

# Diseño de un sistema híbrido autónomo para generación de electricidad e hidrógeno verde con la finalidad de suministrar energía eléctrica a una vivienda

Bryan Escachx Estévez, Javier Alejandro García Viloria

Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú.

Universitat Politècnica de Catalunya

Av. Víctor Balaguer 1, 08800 Vilanova i la Geltrú

## Resumen

Se estudia el diseño de un sistema de autoconsumo para una vivienda simulado en el software Simulink. Se quiere implementar la hibridación de la capacidad energética, compuesta por una batería química convencional y un electrolizador que transforma, a través de la electrólisis del agua, la energía eléctrica en hidrógeno el cual se almacena en un depósito para posteriormente, cuando se requiera de esa energía, mediante una pila de combustible, se inyecte electricidad al bus de potencia.

El trabajo se divide en varias fases:

Una primera fase consiste en buscar un perfil de irradiación y temperatura. Además se obtiene un perfil de carga real de la vivienda, al cual se le añade el consumo de un puesto de carga de un vehículo en las horas nocturnas. Aunque en el trabajo, a modo de ejemplo, se realiza un estudio generalizado del consumo de una vivienda a lo largo del año.

Una segunda fase donde se calcula el dimensionado de los componentes necesarios del sistema y se crea un modelo simple de electrolizador, que cuente con la carga y proporcione el valor de hidrógeno producido.

Una tercera fase, donde con los componentes calculados y los modelos necesarios conocidos, se desarrolla una estrategia de control para cumplir con los requerimientos de consumo de la carga y la durabilidad de los componentes del circuito de potencia.

Una cuarta fase donde se crea el modelo del sistema en Simulink y se simula todo el conjunto, del cual se valida el dimensionado y las estrategias de control previamente diseñadas.

## 1. Introducción

Desde hace años gobiernos, industrias y ciudadanía se está concienciando de que hay que cambiar el modelo de consumo energético, enormemente dependiente de los combustibles fósiles finitos, prueba de ello son las convenciones entre países[1], limitando las emisiones de CO<sub>2</sub> y las multas impuestas a los gobiernos que incumplen

los tratados firmados, las industrias también conscientes del problema dan pasos en este ámbito, haciendo grandes inversiones en producción de energía a través de renovables, o la electrificación de la automoción.

Este cambio hacia un modelo más sostenible medioambiental, tiene retos importantes por delante, pero hay dos que son el motor impulsor de este proyecto.

El primer reto tiene que ver con las granjas solares. Actualmente existe un modelo de negocio que consiste en comprar grandes extensiones de terreno y cubrirlo de placas solares, para producir electricidad que se entrega a la red por determinado precio. Estas granjas solares ocupan amplias extensiones de terreno y si se tuvieran que abastecer toda la demanda de un país con este modelo de producción, el porcentaje de campo ocupado sería inaceptable.

El segundo reto, va asociado con el almacenamiento de la energía producida, la mayoría de energías renovables que existen hoy en día son de producción intermitente, ya que muchas de ellas dependen de factores climáticos como, el viento, el Sol o los caudales de los ríos. No existen métodos de almacenamiento de energía eléctrica masivos que aseguren el abastecimiento de energía continuo a la red. Si la producción de energía disminuyera drásticamente no hay reserva de energía almacenada, capaz de suplir a la red, o al contrario, si hay una sobreproducción no hay espacios habilitados, donde almacenar esa energía y por ende se desperdiciaría.

Es por eso que una de las soluciones naturales al problema es el Autoconsumo. En el ámbito doméstico ya viene practicándose desde hace tiempo. Se produce energía con placas solares o molinos eólicos, y se deposita en grandes baterías para cuando la producción decaiga, suplir el sistema con esa energía previamente almacenada.

Es aquí donde tropezamos con el mismo inconveniente que presenta el uso de los combustibles fósiles. Estas baterías en su mayoría están hechas de Litio, una materia prima finita, cuyo reciclaje en baterías es caro y no 100% aprovechable. Aunque se practique el reciclaje intensamente, la materia se ira agotando gradualmente, en este mismo proceso [2].

Teniendo en cuenta su uso en el parque automovilístico, la falta de este recurso será un grave problema en este siglo, si no se mantiene un reciclaje exhaustivo de las baterías de litio. El problema se agudiza cuando se empieza a observar que un porcentaje alto del parque móvil eléctrico conlleva al uso de baterías no solo en vehículos sino también en puestos de recarga de todo tipo y en el caso del autoconsumo, si se quiere asegurar un suministro resistente a las variaciones climáticas el sobredimensionamiento de las baterías es de 3 a 5 veces mayor que si solo se tuviera que suministrar energía a la vivienda.

