto de la carga transferida y el potencial o voltaje de la celda E, que es la energía por unidad de carga que proporciona la pila. El potencial se define como el trabajo que hay que hacer para mover una carga de un punto a otro en un campo eléctrico. Como se ha visto en la introducción, el valor de este voltaje depende la química del sistema.

$$W_{\text{Eléc}} = \Delta G = q \cdot E = -2 \cdot F \cdot E \text{ Julios} \quad (\text{Ec. 7})$$

Por tanto, el potencial de la celda reversible es:

$$E = \frac{-W_{\text{Eléc}}}{2 \cdot F} = \frac{-\Delta G}{2 \cdot F} \quad (\text{Ec. 8})$$

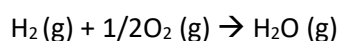
3.1.2 Potencial energético de una PEMFC

El objetivo de estos dispositivos es extraer la mayor cantidad de energía contenida en el hidrógeno para transformarla en electricidad. En primer lugar, se calcula la energía máxima que se puede extraer del sistema. Esto se obtiene a partir de las entalpías de formación (ΔH_f^0) en condiciones estándar (p = 1 bar y T = 298,15K) de las especies químicas involucradas. En la siguiente tabla se muestran las entalpías estándar de formación de las especies involucradas, que para los compuestos puros es cero, y las entropías, también en condiciones estándar.

Tabla 3 Entalpías estándar de formación y entropía (Smith et al., 2007).

Compuesto	ΔH_f^0 (kJ/mol)	ΔS^0 (J/K·mol)
H ₂ (g)	0	130,68
O ₂ (g)	0	205
H ₂ O (l)	-285,83	69,95
H ₂ O (g)	-241,83	

$$\Delta H_f^0 = \sum_{\text{productos}} \Delta H_p^0 - \sum_{\text{reactivos}} \Delta H_r^0 = \Delta H_{H_2O}^0 - \Delta H_{H_2}^0 - \frac{1}{2} \Delta H_{O_2}^0$$



$$\Delta H_f^0 = -285,83 \text{ kJ/mol (HHV)}$$



Como se observa, se trata de una reacción exotérmica. La diferencia entre el HHV (poder calorífico superior de hidrógeno) y el LHV (poder calorífico inferior) es la entalpía de vaporización del agua. Las pilas de hidrógeno suelen trabajar a menos de 100°C, por lo que el agua obtenida se encuentra principalmente en forma líquida.

Parte la energía liberada se pierde en forma de calor irreversiblemente:

$$\Delta S^0 = \sum_{\text{productos}} \Delta S_p^0 - \sum_{\text{reactivos}} \Delta S_r^0 = \Delta S_{\text{H}_2\text{O}}^0 - \Delta S_{\text{H}_2}^0 - 1/2\Delta S_{\text{O}_2}^0 = -163,22 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$$

Se sustituyen los valores obtenidos en la (Ec. 4):

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S = -237,16 \text{ kJ/mol}$$

$$W_{\text{eléc}} = -237,16 \text{ kJ/mol}$$

La energía libre de Gibbs negativa indica que la reacción es espontánea, así que es energéticamente favorable. Por otro lado, se obtiene que 237kJ/mol de los 285,83kJ/mol disponibles se pueden aprovechar para obtener trabajo eléctrico de la celda electroquímica, lo que representa en torno al 82,87%.

3.1.2.1 Potencial de la celda

El potencial de celda se puede calcular de acuerdo con el desarrollo termodinámico mostrado anteriormente. Sustituyendo en la (Ec. 8) se obtiene que, en condiciones estándar de p, T el voltaje o potencial de celda es:

$$E^0 = \frac{-\Delta G^0}{2 \cdot F} = \frac{-237160 \text{ J/mol}}{2 \cdot 96485 \text{ C/mol}} = 1,23 \text{ V}$$

También se puede obtener el potencial de la celda a partir de los potenciales de las semirreacciones de reducción de la table del Anexo A. E^0 , es la diferencia de potencial que le corresponde a una celda o semipila construida con un electrodo de ese elemento y un electrodo estándar de hidrógeno, cuando la concentración efectiva o actividad de los iones que intervienen en el proceso es 1 mol/L, la presión de las sustancias gaseosas es 1 atmósfera, y la temperatura es 298 K. Estos valores se han obtenido experimentalmente a lo largo de los años por diversos científicos. En la Tabla 4 se muestran las dos reacciones de reducción en cuestión y sus potenciales de reducción.

Tabla 4 Potenciales de reducción de las semirreacciones de los electrodos (Ver Anexo A).

Semirreacción de reducción	$\Delta E_{\text{reducción}}^0$ (V)
$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$	0,00
$1/2\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	1,229

La semirreacción con un mayor potencial de reducción será la que tenga lugar en este sentido y constituirá el cátodo, y la otra tendrá lugar en sentido contrario, es decir en su forma de

oxidación y constituirá el ánodo de la celda. El potencial de electrodo en condiciones estándar para la celda de hidrógeno es:

$$E^{\circ} = E_{red}^{\circ} - E_{ox}^{\circ} = 1,229 - 0,000 = 1,229V$$

A partir de los datos termodinámicos, se ha obtenido que, en condiciones estándar de p,T el potencial de electrodo disponible es 1,23V. Sin embargo, como hemos visto en la Introducción, estas celdas normalmente trabajan a temperaturas en el rango (30-80°C) y en presiones superiores a un bar. Además, sobre la superficie del electrodo tienen lugar gradientes de concentración debido a los fenómenos de transporte de materia y al consumo de los reactivos. Como se ha visto, estas variables están relacionadas con el trabajo realizado por la pila. A continuación, se muestra cómo afectan estas variables sobre el potencial de la celda.

3.1.3 Efecto de la temperatura, presión y la concentración en el potencial de celda

En la expresión (B.11) del Anexo B se relaciona la variación de la energía libre de Gibbs con la temperatura y la presión. A partir de esta relación se obtiene la relación del voltaje con estas variables.

$$dG = -SdT + Vdp ; \quad dG = \left(\frac{\partial G}{\partial T} \right)_p dT + \left(\frac{\partial G}{\partial p} \right)_T dp \quad (\text{Ec. 9})$$

- Efecto de la temperatura

La derivada parcial de la energía libre de Gibbs a presión constante con respecto a la temperatura:

$$\left(\frac{\partial G}{\partial T} \right)_p = -S \quad (\text{Ec. 10})$$

Los potenciales termodinámicos se expresan en minúsculas para indicar que se encuentran expresadas por mol, ya que todo se está expresando por mol de H₂ consumido. Sustituyendo la (Ec. 7) en la (Ec. 10).

$$\left(\frac{\partial \Delta g}{\partial T} \right)_p = \left(\frac{\partial (-2F \cdot E)}{\partial T} \right)_p = -\Delta s \quad \rightarrow \quad \left(\frac{\partial (E)}{\partial T} \right)_p = \frac{\Delta s}{2F} \quad (\text{Ec. 11})$$

Realizando la integral entre un estado cualquiera T, y la temperatura estándar T⁰:

$$E = E^{\circ} + \frac{\Delta s^{\circ}}{2F} (T - T^{\circ}) \quad (\text{Ec. 12})$$

Para la mayoría de las celda de combustible Δs es negativo, por lo tanto, los voltajes de las celdas de combustible reversibles suelen disminuir cuando aumenta la temperatura (O’Hayre et al., 2016a).

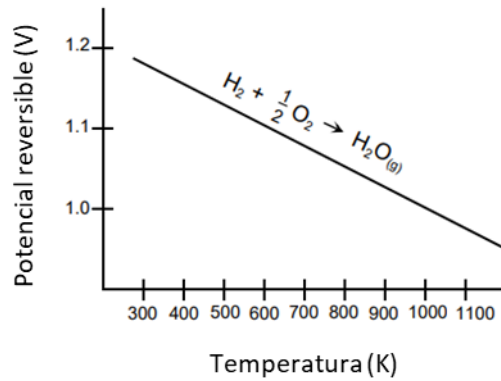


Figura 33 Variación del potencial de celda H_2/O_2 con la temperatura (SEG & G Services, Ralph M. Parsons Company, 2000)

- Efecto de la presión

De la (Ec. 9), se obtiene también que, a temperatura constante, derivada parcial de la energía libre de Gibbs con respecto a la presión está relacionada con la variación volumétrica de la reacción.

$$\left(\frac{\partial(\Delta g)}{\partial p}\right)_T = \left(\frac{\partial(-2FE)}{\partial p}\right)_T = \Delta v \quad \rightarrow \quad \left(\frac{\partial E}{\partial p}\right)_T = \frac{-\Delta v}{2F} \quad (\text{Ec. 13})$$

Asumiendo que se cumple la ley de los gases ideales, se sustituye la variación de volumen:

$$\left(\frac{\partial E}{\partial p}\right)_T = \frac{-\Delta n RT}{2Fp} = \frac{-(n_p - n_r)RT}{2Fp} \quad (\text{Ec. 14})$$

Donde n_p son los moles de productos de reacción y n_r los moles que reaccionan.

Si la variación de moles es negativa (se generan menos moles de gas de los que se han consumido), el potencial de celda aumenta al aumentar la presión del sistema. Esto es un ejemplo de la aplicación del principio de Le Chatelier (O'Hayre et al., 2016a): al aumentar la presión del sistema, la reacción favorecida es aquella en la que se alivia el sistema.

- Efecto de la concentración

Para estudiar el efecto de esta variable se hace uso de la ecuación de Nernst:

$$E = E^0 - \frac{RT}{2F} \ln \frac{\prod a_{\text{productos}}^{v_i}}{\prod a_{\text{reactivos}}^{v_i}} = E^0 - \frac{RT}{2F} \ln \frac{a_{H_2O}}{a_{H_2} \cdot a_{O_2}^{1/2}} \quad (\text{Ec. 15})$$

El agua que se produce es en estado líquido y su actividad es 1. Para el resto de los gases, considerados como gases ideales, se puede sustituir su actividad por la presión a la que se encuentra cada uno $a = P_i/P_t$.

$$E = E^0 - \frac{RT}{nF} \ln \frac{1}{P_{H_2} \cdot P_{O_2}^{1/2}} \quad (\text{Ec. 16})$$

- Potencial de celda termodinámico como función de T,p, c

Finalmente, se obtiene un potencial de celda como una función de las tres variables. No obstante, el efecto de la presión se considera despreciable y se obtiene el potencial como una función de la temperatura y la concentración de los reactivos, que al ser gases se expresan en forma de presiones parciales.

$$E = E^0 + \frac{\Delta S_0}{2F} (T - T_0) + \frac{RT}{2F} \ln(p_{H_2} \cdot p_{O_2}^{1/2}) \quad (\text{Ec. 17})$$

$$E = 1,229 - 8,46 \cdot 10^{-4} (T - T_0) + 4,31 \cdot 10^{-5} T \ln(p_{H_2} \cdot p_{O_2}^{1/2}) \quad (\text{Ec. 18})$$

En el siguiente capítulo se presentan las condiciones de operación consideradas para este estudio y se muestra el resultado obtenido para estas condiciones.

3.1.4 Cinética electroquímica

En el apartado anterior se ha obtenido el rendimiento máximo de una celda de combustible que opera en base a la reacción $H_2 + O_2 \rightarrow H_2O$. No obstante, en la realidad, este potencial varía con la intensidad de corriente (Ver Figura 34). Esta representación se conoce como curva de polarización. En estas curvas se representa el funcionamiento real de una celda de combustible y en ellas se puede apreciar que el potencial de la celda cae a causa de diferentes fenómenos físicos irreversibles que tienen lugar, conocidos como sobrepotencial o polarización. En la Figura 34 se representa el rendimiento de una pila de combustible de un estándar de 100 cm² conformado por un Ensamblaje de electrodos de membrana (MEA) de 7 capas fabricado por *3M Corporation* operando con hidrógeno a 70°C.

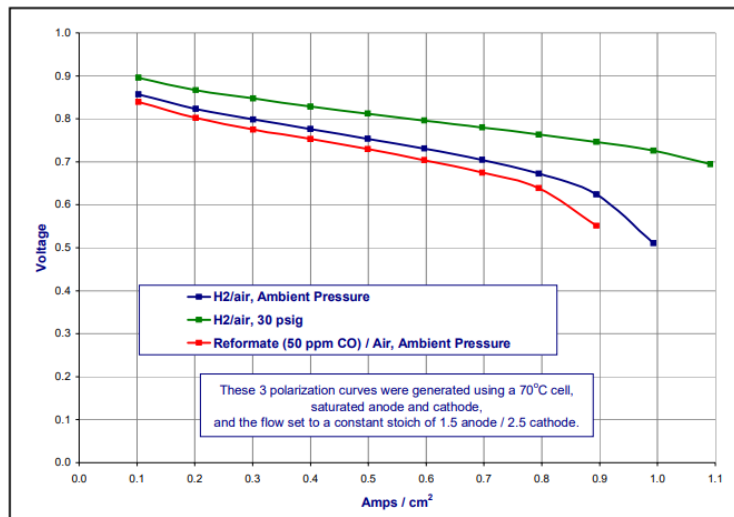


Figura 34 Curvas de polarización en PEMFC (SEG & G Services, Ralph M. Parsons Company, 2000)

Existen tres tipos de polarizaciones que afectan directamente sobre el voltaje de celda proporcionado por una celda de combustible, donde cada fenómeno está relacionado con distintas etapas del proceso global de conversión electroquímica y se deben al transporte de masa, a la cinética del sistema y a la resistencia óhmica. El conjunto de estos fenómenos determina el voltaje de salida de la celda, definido por:

$$U_{celda} = E - \eta_{ACT} - \eta_{OHM} - \eta_{CONC} \quad (\text{Ec. 19})$$

Para obtener un modelo que defina estos fenómenos y permita predecir la fenomenología que tiene lugar en una celda se ha seguido el modelo empleado por Larminie et al.(2003). Donde define estos elementos de la siguiente manera:

- E es el potencial de celda de equilibrio termodinámico se obtiene mediante la expresión obtenida en el apartado anterior.
- η_{ACT} son las sobretensiones de activación definidas mediante la ecuación de Tafel.
- η_{OHM} corresponde a las resistencias internas y se definen mediante la ecuación de Nernst-Planck, lo que conduce a una definición de sobretensión óhmica mediante la ecuación de la ley de Ohm. Son las que se comportan realmente como una resistencia.
- η_{CONC} hace referencia a las propiedades de transporte de masa.

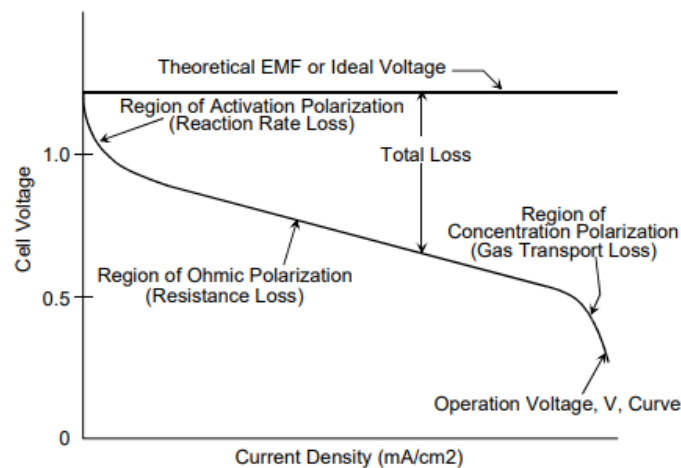


Figura 35 Origen de los sobrepotenciales (SEG & G Services, Ralph M. Parsons Company, 2000).

Los datos de polarización de concentración y activación generalmente sólo son válidos para esa celda particular y geometría de operación.

Es muy difícil obtener un modelo teórico que defina la fenomenología de este sistema. Además, no se han considerado ciertas propiedades que probablemente afecten al funcionamiento de las pilas de combustible, como los gradientes térmicos (Amphlett et al., 1995). Existen muchos modelos mecánicos en la literatura, pero generalmente requieren el conocimiento de parámetros que no están fácilmente disponibles, como los coeficientes de transferencia, el nivel de humedad, la membrana, el electrodo y el espesor de la capa de catalizador activo. Los modelos empíricos, por otro lado, generalmente son precisos en un rango operativo pequeño. Por eso para el este estudio se ha empleado el modelo descrito en (Amphlett et al., 1995), que combina modelos teóricos y empíricos. Estos modelos se describen a continuación.

3.1.4.1 Polarización de activación

Estas pérdidas derivan de la energía de activación de las reacciones electroquímicas en los electrodos y dependen de las reacciones en cuestión, material y microestructura del electrocatalizador, actividades de reactivos, y débilmente de la densidad de corriente.

La velocidad de una reacción electroquímica es la resultante de diversas etapas consecutivas cuya velocidad global viene determinada por la etapa más lenta. Generalmente intervienen procesos de difusión y migración, transferencia de carga, así como adsorción y desorción sobre la superficie del electrodo.

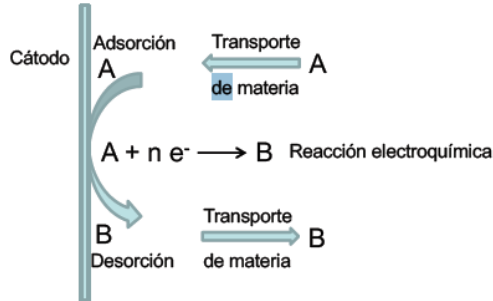


Figura 36 Etapas de una reacción electroquímica catódica.

La intensidad de corriente es el flujo de electrones que circulan por el circuito eléctrico por unidad de tiempo.

$$I = \frac{dQ}{dt} \quad (\text{Ec. 20})$$

La velocidad de un proceso electroquímico es directamente proporcional a la intensidad de la corriente. La relación entre la cantidad de producto oxidado o reducido o transportado y la intensidad de la corriente viene dada por la ley de Faraday:

$$I = nF \frac{dN}{dt} = nFv \quad (\text{Ec. 21})$$

Donde v es la velocidad de la reacción electroquímica (mol/s). No obstante, por conveniencia, se emplea la densidad de corriente. Es un parámetro más importante dado que las reacciones electroquímicas sólo ocurren en la superficie

$$i = \frac{I}{A} \text{ en } A/cm^2 \quad (\text{Ec. 22})$$

La densidad de corriente está relacionada con el potencial de electrodo a partir de la ecuación cinética del proceso.

Las polarizaciones relacionadas con este fenómeno predominan a bajas intensidades de corriente, apareciendo pérdidas de tensión asociadas a la cinética electroquímica de las semirreacciones de oxidación y reducción. La sobretensión total de activación es la suma de la debida a la reacción catódica y anódica:

$$\eta_{act, total} = \eta_{oxi} + \eta_{red} \quad (\text{Ec. 23})$$

En la siguiente figura se muestra la sobretensión catódica y anódica, como se puede observar la cinética de la oxidación del hidrógeno sobre el platino es mucho más rápida que la reacción reducción.

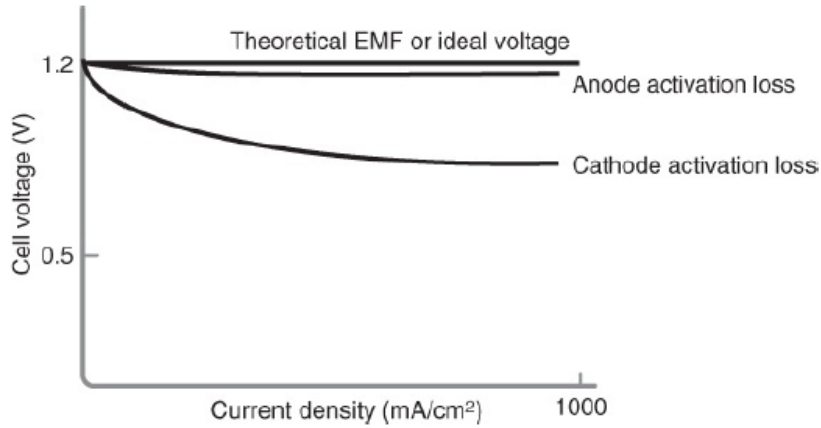


Figura 37 Polarización de activación catódica y anódica (O’Hayre et al., 2016b).

Cuando los efectos de la transferencia de masa son despreciables, la reacción cinética se puede describir mediante la ecuación de Butler-Volmer:

$$i = i_0 \left(e^{\frac{\alpha \cdot n \cdot F \cdot \eta}{R \cdot T}} - e^{-\frac{(1-\alpha) \cdot n \cdot F \cdot \eta}{R \cdot T}} \right) \quad (\text{Ec. 24})$$

Donde i_0 es la densidad de corriente de intercambio y se considera el verdadero coeficiente cinético en las reacciones electroquímicas. Se define en el equilibrio termodinámico, cuando no hay flujo neto de electrones, pero sí que hay intercambio, pues el intercambio en un sentido es igual que en el contrario. Hay sistemas que ese intercambio lo llevan a mayor velocidad y otros a menos. Esta velocidad se puede definir de la siguiente manera:

$$i_0 = nFAk_0 \left[\exp\left(\frac{-\Delta E_A}{RT}\right) (C_A^*)^{\alpha(1-\alpha)} \cdot (C_B^*)^{b(\alpha)} \right] \quad (\text{Ec. 25})$$

Donde n es el número de electrones involucrados por mol electrolizado en la etapa, a y b son los órdenes de reacción, A es el área superficial dónde tiene lugar la reacción, k_0 es la constante de reacción intrínseca y ΔE_A es la energía de activación de reacción. Para altos valores de sobrepotencial, se puede despreciar el segundo término de la (Ec. 24), despejando el sobrepotencial:

$$\eta_{act} = \frac{R \cdot T}{\alpha \cdot n \cdot F} \log \frac{i}{i_0} \quad (\text{Ec. 26})$$

Esta ecuación se conoce como ecuación de Tafel. Normalmente se muestra en su forma de logaritmo neperiano en vez de en base 10.

$$\eta_{act} = A \ln \frac{i}{i_0} \quad (\text{Ec. 27})$$

La constante A es mayor cuanto más lenta es la reacción electroquímica. Por otro lado, i_0 es mayor cuanto más rápida es la reacción. Esta expresión sólo se cumple cuando $i > i_0$ (Larminie et al., 2003).

