



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Máster en Ingeniería Industrial

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO₂, mediante una pila de combustible.

Autor: D. Pedro Gabana Molina
Tutor: D^a. Miriam Reyes Serrano
Tutor: Francisco V. Tinaut Fluixá

Valladolid, mayo, 2021



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Máster en Ingeniería Industrial

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO₂, mediante una pila de combustible.

Autor: D. Pedro Gabana Molina
Tutor: D^a. Miriam Reyes Serrano
Tutor: Francisco V. Tinaut Fluixá

Valladolid, mayo, 2021

RESUMEN (ESPAÑOL)

En este TFM se ha desarrollado una herramienta de simulación para poder estimar las producciones de energías eléctrica y térmica de una pila de combustible alimentada con hidrógeno, a fin de satisfacer las demandas energéticas de una aplicación de pequeña potencia. Teniendo en cuenta las posibilidades para el origen del hidrógeno, se han estimado también las emisiones asociadas de CO₂ correspondientes a dichas posibilidades, así como un análisis económico. La herramienta de simulación permite plantear diversos escenarios de generación a evaluar con distintos indicadores de ahorro energético, de emisiones y económico. A su vez, se consideran distintos niveles de detalle de la pila de combustible, caracterizándola mediante sus rendimientos eléctrico y térmico, o bien mediante una simulación dinámica de la misma, con potencias eléctrica y térmica variables a lo largo del día.

RESUME (ENGLISH)

In this TFM it has been developed a simulation tool to estimate electric and thermal energy productions of a hydrogen fuel cell, in order to cover energy demands of a low power application. Considering different possibilities for the hydrogen origin, it has also been estimated CO₂ emissions for those different possibilities, as well as an economic analysis. The simulation tool allows to propose diverse generation scenarios evaluable with different energy, emissions saving and economic indicators. Moreover, it has been considered different detail levels for the fuel cell, characterizing it as a means of its electrical and thermal performance, as well as a dynamical simulation, with electrical and thermal daily variable powers.

AGRADECIMIENTOS

En este apartado, encontrándome en disposición de finalizar mis estudios de Máster en Ingeniería Industrial, me gustaría dar las gracias a toda mi familia, en especial a mi madre por todo su apoyo durante toda mi vida académica.

También me gustaría dar las gracias a mi novia, cuyo apoyo emocional ha sido y es inestimable, incluso en los momentos más difíciles.

Además, me gustaría dar las gracias a mis amigos, por su comprensión en esos largos días de estudio y trabajo en los que no he podido pasar tanto tiempo con ellos como hubiera querido.

Por último, me gustaría dar las gracias a todos los profesores del Máster en Ingeniería Industrial, pero en especial quiero dar las gracias al profesor Francisco V. Tinaut Fluixá, por toda su ayuda, paciencia y comprensión tanto durante mis estudios de máster como durante el desarrollo de este TFM, así como a la profesora Miriam Reyes Serrano por su predisposición y cooperación a la hora de ayudarme a finalizar con éxito tanto este trabajo como el máster.

ÍNDICE

Resumen (español).....	3
Resume (English)	3
Agradecimientos	4
Índice	5
Capítulo: 1. Introducción.....	1
Capítulo: 2. Características de las pilas de combustible tipo PEM.	13
Capítulo: 3. Sistema de generación de energías eléctrica y térmica basado en pila de combustible. 28	
Capítulo: 4. Modelo algebraico de generación de energías eléctrica y térmica en una pila de combustible.....	33
Capítulo: 5. Análisis de resultados de producción energética y de emisiones en función de las horas de funcionamiento.....	47
Capítulo: 6. Simulación de pila de combustible PEM basada en un modelo dinámico.....	83
Capítulo: 7. Conclusiones y desarrollos futuros.....	96
Bibliografía.	100

CAPÍTULO: 1. INTRODUCCIÓN

1.1.El hidrógeno como combustible.

El hidrógeno es la sustancia más abundante del Universo, aunque en la tierra solamente aparece combinado con H₂O, HC, H₂OC y HM, ya que no existen yacimientos (Asociación española del hidrógeno, 2020).

Actualmente, la escasez de combustibles fósiles y la fuerte dependencia hacia los países productores de estos combustibles, así como la reducida eficiencia del sector del transporte y los elevados niveles de contaminación, han provocado que la necesidad de buscar un nuevo vector energético sea evidente (Tinaut Fluixá F. V., 2016).

El hidrógeno, como vector energético, permite la utilización de diversas fuentes de energía, ya sean fósiles, nucleares o renovables. Dado que la combustión del hidrógeno no produce de forma directa CO₂, eligiendo adecuadamente los procesos de producción del mismo se puede conseguir una descarbonización del sistema energético. Además, en el caso particular del sector de Transporte, el hidrógeno puede contribuir para conseguir una descarbonización de dicho sector de hasta el 95%. Entre sus capacidades destacables se encuentran que puede ser transformado en energía eléctrica con un rendimiento elevado, que la densidad de almacenamiento energético es bastante elevada, y que es posible transportarlo en estado gaseoso o en estado líquido (Tinaut Fluixá F. V., 2016).

Las propiedades que plantea el hidrógeno como combustible quedan resumidas en la siguiente tabla [Tabla 1].

Tabla 1. Propiedades del hidrógeno como combustible (Tinaut Fluixá F. V., 2016).

Propiedades físicas del hidrógeno		
Propiedad	Hidrógeno	Comparación
Densidad (en estado gaseoso)	0,089 kg/m ³ (0°C, 1bar)	1/10 del gas natural
Densidad (en estado líquido)	70,79 kg/m ³ (-253°C, 1 bar)	1/6 del gas natural
Punto de ebullición	-253,76 °C (1bar)	90 °C por debajo del gas natural licuado
Energía por unidad de masa (PCI)	120,1 MJ/kg	3x el de la gasolina
Densidad de energía (condiciones ambientales, PCI)	0,01 MJ/l	1/3 del del gas natural
Energía específica (licuado, PCI)	8,5 MJ/l	1/3 del del gas natural licuado
Velocidad de la llama	346 cm/s	8 veces la dem metano
Rango de ignición	4-77% en volumen en el aire	Intervalo 6 veces mas amplio que en el metano
Temperatura de autoignición	585 °C	220°C para la gasolina
Energía de ignición	0,02 mJ	1/10 de la del metano

Frente a las diversas ventajas que plantea el hidrógeno como vector energético, también se plantean algunos inconvenientes, tal y como puede analizarse en la tabla [Tabla 2].

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO₂, mediante una pila de combustible.

Tabla 2. Ventajas y desventajas del hidrógeno como combustible.

Características del hidrógeno como combustible	
Ventajas	Desventajas
No produce emisiones directas de CO ₂	Muy baja densidad energética E/V (kJ/m ³)
Elevada densidad energética E/m (kJ/kg)	Baja temperatura de licuefacción (-254°C)
Extremadamente volátil	Baja energía de activación
No es tóxico	Extremadamente volátil
Elevada temperatura de combustión espontánea	Menos seguro en espacios confinados
Muy seguro en espacios abiertos	

El hecho de que la utilización del hidrógeno no produzca emisiones de CO₂ es evidente, ya que este elemento en su forma molecular viene compuesto por dos átomos de hidrógeno (H₂). Al no existir carbono en dicha molécula, la formación de cualquier compuesto derivado del carbono es imposible.

La densidad energética por unidad de volumen es muy baja, asociado a la reducida densidad del hidrógeno, lo que provoca que una pequeña masa de hidrógeno ocupe un volumen elevado. Por el contrario, la cantidad de energía del hidrógeno por unidad de masa es elevada.

El que el hidrógeno sea extremadamente volátil representa una ventaja ya que se disipa fácilmente en una mezcla con otros elementos, por ejemplo, para conseguir una mezcla de combustión idónea, sin embargo, es una desventaja ya que las fugas de este elemento son realmente complejas de localizar.

El que este elemento no plantee ningún peligro para el ser humano a nivel de toxicidad es realmente una ventaja.

La alta temperatura de combustión espontánea es una ventaja, ya que una mayor temperatura de autoinflamación implica una mayor seguridad.

Al ser un compuesto altamente volátil, es muy seguro en espacios abiertos, ya que, ante una fuga, el combustible se disipará rápidamente en el ambiente sin que se pueda llegar a dar lugar un accidente, sin embargo, en espacios cerrados, esta ventaja no es aplicable.

La baja temperatura de licuefacción implica que si se quiere transportar el hidrógeno como líquido será necesario emplear un sistema que mantenga una temperatura muy reducida, lo cual implica muchas pérdidas energéticas y lo hace casi completamente inviable.

Finalmente, la baja energía de activación hace que sea fácilmente inflamable en presencia de una llama o incluso de un punto caliente (residuos carbonosos en una cámara de combustión, por ejemplo), lo cual supone reto a nivel de seguridad en el diseño de los sistemas y en su utilización.

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO₂, mediante una pila de combustible.

1.2.El hidrógeno como vector energético.

Como el hidrógeno existente en la Tierra, a pesar de ser muy abundante, no es directamente aprovechable, se plantea que el hidrógeno se trate como un vector energético, similar al caso de la electricidad (Tinaut Fluixá F. V., 2016).

Sin embargo, hoy en día, el hidrógeno ha de superar una serie de barreras hasta convertirse en un vector energético, barreras que son tanto tecnológicas como sociales (Tinaut Fluixá F. V., 2016).

De esta forma, el hidrógeno puede ser un complemento de la electricidad para almacenar y transportar energía, ya que toda energía que pueda ser convertida en electricidad permite obtener hidrógeno mediante electrólisis. El hidrógeno almacena energía que luego puede ser utilizada para generar electricidad mediante un proceso muy eficiente en pilas de combustible. Finalmente cabe destacar que el hidrógeno puede aprovechar las tecnologías e infraestructuras del gas natural (Tinaut Fluixá F. V., 2016).

En la siguiente tabla [Tabla 3] se realiza un análisis comparativo de las ventajas y desventajas del hidrógeno como vector energético.

Tabla 3. Propiedades del hidrógeno como vector energético.

Características del hidrógeno como vector energético	
Ventajas	Desventajas
Fácil obtención a partir de energía eléctrica	Coste energético elevado de compresión y licuefacción
Posibilidad de almacenar una gran cantidad de energía específica	Dificultad de almacenamiento (muy volátil y con baja densidad)
Alta eficiencia en la generación de electricidad	
Posibilidad de aprovechar las infraestructuras del gas natural	

Las ventajas que plantea el hidrógeno frente a otros vectores energéticos, así como el uso complementario que puede ejercer con las energías alternativas, ha provocado que se plantee una conversión del paradigma energético y económico europeo planteando un sistema productivo orientado al hidrógeno [Figura 1].

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO₂, mediante una pila de combustible.

European High Level Group for H2

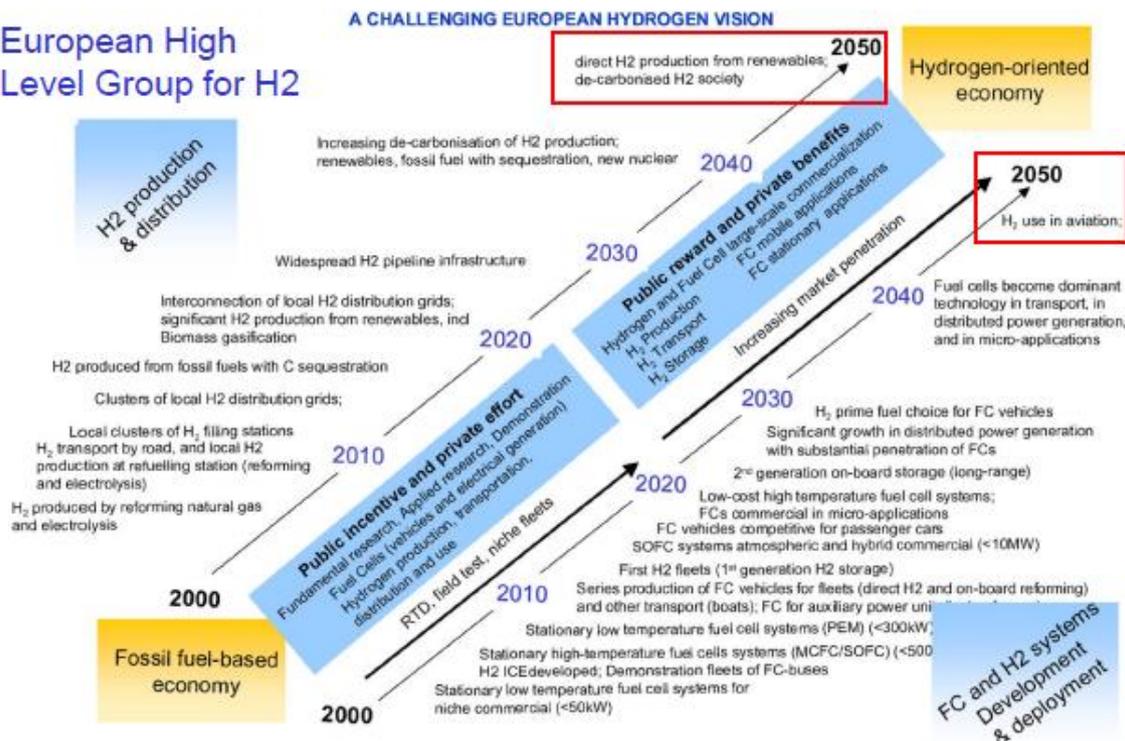


Figura 1. Plan de transformación de la economía europea (Tinaut Fluixá F. V., 2016).

1.3. Obtención del hidrógeno.

El hidrógeno se puede obtener a partir de energía eléctrica, por métodos químicos a partir de sustancias que lo contengan o incluso por disociación a alta temperatura del agua. Dependiendo del nivel de pureza que exija la aplicación posterior, los sistemas de depuración y eliminación de otras sustancias son diferentes (Tinaut Fluixá F. V., 2016).

Como el hidrógeno no es un recurso energético, sino un *vector energético*, ha de producirse a partir de unos recursos y consumiendo una fuente de energía primaria. En la figura se muestran algunos procesos utilizados para la obtención del hidrógeno [Figura 2].

	Procesos
• Nuclear:	Electrólisis Termólisis
• Renovable:	Electrólisis Gasificación Fotólisis
• Fósil:	Reformado: Steam reforming Oxidación Parcial Gasificación

Figura 2, Procesos de obtención de hidrógeno (Tinaut Fluixá F. V., 2016).

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO₂, mediante una pila de combustible.

En la siguiente imagen [Figura 3] se muestran las principales vías de obtención y uso del hidrógeno.

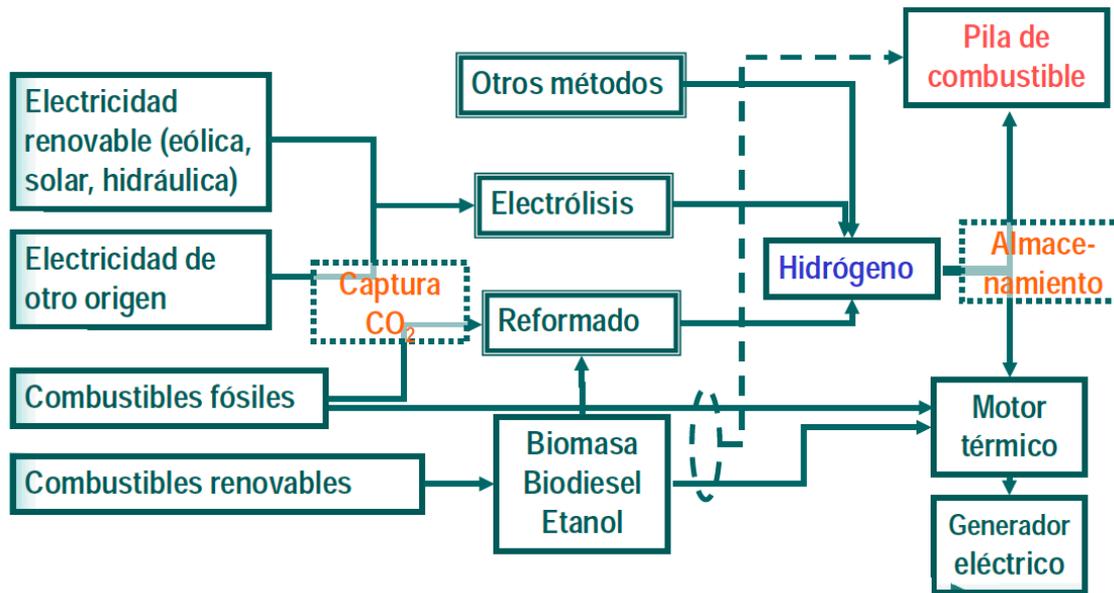


Figura 3, Vías de uso y obtención del hidrógeno (Tinaut Fluixá F. V., 2016).

1.4. Historia de las pilas de combustible.

De acuerdo con (Ortiz-Rivera, Reyes-Hernandez, & Febo, 2007), se dieron una serie de hitos históricos hasta la creación de las pilas de combustible actuales:

- En 1880 los científicos británicos William Nichols y Anthony Carlisle describieron la electrólisis del agua.
- El primer gran acontecimiento en el desarrollo de las pilas de combustible se dio en 1838, cuando William Robert Grove creó la batería de gas, la cual es considerada la primera pila de combustible.
- En 1889 Ludwig Mond y Carl Langer realizaron los primeros experimentos con pilas de combustible.
- En torno a 1893 Friedrich Wilhelm Ostwald describió ampliamente el comportamiento teórico de las pilas de combustible.
- En 1930 Emil Baur y H. Preis realizaron experimentos con electrolitos de óxido sólido a altas temperaturas.
- En 1939 Francis Thomas Bacon empezó a investigar las pilas de combustible alcalinas.
- En 1958 Francis Thomas Bacon trabajó en una pila de combustible alcalina que aportaba energía a un submarino de la marina real británica.
- Ese mismo año G.H.J. Broers y J.A. Ketelaar empezaron a construir una pila de combustible de carbonato fundido.
- En 1959 la investigación en pilas de combustible de óxido sólido empezó a acelerarse en el Instituto Técnico Central de Holanda, y en la empresa General Electric de Nueva York.
- En 1960 se desarrolló la primera pila de combustible tipo PEM en la empresa General Electric por Thomas Grubb and Leonard Niedrach.

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO₂, mediante una pila de combustible.

- En 1961 G.V. Elmore y H.A. Tanner publicaron sus experimentos en las pilas de combustible de ácido fosfórico.
- En 1962 Pratt y Whitney registraron la patente de la pila de combustible alcalina de Francis Thomas Bacon y consiguieron un contrato con la NASA para impulsar la nave Apollo en la misión espacial.
- En 1965 la Armada de Estados Unidos evaluó diversas pilas de combustible de carbonato fundido fabricadas por Texas Instruments.
- En 1990 la pila de combustible con alimentación directa de metanol fue desarrollada por la NASA y la Southern California University.
- En 2007 Honda anunció la fabricación en masa del primer vehículo impulsado por hidrógeno, si bien no se llegó a llevar a cabo.
- Varios años más tarde a partir de 2015, Hyundai y Toyota comenzaron en mercados seleccionados (Japón, California, algunos países europeos) la introducción comercial de vehículos turismo con pila de combustible.
- En 2020 se produjo el anuncio de la futura comercialización de autobuses de pasajeros (Caetano-Toyota) y de camiones de mercancías propulsados con pila de combustible (IVECO-NIKOLA, entre otros).

Todos estos acontecimientos son los que se describen en la siguiente imagen [Figura 4].

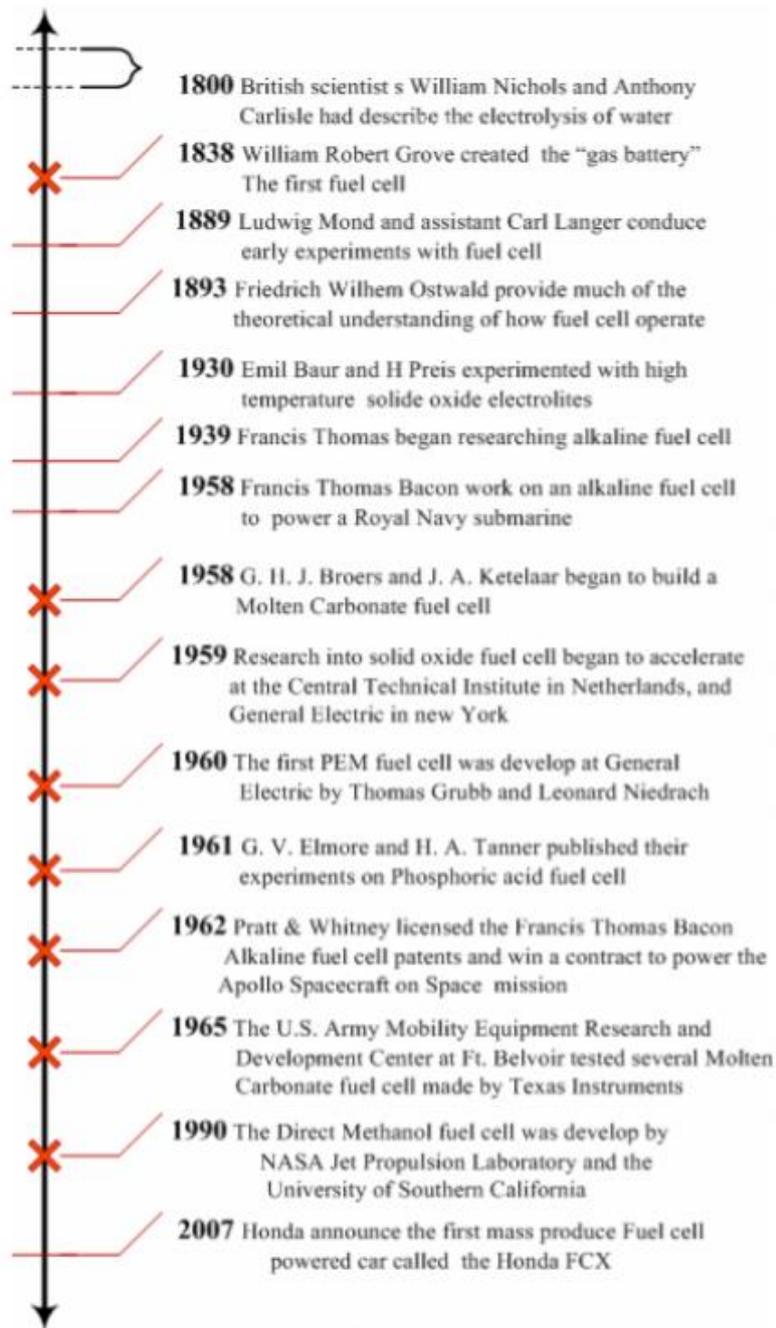


Figura 4, Historia de la pila de combustible (Ortiz-Rivera, Reyes-Hernandez, & Febo, 2007).

1.5. Principio de funcionamiento de la pila de combustible.

La pila de combustible es un dispositivo en donde se combina el combustible (hidrógeno y otros) y el oxígeno mediante una reacción electroquímica que produce energía eléctrica y otros productos (agua) (Tinaut Fluixá F. V., 2016).

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO₂, mediante una pila de combustible.

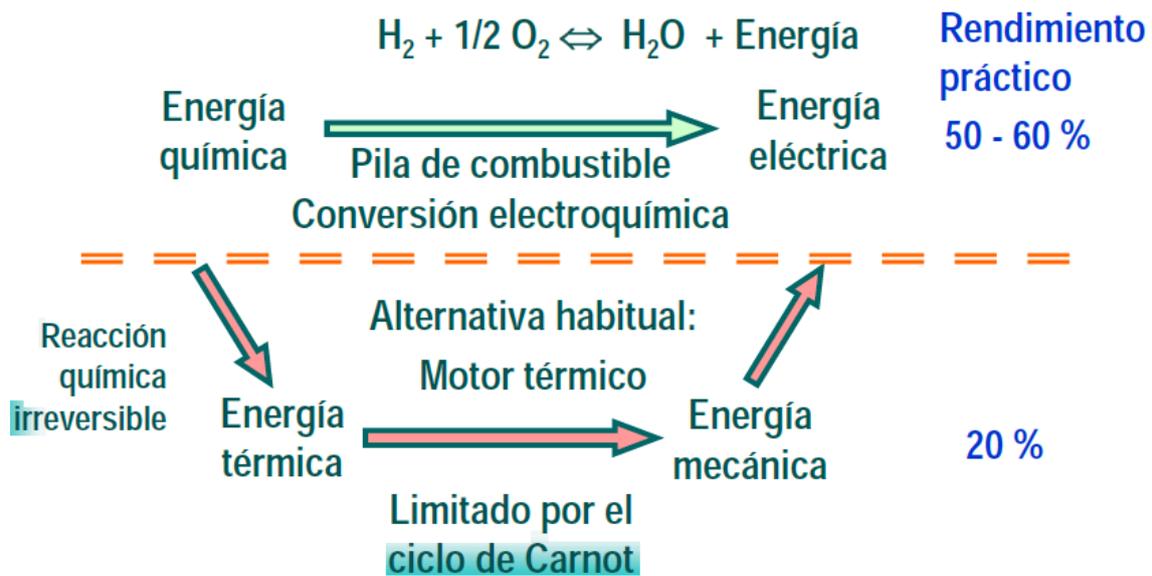


Figura 5, Funcionamiento energético de una pila de combustible (Tinaut Fluixá F. V., 2016).

En la imagen [Figura 5] se puede apreciar un esquema de funcionamiento de las dos alternativas de utilización de hidrógeno, una convencional, como combustible en un motor térmico, y otra para alimentar una pila de combustible.

Como **características** de las pilas de combustible de acuerdo con (Tinaut Fluixá F. V., 2016) se puede decir que:

- La reacción que tiene lugar en este sistema es una **reacción electroquímica** que es capaz de convertir la energía química de un combustible directamente en energía eléctrica.
- La reacción global se puede descomponer en **dos semirreacciones**, cada una de las cuales tiene lugar en un electrodo. La corriente eléctrica generada depende tanto del aporte de reactivos como de la resistencia del circuito eléctrico exterior.
- No es un proceso térmico, por lo que teóricamente se puede tener un rendimiento máximo del 100%, con rendimientos prácticos del 50-60%.
- El nivel de emisiones contaminantes directas es reducido, especialmente si se trata de pilas de baja temperatura.
- No hay partes internas móviles, por lo que las emisiones sonoras son pequeñas, aunque puede haberlas asociadas a los fluidos en circulación (soplante de aire, bomba de refrigeración).
- Son aptas para la generación eléctrica distribuida, ya que se puede escalar en un amplio rango de potencias.

El esquema de funcionamiento de una pila de combustible tipo PEM, con movimiento de protones a través del electrolito, se puede describir de acuerdo con la siguiente imagen [Figura 6].

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO₂, mediante una pila de combustible.

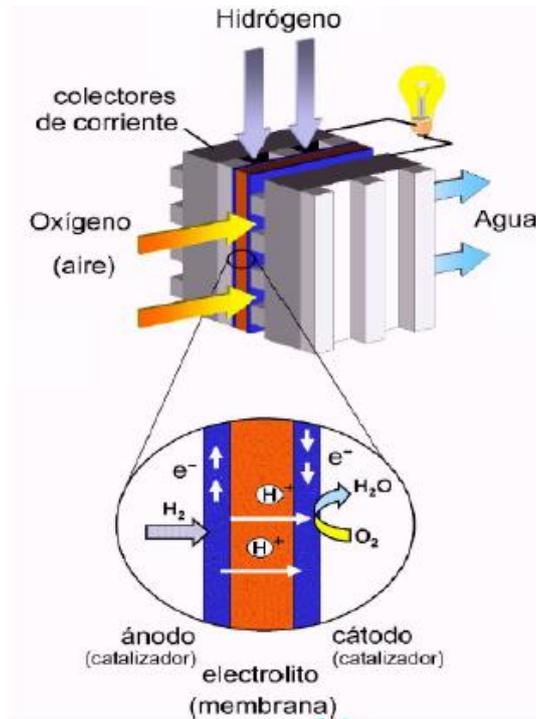


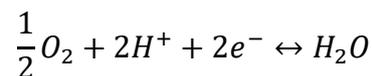
Figura 6, Esquema de funcionamiento de la pila de combustible (Tinaut Fluixá F. V., 2016).

En el **electrodo negativo** (ánodo) la semireacción que tiene lugar es la siguiente:



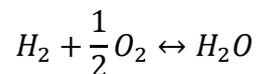
Los protones H^+ se mueven a través del electrolito hacia el **electrodo positivo**, mientras que los electrones se mueven por el conductor exterior.

En el **electrodo positivo** (cátodo) la semireacción que tiene lugar es la siguiente:



Tanto los gases no reaccionados (O_2 , N_2) como el agua han de ser evacuados.

Estas dos semirreacciones se pueden sumar para dar en la **reacción global**:



Con un poder calorífico inferior de: $H_c = 120 \text{ MJ/kg}H_2$

Sin embargo, el uso de estos sistemas implica una serie de inconvenientes de acuerdo con (Tinaut Fluixá F. V., 2016) estos son:

- Requieren de **combustibles específicos** para funcionar como el H_2 , en muchos casos de **elevada pureza**, por lo que se requiere la obtención de este combustible mediante el reformado de otros combustibles.
- Es necesario la utilización de **sistemas integrados** hacer funcionar el conjunto, incluyendo la gestión de la alimentación de hidrógeno y de oxígeno (con una cierta

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO_2 , mediante una pila de combustible.

presión), la evacuación del agua formada, la refrigeración con aire y/o agua, el control del sistema, etc. El sistema integrado se conoce con la denominación en inglés *Balance of Plant* (abreviadamente, BoP).

- Adicionalmente se requiere habitualmente una **batería eléctrica** para amortiguar los picos de demanda eléctrica (o recibir la energía generada por ejemplo en el frenado regenerativo de un vehículo), así como los sistemas de electrónica de potencia, para adecuar niveles de tensión continua entre la pila y el sistema acoplado, o de conversión continua/alterna.
- La parte de la energía del hidrógeno de alimentación de la pila que no aparece como energía eléctrica debe evacuarse en el **sistema de refrigeración** para mantener la temperatura acotada. Este calor residual, puede utilizarse si se considera la pila como un sistema de cogeneración, siendo una ventaja en aplicaciones estacionarias como la que se analiza en este trabajo.

Para reducir estos inconvenientes y hacer estos sistemas viables es necesaria la investigación y desarrollo en diversos aspectos, si bien está fuera del ámbito de este trabajo.

1.6. Sistema pila de combustible.

Como se ha indicado se denomina **sistema de pila de combustible** al **stack** (conjunto de celdas de la pila apiladas en serie) más todos los periféricos necesarios para asegurar el correcto funcionamiento del sistema (BoP) (Tinaut Fluixá F. V., 2016).

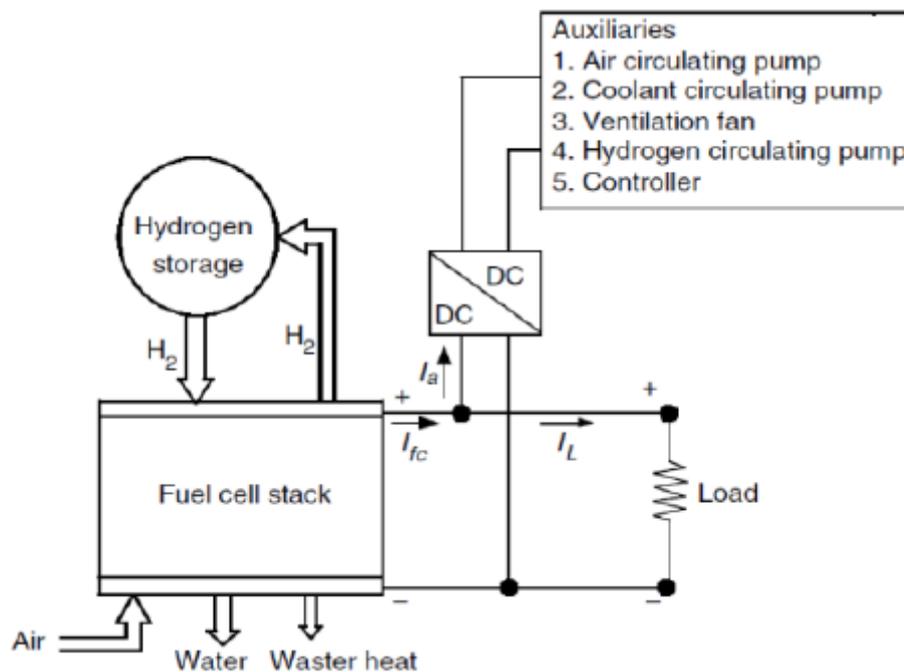


Figura 7, Sistema de pila de combustible (Tinaut Fluixá F. V., 2016).

En la imagen [Figura 7] puede observarse el esquema de un sistema de pila de combustible, en el que se aprecia el stack con todos los elementos auxiliares que componen el sistema.

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO₂, mediante una pila de combustible.

Algunos sistemas de pila de combustible incluyen también el sistema de procesado de combustible convencional para la obtención de hidrógeno a demanda de la pila a partir de otras sustancias como gas natural u otros hidrocarburos (Tinaut Fluixá F. V., 2016).

1.7. Antecedentes

Una vez que conocidas las propiedades del hidrógeno, así como su funcionamiento, se debe hablar de cómo se está produciendo la integración de este en nuestra sociedad.

- En primer lugar, no hay que perder de vista qué promueve este cambio: Políticas de protección y del medio ambiente, tanto desde su vertiente global de cambio climático (CO₂...) como de su aspecto más local de contaminación urbana (NO_x, partículas...).
- Políticas de sostenibilidad económica y aseguramiento del suministro energético, disminuyendo la dependencia que tenemos de los actuales combustibles fósiles.

La tecnología del hidrógeno y pilas de combustible se encuentra en un punto de su evolución, increíblemente joven e innovadora, pero con la suficiente solvencia técnica y desarrollo como para ser una realidad presente (Asociación española del hidrógeno, 2020).

En el inicio del despliegue del hidrógeno como combustible, cuando la demanda todavía es reducida, caben varias alternativas para la producción y el suministro del hidrógeno. Una de ellas es la producción in situ, en la propia estación de repostaje, bien mediante reformado de gas natural, bien mediante electrólisis con energía eléctrica renovable o de la red de suministro. Otra alternativa es la producción centralizada de hidrógeno en plantas industriales de alta capacidad, con captura de CO₂ para eliminar la emisión de gases de efecto invernadero. El tamaño grande de estas plantas hace que el hidrógeno producido sea más económico. Hay un consenso general en que el coste del H₂ debe llegar a ser del orden de 5 \$/kg (unos 15 c€/kWh) para una generalización de su uso, aunque recientemente se están considerando como un objetivo alcanzable llegar a 1,5 €/kg (4,5c€/kWh). El transporte y distribución a las estaciones de repostaje se realiza por medio camiones en forma gaseosa o líquida, o a través de gasoductos si se dispone de dicha infraestructura (Asociación española del hidrógeno, 2020), o se compatibiliza con las infraestructuras de gas natural.

1.8. Objetivos

El **objetivo general** de este Trabajo de Fin de Máster es conocer el funcionamiento de una pila de combustible, así como de los sistemas de generación del hidrógeno, con el fin de identificar la adaptación de un sistema basado en una pila de combustible para que funcione como sistema de generación satisfaciendo las demandas energéticas (electricidad y energía térmica) de una vivienda.

Este objetivo general puede ser descompuesto en los siguientes **objetivos específicos**:

- Conocer los **principios de funcionamiento de las pilas de combustible**.
- Saber cómo se **modelar una pila de combustible estacionaria** para obtener las potencias eléctrica y térmica, considerando dos niveles de complejidad: modelo algebraico y modelo dinámico.

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO₂, mediante una pila de combustible.

- Analizar la **influencia de las demandas eléctrica y térmica de una vivienda** considerando diversas opciones para la generación convencional, la producción de hidrógeno, los rendimientos de la pila de combustible, y el aprovechamiento de las energías generadas en exceso o bien de la generación adicional de los defectos en relación con la demanda.
- **Predecir los valores de la energía primaria consumida, así como las emisiones de CO2 y el coste económico** para diferentes situaciones de demanda y diferentes casos de estudio, analizando la influencia de las horas de funcionamiento y de la potencia media de la pila de combustible.
- **Simular mediante un modelo dinámico el comportamiento de una pila de combustible**, considerando diversos valores de las demandas eléctrica y térmica a lo largo de un día.
- Realizar diversas simulaciones del sistema de generación basado en pila de combustible mediante el modelo dinámico y **optimizar las opciones de control del sistema** planteado.

1.9.Planteamiento del trabajo

Este Trabajo de Fin de Máster se ha dividido en los siguientes capítulos:

- **CAPÍTULO 1:** En esta sección se introducen las características que presenta el hidrógeno como vector energético, así como los objetivos y el actual planteamiento, además también se repasa de manera resumida la historia del hidrógeno como combustible.
- **CAPÍTULO 2:** Se explican detalladamente los conceptos básicos necesarios para comprender el funcionamiento físico de una pila de combustible, también se mencionan de manera resumida los elementos necesarios para la implantación de un sistema de generación basado en esta tecnología.
- **CAPÍTULO 3:** En este capítulo se analiza cómo puede modelarse el comportamiento del sistema global planteado, además también se introduce el funcionamiento de las diferentes configuraciones que se van a estudiar en este trabajo.
- **CAPÍTULO 4:** En este capítulo se detalla el funcionamiento del modelo algebraico planteado.
- **CAPÍTULO 5:** En él se analizan los resultados obtenidos tras aplicar el modelo que se detalla en el capítulo anterior.
- **CAPÍTULO 6:** Se plantea una simulación dinámica en base a demandas energéticas previstas, tratando de diseñar un sistema de control que permita al sistema de generación adaptarse a dichas demandas.
- **CAPÍTULO 7:** En este último capítulo se establecen las conclusiones alcanzadas en este Trabajo de Fin de Máster.

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO2, mediante una pila de combustible.

CAPÍTULO: 2. CARACTERÍSTICAS DE LAS PILAS DE COMBUSTIBLE TIPO PEM.

2.1. Características generales de las pilas de combustible (FC).

2.1.1. Curvas características.

Con carácter general, la **curva de polarización** que proporciona la tensión en bornes de una pila de combustible tipo PEM tiene la forma de la figura [Figura 8] (Tinaut Fluixá F. , 2020).

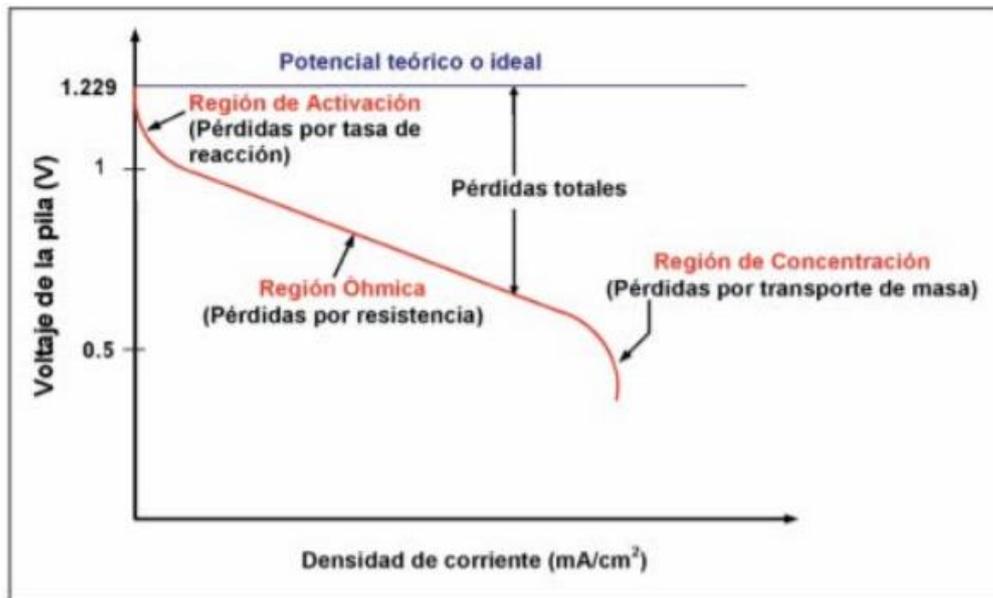


Figura 8, Curva de tensión en bornes de la pila de combustible tipo PEM (Tinaut Fluixá F. , 2020).

En la gráfica [Figura 8] se pueden apreciar **tres regiones de funcionamiento**: la primera en la que reducidos aumentos de corriente implican cambios de tensión elevados, la siguiente región viene caracterizada por una relación lineal entre la tensión y la corriente (debido a las pérdidas por las resistencias internas) y la tercera región, en la que aparecen pérdidas adicionales por transporte de masa y por lo tanto se producen reducciones importantes de la tensión con moderados aumentos de la corriente demandada.

En la figura [Figura 9] se muestra la dependencia de la tensión, el rendimiento y la potencia eléctricos proporcionados por una PC comercial tipo PEM en función de la densidad de corriente (A/cm²) (Tinaut Fluixá F. , 2020):

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO₂, mediante una pila de combustible.

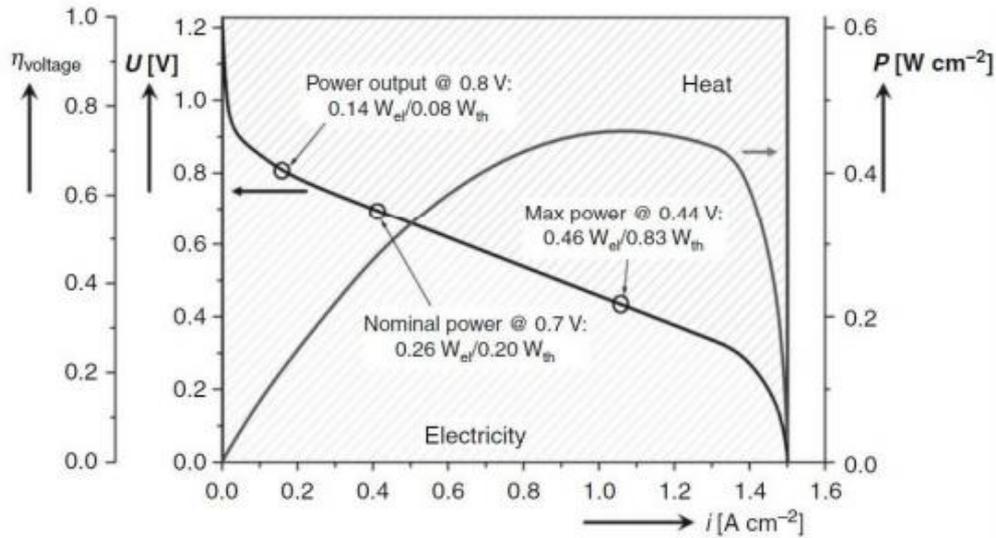


Figura 9, Puntos de funcionamiento PC (Tinaut Fluixá F. , 2020).