Es por eso que en el presente trabajo se plantea un diseño y control de una planta doméstica de autoconsumo respetuoso con el medioambiente con un sistema de almacenamiento de energía híbrido, compuesto por una batería convencional y un depósito de hidrógeno, que ayude a reducir el tamaño de la batería química para almacenar parte de la energía en forma de hidrógeno verde, y sea capaz de abastecer a la vivienda más un punto de recarga para un vehículo eléctrico.

## 2. Estudio y obtención del perfil de carga real

Con el objetivo de observar el consumo de un hogar se ha realizado un estudio de la vivienda. En esta se encuentran los electrodomésticos típicos que tiene un hogar medio.

Los cálculos se obtienen mediante la potencia del electrodoméstico y de sus horas de utilización, aunque se ha tenido en cuenta también que no es habitual el uso de la potencia máxima en ciertos aparatos. Un ejemplo de ello podría ser la vitrocerámica, normalmente se hace uso de uno o dos fogones a la vez y con un volumen medio alto. Se debe tener en cuenta también la época en la que se realiza el estudio, ya que el consumo varía en la estación en la que se encuentre.

Para validar el modelo es necesario tener unos datos reales sobre el consumo de una vivienda, la irradiación y la temperatura a lo largo de un año, los datos de irradiación y temperatura son necesarios para el cálculo del MPPT, y los datos han sido proporcionados gracias a [3].

En el caso de la carga de la vivienda los datos se han obtenido de [4], y posteriormente se les ha añadido el consumo del cargador de un vehículo eléctrico por las noches con el puesto de carga del modo 3. Se ha tenido en cuenta que el coche se cargaría cada noche, pero no el mismo tiempo ya que el consumo del vehículo no es el mismo cada día, aun así, los tiempos de carga están bastante sobredimensionados para probar la robustez del sistema.

## 3. Dimensionamiento de los elementos del sistema

### 3.1 Electrolizador

Para dimensionar el electrolizador debemos fijar cuanto caudal de hidrógeno queremos producir, para la aplicación en cuestión se ha puesto de objetivo un caudal de 100 gramos por hora, y el electrolizador lo conformaran unas 100 celdas en serie.

Por lo tanto siguiendo la formula (3.1):

$$\dot{m} = A \frac{1 \text{ C} \cdot s}{A} \frac{\text{equivalente de e}^-}{96487 \text{ C}} \frac{1 \text{ mol H}_2}{2 \text{ equivalente de e}^-} \frac{2,0158 \text{ g}}{1 \text{ mol H}_2} \quad (3.1)$$

Se obtiene el corriente de 26,84 A.

En la ecuación (3.2) se obtiene la potencia del electrolizador al multiplicar el corriente por el voltaje de celda unitaria por el conjunto de las celdas en serie.

$$P_{\text{electrolizador}} = 25,84A * 1,7 V * 100 \text{ celdas} = 4394,026 W \quad (3.2)$$

### 3.2 Pila de combustible

La pila de combustible se ha escogido teniendo en cuenta que es una ayuda para el sistema en concreto para mantener el nivel de SOC de la batería en niveles estables en todo momento.

La pila de combustible usada en la simulación es de 1,24kW, que es un valor bastante común en pilas comerciales, con un rendimiento del 46% este dato es importante a la hora de calcular la capacidad energética del hidrógeno ya que necesita de la pila de combustible para convertir esa energía en potencia eléctrica.

### 3.3 Baterías

El dimensionado de las baterías viene condicionado por la carga la cual se quiere abastecer, en este caso se trata de la vivienda y del puesto de carga para el vehículo eléctrico. El propósito del dimensionado es dividir la carga entre las baterías y la pila de combustible, por lo que el consumo por el que se dimensiona la batería es el 60% del total.

$$\text{Capacidad baterías (Ah)} = \frac{\text{Consumo (Wh)} \cdot \text{Autonomia}}{P_d \cdot V_t} \cdot 1,1 = \frac{16.215,5}{0,8 \cdot 48} \cdot 1,1 = 2322,46 \text{ Ah} \quad (3.3)$$