α es el coeficiente de transferencia de carga y hace referencia a la proporción de la energía eléctrica aplicada que se aprovecha para cambiar la velocidad de una reacción electroquímica (Larminie et al., 2003). Su valor depende de la reacción electroquímica y del material del electrodo. Su valor debe estar entre 0 y 1. Para el electrodo de hidrógeno, su valor es alrededor de 0,5 para una gran variedad de materiales de electrodos. En el electrodo de oxígeno α está entre 0,1 y 0,5 en la mayoría de las circunstancias.

El factor clave para que la sobretensión de activación sea lo más baja posible es i_0 , que puede variar en varios órdenes de magnitud. Sustituyendo la (Ec. 37) en la (Ec. 23):

$$\eta_{act} = A_c \ln \frac{i}{i_{0,c}} + A_a \ln \frac{i}{i_{0,a}} \quad (\text{Ec. 28})$$

Experimentalmente se observa que la i_0 en el electrodo de oxígeno (cátodo) es mucho más pequeño que en el ánodo de hidrógeno, en ocasiones 105 veces más pequeño (Larminie et al., 2003). Normalmente se considera que la sobretensión en el ánodo es insignificante en comparación con la del cátodo, al menos en el caso de las pilas de combustible de hidrógeno. Para una celda de combustible de baja temperatura alimentada con hidrógeno que funciona con aire a presión ambiente, un valor típico para i_0 es de aproximadamente $0,1 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ en el cátodo y unos $200 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ en el ánodo. Como resultado, las sobretensiones de activación anódicas se mantienen bajas incluso con corrientes elevadas.

El electrolito de una pila de combustible se elige por su capacidad de conducción de iones, pero aun así siempre se transportarán pequeñas cantidades de electrones. Además, también una pequeña parte de combustible se difundirá desde el ánodo a través del electrolito al cátodo. Aquí, debido al catalizador, reaccionará directamente con el oxígeno, sin producir corriente desde la celda. Esta cantidad de combustible desperdiciado que migra a través del electrolito se conoce como cruce de combustible (Larminie et al., 2003).

Ambos efectos (cruce de combustible y corrientes internas) son equivalentes. El cruce de una molécula de hidrógeno del ánodo al cátodo donde reacciona, desperdiciando dos electrones, equivale exactamente a dos electrones que cruzan del ánodo al cátodo internamente, en lugar de como una corriente externa. Además, si la mayor pérdida en la celda es la transferencia de electrones en la interfaz del cátodo, que es el caso del hidrógeno celdas de combustible, entonces el efecto de ambos fenómenos sobre el voltaje de la celda también es el mismo. Por tanto, el cruce de combustible se puede asemejar "equivalente a" una corriente interna (Larminie et al., 2003).

Una forma de medir esto es midiendo el consumo de gases reactivos a circuito abierto (desconectado de su circuito eléctrico).

Despreciando las pérdidas de activación en el ánodo (Larminie et al., 2003) la (Ec. 28) queda:

$$\eta_{act} = A \log \left(\frac{i + i_n}{i_0} \right) \quad (\text{Ec. 29})$$

Para calcular estas pérdidas se toman como referencia los siguientes valores típicos:

$$A=0,06 \text{ V}; i_0=0,04 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}; i_n=3 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$$

3.1.4.2 Polarización óhmica

Cuando incrementa la intensidad de corriente, comienzan a predominar las pérdidas resistivas de tensión debido al transporte protónico por el electrolito que es la membrana polimérica, (resistencia iónica); y al transporte de los electrones por los conductores, que son el colector de grafito y los electrodos (resistencia electrónica). La pérdida de voltaje se calcula utilizando la ley de Ohm. Las pérdidas óhmicas son proporcionales a la densidad de corriente, dependen de los materiales selección y geometría de la pila, y sobre todo de la temperatura (SEG & G Services, Ralph M. Parsons Company, 2000).

$$\eta_{ohmic}^{total} = \eta_{ohmic}^{electronic} + \eta_{ohmic}^{protones} = -I \cdot R^{internal} \quad (\text{Ec. 30})$$

R es la Resistencia total de la celda de combustible.

Dependiendo del tipo de celda, domina una resistencia u otra (SEG & G Services, Ralph M. Parsons Company, 2000). Se considera que la resistencia eléctrica es despreciable comparada con la resistencia de la membrana de intercambio protónico, por lo que la expresión anterior queda de la siguiente forma:

$$\eta_{ohmic}^{total} = \eta_{ohmic}^{protones} = I \cdot R^{ion} \quad (\text{Ec. 31})$$

La transferencia del protón a través de la membrana no se puede considerar constante. El flujo de protones a través de la membrana perpendicular a las caras del electrodo se puede describir con la ecuación de Nernst-Planck. No obstante, la resistencia de los iones a moverse a través de la membrana polimérica depende de otras variables como el grosor de la membrana (t) y la condición de humectación de la membrana (γ). Por este motivo se emplea el siguiente modelo experimental:

$$\eta_{ohmic} = \frac{I \cdot t_{PEM}}{A_{PEM}} \cdot \frac{8}{\exp \left[3,6 \cdot \left(\frac{T - 353}{T} \right) \right]} \left[1 + 1,64 \left(\frac{I}{A} \right) + \gamma \left(\frac{I}{A} \right)^3 \right] \quad (\text{Ec. 32})$$

3.1.4.3 Polarización por concentración

Estos sobrepotenciales predominan a elevadas intensidades de corriente, cuando se alcanza la limitación por transferencia de materia de los reactivos y en el medio de electrolito. Son el resultado de las limitaciones de transporte de los reactivos y dependen en gran medida de la densidad de corriente, la actividad de los reactivos y la estructura del electrodo.

La sobretensión debido al transporte de masa o por variaciones de concentraciones surge principalmente en los casos en los que el hidrógeno se suministra desde un reformador, ya que es posible que ante un aumento de la demanda no se suministre rápido los reactivos.

Otro caso en el que estas sobretensiones son importantes es si se alimenta aire al cátodo y este no está recirculado, pues el nitrógeno que no ha reaccionado puede causar un problema de transporte de masa a altas corrientes. Es por esto por lo que se alimenta más oxígeno del estequiométrico, al menos 2 veces el estequiométrico. Por otro lado, en la PEMFC el agua formada en la reacción puede ser una causa de transporte de masa o sobretensión de concentración (Larminie et al., 2003).

En una FC con reactivos gaseosos y productos, los procesos de difusión de gas controlan la transferencia de masa. En otras celdas, el flujo multifásico en los electrodos porosos puede tener un impacto significativo (por ejemplo, en PEMFC). La evacuación del producto suele ser más limitante que el suministro de combustible, dada la diferencia entre las difusividades del hidrógeno y del agua.

Para las celdas de combustible de fase gaseosa, la tasa de transporte de masa a la superficie de un electrodo en muchos casos puede ser descrito por la primera ley de difusión de Fick:

$$i = \frac{nFD(C_B - C_S)}{\delta} \quad (\text{Ec. 33})$$

Donde C_B es la concentración en el bulk, C_S es la concentración en la superficie y δ es el espesor de la capa de difusión. La densidad de corriente límite corriente límite (i_L) es una medida de la velocidad máxima a la que se puede suministrar un reactivo a un electrodo, y se produce cuando $C_S = 0$, es decir, todo lo que llega se consume

$$i_L = \frac{nFD(C_B)}{\delta} \quad (\text{Ec. 34})$$

Juntando (Ec. 33) y (Ec. 34) se obtiene la siguiente relación:

$$\frac{C_S}{C_B} = 1 - \frac{i}{i_L} \quad (\text{Ec. 35})$$

La ecuación de Nernst para las especies reactivas en condiciones de equilibrio, o cuando no hay corriente fluyendo, es la que se mostró anteriormente en la (Ec. 15). Sin embargo, en la pila, cuando tiene lugar la reacción, la concentración superficial se vuelve menor que la concentración total, y entonces la ecuación de Nernst queda de la siguiente manera sustituyendo la (Ec. 35):

$$\eta_{conc} = E_{Nerst}^0 - E_{Nerst}^* = \left[E^0 - \frac{RT}{nF} \ln \frac{1}{C_R^0} \right] - \left[E^0 - \frac{RT}{nF} \ln \frac{1}{C_R^*} \right] = \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{i_L}{i_L - i} \right) \quad (\text{Ec. 36})$$

En el funcionamiento de la pila de combustible se intenta evitar llegar a esta zona de la curva, ya que como se ve en la Figura 35 supone una caída significativa del voltaje, y por tanto pérdida de eficiencia del dispositivo. En la siguiente figura se muestra el modelo propuesto para una pila de combustible sin tener en cuenta este rango de operatividad de la pila de

combustible de hidrógeno. Para la simulación del modelo se ha empleado los parámetros de una pila de combustible similar a la que se ha seleccionado en este Trabajo Final de Máster.

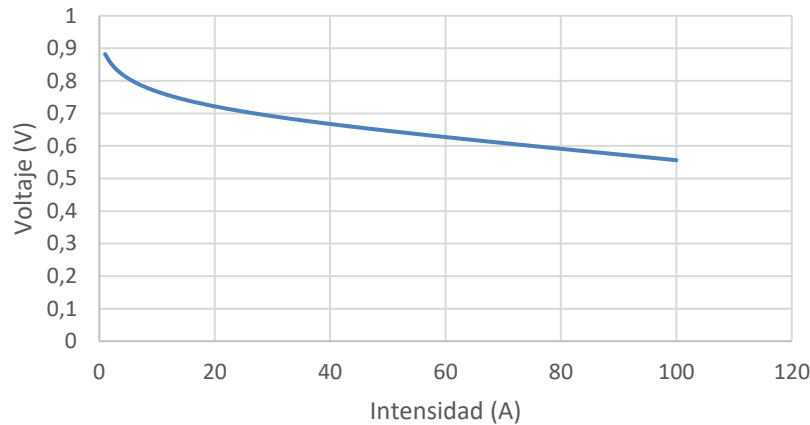


Figura 38 Diagrama V-I de la FC según el modelo empleado.

3.2 Modelo descriptivo de la batería

El criterio de signos seguido establece que cuando la batería se está descargando y por tanto se encuentra proporcionando energía al sistema, la corriente eléctrica es negativa ($I_Q < 0$).

$$\frac{dQ}{dt} = I_Q (I_Q < 0) \quad (\text{Ec. 37})$$

Mientras que, cuando se está recargando esta corriente eléctrica es positiva ($I_Q > 0$).

$$\frac{dQ}{dt} = I_Q \cdot \text{EFF} (I_Q > 0) \quad (\text{Ec. 38})$$

Donde (EFF) es la eficiencia de Faraday y representa la fracción de corriente eléctrica suministrada a la batería que se emplea para que tenga lugar la reacción química de regeneración, y por tanto se cargue la batería.

El modelo empleado para describir su comportamiento es una combinación de los modelos de Shepherd, Unnewehr y Nerst (Tang et al., 2015).

Modelo Shepherd
$$V = E_0 + RI_Q - K_1 \cdot \frac{1}{F} \quad (\text{Ec. 39})$$

Modelo Unnewehr
$$V = E_0 + RI_Q - K_2 \cdot F \quad (\text{Ec. 40})$$

Modelo Nerst
$$V = E_0 + RI_Q + K_3 \cdot \ln(F) + K_4 \cdot \ln(1 - F) \quad (\text{Ec. 41})$$

Los tres modelos se combinan en uno de la siguiente forma:

$$V = E_0 + RI_Q - K_1 \cdot \frac{1}{F} - K_2 \cdot F + K_3 \cdot \ln(F) + K_4 \cdot \ln(1 - F) \quad (\text{Ec. 42})$$

Donde F es la fracción de carga respecto a la capacidad nominal (También conocido como SOC):

$$F = \frac{Q}{Q_M} \quad (\text{Ec. 43})$$

Q es el estado de carga de la batería y Q_M es la capacidad energética nominal de la celda.

Por lo tanto, en este modelo, el voltaje de celda depende del estado de carga (Q), relacionada con la fracción de carga (F), y de la función que esté realizando la batería (I_Q):

E_0 es el voltaje a circuito abierto y su valor depende del tipo de celda empleada, R es la resistencia interna de la batería=0,08 Ω . Los parámetros relacionados con las pérdidas por polarización son: $K_1=0,0142$ V, $K_2=-0,011$ V, $K_3=0,01$ V, $K_4=-0,013$ V.

Se debe tener en cuenta los límites operativos de la batería. El voltaje nominal no es el valor del voltaje de la batería totalmente cargada, tampoco descargada, sino que es un valor promedio.

Cuando las baterías de litio se descargan más allá del voltaje mínimo permitido de la batería, hablamos de descarga profunda, y eso puede dañar la batería y puede no volver a aceptar una carga completa y con el tiempo tendrá problemas para mantener una tensión alta durante la fase de descarga. Por otro lado, una sobrecarga podría llevar a que la batería podría incluso llegar a encenderse espontáneamente.

Para salvaguardar la vida útil de la batería se establece que la fracción de carga mínima es el 5 % ($F=Q/Q_M=0,05$). Sustituyendo $F=0,05$ en la (Ec. 42) se obtiene el voltaje de corte durante la descarga. Despejando la intensidad de corriente, se obtiene la I_D para ese momento.

$$I_D = \frac{V_D - E_0 + K_1 \cdot \frac{1}{0,05} + K_2 \cdot 0,05 - K_3 \cdot \ln(0,05) - K_4 \cdot \ln(1 - 0,05)}{R} \quad (\text{Ec. 44})$$

Para evitar un posible incendio por sobre carga se establece que la fracción de carga máxima sea el 95 % de la nominal. Al igual que antes, sustituyendo $F=0,95$ en la (Ec. 42) se obtiene el voltaje máximo durante la carga. Se despeja la intensidad de corriente correspondiente a ese voltaje:

$$I_C = \frac{V_D - E_0 + K_1 \cdot \frac{1}{0,95} + K_2 \cdot 0,95 - K_3 \cdot \ln(0,95) - K_4 \cdot \ln(1 - 0,95)}{R} \quad (\text{Ec. 45})$$

3.2.1 Tasas de carga y descarga de una batería

Las tasas de carga (R_C) y descarga (R_D) se expresan como 1C, 2C, etc. Si una batería tiene una capacidad de 2200 mAh y una tasa de carga 1C de carga significa que tarda una hora en

cargarse. Si fuese una batería de 1000 mAh y aceptase 2C, se habría podido cargar a 1000 mAh en media hora.

Al igual que con las tasas de carga, existen la tasa máxima de descarga, también expresada con el mismo símbolo, C. Si figuran dos valores en forma de rango, como 30-40C, significa que tolera 30C de forma constante y 40C de forma puntual. Una batería de 1000 mA con una tasa de descarga 2C significa que puede descargar 1000 mA durante una hora, o, por ejemplo, 2000 mA durante media hora. No obstante, estos valores representan una situación ideal. En la realidad cuanto mayor sea la tasa de descarga, a la larga se puede extraer menos energía de la batería, y tarda menos de lo teórico en descargarse (Olmo Esteban, 2019).

En la siguiente figura se puede observar cómo a a mayores tasas de descarga, la batería tarda menos en descarse.

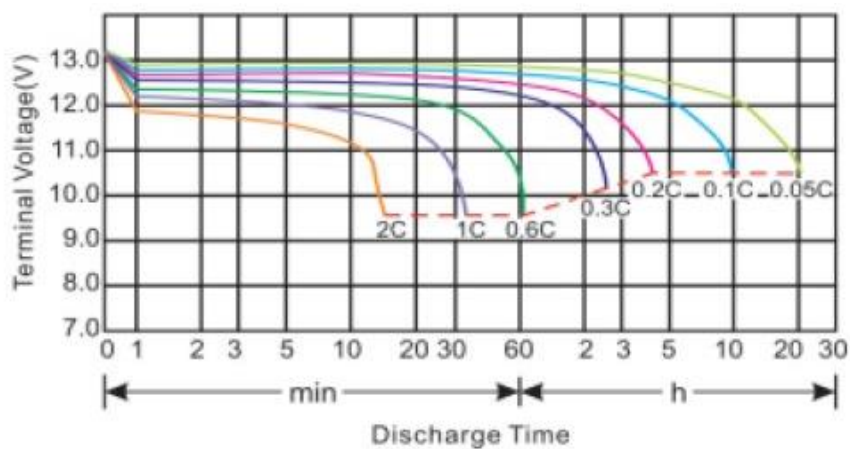


Figura 39 Tiempo de descarga de una batería con diferentes tasas de descarga (Machado, 2021).

En la siguiente figura se puede ver cómo varía el voltaje de celda al descargarse la batería. Y como se ha explicado, para una mayor tasa de descarga, tarda menos en descargarse y por tanto, la caída de potencial es mayor cuanto mayor es C.

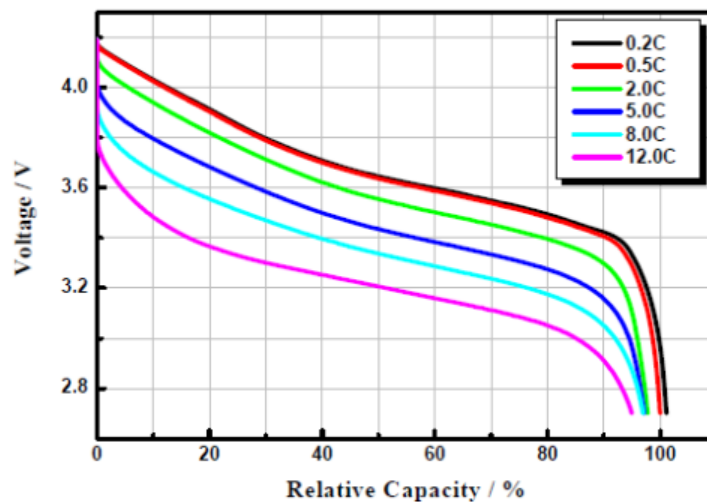


Figura 40 Variación del potencial de la pila con estado de carga a diferentes tasas de descarga (Olmo Esteban, 2019).

A partir de estos ratios (obtenidos del fabricante) y de la capacidad nominal energética de celda (Q_M) se obtienen la intensidad de corriente que es capaz de proporcionar la batería ($I_{Q,MIN}$) y la intensidad de corriente que es capaz de recibir la misma ($I_{Q,MAX}$).

$$I_{Q,MIN} = -R_D \frac{Q_M}{1000} ; I_{Q,MAX} = R_C \frac{Q_M}{1000} \quad (\text{Ec. 46})$$

Si durante la descarga ($I_Q < 0$) la intensidad de corriente de descarga es superior al límite de descarga (Ec. 46), el voltaje de celda se calcula empleando la (Ec. 42) considerando la intensidad máxima de descarga. De esta forma se obtiene el potencial mínimo de descarga V_{min} , que es el voltaje de celda correspondiente a la tasa máxima de descarga. No obstante, el límite del potencial mínimo de descarga es el voltaje de corte ($V_D < V_{min}$)

$$V_{min} = E_0 + R I_{Q,MIN} - K_1 \cdot \frac{1}{F} - K_2 \cdot F + K_3 \cdot \ln(F) + K_4 \cdot \ln(1 - F) \quad (\text{Ec. 47})$$

De la misma forma se obtiene el potencial máximo de carga correspondiente a la corriente límite superior de carga. Representa el voltaje de celda correspondiente con la tasa máxima de recarga de la batería. Al igual que antes, el límite de corte debe ser mayor.

$$V_{MAX} = E_0 + R I_{Q,MAX} - K_1 \cdot \frac{1}{F} - K_2 \cdot F + K_3 \cdot \ln(F) + K_4 \cdot \ln(1 - F) \quad (\text{Ec. 48})$$

El estado de carga de la batería se obtiene entonces:

$$\frac{dQ}{dt} = I_Q \cdot 1000 \quad (\text{Ec. 49})$$

La potencia generada por cada celda de la batería se obtiene de la siguiente manera:

$$P' = I_Q \cdot V \quad (\text{Ec. 50})$$

Y, la potencia total proporcionada por la pila será:

$$P = P' \cdot C_p \cdot C_s \quad (\text{Ec. 51})$$

C_p son las celdas en paralelo y C_s las celdas en serie.

Las pérdidas de potencias que se producen durante la carga de la batería se calculan de la siguiente manera:

$$P_{LOSS} = P(1 - EFF) \quad (\text{Ec. 52})$$

4 ESPECIFICACIONES DEL VEHÍCULO Y DESCRIPCIÓN DE LA CURVA DE DEMANDA

En este capítulo se describe el vehículo elegido para llevar a cabo el estudio y sus características. Se define también la curva de demanda de potencia en base a los datos experimentales del estudio mostrado en la introducción (Ver Figura 32). Además, se describen dos curvas de demanda de potencia para dos geografías distintas, con el objetivo de ampliar el rango de aplicabilidad del estudio. En estas curvas se ha tenido en cuenta un frenado regenerativo, para lo cual se ha propuesto una forma de cuantificarlo.

