



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Aplicación de una pila SOFC a un sistema
combinado de producción de electricidad y
calor alimentado con bioetanol

Application of a solid oxide fuel cell to a
combiner system of production of electricity
and heat fed with bioethanol

Pablo Sánchez Romero

Director/es

Enrique Romero Pascual
Jaime Soler Herrero

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
2019

Aplicación de una pila SOFC a un sistema combinado de producción de electricidad y calor alimentado con bioetanol

RESUMEN

En el presente trabajo se ha realizado un estudio acerca de un tipo de sistema micro-CHP (micro Combined Heat and Power) para producir electricidad y calor, basado en una pila de combustible de hidrógeno y utilizando bioetanol como combustible medioambientalmente sostenible.

La pila de combustible analizada, con el objetivo de conseguir 5kW de potencia eléctrica, es una pila tipo SOFC "Solid Oxide Fuel Cell" con las mejores características entre las disponibles en la actualidad. Las altas temperaturas de trabajo y su construcción basada en materiales sólidos permiten altas eficiencias en el proceso, aparte de otras ventajas adicionales.

El diseño de la pila de combustible se ha llevado a cabo para las condiciones estándar de la operación con la intención de obtener la potencia requerida. Estas condiciones han sido establecidas dentro de los parámetros habituales de operación para este tipo de tecnología. La pila de combustible incorpora 85 celdas de 120×120 mm y trabaja a una temperatura de 800°C. Dicha pila se integra en un sistema formado por 4 partes principales: reformado, combustión, intercambiadores de calor y la pila de combustible.

La generación del hidrógeno se lleva a cabo mediante el reformado de bioetanol con vapor de agua. El aporte de energía necesario para el funcionamiento de la instalación de forma térmicamente independiente es obtenido gracias al combustor incluido en el proceso. Para aprovechar el calor residual se obtiene un acondicionamiento de agua caliente sanitaria (ACS) mediante el intercambio de energía en la red de intercambiadores de calor. Por su parte, la energía (potencia) eléctrica es obtenida en la pila.

Sobre la instalación diseñada se estudia la variación de diferentes condiciones de operación. Estas condiciones son la relación de agua:bioetanol a la entrada del reformador y la temperatura de operación de la pila de combustible, ya que el resto de variables están ya estipuladas.

Las condiciones óptimas han sido determinadas mediante un análisis de las eficacias del proceso, tanto eléctricas como térmicas. Una relación estequiométrica entre agua y bioetanol a la entrada del reactor es la mejor opción a una temperatura de reformado de 700°C con la pila operando a las condiciones estándar (800 °C). El rendimiento eléctrico del sistema completo obtenido es 45 %, mientras que el rendimiento global (electricidad + ACS) es 97,5 %.

Una vez conocido el valor óptimo de la relación se estudia la variación de temperatura de trabajo de la pila, tanto de manera individual como ya integrada en la instalación. El valor de temperatura dependerá del lugar en el cual se instale este proceso, ya que esta variación de temperatura provoca diferentes eficiencias eléctricas y térmicas.

ÍNDICE TRABAJO FIN DE GRADO.

MEMORIA 1

1.	INTRODUCCIÓN.....	3
1.1.	OBJETIVO DEL PROYECTO	3
1.2.	JUSTIFICACIÓN	3
2.	MARCO TEÓRICO	4
2.1.	SISTEMAS MICRO-CHP	4
2.1.1.	BENEFICIOS DE LOS SISTEMAS MICRO CHP	4
2.1.2.	UTILIDADES DE LOS MICRO-CHP	5
2.1.3.	PILAS DE COMBUSTIBLE EN MICRO-CHP	5
2.2.	BIOETANOL.....	6
2.3.	HIDRÓGENO.....	7
2.4.	PILAS SOFC (SOLID OXIDE FUELL CELL)	8
2.4.1.	CONFIGURACIÓN Y COMPONENTES.....	8
2.4.2.	FUNCIONAMIENTO BÁSICO SOFC	9
3.	MODELADO DE LOS EQUIPOS.....	11
3.1.	GENERAL.....	11
3.2.	MODELADO DEL COMBUSTOR.....	12
3.3.	MODELADO DEL REFORMADOR	12
3.4.	MODELADO DE LA PILA DE COMBUSTIBLE	13
3.4.1.	VOLTAJE TEÓRICOY VOLTAJE REAL.	14
3.4.2.	PÉRDIDAS OHMICAS	15
3.4.3.	PÉRDIDAS POR CONCENTRACIÓN:	15
3.4.4.	PÉRDIDAS POR ACTIVACIÓN	17
3.5.	MODELADO DE LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR.....	18
4.	DISEÑO DE LA PILA DE COMBUSTIBLE	18
4.1.	PARÁMETROS DE ENTRADA Y CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO.....	18
4.2.	ANÁLISIS PARA LE DIMENSIONALIZACIÓN DE LA PILA DE COMBUSTIBLE.....	18
4.3.	CÁLCULO DE PARÁMETROS	19
5.	SIMULACIÓN Y ELECCIÓN DE PARÁMETROS	22
5.1.	EFICIENCIAS DE LA INSTALACIÓN.	22
5.1.1.	EFICIENCIA ELÉCTRICA DE LA PILA	22
5.1.2.	EFICIENCIA ELÉCTRICA DE LA INSTALACIÓN	23
5.1.3.	EFICIENCIA TÉRMICA DE LA INSTALACIÓN	23
5.1.4.	EFICIENCIA GLOBAL DE LA INSTALACIÓN	23
5.2.	CASO PRINCIPAL	24
5.3.	CONDICIONES DE OPERACIÓN	24
5.3.1.	VARIACIÓN DE LA RELACIÓN [H ₂ O /EtOH].....	24
5.3.2.	VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA DE LA PILA	26
5.3.2.1.	DISMINUCIÓN DE TEMPERATURA	26
5.3.2.2.	AUMENTO DE LA TEMPERATURA EN EL SISTEMA	27
6.	PARÁMETROS FINALES Y CONCLUSIÓN	30
7.	BIBLIOGRAFÍA	31
ANEXO I	34	
1.	DISEÑOS CELDAS SOFC.....	35
2.	MATERIALES	36
2.1.	ÁNODO	36

2.2.	CÁTODO:.....	36
2.3.	ELECTROLITO:	37
2.4.	INTERCONEXIÓN:.....	37
ANEXO II	38	
1.	COMBUSTOR	41
2.	INTERCAMBIADORES DE CALOR	42
3.	REFORMADO	44
4.	PILA DE COMBUSTIBLE.....	46
ANEXO III	50	
ANEXO IV	54	

MEMORIA

1. INTRODUCCIÓN

1.1. OBJETIVO DEL PROYECTO

El proyecto actual tiene como objetivo el estudio de un sistema de cogeneración de electricidad (5kW) y calor incluyendo una pila de combustible tipo SOFC (Solid Oxide Fuel Cell), así como su posterior simulación con la intención de conocer su comportamiento ante diferentes cambios en las variables de trabajo planteadas y la optimización del proceso.

1.2. JUSTIFICACIÓN

Generar energía con métodos menos nocivos para el medio ambiente, la escasez de recursos energéticos y el aumento de precio de los combustibles fósiles ha llevado a la comunidad investigadora y a la industria a aumentar su interés de desarrollar generadores de energía y calor más eficientes. Por tanto, la posibilidad de desarrollar unidades de CHP (Combined Heat and Power) podría convertirse en una de las soluciones posibles [1].