A partir de este gráfico se pueden plantear distintos valores típicos en varios puntos de funcionamiento, dado que la **potencia eléctrica** entregada permite calcular el **rendimiento eléctrico** de la pila al considerar una referencia de potencia (como la asociada al hidrógeno introducido):

$$V \times I = P_{el} \leftrightarrow \eta_{el}$$

La diferencia $1 - \eta_{el} = \eta_{ter}$ es la **fracción disponible como energía térmica**. Sin embargo, esto no implica que toda la energía térmica sea aprovechable, debido a su nivel térmico, por lo tanto, este rendimiento térmico podría verse reducido.

Considerando un valor de la **intensidad por unidad de superficie** I_s (A/cm²), la superficie para una intensidad dada se puede calcular como:

$$S_I = \frac{I}{I_s} \text{ (cm}^2\text{)}$$

Siendo posible calcular la potencia eléctrica correspondiente:

$$N_{PC,el} = V \times I_s \left(\frac{W}{\text{cm}^2} \right)$$

Análogamente, la superficie para una potencia dada se puede calcular en el punto de rendimiento escogido:

$$S_P = \frac{N_{PC,el}}{P_S} \text{ (cm}^2\text{)}$$

Para unos valores de referencia de densidad de corriente y de rendimiento, se puede calcular, para una potencia dada, la intensidad de corriente y la superficie que resultaría.

$$I = \frac{N_{PC,el}}{V}$$

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO₂, mediante una pila de combustible.

$$S_p = \frac{N_{PC,el}}{P_s} (cm^2)$$

Como generalmente la superficie necesaria para aportar una determinada potencia es muy elevada y por ello, muy difícilmente manejable, lo que se hace es colocar celdas de una superficie manejable en serie para conseguir la potencia demandada. Esto tiene la ventaja de que la corriente total a manejar mantiene valores aceptables, a la vez que las tensiones totales crecen (Tinaut Fluixá F. , 2020).

2.1.2. Tensión y corriente a nivel de celda de una pila de combustible.

Se considera el siguiente esquema [Figura 10], a partir del cual se plantean las ecuaciones que describen el funcionamiento de la pila de combustible.

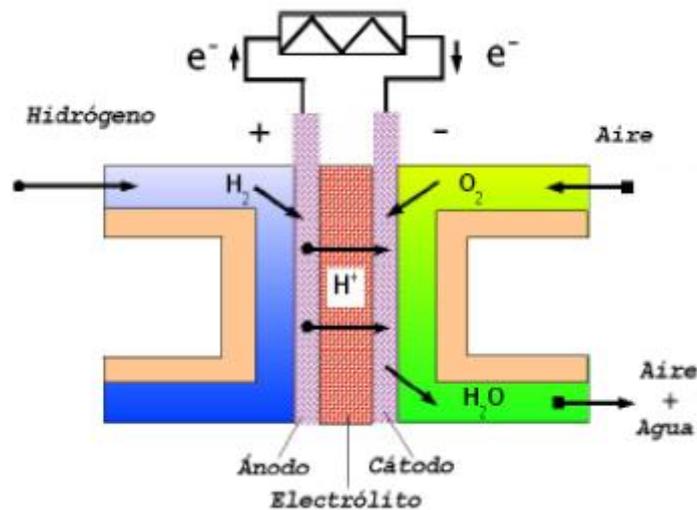
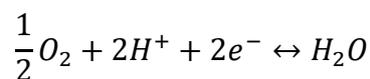
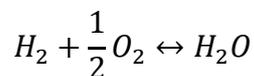


Figura 10, Funcionamiento PC (Tinaut Fluixá F. , 2020).

Las **semirreacciones** son las que se especificaron en el apartado anterior:



La **reacción global** es también la que se especificó en el apartado anterior:



Según (Tinaut Fluixá F. , 2020) esta reacción electroquímica se caracteriza por:

- Un **intercambio de carga**, con z_e electrones (2 moles por cada mol de H₂).
- Una **liberación de energía** que depende del estado inicial de los reactivos y del estado final de los productos. Esta liberación de energía corresponde al balance de entalpía y de entropía, que determina el balance de **energía de Gibbs**.

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

$$\text{Siendo en general: } \Delta G = \sum_{\text{Productos}} \Delta G_i - \sum_{\text{Reactivos}} \Delta G_i$$

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO₂, mediante una pila de combustible.

Considerando el intercambio de carga, la **cantidad total de carga Q_r** en culombios por una mol de reacción vale:

$$Q_r = z_e \cdot F = 193.000 \frac{C}{mol}$$

Siendo F = 96.500 C/mol e⁻ la constante de Faraday y z_e = 2 moles de electrones por cada mol de reacciones.

La **energía de Gibbs liberada** se puede expresar como el producto de la **carga intercambiada Q_r** y una **tensión característica V_r** de la reacción considerada, de forma que:

$$\Delta G \left(\frac{J}{mol} \right) = z_e \left(\frac{mole^-}{mol} \right) \cdot F \left(\frac{C}{mol e^-} \right) \cdot V_r(V)$$

Con lo que la **tensión característica V_r** de la reacción vale:

$$V_r(V) = \frac{\Delta G \left(\frac{J}{mol} \right)}{z_e \left(\frac{mole^-}{mol} \right) \cdot F \left(\frac{C}{mol e^-} \right)}$$

2.1.3. Rendimientos asociados a una pila de combustible.

De acuerdo con (Tinaut Fluixá F. , 2020) es posible considerar diversas expresiones de rendimiento en pilas de combustible:

- **Rendimiento termodinámico:**

$$\eta_{TD} = \frac{\Delta G}{\Delta H^\circ} = \frac{\Delta H - T\Delta S}{\Delta H^\circ} = \frac{\Delta G}{H_c}$$

Siendo H_c el poder calorífico del H₂ (120 MJ/kg) igual a la variación de la entalpía estándar de la reacción de oxidación del hidrógeno. Este rendimiento η_{TD} varía sólo con la temperatura, de la misma forma que varía ΔG(T) y en condiciones estándar para el agua vapor vale 0,94 (94%).

- **Rendimiento como relación entre tensión en bornes y tensión de referencia:**

$$\eta_V = \frac{V}{V_r}$$

Puesto que V_r es constante, este rendimiento varía de la misma forma que la **curva de polarización** de la pila, que representa la tensión eléctrica que se puede obtener de una celda de la pila en función de la intensidad demandada.

- **Rendimiento asociado a la conversión de energía en la celda:**

$$\begin{aligned} \eta_{celd} &= \frac{N_{celd}}{N_{H_2}} = \frac{I(A) \cdot V(V)}{\dot{n}_{H_2} \left(\frac{mol}{s} \right) \cdot \Delta G \left(\frac{J}{mol} \right)} \\ &= \frac{I(A) \cdot V(V)}{\dot{n}_{H_2} \left(\frac{mol}{s} \right) \cdot V_r(V) z_e \left(\frac{mole^-}{mol} \right) \cdot F \left(\frac{C}{mol e^-} \right)} = \frac{V}{V_r} = \eta_V \end{aligned}$$

Se puede ver que el rendimiento de la conversión de energía de la celda coincide con el rendimiento relación de tensiones.

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO₂, mediante una pila de combustible.

- Para el conjunto de **todas las celdas del stack** se puede definir un rendimiento global como la relación entre potencia útil proporcionada por la pila descontando la de los equipos auxiliares y la potencia del hidrógeno suministrado, la cual se puede evaluar a partir de la energía de Gibbs o de la entalpía:

$$\eta_{PC,G} = \frac{N_{PC,el}(W)}{\dot{m}_{H_2} \left(\frac{kg}{s}\right) \Delta G \left(\frac{J}{kg}\right)} = \frac{\sum_k I(A) \cdot V(V)}{\dot{m}_{H_2} \left(\frac{kg}{s}\right) \Delta G \left(\frac{J}{kg}\right)}; \quad \eta_{PC,H} = \frac{N_{PC,el}(W)}{\dot{m}_{H_2} \left(\frac{kg}{s}\right) \Delta H \left(\frac{J}{kg}\right)}$$

$$= \frac{\sum_k I(A) \cdot V(V)}{\dot{m}_{H_2} \left(\frac{kg}{s}\right) \Delta H_c \left(\frac{J}{kg}\right)}$$

$$\eta_{PC,H} = \frac{N_{PC,el}(W)}{\dot{m}_{H_2} \left(\frac{kg}{s}\right) \Delta H \left(\frac{J}{kg}\right)} = \frac{\sum_k I(A) \cdot V(V)}{\dot{m}_{H_2} \left(\frac{kg}{s}\right) \Delta H_c \left(\frac{J}{kg}\right)}$$

Como ΔG y ΔH son valores ligeramente distintos, los rendimientos asociados a evaluar la energía del flujo de hidrógeno son también ligeramente distintos.

2.1.4. Gasto de H2 en función de la potencia del stack.

Tal y como se ha expuesto, el rendimiento η_{PC} incluye la potencia sustraída por los equipos auxiliares, así como otras pérdidas y el no aprovechamiento completo del hidrógeno alimentado, por lo cual, no se trata simplemente de la relación entre la tensión proporcionada y la de referencia (Tinaut Fluixá F. , 2020). De hecho, esto hace que el rendimiento a intensidad cero sea también cero, al igual que la potencia, a pesar de que el valor del rendimiento basado en la relación de tensiones sería el máximo, como se puede ver en la [Figura 11].

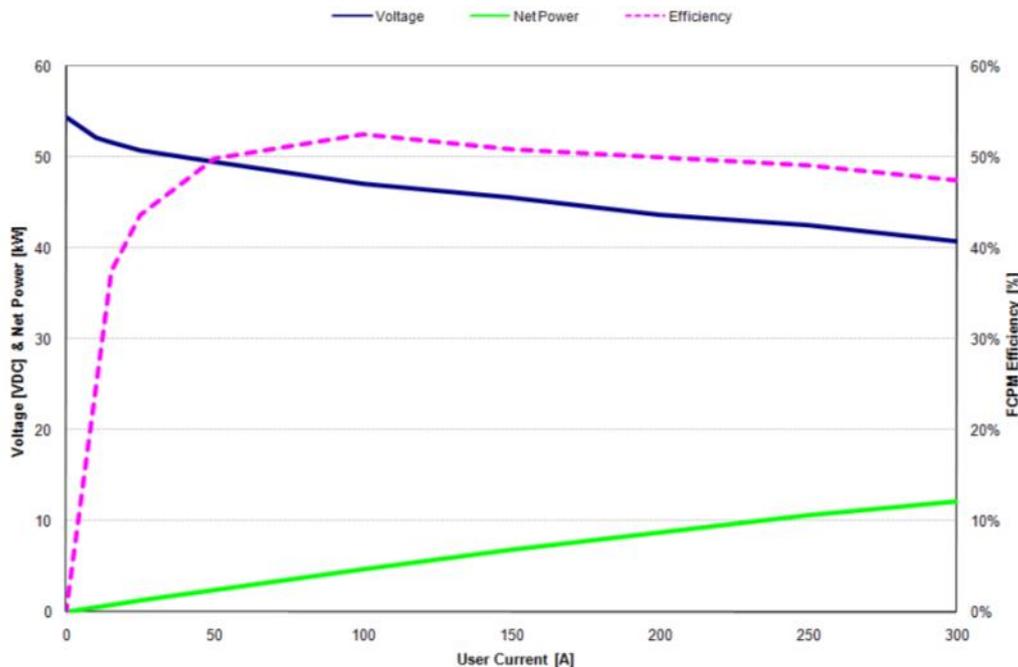


Figura 11, Características PC Hydrogenics, (Guzzella & Sciarretta, 2013).

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO2, mediante una pila de combustible.

En la imagen [Figura 12], puede observarse un esquema del conjunto de elementos que conforman un sistema de pila de combustible BoP (Balance of Plant).

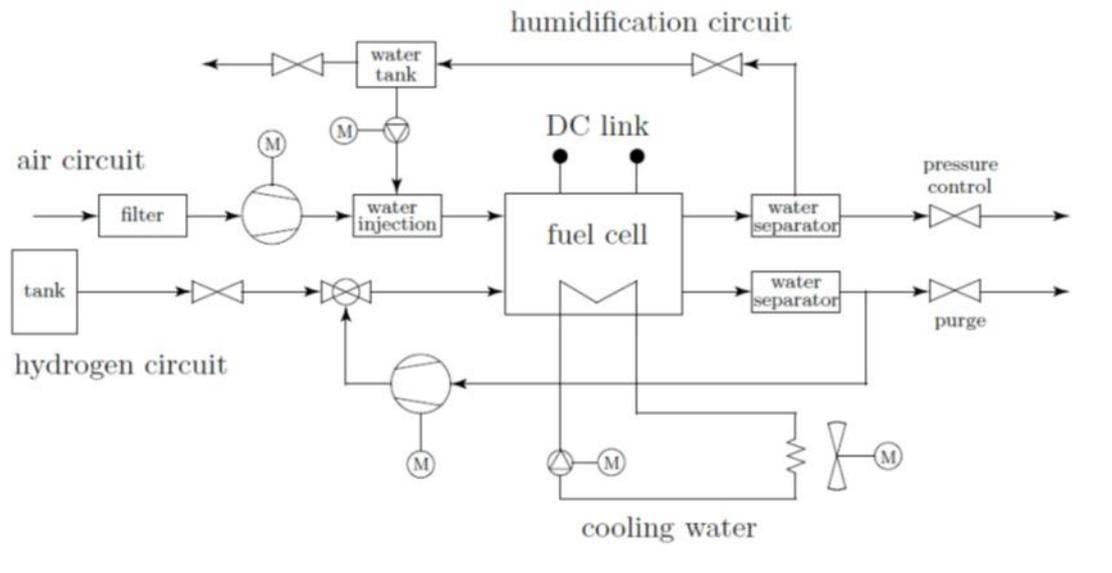


Figura 12. Balance of Plant, (Guzzella & Sciarretta, 2013).

Utilizando las definiciones del apartado anterior, se puede expresar el gasto de H₂ para una pila en función de la potencia eléctrica proporcionada por el stack y el rendimiento de dicha pila:

$$\dot{m}_{H_2} \left(\frac{g}{s} \right) = \frac{1}{\eta_{PC,G}} \frac{N_{PC,el}(kW)}{\Delta G \left(\frac{J}{kg} \right)} = 8,49 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{N_{PC,el}(kW)}{\eta_{PC,G}}$$

$$\dot{m}_{H_2} \left(\frac{g}{s} \right) = \frac{1}{\eta_{PC,H}} \frac{N_{PC,el}(kW)}{H_c \left(\frac{J}{kg} \right)} = 7,04 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{N_{PC,el}(kW)}{\eta_{PC,H}}$$

2.1.5. Gastos y caudales de H₂ y de aire.

En una PC real formada como un stack de K celdas elementales (MEAs), hay que considerar dos cuestiones adicionales (Tinaut Fluixá F. , 2020):

- No todo el H₂ introducido en el ánodo se utiliza en la reacción, ya que, debido a la necesidad de realizar purgas en el ánodo, una parte se pierde, lo que da lugar a un **factor de utilización f_{util}** (de orden de 0,8).
- Además, debe introducirse en el cátodo un **exceso de aire o de oxígeno** en relación con el estequiométrico, para facilitar el desplazamiento de la reacción y la evacuación del vapor de agua formado.

Esto obliga a que los gastos y los caudales reales de ambas corrientes de gases sean superiores a los teóricos.

En el siguiente esquema [Figura 13] se puede apreciar una relación de las variables que resultan relevantes en el circuito del hidrógeno.

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO₂, mediante una pila de combustible.

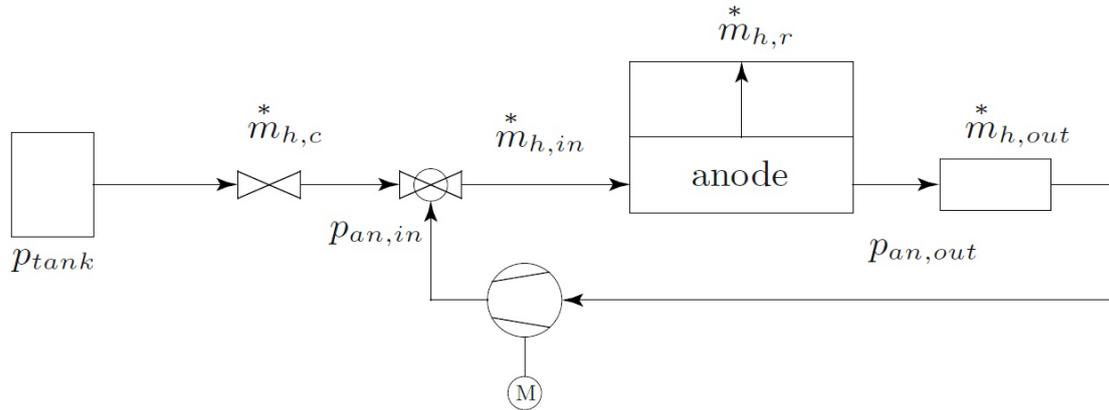


Figura 13, Variables relevantes en el circuito del hidrógeno (Guzzella & Sciarretta, 2013).

El **gasto teórico de hidrógeno** se puede obtener a partir de la expresión que lo relaciona con la corriente producida:

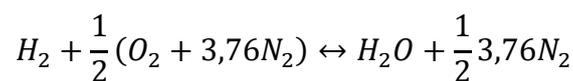
$$I(A) = \frac{\dot{m}_{H_2} \left(\frac{g}{s} \right)}{M_{H_2} \left(\frac{g}{mol} \right)} \cdot z_e \cdot F$$

Este gasto teórico de hidrógeno corresponde a un **caudal en condiciones normales** de:

$$\dot{Q}_{H_2} \left(\frac{Nm^3}{h} \right) = \frac{\dot{m}_{H_2} \left(\frac{kg}{h} \right)}{\rho_{CN}}$$

$$\rho_{CN} = \frac{P_{CN}}{R_{H_2} \cdot T}$$

Para calcular el gasto de aire, hay que considerar la reacción estequiométrica global, la cual establece la estequiometría entre los reactivos y los productos.



El **dosado estequiométrico para el H2** se calcula de la siguiente forma:

$$\frac{1}{F_e} = \left\{ \frac{\dot{m}_{aire} \left(\frac{kg}{h} \right)}{\dot{m}_{H_2} \left(\frac{kg}{h} \right)_{est}} \right\} = 34,05$$

Con el dosado estequiométrico se puede calcular el **gasto de aire estequiométrico** teórico:

$$\dot{m}_{Aire} \left(\frac{kg}{h} \right) = \frac{1}{F_e} \cdot \dot{m}_{H_2} \left(\frac{kg}{h} \right)$$

Una vez calculado el gasto de aire estequiométrico se puede calcular el **caudal de aire estequiométrico** teórico:

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO2, mediante una pila de combustible.

$$\dot{Q}_{\text{Aire}} \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{h}} \right) = \frac{\dot{m}_{\text{Aire}} \left(\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right)}{\rho_{\text{Aire}} \left(\frac{\text{kg}}{\text{Nm}^3} \right)}$$

El **aire real** se calcula a partir del aire estequiométrico con un factor de exceso (Exceso=1/Fr):

$$\dot{m}_{\text{realAire}} \left(\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) = \dot{m}_{\text{Aire}} \left(\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) \cdot \text{Exceso}$$

$$\dot{Q}_{\text{realAire}} \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{h}} \right) = \frac{\dot{m}_{\text{realAire}} \left(\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right)}{\rho_{\text{Aire}} \left(\frac{\text{kg}}{\text{Nm}^3} \right)}$$

2.1.6. Potencia necesaria para comprimir el H2 y el aire.

En el interior de la pila de combustible se establece la siguiente relación entre presiones:

$$\text{Presión en el ánodo (H2)} = \text{Presión en el cátodo (aire)} + \Delta \text{Presión} (\sim 0,2 \text{ bar})$$

La expresión general del trabajo por unidad de masa necesario para comprimir un gas desde una presión P_0 y una temperatura T_0 hasta una presión p_1 , usando un proceso isentrópico como referencia para el rendimiento de compresión η_{cs} vale:

$$W_c = \Delta h_c = \frac{1}{\eta_{cs}} \Delta h_s = \frac{1}{\eta_{cs}} C_p (T_{1s} - T_0)$$

$$\frac{T_{1s}}{T_0} = \left(\frac{P_1}{P_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} ; \gamma = \frac{C_p}{C_v}$$

$$W_c = \frac{1}{\eta_{cs}} C_p T_0 \left[\left(\frac{P_1}{P_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \text{ (J/kg)}$$

Estas expresiones del **trabajo de compresión** son por unidad de masa y por ello, independientes de la potencia de la pila de combustible. **Las potencias de compresión** necesarias para cada fluido sí son dependientes de los correspondientes gastos en la pila:

$$N_c = \dot{m} W_c \text{ (W)}$$

Basado en esto, con carácter general, para una presión especificada para cada gas, las correspondientes potencias necesarias para comprimir el hidrógeno y el aire resultan ambas proporcionales al gasto de hidrógeno, y en consecuencia proporcionales a la corriente eléctrica I proporcionada por la pila de combustible (Tinaut Fluixá F. , 2020).

En la mayor parte de las aplicaciones, el hidrógeno está previamente comprimido y basta colocar un regulador de presión para que se reduzca la presión desde el almacenamiento hasta la utilización. En el sistema completo de un stack de PC, existe una soplante de recirculación del hidrógeno, en cuyo circuito se realiza una extracción para evacuar los gases que han atravesado la membrana de difusión, como el N2, O2 y vapor de agua. Esta purga de

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO2, mediante una pila de combustible.

gases conduce a que el factor de utilización del H₂ sea inferior a la unidad. En todo caso, es necesario comprimir el hidrógeno hasta la presión de suministro, con cálculos semejantes a los realizados, excepto que con presiones elevadas no se puede suponer comportamiento ideal en la compresión (Tinaut Fluixá F. , 2020).

2.1.7. Refrigeración de la pila de combustible.

Adicionalmente, la potencia no aprovechada aparece como energía térmica que provoca un calentamiento, siendo necesario retirarla para evitar el sobrecalentamiento de la pila.

$$\dot{Q}_{Refr} = \eta_{PC,ter} N_{H_2} = (1 - \eta_{PC,el}) N_{H_2} = (1 - \eta_{PC,el}) \frac{N_{PC,el}}{\eta_{PC,el}}$$

Lo que sucede es que, al variar el punto de funcionamiento de la pila de combustible, como el rendimiento eléctrico varía, también lo hace la fracción térmica, cambiando de forma importante los requerimientos de refrigeración, así como la energía térmica disponible en los sistemas de generación conjunta de energía eléctrica y térmica. Con carácter general, la potencia para accionar el sistema de refrigeración depende del cuadrado de la corriente eléctrica de la pila de combustible (Tinaut Fluixá F. , 2020).

2.1.8. Conexión en serie de las celdas de un stack.

Para una potencia elevada, resulta muy difícil de controlar el sistema si la pila estuviera compuesta por una sola celda, ya que implicaría controlar corrientes muy elevadas con tensiones reducidas, para evitar esta situación, lo que se hace es configurar los conjuntos completos con celdas conectadas en serie con el fin de poder proporcionar la tensión requerida con una intensidad menor. Hay que hacer notar, que la alimentación de hidrógeno y de oxígeno o aire a las celdas elementales siempre se produce en paralelo, independientemente de que dichas celdas se conecten eléctricamente en serie.

Al aplicar esta metodología, cabe la duda de si los conceptos desarrollados anteriormente siguen siendo válidos, independientemente de la configuración y del número elegido de celdas en serie.

Según (Tinaut Fluixá F. , 2020), se puede comprobar que los cálculos relativos al gasto de hidrógeno siguen siendo válidos independientemente de la configuración y el número de celdas en serie.

2.2. Elementos constructivos de una instalación basada en una pila de combustible.

En este apartado se van a tratar a nivel práctico los elementos necesarios para instalar un sistema de pila de combustible en una aplicación residencial para producir simultáneamente energía eléctrica y térmica, de tal manera que se muestre como el conocimiento teórico que se desarrollará en el presente trabajo puede aplicarse a un sistema real.

2.2.1. Esquema de la instalación planteado.

Generalmente la implementación de los sistemas de pila de combustible se realiza mediante la implementación de un sistema BoP (Balance of Plant) ya en este sistema se encuentran

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO₂, mediante una pila de combustible.

contenidos todos los elementos funcionales necesarios para el correcto funcionamiento de la pila tal y como puede apreciarse en el esquema [Figura 14].

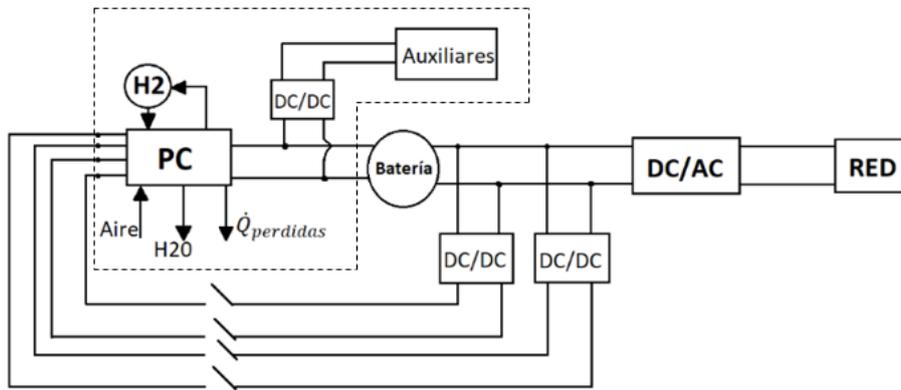


Figura 14, Esquema instalación con BoP.

El sistema BoP incluye una batería eléctrica necesaria para poder arrancar la pila y para poder estabilizar la corriente continua que vamos a tener en la instalación. Posteriormente y de cara a poder entregar al consumidor una corriente alterna a la tensión adecuada, se introduce en el sistema un convertidor CC/CA, además con el fin de arrancar la pila y otorgar las corrientes de arranque de baja tensión y de alta tensión. Por último, se necesita un conmutador con el fin de poder desconectar la pila de combustible y apagarla/desconectarla cuando se precise, así como un sistema de control que al menos evite los puntos de malfuncionamiento de la pila de combustible.

2.2.2. Modelos comerciales de BoP.

Existen diversos fabricantes que venden estos productos y que ofrecen diversas configuraciones para la instalación. Entre estos fabricantes se encuentra la empresa **PowerCell**, cuyo sistema BoP se puede apreciar en la siguiente imagen [Figura 15] (PowerCell, 2019).

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO₂, mediante una pila de combustible.

PowerCell MS-30 10-30 kW PEM Fuel Cell System		Physical Data:		
<p>PowerCell MS-30 can e.g. be used as a range extender (REX) for battery-operated electrical vehicles. By integrating this system with hydrogen tanks and power electronics, the vehicle's range can be extended, without this leading to emissions. PowerCell MS-30 runs on hydrogen and has a fully automated system for cell voltage monitoring. PowerCell MS-30 is easy to integrate, with low fuel consumption, and is based on the robust PowerCell S2 stack.</p> 		Net electric power	10 / 20 / 30 kW	
		Voltage output	63-141 / 123-273 / 134-290 V DC	
		Start-up time	30 s	
		Expected lifetime power generation	10 000 h	
		Temperature & RH ambient range	-20°C ¹⁾ to 50°C, 5-95% non-condensing	
		Installation environment	Outdoor, Pollution degree 3	
		Dimensions (WxDxH)	415 x 641 x 656 mm	
		Weight	145 kg	
		Maximum cooling inlet temperature		
		- HT cooling (fuel cell stack)	70°C	
- LT cooling (cathode compressor)	45°C			
Fuel supply pressure	10 barG			
Fuel quality	Hydrogen grade 3.5 or higher			
Fuel consumption	158 / 316 / 437 slpm @ 10 / 20 / 30 kW			
Maximum system efficiency	>53% ²⁾			
Sound level	<80 dBA at 1 meter at max. power			
IP classification	IP54 ⁴⁾			
BoP supply power				
- HV input	3.5 / 5 kWe @ 300 - 440 V DC ³⁾			
- LV input	0.5 / 1.5 kWe @ 24 V DC ⁵⁾			
Communication	CAN-bus, relay dry contact (em.stop) or other on request			
Standby power consumption				
- Non-freezing	60 W			
- Sub-zero	350 W			
<small>1) target values for products, not guaranteed for prototype 2) sub-zero operations (standby & start-up) with low voltage assistance 3) including external cooling system (e.g. radiator fans etc.) losses 4) optional, on request 5) 3.5 kWe for 10 / 20 kW for 30 kW 6) without / with internal radiator fan control, 12 V DC on request (10/20 kW)</small>				

Figura 15, Especificaciones del sistema BoP PowerCell MS-30 (PowerCell, 2019).

El sistema BoP ofrecido por (PowerCell, 2019) presenta una gran facilidad de implementación, que podría resultar interesante para el diseño planteado. Sin embargo, el rendimiento operativo de este sistema es relativamente bajo en comparación con otros modelos (en torno al 53%).

Proton Motor es otra empresa que ofrece esta clase de productos de los que se puede destacar la amplia posibilidad de configuración, tal y como puede apreciarse en la imagen [Figura 16].

PM Module (Examples)	S5	S8	S30
Electrical System			
Power Range [kW]	1.2-5.1	1.6-8.4	4.1-28.4
Current Range [A]	0-110	0-150	0-500
Voltage Range [V DC]	46-82	56-110	56-110
EL System Efficiency [%]	> 46	> 43	> 38
Hydrogen System			
Hydrogen Quality	ISO 14687-2 / SAE J2719		
H2 Supply Pressure [bar _r]	2.2-7.5	2.2-7.5	3.0 +/-0.5; 7.0 +/-0.5
Hydrogen Consumption (max) [kg/h]	0.31	0.57	1.85
Environmental Conditions			
Ambient Temperature [°C] Operation:	+5 to +40		
Storage & Transport:	-20 to +60		
Operating Altitude* [m]	< 2,000		
Humidity** [% r.H.]	< 95		
Lifetime [op. hrs.]	> 20,000		
Dimensions / Others			
LxW x H [mm x mm x mm]	785 x 465 x 308	785 x 465 x 308	1000 x 600 x 1100
Volume [l]	112	112	660
Tare weight [kg]	77	79	260
Conformity	CE, EN 62282-2		
* without de-rating	Errors excepted, technical changes reserved. Product specifications are subject to change without further notification.		
** non condensing			



PM Module S5/S8



PM Module S30

Figura 16, Especificaciones de pila de H2 de Proton Motor (Proton Motor, 2019).

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO2, mediante una pila de combustible.

Existen distintos ejemplos de configuración, pero también se puede solicitar un ensamble de un BoP con cualquier otra pila del módulo PM 200. Esto ofrece distintas configuraciones, teniendo que decidir entre distintas opciones válidas (Proton Motor, 2019), tal y como se aprecia en la imagen [Figura 17].

PM 200 Stack Module

Type	2.2	4.4	6.6	8.8	11.0	13.2	15.4
Electrical							
Power Range [kW]	0.4–2.1	0.8–4.2	1.2–6.3	1.6–8.4	2.0–10.6	2.4–12.7	2.8–14.8
Current Range [A]	0–150						
Voltage Range [V DC]	14–28	28–55	42–83	56–110	70–138	84–165	98–193
EL Efficiency [%]*	47–67						
Hydrogen							
Hydrogen Quality	ISO 14687-2 / SAE J2719						
H2 Supply Pressure [bar _a]	3.0 +/-0.5; 7.0 +/-0.5						
Hydrogen Consumption (max) [kg/h]	0.14	0.29	0.43	0.57	0.71	0.85	1
Dimensions							
Width x Height [mm x mm]**	294 x 237						
Length [mm]**	395	489	583	676	771	861	957
Volume [l]	9.2	12.5	15.8	19.1	22.4	25.7	29.0
Tare weight [kg]	15.9	19.3	22.7	26.1	29.5	32.9	36.3

* without peripherals
** main dimensions

Figura 17, Especificaciones del sistema PM 200 Stack Module (Proton Motor, 2019).

2.2.3. Instalaciones adicionales.

Al sistema BoP hay que añadirle el tanque de hidrógeno y los convertidores CC/CC y CC/CA, además de la batería y el conmutador.

a) Almacenamiento del hidrógeno.

El almacenamiento de hidrógeno en la práctica se lleva a cabo mediante sistemas de almacenamiento de gas a presión, ya que este método es el más común y rentable de acuerdo con (Baruque de la Fuente, 2018). Por ejemplo, se pueden emplear botellas de almacenamiento de gases como la mostrada en la figura [Figura 18] con un volumen de almacenamiento de 40L cada una (Santiago, 2017), de tal manera que la masa almacenable en estos tanques ronda los 1,53 kg. Así, con un sistema formado por 14 botellas se dispondría de reservas de hidrógeno de unos 21 kg. Como se verá más adelante, esto equivaldría al consumo de la aplicación residencial durante una semana.



Figura 18. Detalles de una botella de almacenamiento de hidrógeno (Santiago, 2017).

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO₂, mediante una pila de combustible.

Existe una relación entre el coste del dispositivo y de almacenamiento y la presión que puede soportar dicho dispositivo, quedando claro que a mayor presión mayor cantidad másica de combustible (hidrógeno en este caso) podrá almacenar.

Como ejemplo particular de desarrollo en este campo, que no es ni mucho menos el propósito de este trabajo, se puede comentar algún ejemplo novedoso como el tanque de hidrógeno del Toyota Mirai. Este tanque de hidrógeno resulta bastante interesante por su movilidad y su facilidad de transporte y recarga (Santiago, 2017).

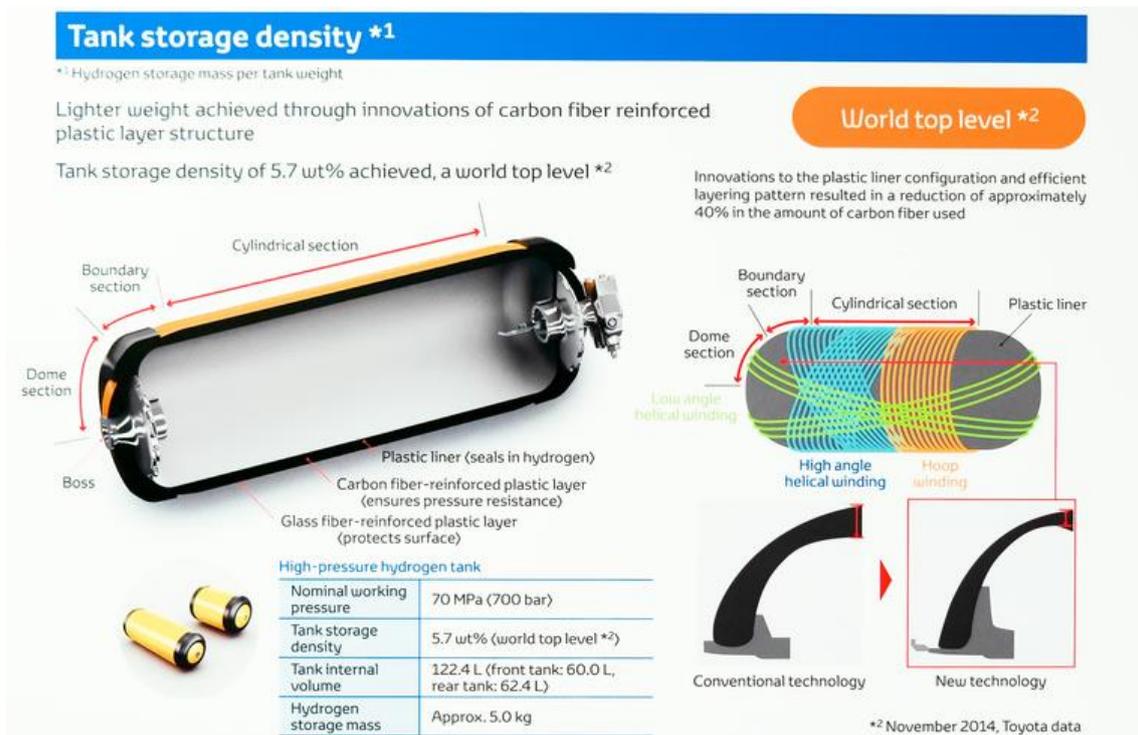


Figura 19, Tanques de hidrógeno montados sobre el Toyota Mirai (Toyota España, S.L.U., 2021).

Como puede apreciarse en la imagen [Figura 19], un conjunto formado por dos de estos tanques proporciona una capacidad de almacenamiento aproximada de 10 kg, ya que es capaz de almacenar hidrógeno a una presión muy elevada.

b) Convertidores CC/CC y CC/CA.

Siguiendo las especificaciones del sistema, en primer lugar, es necesario un convertidor CC/CC que convierta la tensión de salida de la batería a las tensiones necesarias de entrada a la pila. Finalmente, se necesitaría otro convertidor para poder llevar esta tensión a la red. Para ello se podría considerar un convertidor CC/CA.

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO2, mediante una pila de combustible.

c) **Batería.**

En el sistema planteado, sería necesario colocar una batería a la salida de la pila de H₂ con el fin de almacenar toda esa energía producida por la pila, para luego poder suministrarse a partir de una tensión constante. Además, esta energía almacenada por la batería servirá para iniciar el arranque de la pila de H₂ una vez sea esta desconectada. Se podría seleccionar una batería como la mostrada en la imagen [Figura 20].



Figura 20. Batería de litio LiFePo₄ CNNTNY 72v 30ah para Motor 2000 W.

2.2.4. **Tamaño y peso de la pila, así como de la instalación en su conjunto.**

De acuerdo con las especificaciones de (Proton Motor, 2019), es posible obtener el tamaño y peso del sistema BoP, cuyo volumen ronda los 112 litros y su peso ronda los 79 kg. Esto equivale a una potencia específica del sistema de 0,134 kW/kg y 0,095kW/L.

Mientras que el tamaño de los depósitos rondaría los 560 litros con un peso de 672 kg, y la batería tiene un volumen de 6 litros y un peso de aproximadamente 15 kilos. El peso y volumen de los convertidores puede considerarse despreciable.

El volumen total del sistema podría rondar los 700 litros con un peso de aproximadamente 766 kg.

Otro ejemplo de sistema BoP lo podemos encontrar en la oferta de (PowerCellution, 2021) [Figura 21].

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO₂, mediante una pila de combustible.

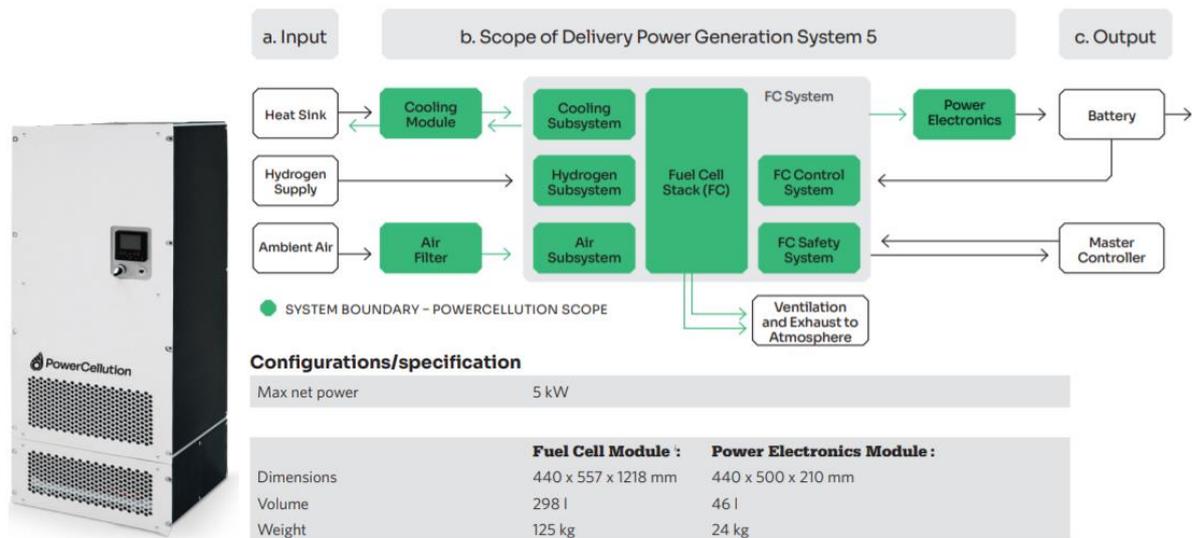


Figura 21. Sistema 5kW de PowerCellution (PowerCellution, 2021).

En esta imagen se puede ver cómo sería realmente un sistema BoP y cuál es el espacio y el peso de dicho sistema.

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO₂, mediante una pila de combustible.

CAPÍTULO: 3. SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍAS ELÉCTRICA Y TÉRMICA BASADO EN PILA DE COMBUSTIBLE.

En este capítulo se explica cómo se ha desarrollado el modelo predictivo en base al cual se centra todo el trabajo, partiendo de un planteamiento general para después comentar cómo se justifica este estudio y finalmente hablar de las distintas configuraciones del sistema de generación.

3.1. Planteamiento general del sistema

El planteamiento seguido durante todo el trabajo es el de buscar un sistema combinado de producción de calor y electricidad para una vivienda aislada. Bajo esta hipótesis se ha diseñado un modelo de simulación para predecir, en función de las demandas eléctrica y térmica anuales y de las horas de funcionamiento, la cantidad de energía eléctrica y térmica que se puede generar, de manera que al compararla con las demandas es posible calcular las cantidades de energía primaria consumida, las emisiones de CO₂... para los distintos sistemas utilizados. De tal manera que al final sea posible realizar una comparación entre los distintos casos de estudio.