4.1 Dispositivo estudiado

El vehículo estudiado es una scooter empleada por personas con movilidad reducida, en concreto el modelo Scooter Libra de Mobiclinic, que realiza una función equivalente a una silla de ruedas. En la siguiente figura se muestra este vehículo:

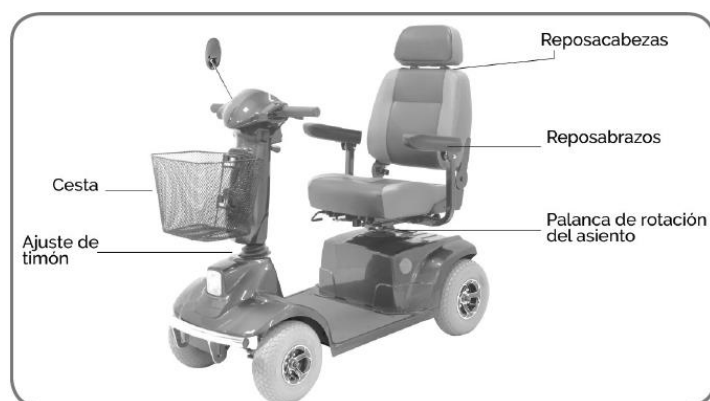


Figura 41 Scooter Libra de Mobiclinic.

En la siguiente tabla se muestran los parámetros más relevantes de este equipo.

Tabla 5 Especificaciones técnicas de la Scooter Libra de Mobiclinic.

Especificaciones técnicas	
Longitud total	128 cm
Anchura total (con reposabrazos)	61 cm
Alto total:	111 cm
Ruedas (delanteras y traseras)	26 cm
Distancia al suelo	4 cm
Grado de inclinación	12 grados
Freno	Electromecánico
Anchura del asiento	45,5 cm
Peso	87,9 kg

Máxima velocidad	8 km/h
Tamaño del motor	500 W, 3400 rpm
Baterías (2)	12V 36Ahr
Peso pack de baterías	22,5 kg
Autonomía	30 km
Cargador de baterías	5A externo
Peso máximo soportado	135 kg
Peso silla + persona	222,9 kg

4.1.1 Justificación del estudio

Como se puede ver, el conjunto de baterías representa gran parte del peso del dispositivo, aproximadamente un 25 %. Para aumentar la autonomía de este tipo de equipos se debe aumentar la energía almacenada en estas baterías, lo que aumenta significativamente el peso de estos vehículos y los hace más incómodos y difíciles de manejar. Como se vio en la introducción, las baterías plomo ácido, utilizadas comúnmente en estos vehículos, poseen una energía específica de 30 a 50 Wh/kg. Mientras que las de litio oscilan entre 100-200 Wh/kg, dependiendo del material del cátodo.

Además, otro hándicap de las baterías es el tiempo que tardan en cargarse. Para esta en concreto se requieren unas 7 horas de recarga conectándola a la red eléctrica. Hoy en día la electricidad proviene mayoritariamente de fuentes no renovables, por lo que también tienen asociado una emisión de gases contaminantes.

A medida que pasa el tiempo la eficiencia de la batería va bajando y tarda más en cargarse y disminuye su autonomía. Por lo que se tiene que recargar con mayor frecuencia y son capaces de recorrer una menor distancia.

Todo ello justifica el estudio de implementar una pila de combustible que alimente un equipo de este tipo. Pues con este tipo de sistemas se puede conseguir una mayor autonomía, pudiendo el usuario realizar un mayor número de kilómetros sin necesidad de conectarlo a la red eléctrica. Aunque, como se ha visto, se sigue requiriendo la presencia de una batería para garantizar las prestaciones del dispositivo. Este estudio se centra en especificar las dimensiones de los elementos para garantizar que el sistema pueda cubrir la curva de demanda de potencia. Para ello se parte de las premisas de que un mayor tamaño del depósito de hidrógeno proporciona una mayor autonomía debido a la densidad energética que posee, pero se obtiene una respuesta dinámica del sistema lenta. Mientras que incorporar una batería de mayor tamaño, aunque aumenta el peso del vehículo tiene una mayor facilidad de respuesta a corto plazo, ya que posee elevada densidad de potencia.

4.2 Elementos del sistema

El modelo híbrido pila de combustible + batería requiere de ciertos elementos de control que garanticen el funcionamiento del sistema y protegen los elementos de una degradación prematura. En la siguiente figura se muestra un esquema análogo al que se debería montar. En este caso es empleado por un dron, así que se debe sustituir el sistema de vuelo por los motores del vehículo.

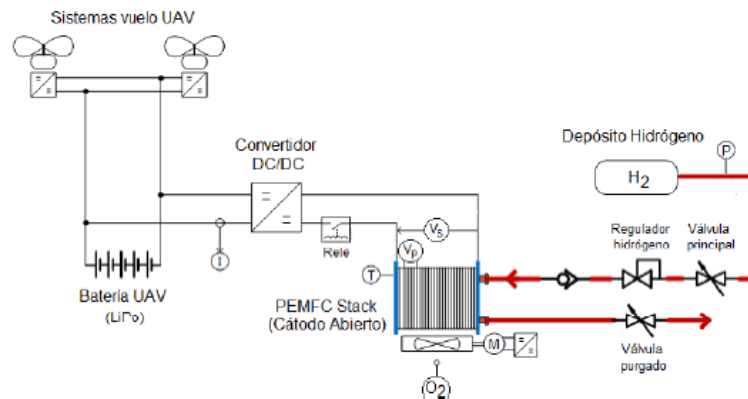


Figura 42 Esquema de sistema híbrido ‘pila de combustible + batería’ aplicado a un dron.

A continuación, se describen los elementos adicionales:

4.2.1.1 Balance de planta

El balance de planta (BoP) son el conjunto de sistemas auxiliares necesarios para que el sistema energético suministre la potencia necesaria. Se estima que el BoP consume aproximadamente 1,5 A. En la fase de arranque es la batería la que debe proporcionarlo, y posteriormente la celda de hidrógeno. Se compone del stack y normalmente de tres sistemas (Delfín Capote, 2021):

- Sistema de suministro de aire.

Es el encargado de filtrar, comprimir, humidificar el aire antes de que entre al cátodo. La velocidad del aire de entrada de cátodo se mide mediante un sensor de flujo de aire de alta precisión. Los componentes que puede incluir son: filtro, compresor, humidificador, válvula de corte y control de presión y sensores de flujo, presión y temperatura.

- Sistema de gestión del combustible.

Se encarga de proporcionar el hidrógeno que se encuentra a elevada presión en el tanque de almacenamiento hacia el ánodo a la presión requerida. Para el correcto funcionamiento de la pila se debe alimentar hidrógeno seco ultrapuro. La línea de alimentación cuenta con una válvula de corte y una válvula reguladora de presión donde se regula desde la presión del tanque (300 bar en este caso) hasta la presión de alimentación del ánodo (0,5 bar).

- Sistema de gestión térmica.

Como se vio en el Capítulo 3, la reacción que tiene lugar es exotérmica, por lo que a medida que ocurre va liberando calor, lo que se traduce en un aumento de la temperatura. Como se ha visto, el rango de temperatura de operación de la pila se encuentra entre 60 – 80 °C, lo cual reduce el coste de los materiales, pero se debe controlar y garantizar ese rango debido a que

tiene un efecto significativo sobre el contenido de agua en el ionómero de la membrana y las capas catalizadoras (Strahl et al., 2014). Esto está relacionado con la difusión del agua a través de la membrana. El contenido de agua en la capa catalizadora afecta directamente al área electroquímicamente activa. El agua es importante para que los protones lleguen a los sitios activos para la reacción electroquímica con los gases reactivos y los electrones, que es el factor clave de rendimiento de la PEMFC. Una correcta gestión de la temperatura/humedad es crucial en este tipo de pilas. (Strahl et al., 2014). Por este motivo el sistema requiere de refrigeración.

Existen dos tipos de tecnologías: cátodo cerrado y cátodo abierto. La elección entre ellas depende de la potencia requerida. Para altas potencias se suelen emplear un sistema de cátodo cerrado. En ellos los canales de las placas catódicas están aislados del medio que les rodea (López Sabirón, 2011). La refrigeración se lleva a cabo mediante un subsistema de suministro de aire además del subsistema de entrega y circulación de combustible. (Kurnia et al., 2021). Existen incluso prototipos para pilas de cátodo cerrado refrigeradas por agua.

Sin embargo, para bajas potencias (hasta 2 kW) se han desarrollado pilas de cátodo abierto, que es una configuración simple donde el cátodo de la celda está conectado al ambiente directamente por los canales, el aire entra directamente a la pila (López Sabirón, 2011), para proporcionar enfriamiento y servir como oxidante, eliminando así el requisito de un subsistema complejo de suministro de aire, minimizando la carga parásita y reduciendo el costo total del sistema. El mayor desafío con la configuración de cátodo abierto es la fuerte dependencia del rendimiento de la pila de las condiciones ambientales. Esta configuración cuenta con un único ventilador de refrigeración directamente unido a la carcasa de la pila de combustible. Este refrigera la pila por convección forzada a la vez que proporciona oxígeno al cátodo (Strahl et al., 2014). Por lo tanto, el suministro de aire del cátodo y la pila de refrigeración no se pueden desacoplar.

Las de cátodo cerrado son más ineficientes porque gastan parte de su energía en mover otro compresor que mueva el aire u otro fluido de refrigeración. Un controlador fija la velocidad de giro del ventilador.

4.2.1.2 Convertidor de tensión (CC/CC)

Cuando la pila de combustible y la batería trabajan en paralelo es necesario hacer coincidir el voltaje nominal de la pila de celdas de combustible con el de la batería. Para conseguirlo se coloca un convertidor de potencia CC/CC entre la pila de combustible y la batería (Jiang et al., 2005). Existen elevadores, reductores, y elevadores -reductores. Estos últimos dan bastantes problemas por su configuración, por lo que se recomienda diseñar el sistema de tal forma que el voltaje de la FC esté siempre por encima del voltaje de la batería, en cuyo caso se necesita un reductor; o bien siempre por debajo, entonces se necesita un elevador. En este estudio se ha seguido tal estrategia que se requiere un convertidor reductor. Esto se expone en el Capítulo 5.

4.2.1.3 Motor de corriente continua

En las sillas de ruedas normalmente se emplean dos motores, uno en cada rueda trasera. En el prediseño que se propone en este Trabajo Fin de Máster el motor del modelo de tren motriz se usa como motor impulsor cuando se acelera y como generador cuando se requiere un frenado regenerativo. Durante la generación, la energía eléctrica es absorbida por la batería.

De entre los tipos de motores de corriente continua que existen, los motores sin escobillas (*brushless*) han ganado popularidad en los últimos años en sectores como automoción, aeroespacial, medicina, equipos de automatización e instrumentación.

Estos motores, a diferencia de los que sí poseen escobillas, no incorporan colector ni escobillas en su estructura para cambiar la polaridad del rotor. En este caso la conmutación de las bobinas se lleva a cabo de forma electrónica mediante un controlador de motor (CLR, n.d.)

Estos motores presentan muchas ventajas frente a los de escobilla, poseen una mejor relación velocidad-par motor (muy importante en dispositivos con limitación de peso), mayor respuesta dinámica, mejor eficiencia, más vida útil, menos ruido y mayor rango de velocidad.

El motor elegido es un motor eléctrico de reducción de engranajes de 250W de Focket, en la Figura 43 se muestra este modelo y en la Tabla 6 sus características.



Figura 43 Motor eléctrico de reducción de engranajes de 250W de Focket.

Tabla 6 Características del motor de 250W de Focket.

AC/DC	DC
Voltaje	12V
Aplicaciones	Bicicletas eléctricas, scooter, etc.
Potencia	250W (0,326hp)
Velocidad de rotación	2.950rpm
Intensidad sin carga	2,5A
Eficiencia	78%

4.3 Frenada regenerativa

El frenado regenerativo consiste en utilizar la energía perdida por fricción durante el frenado que puede recuperarse para recargar la batería (Morgado Ramirez et al., 2019).

La energía recuperada durante la frenada se ha estimado siguiendo los pasos que se describen a continuación.

El par generado en la rueda se calcula multiplicando la fuerza que hay que hacer sobre la rueda multiplicado por el diámetro de esta:

$$\tau = F \cdot r_{rueda} \quad (\text{Ec. 53})$$

Donde la fuerza se obtiene aplicando la segunda ley de Newton:

$$F = m \cdot a \quad (\text{Ec. 54})$$

Siendo m la masa del cuerpo y a la aceleración tangencial, que es la que genera el torque.

La potencia que se obtiene de la rueda se obtiene multiplicando el torque obtenido en la expresión (Ec. 53) por la velocidad angular de la rueda:

$$P = \tau \cdot \omega \quad (\text{Ec. 55})$$

El par y la velocidad de rotación del motor dependen de los requerimientos del motor en cada momento. No obstante, se establecen unas condiciones promedio para obtener un rendimiento y potencia promedio de regeneración de energía en los momentos de frenada.

Conocida la potencia, se puede calcular la intensidad que entra en la batería ($I=P/V$).

Para calcular la potencia regenerativa se ha estimado suponiendo que el vehículo se encuentra a una velocidad crucero de 1,35 m/s (5km/h) y frena (0 km/h) en 2 segundos. La desaceleración en la frenada es entonces 0,675 m/s². En la Tabla 5 se puede obtener el diámetro de la rueda, que es de 26 cm.

Sustituyendo en (Ec. 53), (Ec. 54) y (Ec. 55):

$$F = m \cdot a = 222,9 \cdot 0,675 = 150,45 \text{ N}$$

$$\tau = F \cdot r_{rueda} = 150,45 \cdot 0,13 = 19,56 \text{ N} \cdot \text{m}$$

La rueda gira a una velocidad de:

$$\omega = v/r = 1,35/0,13 = 10,38 \text{ rad/s} = 1,65 \text{ rev/s} = 99,15 \text{ rpm}$$

La potencia es entonces:

$$P = 19,56 \cdot 10,38 = 203 \text{ W}$$

Suponiendo que en el sentido contrario de la motorreductora la eficiencia se encuentra también en torno al 78%, la potencia que llega al motor para generar electricidad es: 158,34 W.

La eficiencia del circuito eléctrico, para calcular la potencia que llega a la batería se estima en torno al 95%, por lo que la entrada a la batería es de 150,42 W.

4.4 Curva de demanda

En la introducción se mostró los resultados de un estudio destinado al diseño de una curva de potencia y velocidad de una silla de ruedas (Ver Figura 32), cuyas características eran similares a las del scooter que se ha empleado en este TFM, es por esto por lo que se ha seguido esta curva como referencia para definir la curva de demanda.

Para aumentar el rango de aplicación de este estudio se ha estudiado dos curvas de demanda correspondientes a dos geografías diferentes. Se ha pretendido simular la potencia requerida

por el equipo en una geografía plana como la de Valencia, y otra con más pendiente como la de Bilbao.

Para confeccionar ambos circuitos se ha planteado un recorrido con una duración de 2h. Se establece como velocidad de cruceo 1,35 m/s (5km/h). Durante el recorrido se va a simular frenadas en semáforo con frenada regenerativa; aceleración hasta la velocidad máxima alcanzable por la silla 1,67 m/s (6km/h), subida de rampa de autobús (12%), y subida de una pendiente con inclinación media.

4.4.1 Curva de demanda en una ciudad tipo Valencia

Valencia es una ciudad mayormente plana, con pocas pendientes. Por lo que se ha tomado como referencia principalmente la curva (e) de la Figura 32.

Se ha considerado que la silla pasa de 0-1,35 m/s en 5 segundos. Esto supone un pico de potencia, y una vez que se mantiene esta velocidad la demanda baja y se mantiene estable.

Se observan picos estables a una altura de 230 W correspondiente a subidas de cuestas y a tramos de máxima velocidad (8km/h). Además, se observa un pico pronunciado de potencia correspondiente a la subida de una cuesta de autobús. Esto también se ha basado en los datos experimentales obtenidos por el estudio de (Morgado Ramirez et al., 2019)

Durante las paradas en semáforos ($v=0\text{km/h}$), se puede observar que la potencia toma valores negativos debido al frenado regenerativo, y la energía se recupera para cargar la batería. Por este motivo se observa un pico negativo de potencia, el sistema “recibe” energía en vez de proporcionarla.

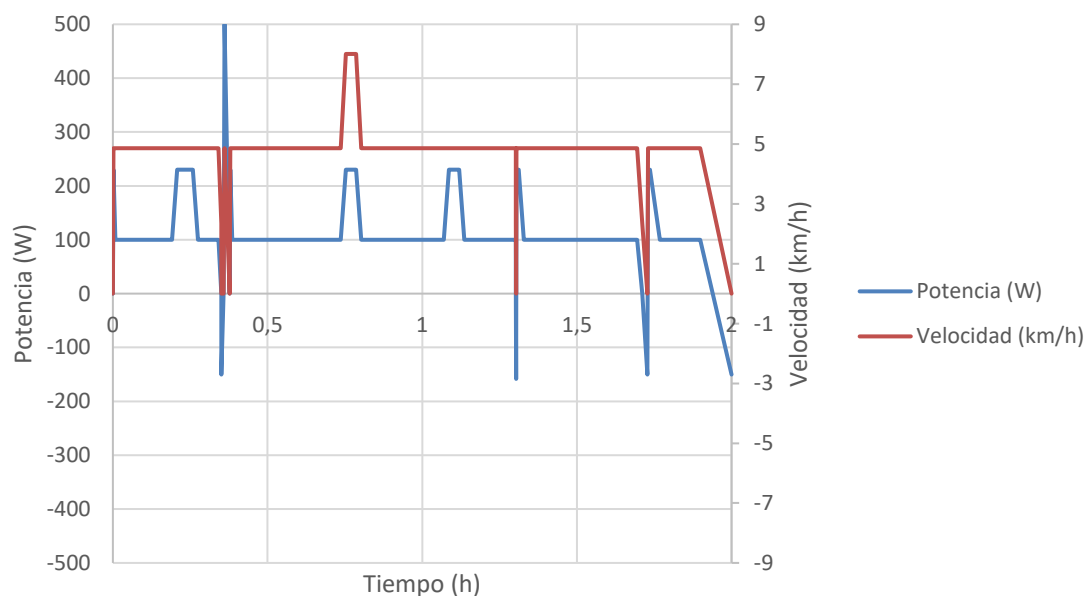


Figura 44 Curva de velocidad y demanda de potencia en una ciudad tipo Valencia (diseño propio).

4.4.2 Curva de demanda en una ciudad tipo Bilbao

Se ha elegido esta ciudad para completar el estudio por su geografía mayormente inclinada. A diferencia del anterior se ha contado con la presencia de más cuestas en el recorrido, principalmente con una inclinación de 2,5 %.

En los experimentos del estudio seguido no hay una pendiente ascendente con esta pendiente, así que se ha calculado a partir del equilibrio de fuerzas de sistema. La potencia y la fuerza son magnitudes proporcionales. Se ha calculado la fuerza necesaria para el movimiento en un plano inclinado y en uno sin inclinación. Y a partir de la proporción de las fuerzas en ambos casos se ha calculado la potencia necesaria en un plano inclinado, partiendo de que la relación entre potencias es igual a la relación entre fuerzas.

Partiendo del esquema de fuerzas que actúan sobre un cuerpo inclinado (Ver Figura 45), se aplica la ley de Newton (Ec. 56).

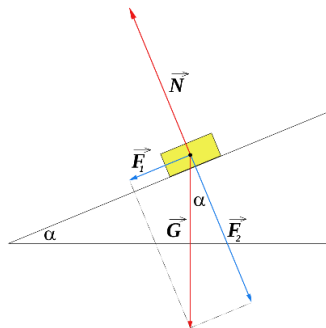


Figura 45 Esquema de fuerzas de un cuerpo en una pendiente.

Aplicando la segunda ley de Newton:

$$\sum F = m \cdot a \quad (\text{Ec. 56})$$

En el eje y no hay aceleración, por lo que la fuerza normal (N) es igual a la componente y del peso. La fuerza del peso es igual a la masa por la gravedad, así que la suma de fuerzas del eje y queda de la siguiente manera:

$$N = F_2 = m \cdot g \cdot \cos \alpha \quad (\text{Ec. 57})$$

En el eje x hay velocidad constante, por lo tanto, la fuerza que hace el sistema es el necesario para superar al peso y a la fuerza de rozamiento:

$$F = F_r + F_1 = \mu \cdot N + m \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (\text{Ec. 58})$$

Se ha supuesto que la pendiente en la ciudad de Bilbao es 2,5%, esto da un grado de inclinación de $1,43^\circ$. Se ha tomado un coeficiente de rozamiento dinámico de 0,5. Realizando los cálculos se obtiene que la fuerza que debe hacer el sistema para moverse a velocidad constante es:

$$F = \mu \cdot m \cdot g \cdot \cos \alpha + m \cdot g \cdot \sin \alpha = 1147N \quad (\text{Ec. 59})$$

En el caso de la superficie plana:

$$F = F_r = \mu \cdot N = \mu \cdot m \cdot g = 1093,32N \quad (\text{Ec. 60})$$

La proporción de potencia consumida es igual a la proporción de fuerza (van a la misma velocidad). Durante la velocidad crucero la potencia necesaria son 100W. Por tanto, la potencia consumida en régimen estacionario a la velocidad de crucero estudiada es:

$$P = 100 \cdot (1147/1093,32) = 105W$$

Durante los tramos de arranque el coeficiente de viscosidad que se toma es el estático en vez del dinámico, y se ha tomado como valor 0,75. Para hacer el cálculo se ha tomado aceleración constante Se considera que pasa de 0-1,35 m/s en 5s ($1,35/5=0,27\text{m/s}^2$).