Existen diferentes políticas tanto en España como en Europa que promueven el uso de la cogeneración como fuente de energía; en mayo de 2007, se publica el RD 616/2007 y el 25 de octubre de 2012 se instaura en Europa la Directiva 2012/27/UE, ambas dos fomentando los sistemas CHP[2],[3].

Definimos sistemas CHP como un conjunto de tecnologías que pueden usar una variedad de combustibles para generar electricidad o energía en el punto de uso, permitiendo que el calor que normalmente se perdería en el proceso de generación de energía se recupere para proporcionar calentamiento y/o enfriamiento [4].

Se han propuesto diversas tecnologías para ser usadas como generadores del sistema CHP, incluidos motores Stirling, motores de combustión interna, células de combustible, etc.[1].

Como se ha mencionado, una opción de sistemas CHP son los basados en pilas de combustible, gracias a los cuales se consigue reducir tanto la emisión de gases de efecto invernadero como la contaminación del aire frente a otros tipos de sistemas CHP. Además, ofrecen mayor relación potencia/calor, mayor eficiencia, son más silenciosos y tienen un mantenimiento relativamente sencillo [5],[6].

El presente trabajo se centra en un tipo de pila de combustible denominada SOFC (Solid Oxide Fuel Cell). Este tipo de pilas de combustible presentan una serie de ventajas debido a sus materiales sólidos y a su alta temperatura de operación[7]:

- tienen una mayor tolerancia a la presencia de impurezas gracias a la operación a altas temperaturas, y con ello se consigue una mayor vida útil para la pila.
- dado que los componentes de este tipo de pila de combustible son sólidos, no se sufren el problema de pérdida de electrolitos y, además, se elimina la corrosión del electrodo porque otros tipos de pilas usan ácidos o bases.

- con las altas temperaturas de operación, se evita el uso de catalizadores muy caros como el platino o el rutenio.
- al operar a altas temperaturas, se puede aprovechar mejor el calor residual de alta calidad para aplicaciones de cogeneración
- muestran bajas pérdidas de voltaje por activación,
- la eficiencia para la producción de electricidad es mayor.
- los sistemas de cogeneración contaminan mucho menos que otros tipos de obtención de calor y electricidad. Especialmente las pilas SOFC liberan una contaminación (CO, partículas, NO_x y otros contaminantes) insignificante.

La alta temperatura de funcionamiento de este tipo de pilas permite un reformado interno del combustible (se podría alimentar directamente ciertas cantidades de metano u otros hidrocarburos en lugar del habitual hidrógeno) y muestra una alta flexibilidad a la hora de elegir el combustible. También se puede realizar un reformado externo e introducir la corriente rica en hidrógeno a la pila. Se utilizará este segundo método con el fin de que la instalación trabaje de forma autosuficiente.

La diferencia básica del bioetanol en comparación con otros combustibles es la viabilidad de su producción a partir de biomasa con procesos bioquímicos. Podríamos considerar al bioetanol como una fuente de energía verde atractiva económicamente que promete bajas emisiones de contaminantes y una combustión controlada. Por tanto, será este el combustible utilizado en el sistema CHP [8].

2. MARCO TEÓRICO

2.1. SISTEMAS MICRO-CHP

En todo el mundo, la energía se consume para producir calor y energía en sectores como la industria, la vivienda y la agricultura. Por un futuro más sostenible, debido al calentamiento global y al agotamiento de los fósiles se llevan a cabo recursos, trabajos de investigación y desarrollo para crear sistemas de producción de energía de mayor eficiencia y ambientalmente amigables [9].

Con respecto la Directiva mencionada anteriormente, (Directiva 2012/27/UE) los sistemas CHP se pueden clasificar en diferentes categorías según sus capacidades eléctricas máximas: "microcogeneración" si es inferior a 50 kWe, "pequeña escala" si oscila entre 50 kWe y 1 MWe.

En el presente trabajo se estudia un sistema CHP de microcogeneración (micro-CHP) ya que la energía obtenida es menor a 50 kWe, concretamente 5 kWe.

2.1.1. BENEFICIOS DE LOS SISTEMAS MICRO CHP

Los sistemas de microcogeneración tienen el potencial de reducir demandas energéticas del sector residencial y otros sectores para calefacción de espacios, obtención de agua caliente

sanitaria y electricidad. La reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y la menor dependencia de los sistemas centrales de generación, transmisión y distribución eléctrica son los posibles beneficios [10].

2.1.2. UTILIDADES DE LOS MICRO-CHP

Los sistemas CHP a pequeña escala y microescala son particularmente adecuados para aplicaciones en edificios comerciales, hospitales, escuelas, locales industriales, edificios de oficinas y edificios domésticos de viviendas unifamiliares o multifamiliares [11].

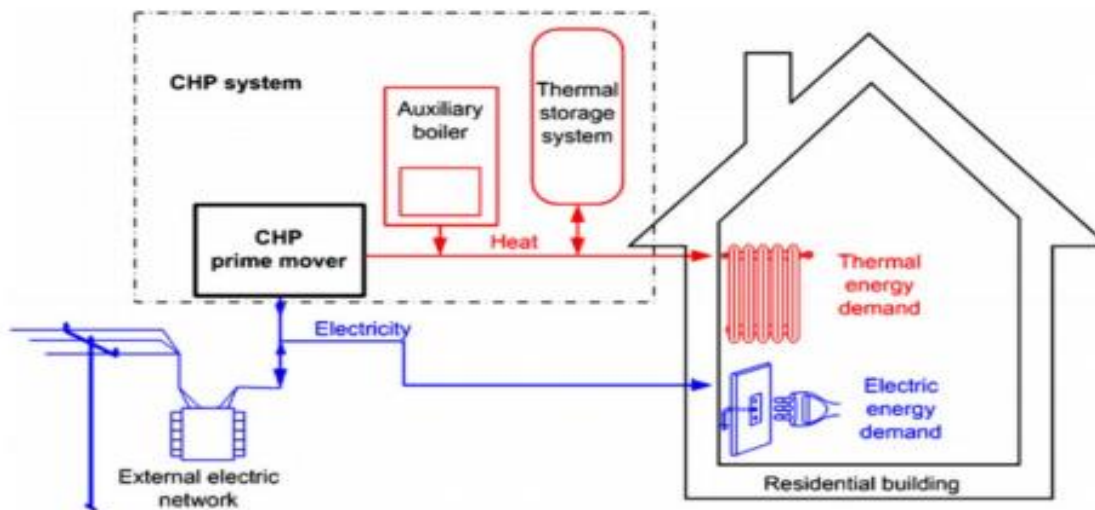


Figura 1. Integración típica de un sistema micro-CHP en un edificio residencial (en inglés) para un sistema no aislado, con posibilidad de inyectar a la red [12].

Como se puede observar en la Figura 1 el sistema micro-CHP abastece de energía eléctrica y térmica a un edificio residencial, además, en el caso de que se genere más energía eléctrica a la requerida cabría la posibilidad de ceder ésta a una red eléctrica externa.