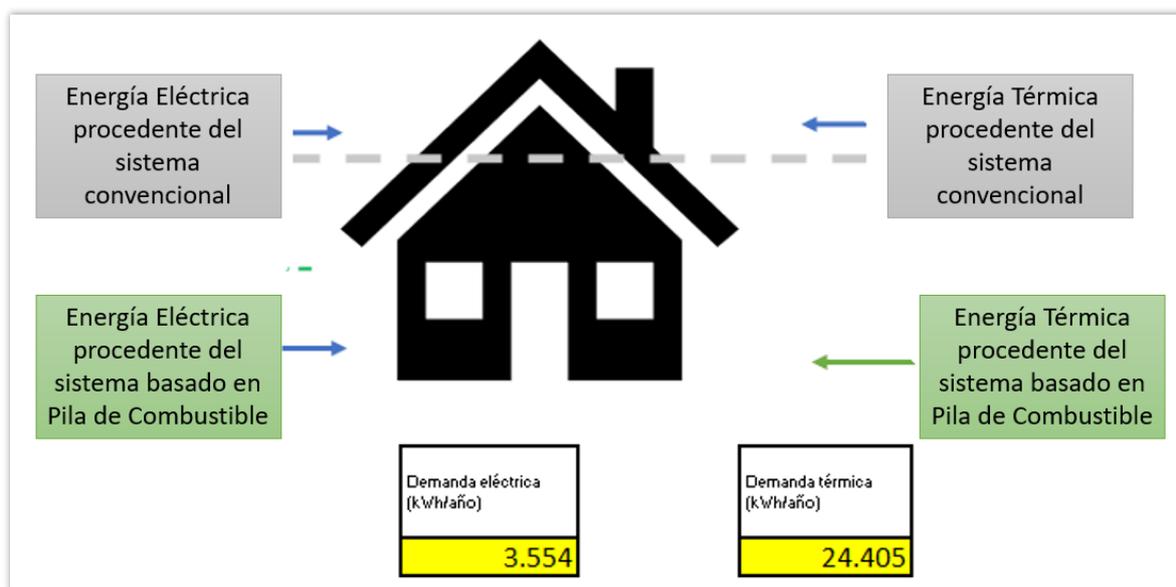


Figura 22. Demanda eléctrica y térmica de una vivienda y opciones para satisfacerlas.

La idea principal del estudio es que una casa tiene unas demandas eléctricas y térmicas, y que éstas han de ser satisfechas, tal y como se muestra en la imagen [Figura 22]. El **sistema convencional** que puede satisfacer estas demandas (o al menos el más generalizado) consta de un sistema compuesto por un acoplamiento a la red eléctrica y una caldera de gas natural acoplada a la red de gas natural.

Como **sistema alternativo**, se considera la posibilidad de satisfacer dichas demandas mediante una **pila de combustible** alimentada con hidrógeno para generar las energías eléctrica y térmica, manteniendo si es necesario un aporte de los sistemas convencionales de electricidad y gas. Se plantea la idea de comparar la energía procedente de la pila de

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO₂, mediante una pila de combustible.

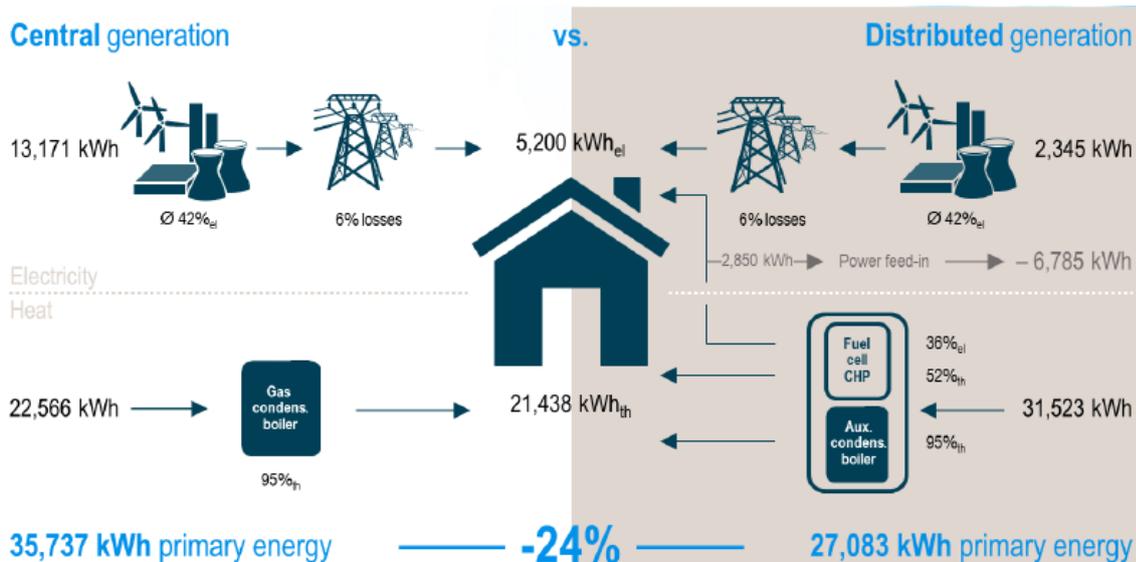
combustible con diversas configuraciones (5 casos) con el sistema convencional. La comparativa se enfoca desde tres aspectos básicos y fundamentales de todo sistema energético hoy en día, el consumo de energía primaria, las emisiones de CO₂ y el coste económico.

3.2. Justificación del caso de estudio

La idea que se plantea es sustituir en parte o por completo las demandas energéticas (electricidad más térmica) de una vivienda mediante un sistema basado en **una pila de combustible** (tipo PEM) **alimentada con hidrógeno** obtenido a partir de diversas posibilidades (suministrado a partir de reformado de gas natural con o sin captura de CO₂, generado in situ mediante reformado de gas natural sin captura de CO₂, generado in situ mediante electrólisis con electricidad renovable ...). Con ello se pretende evaluar las posibilidades de las distintas alternativas tecnológicas en términos de **energía primaria, emisiones de CO₂, costes de inversión y de funcionamiento** siempre orientado a la demanda en el sector doméstico.

El modelo de simulación se ha realizado en Excel y se ha diseñado para que permita considerar diferentes demandas eléctricas y energéticas de una vivienda. Para cubrir la demanda energética de la vivienda, se establece una potencia media y una cantidad de horas de funcionamiento de la pila de combustible. De esta manera, la demanda eléctrica no cubierta por la pila se cubre a partir de la red eléctrica, mientras que la energía eléctrica excedentaria se exporta a la red. Para la demanda térmica se procede análogamente, ya que la parte no satisfecha por la pila se obtiene mediante una caldera convencional, si bien el exceso de energía térmica producida se pierde.

Para poder validar el modelo, se ha considerado un escenario de referencia que corresponde a las estimaciones obtenidas por (Ruf, Lange, Pfister, & Droege, 2018) para una vivienda que consume energía eléctrica (5.200 kWh/año) y térmica (21.438 kWh/año), comparando las alternativas de generación centralizada y distribuida (basada en un reformador in situ combinado con una pila de combustible) y que se muestran en el siguiente esquema [Figura 23]. Como se puede ver en la figura, en determinadas condiciones, el consumo de energía primaria se reduce un 24% al comparar las dos alternativas.



1) Exemplary case of a German, partially renovated 1/2-family dwelling in current conditions (2014), total-balance or power-credit methodology

Figura 23, Comparación entre generación centralizada y distribuida, basada en una pila de combustible con reformado in situ de gas natural (Ruf, Lange, Pfister, & Droege, 2018).

La idea es en primer lugar, reproducir los resultados de este caso de estudio para poder después aplicar el modelo en distintas configuraciones de demanda, consumo y funcionamiento, para poder así comprobar la viabilidad en diversas situaciones, atendiendo a parámetros energéticos, económicos y medioambientales.

3.3. Configuraciones del sistema de generación.

En este trabajo se han tenido en cuenta las siguientes configuraciones de generación de energía para satisfacer las demandas de energía eléctrica y térmica:

- Sistemas convencionales.**
- Pila de combustible con reformador de gas natural in situ.**
- Pila de combustible utilizando hidrógeno procedente de un reformador de gas natural sin captura de CO₂.**
- Pila de combustible utilizando hidrógeno procedente de un reformador de gas natural con captura de CO₂.**
- Pila de combustible utilizando hidrógeno procedente de un electrolizador centralizado.**
- Pila de combustible utilizando hidrógeno procedente de un electrolizador in situ.**

Como ya se ha indicado, en todos los casos aparte del convencional, se supone que **la demanda eléctrica no satisfecha por la pila de combustible se cubre con electricidad de la red eléctrica convencional**. Además, en caso de que la producción de la pila de combustible sea mayor que la demanda de la vivienda, **la diferencia se exporta a la red eléctrica**, contribuyendo a la reducción de energía primaria por la electricidad que no es necesario generar.

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO₂, mediante una pila de combustible.

Para la **demanda térmica**, se supone análogamente que la parte de demanda térmica no satisfecha por la pila de combustible se sigue cubriendo mediante una caldera alimentada con gas natural. Por el contrario, **si hay exceso de energía térmica producida en la pila de combustible, éste se pierde**. Hay que tener en cuenta que la relación calor-electricidad (RCE) de la demanda residencial es generalmente muy superior a la unidad, mientras que la RCE de una pila de combustible es del orden de la unidad.

A continuación, se explican detalladamente las distintas **configuraciones**.

A. Generación de energía mediante el sistema convencional.

La idea de esta parte del estudio es tener un sistema de referencia con respecto al cual comparar los resultados obtenidos de las diferentes configuraciones. Por ello, es necesario calcular los consumos de energía primaria, emisiones de CO₂ y coste de una instalación basada en el sistema convencional que como se ha explicado anteriormente, constaría de una conexión a la red eléctrica para satisfacer la demanda eléctrica y una caldera de gas natural para satisfacer la demanda térmica.

B. Generación de energía mediante una pila de combustible con reformador de gas natural in situ.

En esta situación la instalación consta de una pila de combustible y de un reformador de gas natural, de manera que el sistema se alimenta de la red de gas natural y produce hidrógeno para posteriormente generar electricidad y calor.

Este sistema ofrece muchas ventajas, ya que al tener dos subsistemas es posible, por ejemplo, regular la (RCE) de la instalación para ajustarla a la de la vivienda. Además, la mayoría de las pérdidas térmicas debidas al rendimiento del sistema conjunto de reformador y pila de combustible son aprovechables. Por lo tanto, se puede decir que este sistema, a pesar de utilizar una fuente de energía no renovable, presenta ventajas.

C. Generación de energía mediante una pila de combustible utilizando hidrógeno procedente de un reformador de gas natural sin captura de CO₂.

En esta situación el usuario solamente dispone de un sistema formado por una pila de combustible, pero es necesario considerar de dónde viene el hidrógeno utilizado por la pila.

En esta situación particular, el hidrógeno proviene de un reformador centralizado, que presentará un rendimiento dado, y que venderá el hidrógeno a un precio dado, de tal forma que el usuario solamente tendría que preocuparse de a quien compra el hidrógeno.

D. Generación de energía mediante una pila de combustible utilizando hidrógeno procedente de un reformador de gas natural con captura de CO₂.

Este caso es similar al anterior, pero teniendo en cuenta que en el reformador centralizado de gas natural se dispone de un sistema de captura de CO₂ que reduce drásticamente las emisiones de este gas, pero que a su vez empeora el rendimiento de obtención de dicho hidrógeno y por ello aumenta el coste del hidrógeno.

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO₂, mediante una pila de combustible.

E. Generación de energía mediante una pila de combustible utilizando hidrógeno procedente de un electrolizador centralizado.

En este caso, la instalación es la misma que en los dos casos anteriores, pero teniendo en cuenta que el hidrógeno es obtenido de forma centralizada a partir de electrolizar agua utilizando para ello energía eléctrica.

Esta configuración se utilizaría en un hipotético caso para almacenar energía excedente de sistemas de energía renovable, para posteriormente ser distribuido en forma de hidrógeno a las distintas instalaciones como la que se plantea en este trabajo.

F. Generación de energía mediante una pila de combustible utilizando hidrógeno procedente de un electrolizador in situ.

En este caso, la instalación contaría con un sistema basado en un electrolizador y una pila de combustible, de tal manera que es posible aprovechar la energía térmica del electrolizador para calefactar la vivienda.

La mayor desventaja que supone este sistema frente al sistema de reformador in situ es que no es fácil regular la RCE de la instalación, ya que al suponer que el hidrógeno ha de ser producido según se genera la electricidad, no permite un control independiente del sistema.

CAPÍTULO: 4. MODELO ALGEBRAICO DE GENERACIÓN DE ENERGÍAS ELÉCTRICA Y TÉRMICA EN UNA PILA DE COMBUSTIBLE.

En este capítulo partiendo de la información aportada en el capítulo 3, se va a explicar cómo se ha desarrollado el modelo algebraico de la pila de combustible para la predicción de resultados en Excel. En realidad no es estrictamente un modelo de prediga el punto de funcionamiento de la pila de combustible, sino más bien un **conjunto de relaciones algebraicas que permite obtener resultados relativos a la capacidad de satisfacer la demanda de energías eléctrica y térmica del sistema de pila de combustible**, a partir de una serie de variables relevantes de la misma (**rendimiento eléctrico, fracción de energía térmica**) y las condiciones de funcionamiento (**potencia eléctrica, número de horas de funcionamiento anuales**).

Este modelo algebraico permite estimar las energías producidas por la pila de combustible a partir de considerar una **potencia eléctrica media de funcionamiento**, lo que conlleva asociada una potencia térmica media, y ambas se desarrollan durante un **número determinado de horas en el periodo considerado** (por ejemplo, un año). Los parámetros de entrada son la potencia eléctrica y el número de horas de funcionamiento, junto con los **valores del rendimiento eléctrico y el rendimiento térmico** (fracción de energía térmica generada en la PC). Estas dos variables no se pueden elegir de forma independiente, ya que están relacionadas a través del rendimiento global máximo (un poco menor de la unidad).

$$\eta_{global,PC} = \eta_{eléctrico} + \eta_{térmico} = \frac{P_{eléctrica}}{P_{H_2}} + \frac{P_{térmica}}{P_{H_2}} < 1$$

De esta forma, se pueden calcular fácilmente resultados como la **energía eléctrica y la energía térmica producidas** en el intervalo considerado (un año), así como **las energías que es preciso seguir suministrando por sistemas convencionales** (electricidad y gas natural) en caso de que la PC no pueda satisfacer completamente las demandas de la utilización. Además, se calcula a **energía asociada a la cantidad de hidrógeno** necesario para alimentar la PC, así como las **cantidades de electricidad o de gas natural** que son necesarias para **producir el hidrógeno** en las distintas configuraciones consideradas (electrólisis, reformado). A partir de todas estas cantidades de electricidad y de gas natural se pueden calcular las **energías primarias involucradas y las emisiones de CO2 generadas**. Adicionalmente se realiza una estimación de los **costes asociados a cada configuración**, tanto **operativos**, como derivados de los **costes de inversión** en los equipos. Para sistematizar estos resultados se consideran las configuraciones presentadas al final del capítulo 3.

El modelo algebraico se ha desarrollado en Excel, estructurándolo en **varios bloques: Cálculos energéticos, Cálculos de emisiones de CO2, Resumen de emisiones y rendimientos globales, y Cálculos económicos**.

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO2, mediante una pila de combustible.

4.1. Bloque de cálculos energéticos.

La representación esquemática e interfaz del modelo de predicción es el bloque cuyo aspecto se muestra a continuación [Figura 24], a semejanza lo planteado por (Ruf, Lange, Pfister, & Droege, 2018).

4.1.1. Simbología y colores de las celdas.

Se pueden apreciar celdas de distintos colores; el diseño se ha hecho de tal manera que las **casillas amarillas** representan las **entradas a introducir como características específicas del problema**, es decir, parámetros a introducir, a partir de los cuales el sistema entero realizará los cálculos necesarios para obtener diversos valores (energía primaria, emisiones de CO2 ...).

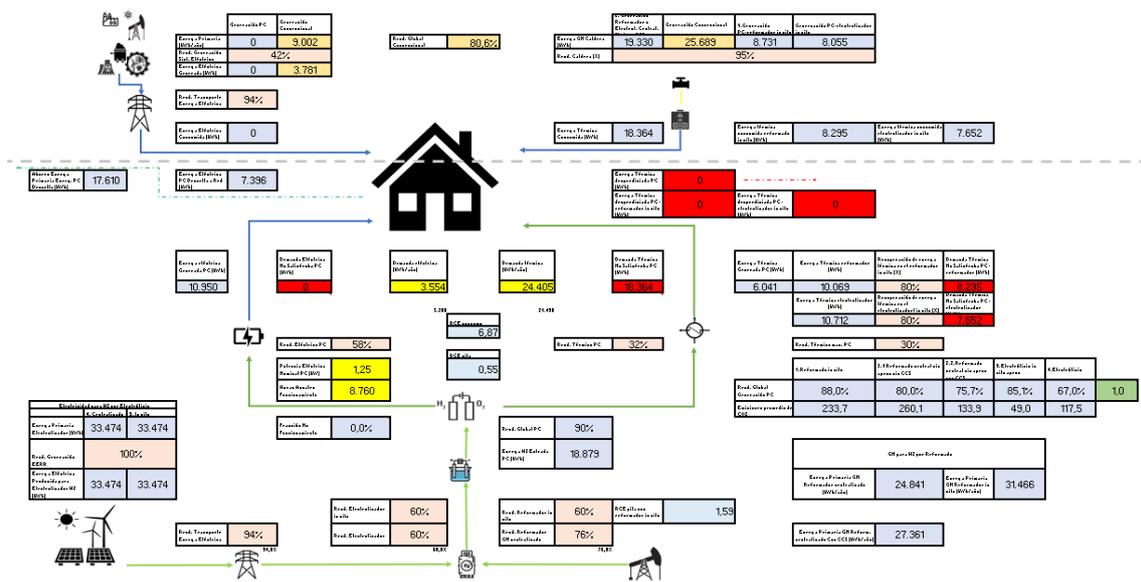


Figura 24. Bloque de cálculos energéticos.

Los valores que habría que introducir son condiciones específicas de cada problema particular, como es la energía eléctrica demandada por la instalación (vivienda) a lo largo del año, la energía térmica demandada a lo largo de un año, la potencia eléctrica media de la pila y las horas de funcionamiento de ésta, tal y como puede observarse en las imágenes [Figura 25] [Figura 26].



Figura 25. Celdas demanda térmica y eléctrica.

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO2, mediante una pila de combustible.

Potencia Eléctrica Nominal PC (kW)	1,25
Horas Anuales Funcionamiento	8.760

Figura 26. Características de funcionamiento de la pila.

Las **celdas rosas** hacen referencia a valores que son **condiciones generales** de funcionamiento aplicables a cualquier tipo de análisis de estas características, como por ejemplo el rendimiento de la red eléctrica española. Estos valores han sido obtenidos de acuerdo con (Tinaut Fluixá F. V., 2016).

Las **celdas azules** muestran **resultados importantes de los cálculos** a analizar, como consumos de energía primaria, o resultados intermedios que se pueden considerar.

Las **celdas rojas** indican valores no deseables para algunas variables calculadas, como la cantidad de energía térmica disipada al ambiente o demandas no satisfechas.

Por otra parte, las **celdas naranjas** indican valores correspondientes al sistema energético convencional actual, frente al que se están comparando los sistemas planteados en el presente trabajo.

4.1.2. Estructura del bloque de cálculos energéticos.

Se puede apreciar que el **bloque de cálculos energéticos** se divide en dos partes, claramente diferenciadas.

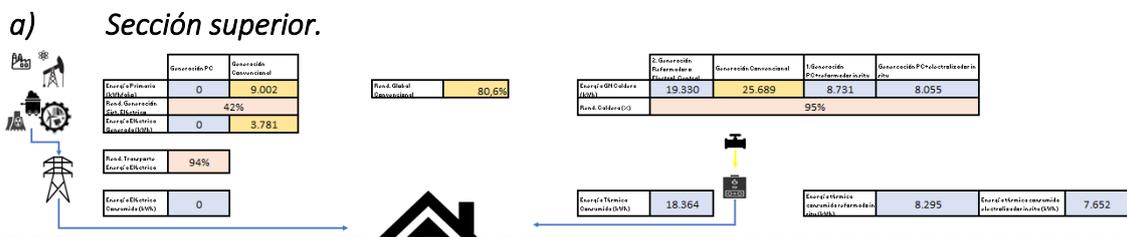


Figura 27. Sección superior del bloque de cálculos energéticos.

La **sección superior del bloque**, que se puede visualizar en la imagen [Figura 27], constituye los cálculos realizados teniendo asociados al **sistema de generación convencional**. Para este sistema de generación se ha optado por el más común en España, un acoplamiento a la red eléctrica y una caldera de gas natural acoplada a la red nacional de gas natural.

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO₂, mediante una pila de combustible.

b) **Sección inferior.**

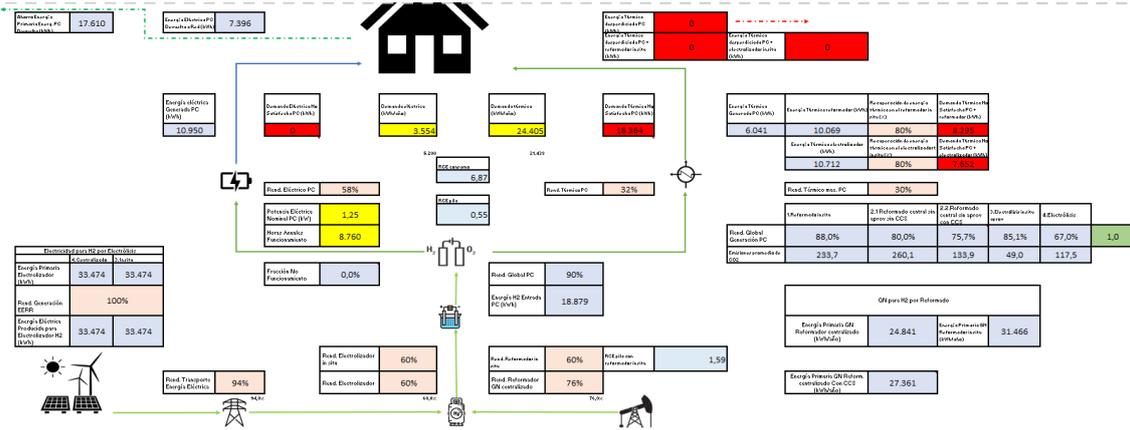


Figura 28. Sección inferior del bloque de cálculos energéticos.

En la **sección inferior del bloque**, que es la que se muestra en la imagen [Figura 28], se muestran los resultados de los cálculos para las cinco configuraciones de instalaciones basadas en pila de hidrógeno que se plantean en este trabajo, y que serán analizadas más adelante.

4.1.3. Estructura de los cálculos que se realizan en el bloque.

Lo primero que hay que tener en cuenta es que los cálculos arrancan desde las casillas que contienen los valores de entrada para las demandas energéticas y térmicas, que pueden verse en la imagen [Figura 29], es decir, cumplimentar dichas casillas es absolutamente necesario para obtener todos los resultados que ofrece el modelo.



Figura 29. Casillas demandas térmica y eléctrica.

Una vez configurados estos parámetros, se ejecutan todas las operaciones necesarias para obtener los resultados que se comentarán posteriormente.

Al igual que en el apartado anterior, las dos secciones se calculan de forma diferente, de manera que es preciso explicar su funcionamiento de manera individual.

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO2, mediante una pila de combustible.

a) **Parte de la pila de hidrógeno.**

En esta sección hay dos apartados claramente diferenciados, uno en el que se ejecutan los cálculos relativos a la pila de hidrógeno y otro en el que se desarrollan los cálculos relativos a la obtención del hidrógeno mediante los distintos medios disponibles.

a. Funcionamiento de la parte de la pila de hidrógeno.

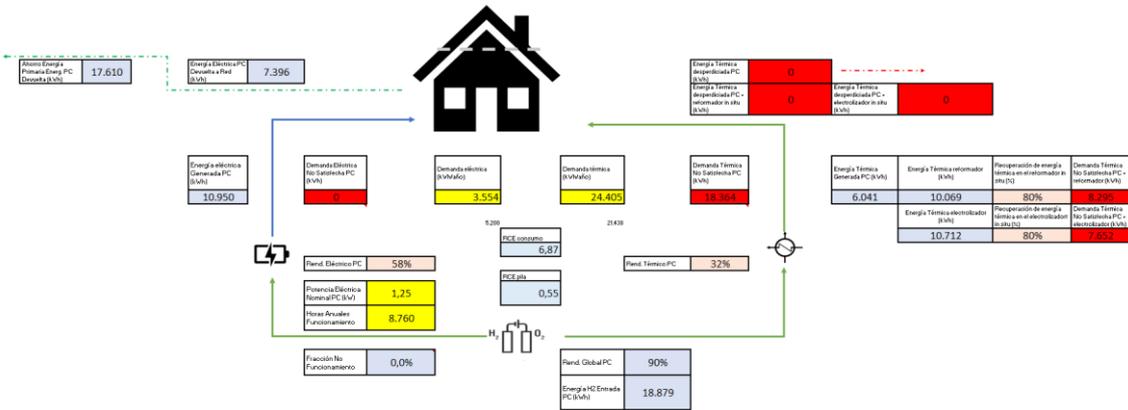


Figura 30. Sección inferior, cálculos relativos a la pila de combustible.

Se puede apreciar [Figura 30] que a la instalación de consumo llegan dos flujos (flechas) y salen otros dos. Los **flujos salientes** corresponden a las energías que no es posible aprovechar en la instalación y que por tanto es devuelta a la red en el caso de la energía eléctrica, o bien es disipada al ambiente si es energía térmica. Los **flujos entrantes** representan las energías térmica y eléctrica aportadas por la pila de combustible. El único elemento del sistema planteado que produce energía eléctrica es la pila de combustible. Sin embargo, la energía térmica puede ser producida por la pila, por el reformador o por el electrolizador, de tal manera que la cantidad total de energía térmica aportada por la instalación es un parámetro dependiente de la configuración de la instalación.

La **sección izquierda** es la que representa el comportamiento de la **parte eléctrica de la instalación**, en la que se calcula la energía eléctrica que se exporta a la red en función del número de horas y de la potencia media de funcionamiento de la pila de combustible, de tal manera que, si la energía eléctrica generada es mayor que la demandada, o no coincide en las mismas franjas horarias, es cedida a la red eléctrica, tal y como puede apreciarse en la imagen. La energía cedida a la red eléctrica supone un ahorro de energía primaria debido a que se evita un cierto consumo de energía convencional de la red.

La **energía térmica** generada en la pila es aprovechada para suplir necesidades de calor por la instalación, teniendo siempre en cuenta la correlación horaria. Este cálculo es el que puede verse en la **sección derecha**. Sin embargo, también se tienen en cuenta las energías térmicas aportadas por los distintos elementos, ya que la pila puede no ser el único elemento que aporte calor (a parte de la caldera de gas natural) a la instalación. Los cálculos para las diferentes configuraciones se comentan más adelante.

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO₂, mediante una pila de combustible.

Por último, en la parte central de la sección inferior se muestran los cálculos de las **relaciones calor-electricidad de la pila de combustible y de la demanda** por parte de la instalación, para ser tenidos en cuenta a la hora de realizar el análisis.

b. Parte de generación y transformación de la energía primaria.

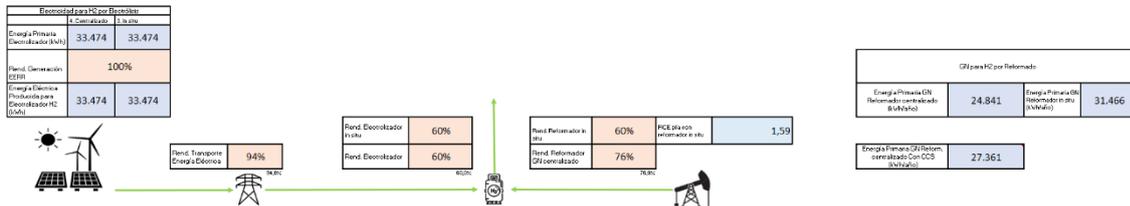


Figura 31. Generación de hidrógeno mediante distintas tecnologías.

En esta parte [Figura 31] se llevan a cabo los cálculos necesarios para obtener la **energía primaria necesaria** según las distintas tecnologías utilizadas para obtener el hidrógeno. En función de la tecnología utilizada se tendrán unos rendimientos u otros y un aprovechamiento de la energía térmica u otro.

En esta sección se obtienen los parámetros necesarios para calcular los distintos valores de energía térmica aportados por la instalación para cada caso de estudio que se comentaron en la sección anterior.

b) *Funcionamiento de la sección superior.*

En la sección superior del programa se calculan los valores relativos al **sistema convencional** [Figura 32].

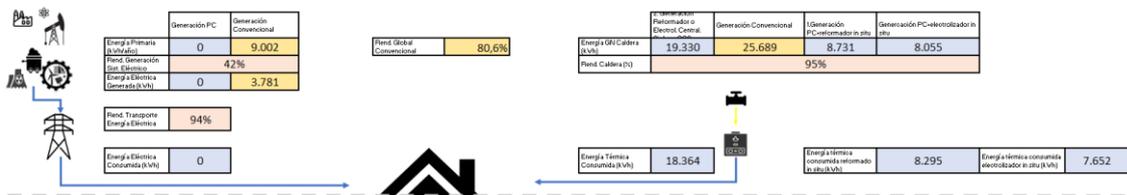


Figura 32. Resultados energéticos de acuerdo con el sistema convencional de generación.

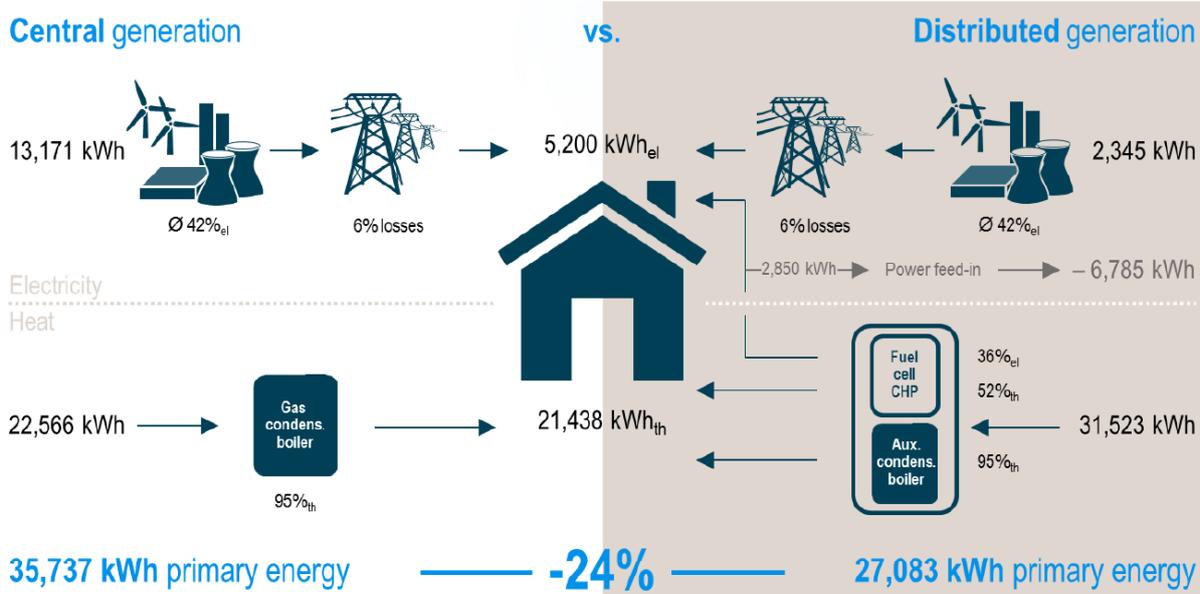
La idea general de esta parte de la interfaz es que la demanda energética siempre ha de ser satisfecha, de tal manera que se realizan dos cálculos, uno para determinar la energía (térmica o eléctrica) primaria que es necesario aportar para satisfacer la demanda cuando la instalación dispone de una pila de combustible funcionando según los parámetros introducidos en las celdas amarillas. La diferencia entre la energía demanda y la generada en la pila de combustible debe ser satisfecha con los respectivos sistemas convencionales (eléctrico y gas natural). Hay que tener en cuenta que los cálculos relativos al sistema eléctrico son más sencillos, ya que independientemente del tipo de instalación la energía eléctrica se calcula siempre de la misma forma. Sin embargo, la energía térmica varía en función del tipo de configuración, lo que implica un mayor número de opciones en esta parte.

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO2, mediante una pila de combustible.

Además, también se calcula la **energía primaria** que habría que aportar si se decidiera instalar únicamente el sistema convencional de producción de energía térmica y eléctrica, con el fin de plantear una referencia con respecto a la cual comparar el sistema planteado.

4.1.4. Comprobación y validación del modelo.

Con el fin de verificar el correcto desarrollo del modelo de la hoja Excel, se ha comparado el resultado obtenido al someterlo a las condiciones aplicadas en (Ruf, Lange, Pfister, & Droege, 2018) de tal manera que si los resultados son iguales se puede decir que el modelo queda validado. En la siguiente imagen [Figura 33] se puede observar una comparativa entre los dos modelos, con idénticos resultados para el caso considerado.



1) Exemplary case of a German, partially renovated 1/2-family dwelling in current conditions (2014), total-balance or power-credit methodology

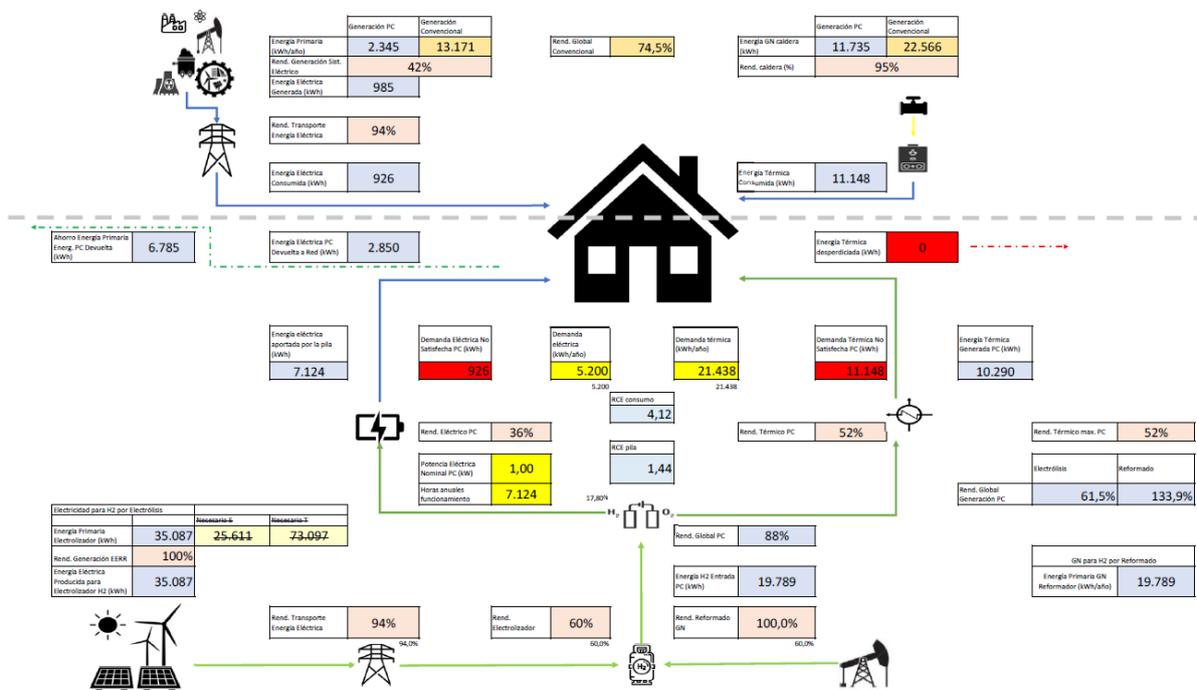


Figura 33. Comparación de resultados del modelo con los de (Ruf, Lange, Pfister, & Droege, 2018).

Al conseguir reproducir perfectamente el caso de estudio presentado por (Ruf, Lange, Pfister, & Droege, 2018), queda validado el trabajo desarrollado, y por lo tanto se puede aplicar dicho modelo a otras situaciones. De hecho, este trabajo representa en este aspecto un estudio mucho más amplio que el ofrecido por (Ruf, Lange, Pfister, & Droege, 2018) al considerar un mayor número de configuraciones, además de incluir las emisiones de CO2 y una evaluación económica, como se ve en los apartados siguientes.

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO2, mediante una pila de combustible.

4.2. Bloque de cálculo de emisiones de CO2.

En este bloque se ejecutan todas las operaciones necesarias para calcular las emisiones de CO2 en función de las distintas configuraciones y de las distintas situaciones y escenarios posibles. La extensión del bloque es considerable, tal y como se puede apreciar en la imagen [Figura 34]. Hay que indicar que estos cálculos no estaban considerados en el trabajo de (Ruf, Lange, Pfister, & Droege, 2018), como tampoco los de costes que se describen posteriormente, siendo extensiones muy importantes del mismo.

Emisiones de CO2													
Sistema Convencional Generación Energía Eléctrica y Térmica										Mix España	EERR 100%		
Generación Convencional Energía Eléctrica					Mix España	EERR 100%	Generación Convencional Energía Térmica					Mix España	EERR 100%
Energía Eléctrica Convencional [MW]	Coste [€/MWh]	Emisiones CO2 [kg/kWh]	Emisiones CO2 [kg/año]	Mix España	EERR 100%	Energía GN [MW]	Coste [€/MWh]	Emisiones CO2 [kg/kWh]	Emisiones CO2 [kg/año]	Mix España	EERR 100%		
3.781	222	248,8	385	8	8	25.885	245	5.528	6.586	5.528			
Factor de Emisión [kgCO2/Energía Demandada]										235	198		

Sistema PC. H2 a partir de electrolizador										Electrolizador. Sin Emisor				
Emisor Generación Energía Eléctrica					Mix España	EERR 100%	Emisor Generación Energía Térmica con GN					Mix Mix	Mix Ren	Ren Ren
Energía Eléctrica Convencional [MW]	Coste [€/MWh]	Emisiones CO2 [kg/kWh]	Emisiones CO2 [kg/año]	Mix España	EERR 100%	Energía GN [MW]	Coste [€/MWh]	Emisiones CO2 [kg/kWh]	Emisiones CO2 [kg/año]	Mix Mix	Mix Ren	Ren Ren		
33.474	222	8,8	8.783	8	8	19.338	245	4.156	12.833	4.156	4.156			
Factor de Emisión [kgCO2/WWh Demandada]										354	418	418		

Sistema PC. H2 a partir de reformador de gas natural										Electricidad Mix				Electricidad Ren			
Emisor Reformado GN					Sin CCS	Can CCS	Emisor Generación Energía Térmica con GN					Sin CCS	Can CCS	Sin CCS	Can CCS		
Energía Eléctrica Convencional [MW]	Coste [€/MWh]	Emisiones CO2 [kg/kWh]	Emisiones CO2 [kg/año]	Sin CCS	Can CCS	Energía GN [MW]	Coste [€/MWh]	Emisiones CO2 [kg/kWh]	Emisiones CO2 [kg/año]	Sin CCS	Can CCS	Sin CCS	Can CCS				
18.873	222	287,8	5.841	---	---	19.338	245	4.156	3.197	4.793	3.197	4.793					
Factor de Emisión [kgCO2/WWh Demandada]										258	194	258	194				

Sistema PC. H2 a partir de reformador in situ										Electrolizador. Sin Emisor				
Emisor Reformado GN					Sin CCS	Can CCS	Emisor Generación Energía Térmica con GN					Mix Mix	Mix Ren	Ren Ren
Energía Eléctrica Convencional [MW]	Coste [€/MWh]	Emisiones CO2 [kg/kWh]	Emisiones CO2 [kg/año]	Sin CCS	Can CCS	Energía GN [MW]	Coste [€/MWh]	Emisiones CO2 [kg/kWh]	Emisiones CO2 [kg/año]	Mix Mix	Mix Ren	Ren Ren		
33.474	222	8,8	8.783	8	8	8.855	245	1.792	18.435	1.792	1.792			
Factor de Emisión [kgCO2/WWh Demandada]										235	45	45		

1. Sistema PC. H2 a partir de reformador de gas natural in situ										Electricidad Mix		Electricidad Ren	
Emisor Reformado GN					Sin CCS	Can CCS	Emisor Generación Energía Térmica con GN					Sin CCS	Sin CCS
Energía Eléctrica Convencional [MW]	Coste [€/MWh]	Emisiones CO2 [kg/kWh]	Emisiones CO2 [kg/año]	Sin CCS	Can CCS	Energía GN [MW]	Coste [€/MWh]	Emisiones CO2 [kg/kWh]	Emisiones CO2 [kg/año]	Sin CCS	Sin CCS		
18.873	222	287,8	5.841	---	---	8.751	245	1.877	8.262	8.262			
Factor de Emisión [kgCO2/WWh Demandada]										234	236		

Emisor de CO2 evitado debido a la devolución de energía eléctrica a la red										Electrolizador. Con Emisor				
Emisor Reformado GN					Mix Generación	EERR 100%	Emisor Generación Energía Térmica con GN					Mix Mix	Mix Ren	Ren Ren
Energía Eléctrica Convencional [MW]	Coste [€/MWh]	Emisiones CO2 [kg/kWh]	Emisiones CO2 [kg/año]	Mix Generación	EERR 100%	Energía GN [MW]	Coste [€/MWh]	Emisiones CO2 [kg/kWh]	Emisiones CO2 [kg/año]	Mix Mix	Mix Ren	Ren Ren		
7.351	222	248,8	1.328	8	8	19.338	245	4.156	18.336	2.235	4.156			
Factor de Emisión [kgCO2/WWh Demandada]										354	418	418		

Figura 34. Bloque de cálculo de emisiones de CO2.

Se puede comprobar que, aparte de calcular las emisiones de CO2 del sistema instalado, también se comparan con las del sistema convencional. Además, para cada caso se calculan los factores de emisión de CO2 y se consideran diversos escenarios de procedencia de la energía eléctrica. La razón por la que se estudian estos escenarios de procedencia de la energía eléctrica es que, si la instalación no es capaz de satisfacer toda la demanda

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO2, mediante una pila de combustible.

energética, se utiliza el sistema convencional para satisfacer la demanda restante, y sus imputaciones de emisiones de CO2 han de ser tenidas en cuenta para que el estudio sea exhaustivo.

Como el bloque es demasiado extenso como para tratarlo en su conjunto, se va a explicar el funcionamiento de los distintos apartados de manera independiente.

4.2.1. Emisiones de CO2 del sistema convencional.

En la tabla que se muestra a continuación se calculan las emisiones de CO2 del sistema convencional, usando los factores de emisión de la generación de energía eléctrica en España (260 g/kWh en 2018), así como el factor de emisión asociado a la combustión del gas natural (215 g/kWh para una composición representativa del gas natural consumido en España). En la imagen se puede apreciar dicha tabla [Figura 35].