En el caso del plano inclinado en el eje y la fuerza neta sigue siendo 0, y en el eje x en este caso la resultante de fuerzas no es 0, sino que es $m \cdot a$, tanto para el caso inclinado (Ec. 63) como el plano (Ec. 64)

$$F - F_r - F_1 = F - \mu \cdot N + m \cdot g \cdot \text{sen}\alpha = m \cdot a \quad (\text{Ec. 61})$$

$$F - F_r = F - \mu \cdot N = m \cdot a \quad (\text{Ec. 62})$$

La relación de fuerzas es en este caso:

$$P = 230 \cdot (1754,23/1700,17) = 237,6W$$

En la siguiente figura se muestra la curva de velocidad y de demanda de potencia propuesta para Bilbao.

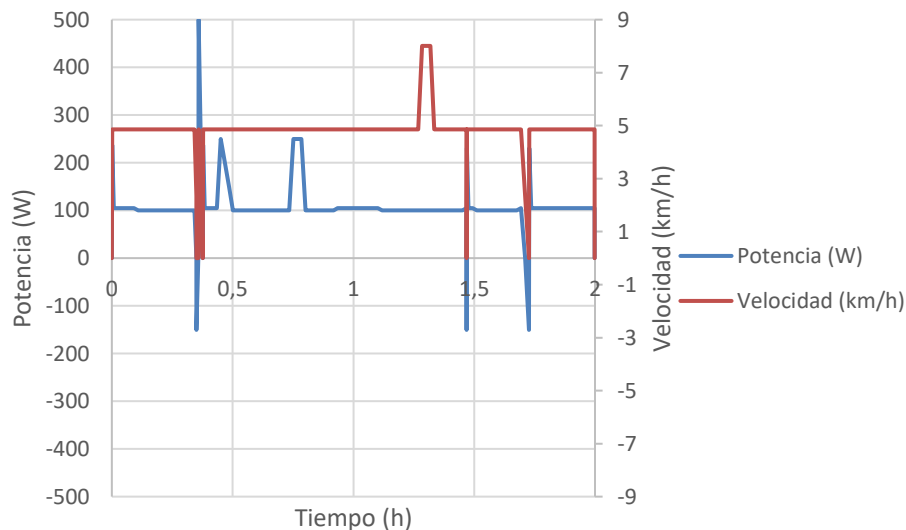


Figura 46 Curvas de velocidad y de demanda de potencia en una ciudad tipo Bilbao (elaboración propia).

Al igual que antes, para obtener la curva de demanda se ha diseñado un circuito con paradas en semáforos, tramos a máxima velocidad, y en este caso con mayores tramos en plano inclinado. También se ha recuperado la energía de frenado.

En una inclinación en una ciudad tipo Bilbao, se requiere mayor potencia para alcanzar la misma velocidad con pendiente, ya que hay que superar una fuerza debida al peso del vehículo. Esto se traduce en que, para una misma FC en las dos ciudades, para un mismo recorrido de dos horas la botella de hidrógeno en Bilbao se gastará antes, o dicho de otra forma, tendrá menos autonomía.

Para que se observe visualmente las diferencias en la geografía de los dos circuitos tipos, en la siguiente gráfica se muestra la altura subida a lo largo del trayecto debido a la inclinación de la calle.

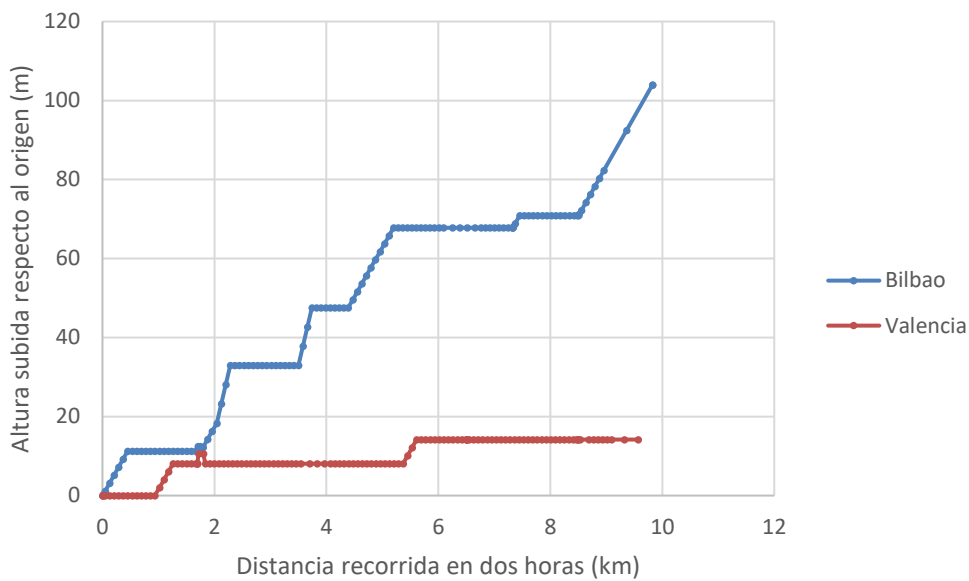


Figura 47 Altura subida a lo largo del circuito en cada ciudad (elaboración propia).

Durante los tramos a velocidad constante la distancia se ha calculado multiplicando la velocidad durante el tiempo que se ha llevado esa velocidad. Y durante las aceleraciones y las deceleraciones se emplea la expresión del movimiento rectilíneo uniformemente acelerado, en las aceleraciones

$$s = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2 \quad (\text{Ec. 63})$$

5 SIMULACIÓN DEL PROCESO, SELECCIÓN DE EQUIPOS Y CONSUMO DE HIDRÓGENO

En este capítulo se discute la dimensión idónea de los dos equipos principales del sistema híbrido ‘pila de combustible y batería’ para la curva de demanda de potencia definida. Para ello primero se define la estrategia energética que establece cuánta potencia debe dar cada equipo en todo momento. Después se eligen los equipos entre los comercialmente disponibles que tenga las prestaciones requeridas.

Este estudio se ha planteado para una configuración de estos dos dispositivos en paralelo, donde ambos pueden alimentar al sistema de tracción del vehículo. Se ha tomado esta decisión en base a los resultados observados en los datos de la literatura.

5.1 Configuraciones del circuito eléctrico

Estos dos dispositivos se pueden configurar de diferentes formas para suministrar al motor eléctrico la potencia necesaria para mover el equipo. No obstante, se ha elegido poner un circuito en paralelo, en el que tanto la batería como la pila de combustible están conectados a la tracción del vehículo.

5.1.1 Estrategia energética

Para poder dimensionar ambos sistemas de almacenamiento de energía es necesario definir una estrategia energética donde se establezca qué sistema proporciona la potencia necesaria en cada momento, esto se traduce en una intensidad proporcionada. A continuación, se describe la estrategia energética seguida en cada fase del circuito. El sistema se puede encontrar ante las siguientes situaciones:

1. Encendido del vehículo

La batería enciende todo el equipo (balance de planta y pila de combustible). Se estima que la intensidad requerida son 1,2A.

2. Arranque

El vehículo pasa de 0 - 1,34m/s (5km/h) en 5 segundos y para ello se requieren 250W. Este pico de demanda de potencia lo debe proporcionar la batería, pues la pila de combustible tarda de media 30 segundos en arrancar. Así que, los primeros 25 segundos siguientes del tramo a velocidad crucero también los debe alimentar la batería.

3. Tramo a velocidad crucero

Se ha establecido una velocidad crucero de 1,34 m/s (5km/h). Durante este tipo de tramos la pila de combustible es la única que alimenta al motor eléctrico. Además, la diferencia de potencia entre su umbral máximo y la que debe suministrar al vehículo se emplea para cargar la batería.

Lo ideal es dimensionar la pila para que el punto óptimo de funcionamiento sea la suma de estas dos demandas de potencia.

4. Cuesta o aceleración

En los casos en los que se desea acelerar y pasar de la velocidad crucero a la velocidad máxima del vehículo (8km/h) hay un pico de potencia que debe proporcionar la batería. De la misma forma, si se desea subir una cuesta también se requiere un pico de potencia instantánea

Como se visto a lo largo del TFM, la pila de combustible tiene poca capacidad de respuesta, es por eso por lo que se necesita la batería, para alimentar al sistema antes estos picos. Durante estos tramos la celda de combustible sigue proporcionando la potencia para la que ha sido diseñada y el exceso necesario de potencia momentáneos los da la batería.

5. Momento de máxima potencia

Como se ha visto en las figuras de demanda de potencia. El pico de máxima potencia está en la subida de una cuesta típica de autobús, con una inclinación del 12%.

6. Frenos y paradas

Durante los tramos de frenos y parada se apagan los dos suministros y se recupera la energía de la desaceleración como se ha descrito en el capítulo anterior (Ver apartado 4.3), optimizando el diseño del sistema.

Bajo los criterios que se acaban de describir se establece cuál de los dos equipos y cuánta potencia da cada uno en todo momento. Esto es lo que se muestra en las dos siguientes figuras para cada ciudad. La suma de ambas gráficas se corresponde con la potencia total que requiere el sistema.

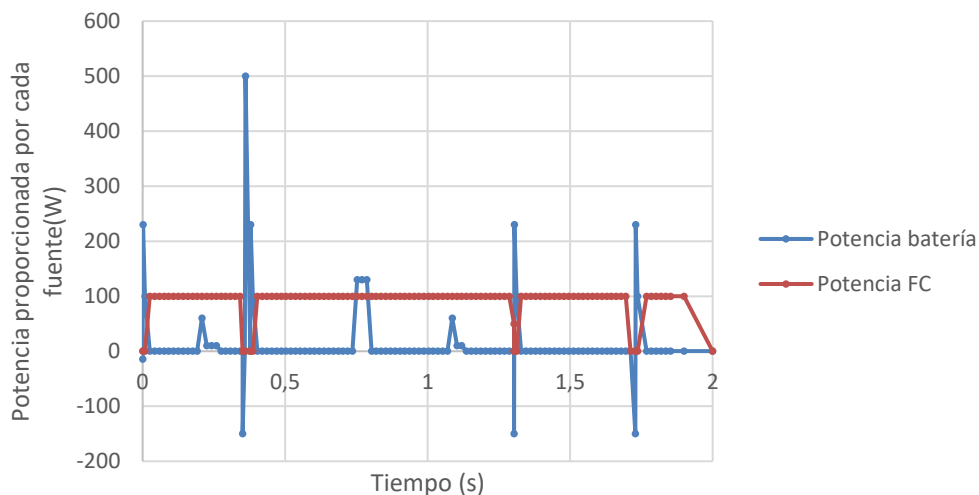


Figura 48 Potencia proporcionada por cada fuente de alimentación en una ciudad tipo Valencia.

Como se puede observar en la imagen, la pila de combustible trabaja en los tramos con velocidad constante proporcionando aproximadamente 100W, mientras que la batería trabaja dando picos momentáneos de potencia. Como se puede observar, la batería se debe dimensionar de forma que sea capaz de dar picos de potencia de 500W

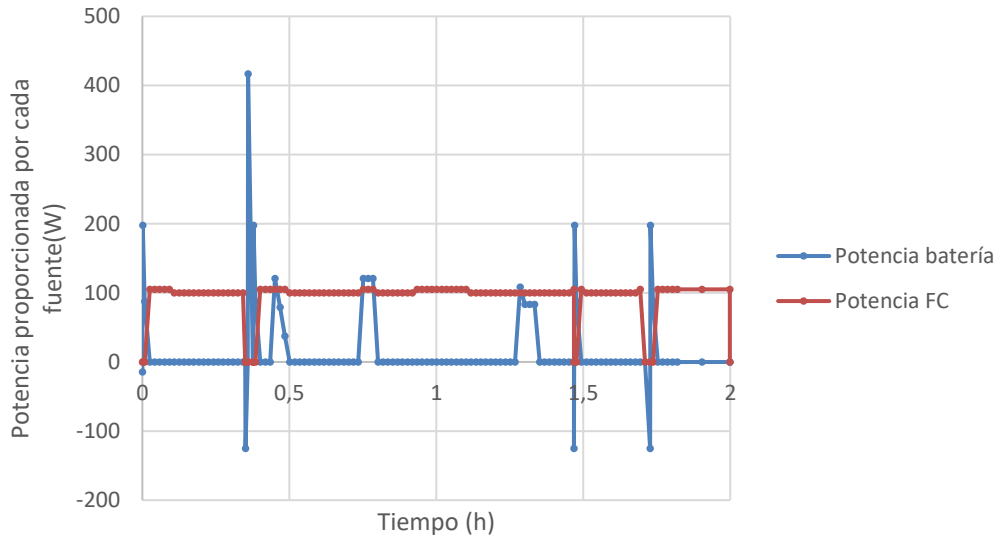


Figura 49 Potencia proporcionada por cada fuente de alimentación en una ciudad tipo Bilbao.

Con estos requerimientos de potencia se seleccionan los dos equipos para asegurar que se proporcione la demanda requerida en todo momento, cubriendo siempre las necesidades y las condiciones límite de operación de ambos equipos para asegurar su correcto funcionamiento y su vida útil.

5.2 Selección de equipos

En este apartado se discute el dimensionamiento de pila de combustible y batería, y se describen los seleccionados entre los comercialmente disponibles. En primer lugar, se ha estudiado únicamente la sustitución de las baterías de plomo ácido por unas de litio para estudiar la mejora que esto supone. Y, posteriormente se ha analizado el tamaño idóneo que deben tener la pila de combustible y batería en un sistema de propulsión híbrido. En este caso se busca que la batería suministre únicamente los picos de potencia que aparecen en la curva de demanda, mientras la pila de combustible proporciona la potencia necesaria para mantener la velocidad crucero, cargar la batería y mantener el BoP

Para la selección de ambos equipos se ha tenido en cuenta un sobredimensionamiento del 20% sobre las demandas requeridas de cada uno.

5.2.1 Batería

En primer lugar, se ha analizado la opción de no emplear celda de combustible y usar baterías de litio del mismo peso que las de plomo ácido para observar sus ventajas operativas. Y posteriormente se han discutido posibles tamaños de una batería que sea complementaria a la celda de combustible.

La intensidad que debe proporcionar la batería se calcula conociendo la potencia y el voltaje ($P=V \cdot I$). Tal y como se vio en la Figura 40 el potencial varía durante la descarga de la batería, por lo tanto, debe recalcular el voltaje de la batería durante la descarga. Esto se calcula mediante el modelo de la (Ec. 42) y el estado de carga a partir de la (Ec. 43). Durante el cálculo se debe tener en cuenta los límites de voltaje que puede alcanzar la batería, y los cálculos se

programan para que cuando la batería se encuentra descargada la celda de combustible la recargue, la intensidad de carga también suele proporcionarla el fabricante.

Se ha considerado una eficiencia del 95% en la intensidad de corriente que sale de la batería y llega al motor.

Por tanto, la celda de combustible se debe dimensionar de tal forma que sea capaz de alimentar al vehículo y de forma simultánea cargue la batería. La entrada de la hoja de cálculo son los límites de tensión de la batería, la capacidad en Ah y la curva de demanda de potencia.

En cuanto al voltaje de la batería. Conviene que esta tenga la misma tensión que el motor, por lo tanto, se ha empleado una de 12V. Este voltaje depende de cuantas baterías se tenga en paralelo.

5.2.1.1 Opción 1: Sólo batería

Normalmente este tipo de equipos funcionan con dos baterías. La que se ha tomado como referencia emplea dos baterías de plomo ácido de 12V 36Ahr, y en conjunto pesan 22,5 kg. Primero se ha estudiado un conjunto de baterías de litio que pesen lo mismo, para observar la mejora obtenida con este tipo de baterías.

Por ejemplo, la batería 12.8 Voltios y 100 Ah de capacidad de X Tech Battery. Esta batería tiene un peso similar a cada una de las baterías de plomo ácido Recomendada por el fabricante para aplicaciones como servicio en camper, caravanas, embarcaciones, energía solar, o tracción en silla de ruedas y vehículos eléctricos etc. Esta batería es de LiFePO_4 , por lo que en la simulación se debe tener en cuenta que su rango de tensión de operación está en 2,5-3,65.V

Tabla 7 Características de la batería 100 Ah de XTech Battery



Figura 50 Batería 100Ah de XTech Battery

Tecnología	LiFePO_4
Corriente estándar de carga	80A
Corriente estándar de descarga	80A
Corriente máxima de descarga	100A
Tensión	10,5-14,4V
Voltaje nominal	12,8V
Dimensiones	260mmx170mmx230mm
Peso aproximado	11kg

Este análisis se ha hecho con las curvas de demanda de ambas ciudades, pero se muestran los datos de Bilbao ya que son los más limitantes. En la siguiente curva se muestra la evolución del voltaje y de estado de carga durante la descarga

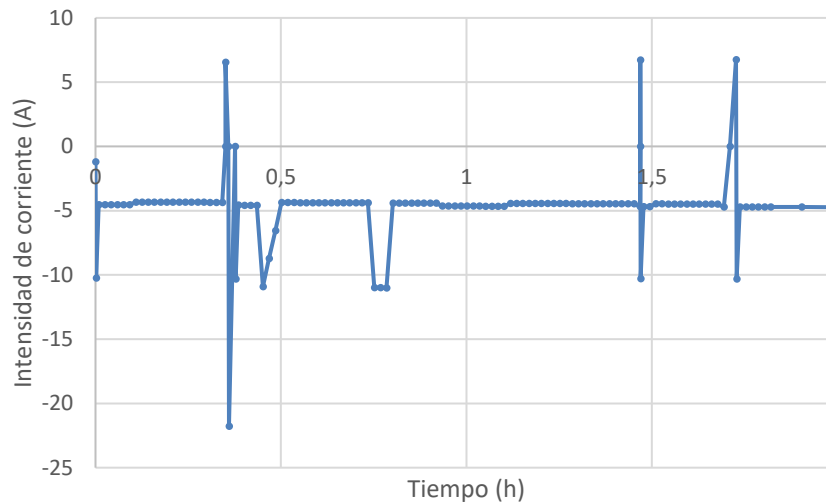


Figura 51 Intensidad proporcionada por la batería en un sistema de propulsión de dos baterías de LiFePO₄ (elaboración propia).

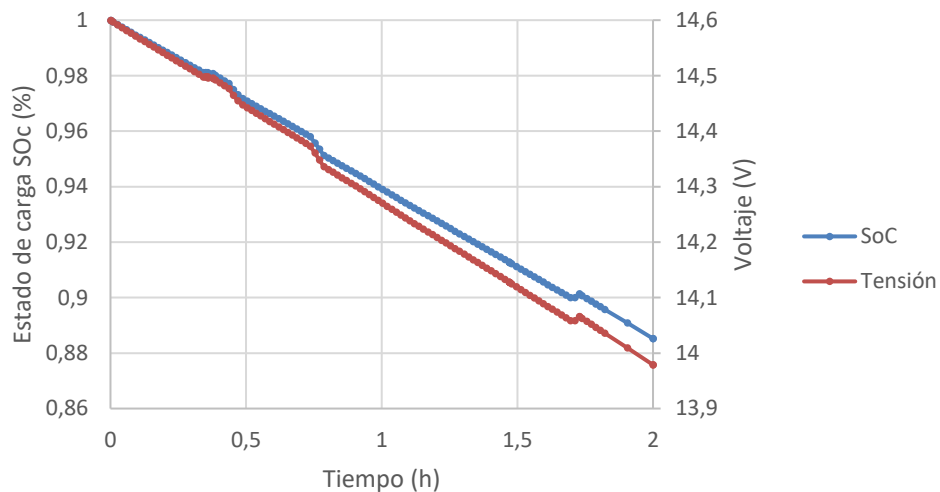


Figura 52 Evolución del estado de carga y del voltaje con el tiempo (elaboración propia).

Se obtiene que al final del recorrido la batería está cargada en torno a un 88%, sólo se ha descargado un 12%. Por lo que se podría repetir este circuito casi 10 veces más. En este circuito se han recorrido 9,7 km, por lo que este conjunto de baterías podría proporcionar una autonomía de 80,83 km.

5.2.1.2 Opción 2: Pila de combustible + batería

Como se ha explicado a lo largo del documento, se pretende estudiar un sistema donde la pila de combustible es la principal fuente de energía y la batería se emplea para el almacenamiento de energía. En este planteamiento la batería se carga únicamente por la pila de combustible y con la energía recuperada en el frenado regenerativo.

En este caso la batería debe poder cumplir fácilmente con el requisito de potencia para un rendimiento de arranque, aceleración, de inclinación y velocidad máxima de cruceo específicos del vehículo. Por tanto, se requiere de una batería que sea capaz de dar 500W durante cortos periodos de tiempo.