2.1.3. PILAS DE COMBUSTIBLE EN MICRO-CHP

Hay varias tecnologías disponibles; las más maduras son las tecnologías basadas en la combustión, como las microturbinas, los motores de combustión interna y los motores Stirling. El inconveniente para tamaños pequeños, es que tienen una relación potencia/calor relativamente baja. Esto los hace adecuados para edificios con una demanda de calor relativamente alta. Para la construcción pueden ser una solución alternativa a los sistemas de calefacción impulsados por calderas. Sin embargo, debido a una tasa de aislamiento mejorada y un número creciente de aparatos eléctricos en viviendas, el perfil de energía en los edificios está cambiando. Para satisfacer estas demandas futuras, se prefiere el uso de las tecnologías que proporcionen mayores relaciones de potencia/calor incluso a pequeña escala [13].

Con esta perspectiva, los micro-CHP basados en celdas de combustible son una alternativa prometedora en edificios con una demanda de calor relativamente baja. Las pilas de combustible tienen altas eficiencias eléctricas, en comparación con otras tecnologías [14].

La tecnología de pilas de combustible de óxido de sólido (SOFC) es la tecnología más madura en la actualidad, y que puede utilizar gas natural o biogás como combustible [15]. Dentro de

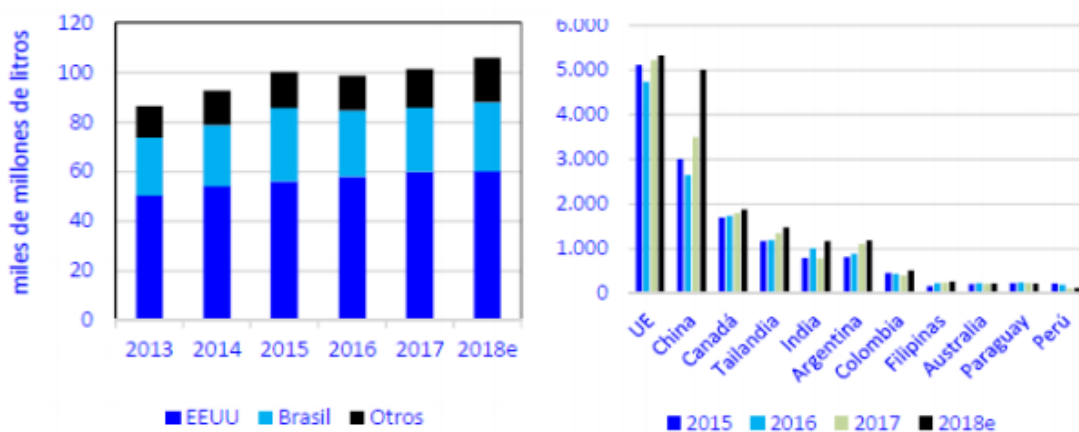
los edificios, este tipo de celda de combustible muestra que ya es competitivo con otros sistemas de combustible y calefacción eléctrica. La viabilidad podría incrementarse mejorando la utilización del calor residual [16].

2.2.BIOETANOL

El bioetanol es un alcohol producido a partir de productos agrícolas como el maíz, sorgo, trigo, caña de azúcar, e incluso biomasa. Utilizado como combustible, es una fuente de energía ecológica alternativa al petróleo o gas natural que va ganando cuota de mercado cada año en todo el mundo.

Las ventajas medioambientales y económicas de este combustible renovable son claras; reduce la dependencia de los combustibles fósiles; mejora la combustión de los motores, pudiéndose utilizar teóricamente en todos los vehículos; es fácil de producir y almacenar y disminuye la contaminación ambiental al tener un valor neto (en el ciclo completo de uso) de emisiones prácticamente cero [17].

Comparando la Gráfica 1, se puede observar cómo EEUU y Brasil dominan la producción y consumo mundial de bioetanol. EEUU obtiene la producción de bioetanol del maíz y Brasil de la caña de azúcar. La UE lejos de estos gigantes productores ocupa el tercer puesto, seguido de China y Canadá principalmente[18].



Gráfica 1. Producción de bioetanol en EEUU, Brasil y el resto del mundo.

El bioetanol tiene numerosas ventajas, tanto energéticas, ambientales, como socioeconómicas respecto al resto de combustibles [19]:

- fuente de energía alternativa, aunque limitada por la producción agraria.
- contribuye a reducir el uso de combustibles fósiles.
- reducción de emisiones contaminantes, especialmente de CO₂, uno de los principales gases de efecto invernadero.
- ahorro económico derivado de la reducción de importaciones de petróleo.
- oportunidad para el desarrollo agrícola, contribuyendo a mantener la población rural.

2.3. HIDRÓGENO

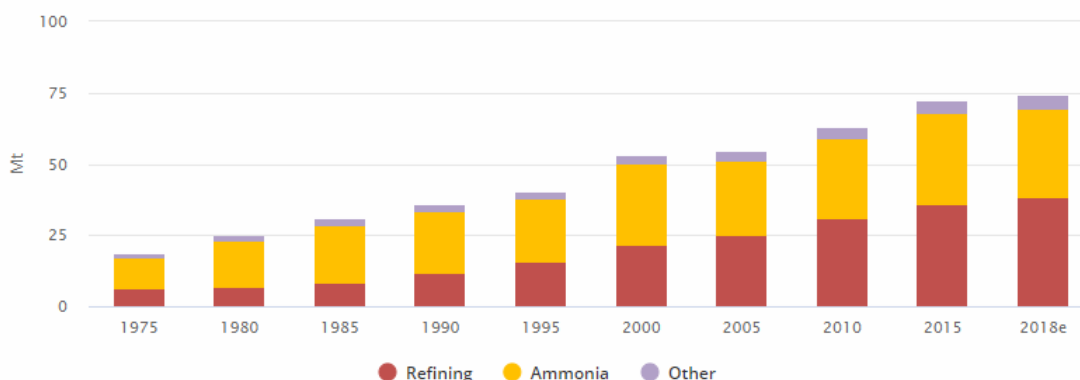
El hidrógeno no es una fuente de energía sino un vector de energía, lo que significa que su papel potencial tiene similitudes con el de la electricidad. Tanto el hidrógeno como la electricidad pueden ser producidos por diversas fuentes y tecnologías. Ambos son versátiles y se pueden usar en muchas aplicaciones diferentes.

El uso de hidrógeno no produce gases de efecto invernadero, partículas, óxidos de azufre ni ozono a nivel del suelo. Si el hidrógeno se usa en una pila de combustible, no emite nada más que agua.

El hidrógeno al ser un vector de energía química puede almacenarse y transportarse de manera estable (mejor en forma de compuestos que lo liberen para su uso), como se hace hoy con petróleo, carbón, biomasa y con el gas natural. El hidrógeno también se puede combinar con otros elementos como el carbono y el nitrógeno para producir combustibles a base de hidrógeno que sean más fáciles de manejar y se pueden usar como materia prima en la industria reduciendo las emisiones.

La producción de hidrógeno para usos industriales es un negocio importante a nivel mundial. La demanda de hidrógeno, que se ha triplicado desde 1975, continúa aumentando. Hoy en día, el hidrógeno se usa principalmente en el proceso de refinado de petróleo y para la producción de fertilizantes [20]

La Gráfica 2 muestra cómo ha ido aumentando la demanda de hidrógeno puro a lo largo de los últimos años.



Gráfica 2. Demanda global de hidrógeno puro.