Emisiones de CO2													
Sistema Convencional Generación Energía Eléctrica y Térmica											Mix España	EERR 100%	
Generación Convencional Energía Eléctrica				Mix España	EERR 100%	Generación Convencional Energía Térmica						6.506	5.523
Energía Eléctrica Convencional (kWh)	3.781	eco2 (g/kWh _{el})	260,0	Emisiones CO2 (kg/año)	983	0	Energía GN (kWh)	25.689	eco2 (g/kWh _{GN})	215	Emisiones de CO2 (kg/año)		
											Factor de Emisión (gCO2/Energía Demandada)	233	198

Figura 35. Cálculo de las emisiones de CO2 de acuerdo con el sistema convencional.

Para el sistema convencional de generación de CO2 se tienen en cuenta las energías calculadas en el bloque 1 y los factores de emisión de cada tecnología. Posteriormente se tiene en cuenta la producción total de CO2 en un año como suma del emitido en la generación eléctrica y en la combustión del gas natural. Para este total, se consideran dos escenarios: el primero es que la energía eléctrica proviene del sistema de generación actual y el segundo se basa en que la energía eléctrica proviniera de energías renovables al 100%.

Además, también se estudia cómo se verían afectados los factores de emisión de CO2, de manera que se obtiene un indicador más de la idoneidad de cada sistema.

4.2.2. Emisiones CO2 con un sistema de generación de hidrógeno a partir de un electrolizador centralizado.

En esta tabla se calculan las emisiones de CO2 relativas al sistema en el que el usuario solamente dispone de la pila de combustible y compra el hidrógeno a una planta electrolizadora que lo obtuviera a partir de energía eléctrica. Se plantean tres situaciones posibles, una en la que la energía eléctrica proviniera del sistema convencional para las dos instalaciones, otra en la que el electrolizador solamente utilizara energía renovable mientras que el sistema convencional obtuviera energía mediante el sistema de generación actual, y la última, en la cual ambos sistemas obtuvieran la energía de un sistema de generación renovable. Hay que tener en cuenta que tanto la energía eléctrica como la energía térmica no cubiertas por la instalación han de satisfacerse mediante el sistema convencional.

La tabla con los **resultados** de los cálculos es la que se muestra a continuación [Figura 36].

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO2, mediante una pila de combustible.

Sistema PC. H2 a partir electrolizador										Electrolizador. Sin Emisiones CO2					
Emisiones Generación Energía Eléctrica						Mix España	EERR 100%	Emisiones Generación Energía Térmica con GN				Mix/Mix	Mix/Ren	Ren/Ren	
Energía Eléctrica para H2 (kWh)	33.474	eco2 (g/kWhel)	0,0	Emisiones de CO2 (kg/año)	8.703	0	Energía GN (kWh)	19.330	eco2 (g/kWhGN)	215	Emisiones de CO2 (kg/año)	4.156	12.859	4.156	4.156
Energía Eléctrica Convencional	0	eco2 (g/kWhel)	260,0	Emisiones de CO2 (kg/año)	0	0							-97,6%	36,1%	24,8%
Factor de Emisión (gCO2/kWh Demandado)													364	118	118

Figura 36. Emisiones de CO2 en el sistema de pila de combustible con electrolizador centralizado.

Se consideran los mismos factores de emisión ya indicados anteriormente. Para el cálculo de los totales anuales asociados a la generación de electricidad y al consumo de gas natural, en este caso se tienen en cuenta las emisiones debidas a la electricidad que hubiera que consumir de la red porque la instalación no fuera capaz de aportarla, así como la energía térmica que habría que obtener mediante la caldera de gas natural si la pila no es capaz de abastecer la demanda, y las emisiones de CO2 de la energía eléctrica asociada al hidrógeno que alimenta la propia pila.

4.2.3. Emisiones CO2 con un sistema de generación de hidrógeno a partir de un reformador centralizado.

En esta situación el sistema solamente está formado por la pila de combustible, considerando que el hidrógeno que alimenta a la pila procede de un reformador que utilizaría gas natural como alimentación. Ante esta situación existen dos posibilidades, que haya o no captura de CO2, siendo completamente distintas estas dos situaciones si hay o no captura de CO2. También hay que tener en cuenta las emisiones evitadas por el hecho de devolver energía a la red. En la imagen [Figura 37] se muestra la tabla en Excel donde se realizan los cálculos para este caso.

Sistema PC. H2 a partir de reformado de gas natural										Electricidad Mix		Electricidad Renov				
Emisiones Reformado GN					Sim CCS	Con CCS	Emisiones Generación Energía Térmica con GN				Sin CCS	Con CCS	Sin CCS	Con CCS		
Energía GN Consumido (kWh)	18.879	eco2 (g/kWhGN)	267,0	Emisiones de CO2 (kg/año)	5.041	***	Energía GN (kWh)	19.330	eco2 (g/kWhGN)	215	Emisiones de CO2 (kg/año)	4.156	9.197	4.733	9.197	4.733
Emisiones Reformado GN con Captura CO2					Sim CCS	Con CCS							-41,4%	27,3%	-66,5%	14,3%
Energía GN Consumido (kWh)	18.879	eco2 (g/kWhGN)	30,6	Emisiones de CO2 (kg/año)	***	577							Reformador GN con Emisiones CO2 evitadas			
Emisiones Generación Energía Eléctrica						Mix Generación	EERR 100%	Factor de Emisión (gCO2/kWh Demandado)				260	134	260	134	
Energía Eléctrica Convencional (kWh)	0	eco2 (g/kWhel)	260,0	Emisiones de CO2 (kg/año)	0	0					-11,8%	56,8%	-66,5%	14,3%		

Figura 37. Tabla de cálculo emisiones de CO2 con reformador centralizado.

Además, se tiene en cuenta la procedencia de la electricidad, siendo el “Mix” el sistema actual de generación de electricidad y el renovable un sistema de generación alternativo basado únicamente en energías renovables.

4.2.4. Emisiones CO2 con un sistema de generación de hidrógeno a partir de un electrolizador in situ.

Se plantean los cálculos necesarios para obtener las emisiones equivalentes de CO2 de la instalación en las distintas situaciones explicadas anteriormente [Figura 37].

Sistema PC. H2 a partir electrolizador in situ										Electrolizador. Sin Emisiones CO2					
Emisiones Generación Energía Eléctrica						Mix España	EERR 100%	Emisiones Generación Energía Térmica con GN				Mix/Mix	Mix/Ren	Ren/Ren	
Energía Eléctrica para H2 (kWh)	33.474	eco2 (g/kWhel)	0,0	Emisiones de CO2 (kg/año)	8.703	0	Energía GN (kWh)	8.055	eco2 (g/kWhGN)	215	Emisiones de CO2 (kg/año)	1.732	10.435	1.732	1.732
Energía Eléctrica Convencional	0	eco2 (g/kWhel)	260,0	Emisiones de CO2 (kg/año)	0	0							-90,4%	73,4%	68,6%
Factor de Emisión (gCO2/kWh Demandado)													295	49	49

Figura 38. Tabla de cálculo de emisiones de CO2 con electrolizador in situ.

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO2, mediante una pila de combustible.

En este caso se considera que se dispone de un electrolizador descentralizado, es decir en la instalación y que éste se utiliza para generar hidrógeno consumiendo electricidad. A este electrolizador se le pueden asociar unas emisiones de CO2 si se considera que la electricidad proviene del sistema convencional. Si, por el contrario, esta electricidad proviniera de un sistema de generación renovable, no habría ninguna imputación de CO2 al electrolizador.

4.2.5. Emisiones CO2 con un sistema de generación de hidrógeno a partir de un reformador in situ.

Nuevamente se presenta la tabla que permite calcular las emisiones de CO2 para el sistema planteado [Figura 39]. Por el tamaño de la instalación, se considera que no es factible incluir un sistema de captura de CO2, por lo que no se contempla en los cálculos.

1. Sistema PC. H2 a partir de reformado de gas natural in situ										Electricidad Mix		Electricidad Renov							
Emisiones Reformado GN						Sin CCS		Emisiones Generación Energía Térmica con GN						Sin CCS		Sin CCS			
Energía Convencional (kWh)	CO2 (g/kWh)	338,2	Emisiones de CO2 (kg/año)	6.385				Energía GN (kWh)	8.731	CO2 (g/kWhGN)	215	Emisiones de CO2 (kg/año)	1.877						
Emisiones Generación Energía Eléctrica						EER 100%								Reformador GN con Emisiones CO2 evitadas					
Energía Eléctrica Convencional (kWh)	0	CO2 (g/kWhel)	260,0	Emisiones de CO2 (kg/año)	0	0													
														6.339	8.262				
														2,6%	-49,6%				
														Factor de Emisión (gCO2/kWh Demandado)		234	296		

Figura 39. Emisiones de CO2 con reformador in situ.

En este caso, se estudian las emisiones equivalentes de CO2 por el uso de una instalación compuesta por la pila de hidrógeno y un reformador in situ alimentado con gas natural.

4.2.6. Emisiones evitadas debido a la devolución de energía eléctrica a la red.

Obviamente, el hecho de devolver (exportar) energía eléctrica a la red supone un ahorro efectivo de emisiones de CO2, al evitar tener que generar dicha energía por medios convencionales [Figura 40].

Emisiones de CO2 evitadas debido a la devolución de energía eléctrica a la red							Electrolizador. Con Emisiones CO2		
Mix Generación EER 100%							Mix/Mix	Mix/Ren	Ren/Ren
Energía Eléctrica PC Convencional (kWh)	7.396	CO2 (g/kWhel)	260,0	Emisiones de CO2 (kg/año)	1.923	0	10.936	2.233	4.156
							-68,1%	65,7%	24,8%

Figura 40. Emisiones de CO2 evitadas.

Es necesario contabilizar las emisiones que se han evitado al devolver energía eléctrica a la red, de manera que sean tenidas en cuenta a la hora de realizar los cálculos de emisiones. En varias de las configuraciones consideradas, este término es relevante.

4.3. Bloque de cálculo resumen de emisiones y rendimientos energéticos globales.

Con el fin de sintetizar los resultados obtenidos, tanto las emisiones de CO2 como la energía primaria quedan recogidas en esta tabla [Figura 41].

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO2, mediante una pila de combustible.

		Generación H2 por Electrólisis Centralizada						Generación H2 por Reformado GN Centralizado con/ sin CCS							
Energía Primaria Total Generación Convencional (kWh)	34.692	Energía Primaria Total Generación PC (kWh)	52.804	Idem con Energía Eléctrica PC Devuelta (kWh)	35.195	Ahorro Energía Primaria Gen. (kWh) con Ener. Electr. Devuelta	-503	-1,5%	Energía Primaria Total PC (kWh)	44.171	Ahorro Energía Primaria Energ. PC Devuelta (kWh)	17.610	Energía Prim. con Energía Eléctrica PC Devuelta (kWh)	26.562	
Mix/Ren		Ahorro Emisiones CO2 (kg)	2.350	36,12%	Mix/Ren	Ahorro Emisiones CO2 (kg) con Emisiones evitadas	4.583	70,4%	Ahorro Energía Primaria PC (kWh)	-9.480	-27,3%		Ahorro Energía Primaria PC (kWh)	8.130	23,4%
		Sin tener en cuenta la energía eléctrica devuelta a la Red				Teniendo en cuenta la energía eléctrica devuelta a la Red			Ahorro Emisiones CO2 (kg)	-2.690	-41,4%	Mix/Mix	Ahorro Emisiones CO2 (kg) con Emisiones evitadas	-768	-11,8%
		Generación H2 por Electrólisis Descentralizada						Generación H2 por Reformado GN in situ sin CCS							
Mix/Ren		Energía Primaria Total Generación PC (kWh)	41.529	Idem con Energía Eléctrica PC Devuelta (kWh)	23.919	Ahorro Energía Primaria Gen. (kWh) con Ener. Electr. Devuelta	10.772	31,1%	Energía Primaria Total PC con CCS (kWh)	46.691	Idem con Energía Eléctrica PC Devuelta (kWh)	17.610	Idem con Energía Eléctrica PC Devuelta (kWh)	29.082	
		Ahorro Emisiones CO2 (kg)	4.774	73,38%	Mix/Ren	Ahorro Emisiones CO2 (kg) con Emisiones evitadas	7.008	107,7%	Ahorro Energía Primaria PC con CCS (kWh)	-12.000	-34,6%		Ahorro Energía Primaria PC con CCS (kWh)	5.610	16,2%
		Sin tener en cuenta la energía eléctrica devuelta a la Red				Teniendo en cuenta la energía eléctrica devuelta a la Red			Ahorro Emisiones CO2 (kg) con CCS (kg)	1.773	27,3%	Mix/Mix	Ahorro Emisiones CO2 (kg) con CCS y Emisiones evitadas	3.696	56,8%
		Sin tener en cuenta la energía eléctrica devuelta a la Red				Teniendo en cuenta la energía eléctrica devuelta a la Red (sin y con CCS)							Teniendo en cuenta la energía eléctrica devuelta a la Red (sin y con CCS)		
		Mix/Mix							Energía Primaria Total PC (kWh)	40.197	Idem con Energía Eléctrica PC Devuelta (kWh)	22.587	Ahorro Energía Primaria Gen. (kWh) con Ener. Electr. Devuelta	12.104	34,9%
									Ahorro Emisiones CO2 (kg)	-1.756	-26,99%	Mix/Mix	Ahorro Emisiones CO2 (kg) con Emisiones evitadas	167	2,6%
		Sin tener en cuenta la energía eléctrica devuelta a la Red				Teniendo en cuenta la energía eléctrica devuelta a la Red							Teniendo en cuenta la energía eléctrica devuelta a la Red		

Figura 41. Tabla de resumen de resultados de emisiones y rendimientos globales.

En este bloque se sintetizan los resultados de los cálculos necesarios para conocer los ahorros de energía primaria y de emisiones de CO2 con las distintas configuraciones empleadas con respecto al sistema convencional de generación. Los ahorros (o las penalizaciones, en negativo) se presentan en valores anuales absolutos y también en forma de porcentaje.

4.4. Bloque de cálculos económicos.

El tercer aspecto para estudiar es el económico, para ello, en función del caso de estudio y de la instalación planteada se han establecido distintas posibilidades que permiten llevar a cabo los cálculos.

En la siguiente imagen [Figura 42] se muestra la tabla de cálculos económicos. Se puede apreciar que se sigue la regla de colores de la tabla de cálculos energéticos.

Análisis Económico														
Sistema convencional					Sistema PC									
Energía Eléctrica	Coste unitario	Coste total	Energía Térmica	Coste unitario	Coste total	Sistema eléctrico	Coste unitario	Coste total	Sistema PC	Coste unitario	Coste total	Sistema de calor	Coste unitario	Coste total
	€/año	€		€/año	€	Coste de la instalación	€/año	€	Coste de la PC	€/año	€	Coste de la caldera y la instalación PC	€/año	€
Coste de instalación	75	1.500	Coste de la caldera y la instalación	220,00	3.300	Coste de la instalación	75	1.500	Coste de la PC	250	2.500	Coste de la caldera y la instalación PC	220,00	3.300
Coste electricidad compra	0,180	849	Coste del Gas Natural comprado	0,042	1.025	Electricidad comprada	€/kWh	€/año	Coste del reformador	€/año	€	Coste del Gas Natural instalación PC	€/kWh	€/año
						Electricidad comprada	0,180	849	Coste del reformador	350	3.500	Coste del Gas Natural instalación PC	0,042	771,27
						Electricidad vendida	€/kWh	€/año	Coste del Gas Natural	€/kWh	€/año	Coste caldera e inst. Reformador	€/año	€
						Electricidad vendida	0,055	407	Coste del Gas Natural	0,042	1.322	Coste caldera e inst. Reformador	220,00	3300
									Coste del electrolizador	€/año	€	Coste del Gas Natural con reformador	€/kWh	€/año
									Coste del electrolizador	450	4.500	Coste del Gas Natural con reformador	0,042	348,38
									Coste electricidad renovable	€/kWh	€/año	Coste caldera e inst. con electrolizador	€/año	€
									Coste H2 reformador centralizado sin CCS	0,18	6.025	Coste caldera e inst. con electrolizador	220,00	3.300
									Coste H2 reformador centralizado sin CCS	€/kWh	€/año	Coste del Gas Natural con electrolizador	€/kWh	€/año
									Coste H2 reformador centralizado con CCS	0,17	3.209	Coste del Gas Natural con electrolizador	0,042	321,38
									Coste H2 reformador centralizado con CCS	€/kWh	€/año			
									Coste H2 electrolizador centralizado	0,19	3.535			
									Coste H2 electrolizador centralizado	€/kWh	€/año			
									Coste H2 electrolizador centralizado	0,25	4.720			
Coste del término fijo electricidad	3,800	€/kWmes	4,6	kW	209,76	€/año								
Precio compra de electricidad	0,180	€/kWh												
Precio compra de gas natural	0,042	€/kWh												
Precio de venta de la electricidad	0,055	€/kWh												
Precio compra de electricidad renovable	0,180	€/kWh												
Precio compra de H2 reformador centralizado sin CCS	0,170	€/kWh H2	5,67	€/kg H2										
Precio de H2 reformador centralizado con CCS	0,187	€/kWh H2	6,24	€/kg H2										
Precio de H2 electrolizador centralizado	0,250	€/kWh H2	8,33	€/kg H2										
Coste de emisiones de CO2	12,00	€/t CO2												

Figura 42. Tabla de cálculos económicos.

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO2, mediante una pila de combustible.

A partir de los valores de entrada configurados en las celdas amarillas se realizan los diferentes cálculos para obtener los distintos costes de los sistemas.

En la siguiente tabla en Excel [Figura 43] se suman todos los costes que conforman cada uno de los sistemas planteados.

Costes €/año	Coste operativo €/año	Coste de inversión €/año	Coste total €/año	Ahorro Operativo €/año	Ahorro total €/año	Payback años (ahorro operativo)	Rentabilidad anual	Rentabilidad operativa / convencional	Rentabilidad operativa / PC	Ahorro económico imputable al CO2
Coste anual del sistema energético convencional :	1.874,49	295,00	2.169,49							
1. Coste anual sistema PC + reformador in situ :	1.472,91	895,00	2.367,91	401,58	-198,42	14,94	-9%	21%	17%	2,00
2. Coste anual sistema PC + reformador centralizado sin CCS	3.783,73	545,00	4.328,73	-1.909,24	-2.159,24	inf	-100%	-102%	-44%	-9,21
3. Coste anual sistema PC + reformador centralizado con CC	4.109,33	545,00	4.654,33	-2.234,84	-2.484,84	inf	-115%	-119%	-48%	44,36
4. Coste anual sistema PC + electrolizador in situ :	6.149,67	995,00	7.144,67	-4.275,18	-4.975,18	inf	-229%	-228%	-60%	84,09
5. Coste anual sistema PC + electrolizador centralizado:	5.294,08	545,00	5.839,08	-3.419,59	-3.669,59	inf	-169%	-182%	-59%	55,00

Figura 43. Costes de los sistemas.

Los resultados obtenidos en esta tabla son los que se utilizan posteriormente para estudiar la viabilidad económica de los distintos sistemas planteados.

CAPÍTULO: 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE PRODUCCIÓN ENERGÉTICA Y DE EMISIONES EN FUNCIÓN DE LAS HORAS DE FUNCIONAMIENTO.

A partir del modelo explicado en el apartado anterior se plantea un procedimiento que permita analizar los resultados obtenidos considerando diversos valores de la demanda eléctrica y de la demanda térmica (a través de la relación calor-electricidad RCE) y en función del número de horas de funcionamiento del sistema de PC. La estructura del procedimiento y el programa desarrollado puede verse en el Anexo 2.

5.1. Tablas de análisis Y SI.

Como punto de partida se usa la herramienta de Excel *Tabla de datos Y SI* que permite realizar estudios paramétricos considerando diversos valores de dos variables de entrada y recogiendo en una tabla los valores de una variable de resultados. Usando repetidamente esta herramienta, se puede ver los efectos sobre varias de las variables de resultados relevantes del modelo. Además, se puede hacer simultáneamente para todas las configuraciones consideradas del sistema basado en la pila de combustible.

Los resultados se calculan considerando una demanda eléctrica de 4380 kWh/año (equivalente a una potencia eléctrica media demandada de 0.5 kW). Por su parte, la demanda térmica es la que corresponde a valores de la RCE de 0, 1, 2, 3, 6 y 9.

Se plantea un análisis para obtener diversos **resultados en función del número horas de funcionamiento y de la potencia eléctrica de la pila** para unas demandas eléctrica y térmica especificadas. La potencia eléctrica media de generación de la pila toma valores de 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.25, 1.5, 1.75, 2, 2.25, 2.5 kW. Mientras que el número de horas de funcionamiento toma los valores de 0, 2920, 4380, 5840, 7300, 8760 horas/año.

Los resultados relevantes que se consideran en el análisis son el **ahorro de energía primaria**, el **ahorro de emisiones de CO2 con emisiones evitadas**, la **energía térmica disipada al ambiente**, los **factores globales de emisión de CO2**, los **rendimientos globales**, la **energía eléctrica devuelta a la red**, el **ahorro económico operativo**, el **ahorro total**, la **rentabilidad anual** y el **payback**.

En la siguiente imagen [Figura 44], se puede observar cómo se ha planteado el mapa de color en función de los resultados de los cálculos, de tal manera que en **verde** aparecen los resultados más favorables, mientras que en **rojo** quedan destacados los resultados no deseados (mayores que los favorables o negativos en otros casos).

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO2, mediante una pila de combustible.

1. PC con H2 por Reformado in situ de GN con aprovechamiento térmico											
Factores de emisión de CO2											
231,49	0,00	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00	2,25	2,50
0	231	231	231	231	231	231	231	231	231	231	231
2.920	231	231	230	231	231	231	232	232	232	233	233
4.380	231	231	230	231	231	231	232	232	233	233	233
5.840	231	230	230	230	231	231	232	233	233	233	234
7.300	231	230	229	230	231	231	232	233	233	234	234
8.760	231	230	229	230	231	231	232	233	234	234	235

Figura 44. Ejemplo de Tabla de resultados con mapa de colores.

En la imagen [Figura 45] se pueden observar todos los mapas de colores que se han utilizado en el análisis previo para obtener conclusiones e identificar los diferentes puntos de funcionamiento en un único caso de RCE.

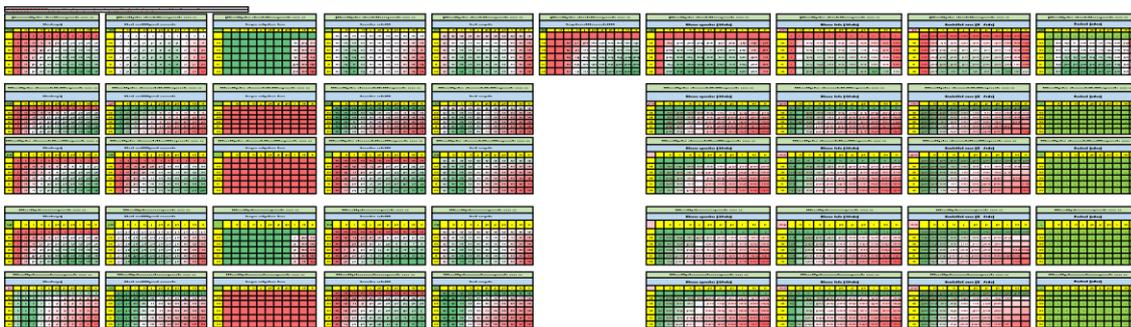


Figura 45. tablas Y Si.

Para cada configuración de demanda térmica y eléctrica estos valores se ven modificados, por ello, en el siguiente apartado se explicará que se ha hecho para poder realizar un análisis en profundidad de los resultados del estudio.

5.2. Representación gráfica de los resultados.

Se ha programado una **macro en VBA** que permite obtener representaciones gráficas de los diferentes resultados obtenidos en los **análisis Y Si**. Además, como resulta interesante comparar **distintos resultados en función de su RCE**, se ha programado la macro para que cada análisis quede identificado en una pestaña nueva del Excel.

Un ejemplo del conjunto de resultados obtenidos al ejecutar la macro para una RCE dada se puede observar a continuación [Figura 46], se puede observar que, para ese caso específico

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO2, mediante una pila de combustible.

de demanda eléctrica y térmica, tanto todas las tecnologías estudiadas como todos los resultados a analizar quedan caracterizados.

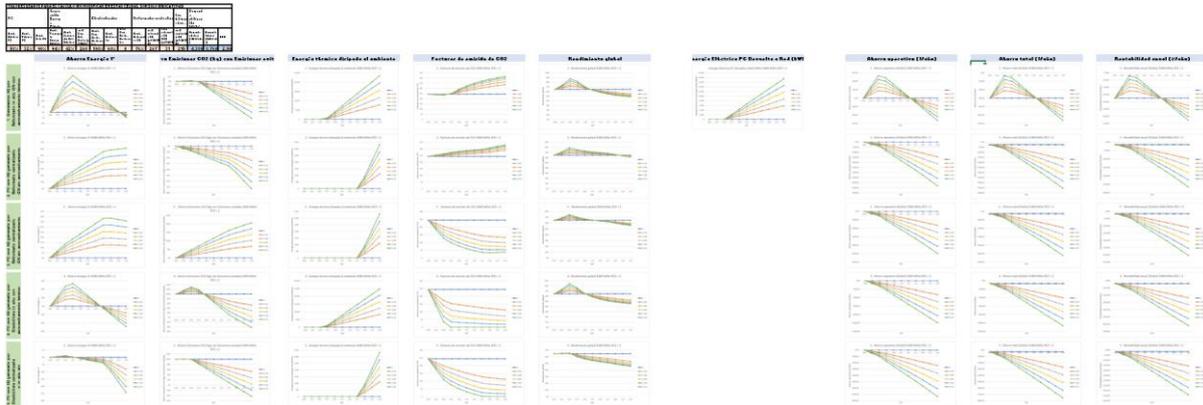


Figura 46. Resultado de ejecución de la macro para una RCE.

De esta forma se han generado resultados al variar **las horas anuales de funcionamiento de la pila de combustible**, considerando siempre la **misma demanda eléctrica y modificando la demanda térmica**, utilizando para ello como **parámetro valores de la RCE de 0, 1, 2, 3, 6 y 9**, con el fin de poder desarrollar un análisis exhaustivo de cómo afecta la variación de la RCE al funcionamiento de la instalación. De acuerdo con los resultados obtenidos para las RCE especificadas, se van a analizar los diferentes resultados obtenidos.

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO2, mediante una pila de combustible.

5.3. Análisis de los resultados.

En este apartado se van a analizar los resultados obtenidos en el análisis de la hoja Excel, de manera que se puedan obtener conclusiones claras y precisas del análisis de tendencias. Para ello, se ha agrupado cada variable en función de su RCE, para que se pueda ver cómo se van modificando cuando ésta cambia.

El primer resultado que se analiza es el de la **energía eléctrica devuelta a la red**, que es la misma independientemente de la configuración de la pila, porque no depende de las opciones para generar el hidrógeno, tal y como puede apreciarse en las gráficas [Figura 47].

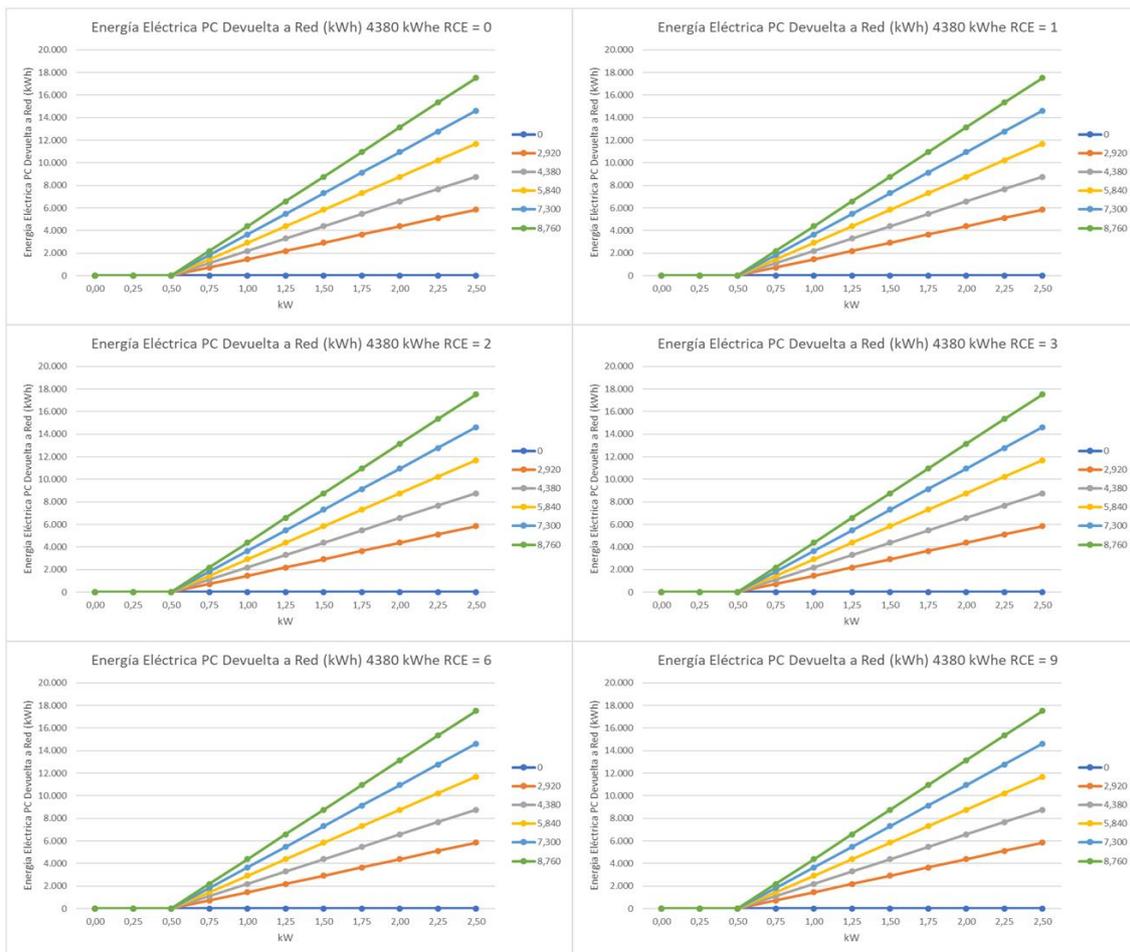


Figura 47. Energía eléctrica anual devuelta a la red.

De esta manera se comprueba que **a partir de una potencia media de la pila de combustible de 0,5 kW se devuelve (exporta) energía eléctrica a la red**. Cuanto mayor es el número de horas de uso de la pila, mayor cantidad de energía eléctrica se exporta a la red. Este resultado es lógico de acuerdo con las especificaciones marcadas anteriormente.

A continuación, se analizan los distintos casos de estudio con el fin de comprobar que beneficios e inconvenientes presenta cada una de las distintas tecnologías.

De manera general se establece la conclusión de que las tendencias positivas se ven mejoradas por un mayor número de horas de funcionamiento. Por la misma razón, las

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO₂, mediante una pila de combustible.

tendencias negativas también se ven agravadas a un mayor número de horas de funcionamiento del sistema.

Los **resultados relevantes** que se van a analizar son:

- **Ahorro de energía primaria.** Determina de manera porcentual el ahorro de energía primaria ofrecido por el sistema planteado frente al sistema convencional de generación energética.
- **Ahorro de emisiones de CO2 con emisiones evitadas.** Este factor indica la reducción o aumento porcentual de emisiones de CO2 que ofrece el sistema planteado frente al sistema convencional.
- **Energía térmica disipada al ambiente.** Esta variable refleja la energía térmica anual que sería necesario disipar al ambiente para refrigerar el sistema planteado.
- **Factor global de emisión de CO2.** Este factor, que está claramente relacionado con el segundo, indica el nivel de emisiones de CO2 por unidad de energía generada.
- **Rendimiento global.** Este factor indica la relación entre la energía total utilizada y la consumida en forma de energía primaria.
- **Ahorro económico operativo.** Cantidad económica anual que se estima que se ahorra por el uso de cada una de las tecnologías estudiadas.
- **Rentabilidad anual** (solamente si se produce ahorro operativo).

5.3.1. Configuración 1, generación de H2 por reformado in situ de gas natural con aprovechamiento térmico.

En esta configuración se dispone de un reformador in situ de gas natural, con el cual es posible aprovechar como calor útil la energía térmica que aparece en el propio proceso de funcionamiento del reformador, aumentando así la RCE media de generación de la instalación. A continuación, se analizan los distintos parámetros de estudio.

A. *Ahorro de energía primaria.*

Según aumenta la relación calor electricidad (RCE) de la demanda, el punto de máximo ahorro energético se desplaza hacia arriba y hacia la derecha, es decir, hacia posiciones en las cuales se ahorra mayor cantidad de energía primaria con una potencia media de la pila mayor, tal y como puede apreciarse analizando las gráficas [Figura 48].

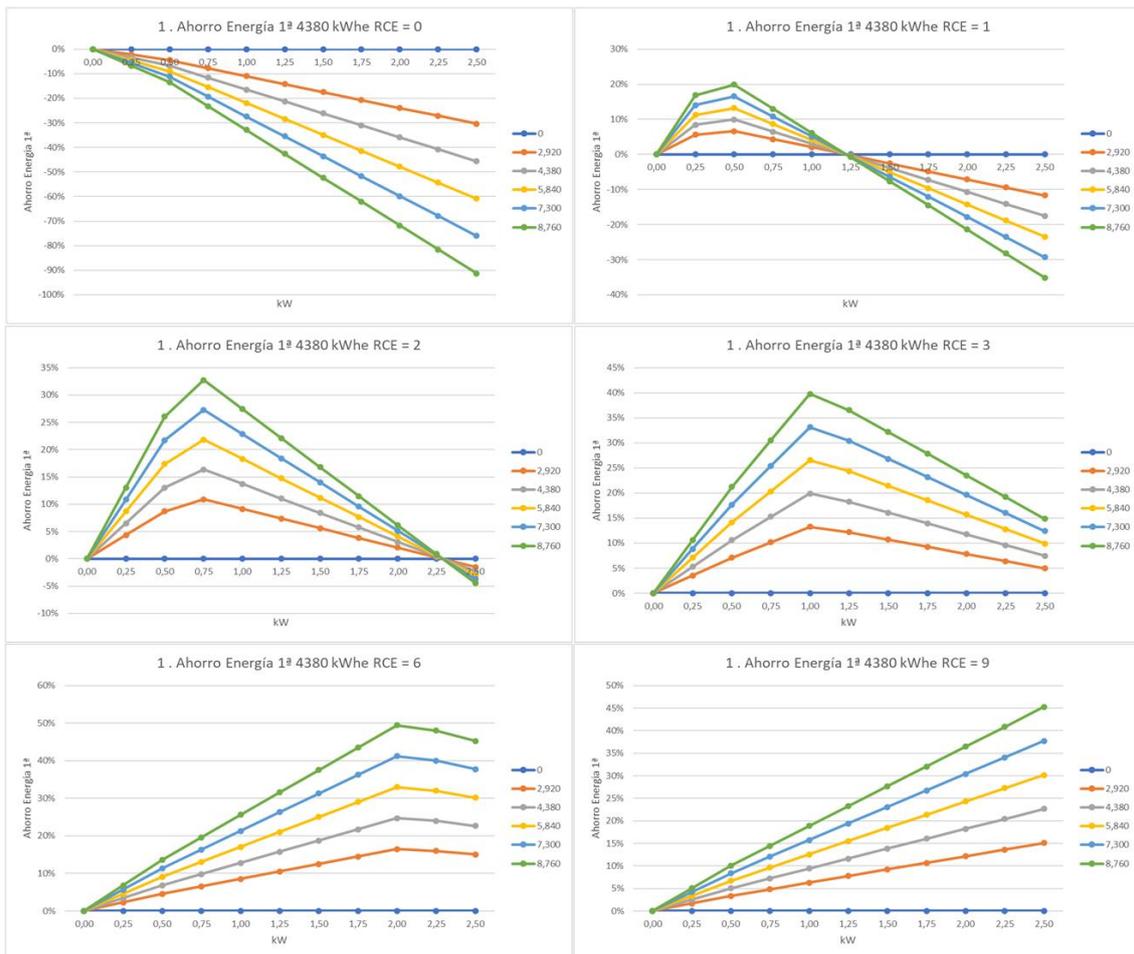


Figura 48. Ahorro de energía primaria caso 1.

Queda de manifiesto a la vista de los resultados, que el ahorro de energía primaria ofrecido por este sistema está claramente condicionado por la energía térmica demandada, en mucha mayor medida que la energía eléctrica, ya que esta primera puede ser exportada fácilmente a la red sin ningún perjuicio adicional.

B. Ahorro de emisiones de CO2 con emisiones evitadas.

Para cada RCE de la demanda, el punto de mayor ahorro de emisiones de CO2 se corresponde con el de mayor ahorro de energía primaria. Esta reducción de emisiones de CO2 nunca es muy elevada, pero crece con la RCE tal y como se observa en las gráficas [Figura 49].

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO2, mediante una pila de combustible.

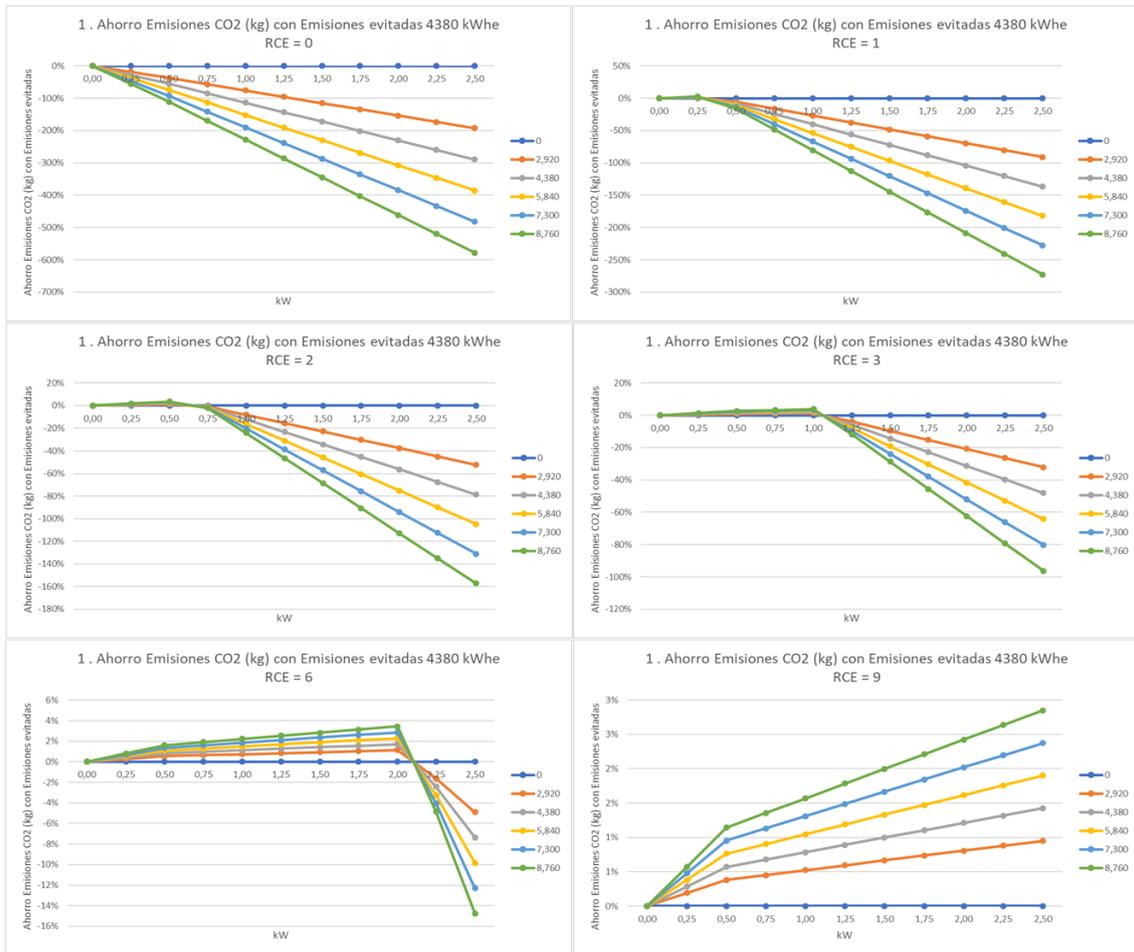


Figura 49. Ahorro de emisiones de CO2 caso 1.

Se comprueba a la vista de los resultados que el ahorro de energía primaria fomenta una reducción de emisiones de CO2 que provocan que este sistema pueda ser beneficioso medioambientalmente.

C. Energía térmica disipada al ambiente.

Cuando se disipa energía térmica al ambiente, el ahorro de energía primaria y por ende el ahorro de emisiones de CO2 disminuyen drásticamente. En los resultados gráficos [Figura 50] se puede observar que lógicamente, según aumenta la RCE de la demanda, el punto en el que se empieza a disipar energía térmica se desplaza hacia posiciones de mayor potencia media de la pila.

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO2, mediante una pila de combustible.

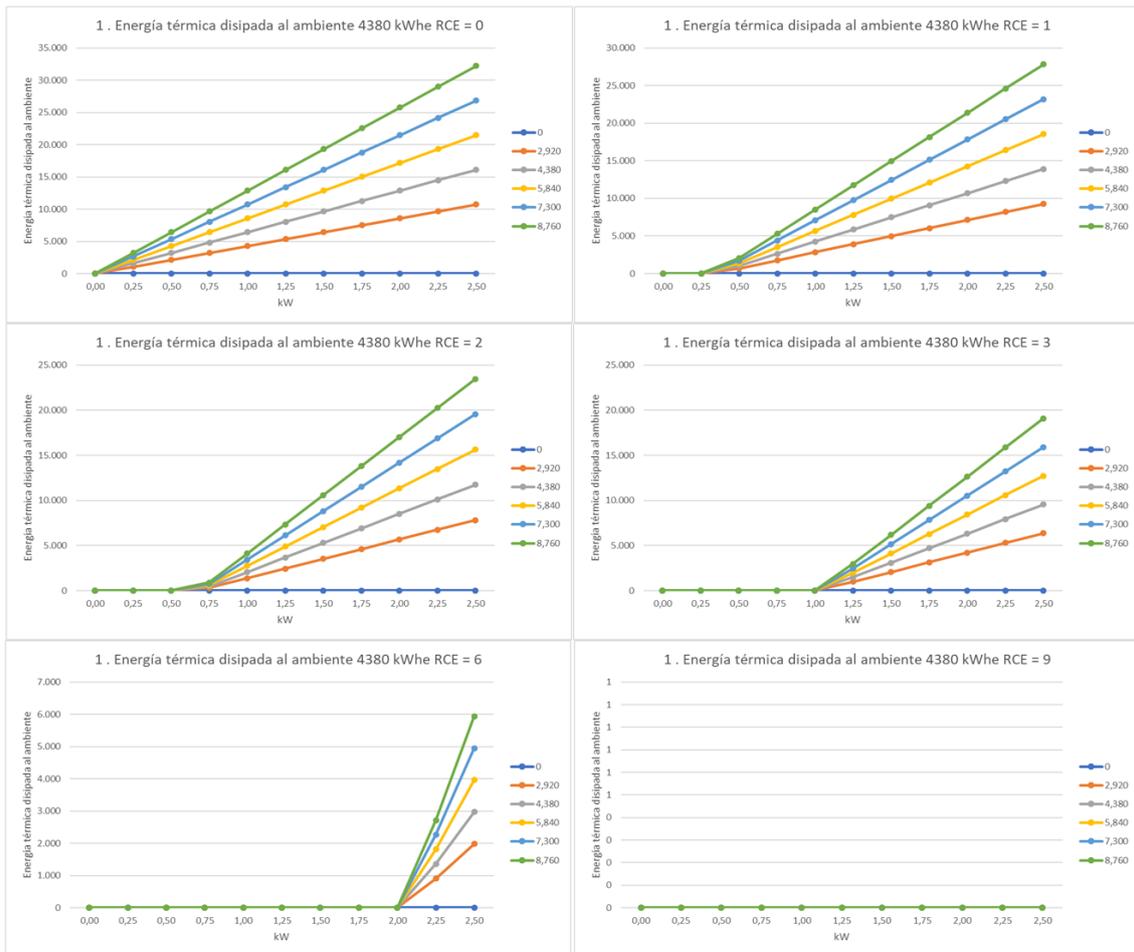


Figura 50. Energía térmica disipada al ambiente caso 1.