Las baterías se escogen en función de sus parámetros principales: la corriente que normalmente se expresa en mA·h (Q_M), voltaje (V) y las tasas de carga (R_C) y descarga (R_D), que se expresan como 1C, 2C, 5C etc. (Ver apartado 3.2.1).

En el caso de estudio, se pretende diseñar un sistema en el que la batería proporciona la potencia en los momentos puntuales de incremento de demanda de potencia, por lo que tiene que ser capaz de dar mucha corriente en poco tiempo. El objetivo inicial es estudiar el funcionamiento de un dispositivo alimentado principalmente por el hidrógeno, y por sus características de baja velocidad de respuesta se requiere de una batería para los picos de potencia.

Por tanto, la idea inicial es escoger una batería que cumpla con este requisito y optimizarla para que ocupe el menor espacio posible y pese menos en el equipo. Por lo tanto, para optimizar la batería se requiere que esta tenga baja intensidad de corriente, pero elevado C. Si tiene bajo C y elevado Q_M la batería estaría sobredimensionada porque podría dar mucha potencia durante mucho tiempo, lo cual no es necesario. La tasa de descarga de una batería se elige en función del consumo máximo previsto. A continuación, se discute el tamaño que debe tener la batería poniendo dos ejemplos de baterías con diferentes capacidades y ratios de descarga.

En primer lugar, se ha probado con una batería como la que se ha descrito, normalmente estas baterías son de polímero de Litio. Se ha seleccionado la batería LiPo Soaring Mini 4s 14.8V de la marca Gens ACE. 20C. Como se vio en la introducción estas baterías operan en el rango 3,7 - 4,2 V.



Figura 53 Batería litio polímero modelo Gens ACE Soaring Mini 4s 14.8V.

Tabla 8 Propiedades de la batería litio polímero modelo Gens ACE Soaring Mini 4s 14.8 V.

Tecnología	LiPo
Corriente nominal	2200 mAh
Corriente de carga	0,8 A
Voltaje	14,8 V (4S)
Ratio descarga	20C
Ciclos recargables	1000 veces
Peso	185 g

En la siguiente figura se indica los requerimientos de intensidad de la batería para conseguir realizar el circuito diseñado contando con una eficiencia del 95% (energía proporcionada por la batería que llega al motor) y una batería de 12V, acorde con el motor escogido. Como se estableció en el Capítulo 3, una corriente de intensidad positiva indica que se está cargando la batería y negativa que se está descargando.

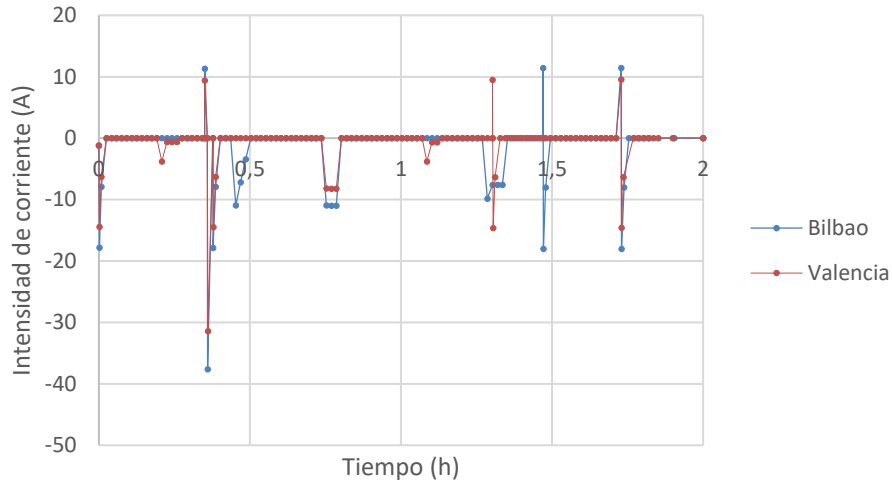


Figura 54 Intensidad proporcionada por la batería a lo largo del trayecto en las dos ciudades (elaboración propia).

De la curva de intensidad se puede deducir que durante los momentos puntuales de máxima potencia se requiere una intensidad de unos 37A. La batería estudiada, de 2,2Ah y 20C, puede dar 44 Amperios durante 3min, cubre el requisito de potencia de descarga en momentos puntuales. Al igual que antes, mediante el modelo de la batería se obtiene la evolución del estado de carga de la batería a lo largo del circuito.

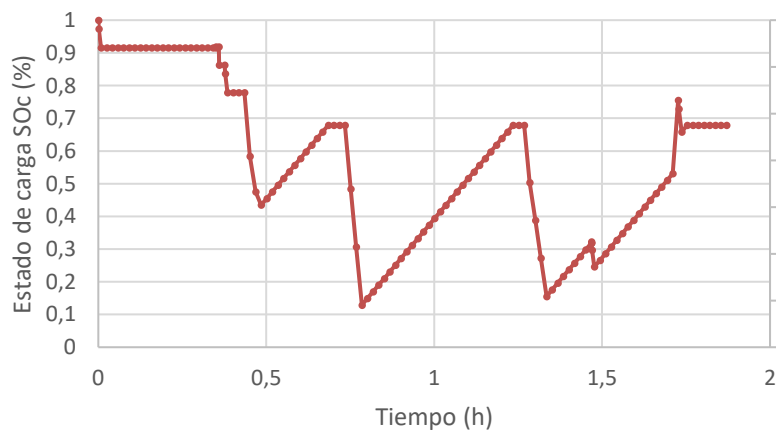


Figura 55 Evolución del estado de carga y del voltaje con el tiempo (elaboración propia).

Los tramos descendentes de esta curva indican la descarga de la batería y los ascendentes la carga de esta por la pila de combustible y la energía recuperada en el frenado regenerativo. Como se puede observar, esta batería es capaz de dar las prestaciones necesarias para cubrir la potencia del circuito planteado, pero bien es cierto que, durante los periodos de máxima

potencia, aunque los cubre, tiene una carga muy lenta y si se requiriese por alguna circunstancia de otro pico de potencia no habría tiempo suficiente para que la pila de combustible la recargase. Por eso se ha estudiado una batería más grande como alternativa. Esta opción no cumpliría con el sobredimensionamiento del 20 % requerido.

Por tanto, se prueba con otra batería con más capacidad. Se ha probado con una de óxido de níquel-manganeso-cobalto (NMC), ya que se ha observado que este tipo de baterías se emplean comúnmente para bicis eléctricas. Estas baterías tienen un ratio de descarga menor.

Se ha elegido el modelo *12V 20Ah Li-Ion Battery - NMC Lithium Ion Deep Cycle* de la casa comercial Aegis Battery. También de 12V, con una corriente de descarga nominal de 20 Ah, pero que puede dar una corriente pico de 40 Ah durante unos segundos, garantizando que cubra el pico de demanda del sistema. En la siguiente figura se muestra esta batería, y en la siguiente tabla sus características técnicas. Como se vio en la introducción estas baterías funcionan en el rango 3-4,2V por su seguridad.



Figura 56 Batería modelo *12V 20Ah Li-Ion Battery - NMC Lithium Ion Deep Cycle* Aegis Battery.

Tabla 9. Características de la batería *12V 20Ah Li-Ion Battery - NMC Lithium Ion Deep Cycle* Aegis Battery.

Tecnología	LiNiMnCoO ₂
Capacidad nominal	20 Ah
Máxima corriente de descarga en pulsos	40 A
Corriente de carga	2 A
Voltaje	12V
Ratio descarga	5C
Ciclos recargables	1000-2000 veces
Peso	1,41 kg
Dimensiones	163x74x76 mm
Potencia específica	150-220 Wh/kg

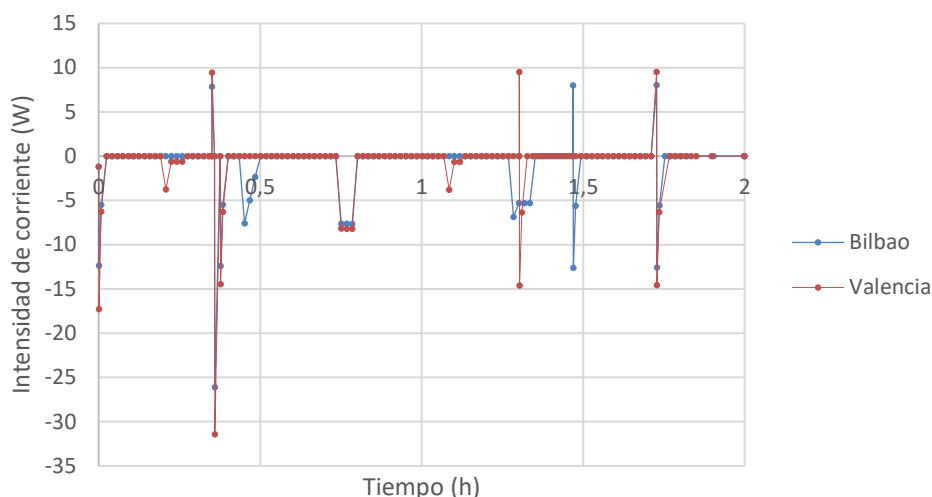


Figura 57 Evolución del estado de carga y del voltaje con el tiempo (elaboración propia).

Esta opción sí que cumpliría con el sobredimensionamiento del 20 %, pues la intensidad media requerida en los picos se encuentra entorno a los 12 A, (14,4 A con el 20 %) y la capacidad nominal son 20 A.

Como se puede ver, la batería no se descarga tanto como la que se presentó en la opción 2, no llega a descargarse por debajo del 90 %, por lo que podría aguantar un ciclo de demanda mucho más completo que el planteado en el proyecto.

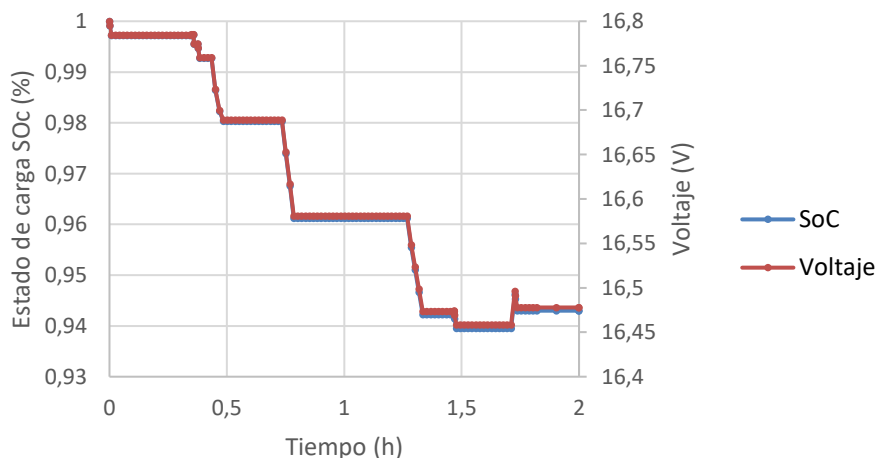


Figura 58 Evolución del estado de carga y del voltaje con el tiempo (elaboración propia).

5.2.2 Dimensionamiento de la pila de combustible PEMFC y de la botella de H₂

En cuanto a potencial de trabajo se debe asegurar que se encuentra en todo momento por encima del potencial de la batería o uno que se encuentre siempre por debajo. El motor elegido trabaja a 12V, por lo que se deberá elegir una batería que se ajuste a este voltaje. Esto quiere decir que el límite de voltaje inferior de la pila de combustible deberá ser superior al voltaje máximo alcanzado en la batería.

Como se ha mencionado en la descripción de la estrategia energética, la pila de combustible va a alimentar al sistema durante los tramos a velocidad crucero para evitar variaciones repentinas de demanda que puedan dañar la membrana y reduzca la vida de la celda.

En la siguiente gráfica se muestran la potencia requerida durante los tramos de velocidad crucero que debe proporcionar la pila de combustible en ambas ciudades.

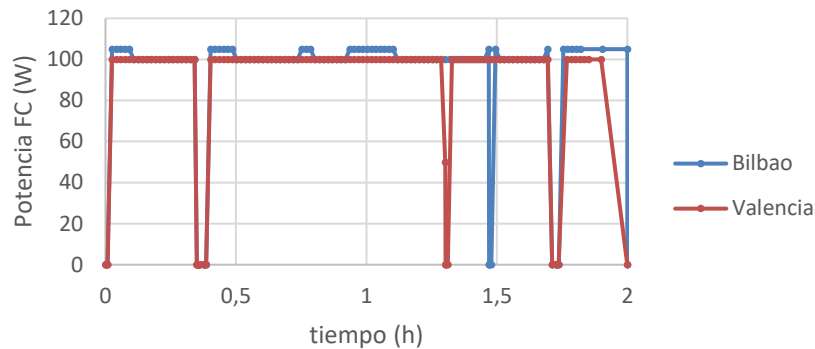


Figura 59 Potencia proporcionada por la pila en las dos ciudades (elaboración propia).

Como se puede observar, en una ciudad tipo Bilbao se requiere un poco más de potencia para alimentar al sistema. La gráfica es el resultado de sumar la potencia a velocidad crucero y la potencia necesaria para cargar la batería cuando esta se descarga. También se ha tenido en cuenta el consumo del BoP que se estima en 1,2A. Por tanto, la celda debe de ser capaz de dar 140 W, teniendo en cuenta el sobredimensionamiento del 20%.

Como se comentó en el apartado anterior, las pilas de combustible de cátodo abierto son más eficientes, por lo que se ha seleccionado una de este tipo.

Se ha hecho una búsqueda de pilas de combustibles comerciales, y se ha escogido una celda de potencia nominal 200W de la casa comercial Horizon Fuel Cell. Con ella se garantiza cubrir la potencia en todo momento. En estos equipos 200W es la potencia eléctrica suministrada por el equipo.

En la Figura 60 se muestra la pila de combustible elegida, y en la Tabla 10 sus propiedades, ambos obtenidos del catálogo del fabricante.



Figura 60 Celda de combustible de hidrógeno de cátodo abierto modelo H-200 de 200W de Horizon Fuel Cell.

Tabla 10 Propiedades de la celda de combustible H-200 de 200 W de Horizon Fuel Cell.

Tipo de celda	PEMFC
Número de celdas	40
Punto óptimo de funcionamiento	24 V@8,3A
Reactivos	H2 y aire
Presión del hidrógeno	0,45-0,55 bar
Temperatura máxima de diseño	65 °C
Refrigeración	Aire (integra un ventilador)
Peso del stack	2230 g
Peso del controlador	400 g
Flujo de H2 a máxima carga de trabajo	2,6 L/min
Tiempo de arranque	30 s
Pureza del hidrógeno	99,995 %
Eficiencia del sistema	40 %@24 V
Voltaje mínimo por sobreprotección	20V
Corriente máxima por protección	12 A
Alimentación eléctrica externa	13 V,5 A
Tamaño del stack	118x183x94 mm

En este caso el fabricante proporciona las curvas de Potencia- Corriente y Voltaje-Corriente.

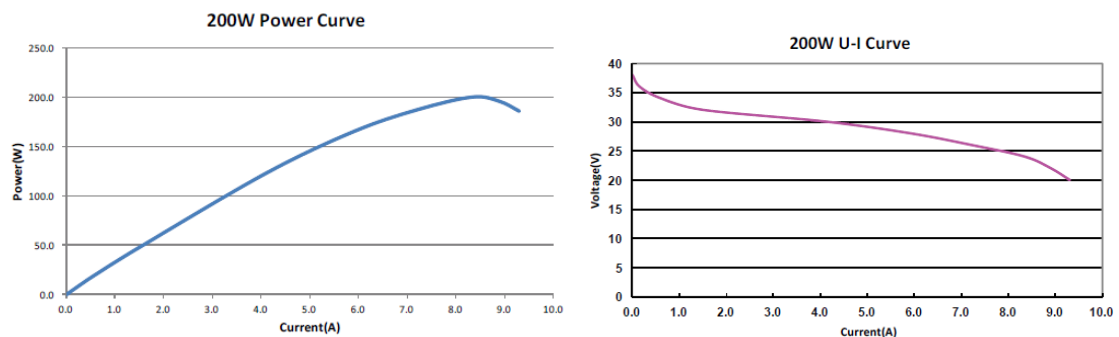


Figura 61 Curvas P-I y V-I de la pila de combustible elegida.

De la curva P-I se obtiene el punto de máxima eficiencia. Y en la curva V-I se obtiene la evolución del voltaje con la intensidad.

5.3 Cálculo de hidrógeno consumido

A un apilamiento de varias celdas se le denomina stack. Normalmente el potencial de una sola celda no es suficiente, se colocan varias en serie y se suma las potencias individuales para obtener la total.

$$U_{stack} = N_{cell} \cdot E_{cell} \quad (\text{Ec. 64})$$

Tras seleccionar una celda concreta, se determina cuántas se necesitan colocar en serie para obtener una potencia de salida de la pila deseada para el caso de aplicación.

La potencia que entrega el stack de la pila se obtiene multiplicando el potencial total del stack por la intensidad:

$$P_{FC} = I_{FC} \cdot U_{stack} \quad (\text{Ec. 65})$$

Por lo tanto, como se puede observar, se tiene dos variables. Para variar el potencial del stack se ponen más o menos FC en serie; mientras que la I depende de cuánta reacción esté teniendo lugar simultáneamente, lo cual varía con la superficie del electrolito (y electrodos)

El consumo de reactivos se calcula mediante la ecuación de Faraday:

$$M_{H_2} = N_{cell} \cdot \frac{I}{n \cdot F} S_{H_2} \cdot t \quad (\text{Ec. 66})$$

Por otro lado, la cantidad de oxígeno estequiométrico que debe entrar a la pila:

$$V_{O_2} = \frac{1}{2} V_{H_2} \cdot S_{O_2} = \frac{1}{2} N_{cell} \cdot \frac{I}{n \cdot F} S_{H_2} \cdot S_{O_2} \quad (\text{Ec. 67})$$

Teniendo en cuenta que a la pila se introduce aire, no oxígeno puro, hay que tener en cuenta la proporción de oxígeno en el aire (21%).

$$V_{Aire} = \frac{1}{0,21} V_{O_2} = 2,38 \cdot V_{H_2} \cdot V_{O_2} = 2,38 \frac{1}{2} N_{cell} \cdot \frac{I}{n \cdot F} S_{H_2} \cdot S_{O_2} \quad (\text{Ec. 68})$$

En la siguiente tabla se muestra el hidrógeno obtenido que se consume en cada ciudad siguiendo la ley de Faraday. También se muestra el hidrógeno que teóricamente se debería consumir según el fabricante.

Según el catálogo se consume 2,6l/min a máxima potencia. Se ha observado que para una pila con la mitad de potencia nominal el caudal consumido es también la mitad, y para una pila del doble de potencia se consume el doble de caudal. Por tanto, para calcular el consumo a diferentes potencias requeridas a lo largo del circuito se ha considerado una relación lineal entre estos dos factores. Suponiendo gas ideal y que se alimenta al sistema a 0,5 bar de media, empleando la ley de los gases ideales se obtiene la masa total de hidrógeno consumida.

Tabla 11 Hidrógeno consumido calculado y teórico.

	Hidrógeno consumido en Valencia (g)	Hidrógeno consumido en Bilbao (g)
Hidrógeno teórico	11,22	12,12
Hidrógeno según fabricante	11,41	12,33

Por un lado, se puede ver que el consumo calculado por los dos métodos es bastante similar, esto da consistencia a los resultados. Por otro vemos que en Bilbao se consume en torno a un 8% más de hidrógeno. Esto es debido a la mayor potencia requerida para cumplir con los requisitos del circuito y se traduce en que para una cantidad de partida de hidrógeno disponible, en esta ciudad se tendrá menor autonomía.

Una vez seleccionadas la batería y la pila, falta por seleccionar la botella de hidrógeno que alimentará al sistema. Existen botellas de diferentes volúmenes, para seleccionarla se debe tener en cuenta el espacio disponible en el dispositivo.

Dentro del espacio disponible se proponer colocar la botella de hidrógeno en la silla tiene una anchura de 61 cm. Se ha elegido una botella de la marca comercial *HES Energy Systems*, en concreto el modelo F7.2, cuyo largo cumple con la anchura del vehículo y además se dispone de una gran cantidad de hidrógeno.

Tabla 12 Características de la botella de hidrógeno modelo F7.2 de HES Energy Systems.

Modelo	F7.2
Peso	2,8 kg
Volumen (l)	7,2 L
Gramos de hidrógeno almacenados	193 g
Dimensiones	Diámetro=161mm L=545mm
Capacidad energética máxima estimada	2300 Wh
Presión del hidrógeno	300 bar

Una vez seleccionada la botella y conocido el hidrógeno que almacena se extrapolan los datos obtenidos en el estudio para calcular la autonomía proporcionada por una botella entera. Conociendo que la botella almacena 193 gramos de hidrógeno y con los datos de la Tabla 11.

Tabla 13 Autonomía del sistema propuesto.

	Valencia	Bilbao
Hidrógeno consumido (g)	11,22	12,12
Km recorrido	9,76	9,76
Km de Autonomía	163,75	155,60
Tiempo de autonomía (h)	34,38	31,84

Como se puede observar, en Valencia se obtiene una mayor autonomía, en concreto un 8,15% más de autonomía. Esto se debe a que su superficie mayormente plana requiere menos potencia a velocidad crucero y por tanto consume menos hidrógeno. Esto se traduce en que se va a tardar menos en gastar la botella de hidrógeno disponible.