A continuación, se presentan algunas ventajas importantes del hidrógeno [21]:

- El hidrógeno es un portador de energía limpia, no tóxico y contiene una alta energía específica (por ejemplo, el contenido de energía de 9,5 kg de hidrógeno es equivalente al de 25 kg de gasolina)
- Existen muchos procesos de producción de hidrógeno, incluidos los procesos donde parte del hidrógeno es aportado por combustibles fósiles (por ejemplo, reformado con vapor de gas natural u otros hidrocarburos ligeros, gasificación de carbón y otros hidrocarburos pesados), electrólisis de agua, termoquímica directa e indirecta, descomposición, y procesos impulsados directamente por la luz solar.

- El hidrógeno se puede utilizar en aspectos muy variados de la economía (por ejemplo, como combustible para automóviles y para generar electricidad a través de pilas de combustible).

Respecto a los mayores inconvenientes del hidrógeno:

- Cuando se mezcla con aire, el hidrógeno puede arder aún en concentraciones muy bajas y esto puede causar problemas de seguridad.
- El almacenamiento de hidrógeno en forma líquida es difícil, ya que se requieren unas temperaturas muy bajas para licuarlo y ello supone un gasto energético elevado.

2.4. PILAS SOFC (SOLID OXIDE FUELL CELL)

La pila de combustible es un dispositivo electroquímico, similar a una batería, en el que ocurre una reacción química proporcionando así energía eléctrica. A diferencia de una batería, los productos químicos necesarios para generar la energía se proporcionan externamente. Para la mayoría de las pilas de combustible, los reactivos son el hidrógeno y el oxígeno (este último proveniente del aire) [22].

Se han desarrollado numerosos tipos; pila de combustible de membrana de intercambio (PEMFC), pila de combustible de metanol directo (DMFC), pila de combustible alcalino (AFC), pila de combustible de ácido fosfórico (PAFC), pila de carbonato fundido (MCFC), pila de combustible microbiana y pila de combustible de óxido sólido (SOFC) [23].

La tecnología de pilas de combustible de óxido sólido (SOFC) se ha desarrollado para una amplia gama de aplicaciones de generación de energía. El atractivo de esta tecnología es su producción eficiente y limpia de electricidad a partir de una variedad de combustibles. Las características principales del SOFC son la construcción en estado sólido y el funcionamiento a alta temperatura normalmente entre 600°C y 1000 °C. La combinación de estas características conduce a una serie de propiedades y ventajas únicas para este tipo de pila de combustible [24],[25].

2.4.1. CONFIGURACIÓN Y COMPONENTES

Un sistema SOFC es un stack que consiste en un apilamiento de celdas unitarias ensambladas. Este tipo de sistemas tienen dos diseños característicos: tubular y plano como muestra la Figura 2 [26].

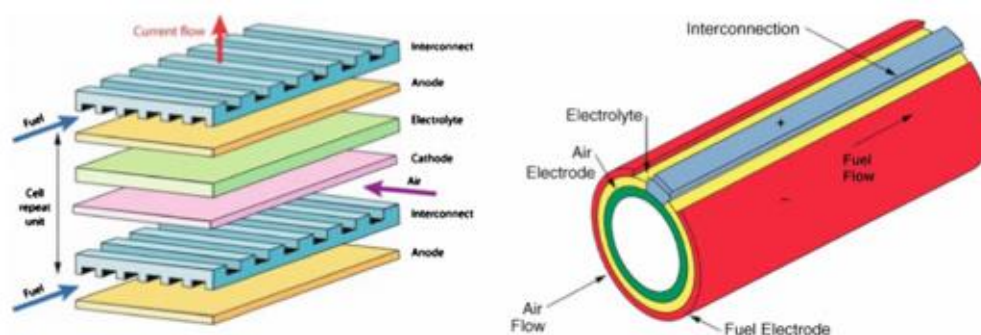


Figura 2. Diseños típicos de SOFC.

Los diseños planos están en una etapa de desarrollo más temprana que los diseños tubulares. Son más simples de fabricar y consisten en placas planas unidas entre sí para formar los conjuntos de electrodos y electrolito, en estos diseños, el aire y el combustible fluyen a través de canales integrados en el cátodo y el ánodo respectivamente. El diseño plano ofrece una resistencia óhmica más baja y densidades de potencia más altas en comparación con el diseño tubular, pero generalmente requiere sellos de alta temperatura y no son tan robustos (especialmente en condiciones presurizadas).

El diseño tubular de SOFC construye la pila como una bancada de tubos, estando formado cada tubo por un cátodo, un electrolito sólido y un ánodo. Se introduce aire en el interior de cada tubo y el combustible fluye alrededor de los tubos para producir electricidad. La principal ventaja del diseño tubular es que no requiere sellos de alta temperatura.

En la Tabla 1 se puede observar un resumen comparativo de las propiedades dependiendo el tipo de configuración de la SOFC.

Tabla 1. Comparación de propiedades entre SOFC tubular y SOFC de diseño plano.

Propiedades	Plana	Tubular
Facilidad de fabricación	Fácil	Difícil
Coste de fabricación	Alto	Bajo
Facilidad de sellado	Difícil	Fácil
Estabilidad a largo plazo	Regular	Excelente

Para cada configuración de pila hay varios tipos de diseños que atesoran diferentes propiedades, con motivo de no desenfocar la memoria se incluyen en el ANEXO I.

Aunque el concepto de las SOFC es bastante simple, la selección de materiales para los componentes individuales presenta enormes desafíos. Cada material debe tener las propiedades eléctricas y catalíticas necesarias para realizar su función en la celda y debe haber suficiente estabilidad química y estructural para soportar la fabricación y el funcionamiento a altas temperaturas. Los principales materiales utilizados en las diferentes partes de la pila se muestran en el ANEXO I.

2.4.2. FUNCIONAMIENTO BÁSICO SOFC

A continuación, se va a realizar una explicación general sobre el funcionamiento de la pila, ayudado por la Figura 3;

- El hidrógeno fluye hacia la celda de combustible a través del ánodo.
- Reacción química en el ánodo que separa los átomos de hidrógeno en protones y electrones
- Los electrones fluyen al circuito eléctrico hacia el cátodo generando electricidad.
- El oxígeno se reduce en el cátodo gracias a los electrones
- Los iones de oxígeno O^{2-} fluyen hacia el ánodo por la membrana de óxidos sólidos, a través de las vacantes de oxígeno en su red.

- Reacción química en el ánodo entre los protones y los iones oxígeno O^{2-} provenientes del cátodo para producir agua y calor.