Este resultado es importante por las implicaciones que conlleva en otros parámetros del caso de estudio.

Los resultados son perfectamente factibles, ya que cuanto mayor es la RCE (mayor energía térmica demandada) más tarde se empieza a disipar energía térmica al ambiente.

D. Factor global de emisión de CO₂.

El factor global de emisiones de CO₂ es la relación entre la masa total de CO₂ emitida al ambiente por todos los dispositivos involucrados y la cantidad total de energía aportada por el sistema, por ello, interesa que este factor sea lo menor posible.

Este factor está directamente relacionado con el ahorro de emisiones de CO₂, ya que cuando aumenta el ahorro de emisiones de CO₂, el factor de emisión disminuye. De la misma forma, cuando disminuye el ahorro de emisiones de CO₂, aumenta el factor de emisiones de CO₂. Esto se puede comprobar en las representaciones gráficas [Figura 51].

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO₂, mediante una pila de combustible.

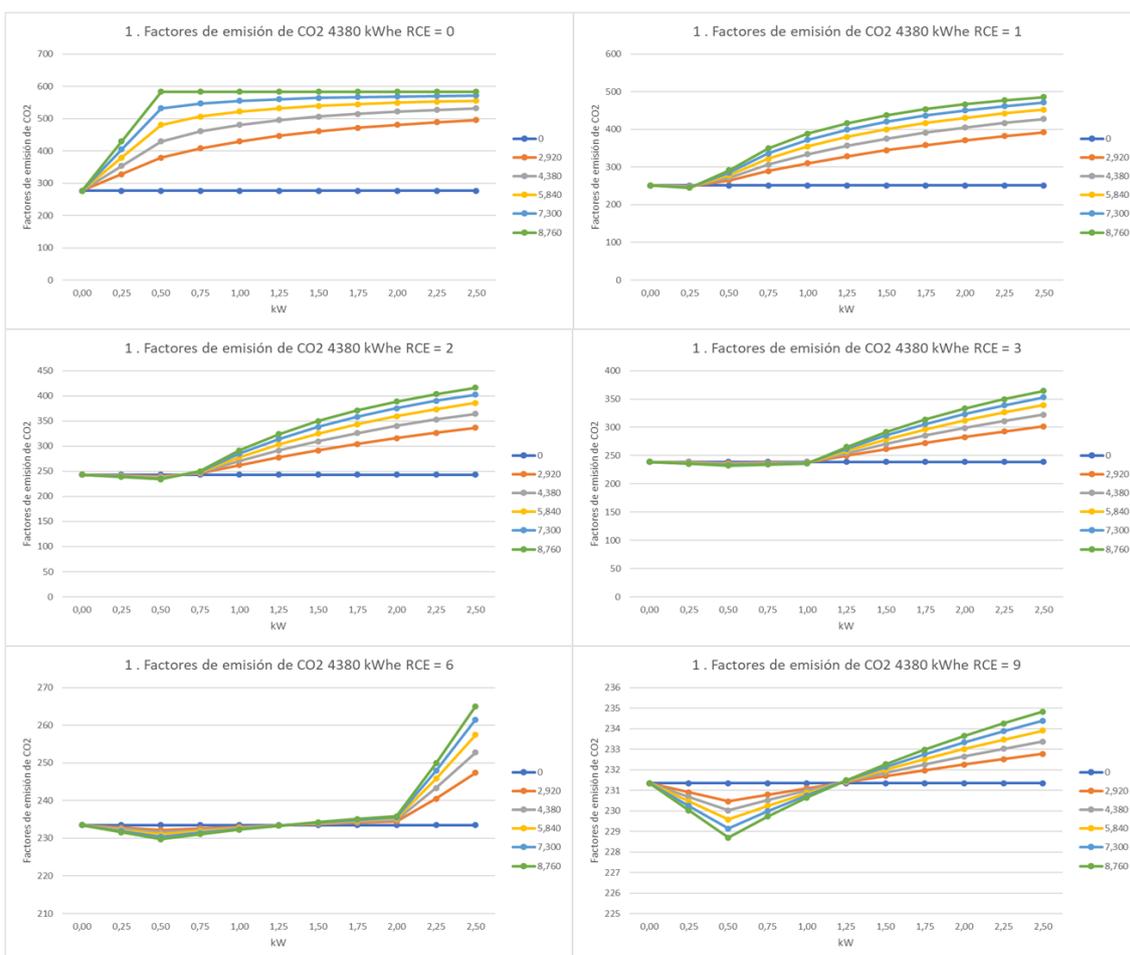


Figura 51. Factores de emisión de CO2 caso 1.

E. Rendimiento global.

De manera general el rendimiento global mejora por el hecho de utilizar este sistema. Esta mejora del rendimiento alcanza su valor máximo antes de devolver energía a la red. Según se va devolviendo energía eléctrica a la red el rendimiento global cae ligeramente. Sin embargo, en cuanto se disipa energía térmica al ambiente el rendimiento global sufre una caída drástica. Esto se puede comprobar analizando las gráficas [Figura 52].

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO2, mediante una pila de combustible.

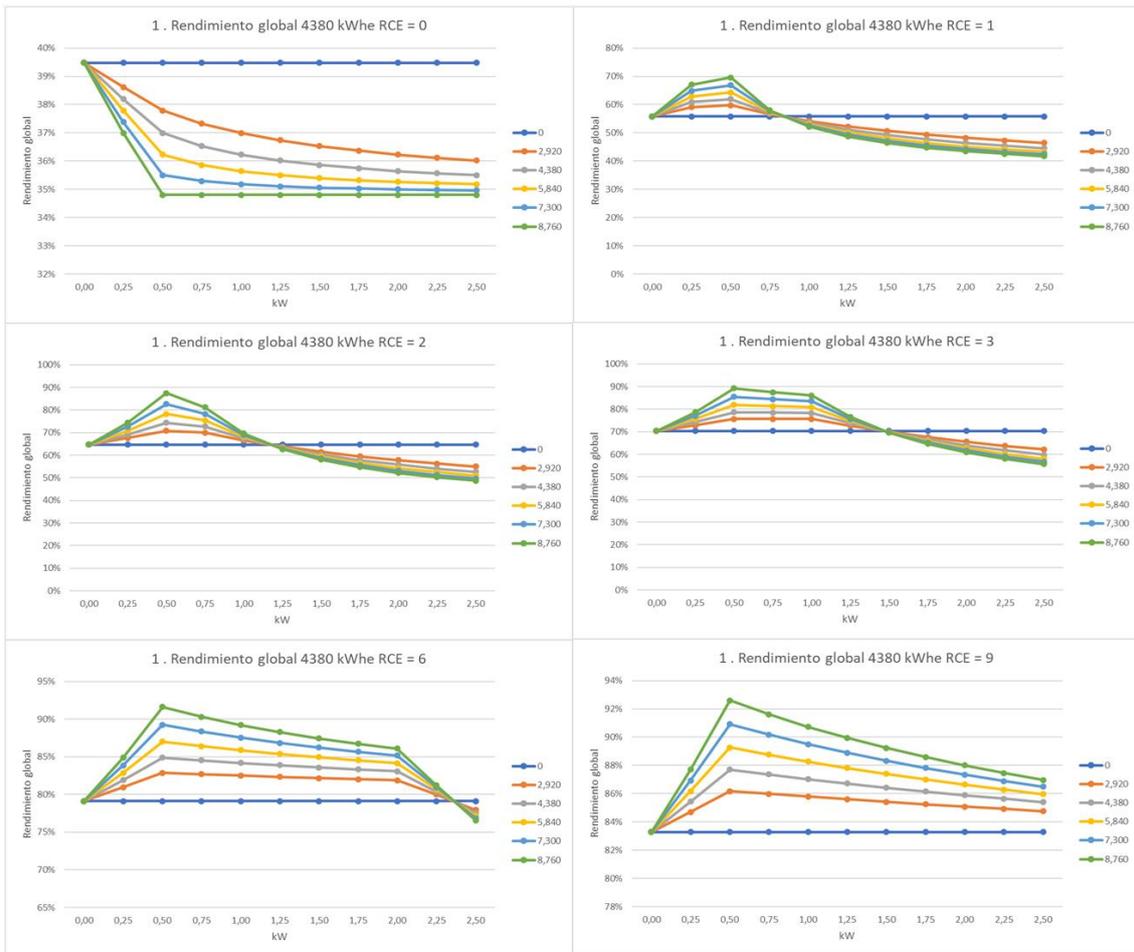


Figura 52. Rendimiento global caso 1.

Este resultado es realmente importante, ya que va a determinar la viabilidad de la instalación, así como sus puntos de funcionamiento.

F. Ahorro económico operativo.

De forma general, el ahorro económico operativo marca el ahorro económico total, por consiguiente, el ahorro máximo se da cuando se produce el rendimiento global máximo, tal como puede apreciarse en la imagen [Figura 53].

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO₂, mediante una pila de combustible.

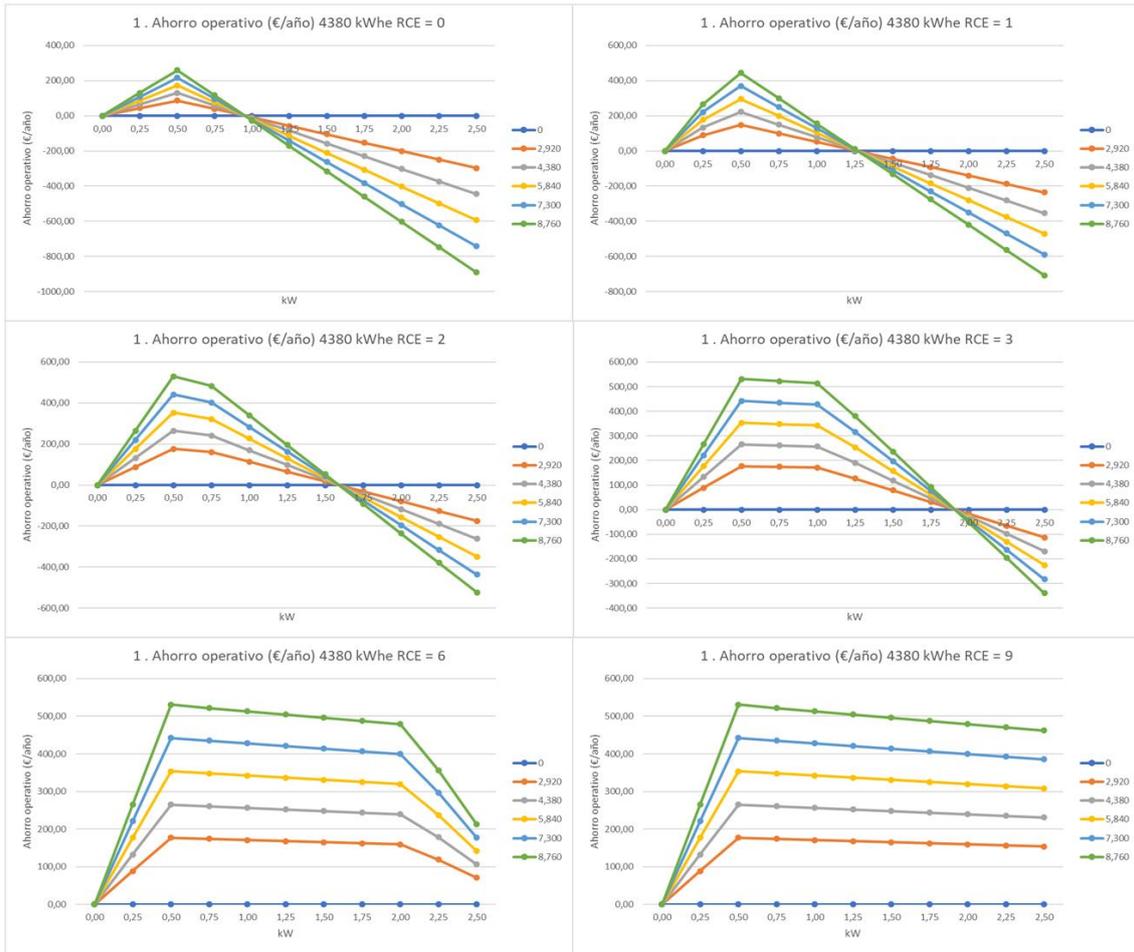


Figura 53. Ahorro operativo caso 1.

Sin embargo, aunque el ahorro operativo resulte positivo, este ahorro total viene condicionado por el coste de la inversión.

G. Rentabilidad anual.

En este caso, al resultar un ahorro operativo positivo, se estudia la rentabilidad anual de la instalación [Figura 54]. Aquí se puede observar que el elevado coste de la inversión hace que no se pueda amortización de la instalación.

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO₂, mediante una pila de combustible.

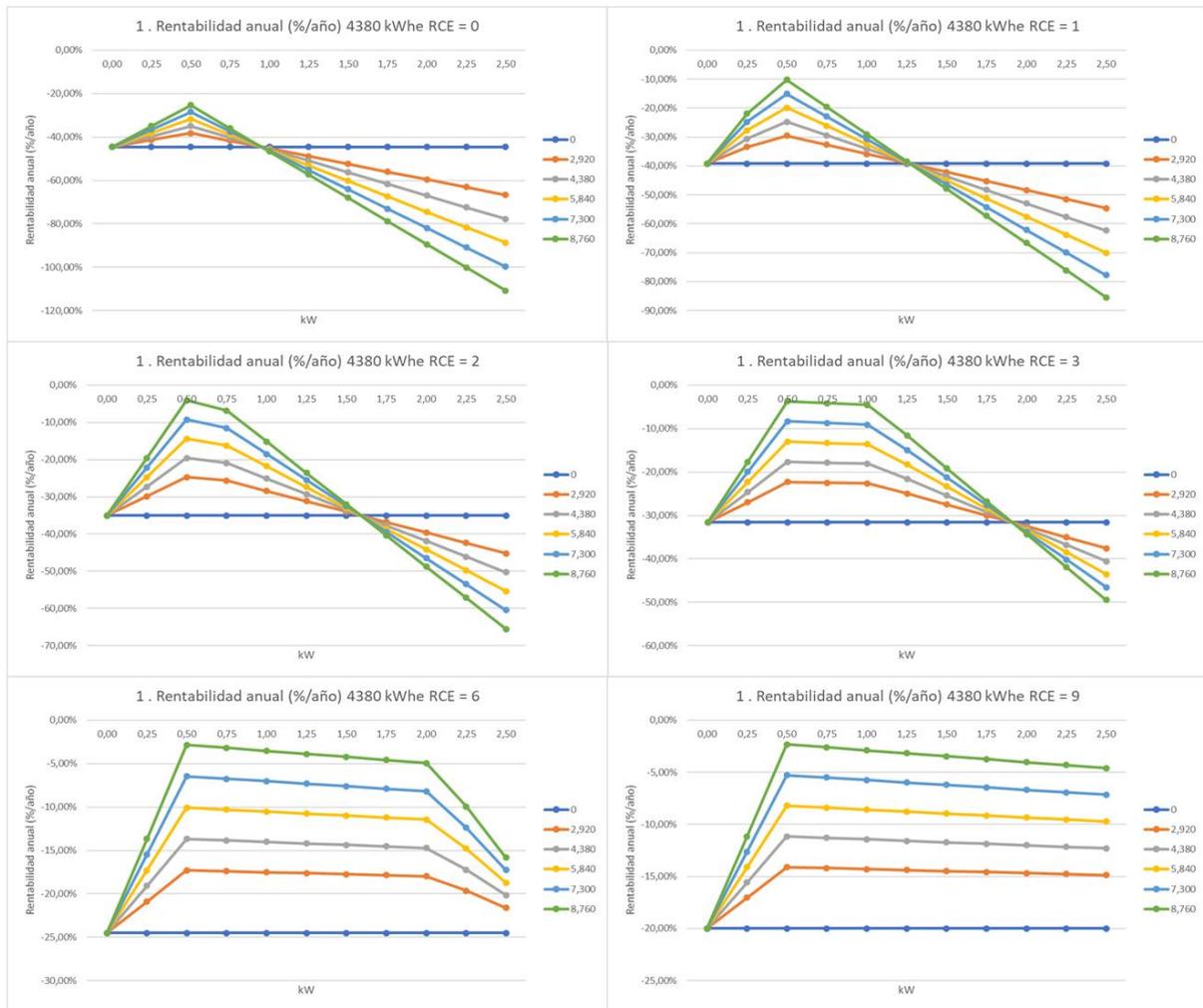


Figura 54. Rentabilidad anual caso 1.

Se puede observar que no se alcanza una rentabilidad positiva, sin embargo, otro aspecto interesante a observar es la influencia de la disipación de energía térmica en el ambiente.

En esta situación en la que sí que se obtiene ahorro económico, se ha llegado a analizar el payback en función del punto de funcionamiento, siendo el mínimo payback posible de 11,3 años.

5.3.2. Configuración 2, pila de combustible con hidrógeno generado por reformado centralizado de gas natural sin aprovechamiento térmico ni captura de CO₂.

El sistema implementado constaría únicamente de la pila de hidrógeno, considerándose cuál es el origen del hidrógeno consumido por la pila, y como afecta este a su precio y emisiones de CO₂. En este caso concreto, el hidrógeno provendría de una planta en la que se obtendría dicho hidrógeno a partir de reformado de gas natural, no teniendo en consideración el aprovechamiento térmico que pudieran ejercer en dicha planta del calor residual del reformador.

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO₂, mediante una pila de combustible.

A. Ahorro de energía primaria.

El ahorro de energía primaria aumenta de manera generalizada al aumentar la potencia media, hasta llegar al punto en el que se empieza a disipar energía térmica al ambiente, en ese momento el aumento del ahorro de energía primaria se ve disminuido. Al aumentar la RCE este el punto en el que se empieza a disipar energía térmica al ambiente se desplaza hacia potencias medias de la pila mayores. Estas son las conclusiones obtenidas del análisis de las gráficas [Figura 55].

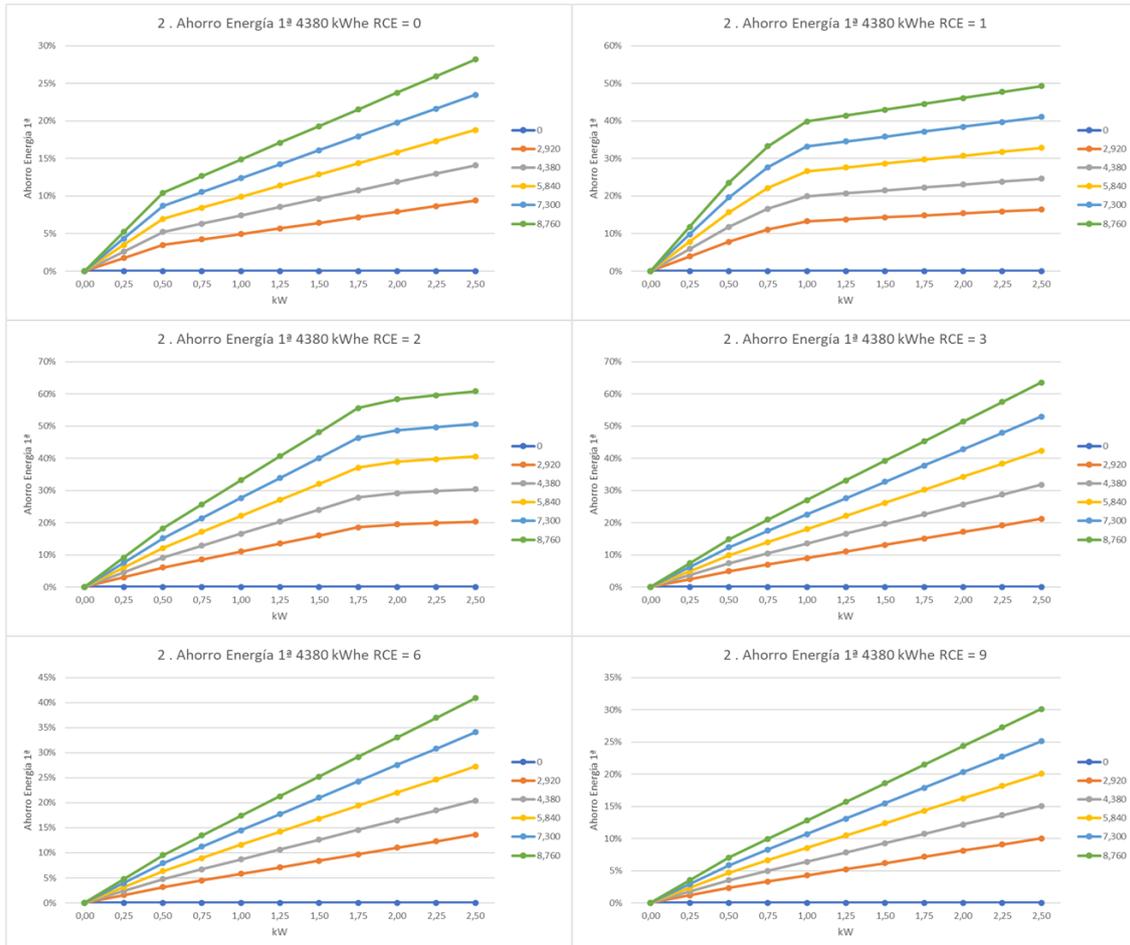


Figura 55. Ahorro de energía primaria caso 2.

El resultado en términos de ahorro de energía primaria es favorable, pero obviamente no es tan favorable considerando el caso anterior.

B. Ahorro de emisiones de CO2 con emisiones evitadas.

El ahorro de emisiones de CO2 siempre es negativo en esta situación, hecho que se ve agravado cuanto menor es la RCE de la instalación, ya que al disipar energía térmica al ambiente se produce un decremento en el ahorro de emisiones de CO2. Este análisis se obtiene a la vista de los resultados de las gráficas [Figura 56].

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO2, mediante una pila de combustible.

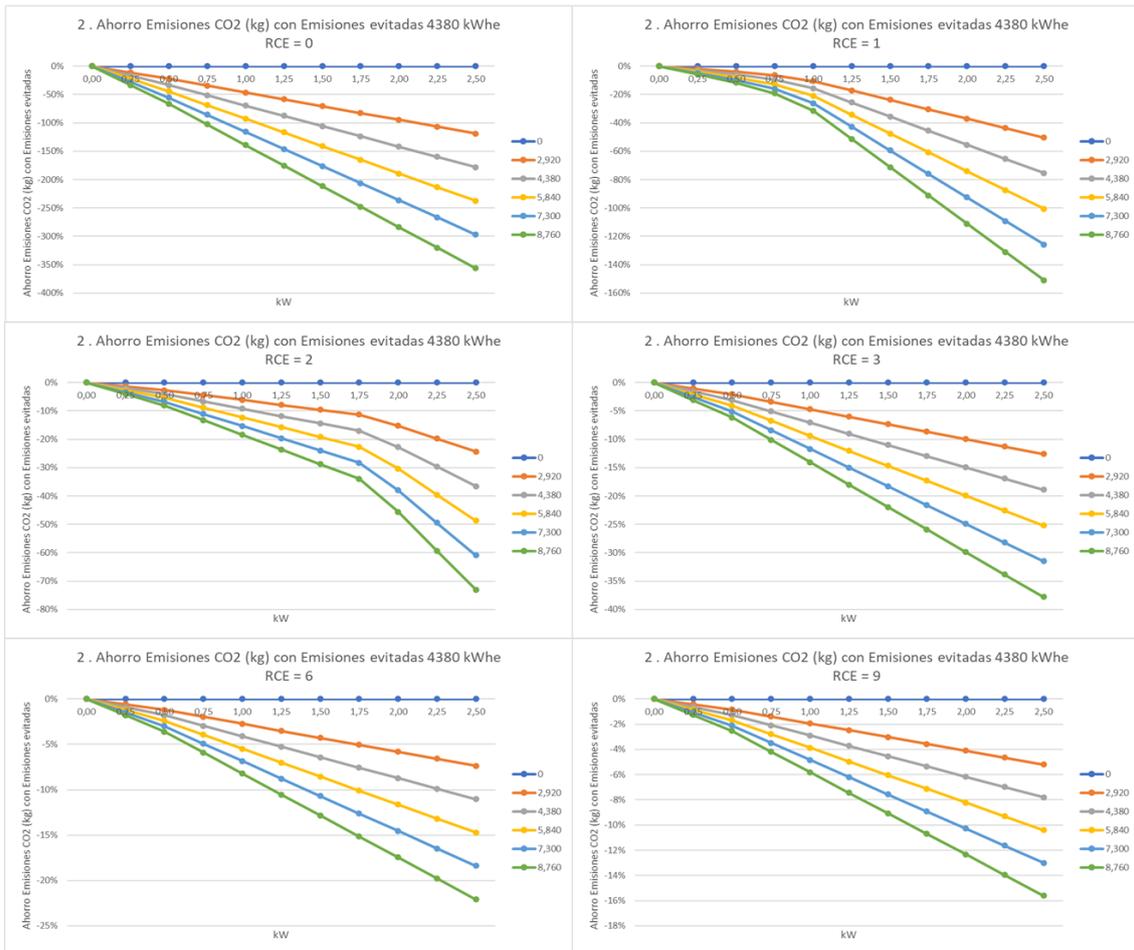


Figura 56. Ahorro de emisiones de CO2 caso 2.

A pesar del aprovechamiento térmico, en un sistema energético como el español, en el que existe un porcentaje tan elevado de energías renovables implica que el emplear gas natural como fuente de energía primaria conlleva un aumento de emisiones de CO2.

C. Energía térmica disipada al ambiente.

En esta situación el sistema produce mucha menos energía térmica, ya que la energía térmica únicamente se debe a la fracción térmica de la pila. Al producirse una menor cantidad de energía térmica, no es necesario disipar dicha energía al ambiente hasta que se alcanzan puntos de funcionamiento mucho más intensivos, esto puede observarse analizando las gráficas [Figura 57].

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO2, mediante una pila de combustible.

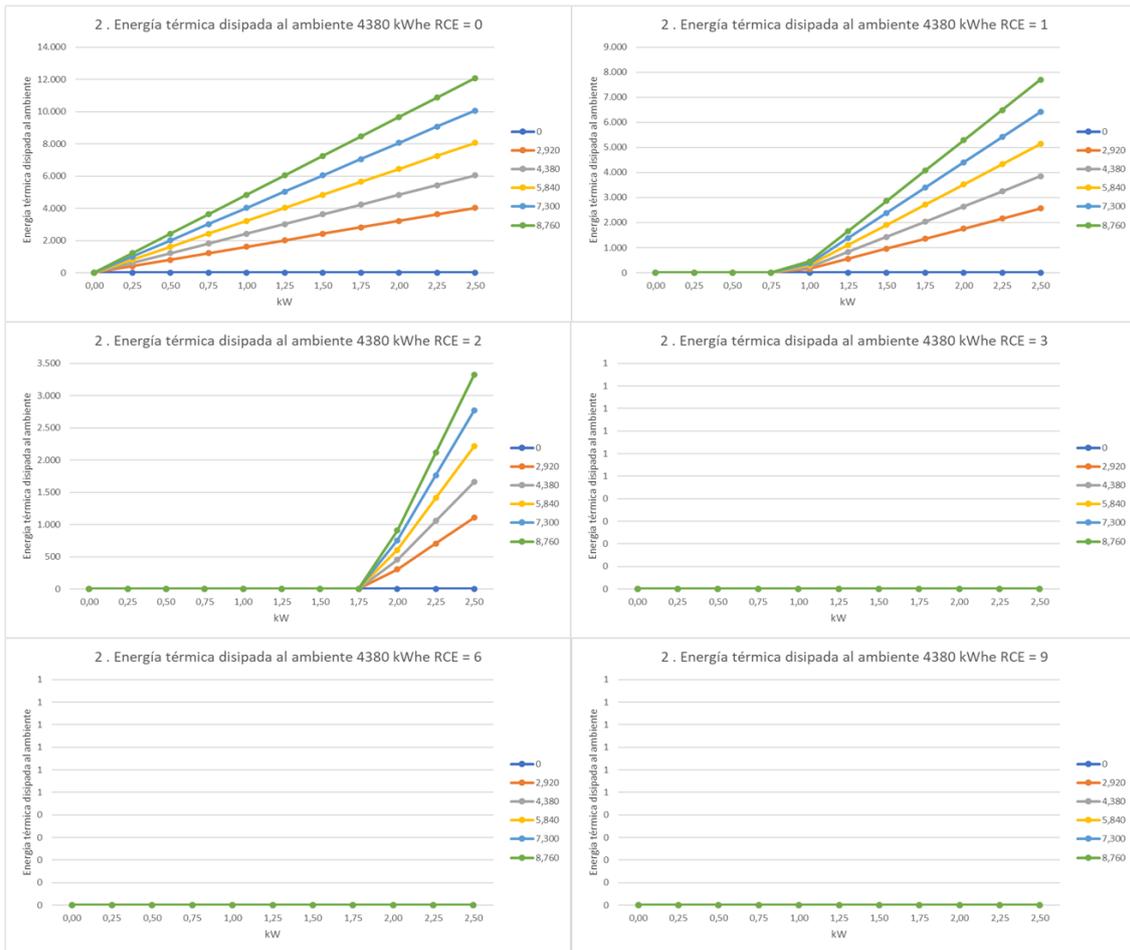


Figura 57. Energía térmica disipada al ambiente caso 2.

Aunque la energía disipada al ambiente en esta situación sea mucho menor, el hecho de tener que disipar energía térmica al ambiente sigue acarreando consecuencias sobre el resto de parámetros y por ello es muy importante tener este parámetro en consideración.

D. Factor global de emisión de CO₂.

El comportamiento del factor de emisión de CO₂ es análogo al comportamiento del ahorro de emisiones de CO₂, en este caso, este parámetro siempre aumenta, tal y como puede observarse en la imagen [Figura 58].

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO₂, mediante una pila de combustible.

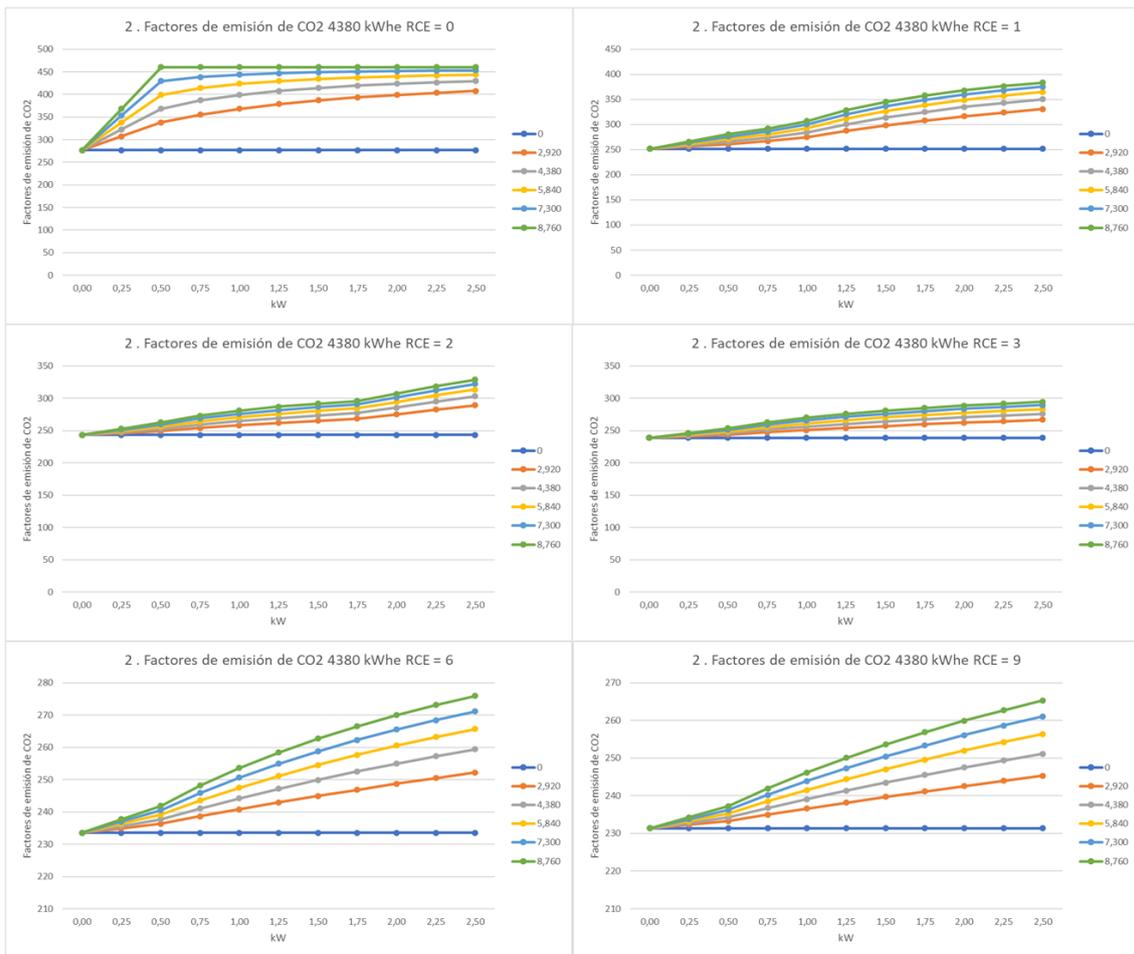


Figura 58. Factores de emisión de CO2 caso 2.

Como consecuencia de que no se produce ahorro en las emisiones de CO2 se produce un aumento en el factor de emisiones de CO2.

E. Rendimiento global.

Se aprecia un valor máximo de rendimiento global para una potencia de 0,5 kW, que en este caso es más acusado que en el caso anterior. Esto es independiente de la RCE de la instalación. Este análisis se obtiene de la observación de las gráficas [Figura 59].

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO2, mediante una pila de combustible.

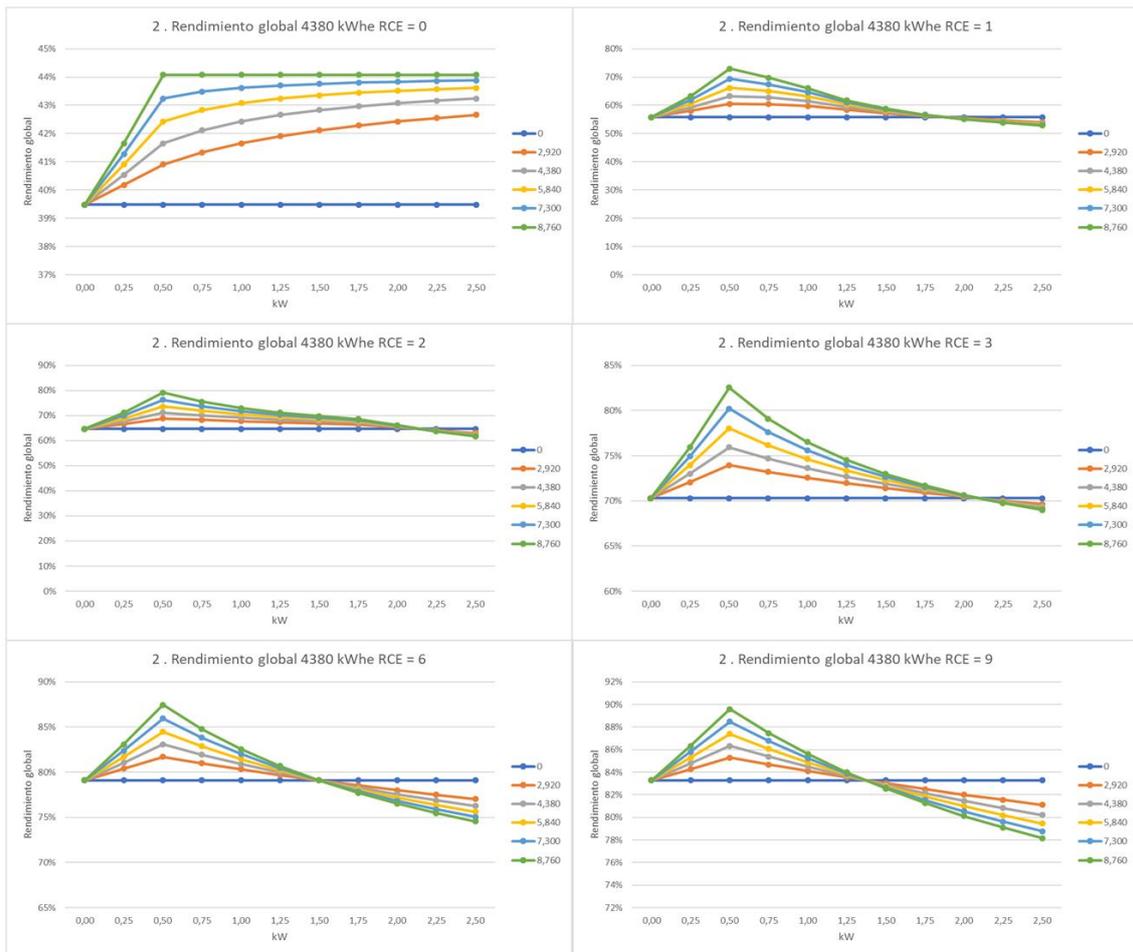


Figura 59. Rendimiento global caso 2.

El rendimiento global es un parámetro importante ya que tiene implicaciones en el resto de los parámetros de la instalación.

F. Ahorro económico operativo.

En esta situación el precio del combustible es tan elevado, que no resulta rentable el uso de la instalación, tal y como puede apreciarse en las gráficas [Figura 60].

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO₂, mediante una pila de combustible.

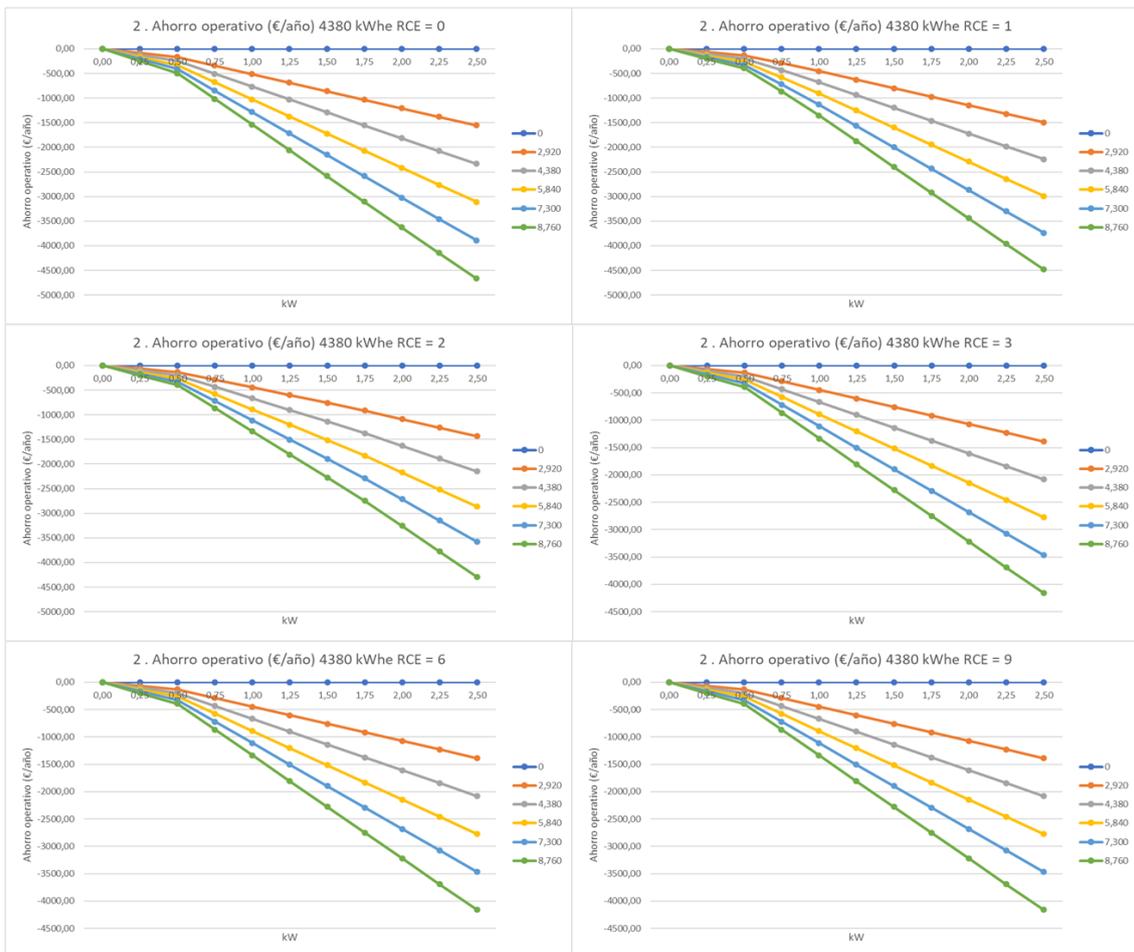


Figura 60. Ahorro operativo caso 2.

Una vez que el ahorro operativo es negativo no tiene sentido plantearse la instalación ya que el ahorro económico depende de que no solamente exista ahorro operativo, sino de que este sea lo suficientemente elevado como para compensar los gastos de la inversión.