Para calcular el estado de carga de la botella. Para calcular el volumen consumido en condiciones estándar se ha empleado la ley de los gases ideales (Ec. 69), y para calcularlo a la presión a la que se encuentra la botella se ha empleado el factor de compresibilidad (Z), que para la presión de 300 bar y temperatura ambiente $Z=1,18716$ (de Assas et al, 2008) (Ec. 70)

$$p_1 \cdot V_1 = n \cdot R \cdot T \quad (\text{Ec. 69})$$

$$p_2 \cdot V_2 = z \cdot n \cdot R \cdot T \quad (\text{Ec. 70})$$

$$\frac{p_1 \cdot V_1}{p_2 \cdot V_2} = \frac{1}{z} \quad (\text{Ec. 71})$$

De esta forma, sabiendo que el volumen inicial de la botella son 7,2l,; se obtiene la evolución del estado de carga:

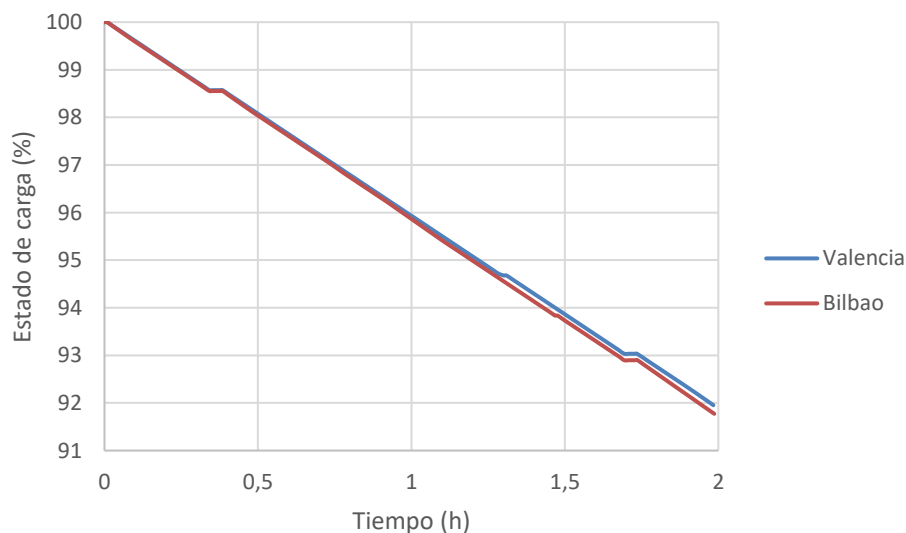


Figura 62 Evolución del estado de carga de la botella en las dos ciudades.

5.3.1 Colocación de los elementos en el vehículo

Se debe garantizar que los elementos seleccionados caben en el espacio disponible en el vehículo. No se conoce las dimensiones exactas del compartimiento donde se encuentran las baterías, pero se ha encontrado en catálogos que una batería de este tipo, con el mismo pesaje y características (11 kg, 12 V y 36 Ah) ocupa aproximadamente 196x132x158 mm. Se ha diseñado un compartimiento con el mismo largo y alto, pero con el doble de ancho, con un poco de holgura para otros elementos que tenga el dispositivo. 200x300x165 mm.

Las dimensiones del stack de la celda de combustible son 118x183x94 mm, y las de la batería 163x74x76mm, por tanto, hay espacio suficiente para alojar la celda de combustible y la electrónica necesaria para completar el sistema.

En la siguiente figura se muestra el espacio disponible y el que ocuparían los equipos en él:

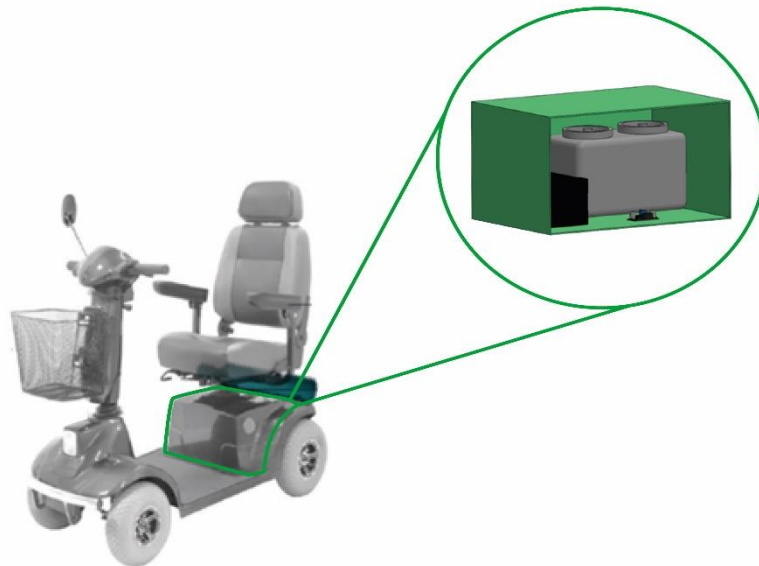


Figura 63 Posición de los elementos en el espacio disponible.

5.4 Cálculo de los contaminantes no emitidos

El diseño propuesto no se conecta a la red eléctrica, el único combustible que se le proporciona es el hidrógeno. En una situación ideal este hidrógeno es hidrógeno verde, y se ha obtenido mediante hidrólisis del agua empleando energía renovable. Por tanto, se puede considerar que el vehículo emite cero emisiones.

En cambio, si se emplea un vehículo tradicional que funciona sólo mediante una batería de plomo ácido que se debe conectar todos los días a la red eléctrica lleva asociados unas emisiones. Actualmente la red eléctrica suministra energía procedente de muchas fuentes (carbón, gas, nuclear, eólica, hidráulica, etc.), y algunas de ellas sí que emiten contaminantes al medioambiente.

Para calcular las emisiones asociadas a esta energía necesaria para cargar las baterías que impulsan el vehículo, debe tenerse en cuenta el factor de emisión de CO₂ atribuible al suministro eléctrico conocido como mix eléctrico (g de CO₂eq/kWh). Este factor representa las emisiones asociadas a la generación eléctrica conectada a la red nacional necesaria para cubrir el consumo.

El CO₂eq es una medida de la huella de carbono. Engloba a todas las emisiones de gases de efecto invernadero, no solo el CO₂.

Según La Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia (CNMC) en fecha 20 de abril de 2022 es de 259 g CO₂ eq/kWh (CNMC, n.d.)

El scooter de estudio de este TFM emplea 2 baterías de 12V y 36Ah. Para cargarse necesitan 5A externos. Por tanto, tardan 7,2 h en cargarse. En una hora consumen entre las dos 120W

$$g \text{ CO}_{2,eq} = kWh \cdot \frac{g \text{ CO}_{2,eq}}{kWh} \quad (\text{Ec. 72})$$

Teniendo en cuenta la potencia por hora, las horas que tarda en cargarse y el mix eléctrico, se obtiene que cada vez que se cargan las baterías al completo se emiten un total de 223, 77g CO₂eq. Con esto se consigue una autonomía máxima de 30 km según el fabricante.

Si bien es cierto, que podríamos emplear la energía renovable para cargar las baterías del vehículo, lo que también lo convertiría en un vehículo con 0 emisiones, hay que esperar a que toda la red eléctrica este suministrada con energía renovable, lo cual queda un tiempo para conseguirlo. Sin embargo, hay multitud de proyectos actuales que se orientan en emplear la energía sobrante en las fuentes renovables durante las horas valle para emplear ese hidrógeno como fuente energética en ciertas aplicaciones de interés.

6 CONCLUSIONES

En este capítulo se exponen las principales conclusiones que se deducen de los resultados obtenidos a lo largo de la realización del trabajo. También se discute si se han alcanzado los objetivos propuestos, así como las posibles líneas futuras de trabajo para la continuación de este.

6.1 Conclusiones

En este Trabajo Final de Máster se ha estudiado la incorporación de un sistema híbrido formado por una pila de combustible de hidrógeno y una batería a un scooter empleado por personas con movilidad reducida. En esta configuración la pila de hidrogeno es la fuente principal de energía y la batería es un dispositivo auxiliar que garantiza el correcto funcionamiento en los picos de demanda y absorbe la energía de frenado.

Para definir la potencia que deben proporcionar los elementos se han definido dos curvas de demanda para dos geografías diferentes: una mayormente plana como Valencia y otra con un recorrido con mayor inclinación del terreno como Bilbao.

Una correcta definición de la curva de demanda es muy importante para optimizar el dimensionamiento de los equipos. Se han empleado datos experimentales de la literatura, pero estos no tienen presente el frenado regenerativo. Para estimar esto último se ha propuesto un cálculo basado en mecánica básica.

Para dimensionar la pila de combustible se ha estimado la potencia necesaria para cumplir con la demanda requerida en los tramos a la velocidad de crucero, más la energía necesaria para cargar la batería y la corriente que alimenta el balance de planta. Además, se ha considerado un sobredimensionamiento del 20%. Siguiendo estos criterios de diseño se ha seleccionado una pila de combustible de 200 W.

Para el dimensionamiento de la batería se han estudiado diferentes configuraciones. En la Figura 15 se muestra la autonomía obtenida para cada caso y el peso del sistema de propulsión. Para comparar los resultados se han empleado los datos de Bilbao, ya que representan una situación más desfavorable.

Tabla 14 Síntesis de los resultados (Ver pág. 81 y Tabla 13).

	Baterías de plomo-ácido 36 Ah	Baterías de litio 100 Ah 1C	Pila de combustible 200W + batería 20 Ah 5C
Autonomía (km)	30	80,83	155,60
Peso (kg)	22,5	22	6,84

Cambiar las baterías de plomo ácido convencionales por unas de litio del mismo peso, que poseen más energía específica, ya supone una mejora significativa en la autonomía. Se consigue más del doble de autonomía. No obstante, este Trabajo Final de Máster tenía como objetivo el estudio de la incorporación de una pila de combustible para analizar las mejoras que se obtienen.

En cuanto al sistema híbrido propuesto, se ha probado con baterías de diferentes dimensiones para optimizar el sistema, teniendo en cuenta para ello el frenado regenerativo. El planteamiento inicial es que la batería sea capaz de proporcionar los picos necesarios de potencia. Se ha comenzado estudiando una batería con una capacidad moderada de 2 Ah pero como una capacidad de descarga elevada, de 20C, la cual es capaz de proporcionar la corriente necesaria en el circuito propuesto. No obstante, esta podría ser insuficiente en un circuito más exigente debido a su lenta carga. Por eso se ha propuesto una de 20 Ah y una ratio de descarga 5C.

El peso total del sistema propuesto es 6,84 kg, engloba el peso del stack de celdas de combustible, la botella de hidrógeno y la batería. Con este conjunto de potencia se obtiene una autonomía de 155 km en el caso de Bilbao, frente a los 30 km de autonomía que proporcionan las baterías de plomo ácido con un peso de 22 kg.

Por tanto, se ha comprobado que incorporando la celda de combustible al vehículo se obtiene una autonomía cinco veces mayor reduciendo el peso del sistema de propulsión de 22,5 a 6,48 kg. Esto puede mejorar sustancialmente la vida de las personas que emplean este tipo de vehículo, ya que actualmente tienen que dejar cargando las baterías durante horas.

Por tanto, se concluye que utilizar el hidrógeno en este tipo de aplicaciones supone una mejora de las prestaciones. En este caso se consigue un vehículo con una mayor autonomía, que no requiere largos tiempos de recarga, más que la recarga de la botella de hidrógeno.

Estos resultados ponen de manifiesto la utilidad del hidrógeno como fuente para impulsar vehículos. Son competitivos con los vehículos de gasolina en cuanto a tiempo de recarga, y junto con baterías se podría garantizar sus prestaciones, garantizando cero emisiones locales. El hidrógeno va a ser una pieza clave en la lucha contra el cambio climático.

6.2 Líneas futuras de trabajo

Este trabajo pone como punto de partida el dimensionamiento preliminar del tamaño de la celda de combustible y la batería que se requieren para alimentar a un sistema de este tipo, y se han observado posibles vías de investigación del trabajo realizado.

Para comenzar a enriquecer el proyecto, se podría describir una curva de demanda más precisa y que englobe más posibles escenarios. Existe muy poca información al respecto en la literatura y que además no cuentan con frenador regenerativo.

Para obtener curvas de respuesta de los componentes se puede emplear otras herramientas de software, como TRNSYS, programadas para hacer un estudio dinámico de la respuesta ante la demanda. De esta forma se puede optimizar el dimensionamiento de los equipos.

El siguiente paso sería realizar experimentos prácticos con un prototipo funcional y estudiar la viabilidad real del sistema. Esto incluye hacer un diseño más detallado de la disposición de los elementos en el vehículo haciendo un estudio de análisis del riesgo que conlleva llevar un equipo a tan elevada presión (300 bar).

Hacer un estudio de viabilidad económica y de contaminación, ya que actualmente el hidrógeno suministrado podría no ser verde. Además, las pilas de combustible requieren de metales caros y limitados.

7 BIBLIOGRAFÍA

- Abdelkareem, M. A., Elsaid, K., Wilberforce, T., Kamil, M., Sayed, E. T., & Olabi, A. (2021). Environmental aspects of fuel cells: A review. *Science of The Total Environment*, 752, 141803. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.141803>
- AIE. (2019). *Datos y Estadísticas - Agencia Internacional de la Energía*. [https://www.iea.org/data-and-statistics/data-browser?country=WORLD&fuel=Energy supply&indicator=ElecGenByFuel](https://www.iea.org/data-and-statistics/data-browser?country=WORLD&fuel=Energy%20supply&indicator=ElecGenByFuel)
- Akinyele, D. O., & Rayudu, R. K. (2014). Review of energy storage technologies for sustainable power networks. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 8, 74–91. <https://doi.org/10.1016/J.SETA.2014.07.004>
- Alamoudi, Y. A., Ferrah, A., Panduranga, R., Althobaiti, A., & Mulolani, F. (2019). State-of-the-Art Electrical Machines for Modern Electric Vehicles. *2019 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences, ASET 2019*. <https://doi.org/10.1109/ICASET.2019.8714343>
- Alanne, K., & Cao, S. (2019). An overview of the concept and technology of ubiquitous energy. *Applied Energy*, 238, 284–302. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2019.01.100>
- Alkire, R. C., Gerischer, H., Kolb, D. M., & Tobias, C. W. (2008). Advances in Electrochemical Science and Engineering. *Advances in Electrochemical Science and Engineering*, 5, 1–430. <https://doi.org/10.1002/9783527616794>
- Amphlett, J. C., Baumert, R. M., Mann, R. F., Peppley, B. A., Roberge, P. R., & Harris, T. J. (1995). Performance modeling of the Ballard Mark IV solid polymer electrolyte fuel cell: I. Mechanistic model development. *Journal of the Electrochemical Society*, 142(1), 1.
- Anderson, T. R., Hawkins, E., & Jones, P. D. (2016). CO₂, the greenhouse effect and global warming: from the pioneering work of Arrhenius and Callendar to today's Earth System Models. *Endeavour*, 40(3), 178–187. <https://doi.org/10.1016/J.ENDEAVOUR.2016.07.002>
- Antig. (n.d.). *Antig | Type of Fuell Cells*. Retrieved July 1, 2022, from http://www.antig.com/technology/technology_fuel_cell_types.htm
- Aouzellag, H., Ghedamsi, K., & Aouzellag, D. (2015). Energy management and fault tolerant control strategies for fuel cell/ultra-capacitor hybrid electric vehicles to enhance autonomy, efficiency and life time of the fuel cell system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(22), 7204–7213. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2015.03.132>
- Baker, J. N., & Collinson, A. (1999). Electrical energy storage at the turn of the Millennium. *Power Engineering Journal*, 13(3), 107–112. <https://doi.org/10.1049/PE:19990301>
- Baykara, S. Z. (2018). Hydrogen: A brief overview on its sources, production and environmental impact. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(23), 10605–10614. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2018.02.022>
- Behdani, A., & Naseh, M. R. (2017). Power management and nonlinear control of a fuel cell–supercapacitor hybrid automotive vehicle with working condition algorithm. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(38), 24347–24357. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2017.07.197>
- Bergamo, J. E. (2016). *6. Esquema de funcionamiento de energía geotérmica. | Download Scientific Diagram*. https://www.researchgate.net/figure/6-Esquema-de-funcionamiento-de-energia-geotermica_fig6_323667570
- Bhattacharya, S. C. (2002). Biomass energy in Asia: a review of status, technologies and policies

- in Asia. *Energy for Sustainable Development*, 6(3), 5–10. [https://doi.org/10.1016/S0973-0826\(08\)60320-8](https://doi.org/10.1016/S0973-0826(08)60320-8)
- Bilgen, S., Keleş, S., Kaygusuz, A., Sari, A., & Kaygusuz, K. (2008). Global warming and renewable energy sources for sustainable development: A case study in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(2), 372–396. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2006.07.016>
- Bithas, K., & Kalimeris, P. (2016). *A Brief History of Energy Use in Human Societies*. 5–10. https://doi.org/10.1007/978-3-319-20732-2_2
- Boretti, A. (2020). Hydrogen internal combustion engines to 2030. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(43), 23692–23703. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2020.06.022>
- Boudghene Stambouli, A., & Traversa, E. (2002). Fuel cells, an alternative to standard sources of energy. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 6, Issue 3, pp. 295–304). Pergamon. [https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(01\)00015-6](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(01)00015-6)
- Bouquain, D., Blunier, B., & Miraoui, A. (2008). A hybrid fuel cell/battery wheelchair - Modeling, simulation and experimentation. *2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2008*. <https://doi.org/10.1109/VPPC.2008.4677671>
- Brandon, N. P., & Kurban, Z. (2017). Clean energy and the hydrogen economy. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 375(2098). <https://doi.org/10.1098/RSTA.2016.0400>
- Brown, T. L., LeMay Jr, H. E., Bursten, B. E., & Burdge, J. R. (2004). *Química: la ciencia central*. Pearson educación.
- Burke, A. F. (2007). Batteries and ultracapacitors for electric, hybrid, and fuel cell vehicles. *Proceedings of the IEEE*, 95(4), 806–820. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2007.892490>
- Chandra, R. (2018). *Unit-1 Introduction to Energy and its Various Forms*. IGNOU.
- Chen, H., Cong, T. N., Yang, W., Tan, C., Li, Y., & Ding, Y. (2009). Progress in electrical energy storage system: A critical review. *Progress in Natural Science*, 19(3), 291–312. <https://doi.org/10.1016/J.PNSC.2008.07.014>
- Chen, X., Shen, W., Vo, T. T., Cao, Z., & Kapoor, A. (2012). An overview of lithium-ion batteries for electric vehicles. *2012 10th International Power & Energy Conference (IPEC)*, 230–235. <https://doi.org/10.1109/ASSCC.2012.6523269>
- Churchill, S. W. (1997). The reduction of air pollution by improved combustion. *Energy Conversion and Management*, 38(10–13), 1335–1341. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(96\)00163-X](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(96)00163-X)
- CLR, C. L. de R. (n.d.). *Diferencias entre motores con escobillas y brushless – Blog CLR*. Cómo Seleccionar El Mejor Motor Eléctrico En Pequeños Accionamientos. Retrieved July 5, 2022, from <https://clr.es/blog/es/diferencias-motores-con-escobillas-brushless/>
- CNMC, C. N. de los M. y la C. (n.d.). ACUERDO SOBRE EL ETIQUETADO DE LA ELECTRICIDAD RELATIVO A LA ENERGÍA PRODUCIDA EN EL AÑO 2021. 2022.
- Council, W. E. (2013). World energy resources 2013 survey. *World Energy Council*, 1–468.
- Dawood, F., Anda, M., & Shafiullah, G. M. (2020). Hydrogen production for energy: An overview. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(7), 3847–3869. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2019.12.059>
- de Assas, P., Graña Otero, J.C., Leo Mena, T., & Perez Grande, I. (2008). *Apuntes de*

Termodinámica. Publicaciones de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos.