El resto de consumo se dimensiona con la pila de combustible. Esto se hace teniendo en cuenta el rendimiento y la energía específica del hidrógeno, 33,33 kWh/kg. Teniendo esto en cuenta, la capacidad de la pila debe ser de:

$$C(\text{Ah}) = \frac{10.810 \text{ Wh}}{24 V} = 450,42 \text{ Ah} \quad (3.4)$$

Con estos datos se obtienen los kilos de hidrógeno necesarios para complementar la batería.

$$\text{Kg de H}_2 = \frac{1 \text{ kg} \cdot 450,42 \text{ Ah}}{638,825 \text{ Ah}} = 0,705 \approx 0,71 \text{ kg} \quad (3.5)$$

Se obtiene que para abastecer el 40% del consumo total son necesarios 0,71 kg de hidrógeno.

### 3.4 Placa fotovoltaica

La fuente energética principal son los módulos fotovoltaicos, por lo que para su dimensionado es necesario tener en cuenta todas las cargas: electrolizador, vivienda y puesto de recarga.

Los factores a tener en cuenta son las horas que se puede aprovechar esta energía, las HSP, y la potencia que es capaz de proporcionar al sistema. Para que los cálculos sean correctos se debe realizar un sobredimensionado para evitar cualquier problema de falta de suministro.

$$N^{\circ} \text{ placas} = \frac{\text{Consumo diario-SD}}{\text{HSP-Wp}} = \frac{29.892,03 \cdot 1,30}{4,282 \cdot 370} = 24,52 \approx 25 \text{ placas} \quad (3.6)$$

Para el correcto funcionamiento del sistema se obtiene que serán necesarias 25 placas fotovoltaicas.

#### 4. Heurística de control

El objetivo de control principal del sistema es alimentar la carga con la potencia que demande a una tensión marcada por la tensión de batería. Al mismo tiempo, y mientras sea posible, mantener cargadas las baterías y producir hidrógeno para que sea almacenado. Dadas las limitaciones de los diferentes subsistemas (como la irradiación del sol a diferentes horas del día y las limitaciones de funcionamiento en la pila de combustible), es necesario un control supervisor del sistema que asegure que los flujos de energía sean distribuidos convenientemente entre todos los subsistemas.

El control también tiene que asegurar la protección de los diferentes componentes del circuito para alargar su vida útil, a continuación, se definirán las situaciones en las que los componentes se verán dañados.

En el caso de la pila de combustible las principales causas de degradación son:

- **Dinámicas rápidas en la demanda de energía** [5], la potencia generada por la pila es directamente proporcional al caudal  $H_2$  de entrada en la misma, un cambio brusco de la corriente no puede ser seguido instantáneamente por el caudal de consumo de  $H_2$ , produciendo un fenómeno llamado 'starvation', producido por la diferencia de combustible en el stack con la corriente que se le demanda a la misma.
- **Trabajar a voltajes muy altos cercanos al voltaje en circuito abierto** [5], trabajar a voltajes de celda superiores a 0.85 V degradan significativamente la celda, es por eso que se debe limitar el encendido y apagado de la pila ya que son en esos momentos cuando la pila trabaja en vacío y llevan un cierto tiempo para que se lleven a cabo.

En el caso de la batería las principales causas de degradación son:

- **Trabajar en los límites del SOC** [6], es bien conocido que a las baterías químicas no les conviene trabajar cerca de su porcentaje más bajo de carga ni el más alto, estos fenómenos vienen dados por las reacciones químicas que suceden dentro de la batería, que en el caso de la sobrecarga aumenta la temperatura de la batería y a cierto nivel de temperatura la capacidad de la batería se ve afectada indefinidamente, al mismo tiempo una sobre descarga de la misma afectara a los electrodos de la batería reduciendo igualmente la capacidad de la misma.

Es por ello que el control presentado más adelante debe cumplir estos tres requisitos,

Además de asegurar que siempre haya electricidad suficiente para suministrar al hogar.