En esta situación el precio del hidrógeno que se ha considerado (y que puede observarse en la Figura 41) es de 0,17€/kWhH₂ equivalente a un precio de 5,67€/kgH₂.

Excel permite calcular **qué precio del H₂ haría que el ahorro operativo empezara a ser positivo** (utilizando la herramienta Solver o la función buscar objetivo). En este caso dicho valor sería de 0,074€/kWhH₂ que equivale a un precio de 2,48 €/kgH₂.

5.3.3. Configuración 3, pila de combustible con hidrógeno generado por reformado centralizado de gas natural sin aprovechamiento térmico con captura de CO₂.

El análisis es similar al anterior con la salvedad que en este caso se sacrifica el ahorro de energía primaria y por ende el rendimiento global de la instalación con el fin de mejorar el ahorro de emisiones de CO₂, llegando a obtener ahorros de CO₂ muy elevados. De no ser

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO₂, mediante una pila de combustible.

porque económicamente el coste del combustible no es asumible, ésta podría ser la opción idónea.

A. Ahorro de energía primaria.

El ahorro de energía primaria aumenta de manera generalizada al aumentar la potencia media, hasta llegar al punto en el que se empieza a disipar energía térmica al ambiente, en ese momento el aumento del ahorro de energía primaria se ve disminuido. Al aumentar la RCE de la demanda, éste el punto en el que se empieza a disipar energía térmica al ambiente se desplaza hacia potencias medias de la pila mayores. Este análisis es similar al del caso anterior, sin embargo, el ahorro de energía primaria será menor debido al defecto de energía que supone el empleo del sistema de captura de CO₂. Estas son las conclusiones obtenidas del análisis de las gráficas [Figura 61].

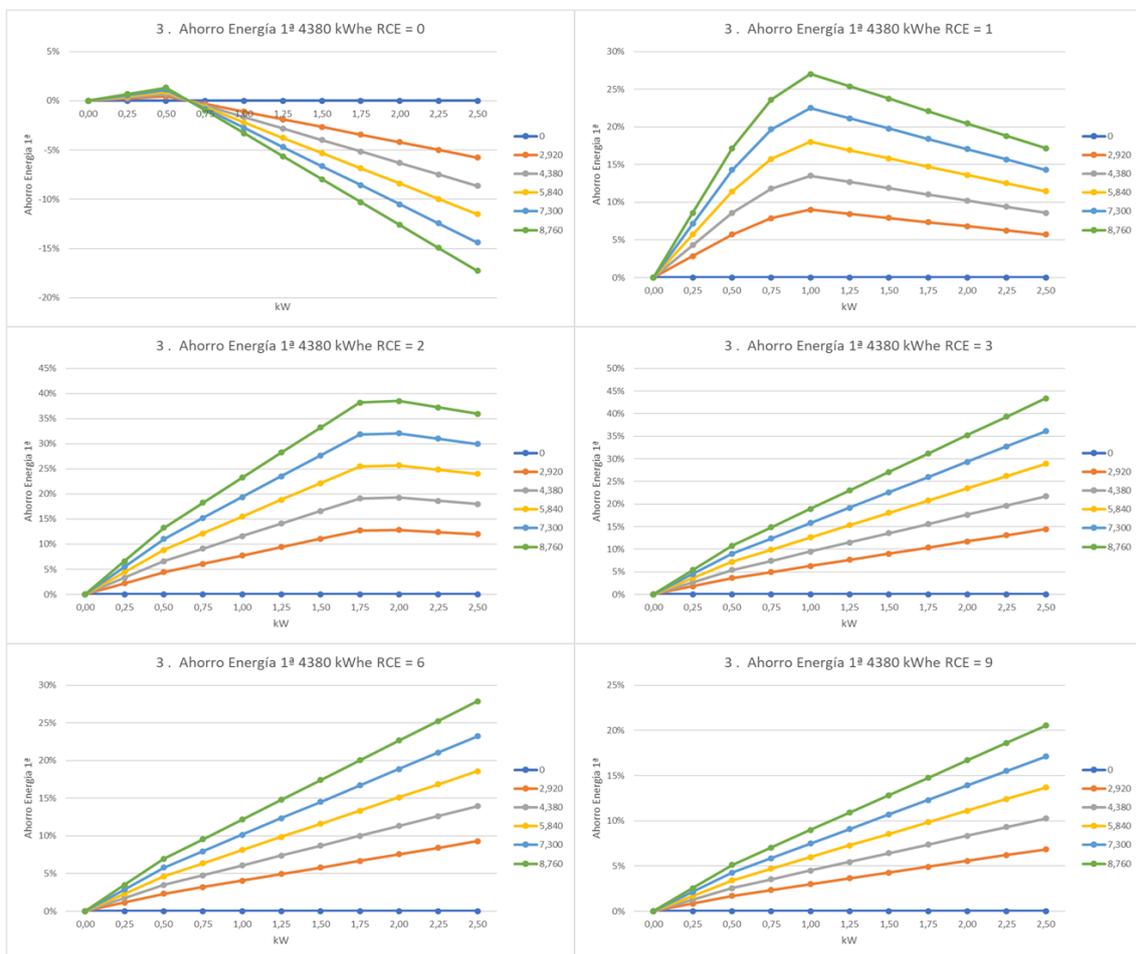


Figura 61. Ahorro de energía primaria caso 3.

El ahorro de energía primaria conseguido en estas situaciones es menor que en los dos casos anteriores, ya que se trata de una situación en la que hay más pérdidas energéticas.

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO₂, mediante una pila de combustible.

B. Ahorro de emisiones de CO2 con emisiones evitadas.

Esta situación es completamente distinta a la de los casos anteriores, ya que en esta situación el hecho de consumir más energía implica un mayor ahorro de emisiones de CO2, gracias al sacrificio de un porcentaje del rendimiento. Esto puede observarse en las gráficas [Figura 62].

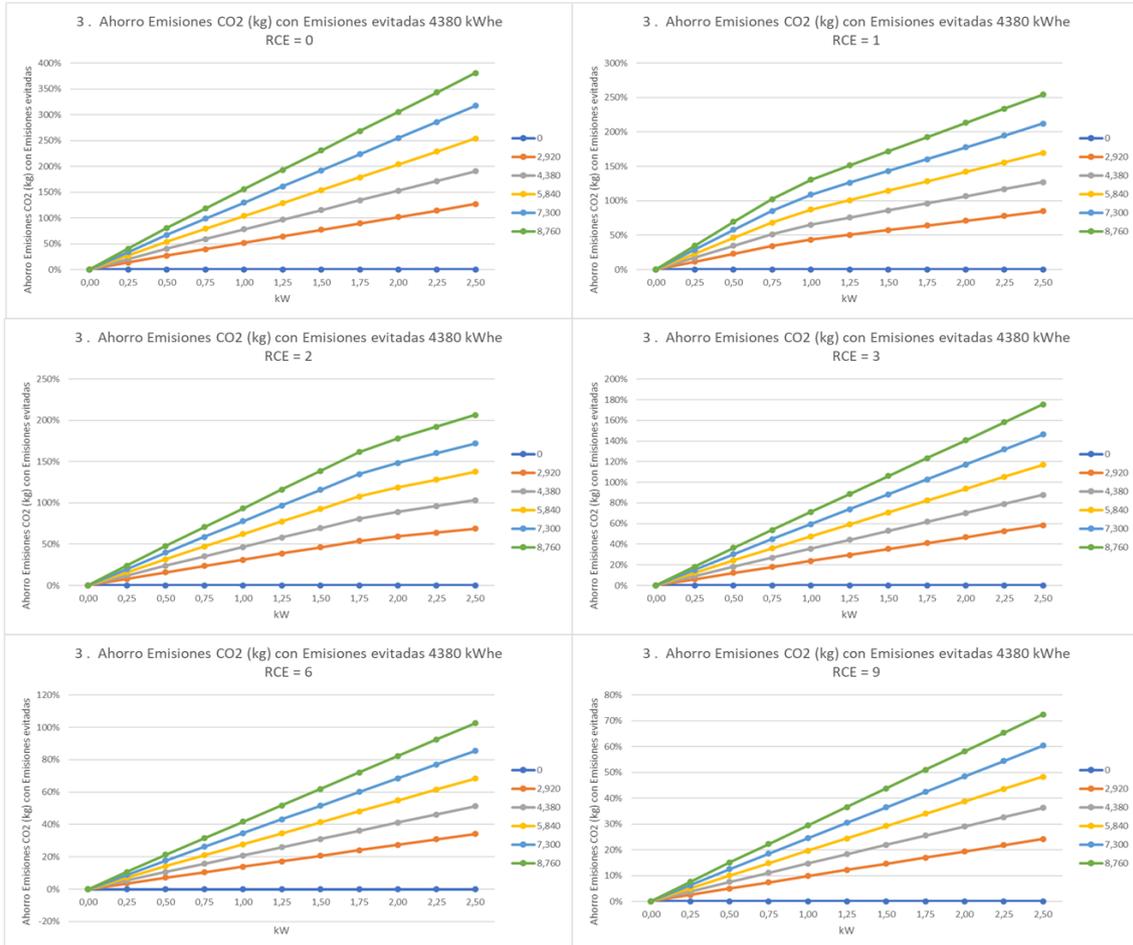


Figura 62. Ahorro emisiones de CO2 caso 3.

Este ahorro de CO2 es realmente interesante, ya que se consigue cumplir claramente con dos objetivos de cualquier sistema energético, el ahorro de energía y la reducción de emisiones de CO2. Sin embargo, este sistema implica un sobrecoste operativo frente al caso anterior por lo que es más difícil que resulte rentable.

C. Energía térmica disipada al ambiente.

Al igual que en el caso anterior la energía térmica únicamente se debe a la fracción térmica de la pila. Al producirse una menor cantidad de energía térmica, no es necesario disipar dicha energía al ambiente hasta que se alcanzan puntos de funcionamiento mucho más intensivos, esto puede observarse analizando las gráficas [Figura 63]. Los resultados son exactamente iguales a los del caso anterior porque tanto la pila como el hidrógeno

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO2, mediante una pila de combustible.

consumido son los mismos, sin embargo, otro tema es el coste de energía primaria, que como ya se ha visto, es mayor.

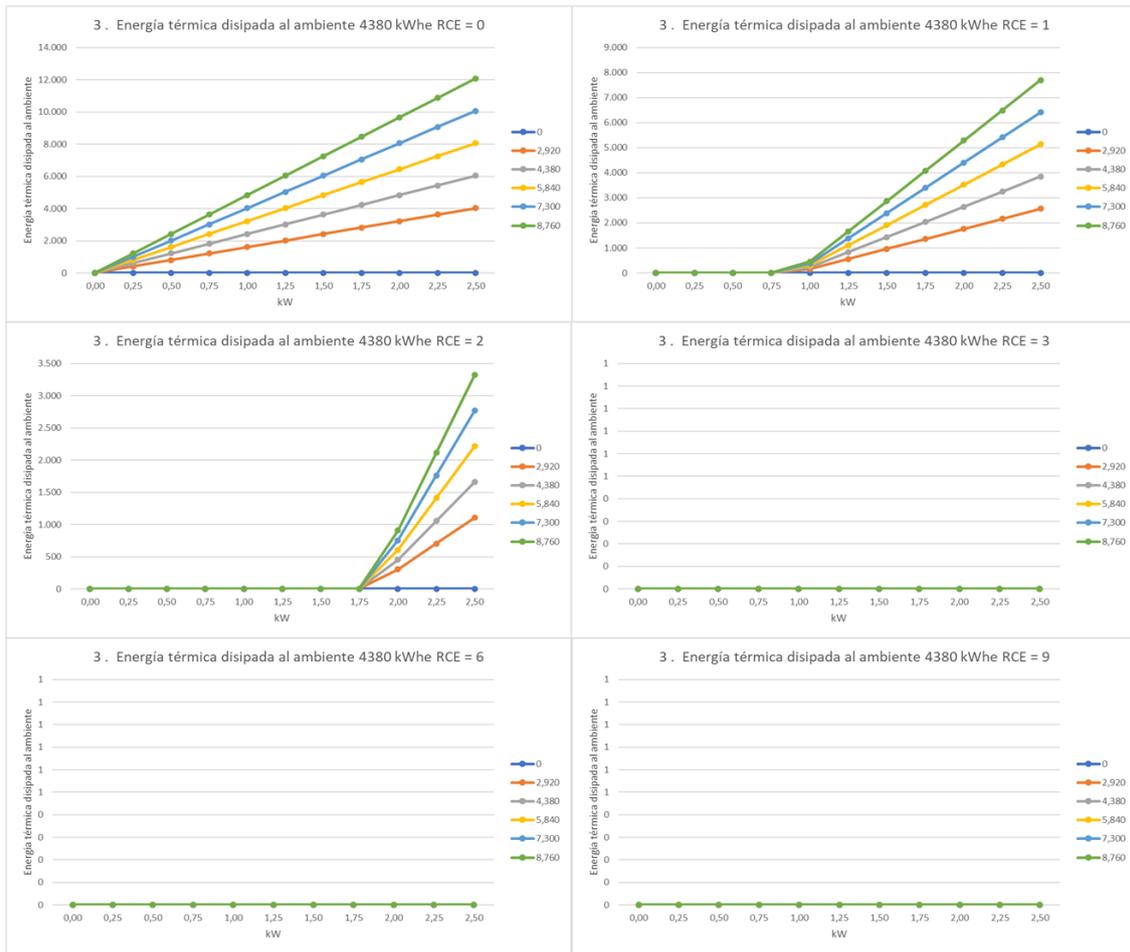


Figura 63. Energía térmica disipada al ambiente caso 3.

D. Factor global de emisión de CO₂.

Debido al ahorro en emisiones de CO₂ se produce una disminución drástica del factor de emisiones de CO₂, tal como puede apreciarse a continuación [Figura 64].

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO₂, mediante una pila de combustible.

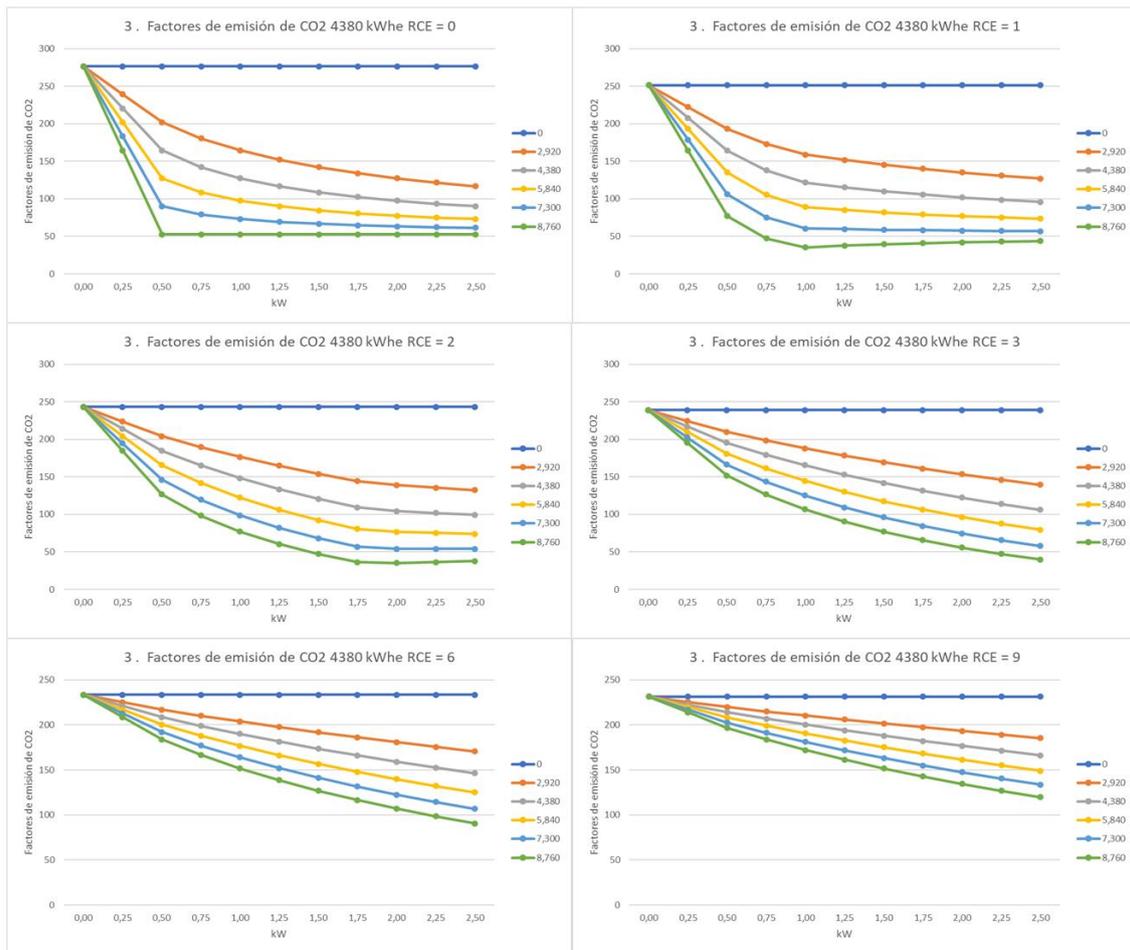


Figura 64. Factores de emisión de CO2 caso 3.

Se puede apreciar que el factor de emisión cae drásticamente hasta un valor mínimo cercano a 50, esto se debe a que a pesar de que haya captura de CO2, el factor de emisión del sistema con captura de CO2 tiene un factor de emisión de 30,6.

E. Rendimiento global.

Se aprecia un valor máximo de rendimiento global para una potencia de 0,5 kW. Esto es independiente de la RCE de la instalación, no así el rendimiento global máximo que aumenta con la RCE. Este análisis se obtiene de la observación de las gráficas [Figura 65].

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO2, mediante una pila de combustible.

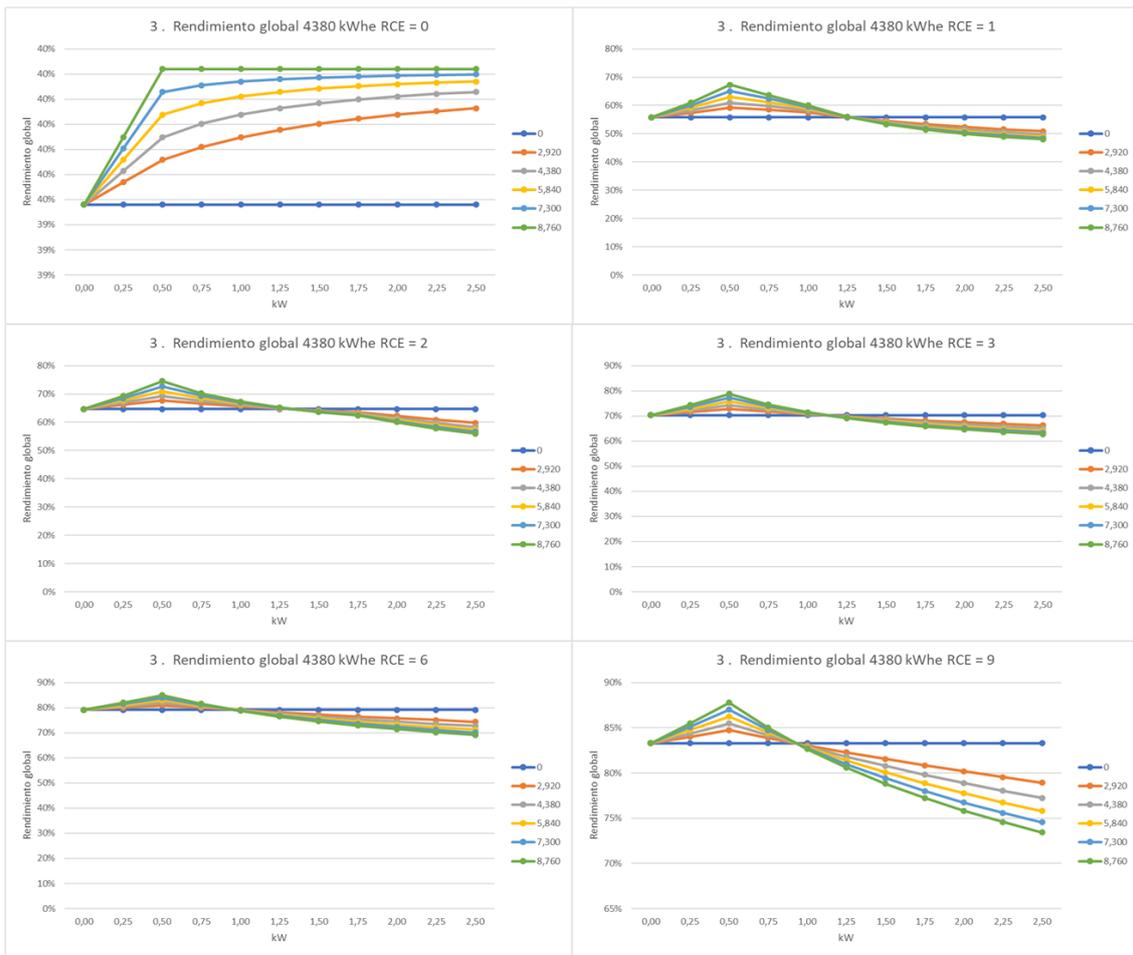


Figura 65. Rendimiento global caso 3.

F. Ahorro económico operativo.

En esta situación el precio del combustible es aún más elevado que en el caso anterior, por lo que no resulta rentable el uso de la instalación, tal y como puede apreciarse en las gráficas [Figura 66].

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO₂, mediante una pila de combustible.

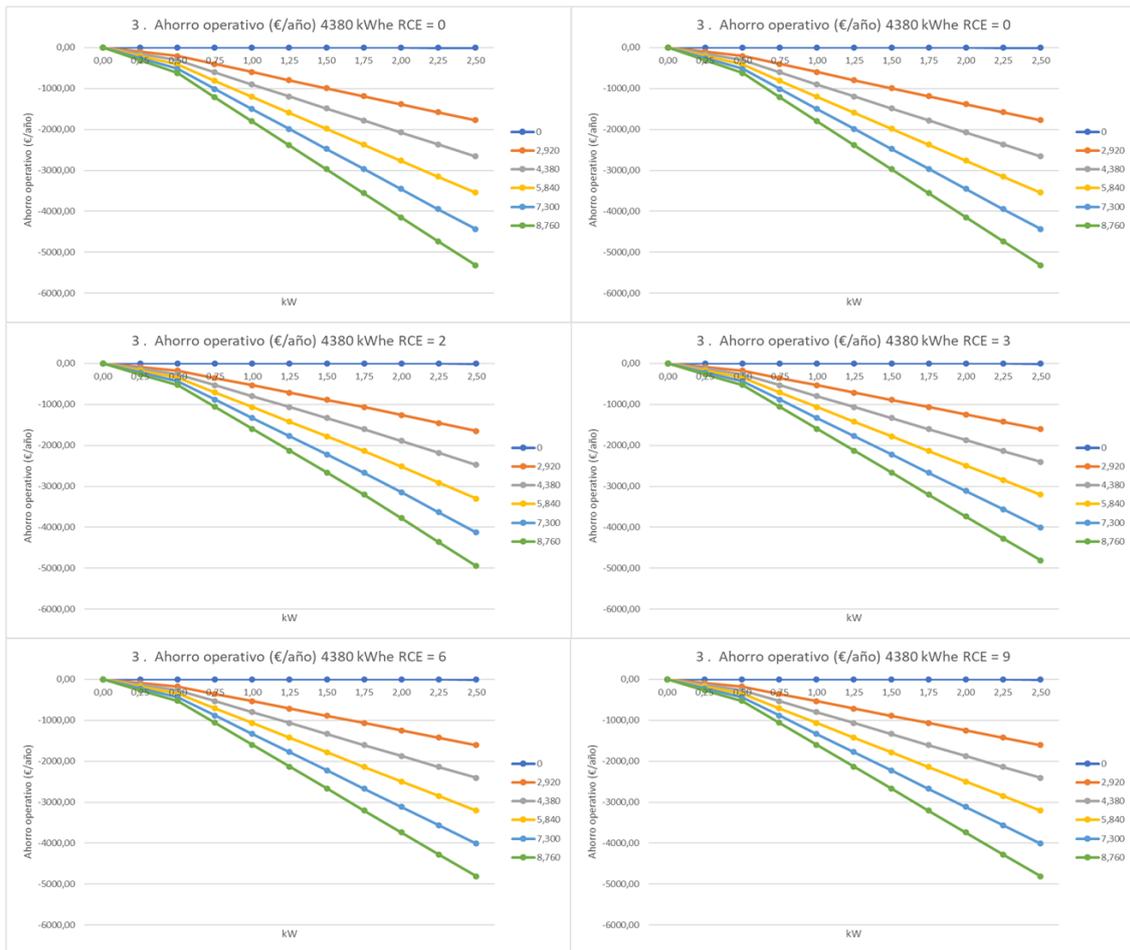


Figura 66. Ahorro operativo caso 3.

En esta situación, el precio considerado es de 0,187€/kWh de hidrógeno, equivalente a un precio de 6,24€/kgH₂. En este caso, el precio es superior al caso anterior, debido al coste provocado por el sistema de captura de CO₂.

5.3.4. Configuración 4, pila de combustible con hidrógeno generado por electrólisis in situ con aprovechamiento térmico.

En este caso se supone que se emplea energía eléctrica para generar hidrógeno y almacenarlo para emplear dicha reserva energética cuando se precise.

A. Ahorro de energía primaria.

En esta situación se consigue un ahorro de energía primaria, aunque en menor medida que cuando la energía primaria se obtenía en forma de gas natural, esto se puede comprobar a continuación [Figura 67].

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO₂, mediante una pila de combustible.

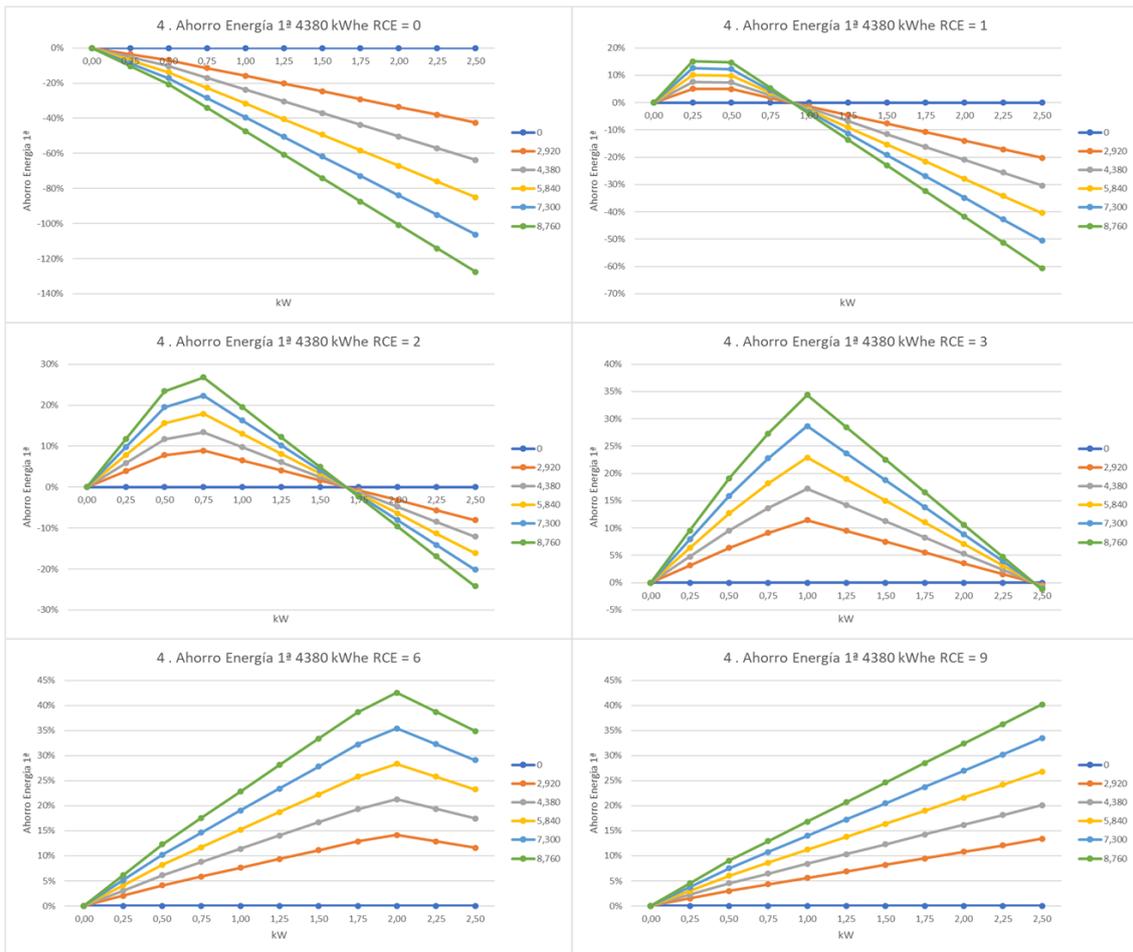


Figura 67. Ahorro de energía primaria caso 4.

B. Ahorro de emisiones de CO2 con emisiones evitadas.

Independientemente de la RCE de la demanda, el punto de máximo ahorro de emisiones de CO2 se produce en el momento en el que se empieza a exportar energía eléctrica a la red. Esto se puede comprobar en la imagen [Figura 68].

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO2, mediante una pila de combustible.

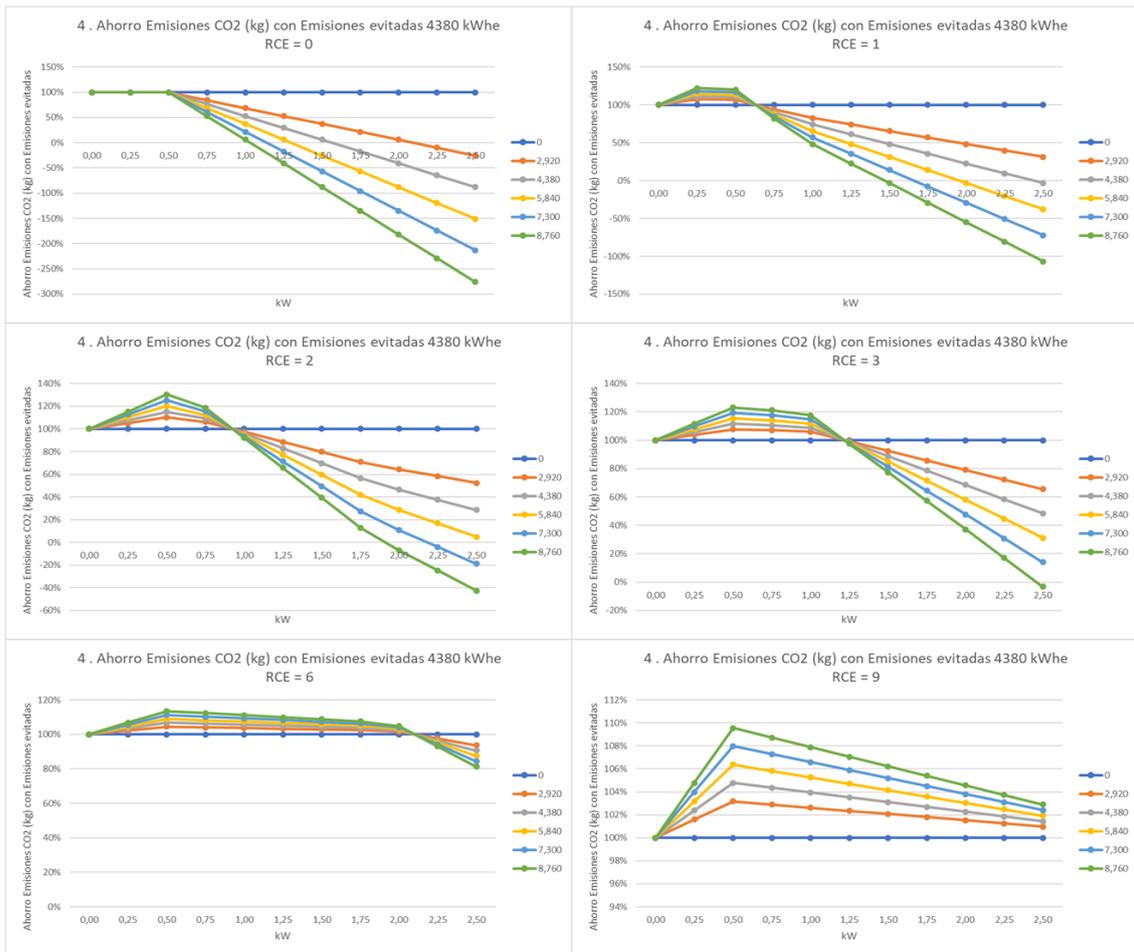


Figura 68. Ahorro de emisiones de CO2 caso 4.

También se puede comprobar la influencia que la disipación de energía térmica al ambiente presenta sobre el resultado de emisiones de CO2.

C. Energía térmica disipada al ambiente.

Al disponer de un electrolizador in situ, se genera energía térmica que provoca que sea necesario disipar energía térmica al ambiente para potencias medias de la pila menores que en el caso anterior. El punto en el que se empieza a disipar energía al ambiente aumenta con la RCE de la demanda, tal y como puede apreciarse en las gráficas [Figura 69].

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO2, mediante una pila de combustible.

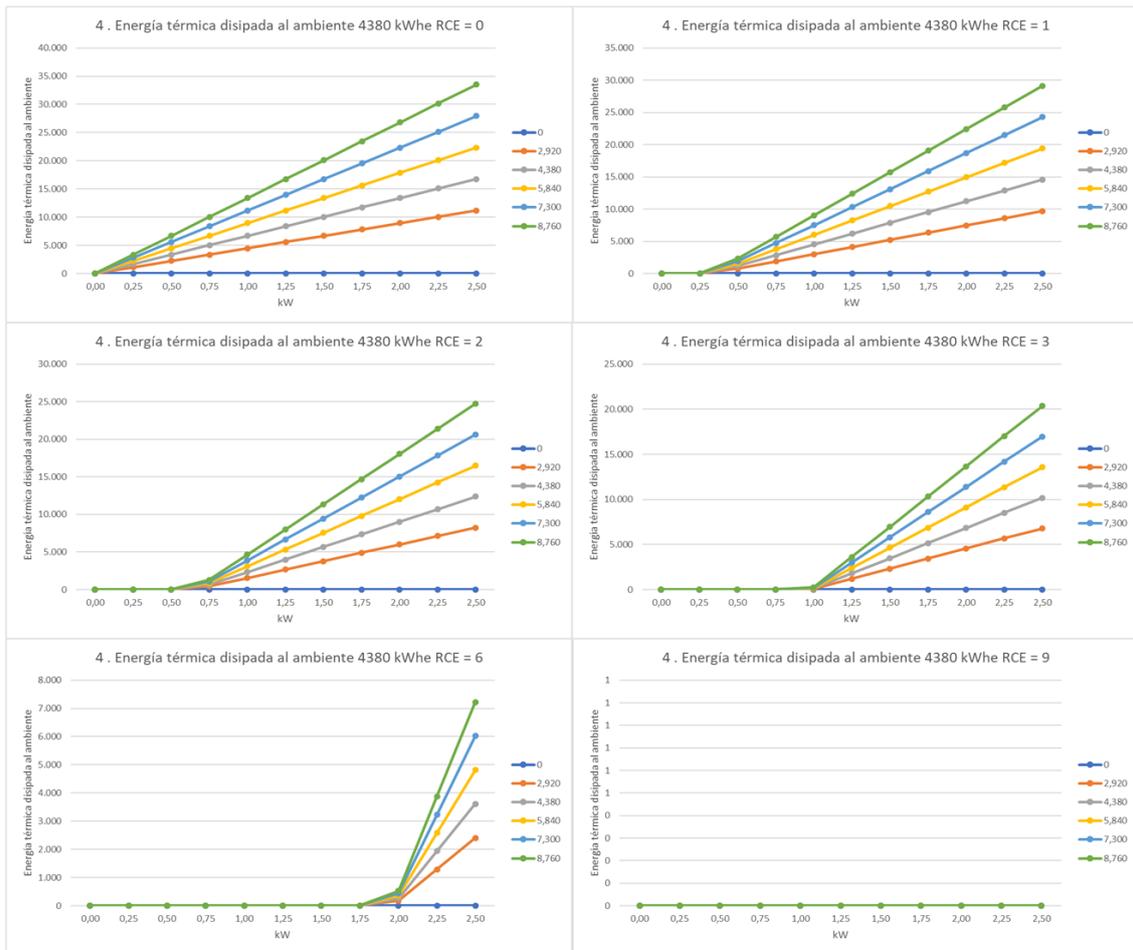


Figura 69. Energía térmica disipada al ambiente caso 4.

D. Factor global de emisión de CO₂.

En el caso de obtención del hidrógeno mediante hidrólisis, se está considerando el factor de emisión que tendría este sistema si la energía utilizada para la hidrólisis del agua proviniera de fuentes de energía renovable, consideración que no se hacía en el apartado de ahorro de emisiones de CO₂, en la cual se insertaba el sistema en el sistema convencional. Por lo tanto, los resultados obtenidos en este apartado [Figura 70] son claramente favorables.

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO₂, mediante una pila de combustible.

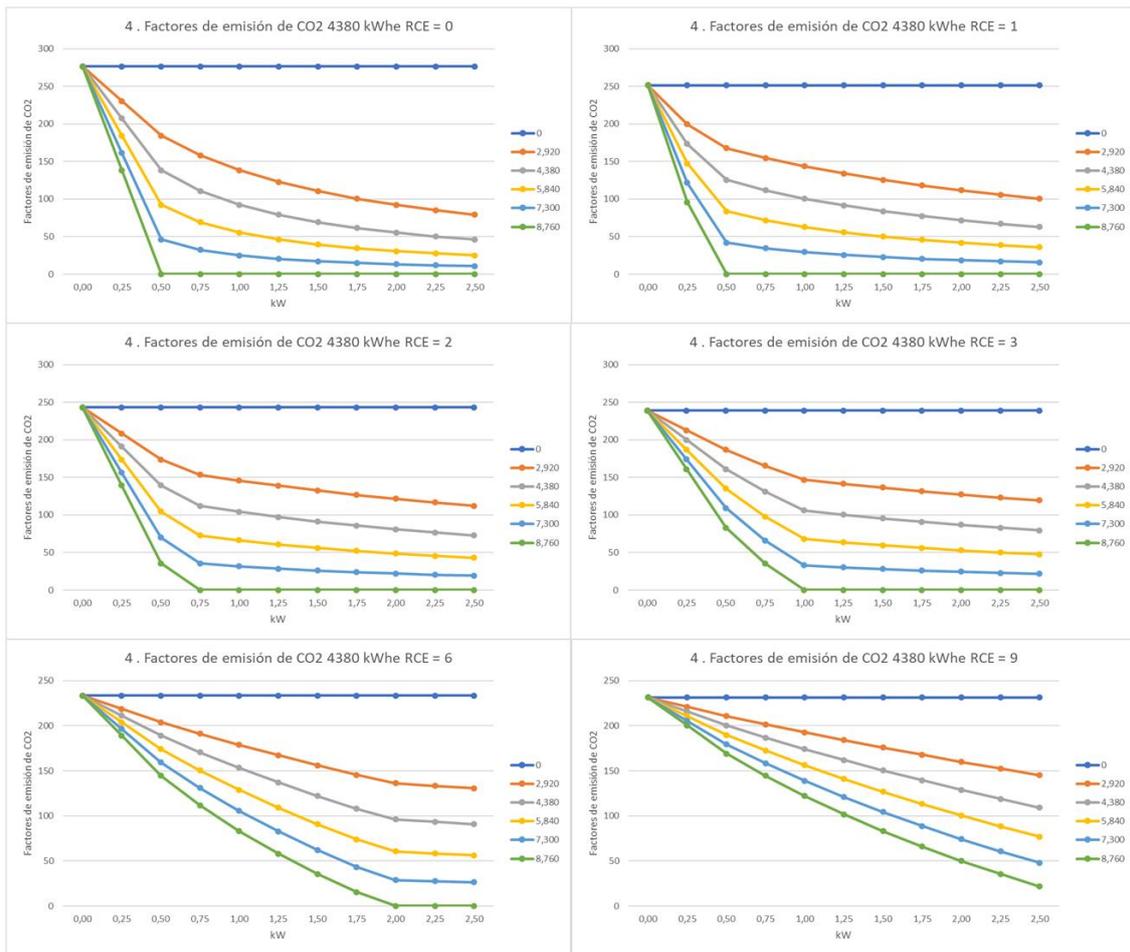


Figura 70. Factores de emisión de CO2 caso 4.

E. Rendimiento global.

Se vuelve a cumplir que el rendimiento global máximo se da para una potencia de 0,5 kW, potencia a partir de la cual empieza a exportar energía eléctrica a la red [Figura 71].

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO2, mediante una pila de combustible.