- Delfín Capote, P. (2021). *Análisis de sistemas del balance de planta en vehículos propulsados por pila de combustible de hidrógeno. (Trabajo Fin de Grado Inédito). Universidad de Sevilla, Sevilla.*
- Demirel, Y. (2016). *Energy Sources*, 35–71. https://doi.org/10.1007/978-3-319-29650-0_2
- Díaz Baizán, P. (2016). *SUPERCONDENSADORES HIBRIDOS ASIMETRICOS BASADOS EN MATERIALES DE CARBONO Y ESPECIES REDOX INORGANICAS.*
- Echeverri Londoño, C. (2017). *Predicción de los niveles sonoros asociados a los parques eólicos.* <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.16457.80483>
- Egré, D., & Milewski, J. C. (2002). The diversity of hydropower projects. *Energy Policy*, 30(14), 1225–1230. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(02\)00083-6](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(02)00083-6)
- Fathabadi, H. (2019). Combining a proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) stack with a Li-ion battery to supply the power needs of a hybrid electric vehicle. *Renewable Energy*, 130, 714–724. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2018.06.104>
- Feroldi, D., & Basualdo, M. (2012). Description of PEM Fuel Cells System. *Green Energy and Technology*, 87, 49–72. https://doi.org/10.1007/978-1-84996-184-4_2
- Fridleifsson, I. B. (2001). Geothermal energy for the benefit of the people. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 5(3), 299–312. [https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(01\)00002-8](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(01)00002-8)
- García, J. L. (2021). Electric power systems. *Cubesat Handbook*, 185–197. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817884-3.00009-6>
- Geng, B., Mills, J. K., & Sun, D. (2012). Two-stage energy management control of fuel cell plug-in hybrid electric vehicles considering fuel cell longevity. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 61(2), 498–508. <https://doi.org/10.1109/TVT.2011.2177483>
- Ghayad, A. (2021). *8 Differences between Hydrogen and Gasoline Combustion Engines.* <https://www.engineerine.com/2021/12/8-differences-between-hydrogen-and.html>
- Gielen, D., Boshell, F., Saygin, D., Bazilian, M. D., Wagner, N., & Gorini, R. (2019). The role of renewable energy in the global energy transformation. *Energy Strategy Reviews*, 24, 38–50. <https://doi.org/10.1016/J.ESR.2019.01.006>
- Gómez de Aguëro, M. L. (2019). *Bomba de calor geotérmica - Akiter.* <https://www.akiter.com/bomba-de-calor-geotermica/>
- Gomis-Bellmunt, O., Villafafila-Robles, R., & Sumper, A. (2012). *A review of energy storage technologies for wind power applications.*
- Guo, M., Song, W., & Buhain, J. (2015). Bioenergy and biofuels: History, status, and perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 712–725. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2014.10.013>
- Halbleib, A., Turner, M., & Naber, J. (2012). Control of battery electric vehicle charging for commercial time of day demand rate payers. *2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, ISGT 2012.* <https://doi.org/10.1109/ISGT.2012.6175728>
- Hall, P. J., & Bain, E. J. (2008). Energy-storage technologies and electricity generation. *Energy Policy*, 36(12), 4352–4355. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2008.09.037>
- Hegedus, S. (2011). *Achievements and Challenges of Solar Electricity from Photovoltaics Related papers.*

- Helmets, E., & Marx, P. (2012). Electric cars: Technical characteristics and environmental impacts. *Environmental Sciences Europe*, 24(4), 1–15. <https://doi.org/10.1186/2190-4715-24-14/FIGURES/2>
- Hemi, H., Ghouili, J., & Cheriti, A. (2014). A real time fuzzy logic power management strategy for a fuel cell vehicle. *Energy Conversion and Management*, 80, 63–70. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2013.12.040>
- IEO. (2021). International Energy Outlook 2021 with projections to 2050 Narrative. *Energy Information Administration, Us*. www.eia.gov
- Ingeoexpert. (2018). *¿Cómo funciona una central hidroeléctrica? | Ingeoexpert*. <https://ingeoexpert.com/2018/03/22/como-funciona-una-central-hidroelectrica/>
- Jacobson, M. Z., & Archer, C. L. (2012). Saturation wind power potential and its implications for wind energy. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(39), 15679–15684.
- Jahid, A., Monju, K. H., Hossain, S., & Hossain, F. (2019). Hybrid power supply solutions for off-grid green wireless networks. *International Journal of Green Energy*, 16(1), 12–33.
- Jiang, Z., Gao, L., & Dougal, R. A. (2005). Flexible multiobjective control of power converter in active hybrid fuel cell/battery power sources. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 20(1), 244–253. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2004.839782>
- Jungheinrich PROFISHOP. (2022). *Cómo funciona una batería de litio | Jungheinrich PROFISHOP*. <https://www.jungheinrich-profishop.es/es/guia-profi/como-funciona-una-bateria-de-litio/>
- Karatayev, M., Movkebayeva, G., & Bimagambetova, Z. (2019). Increasing Utilisation of Renewable Energy Sources: Comparative Analysis of Scenarios Until 2050. *Energy Security*, 37–68. https://doi.org/10.1007/978-3-030-01033-1_3
- Koohi-Fayegh, S., & Rosen, M. A. (2020). A review of energy storage types, applications and recent developments. *Journal of Energy Storage*, 27, 101047. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2019.101047>
- Kraa, O., Ghodbane, H., Saadi, R., Ayad, M. Y., Becherif, M., Aboubou, A., & Bahri, M. (2015). Energy Management of Fuel Cell/ Supercapacitor Hybrid Source Based on Linear and Sliding Mode Control. *Energy Procedia*, 74, 1258–1264. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2015.07.770>
- Kurnia, J. C., Chaedir, B. A., Sasmito, A. P., & Shamim, T. (2021). Progress on open cathode proton exchange membrane fuel cell: Performance, designs, challenges and future directions. *Applied Energy*, 283. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2020.116359>
- Larminie, J., Dicks, A., & McDonald, M. S. (2003). *Fuel cell systems explained* (Vol. 2). J. Wiley Chichester, UK.
- Liang, Y., Zhao, C. Z., Yuan, H., Chen, Y., Zhang, W., Huang, J. Q., Yu, D., Liu, Y., Titirici, M. M., Chueh, Y. L., Yu, H., & Zhang, Q. (2019). A review of rechargeable batteries for portable electronic devices. *InfoMat*, 1(1), 6–32. <https://doi.org/10.1002/INF2.12000>
- Linden, D. (2002). *Reddy.: TB Handbook of Batteries*. McGraw-Hill: New York, NY, USA.
- Londoño-Pulgarin, D., Cardona-Montoya, G., Restrepo, J. C., & Muñoz-Leiva, F. (2021). Fossil or bioenergy? Global fuel market trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 143, 110905. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2021.110905>
- López Martínez, J. M. (2018). *Vehículos híbridos y eléctricos. Ventajas e inconvenientes - Automoción*. <https://www.interempresas.net/Sector-Automocion/Articulos/216238->

Vehiculos-hibridos-y-electricos-Ventajas-e-inconvenientes.html

- López Sabirón, M. A. (2011). *Gestión térmica y del agua en una pila de combustible tipo PEM. Diseño y fabricación de pilas.*
- Lu, X., & McElroy, M. B. (2017). Global Potential for Wind-Generated Electricity. *Wind Energy Engineering: A Handbook for Onshore and Offshore Wind Turbines*, 51–73. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809451-8.00004-7>
- Lü, X., Miao, X., Liu, W., & Lü, J. (2018). Extension control strategy of a single converter for hybrid PEMFC/battery power source. *Applied Thermal Engineering*, 128, 887–897. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2017.09.003>
- Lü, X., Qu, Y., Wang, Y., Qin, C., & Liu, G. (2018). A comprehensive review on hybrid power system for PEMFC-HEV: Issues and strategies. *Energy Conversion and Management*, 171, 1273–1291. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2018.06.065>
- Luna-Rubio, R., Trejo-Perea, M., Vargas-Vázquez, D., & Ríos-Moreno, G. J. (2012). Optimal sizing of renewable hybrids energy systems: A review of methodologies. *Solar Energy*, 86(4), 1077–1088. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2011.10.016>
- Machado, M. A. (2021). *PRUEBAS DE VERIFICACIÓN CORRECTAS EN LAS BATERÍAS - Tb Plus Energy.* <https://tbplusenergy.com/2021/10/08/pruebas-de-verificacion-correctas-en-las-baterias/?lang=en>
- McLarnon, F. R., & Cairns, E. J. (1989). ENERGY STORAGE. *Annu. Rev. Energy*. 1989, 14, 241–271. www.annualreviews.org
- McNeill, J. R. (2000). *Something new under the sun : an environmental history of the twentieth-century world.* 421. https://books.google.com/books/about/Something_New_Under_the_Sun_An_Environment.html?hl=es&id=D4dOq9Llo_gC
- Meier, A., & Steinfeld, A. (2010). Solar Thermochemical Production of Fuels. *Advances in Science and Technology*, 74, 303–312. <https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/AST.74.303>
- Melikoglu, M. (2018). Current status and future of ocean energy sources: A global review. *Ocean Engineering*, 148, 563–573. <https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2017.11.045>
- Morgado Ramirez, D. Z., Rasha, L., Barbareschi, G., Suzuki, T., Caplan, I., McKinnon, I., Brett, D. J. L., & Holloway, C. (2019). Adjusted method to calculate an electric wheelchair power cycle: fuel cell implementation example. *Journal of Energy Storage*, 23, 371–380. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2019.01.027>
- Nations, U. (2019). World population prospects 2019. Vol (ST/ESA/SE. A/424) Department of Economic and Social Affairs: Population Division.
- Nicoletti, G., Arcuri, N., Nicoletti, G., & Bruno, R. (2015). A technical and environmental comparison between hydrogen and some fossil fuels. *Energy Conversion and Management*, 89, 205–213. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2014.09.057>
- Njoya Motapon, S., Dessaint, L. A., & Al-Haddad, K. (2014). A comparative study of energy management schemes for a fuel-cell hybrid emergency power system of more-electric aircraft. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(3), 1320–1334. <https://doi.org/10.1109/TIE.2013.2257152>
- Noussan, M., Raimondi, P. P., Scita, R., & Hafner, M. (2020). The Role of Green and Blue Hydrogen in the Energy Transition—A Technological and Geopolitical Perspective.

- Sustainability* 2021, Vol. 13, Page 298, 13(1), 298. <https://doi.org/10.3390/SU13010298>
- O’Hayre, R., Cha, S.-W., Colella, W., & Prinz, F. B. (2016a). Chapter 2: Fuel Cell Thermodynamics. *Fuel Cell Fundamentals*, 25–76. <https://doi.org/10.1002/9781119191766.ch2>
- O’Hayre, R., Cha, S.-W., Colella, W., & Prinz, F. B. (2016b). Chapter 3: Fuel Cell Reaction Kinetics. *Fuel Cell Fundamentals*, 77–116. <https://doi.org/10.1002/9781119191766.CH3>
- Olmo Esteban, G. (2019). *Caracterización de baterías de litio para el estudio del envejecimiento*.
- Orme, M. (2001). Estimates of the energy impact of ventilation and associated financial expenditures. *Energy and Buildings*, 33(3), 199–205. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(00\)00082-7](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(00)00082-7)
- Ould Amrouche, S., Rekioua, D., Rekioua, T., & Bacha, S. (2016). Overview of energy storage in renewable energy systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(45), 20914–20927. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2016.06.243>
- Palacín, M. R., & De Guibert, A. (2016). Batteries: Why do batteries fail? *Science*, 351(6273). https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1253292/ASSET/F1424BAD-E802-4DA9-AE13-B59EB7EB357E/ASSETS/GRAPHIC/351_1253292_FA.JPEG
- Pardo, N., Montero, Á., Martos, J., & Urchueguía, J. F. (2010). Optimization of hybrid – ground coupled and air source – heat pump systems in combination with thermal storage. *Applied Thermal Engineering*, 30(8–9), 1073–1077. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2010.01.015>
- Planas, O. (2021). *Fisión nuclear, qué es, reacciones en cadena y ejemplos*. <https://energia-nuclear.net/que-es-la-energia-nuclear/fision-nuclear>
- Powers, W. F., & Nicasri, P. R. (2000). Automotive vehicle control challenges in the 21st century. *Control Engineering Practice*, 8(6), 605–618. [https://doi.org/10.1016/S0967-0661\(99\)00199-9](https://doi.org/10.1016/S0967-0661(99)00199-9)
- RELiON. (n.d.). *Comparing Lithium Iron Phosphate with Lead Acid Batteries | RELiON*. Retrieved July 6, 2022, from <https://relionbattery.com/resource-center/technology/lithium-vs-lead-acid>
- Ritchie, H., & Roser, M. (2020). Energy. *Our World in Data*. <https://ourworldindata.org/energy>
- Rivas, P. (2013). *Energía Solar Térmica | ¿Cómo funciona?* <https://instalacionesyeficienciaenergetica.com/como-funciona-la-energia-solar-termica/>
- Rühl, C. (2008). *BP Statistical Review of World Energy*. www.bp.com/statisticalreview
- Sanabria Betancur, E. A., David, J., Ramos, S., Tecnológica, U., Pereira, D. E., De, F., Ingeniería, T., & Pereira, M. (2016). *SISTEMA DE CONTROL DE VELOCIDAD DE UN MOTOR TRIFÁSICO MEDIANTE UN VARIADOR DE FRECUENCIA Y SISTEMA SCADA*.
- Sánchez Pérez, R. (n.d.). *Central térmica - Tecnologías Rubén*. Retrieved June 29, 2022, from <http://tecnologiasruben.weebly.com/central-teacutermica.html>
- Sasaki, T., Ukyo, Y., & Novák, P. (2013). Memory effect in a lithium-ion battery. *Nature Materials* 2013 12:6, 12(6), 569–575. <https://doi.org/10.1038/nmat3623>
- Schäfer, A., Heywood, J. B., & Weiss, M. A. (2006). Future fuel cell and internal combustion engine automobile technologies: A 25-year life cycle and fleet impact assessment. *Energy*, 31(12), 2064–2087. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2005.09.011>

- SEG & G Services, Ralph M. Parsons Company, & S. A. I. C. (2000). *Fuel Cell Handbook*. DIANE Publishing.
- Segura, F., Andújar, J. M., & Durán, E. (2011). Analog current control techniques for power control in PEM fuel-cell hybrid systems: A critical review and a practical application. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(4), 1171–1184. <https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2049710>
- Shafiee, S., & Topal, E. (2009). When will fossil fuel reserves be diminished? *Energy Policy*, 37(1), 181–189. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2008.08.016>
- Sherif, S. A., Barbir, F., & Veziroglu, T. N. (2005). Wind energy and the hydrogen economy—review of the technology. *Solar Energy*, 78(5), 647–660. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2005.01.002>
- Sheykhi, M., Chahartaghi, M., Balakheli, M. M., Hashemian, S. M., Miri, S. M., & Rafiee, N. (2019). Performance investigation of a combined heat and power system with internal and external combustion engines. *Energy Conversion and Management*, 185, 291–303. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2019.01.116>
- Sime Poma, L. (2010). *Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo PNUD. Informe de desarrollo humano. La verdadera riqueza de las naciones: Caminos al desarrollo humano. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa, 2010. http://hdr.undp.org/en/media/HDR_2010_ES_Complete.pdf.*
- Sinsel, S. R., Riemke, R. L., & Hoffmann, V. H. (2020). Challenges and solution technologies for the integration of variable renewable energy sources—a review. *Renewable Energy*, 145, 2271–2285. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2019.06.147>
- Smil, V. (2019). *Energy in world history*. Routledge.
- Smith, J., Van Ness, H., & Abbot, M. (2007). Introducción a la termodinámica en Ingeniería Química. In *Introducción a la termodinámica en Ingeniería Química*.
- Song, M. K., Park, S., Alamgir, F. M., Cho, J., & Liu, M. (2011). Nanostructured electrodes for lithium-ion and lithium-air batteries: the latest developments, challenges, and perspectives. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 72(11), 203–252. <https://doi.org/10.1016/J.MSER.2011.06.001>
- Staffell, I., Scamman, D., Velazquez Abad, A., Balcombe, P., Dodds, P. E., Ekins, P., Shah, N., & Ward, K. R. (2019). The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system. *Energy & Environmental Science*, 12(2), 463–491. <https://doi.org/10.1039/C8EE01157E>
- Steinhauser, G., Brandl, A., & Johnson, T. E. (2014). Comparison of the Chernobyl and Fukushima nuclear accidents: A review of the environmental impacts. *Science of The Total Environment*, 470–471, 800–817. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2013.10.029>
- Strahl, S., Husar, A., Riera, J., & Costa Castelló, R. (2014). Control de temperatura en pilas de combustible tipo PEM de cátodo abierto. *Actas de Las XXXV Jornadas de Automática*, 215–221.
- Takahashi, Y., Matsuo, S., & Kawakami, K. (2008). Hybrid robotic wheelchair with photovoltaic solar cell and fuel cell. *2008 International Conference on Control, Automation and Systems, ICCAS 2008*, 1636–1640. <https://doi.org/10.1109/ICCAS.2008.4694494>
- Taljan, G., Fowler, M., Cañizares, C., & Verbič, G. (2008). Hydrogen storage for mixed wind–nuclear power plants in the context of a Hydrogen Economy. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(17), 4463–4475. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2008.06.040>

- Tang, X., Wang, Y., & Chen, Z. (2015). A method for state-of-charge estimation of LiFePO₄ batteries based on a dual-circuit state observer. *Journal of Power Sources*, 296, 23–29. <https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2015.07.028>
- Tarascon, M. A. & J.-M. (2008). Building better batteries. *Nature* 2008 451:7179, 451(7179), 652–657. <https://doi.org/10.1038/451652a>
- Thomas, C. E. (2009). Fuel cell and battery electric vehicles compared. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(15), 6005–6020. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2009.06.003>
- Tian, Y., & Zhao, C. Y. (2013). A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications. *Applied Energy*, 104, 538–553. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2012.11.051>
- Tromly, K. (2001). *Renewable Energy: An Overview*.
- Turkenburg, W., Arent, D. J., Bertani, R., Faaij, A., Hand, M., Krewitt, W., Larson, E. D., Lund, J., Mehos, M., Merrigan, T., & others. (2012). *Global Energy Assessment (GEA): Renewable Energy*.
- Twidell, J. (2021). Renewable Energy Resources. *Renewable Energy Resources*. <https://doi.org/10.4324/9780429452161>
- Verhelst, S., & Wallner, T. (2009). Hydrogen-fueled internal combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, 35(6), 490–527. <https://doi.org/10.1016/J.PECS.2009.08.001>
- Vishnumurthy, K. A., & Girish, K. H. (2021). A comprehensive review of battery technology for E-mobility. *Journal of the Indian Chemical Society*, 98(10), 100173. <https://doi.org/10.1016/J.JICS.2021.100173>
- Wang, F. C., & Chiang, Y. S. (2012). Design and control of a PEMFC powered electric wheelchair. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(15), 11299–11307. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2012.04.156>
- Wang, Y., Moura, S. J., Advani, S. G., & Prasad, A. K. (2019). Power management system for a fuel cell/battery hybrid vehicle incorporating fuel cell and battery degradation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(16), 8479–8492. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2019.02.003>
- White, C. M., Steeper, R. R., & Lutz, A. E. (2006). The hydrogen-fueled internal combustion engine: a technical review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 31(10), 1292–1305. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2005.12.001>
- Whittingham, M. S. (2012). History, Evolution, and Future Status of Energy Storage. *Proceedings of the IEEE*, 100(Special Centennial Issue), 1518–1534. <https://doi.org/10.1109 / JPROC.2012.2190170>
- Wood Mackenzie. (2020). *The future for green hydrogen | Wood Mackenzie*. <https://www.woodmac.com/news/editorial/the-future-for-green-hydrogen/>
- Xu, L., Li, J., Ouyang, M., Hua, J., & Yang, G. (2014). Multi-mode control strategy for fuel cell electric vehicles regarding fuel economy and durability. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(5), 2374–2389. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2013.11.133>
- Yang, Y., Bremner, S., Menictas, C., & Kay, M. (2018). Battery energy storage system size determination in renewable energy systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91, 109–125. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2018.03.047>
- Yang, Y. P., Guan, R. M., & Huang, Y. M. (2012). Hybrid fuel cell powertrain for a powered

- wheelchair driven by rim motors. *Journal of Power Sources*, 212, 192–204. <https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2012.04.012>
- Yeetsorn, R., Maiket, Y., & Kaewmanee, W. (2020). The observation of supercapacitor effects on PEMFC--supercapacitor hybridization performance through voltage degradation and electrochemical processes. *RSC Advances*, 10(22), 13100–13111.
- Yu, Z., Zinger, D., & Bose, A. (2011). An innovative optimal power allocation strategy for fuel cell, battery and supercapacitor hybrid electric vehicle. *Journal of Power Sources*, 196(4), 2351–2359. <https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2010.09.057>
- Zhang, C., Zhang, S., Han, G., & Liu, H. (2017). Power management comparison for a dual-motor-propulsion system used in a battery electric bus. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(5), 3873–3882. <https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2645166>
- Zhou, D., Zhao, C. Y., & Tian, Y. (2012). Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications. *Applied Energy*, 92, 593–605. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2011.08.025>



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCOLA TÈCNICA
SUPERIOR ENGINYERIA
INDUSTRIAL VALÈNCIA

PRESUPUESTO

ESTUDIO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA HÍBRIDO
“PILA DE COMBUSTIBLE + BATERÍA” EN UN VEHÍCULO PARA
PERSONAS CON MOVILIDAD REDUCIDA

ÍNDICE DEL PRESUPUESTO

1	ALCANCE.....	1
2	COSTES DE PERSONAL	2
3	COSTE DE MATERIAL INVENTARIABLE.....	4
4	PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL	5
5	PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR CONTRATA	6
6	PRESUPUESTO BASE DE LICITACIONES.....	7

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Partida presupuestaria del coste personal.....	2
Tabla 2	Amortización en años del material inventariable.	4
Tabla 3	Partida presupuestaria del material inventariable.....	4
Tabla 4	Presupuesto de ejecución material.....	5
Tabla 5	Presupuesto de Ejecución por Contrata.....	6
Tabla 6	Presupuesto base de licitaciones.	7

1 ALCANCE

El alcance del TFM ha sido el prediseño del sistema de propulsión ‘celda de combustible+batería’ para alimentar a un vehículo, por lo tanto, los costes son aquellos asociados al trabajo de ingeniería básica necesario para seleccionar los equipos idóneos que solucionen el problema planteado y analizar su viabilidad. No obstante, esta selección no se ha basado en factores económicos, sino que se ha seleccionado en base a las características técnicas, como un estudio preliminar al montaje y pruebas experimentales. Es por esto por lo que el presupuesto se ha basado en cuantificar el coste de elaboración del trabajo de ingeniería necesario para desarrollar el proyecto. Este presupuesto se ha llevado a cabo siguiendo la guía *RECOMENDACIONES EN LA ELABORACIÓN DE PRESUPUESTOS EN ACTIVIDADES DE I+D+I* de la UPV. *Revisión de 2021*.