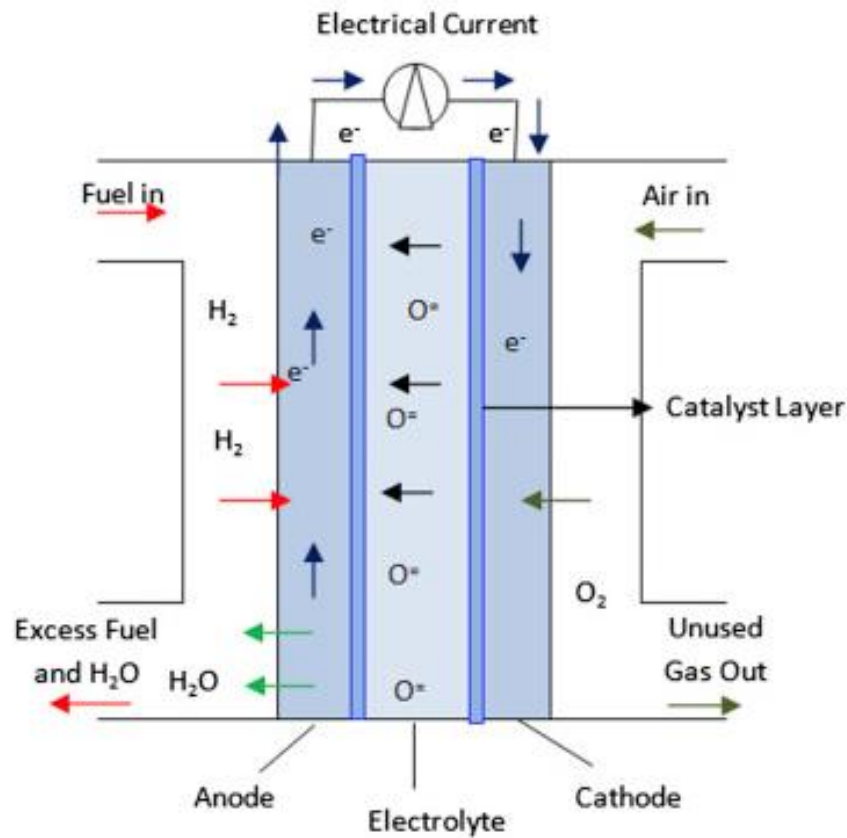
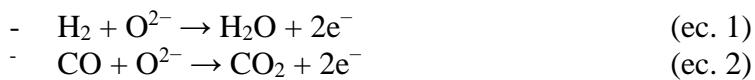


Figura 3. Representación esquemática de la pila de combustible de óxido sólido.

En el ánodo ocurre la semirreacción de oxidación, y en el cátodo la semirreacción de reducción, que en este caso de las pilas de combustible SOFC son las siguientes[27]:

Reacciones en el ánodo:



Reacción en el cátodo:



Reacción general:



Como se observa, la pila SOFC es capaz de alimentarse directamente con otros combustibles diferentes del hidrógeno y, concretamente, el monóxido de carbono (CO) no supone un veneno como en el caso de las pilas de intercambio protónico (PEM) sino un alimento.

3. MODELADO DE LOS EQUIPOS

El Diagrama 1 muestra a grandes rasgos las líneas de flujo, así como los equipos implicados en el proceso.

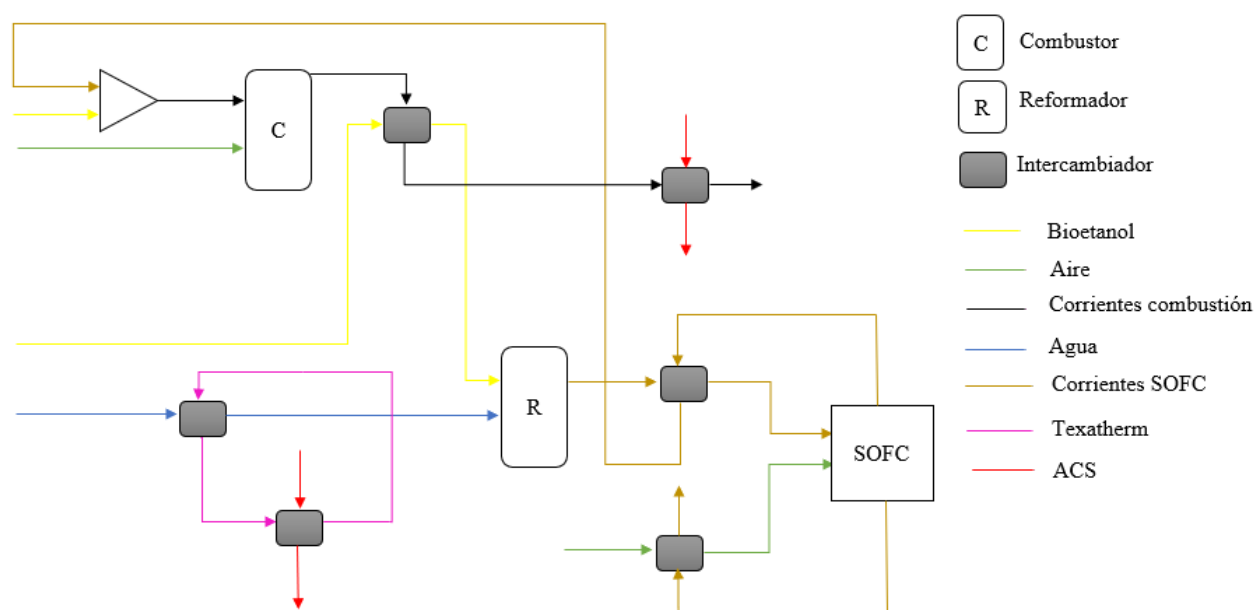


Diagrama 1 Representación gráfica del sistema CHP

3.1. GENERAL

La instalación se puede dividir en cuatro apartados principales:

- **Combustor:** Apartado en el cual se produce la reacción de combustión tanto de bioetanol fresco como del hidrógeno no reaccionado proveniente del ánodo. Estas reacciones producen la energía necesaria para mantener el reformador a temperatura constante, a la vez que se precalienta la corriente de bioetanol de entrada al mismo con los gases de salida del combustor.
- **Reformador:** Alimentado por una corriente de bioetanol y otra de agua previamente precalentadas y gracias al calor desprendido en las reacciones de combustión es posible llevar a cabo el proceso de reformado a una temperatura constante. Como resultado se obtiene una corriente rica en hidrógeno, la cual se alimentará a la célula de combustible.
- **Pila:** La corriente rica en hidrógeno proveniente del reformador se introduce por el ánodo de la pila. A su vez, por el cátodo, se incorpora una corriente de aire portadora del oxígeno necesario para que produzca la reacción electroquímica. Una vez ha dado lugar la reacción, los productos de ánodo y cátodo son aprovechados energéticamente para precalentar las corrientes de entrada de los mismos. Además, posteriormente, la salida del ánodo también es recirculada al proceso de combustión para aprovechar el hidrógeno no reaccionado.
- **Intercambiadores de calor:** Estos tienen dos funciones principales:
 - Precalentar corrientes de proceso
 - Acondicionamiento de agua de red como Agua Caliente Sanitaria (ACS)

3.2. MODELADO DEL COMBUSTOR

El proceso contiene un reactor de equilibrio en el cual se produce la combustión tanto del bioetanol fresco como del hidrógeno recirculado. Las reacciones que tienen lugar en el interior del combustor son las siguientes:



Conocidos los caudales de bioetanol y de hidrógeno a la entrada del combustor se calcula la cantidad de aire necesario para que se produzca una conversión de ambos componentes del 100%. Una vez se sabe el aire estequiométrico se trabajará en este caso con una proporción de 1,3 veces el estequiométrico para asegurar la reacción. Además, realizar la combustión introduciendo esa cantidad de aire asegura una menor cantidad de CO al conseguir una combustión completa.

Se ha considerado el combustor como catalítico, para así cumplir con la legislación medioambiental y reducir al máximo las emisiones son únicamente de CO sino de otros posibles contaminantes. El catalizador estaría basado en un metal activo principal, el platino (Pt), soportado en alúmina. Es de destacar que, al ser catalítico, las temperaturas de combustión bajan considerablemente desde las típicas temperaturas de llama (1000-1200 °C) de un combustor convencional. Además, el combustible, bioetanol, no tiene prácticamente azufre, a diferencia de los combustibles convencionales.