Para evitar las dinámicas rápidas en la simulación se combinan dos estrategias:

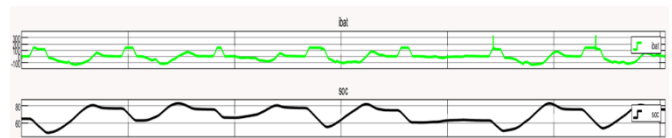
- 1- La pila de combustible siempre trabaja en el punto nominal de potencia eléctrica, por lo tanto, la referencia de corriente que queremos extraer de la pila de combustible y que le damos al controlador es fija, con esto se consigue estar el menor tiempo posible en voltaje de circuito abierto, limitándolo solo al encendido y el apagado de la misma.
- 2- Para evitar que la pila pase en un periodo de muestreo de una referencia 0 a la referencia deseada se añade un 'rate limiter' que en la práctica se podría implementar en un microcontrolador, este atenuamiento en el la variación de la señal de referencia difiere según la literatura, según [7] incrementa este valor un 2% de la potencia nominal por segundo, mientras que con pilas de mayor potencia según [8] utiliza un 10% aproximadamente, en el presente trabajo como se simula una pila de 1.24 kW se utilizara un porcentaje aproximado del 2% de la potencia nominal.

En el caso de la batería, se ha desarrollado una máquina de estados, que activa la pila de combustible cuando el SOC de la batería cae del 60% y sigue activa hasta que el SOC vuelva al 60%, la pila de combustible también se activa al cuándo se va a recargar el vehículo eléctrico, de esta manera se consigue que los niveles de SOC de la batería se mantengan dentro de los límites que no sobre dañaran la durabilidad de la misma.

#### 5. Simulación

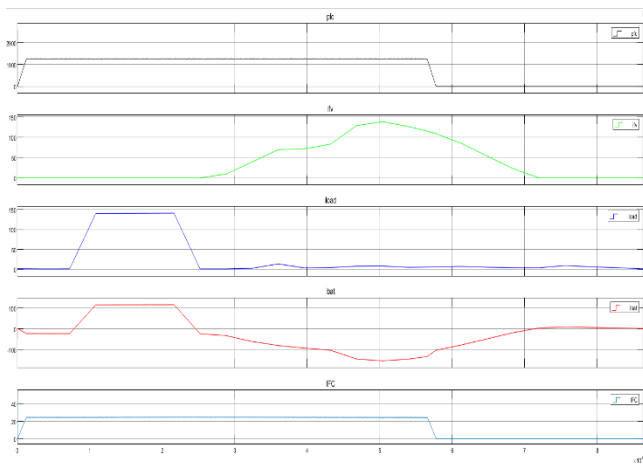
Para comprobar el dimensionado calculado de los diferentes elementos se realiza la simulación de los parámetros de forma individual. Se valida de esta manera el control propuesto.

- 1- El estado de carga de la batería se mantiene en unos niveles estables que ayudan a prolongar su vida útil, en la figura 1 se pueden observar los flujos de corriente de entrada y salida de la batería dependiendo si se está cargando o si está siendo descargada por alguna carga del sistema



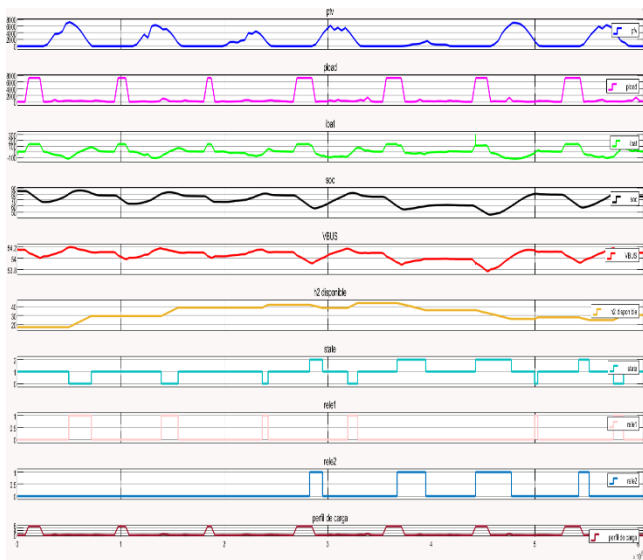
**Fig.1** Detalle de la relación entre los flujos de corriente y el SOC.

- 2- En la figura 2 se pueden observar los flujos de corriente y la aportación de cada subsistema al bus de potencia. También se puede observar como la pila de combustible es una ayuda en las descargas y luego en la recarga de la batería hasta un nivel de SOC seguro.