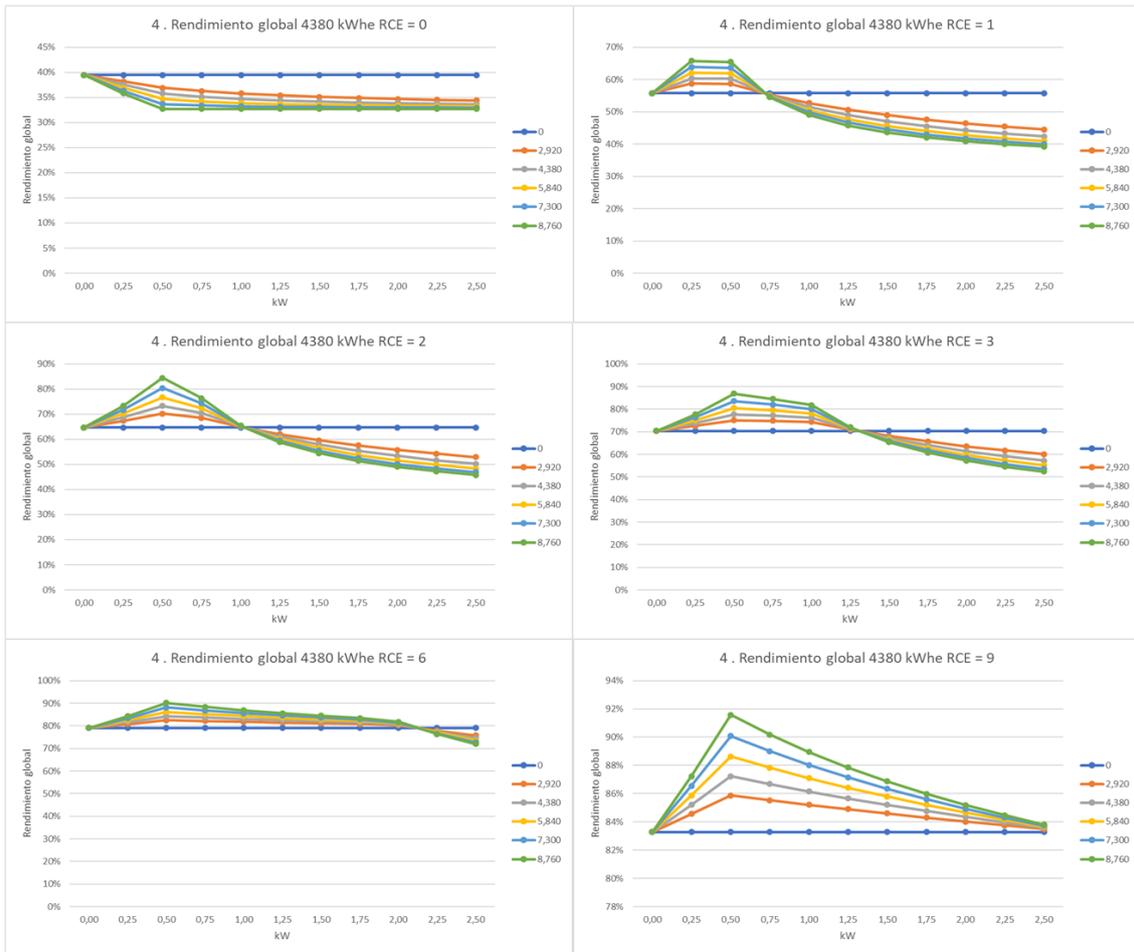


Figura 71. Rendimiento global caso 4.

F. Ahorro económico operativo.

Los resultados del estudio arrojan que no se da ahorro operativo, por consiguiente, es imposible que se produzca ahorro económico [Figura 72].

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO₂, mediante una pila de combustible.

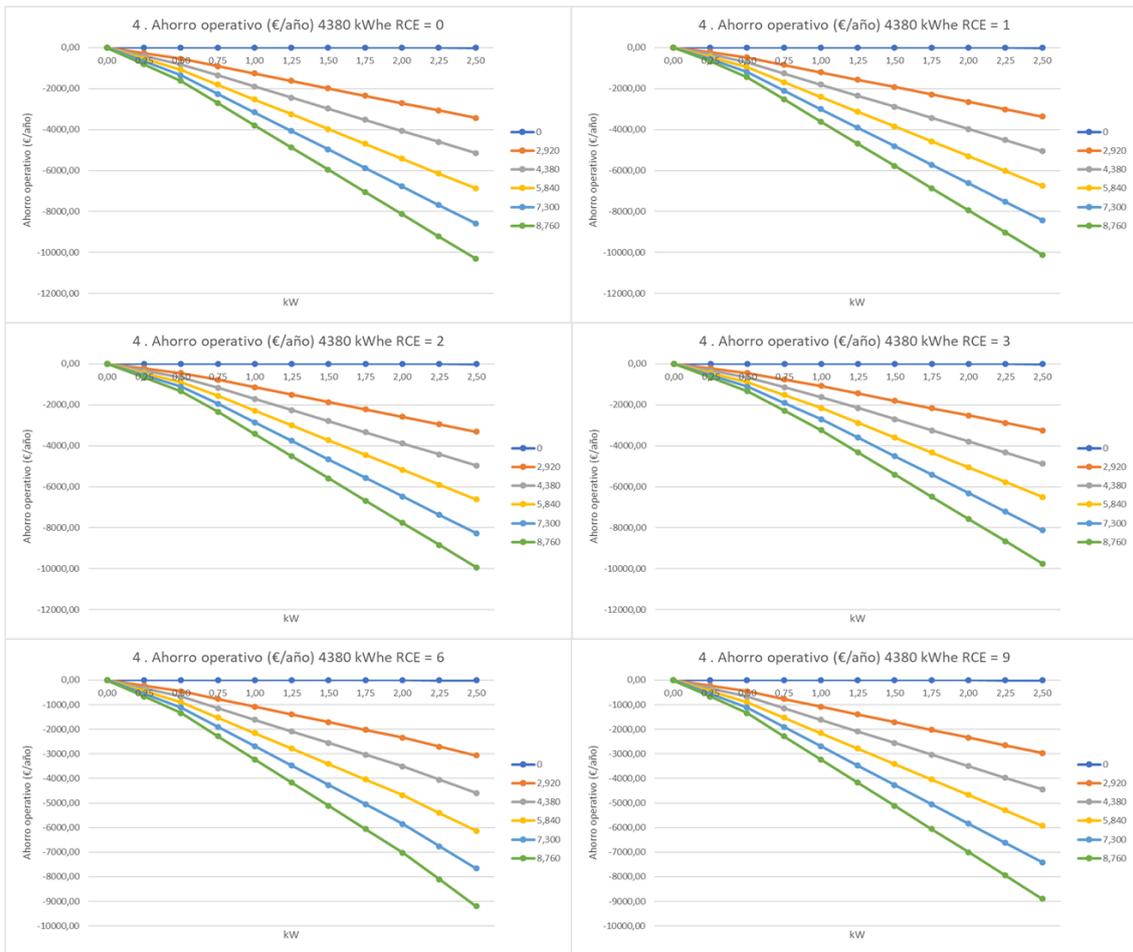


Figura 72. Ahorro operativo caso 4.

5.3.5. Configuración 5, pila de combustible con hidrógeno generado por electrólisis centralizada sin aprovechamiento térmico.

En esta situación el sistema consta de una pila de combustible, considerando que el hidrógeno que alimenta la pila se obtendrá mediante electrólisis en un electrolizador centralizado.

A. Ahorro de energía primaria.

Los ahorros de energía primaria conseguidos son relativamente reducidos incluso en el punto óptimo de funcionamiento [Figura 73].

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO₂, mediante una pila de combustible.

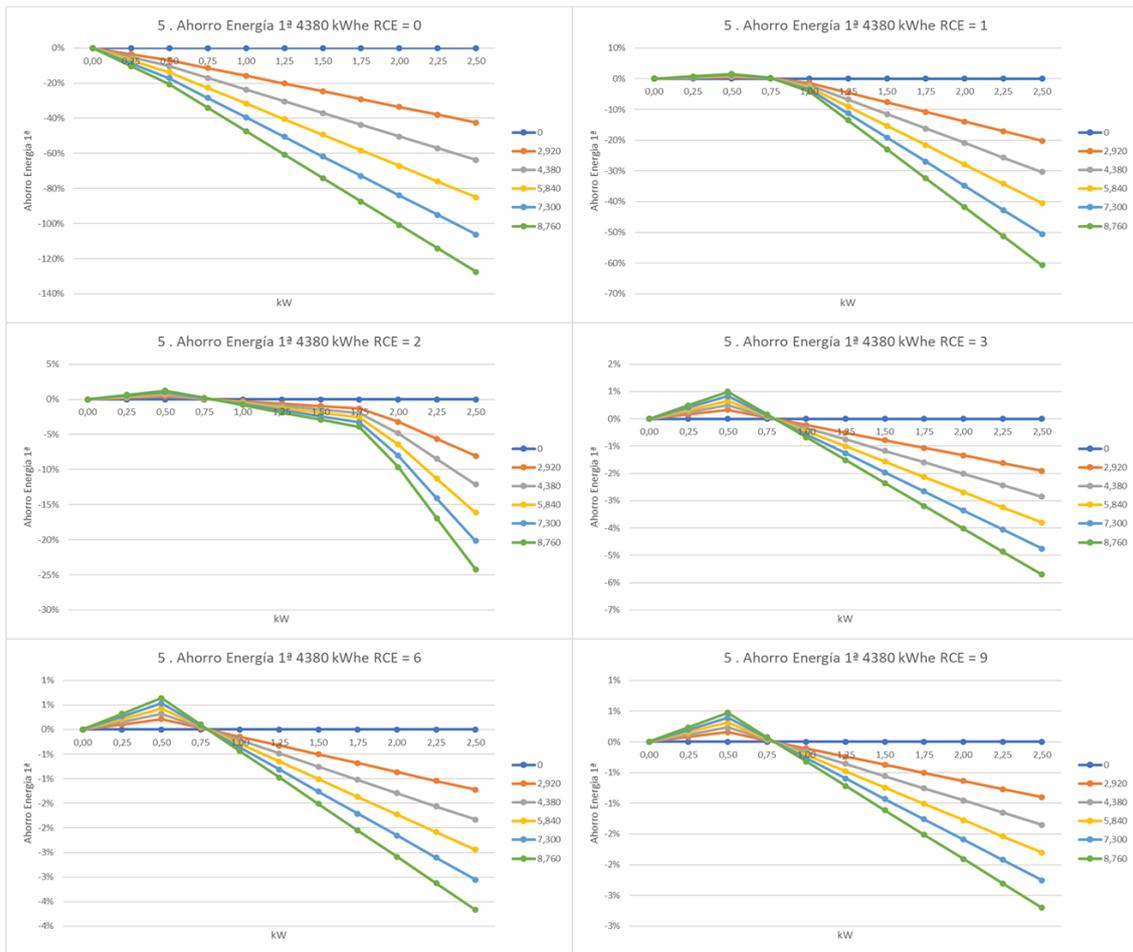


Figura 73. Ahorro de energía primaria caso 5.

B. Ahorro de emisiones de CO2 con emisiones evitadas.

En ningún caso se tiene ahorro de emisiones, por lo que en este respecto esta tecnología no resulta interesante [Figura 74].

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO2, mediante una pila de combustible.

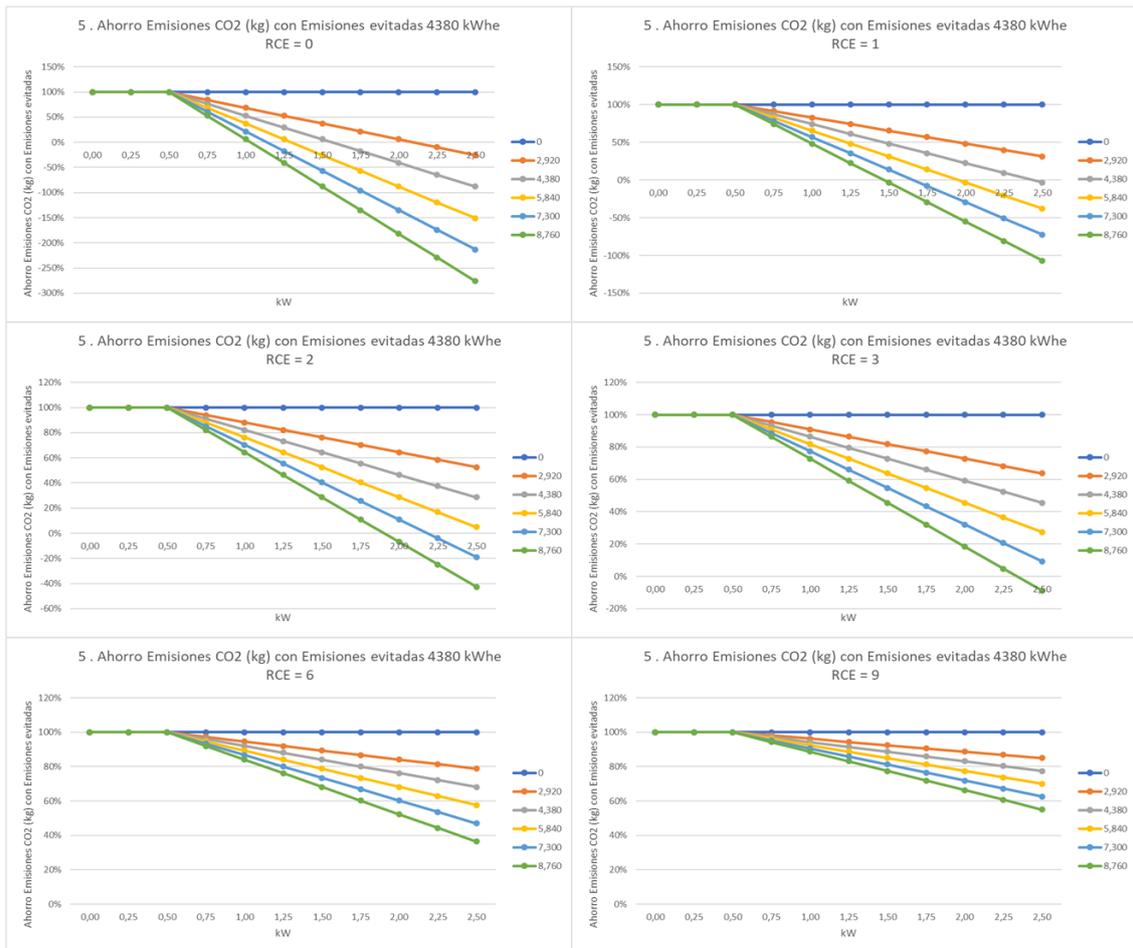


Figura 74. Ahorro de emisiones de CO2 caso 5.

C. Energía térmica disipada al ambiente.

En este caso la energía disipada al ambiente es la misma que en los casos 2 y 3 ya que la instalación solamente se centra en la pila de combustible, lo que puede comprobarse observando las representaciones gráficas [Figura 75].

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO2, mediante una pila de combustible.

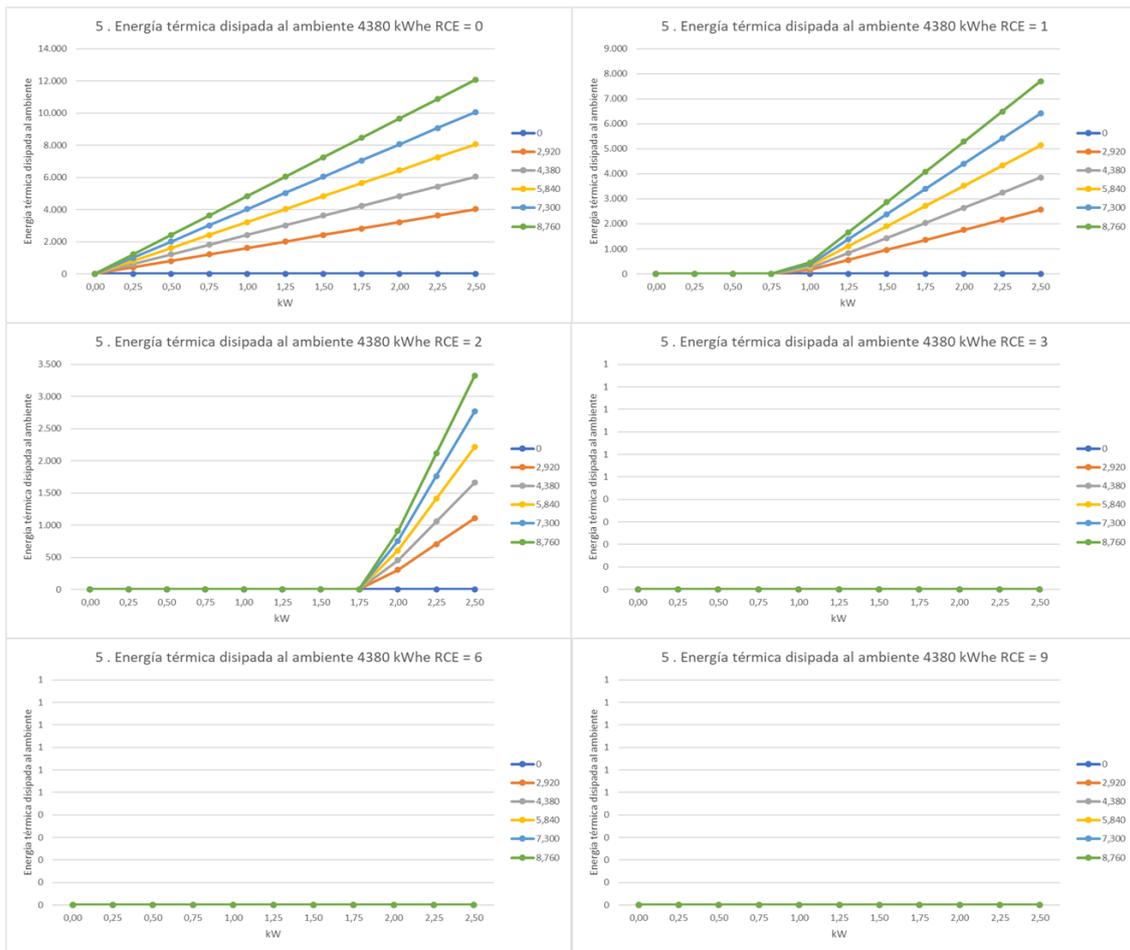


Figura 75. Energía térmica disipada al ambiente caso 5.

D. Factor global de emisión de CO₂.

Se comprueba que el factor de emisiones disminuye siempre [Figura 76], tal y como se explicó en el apartado anterior, se plantea el factor de emisiones de CO₂ del sistema si solamente se utilizaran energías renovables para alimentar electrolizador. Se puede ver que el sistema es claramente favorable en esta situación.

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO₂, mediante una pila de combustible.

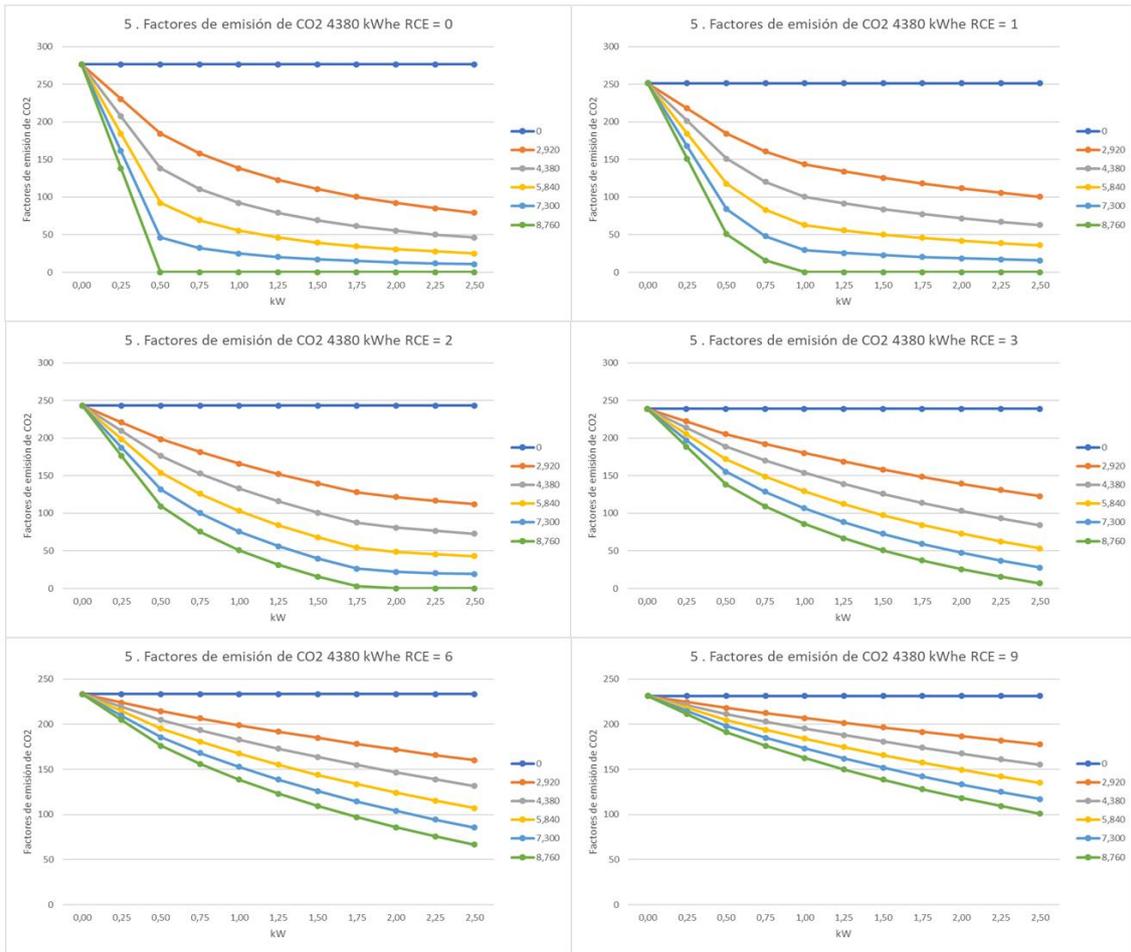


Figura 76. Factores de emisión de CO2 caso 5.

E. Rendimiento global.

A la vista de los resultados mostrados en la representación gráfica, los valores del rendimiento global son inferiores a los de la solución convencional [Figura 77].

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO2, mediante una pila de combustible.

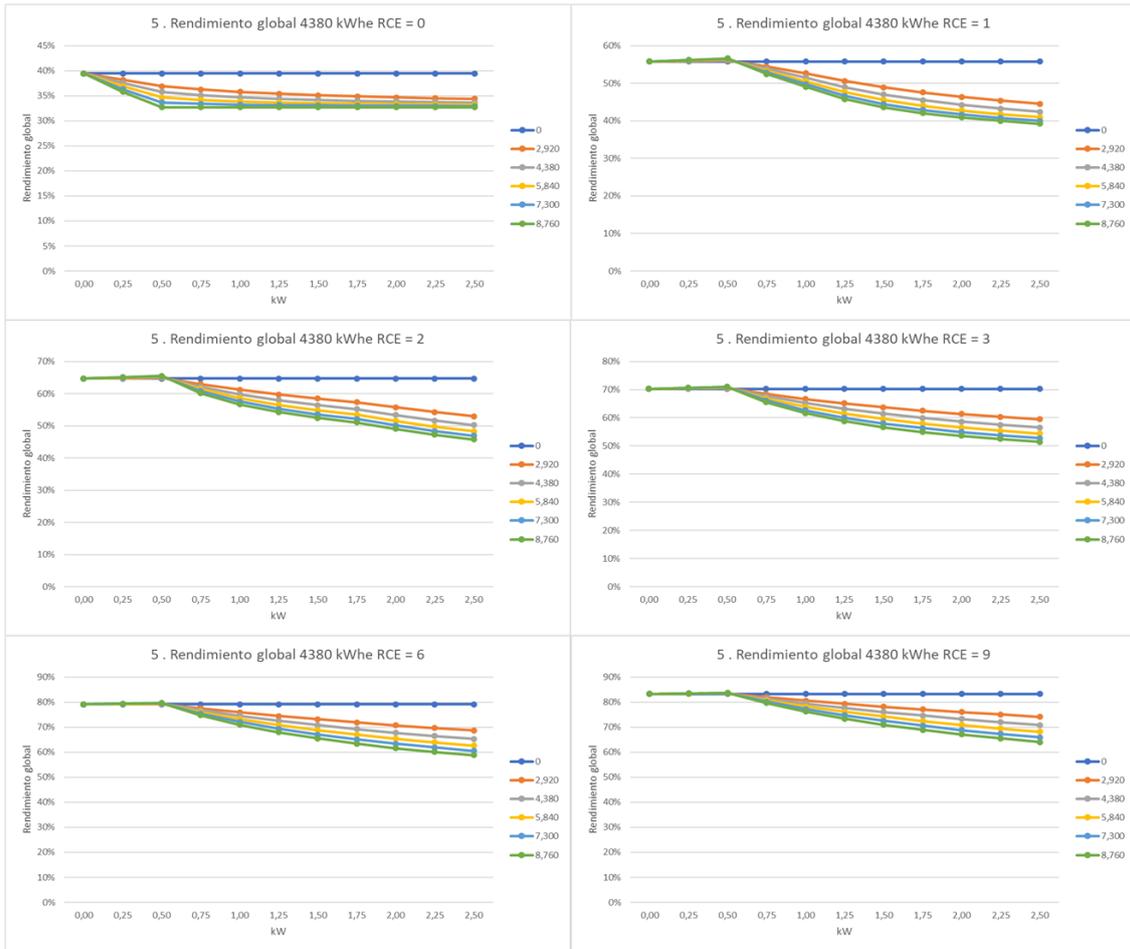


Figura 77. Rendimiento global caso 5.

F. Ahorro económico operativo.

Al no obtenerse ahorro operativo, es imposible obtener ahorro económico total, como se puede apreciar a continuación [Figura 78].

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO₂, mediante una pila de combustible.

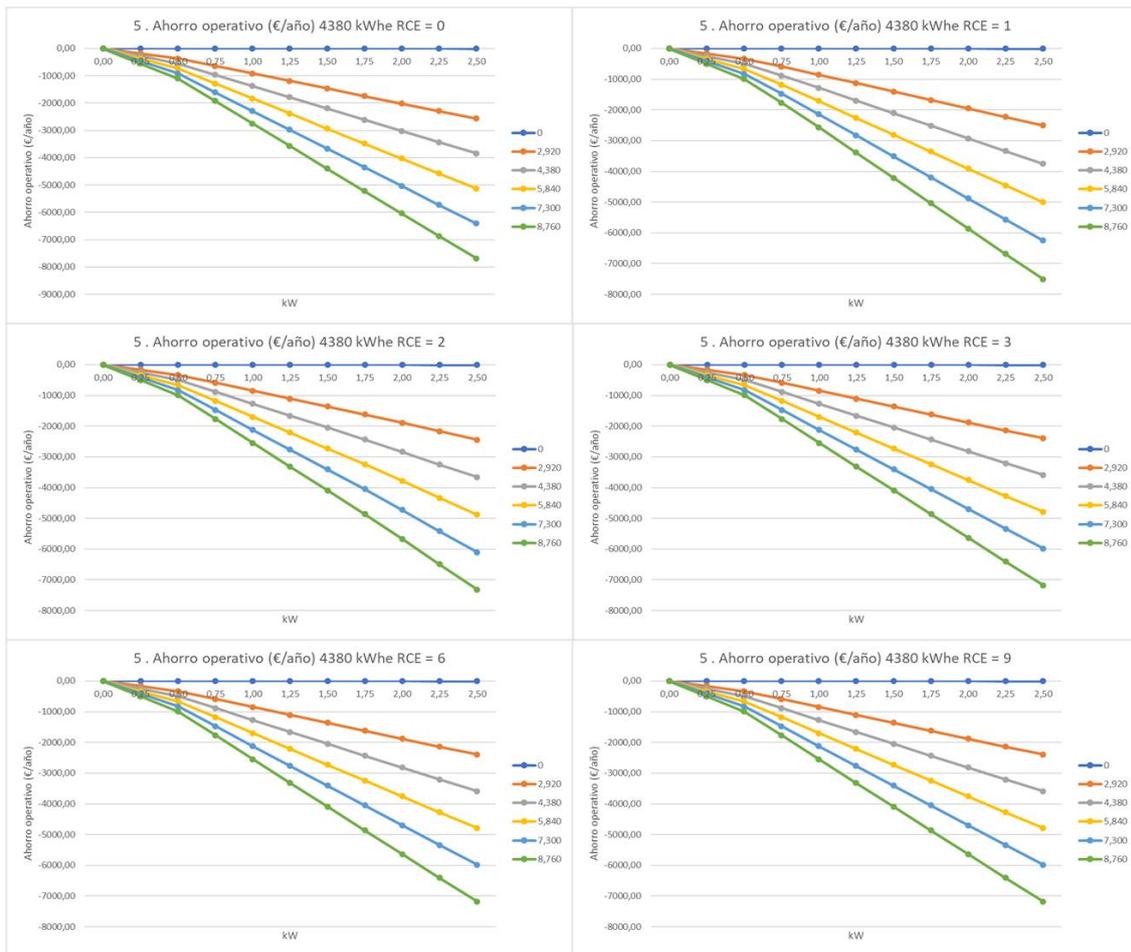


Figura 78. Ahorro operativo caso 5.

En esta situación el precio estimado del combustible es mucho mayor que en los casos anteriores, debido al reducido rendimiento de este sistema. El precio estimado en esta situación es de 0,25€/kWh₂, lo que equivale a 8,33€/kgH₂.

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO₂, mediante una pila de combustible.

CAPÍTULO: 6. SIMULACIÓN DE PILA DE COMBUSTIBLE PEM BASADA EN UN MODELO DINÁMICO.

Como complemento del modelo basado en las relaciones algebraicas entre las potencias y las horas de funcionamiento y la relación RCE de la demanda que se ha descrito anteriormente, se presenta a continuación una simulación del sistema formado por una pila de combustible PEMFC basada en modelo dinámico de la pila. Este **modelo dinámico** posibilita considerar **valores variables en el tiempo tanto de las condiciones de entrada como de las demandas**, así como poder calcular el **punto de funcionamiento real de la pila** en función de la demanda eléctrica o térmica.

6.1. Discretización de las demandas térmica y eléctrica por periodos.

Como se ha indicado una de las ventajas de la simulación basada en el modelo dinámico es que se pueden considerar las potencias eléctricas variables a lo largo del día, y no sólo el número de horas de funcionamiento a la potencia considerada, como se ha hecho en el modelo Excel.

A pesar de tener esta flexibilidad, **para simplificar** la definición de las demandas eléctrica y térmica, se han considerado sólo **cuatro periodos de seis horas** a lo largo del día. En cada periodo se consume una cantidad de energía eléctrica y térmica, con una potencia media en el periodo, tal como se indica en la figura [Figura 79]. Se ha considerado la RCE de la demanda fija, por lo que las potencias eléctrica y térmica varían de la misma forma.

Potencia eléctrica (kW) en cada periodo de 6 h					
	15	20	25	40	
	12-5	6-11	12-17	18-23 (siempre ON)	
Demanda eléctrica (kWh/d)	15,0%	20,0%	25,0%	40,0%	
12,00	0,30	0,40	0,50	0,80	
14,25	0,36	0,47	0,59	0,95	
22,00	0,55	0,73	0,92	1,47	
Demanda térmica (kWh/d)	Potencia térmica (kW) en cada periodo de 6 h				RCE (HPR)
36,00	0,90	1,20	1,50	2,40	3,00
60,00	1,50	2,00	2,50	4,00	5,00
36,00	0,90	1,20	1,50	2,40	2,53
60,00	1,50	2,00	2,50	4,00	4,21
36,00	0,90	1,20	1,50	2,40	1,64
60,00	1,50	2,00	2,50	4,00	2,73
					Para 4.380 kWh/año electricidad
					Para 4.380 kWh/año electricidad
					Para 5.200 kWh/año electricidad
					Para 5.200 kWh/año electricidad
					Para 8.030 kWh/año electricidad
					Para 8.030 kWh/año electricidad

Figura 79. Cálculo de potencias térmicas y eléctricas por periodos.

En esta situación se plantean **dos posibilidades**, la **primera** consiste en hacer funcionar el sistema para **satisfacer la demanda eléctrica**, mientras que la **segunda** consistiría en **satisfacer la demanda térmica**.

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO₂, mediante una pila de combustible.

Estos objetivos de demanda que se plantean pueden cumplirse o no, pero el proceso de establecimiento de las condiciones de funcionamiento del sistema es completamente distinto en función del objetivo planteado.

6.2. Planteamiento de la simulación.

En base al análisis y explicaciones teóricas descritas en (Guzzella & Sciarretta, 2013), se plantea el desarrollo de la simulación. Para llevar a cabo la simulación se utilizan las herramientas de modelo dinámico de Matlab y Simulink. El bloque de referencia relativo a la PEMFC en Simulink es el que se detalla en (MATWORKS, 2020). El bloque permite alternar entre una descripción sencilla y una descripción compleja de la pila PEMFC, además de simular el comportamiento de otros sistemas alimentados por hidrógeno, no solo la pila.

El esquema de funcionamiento de dicho bloque es el que se muestra en la siguiente imagen [Figura 80].

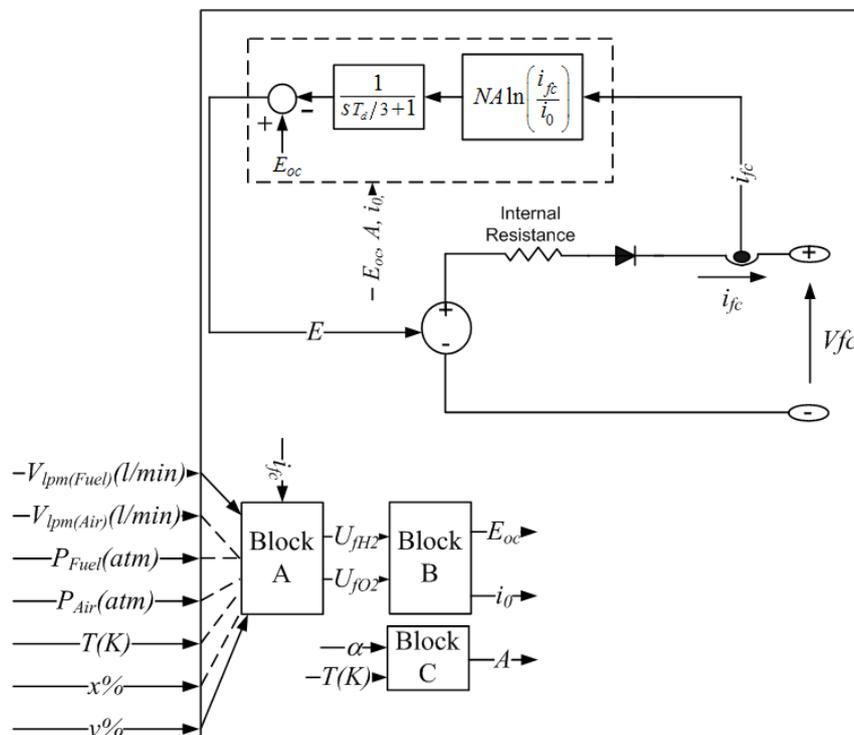


Figura 80. Esquema de funcionamiento pila de combustible Simulink.

En el esquema se pueden apreciar **dos partes diferenciadas**. Una en la que se ejecuta el **circuito eléctrico equivalente a la pila de combustible**, que establece una relación logarítmica entre la tensión y la intensidad eléctrica, y otra en la que se gestionan las **entradas al bloque**, de tal manera que es posible seleccionar las entradas que se quieren fijar para la pila. Como consecuencia, en el bloque se pueden especificar diversas variables que serán utilizadas para ejecutar la simulación dinámica.

A continuación se van a explicar las simulaciones del modelo dinámico llevadas a cabo, pero antes es necesario comentar dos consideraciones generales que han de ser tenidas en cuenta:

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO₂, mediante una pila de combustible.

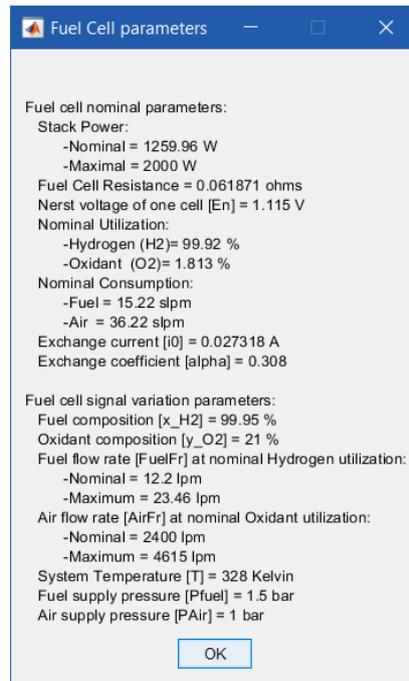


Figura 82. Parámetros de la pila para satisfacción de demanda eléctrica.

La curva de polarización que presenta esta pila de combustible se puede apreciar a continuación [Figura 83].

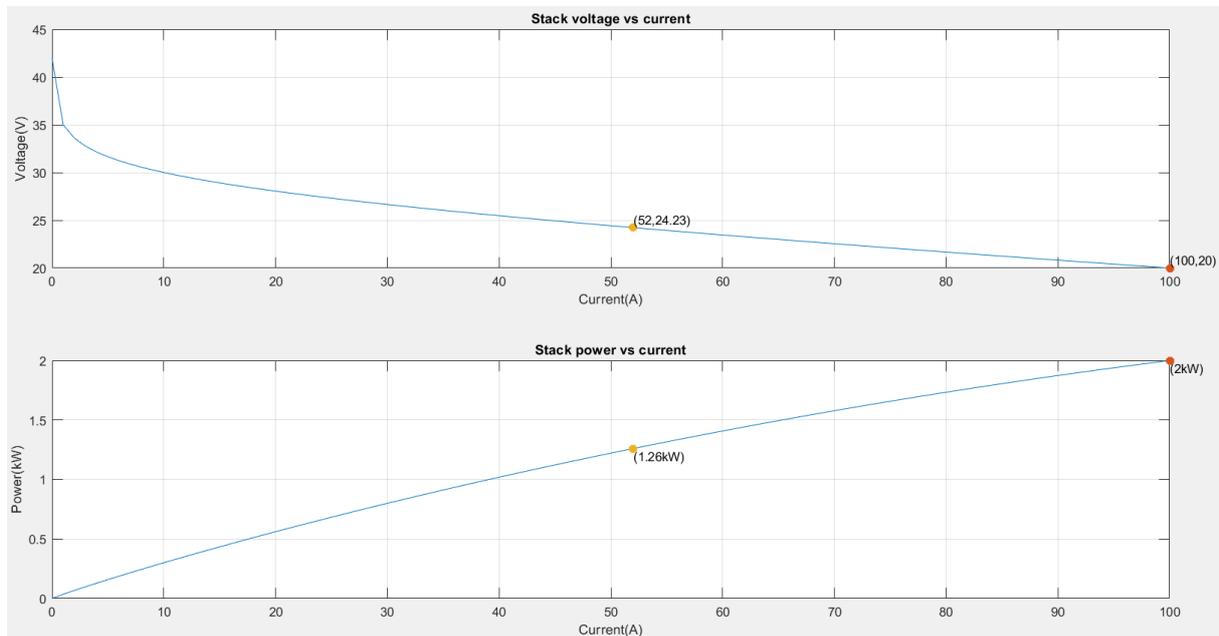


Figura 83. Curva de polarización satisfacción de demanda eléctrica.

Para poder establecer en qué punto de funcionamiento se encuentra trabajando la pila, se puede analizar tanto la curva de tensión intensidad como la de potencia eléctrica intensidad de la pila.

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO₂, mediante una pila de combustible.

En el caso estudiado se puede calcular gráficamente el resultado a partir del cálculo de las resistencias, o bien se puede calcular a partir de las potencias eléctricas requeridas la resistencia de cálculo, tal y como puede apreciarse a continuación [Figura 84].

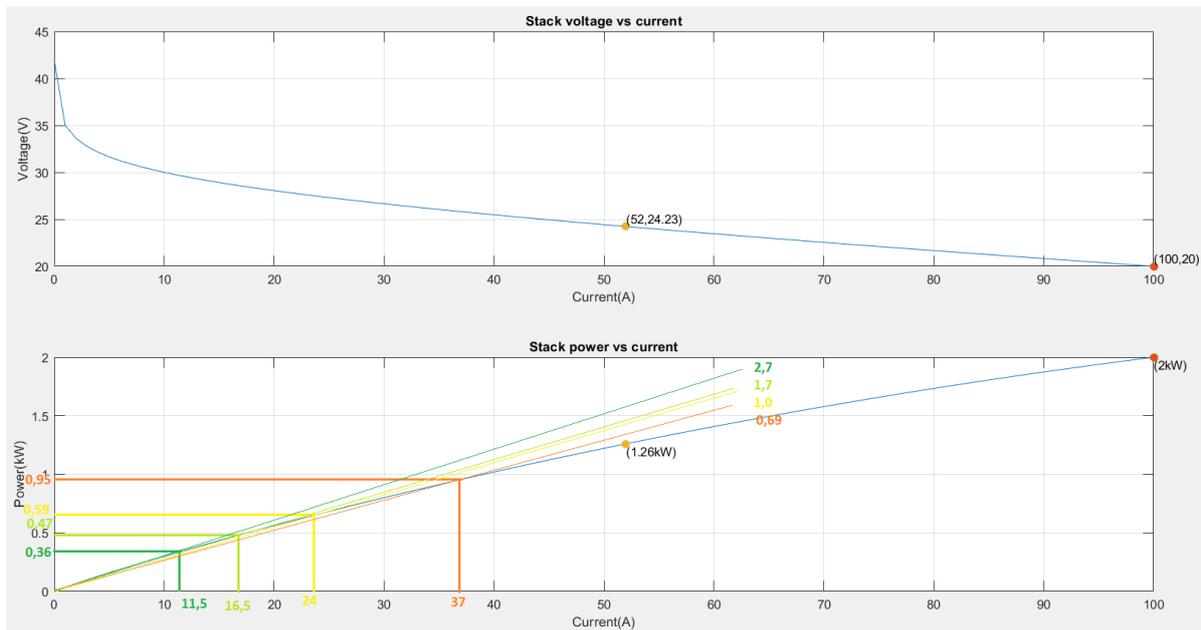


Figura 84. Cálculo de resistencias eléctricas.

Sin embargo, este proceso de control es realmente complejo de implementar. Además, la variación en la tensión de salida de la pila no es deseable. Por ello lo que se hace es introducir un convertidor de tensión que aporte un valor de tensión constante como se vio en la [Figura 83], para a partir de ahí calcular la resistencia necesaria según la potencia demandada. Esto se hace de acuerdo con la siguiente expresión:

$$R = \frac{V^2}{P} = \frac{220^2}{P}$$

En la siguiente imagen [Figura 85] se puede observar el código de simulación utilizado para este caso.

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO₂, mediante una pila de combustible.

```

nh=0.1/3.6; % Número de horas durante las que se mantiene cada potencia
Pots=[0.36 0.47 0.59 0.95]; % Potencias obtenidas del modelo en Excel en kW
Pots=Pots.*1000; % Conversión de las potencias de kW a W

P(1:nh*3600)=ones(1,nh*3600)*Pots(1);

for i = 1:length(Pots)-1
    P(i*nh*3600+1:(i+1)*nh*3600)=ones(1,nh*3600)*Pots(i+1);
end

Re=220^2./P;

Final=length(P);
t=[0:Final-1];

Input=[t', Re'];

R = sim('FuelCell',t, [], Input);

Pel=R.yout{1}.Values.data;
Pter=R.yout{2}.Values.data;

```

Figura 85. Código de simulación para satisfacción de demanda eléctrica.

De esta manera, en función de las distintas demandas es posible simular el comportamiento de la pila con el fin de comprobar que el método de control es correcto. Al ejecutar el código se obtiene el siguiente resultado [Figura 86].