Gracias a la energía generada por estas dos reacciones exotérmicas, el reformador es capaz de actuar a temperatura constante pese a las reacciones endotérmicas que se dan en su interior, así como el precalentamiento de la corriente de bioetanol fresco introducida que se va a reformar con vapor de agua.

3.3. MODELADO DEL REFORMADOR

En general, el etanol se puede convertir en hidrógeno a través de diferentes procesos de reformado: reformado con vapor (SR), oxidación parcial (POX) y reformado autotérmico (ATR).

En la actualidad, el reformado de etanol con vapor es el proceso más utilizado porque proporciona un mayor rendimiento de hidrógeno y una menor tasa de reacciones secundarias.

De forma general, el etanol(g) en contacto con el vapor de agua se convierte principalmente en hidrógeno, metano y óxidos de carbono, de acuerdo a las expresiones (ec.7 – ec9) descomposición del etanol, reformado con vapor de agua de metano (methane steam reforming – MSR) y reacción de desplazamiento agua-gas (water-gas shift – WGS)[28].





La ecuación (ec.10) representa el proceso general de ESR (ethanol steam reforming).



Teóricamente, el proceso de ESR se puede realizar a temperaturas superiores a 300 °C, obteniendo hidrógeno, óxidos de carbono y metano como productos principales. Desde un punto de vista termodinámico las mejores condiciones de operación para el reformado con vapor del bioetanol son temperaturas alrededor de 700 °C, presiones bajas y relación molar etanol:agua entre 1:3 y 1:6 [29].

Un incremento de la temperatura produce mayores necesidades de energía en la etapa de calentamiento (etapa de combustor), a expensas de obtener mejores en el rendimiento final de H₂ además de una mayor selectividad del H₂.

Los niveles de hidrógeno obtenidos a partir de ese límite justifican el trabajo a temperaturas superiores ya que los niveles de CO producidos son fácilmente asumibles para una pila de combustible que trabaja a altas temperaturas. Otra ventaja de trabajar a mayores temperaturas es que se disminuye la diferencia entre la temperatura de reformado y la temperatura de operación de la pila [28].

Los artículos publicados hasta la fecha utilizan temperaturas de 700°C en estos procesos de reformado para posterior utilización de la corriente de hidrógeno en una pila de combustible de óxido sólido [28],[30].

En cambio, en lo que respecta a la relación de etanol/agua será un parámetro a variar en la simulación de la instalación.

3.4. MODELADO DE LA PILA DE COMBUSTIBLE

El modelado matemático es una herramienta esencial en el diseño de sistemas de pilas de combustible, ya que es importante comprender la respuesta de la pila en condiciones normales o transitorias. Un modelo es útil para predecir los efectos de alterar las variables del proceso y usar dicha información para optimizar el rendimiento de la célula [31].

Conociendo los diferentes parámetros del modelo; geometría, datos de propiedades (propiedades de los materiales, constantes, dimensiones de la celda, espesores...), composición de los gases, densidad de corriente, factor de utilización de combustible y relación de aire, cuyos valores se basan en la literatura específica para pilas SOFC más utilizadas en la actualidad. Estas pilas SOFC utilizan el ánodo como soporte y donde el electrolito es sólido y está hecho de circonia (ZrO₂) estabilizada con itria (YO₂) (YSZ) que puede conducir iones de óxido de manera eficiente mientras que los materiales más utilizados para el ánodo y el cátodo son níquel / YSZ y lantano dopado con estroncio manganita (LSM), respectivamente[32],[33].

Existen numerosos tipos de pilas SOFC, cada pila de combustible trabaja en unas condiciones diferentes. Las más estudiadas en la actualidad son las pilas SOFC de temperatura intermedia (IT-SOFC), con soporte anódico y los materiales anteriormente nombrados. Este tipo de pila suele actuar alrededor de 800°C. El reto para este tipo de pilas es conseguir un buen rendimiento a menores temperaturas, por tanto, será interesante la simulación de esta instalación a una temperatura menor de 800°C, así como la respuesta de la pila ante un aumento de temperatura con la intención de aumentar el rendimiento [32],[34].

3.4.1. VOLTAJE TEÓRICOY VOLTAJE REAL.

El voltaje de la celda, que es el voltaje máximo en condiciones específicas de funcionamiento, se puede calcular a partir de las siguientes ecuaciones:

$$E = E_0 + \frac{RT}{nF} \ln \left[\frac{P_{H_2} * P_{O_2}^{0.5}}{P_{H_2O}} \right] \quad (\text{ec. 11})$$

Donde

R (J mol⁻¹K⁻¹) es la constante de gases ideales

T (K) es la temperatura de funcionamiento

n es el número de electrones transferidos

F (C mol⁻¹) es el número de Faraday

P es la presión parcial de cada especie (hidrógeno, oxígeno y vapor de agua)

E_0 (V) es el potencial ideal definido por un polinomio de primer orden dependiente de la temperatura como muestra la siguiente la siguiente ecuación [35],[35]:

$$E_0 = 1,253 - 2,4516 \times 10^{-4}T \quad (\text{ec. 12})$$

$E(V)$ representa el voltaje ideal de la celda

En la práctica, el voltaje real de SOFC es menor que el valor teórico debido a las pérdidas internas de voltaje.

$$V = E - \eta_{\text{act}} - \eta_{\text{conc}} - \eta_{\text{ohm}} \quad (\text{ec. 13})$$

Donde

η_{ohm} (V) corresponde a las pérdidas óhmicas

η_{act} (V) son las pérdidas por activación

η_{conc} (V) pérdidas de concentración

3.4.2. PÉRDIDAS OHMICAS

Las pérdidas óhmicas se deben a la resistencia encontrada por la corriente iónica que pasa a través del electrolito y a la resistencia encontrada por los electrones que atraviesan los electrodos y el circuito eléctrico. Se deben principalmente al electrolito. Se pueden reducir disminuyendo el grosor del electrolito y mejorando la conductividad iónica. Las pérdidas óhmicas están definidas por la ecuación (ec. 14):

$$\eta_{ohm} = iR_{ohm} \quad (ec.14)$$

Donde 'i' ($A\ m^{-2}$) es la densidad de corriente y R_{ohm} (Ω) es la resistencia eléctrica interna de la celda dada por la ecuación:

$$R_{ohm} = \frac{\tau_{ánodo}}{\sigma_{ánodo}} + \frac{\tau_{electrolito}}{\sigma_{electrolito}} + \frac{\tau_{cátodo}}{\sigma_{cátodo}} \quad (ec. 15)$$

Dónde

$\tau_{ánodo}$, $\tau_{electrolito}$ y $\tau_{cátodo}$ (m) representan el espesor de las capas de ánodo, electrolito y cátodo respectivamente[34].

$\sigma_{ánodo}$, $\sigma_{electrolito}$ y $\sigma_{cátodo}$ ($\Omega^{-1}\cdot m^{-1}$) significa la conductividad eléctrica de cada componente, dónde las del cátodo y ánodo se podrían considerar constantes y la conductividad del electrolito depende de la temperatura de operación de la celda [31], [35].

3.4.3. PÉRDIDAS POR CONCENTRACIÓN:

Los sobrepotenciales de concentración aparecen cuando los efectos del transporte de masa dificultan la reacción del electrodo, es decir, cuando el flujo de entrada del reactivo y el flujo de salida del producto de un electrodo son más lentos que los correspondientes a la corriente descargada, y se desarrollan perfiles de concentración a través de los electrodos.