De acuerdo con esta guía, dentro del presupuesto entran los siguientes costes:

1. Personal
2. Material inventariable
3. Material fungible
4. Dietas y viajes
5. Subcontratación
6. Otros gastos
7. Costes indirectos

En este TFM se ha realizado tres partidas presupuestarias: el coste de personal para llevar a cabo el proyecto de ingeniería, el material inventariable, y otros gastos.

2 COSTES DE PERSONAL

En este capítulo se cuantifica el coste de personal que conlleva el proyecto. Este cálculo se lleva a cabo multiplicando el salario por hora de cada persona por el número de horas que le ha dedicado al trabajo. Estos costes horarios se han obtenido a partir de la *RECOMENDACIONES EN LA ELABORACIÓN DE PRESUPUESTOS EN ACTIVIDADES DE I+D+I* de la UPV. En ellas se muestran los salarios mínimos que debe cobrar el personal que trabaja en la universidad.

Aquí se incluye las horas dedicadas por la ingeniería Química con Grado María Vallejo Virtus, y la de los tutores Álvaro Montero Reguera y Carlos. Sánchez Díaz. Los tutores entran dentro de la categoría Titular de Universidad, en categoría de experto, por lo que su retribución salarial se establece en 41,3€/h; y la de María Vallejo entra dentro de la categoría Titulado superior, cuyo salario se debe encontrar en el rango (12,94-24,99), por lo que se ha establecido un salario de 20€/h.

La partida presupuestaria del costo personal se ha desglosado por etapas del proyecto, se ha contado cuántas horas se ha destinado a cada etapa y se ha calculado el coste total. Esto se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 1 Partida presupuestaria del coste personal.

	Coste/ud	Ud	Coste
Etapa 1: Estudio bibliográfico			
Titulado superior	20,00	100,0	2000,00
Titular de universidad 1	41,30	7,0	289,10
Titular de universidad 2	41,30	2,0	82,60
Coste total Etapa 1			2371,70
Etapa 2: Estudio comportamiento físico-químico de los subsistemas			
Titulado superior	20,00	90,0	1800,00
Titular de universidad 1	41,30	6,0	247,80
Titular de universidad 2	41,30	4,0	165,20
Coste total Etapa 2			2213,00
Etapa 3: Definición curva de demanda del vehículo			
Titulado superior	20,00	40,0	800,00
Titular de universidad 1	41,30	12,0	495,60
Titular de universidad 2	41,30	12,0	495,60

Estudio de la implementación de un sistema híbrido “pila de combustible + batería” en un vehículo para personas con movilidad reducida.

Coste total Etapa 3			1791,20
Etapa 4: Estudio de la implementación del sistema híbrido (ventajas y desventajas)			
Titulado superior	20,00	60,0	1200,00
Titular de universidad 1	41,30	10,0	413,00
Titular de universidad 2	41,30	10,0	413,00
Coste total Etapa 4			2026,00
Etapa 5: Análisis de los resultados y propuestas de futuras vías de investigación			
Titulado superior	20,00	10,0	200,00
Titular de universidad 1	41,30	3,0	123,90
Titular de universidad 2	41,30	3,0	123,90
Coste total Etapa 5			447,80
Gastos totales de Personal (€)			8849,70

3 COSTE DE MATERIAL INVENTARIABLE

En este capítulo se presupuesta la amortización de los equipos necesarios para realizar el trabajo que se ha llevado a cabo. Esto incluye el ordenador portátil empleado y el software utilizado para hacer los cálculos y la programación necesaria, el paquete Office, el cual también se ha empleado para la redacción de la memoria.

La amortización de estos elementos se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Amortización} = A / B \times C \times D \quad (\text{Ec. 73})$$

Donde A es el tiempo que se utiliza el equipo en el proyecto en años, B es el periodo de amortización (Ver Tabla 2), C es el coste del equipo y D es el porcentaje de uso del equipo en el proyecto.

Para estimar la amortización del equipo se siguen los parámetros de la guía seguida:

Tabla 2 Amortización en años del material inventariable.

Clasificación económica del gasto		Amortización (años)
68358	Adquisición de equipos para procesos de información	6
68359	Adquisición de aplicaciones informáticas	6
68360	Adquisición de maquinaria	12
68361	Adquisición de instalaciones técnicas	12
68362	Adquisición de útiles y herramientas	12
68363	Adquisición de otro inmovilizado material	12
68364	Adquisición de equipos didácticos y de investigación	10

Como se puede observar en la tabla anterior, tanto los equipos como las aplicaciones informáticas tienen un periodo de amortización de 6 años. El ordenador empleado para llevar a cabo el proyecto es un ordenador portátil que ha costado aproximadamente 700 €. El ordenador ha sido empleado durante toda la evolución del proyecto para la redacción y cálculos y lo mismo para el software utilizado que es el paquete office versión Estándar, se ha empleado durante todo el proyecto tanto para la redacción de los documentos como para los cálculos necesarios.

En la siguiente tabla se muestran la partida de costes de material inventariable:

Tabla 3 Partida presupuestaria del material inventariable

	Elemento	Ud.	A	B	C	D	Coste
2.1	Paquete Office Estándar	1	0,50	6	20	1	1,67
2.2	Ordenador portatil	1	0,50	6	700	1	58,33
	Coste total						60

4 PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL

Para obtener el presupuesto de ejecución de material (PEM) se debe obtener se suman las partidas presupuestarias obtenidas anteriormente.

Tabla 4 Presupuesto de ejecución material.

	Coste
Partida presupuestaria Coste personal	8849,70
Partida presupuestaria Material Inventariable	60
Total (€)	8909,70

El presupuesto de Ejecución Material suma un total de OCHO MIL NOVECIENTOS NUEVE EUROS CON SETENTA CÉNTIMOS.

5 PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR CONTRATA

A un proyecto también se le asocian costes indirectos. Estos son costes que no repercuten directamente con el proyecto, pero están relacionados con actividades de este o de la universidad. Entre estos gastos considerados se incluyen entre ellos gastos de personal, de administración y gasto corriente de las diferentes unidades estructurales. La mayoría de los organismos públicos que financian I+D contemplan costes indirectos, aunque no todos siguen el mismo criterio. Según la guía seguida, los costes indirectos suponen un 25% de todos los costes directos.

Además, se debe tener en cuenta el beneficio industrial (BI) del proyecto, que es aquella parte del precio final que se corresponde con el beneficio del empresario o contratista, normalmente se considera el 6% de los gastos generales.

Teniendo estos dos sobrecostes en cuenta se obtiene el Presupuesto de Ejecución por contrata (PEC), tal y como se puede ver en la siguiente tabla:

Tabla 5 Presupuesto de Ejecución por Contrata.

	Coste
Presupuesto ejecución material	8909,70
Costes indirectos (25%)	2227,42
Beneficio Industrial (6%)	534,58
Total (€)	11671,71

El Presupuesto de Ejecución por Contrata suma un total de ONCE MIL SEISCIENTOS SETENTA Y UN EUROS CON SETENTA Y UN CÉNTIMOS.

6 PRESUPUESTO BASE DE LICITACIONES

Una vez obtenido el Presupuesto de Ejecución por Contrata, se debe tener en cuenta los pagos que se deben hacer relacionados con los impuestos, los cuales son el 21%.

Tabla 6 Presupuesto base de licitaciones.

Presupuesto de Ejecución por Contrata	11671,71
IVA (21%)	2451,058
Total (€)	14122,77

El Presupuesto Base de Licitaciones suma un total de CATORCE MIL CIENTO VEINTI DOS EUROS CON SETENTA Y SIETE CÉNTIMOS.



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCOLA TÈCNICA
SUPERIOR ENGINYERIA
INDUSTRIAL VALÈNCIA

ANEXOS

ESTUDIO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA HÍBRIDO
“PILA DE COMBUSTIBLE + BATERÍA” EN UN VEHÍCULO PARA
PERSONAS CON MOVILIDAD REDUCIDA

1 ANEXO A

Potenciales de reducción de las principales reacciones electroquímicas:

Tabla A 1 Potenciales estándar de reducción (Brown et al., 2004).

Par redox	E°	Par redox	E°
$F_2 + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons 2HF(aq)$	3.06	$2H_2SO_3 + 2H^+ + 4e \rightleftharpoons S_2O_3^{2-} + 3H_2O$	0.40
$F_2 + 2e \rightleftharpoons 2F^-$	2.87	$Fe(CN)_6^{3-} + e \rightleftharpoons Fe(CN)_6^{4-}$	0.36
$O_3 + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons O_2 + H_2O$	2.07	$VO^{2+} + 2H^+ + e \rightleftharpoons V^{3+} + H_2O$	0.36
$S_2O_8^{2-} + 2e \rightleftharpoons 2SO_4^{2-}$	2.01	$Cu^{2+} + 2e \rightleftharpoons Cu$	0.34
$Co^{3+} + e \rightleftharpoons Co^{2+}$	1.82	$Hg_2Cl_2 + 2e \rightleftharpoons 2Hg + 2Cl^-$	0.28
$H_2O_2 + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons 2H_2O$	1.77	$IO_3^- + 3H_2O + 6e \rightleftharpoons I^- + 6OH^-$	0.26
$MnO_4^- + 4H^+ + 3e \rightleftharpoons MnO_2 + 2H_2O$	1.70	$AgCl + e \rightleftharpoons Ag + Cl^-$	0.22
$PbO_2 + SO_4^{2-} + 4H^+ + 2e \rightleftharpoons PbSO_4 + 2H_2O$	1.69	$HgBr_4^{2-} + 2e \rightleftharpoons Hg + 4Br^-$	0.21
$Au^+ + e \rightleftharpoons Au$	1.68	$Cu^{2+} + e \rightleftharpoons Cu^+$	0.15
$HClO_2 + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons HClO + H_2O$	1.64	$Sn^{4+} + 2e \rightleftharpoons Sn^{2+}$	0.15
$HClO + H^+ + e \rightleftharpoons \frac{1}{2}Cl_2 + H_2O$	1.63	$S + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons H_2S$	0.14
$Ce^{4+} + e \rightleftharpoons Ce^{3+}$	1.61	$CuCl + e \rightleftharpoons Cu + Cl^-$	0.14
$Bi_2O_4 + 4H^+ + 2e \rightleftharpoons 2BiO^+ + 2H_2O$	1.59	$AgBr + e \rightleftharpoons Ag + Br^-$	0.10
$BrO_3^- + 6H^+ + 5e \rightleftharpoons \frac{1}{2}Br_2 + 3H_2O$	1.52	$S_4O_6^{2-} + 2e \rightleftharpoons 2S_2O_3^{2-}$	0.08
$MnO_4^- + 8H^+ + 5e \rightleftharpoons Mn^{2+} + 4H_2O$	1.51	$CuBr + e \rightleftharpoons Cu + Br^-$	0.03
$PbO_2 + 4H^+ + 2e \rightleftharpoons Pb^{2+} + 2H_2O$	1.46	$2H^+ + 2e \rightleftharpoons H_2$	0.00
$Cl_2 + 2e \rightleftharpoons 2Cl^-$	1.36	$HgI_4^{2-} + 2e \rightleftharpoons Hg + 4I^-$	-0.04
$Cr_2O_7^{2-} + 14H^+ + 6e \rightleftharpoons 2Cr^{3+} + 7H_2O$	1.33	$Pb^{2+} + 2e \rightleftharpoons Pb$	-0.13
$MnO_2 + 4H^+ + 2e \rightleftharpoons Mn^{2+} + 2H_2O$	1.23	$CrO_4^{2-} + 4H_2O + 3e \rightleftharpoons Cr(OH)_3 + 5OH^-$	-0.13
$O_2 + 4H^+ + 4e \rightleftharpoons 2H_2O$	1.23	$Sn^{2+} + 2e \rightleftharpoons Sn$	-0.14
$IO_3^- + 6H^+ + 5e \rightleftharpoons \frac{1}{2}I_2 + 3H_2O$	1.20	$AgI + e \rightleftharpoons Ag + I^-$	-0.15
$ClO_4^- + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons ClO_3^- + H_2O$	1.19	$CuI + e \rightleftharpoons Cu + I^-$	-0.19
$Br_2(aq) + 2e \rightleftharpoons 2Br^-$	1.09	$Ni^{2+} + 2e \rightleftharpoons Ni$	-0.25
$Br_2(liq) + 2e \rightleftharpoons 2Br^-$	1.07	$V^{3+} + e \rightleftharpoons V^{2+}$	-0.26
$Br_3^- + 2e \rightleftharpoons 3Br^-$	1.05	$PbCl_2 + 2e \rightleftharpoons Pb + 2Cl^-$	-0.27
$VO_2^+ + 2H^+ + e \rightleftharpoons VO^{2+} + H_2O$	1.00	$Co^{2+} + 2e \rightleftharpoons Co$	-0.28
$AuCl_4^- + 3e \rightleftharpoons Au + 4Cl^-$	1.00	$PbBr_2 + 2e \rightleftharpoons Pb + 2Br^-$	-0.28
$NO_3^- + 4H^+ + 3e \rightleftharpoons NO + 2H_2O$	0.96	$PbSO_4 + 2e \rightleftharpoons Pb + SO_4^{2-}$	-0.36
$NO_3^- + 3H^+ + 2e \rightleftharpoons HNO_2 + H_2O$	0.94	$PbI_2 + 2e \rightleftharpoons Pb + 2I^-$	-0.37
$2Hg^{2+} + 2e \rightleftharpoons Hg_2^{2+}$	0.92	$Cd^{2+} + 2e \rightleftharpoons Cd$	-0.40
$AuBr_4^- + 3e \rightleftharpoons Au + 4Br^-$	0.87	$Cr^{3+} + e \rightleftharpoons Cr^{2+}$	-0.41
$Cu^{2+} + I^- + e \rightleftharpoons CuI$	0.86	$Fe^{2+} + 2e \rightleftharpoons Fe$	-0.44
$Hg_2^{2+} + 2e \rightleftharpoons Hg$	0.85	$2CO_2(g) + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons H_2C_2O_4(aq)$	-0.49
$Ag^+ + e \rightleftharpoons Ag$	0.80	$Cr^{3+} + 3e \rightleftharpoons Cr$	-0.74
$Hg_2^{2+} + 2e \rightleftharpoons 2Hg$	0.79	$Zn^{2+} + 2e \rightleftharpoons Zn$	-0.76
$Fe^{3+} + e \rightleftharpoons Fe^{2+}$	0.77	$H_2O + e \rightleftharpoons \frac{1}{2}H_2 + OH^-$	-0.83
$PtCl_4^{2-} + 2e \rightleftharpoons Pt + 4Cl^-$	0.73	$Cr^{2+} + 2e \rightleftharpoons Cr$	-0.91
$Q + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons H_2Q$	0.70	$Mn^{2+} + 2e \rightleftharpoons Mn$	-1.18
$O_2 + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons H_2O_2$	0.68	$Al^{3+} + 3e \rightleftharpoons Al$	-1.66
$PtBr_4^{2-} + 2e \rightleftharpoons Pt + 4Br^-$	0.58	$Mg^{2+} + 2e \rightleftharpoons Mg$	-2.37
$MnO_4^- + e \rightleftharpoons MnO_4^{2-}$	0.56	$Na^+ + e \rightleftharpoons Na$	-2.71
$H_3AsO_4 + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons HAsO_2 + 2H_2O$	0.56	$Ca^{2+} + 2e \rightleftharpoons Ca$	-2.87
$I_3^- + 2e \rightleftharpoons 3I^-$	0.54	$Sr^{2+} + 2e \rightleftharpoons Sr$	-2.89
$I_2(s) + 2e \rightleftharpoons 2I^-$	0.54	$Ba^{2+} + 2e \rightleftharpoons Ba$	-2.90
$Cu^+ + e \rightleftharpoons Cu$	0.52	$K^+ + e \rightleftharpoons K$	-2.93
$4H_2SO_3 + 4H^+ + 6e \rightleftharpoons S_4O_6^{2-} + 6H_2O$	0.51	$Li^+ + e \rightleftharpoons Li$	-3.05

2 ANEXO B

A continuación, se muestran algunos desarrollos de termodinámica básica necesarios para comprender el comportamiento de la celda de combustible. La variación de la energía interna del sistema es igual al calor que se le aplica menos el trabajo realizado por el propio sistema.

$$\Delta U = Q + W_{Eléc} \quad (B. 1)$$

Según la segunda ley de la termodinámica ningún mecanismo puede funcionar de manera que su único efecto en el sistema y en los alrededores sea la conversión completa del calor que el sistema absorbe en trabajo hecho por él mismo (Smith et al., 2007). No establece que no sea posible que el calor se convierta en trabajo.

Existe una propiedad llamada entropía S , una propiedad intrínseca de un sistema que se relaciona de manera funcional a las coordenadas mensurables que caracterizan al sistema. Para un proceso reversible los cambios en esta propiedad se conocen por la siguiente ecuación.

$$dS = \frac{dQ_{rev}}{T} \quad (B. 2)$$

Continuando con la primera ley, si en ella consideramos el trabajo mecánico ($W=p\Delta V$), para un proceso reversible, la ecuación (B. 1) queda de la siguiente manera:

$$\Delta U = T\Delta S - p\Delta V \quad (B. 3)$$

Aplicando el criterio de exactitud, o teorema de correspondencia mutua de Maxwell, para una expresión diferencial $F=F(x,y)$ la derivada total se define como:

$$dF = \left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)_y dx + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)_x dy \quad (B. 4)$$

Por tanto, aplicando este principio a la ecuación (B. 3), se obtiene:

$$\Delta U = U(S, V) \quad (B. 5)$$

$$\left(\frac{\partial U}{\partial S}\right)_V = T \quad ; \quad \left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_S = -p \quad (B. 6)$$

La entropía y el volumen son variables difíciles de medir. Sustituyendo. Para ello se define una propiedad termodinámica: la energía libre de Gibbs, definida por conveniencia de la siguiente manera:

$$G = U - \left(\frac{\partial U}{\partial S}\right)_V S - \left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_S V \quad (B. 7)$$

Sustituyendo las expresiones de (B. 6), se obtiene que G es:

$$G = U - TS + pV \quad (\text{B. 8})$$

Los sistemas evolucionan de manera espontánea hacia un estado de mínima energía, conocido como equilibrio. El equilibrio es un estado dinámico que tiene lugar cuando dos o más fases se encuentran en contacto y no hay variación entre su transferencia de energía y materia. En termodinámica se utilizan las energías de Gibbs y de Helmholtz como funciones de trabajo para estudiar la evolución de los sistemas químicos. El equilibrio se alcanza cuando la energía de Gibbs alcanza su mínimo respecto a todos los posibles cambios de sus variables, lo que implica que su diferencial es igual a cero y no hay variación en sus variables.

Es una función de la presión y de la temperatura. Aplicación la ecuación (B. 8) en su forma diferencial:

$$dG = dU - SdT - TdS + pdV + Vdp \quad (\text{B. 9})$$

Sustituyendo el primer principio de la termodinámica, se obtiene la siguiente expresión:

$$dG = TdS - pdV - SdT - TdS + pdV + Vdp = -SdT + Vdp \quad (\text{B. 10})$$

Así se obtiene una expresión termodinámica que depende de T y p, que son variables fácilmente medibles en cualquier sistema, en vez de S y V. El mínimo de la energía de Gibbs entonces se alcanza cuando sus variables canónicas p y T, se mantienen invariantes, lo que implica equilibrio térmico y mecánico. Si hacemos la derivada total de la energía de Gibbs y la comparamos con la ecuación (B. 4), se obtienen las expresiones (B. 11) y (B. 12).

$$dG = \left(\frac{\partial G}{\partial T} \right)_p dT + \left(\frac{\partial G}{\partial p} \right)_T dp \quad (\text{B. 11})$$

$$\left(\frac{\partial G}{\partial T} \right)_p = -S \quad ; \quad \left(\frac{\partial G}{\partial p} \right)_T = V \quad (\text{B. 12})$$

Si se recurre a la definición de la entalpía, otro potencial termodinámico:

$$H = U + pV \quad (\text{B. 13})$$

En su forma diferencial:

$$dH = dU + pdV + Vdp = TdS + Vdp \quad (\text{B. 14})$$

Así se obtiene otra forma de expresar la energía libre de Gibbs, que es la más común:

$$G = H - TS \quad (\text{B. 15})$$

Finalmente, encontramos el cuarto potencial termodinámico, la energía libre de Helmholtz, que depende de la temperatura y el volumen:

$$F = U - TS \quad (\text{B. 16})$$

$$\Delta F = -S\Delta T - p\Delta V \quad (\text{B. 17})$$

Pero la ecuación (B. 11) no incluye el equilibrio químico, es decir, movimiento de materia entre fases, así que se debe añadir un término adicional que exprese la variación de G con la variación de moles en sustancia presente en la disolución de una fase a otra.

$$dG = d(ng) = \left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_{p,n} dT + \left(\frac{\partial G}{\partial p}\right)_{T,n} dp + \sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial G}{\partial n_i}\right)_{T,p,n_j} dn_i \quad (\text{B. 18})$$