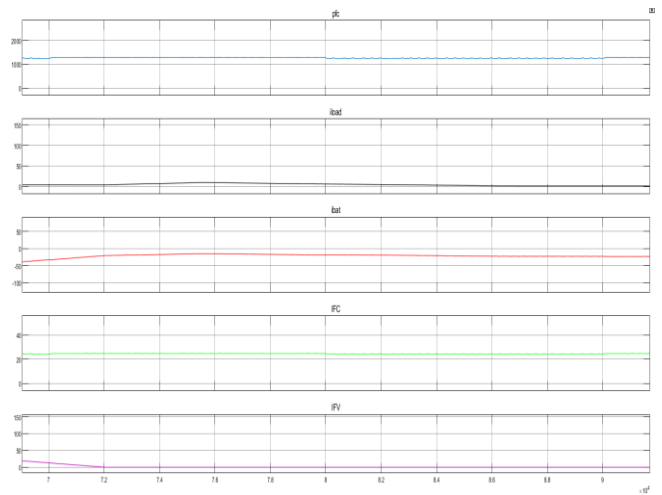
**Fig. 2** Detalle de los flujos de corriente del sistema

- 3- Ni el electrolizador ni la pila de combustible se encienden y se apagan en periodos cortos de tiempo, siendo esta una medida para alargar su vida útil. En la figura 3 podemos ver como los periodos de trabajo de los relés son largos y no se encienden en cortos espacios de tiempo.



**Fig.3** Datos obtenidos del sistema durante una semana

- 4- Vemos una mayor independencia de los factores climáticos al tener una fuente de energía independiente de los mismos, característica que permite que la batería del sistema sea más pequeña. Esto se puede ver en la figura 4 como la placa fotovoltaica no proporciona ninguna energía y es la pila de combustible que va cargando la batería poco a poco.



**Fig. 4** Demostración de la independencia climática del sistema

Observando el funcionamiento del sistema durante diferentes épocas del año, se puede concluir, que el concepto de estructura, dimensionado y control del mismo es adecuado. Observando las simulaciones se ha llegado a la conclusión de que es necesario aumentar la pila de combustible en potencia, ya que la carga del vehículo eléctrico es mucho mayor, y la ayuda de la pila de combustible a la batería es casi insignificante. Además, en el tramo de recarga de la batería, una vez finalizada la carga del coche, tarda un tiempo considerable en llevar la carga de la batería a unos estados seguros, por lo tanto le da robustez al sistema frente condiciones en las que no hay irradiación solar durante días, pero se considera que no es suficiente.

## 6. Conclusiones

En el presente trabajo se ha demostrado que en el caso del autoconsumo con un puesto de recarga de un vehículo eléctrico, el tamaño de las baterías aumenta drásticamente, y si extrapolamos esta situación a electrolineras o puestos de recarga públicos que sean capaces de abastecer el fuerte incremento de vehículos eléctricos en las próximas décadas, las suposiciones [9] hechas solo para el vehículo eléctrico se quedan cortas.

Se ha planteado una arquitectura y dimensionamiento de componentes en viviendas de autoconsumo, que ayudaría a reducir el tamaño de las baterías convencionales, a cambio de un incremento en el número de placas de la vivienda causadas por las grandes pérdidas del electrolizador y la pila de combustible, que aumenta el coste notablemente y que sin ayudas gubernamentales ni investigaciones en abaratar los costes asociados a los diversos componentes del sistema será una opción poco viable económicamente para los consumidores.

Se ha diseñado una heurística de control, implementada a diferentes niveles en base a las limitaciones de las tecnologías estudiadas y de los requisitos energéticos que conlleva la carga a la que se conecta el sistema.

Se ha desarrollado un modelo simplificado en Simulink del sistema, donde se ha podido comprobar que el dimensionamiento de los componentes es adecuado, y que las estrategias de control tanto individuales como globales

son las correctas para cumplir los requisitos energéticos de las cargas y prolongar adecuadamente la vida útil de los elementos del sistema.

Por último, se ha realizado el montaje de un pequeño sistema híbrido a modo de ejemplo compuesto por una celda de combustible reversible, una placa fotovoltaica y una carga, todo ello controlado por un micro controlador donde conceptualmente se pueden observar similitudes con el trabajo realizado en las simulaciones, y ver de manera física como interactúan las diferentes tecnologías.

Las tecnologías PEM de hidrógeno son la alternativa verde con mayor peso frente a la baterías convencionales en el almacenamiento de energía en vehículos. En la mayoría de los casos serán sistema híbridos de almacenamiento causado por las limitaciones de esta tecnología, lo cual debería por si solo ser razón más que suficiente para incrementar el número de recursos en este ámbito. En España hay varios proyectos en marcha en tecnologías relacionadas con el hidrógeno, y una hoja de ruta [10] para el 2030 bastante ambiciosa que da a entender la predisposición del gobierno a ofrecer los recursos.