Para una estructura soportada por el ánodo, el sobrepotencial de concentración suele ser muy pequeño en el cátodo, pero puede ser significativo en el ánodo, particularmente a altas densidades de corriente y utilización de combustible.

Para condiciones de circuito abierto, las concentraciones de reactivo y producto en las interfaces electrodo / electrolito o límites trifásicos (TPB). Sin embargo, cuando la corriente fluye y se desarrollan gradientes de concentración (como se ilustra en la Figura 4 para un SOFC con soporte de ánodo), las concentraciones de especies en los límites trifásicos son diferentes de las concentraciones en masa.

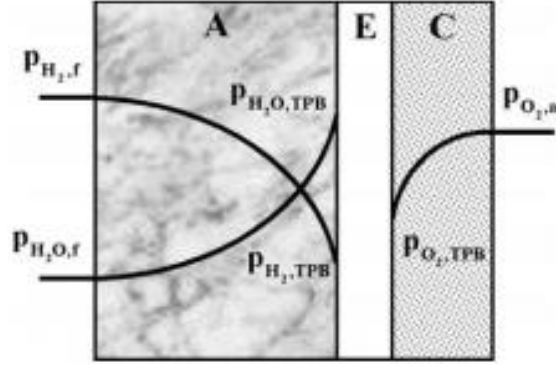


Figura 4. Diagrama esquemático de una celda de combustible de óxido sólido con soporte de ánodo.

La ecuación (ec.16) determina las pérdidas por sobrepotencial de concentración.

$$\eta_{\text{conc}} = \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{P_{H_2O,TPB} P_{H_2}}{P_{H_2O} P_{H_2,TPB}} \right) + \frac{RT}{4F} \ln \left(\frac{P_{O_2}}{P_{O_2,TPB}} \right) \quad (\text{ec.16})$$

El primer término del lado derecho se refiere al sobrepotencial de concentración anódico y el segundo al catódico:

$$\eta_{\text{conc,ánodo}} = \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{P_{H_2O,TPB} P_{H_2}}{P_{H_2O} P_{H_2,TPB}} \right) \quad (\text{ec. 17})$$

$$\eta_{\text{conc,cátodo}} = \frac{RT}{4F} \ln \left(\frac{P_{O_2}}{P_{O_2,TPB}} \right) \quad (\text{ec. 18})$$

Dónde

$P_{H_2,TPB}$, $P_{O_2,TPB}$ y $P_{H_2O,TPB}$ representan las presiones parciales de hidrógeno, oxígeno y agua en la interfaz del electrodo y electrolito, respectivamente

Para permitir el cálculo de η_{conc} , es necesaria una relación entre las presiones parciales de H_2 , H_2O y O_2 en los límites trifásicos y la densidad de corriente. Se han desarrollado diferentes modelos de transporte de fase gaseosa de medios porosos para predecir los potenciales de concentración

Aquí, se ha supuesto que: las principales especies gaseosas en el ánodo son H_2 y H_2O (difusión equimolar a contracorriente en una dimensión tridimensional de H_2 y H_2O) y en el cátodo son O_2 y N_2 (autodifusión unidimensional); la difusión externa es insignificante; y la reacción electroquímica se produce solo en la interfaz electrodo/electrolito. Se obtuvieron las siguientes ecuaciones:

$$P_{H_2,TPB} = P_{H_2} - \frac{RT\tau_{\text{ánodo}}}{2FD_{\text{eff,ánodo}}} i \quad (\text{ec. 19})$$

$$P_{H2O,TPB} = P_{H2O} + \frac{RT\tau_{\acute{a}nodo}}{2FD_{eff,\acute{a}nodo}} i \quad (ec.20)$$

$$P_{O2,TPB} = P - (P - P_{O2}) \exp\left(\frac{RT\tau_{c\acute{a}todo}}{4FD_{eff,c\acute{a}todo}} i\right) \quad (ec.21)$$

Donde

$D_{eff,c\acute{a}todo}$, $D_{eff,\acute{a}nodo}$ ($m^2.s^{-1}$) son los coeficientes de difusión efectiva de ánodo y cátodo respectivamente. Estos son dependientes de la porosidad del material (ϵ_p) y un factor de tortuosidad ($\tau_{tortuosidad}$) de los materiales[28],[30],[36].

3.4.4. PÉRDIDAS POR ACTIVACIÓN

Las pérdidas de activación están presentes cuando la velocidad de reacción electroquímica en la superficie del electrodo es controlada por la cinética de desaceleración de este electrodo. En otras palabras, las polarizaciones de activación están directamente relacionadas con la velocidad de reacción electroquímica. Para que pueda comenzar una reacción química o electroquímica en ambos casos, los reactivos deben superar una barrera de activación. En el caso de reacción electroquímica donde las pérdidas de activación:

$$\eta_{act} = \frac{RT}{\alpha F} \sinh^{-1}\left(\frac{i}{2i_{0,\acute{a}nodo}}\right) + \frac{RT}{(1-\alpha)F} \sinh^{-1}\left(\frac{i}{2i_{0,c\acute{a}todo}}\right) \quad (ec.22)$$

Donde

α es el coeficiente de transferencia electrónica o el coeficiente de transferencia de carga.

i_0 ($A.m^{-1}$) es la densidad de corriente de intercambio para cada electrodo (ánodo o cátodo), generalmente viene dado por las ecuaciones:

$$i_{0,\acute{a}nodo} = \frac{RT}{2F} k_{\acute{a}nodo} \exp\left(\frac{-E_{\acute{a}nodo}}{RT}\right) \quad (ec.23)$$

$$i_{0,c\acute{a}todo} = \frac{RT}{2F} k_{c\acute{a}todo} \exp\left(\frac{-E_{c\acute{a}todo}}{RT}\right) \quad (ec.24)$$

Para la cual

$E_{\acute{a}nodo}$ y $E_{c\acute{a}todo}$ (J/mol) es la energía de activación de cada electrodo

k (A/m^2) es un factor pre-exponencial.

Ambos dos están representados respectivamente por un polinomio de primer orden como función de temperatura y una constante[36],[37].

Los valores para el cálculo de las diferentes ecuaciones se pueden consultar en el ANEXO IV.

3.5.MODELADO DE LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR

Una de las características por las cuales son tan efectivos los sistemas de cogeneración es el aprovechamiento de calor residual producido. En este caso se utiliza para el precalentamiento y para la obtención de ACS. Los diferentes intercambiadores están incorporados en el proceso para aprovechar los altos gradientes térmicos que ocurren a lo largo de toda la instalación.

Los detalles de posición de los diferentes intercambiadores, así como el método de acondicionamiento de ACS viene incluido en el ANEXO II

4. DISEÑO DE LA PILA DE COMBUSTIBLE

4.1.PARÁMETROS DE ENTRADA Y CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO.

Una vez conocido el modelo matemático mediante el cual que predice el comportamiento de la pila gracias a las ecuaciones incluidas en el apartado 3.4MODELADO DE LA PILA DE COMBUSTIBLE, es posible el diseño de esta para su futuro funcionamiento en condiciones óptimas.