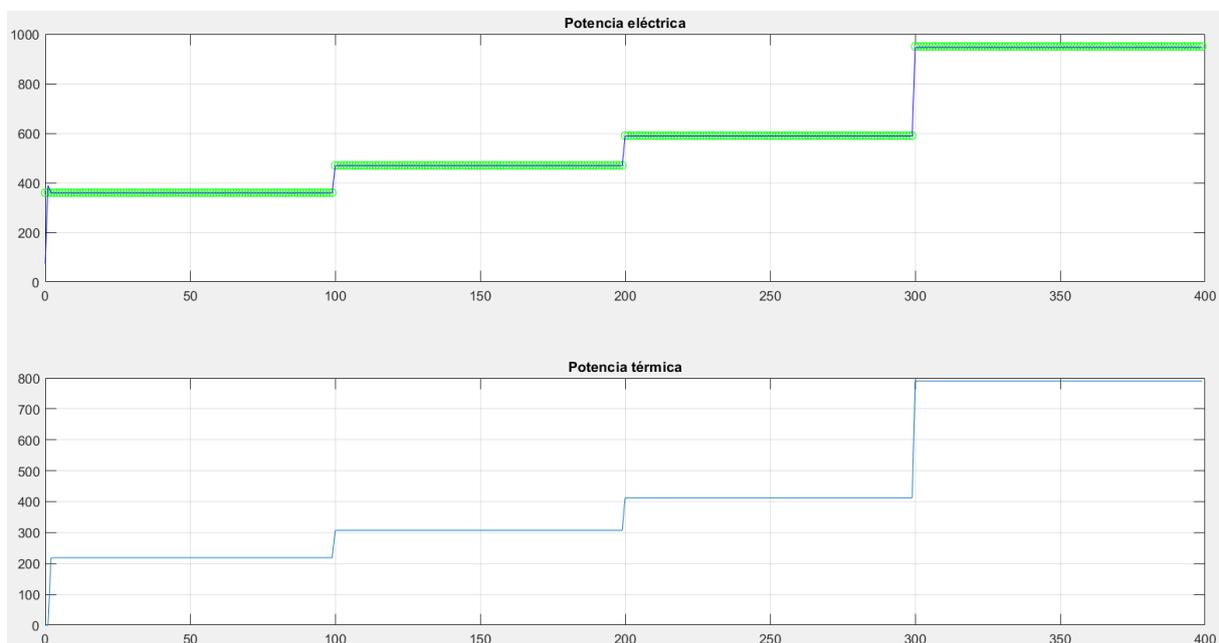


Figura 86. Resultados correspondientes a satisfacer la demanda eléctrica.

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO₂, mediante una pila de combustible.

Se puede observar que la potencia eléctrica aportada por la pila se ajusta a la demanda, mientras que la potencia térmica generada es un resultado consecuencia del punto de funcionamiento de la pila.

Se podría considerar introducir un controlador para ajustar el punto de funcionamiento aún más, dado que si existiera algún tipo de pérdidas eléctricas que impidiera la satisfacción de la demanda eléctrica, se podría ajustar el punto de funcionamiento para cumplir con la demanda. Sin embargo, el resultado sería similar al expuesto en este apartado, por lo que no merece la pena desarrollarlo.

6.4. Sistema de control para satisfacer la demanda térmica

Se plantea en este caso la segunda posibilidad de regulación, que es la de tratar de satisfacer la demanda térmica con independencia de la demanda eléctrica. En este caso, dado que la demanda térmica alcanza rangos energéticos más elevados, es necesario utilizar otra pila. Los parámetros de funcionamiento de la pila utilizada en este caso se muestran a continuación [Figura 87].

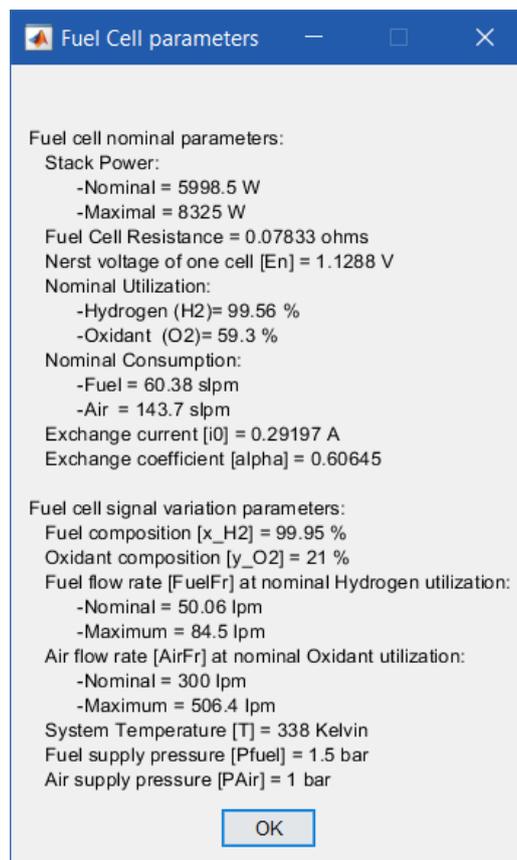


Figura 87. Parámetros de funcionamiento de la pila para satisfacción de demanda térmica.

Sin embargo, este caso plantea dificultades para establecer el punto de funcionamiento, ya que es la carga eléctrica la que condiciona el punto de funcionamiento de la pila, como se puede ver atendiendo a la curva característica de la pila [Figura 88].

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO₂, mediante una pila de combustible.

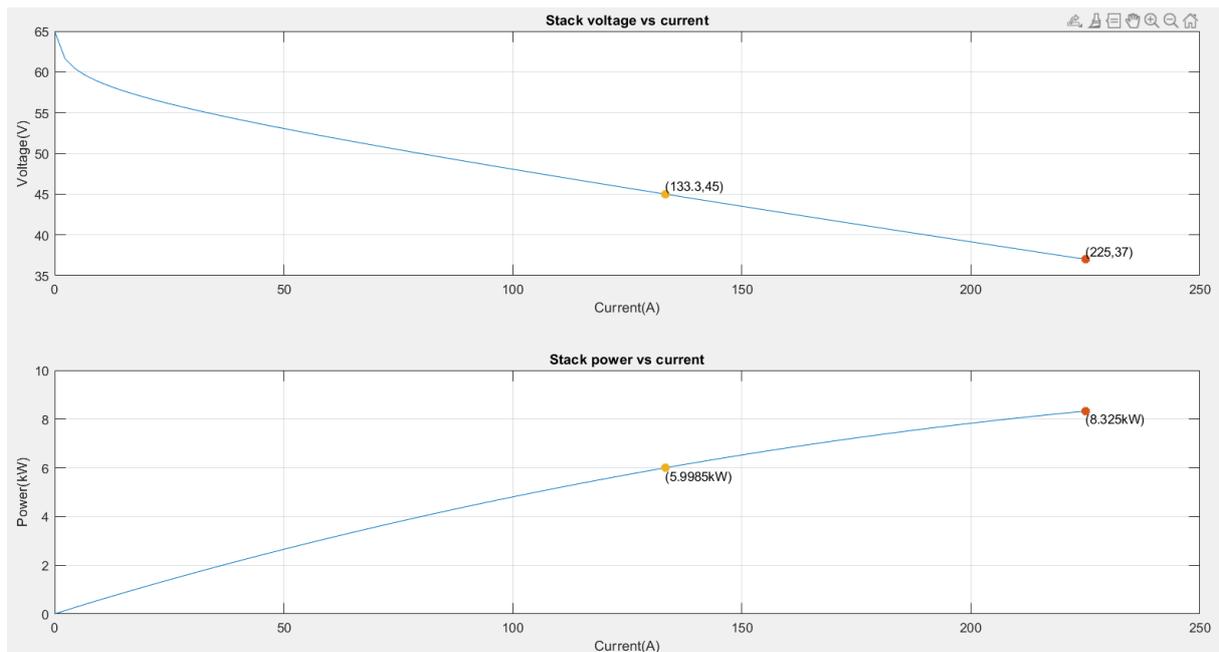


Figura 88. Curvas características de la pila satisfacción de demanda térmica.

Como ya se vio anteriormente, el punto de funcionamiento está claramente condicionado por la tensión y la corriente del stack. Al tratarse de variables de corriente continua, se puede aplicar la ley de Ohm:

$$R(\Omega) = \frac{V(V)}{I(A)}$$

La representación de la relación entre la tensión y la intensidad sobre la curva de polarización es una recta, cuyo origen es el origen de coordenadas, y su pendiente el valor de dicha resistencia, [Figura 89].

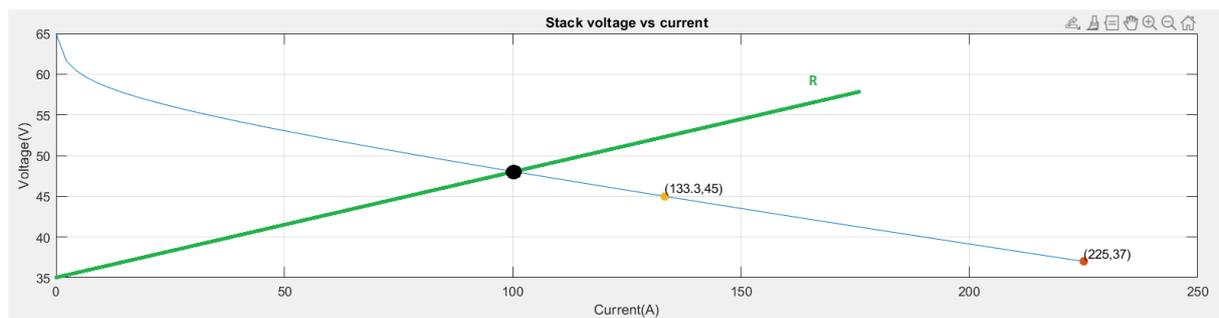


Figura 89. Resistencia eléctrica en la curva de polarización.

El punto de corte entre dicha recta de carga y la curva de polarización es el punto de funcionamiento eléctrico de la pila, de tal manera que para conseguir controlar este sistema para que aporte la energía térmica para satisfacer la demanda hay que ejecutar el cálculo inverso. Para ello se ha planteado un primer lugar un caso basado en estrategias de control clásico.

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO₂, mediante una pila de combustible.

Debido a la dependencia directa del cálculo dinámico de la pila y la resistencia, resulta imposible tratar de controlar el sistema en demanda energética actuando sobre la carga conectada (caídas drásticas en la utilización). Por ello, como segunda estrategia de control se ha considerado resolver este problema basándose en **entrenar un modelo predictivo** que determine para una utilización de hidrógeno elevada, la alimentación de hidrógeno necesaria para satisfacer la demanda térmica independientemente de la carga eléctrica.

6.4.1. Control clásico.

Se plantea un método de control clásico para ajustar la resistencia eléctrica, de tal forma, que se emplea un controlador PID simple que permita obtener la resistencia necesaria para satisfacer la demanda térmica. El esquema planteado es el que puede verse en la imagen [Figura 90].

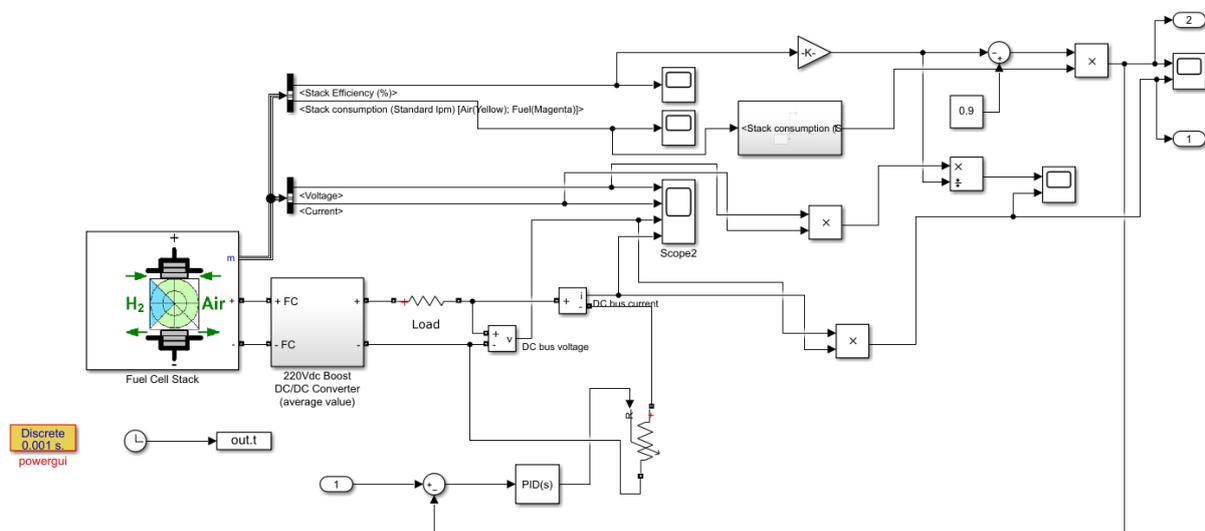


Figura 90. Esquema de control de la pila de combustible para satisfacer la demanda térmica.

El controlador utilizado únicamente consta de un integrador con una ganancia negativa. Se trata de un controlador muy sencillo, ya que la sintonización del controlador según los métodos descritos en (MATLAB, 2020) no ha sido posible.

Las instrucciones utilizadas para la simulación son similares a las del caso anterior, tal y como se muestra a continuación [Figura 91].

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO₂, mediante una pila de combustible.

```

nh=0.1/3.6; % Número de horas durante las que se mantiene cada potencia
Term=[0.9 1.2 1.5 2.4]; % Potencias térmicas obtenidas del modelo en Excel en kW
Term=Term.*1000; % Conversión de las potencias de kW a W

T(1:nh*3600)=ones(1, nh*3600)*Term(1);

for i = 1:length(Term)-1
    T(i*nh*3600+1:(i+1)*nh*3600)=ones(1, nh*3600)*Term(i+1);
end

Final=length(T);
t=[0:Final-1];

Input=[t', T'];

RT = sim('FuelCell_2',t, [], Input);

Pel=RT.yout{1}.Values.data;
Pter=RT.yout{2}.Values.data;

subplot(2,1,1), plot(t, Pel), title('Potencia eléctrica'), grid
subplot(2,1,2), plot(t, T, 'go', t, Pter), title('Potencia térmica'), grid

```

Figura 91. Instrucciones control térmico.

De tal manera que al ejecutar dicho código se obtienen los resultados siguientes [Figura 92].

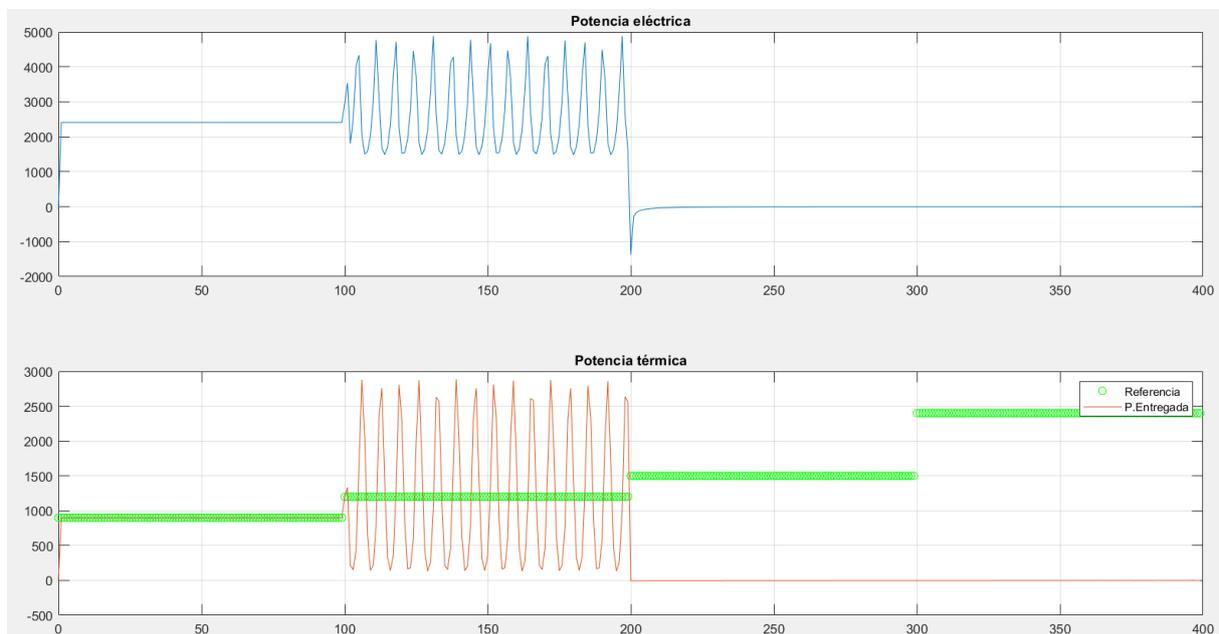


Figura 92. Resultados control térmico simple.

Se puede comprobar que efectivamente la pila es capaz de satisfacer la energía térmica demandada, pero el controlador implementado no es adecuado para este fin. Por ello,

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO₂, mediante una pila de combustible.

convendría linealizar la planta con el fin de poder diseñar un sistema de control más adecuado.

Se va a realizar un ensayo para caracterizar el problema con el fin de poder diseñar una red neuronal que emula el comportamiento del sistema y sobre la cual se pueda trabajar para conseguir un controlador adecuado.

6.4.2. Obtención del modelo predictivo para el control.

Para poder construir el modelo predictivo hace falta someter al modelo dinámico a un ensayo, con el fin de obtener los datos que posteriormente van a ser utilizados para entrenar la red neuronal que ejerza como modelo predictivo, el esquema del ensayo se muestra a continuación [Figura 93].

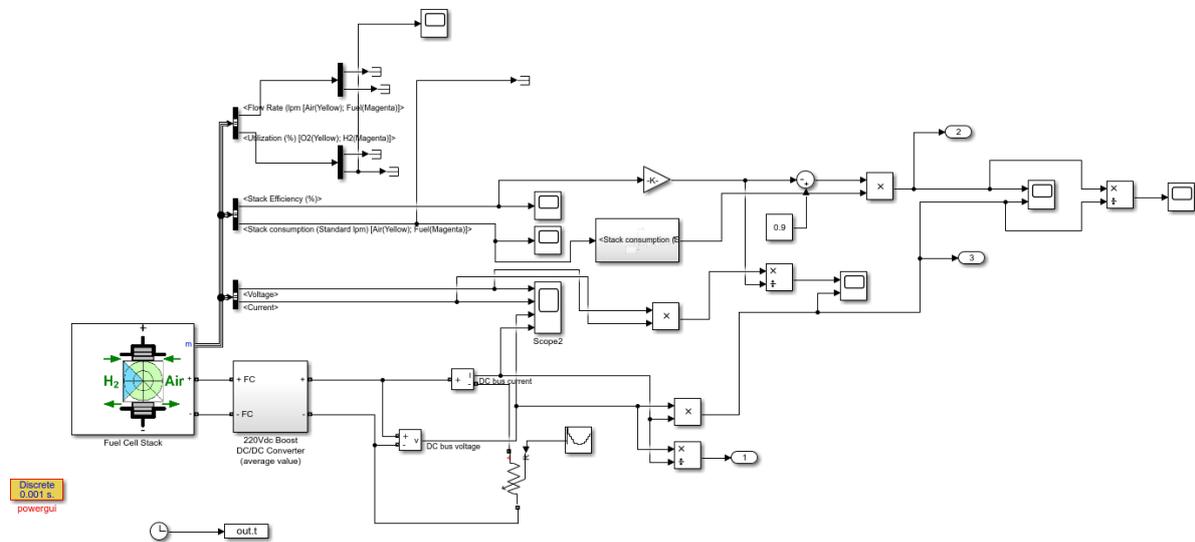


Figura 93. Esquema de ensayo Simulink.

Se somete al sistema a diversas entradas para distintos valores de la resistencia y se registran las salidas de potencia eléctrica y térmica. Esto se realiza mediante la siguiente secuencia de instrucciones [Figura 94].

```
t=[0:0.1:2000];
Ens = sim('Ensayo_FuelCell', t, [], []);

Entrada=[Ens.yout{1}.Values.data];
Salida=[Ens.yout{2}.Values.data, Ens.yout{3}.Values.data];
```

Figura 94. Instrucciones ensayo de la pila de combustible.

De esta forma se obtienen las secuencias de datos necesarias para entrenar la red neuronal.

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO2, mediante una pila de combustible.

6.4.3. Modelo de red neuronal.

Se utilizan los datos obtenidos del ensayo y la herramienta nstart de Matlab (Hudson Beale, Hagan, & Demuth, 2020) para entrenar la red neuronal que emule el comportamiento de la instalación, consiguiendo el esquema siguiente [Figura 95].

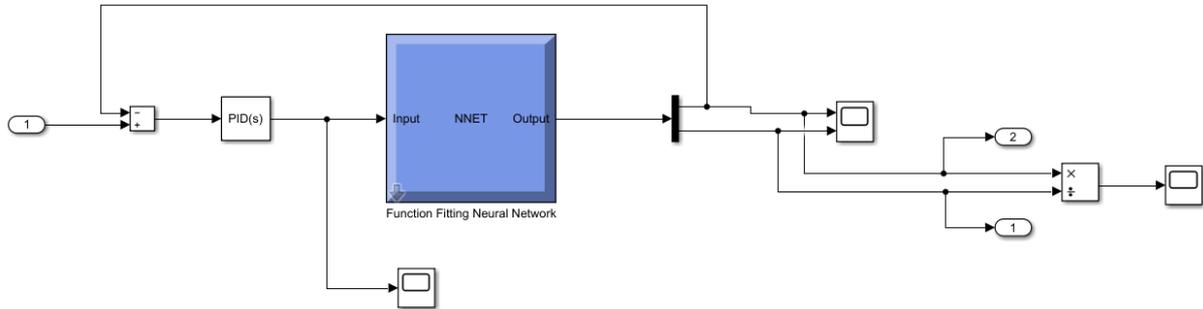


Figura 95. Esquema en Simulink empleando la red neuronal.

Una vez que se ha conseguido el esquema de la imagen, es posible entrenar el controlador que regule el sistema adecuadamente, para lo cual se utiliza la herramienta PIDTunner de Matlab (MATLAB, 2020) para sintonizar el controlador.

El paso siguiente consiste en exportar el controlador al esquema original y comprobar su funcionamiento.

6.4.4. Control optimizado incluyendo el modelo predictivo.

Una vez se exporta el controlador resultante y se incluye en el sistema de control, se vuelve a simular el sistema de manera que se obtienen los siguientes resultados [Figura 96].

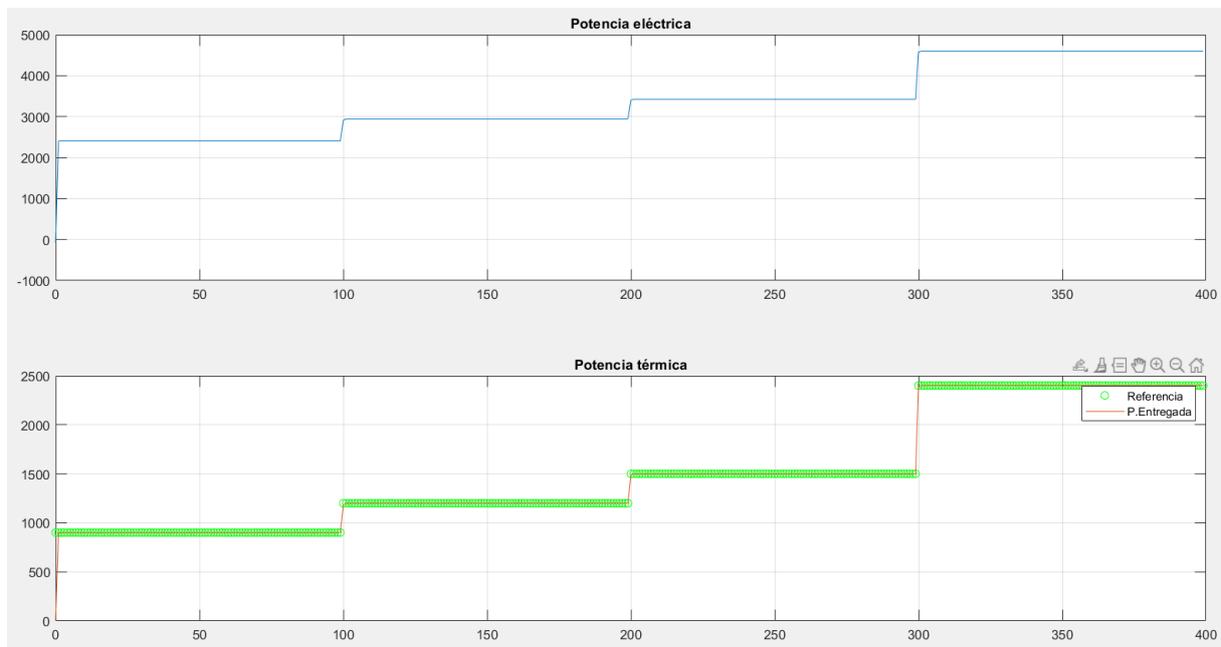


Figura 96. Resultado uso de la pila para satisfacer energía térmica.

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO₂, mediante una pila de combustible.

Aunque a simple vista la diferencia es pequeña, dado que el primer controlador era muy similar al utilizado finalmente, si se analiza detalladamente, se puede comprobar la mejoría del controlador, considerando mejor aquel controlador que consigue un seguimiento de la referencia, es decir de la potencia térmica demanda, más preciso.

6.4.5. Estudio paramétrico del sistema de control planteado.

Con el fin de demostrar que el sistema diseñado es capaz de adecuarse a una demanda térmica variable, se ha desarrollado un experimento que sea capaz de emular esta situación. Es decir, que se demande una cantidad variable de energía térmica y comprobar que la pila de combustible es capaz de responder a dicha demanda. Sometiendo al sistema diseñado a dicho experimento se obtiene el siguiente resultado [Figura 97].

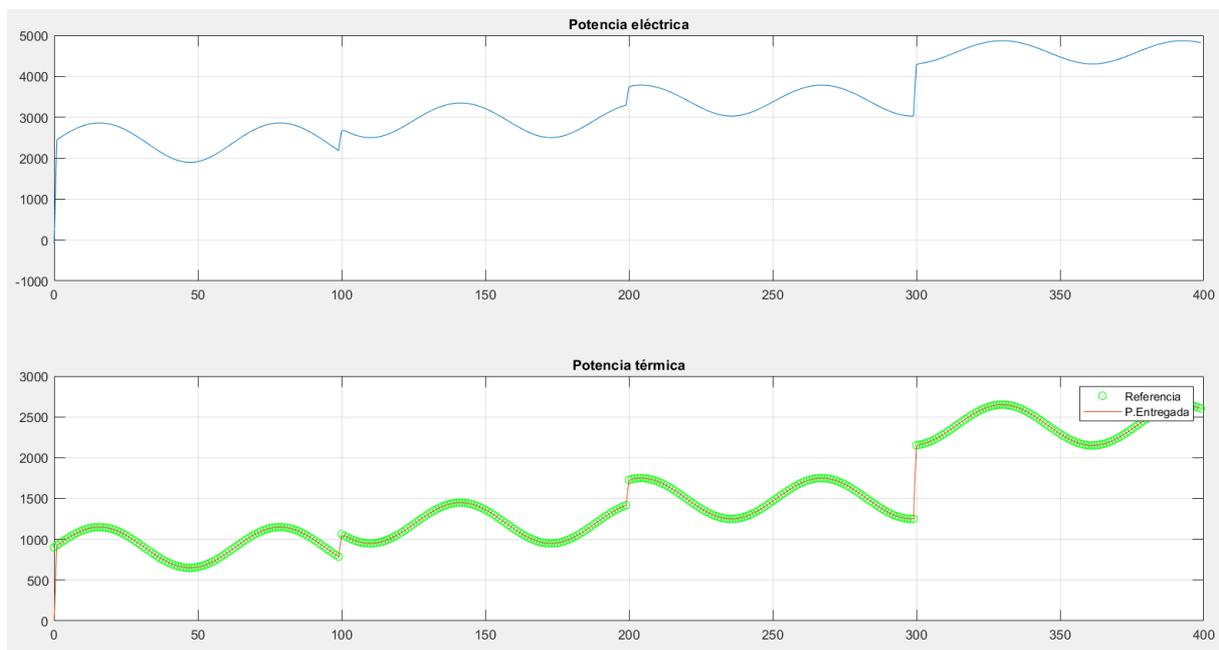


Figura 97, Respuesta del sistema a una demanda térmica variable.

En la gráfica [Figura 97], se puede observar que el seguimiento de la consigna es correcto, demostrándose que el sistema implementado simula el comportamiento de este tipo de instalaciones bajo situaciones reales.

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO₂, mediante una pila de combustible.

CAPÍTULO: 7. CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS.

7.1. Conclusiones

Para predecir y analizar los resultados del uso de las pilas tipo PEMFC como sistemas de generación de energías eléctrica y térmica para el ámbito doméstico, se pueden plantear diversas posibilidades, tanto a nivel de concepción del sistema como de uso del mismo: Dichas posibilidades son las que se han analizado en el trabajo con el fin de encontrar la configuración y las condiciones de funcionamiento que mejor satisfagan las necesidades energéticas.

Este trabajo se plantea con el fin de comprobar cuál es el estado y las posibilidades de las diferentes soluciones disponibles actualmente, así como plantear distintos escenarios futuros. El análisis se realiza desde la perspectiva del ahorro energético, atendiendo también a factores como las emisiones de CO₂ y la rentabilidad económica.

Se han desarrollado y utilizado **dos tipos de modelado** de las pilas de combustible PEMFC:

- Modelado algebraico en Excel
- Simulación basada en un modelo dinámico en Matlab.

Cada uno de estos tipos de modelos proporciona resultados que permiten analizar distintos aspectos de funcionamiento de las pilas PEMFC.

7.1.1. Conclusiones del modelo algebraico

Para el modelo algebraico desarrollado en Excel para la pila de combustible se han considerado **cinco configuraciones del conjunto pila de combustible-sistema de generación de hidrógeno** (además de la configuración convencional que se usa como referencia):

- **C1: Configuración 1**, generación de H₂ por reformado in situ de gas natural con aprovechamiento térmico.
- **C2: Configuración 2**, generación de H₂ por reformado centralizado de gas natural sin captura de CO₂, ni aprovechamiento térmico.
- **C3: Configuración 3**, generación de H₂ por reformado centralizado de gas natural con captura de CO₂, ni aprovechamiento térmico.
- **C4: Configuración 4**, generación de H₂ por electrolisis in situ con aprovechamiento térmico.
- **C5: Configuración 5**, generación de H₂ por electrolisis centralizada sin aprovechamiento térmico.

Para cada configuración, en función de los parámetros de operación de la PC, como son la potencia eléctrica y el número de horas anuales de funcionamiento, se han obtenido **diez tipos de resultados**: Ahorro de Energía Primaria, Ahorro de CO₂ con emisiones evitadas, Energía Térmica disipada al ambiente, Factor Global de Emisión de CO₂, Rendimiento Global, Energía Eléctrica devuelta a la red, Ahorro Económico Operativo, Ahorro Total, Rentabilidad (%), y Payback.

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO₂, mediante una pila de combustible.

Aunque en este trabajo se ha calificado de modelo algebraico, el desarrollo realizado parte de considerar unos valores determinados del **rendimiento eléctrico de la pila de combustible y de la fracción de energía térmica obtenida** en la misma, cuya suma es un valor constante, inferior a la unidad (típicamente 0,9) para tener en cuenta algunas pérdidas no aprovechables en el proceso de conversión de la pila.

La principal **ventaja de este modelo algebraico** es la posibilidad de considerar múltiples configuraciones de forma simultánea, así como realizar de forma rápida estudios paramétricos modificando valores de entrada como la potencia eléctrica nominal, las horas de funcionamiento o los valores de los rendimientos de los distintos sistemas.

Las principales **conclusiones generales del modelo algebraico en Excel** se indican a continuación:

- De forma cualitativa y muy resumida, se pueden establecer comparaciones entre **las cinco configuraciones** consideradas en función de los principales resultados a analizar:
 - En función del **ahorro de energía primaria**:

$$C1 > C2 > \approx C3 > \approx C4 > > C5$$
 - En función del **ahorro de emisiones de CO2**:

$$C4 \approx C3 \approx C5 > > C1 > C2$$
 - En función del **ahorro económico operativo**:

$$C1 > > C2 > \approx C3 > > C5 > C4$$
- Independientemente de la configuración del sistema planteado, en todos los casos el punto de funcionamiento ideal es en el que se cumplen las **condiciones de autoconsumo** (toda la energía demandada es proporcionada por la pila de combustible). Sin embargo, esta condición no se cumple en general ya que la relación calor electricidad (RCE) de la demanda residencial suele ser mayor de la unidad, mientras que la RCE de las pilas es del orden la unidad.
- **A nivel operativo**, los puntos más interesantes de trabajo son aquellos en los que una de las dos demandas (térmica y eléctrica) se satisface completamente y la otra parcialmente (ya que es muy difícil que ambas puedan satisfacerse completamente sin tener exceso o defecto de uno de los dos tipos de energía generada)
- Si se tuviera un exceso de alguna de las energías generadas sobre las demandadas, sería preferible que este **exceso fuera de energía eléctrica**, ya que es fácilmente exportable al disponer de una conexión a la red, y contribuye a reducir el consumo de energía primaria por la electricidad no generada en el sistema eléctrico convencional.
- La **mejor estrategia de funcionamiento** es aquella en la que se trabaja para **tratar de cubrir la energía térmica**, asumiendo la energía eléctrica generada, ya que el rendimiento de obtención de energía eléctrica por parte del sistema completo es similar al rendimiento del sistema eléctrico convencional, pero al tratarse de un sistema de cogeneración el aprovechamiento adicional de la energía térmica mejora el rendimiento global.

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO2, mediante una pila de combustible.

- Si **solamente se quisiera satisfacer energía eléctrica**, sin importar la térmica, los únicos sistemas factibles son los centralizados basados en reformado de gas natural, ya que son los únicos que proporcionan un ahorro de energía eléctrica ante estas situaciones.
- Se ha visto que **la disipación de energía térmica penaliza en gran medida las emisiones de CO₂**, por lo tanto, los sistemas centralizados que no tengan aprovechamiento térmico no posibilitan la reducción de emisiones de CO₂. En estos casos, la mejor opción para los sistemas centralizados de reformado de gas natural es incluir sistemas de captura de CO₂, que consiguen reducir en gran medida esas emisiones.
- Debido o bien al coste del hidrógeno o bien al elevado coste de los equipos, ninguno de los sistemas estudiados es rentable económicamente en comparación con las soluciones convencionales en las condiciones actuales. El único sistema que presenta ventajas en el **coste operativo** (es decir, que no pierde dinero por el mero hecho de estar funcionando) es la **Configuración 1**, es decir pila de combustible alimentada con hidrógeno generado mediante reformado in situ de gas natural, aunque el coste de la instalación es mayor que el de una configuración convencional.
- Se ha visto que hasta que el precio del hidrógeno no sea inferior a 15 c€/kWh (5 €/kg H₂) el **coste operativo** hace más caras este tipo de instalaciones. A medio plazo, se están planteando costes de hidrógeno renovable de origen fotovoltaico con precios en origen de 4,5 c€/kWh (1,5 €/kg), lo que cambiará radicalmente la situación. De hecho, se ha estimado que, en la configuración de hidrógeno generado por electrólisis, el sistema de generación conjunto basado en pila de combustible sería rentable en coste total a partir de un precio del hidrógeno de 7,5 c€/kWh (2,5 €/kg H₂).
- También se puede indicar que el **coste de los derechos de emisión de CO₂** que harían que la configuración 5 fuera rentable a nivel operativo sería de 140 €/tCO₂, mientras que el coste hoy es de 50 €/tCO₂. Además, si se considera una reducción del coste de la energía eléctrica el coste de los derechos de emisión sería mucho menor.

7.1.2. Conclusiones de la simulación basada en el modelo dinámico

La **simulación** basada en el **modelo dinámico** se plantea como una alternativa a los cálculos desarrollados en Excel con el fin de comprobar en qué medida se podría aplicar este sistema en los distintos casos de estudio, con la posibilidad de modificar la potencia eléctrica y térmica de la pila a lo largo de un día. De hecho, se han considerado cuatro escalones de potencias a lo largo del día por simplicidad, pero no hay ningún problema para considerar valores diferentes de las potencias cada hora o cada 15 minutos.

En el modelo de simulación, se considera únicamente la pila de combustible, sin incluir el reformador de gas natural o el electrolizador, ya que es más sencillo de implementar y permite considerar el funcionamiento de **tres de las cinco configuraciones** estudiadas mediante el modelo en Excel.

Las principales **conclusiones** obtenidas a partir de los resultados de la **simulación dinámica** se indican a continuación:

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO₂, mediante una pila de combustible.

- El modelo dinámico desarrollado en Matlab guarda una mayor relación con los **parámetros electroquímicos** que caracterizan la pila de combustible, lo que permite demostrar analíticamente cuándo una pila de combustible es capaz de satisfacer una demanda energética y cuándo no.
- A la vista de los resultados de las simulaciones se puede observar que la **potencia eléctrica nominal de la pila de combustible** es un parámetro crítico para ver si se puede satisfacer la demanda máxima, ya sea térmica o eléctrica, que caracteriza la instalación.
- Dentro de que se trabaja únicamente con un sistema formado por la pila de combustible, existen dos posibilidades claramente diferenciadas. La primera consiste en trabajar con la pila para **satisfacer la demanda eléctrica**, situación que tiene sentido siempre y cuando la demanda eléctrica sea inferior a la demanda térmica, atendiendo a las conclusiones adoptadas tras el análisis del modelo en Excel.
- La segunda situación de trabajo consistiría en que la pila funcionara para **satisfacer la demanda térmica** de la vivienda, con la posibilidad de que el exceso de energía eléctrica generada puede ser exportada a la red.
- El **control de la pila para satisfacer la demanda eléctrica** es bastante sencillo, ya que simplemente implica **buscar el punto adecuado de funcionamiento en la curva de polarización**, y si se dispone de un convertidor de tensión únicamente es necesario conocer en qué potencias máximas y mínimas es posible trabajar. Se plantea pues un método de control sencillo basado en el cálculo sobre un convertidor de tensión.
- El **control para satisfacer la demanda térmica**, sin embargo, plantea algunas dificultades, entre ellas, que no se dispone de una curva de potencia térmica que permita establecer un ajuste sencillo sobre el punto de funcionamiento de la pila, además de que el sistema es no lineal, lo que dificulta en gran medida las acciones de control. Dadas estas dificultades, se ha planteado la utilización de una **red neuronal** que modele la relación entre potencia eléctrica y potencia térmica de la pila, con el fin de modelar un controlador adecuado para el sistema no lineal. Aunque el proceso resulte complejo, la aplicación de técnicas de soft computing en este campo resulta de gran interés por los buenos resultados que se han obtenido.

7.2. Sugerencias para desarrollos futuros.

Finalizado el desarrollo de este trabajo fin de máster se proponen las siguientes líneas de trabajo y posibilidades.

- Con respecto al modelo algebraico de predicción en Excel, se podría desarrollar el mismo sistema considerando **otros elementos de generación de calor**, como es el uso de un sistema de bomba de calor con el que aumentar la RCE del sistema de generación.
- En el desarrollo del **modelo dinámico en Matlab** se podría proponer un modelo predictivo que considere la dinámica de los procesos electroquímicos dentro de cada celda de la pila, a fin de predecir con mayor precisión el comportamiento de la pila.

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO₂, mediante una pila de combustible.

BIBLIOGRAFÍA.

- Asociación española del hidrógeno.* (2020). Obtenido de <https://www.aeh2.org/>
- Barbir, F. (2005). Fuel Cell Electrochemistry. En F. Barbir, *PEM Fuel Cells: Theory and Practice*.
- Baruque de la Fuente, D. (2018). *Evaluación de alternativas de almacenamiento de hidrógeno a bordo en un vehículo de pila de combustible (FCEV)*. Valladolid: [Confidencial].
- Fang, Z., L Smith Jr, R., & Qi, X. (2015). *Production of Hydrogen from Renewable Resources*. Springer.
- Guzzella, L., & Sciarretta, A. (2013). Cap 6: Fuel-Cell Propulsion Systems. En L. Guzzella, & A. Sciarretta, *Vehicle Propulsion Systems Introduction to Modeling and Optimization* (págs. 201-242). Springer Heidelberg New York Dordrecht London.
- Hudson Beale, M., Hagan, M. T., & Demuth, H. B. (2020). *Deep Learning Toolbox User's Guide*. MathWorks, Inc.
- Manuel Alonso Martín-Sonseca. (Febrero de 2021). Código de la Energía Eléctrica. España, España: MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO.
- MATLAB. (2020). *Control System Toolbox User's Guide*. The MathWorks, Inc.
- MATLAB. (2020). *MATLAB® Primer*. The MathWorks, Inc.
- MATWORKS. (2020). *Fuel Cell Stack*. Obtenido de <https://es.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/fuelcellstack.html>
- Ortiz-Rivera, E., Reyes-Hernandez, A., & Febo, R. (2007). Understanding the History of Fuel Cells. *IEEE*, 117-122.
- PowerCell.* (2019). Obtenido de <https://www.powercell.se/en/start/>
- PowerCellution. (11 de Febrero de 2021). *PowerCellution.com*. Obtenido de <https://powercellution.com/power-generation-system-5>
- Proton Motor.* (2019). Obtenido de <https://www.proton-motor.de/zero-emission-loesungen/datenblaetter/>
- Ruf, Y., Lange, S., Pfister, J., & Droege, C. (2018). *Fuel Cells Distributed Generation Commercialisation Study*. Munich: Roland Berger GmbH. Obtenido de Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking: www.fch-ju.eu
- Santiago, Ó. (22 de Octubre de 2017). *Apilados*. Obtenido de <http://apilados.com/blog/almacenamiento-hidrogeno-comprimido-tipos-tanques/>

Simulación de la producción de energías eléctrica y térmica, y de emisiones de CO₂, mediante una pila de combustible.

Tinaut Fluixá, F. (Mayo de 2020). *CÁLCULOS PILAS COMBUSTIBLE*. Obtenido de Apuntes de la asignatura Sistemas de Propulsión Alternativos: <https://campusvirtual.uva.es/>

Tinaut Fluixá, F. V. (mayo de 2016). *Hidrógeno y Pilas de Combustible*. Obtenido de Tema 9 de la asignatura Tecnología Energética del Máster en Ingeniería Industrial por la Universidad de Valladolid: <https://campusvirtual.uva.es/>

Toyota España, S.L.U. (7 de Marzo de 2021). *Toyota Mirai*. Obtenido de <https://www.toyota.es/world-of-toyota/articles-news-events/Toyota-Mirai-pila-combustible-hidrogeno>