En nuestra opinión, estamos en un momento clave de transición y las decisiones que tomemos ahora como sociedad determinará un no tan lejano futuro, del cual seremos fuertemente responsables. Nuestro deseo, y este trabajo es prueba de ello, es el de dedicarnos al sector de la producción de energía mediante renovables y con ello aportar nuestro granito de arena en la transición hacia una sociedad más sostenible energéticamente.

## 7. Agradecimientos

Antes que nada queremos agradecer el esfuerzo y la dedicación que hemos tenido para este proyecto. Ha sido un trabajo al que se le han dedicado muchas horas debido a la falta de conocimientos en cierta materia. En parte esto ha sido un factor por el que no hemos ampliado este trabajo tanto como queríamos.

A pesar de todo lo comentado, es un orgullo haberlo realizado, ya que hemos aprendido muchas cosas muy interesantes para nuestro futuro y para el sector al cual nos queremos dedicar. Además de haber aprendido a utilizar herramientas que sin la realización de este proyecto no hubiésemos usado.

Queríamos agradecer a amigos y familiares, ya que el apoyo ofrecido en momentos de estrés a lo largo de la carrera y la paciencia demostrada han sido de gran ayuda.

También queremos agradecer a todos los profesores que han influenciado en las distintas asignaturas para realizar el proyecto ya que se han requerido la mayoría de los conocimientos que nos han transmitido.

## Referencias

[1] El acuerdo de París [Consulta: Marzo del 2022 ]

Disponible en: <https://unfccc.int/es/process-and-meetings/the-paris-agreement/el-acuerdo-de-paris>

[2] The time dimension and lithium resource constraints for electric vehicles

Duncan Kushnir n, Bjorn A. Sande ´n

Environmental Systems Analysis, Energy and Environment, Chalmers University of Technology, Göteborg 412 96, Sweden [ Consulta: Diciembre del 2022 ]

Disponible en: <https://research.chalmers.se/en/publication/153059>

[3] Photovoltaic Geographical Information System. [Consulta: Mayo 2022]

Disponible en: [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/en/](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/)

[4] Datadis/datos. La plataforma de datos de consumo eléctrico. [Consulta: Abril 2022]

Disponible en: <https://datadis.es/data>

[5] Ramos, G. A., de Pérez-Cabrero, T. M., Domènech-Mestres, C., & Costa-Castelló, R. (2021). Industrial Robots Fuel Cell Based Hybrid Power-Trains: A Comparison between Different Configurations. Electronics 2021, Vol. 10, Page 1431, 10(12), 1431.[Consulta: Marzo 2022]

Disponible en:

<https://digital.csic.es/bitstream/10261/261200/1/electronics-10-01431-v3.pdf>

[6] Ana Barbón Núñez U N I V E R S I D A D D E O V I E D O Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón Página 2 de 118 Índice. (n.d.).[Consulta: Marzo 2022]

Disponible en:

<https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/handle/10651/48646/TFMAAnaBarbonRUO.pdf?sequence=3>

[7] L. Valverde, C. Bordons and F. Rosa, "Integration of Fuel Cell Technologies in Renewable-Energy-Based Microgrids Optimizing Operational Costs and Durability," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 63, no. 1, pp. 167-177, Jan. 2016, doi: 10.1109/TIE.2015.2465355.[Consulta: Mayo 2022]

Disponible en:

[https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/116529/Integration\\_of\\_Fuel\\_Cell\\_technologies\\_in.pdf](https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/116529/Integration_of_Fuel_Cell_technologies_in.pdf)

[8] Simulink Version 10.3 (R2021a) 14-Nov-2020 [Consulta: Octubre 2021]

Disponible en: <https://es.mathworks.com/products/simulink.html>

[9] The time dimension and lithium resource constraints for electric vehicles Duncan Kushnir n, Bjorn A. Sande ´n Environmental Systems Analysis, Energy and Environment, Chalmers University of Technology, Göteborg 412 96, Sweden [Consulta: Octubre 2021]

Disponible en: <https://research.chalmers.se/en/publication/153059>

[10] Hoja de ruta del hidrógeno: una apuesta por el hidrógeno renovable. [Consulta: Noviembre 2021]

Disponible en: [https://energia.gob.es/es-es/Novedades/Documents/hoja\\_de\\_ruta\\_del\\_hidrogeno.pdf](https://energia.gob.es/es-es/Novedades/Documents/hoja_de_ruta_del_hidrogeno.pdf)