En primer lugar, se definen las principales condiciones en las que va a trabajar la pila de combustible correspondiente, en este caso son las siguientes:

- Relación $[H_2O: EtOH]$ estequiométrica, es decir, esta relación toma un valor igual a 3
- Temperatura de operación típica en pilas SOFC de 800°C

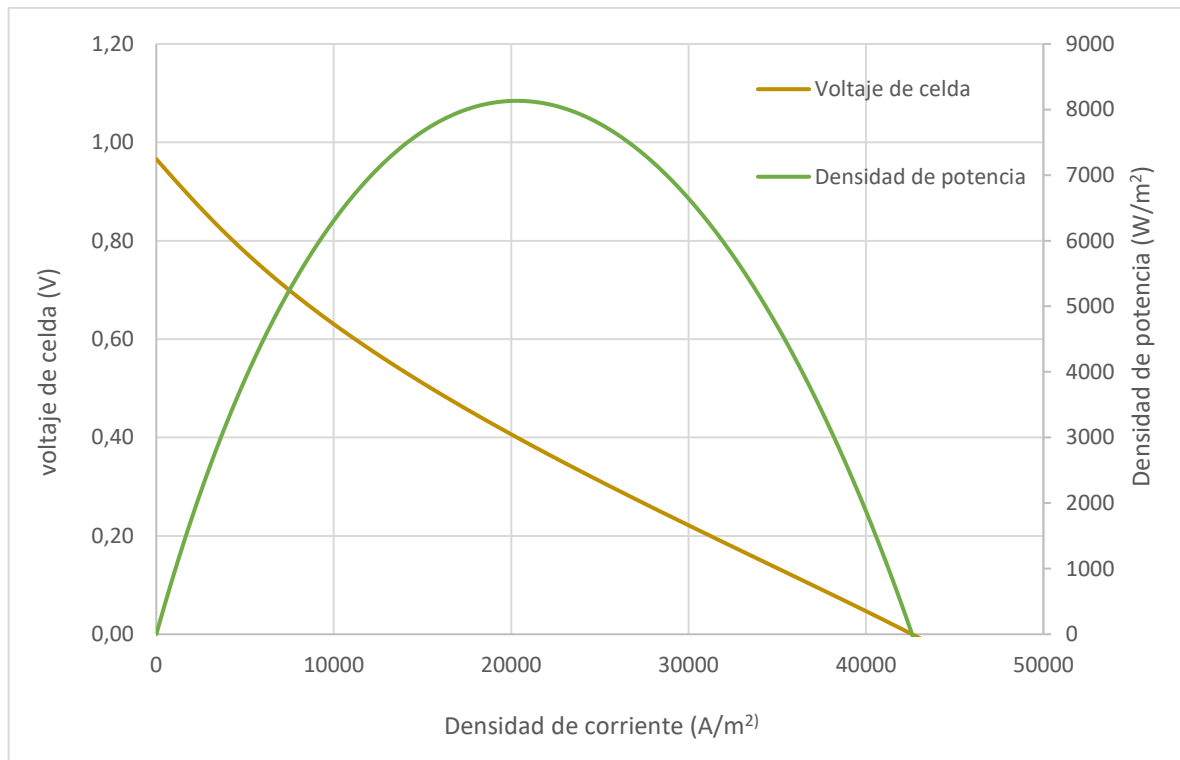
Otros valores que influyen en el funcionamiento de la pila como el factor de utilización (U_F) (la fracción de hidrógeno que reacciona en la pila), la ratio de aire en función del combustible introducido en la pila (Air_{ratio}), así como todos los valores de constantes y parámetros utilizados las ecuaciones utilizadas aparecen en el ANEXO IV.

Las pilas de combustible normalmente están diseñadas para funcionar a un voltaje de celda entre 0,6 y 0,7 V. Este rango de operación es en el que se encuentra una buena eficiencia, una operación estable y se evita la posible oxidación anódica para bajo voltaje de celda [29].

La relación de aire (Air_{ratio}) garantiza un aumento de temperatura en el interior de la pila de combustible de hasta 100°C, por tanto, para una pila que actúa a 800°C las corrientes alimentadas a ánodo y cátodo se deben introducir a una temperatura mínima de 700°C[32].

4.2.ANÁLISIS PARA LA DIMENSIONALIZACIÓN DE LA PILA DE COMBUSTIBLE.

Esta sección presenta las curvas características para el voltaje de la celda y la densidad de potencia en función de la densidad de corriente para las condiciones típicas de la pila de combustible. La Gráfica 3 ilustra el voltaje de celda y la densidad de potencia obtenidos en función de la densidad de corriente para la mezcla de combustible obtenida tras el reformado de bioetanol.



Gráfica 3. Voltaje de celda y densidad de potencia a diferentes densidades de corriente

Como se mencionó anteriormente, las celdas de combustible suelen estar diseñadas para operar a un voltaje de celda entre 0,6 y 0,7 V. Por ello si la pila de combustible estuviese constituida por todas las celdas a una misma temperatura y composición de gases constantes, el mejor punto de operación observando la Gráfica 3 estaría entre valores de densidad de corriente de 7500 y 11000 A/m², lo que conllevaría densidades de potencia de entre 5245 y 6654 Wm⁻².

Se toma un valor intermedio de 0,66 V, para el cual la densidad de corriente es igual a 9000 A/m² y la densidad de potencia corresponde al valor de 5915 Wm⁻².

Las pilas SOFC pueden contener diferentes áreas de celda como pueden ser 0,04 m², 0,02 m², 0,0144 m², 0,01 m² [34],[37]. En este caso se va a utilizar un valor típico de área de 0,120m×0,120m. A partir de estos valores y para obtener una potencia de 5kW se diseña la pila de combustible ideal para las condiciones de operación indicadas.

4.3. CÁLCULO DE PARÁMETROS

$$I_{total} = A_{celdaef} * i \quad (\text{ec. 25})$$

Donde

$A_{celdaef}$ es el área efectiva de una celda unitaria.

i se refiere a la densidad de corriente escogida.

I_{total} es la intensidad total necesaria para obtener 5kW de potencia.

Tabla 2. Cálculo de la intensidad total.

$A_{celdaef}$	0,01	m ²
i	9000	A/m ²
I_{total}	90	A

Para calcular el voltaje total necesario en la pila de combustible:

$$V_{total} = \frac{P}{I_{total}} \quad (\text{ec. 26})$$

Dónde:

P es la potencia requerida.

I_{total} la intensidad total necesaria para dar la potencia requerida.

V_{total} el voltaje correspondiente que se ha de obtener de la pila.

Tabla 3. Cálculo del voltaje total de pila.

P	5000	W
I_{total}	90	A
V_{total}	55,56	V

Como se ha mencionado el voltaje una celda es de 0,66 V, esto nos permite obtener el número de celdas necesarias para alcanzar el voltaje total correspondiente a 5 kW de potencia:

$$N^{\circ} \text{ celdas} = \frac{V_{total}}{V_{celda}} \quad (\text{ec.27})$$

Donde

$N^{\circ} \text{ celdas}$ es la cantidad de celdas de la pila.

V_{total} se refiere al voltaje total necesario.

V_{celda} es el voltaje obtenido en cada celda de manera individual.

Tabla 4. Cálculo del número de celdas óptimas.

V_{total}	55,56	V
V_{celda}	0,66	V
$N^{\circ} \text{ celdas}$	84,17	celdas

Debido a que el número de celdas no es exacto se diseña con 85 celdas obteniéndose algo más de potencia a la requerida o se ajustaría la densidad de corriente para obtener la potencia justa de 5 kW.

Conociendo el número de celdas contenidas en la celda de combustible, es posible calcular la longitud total de esta teniendo en cuenta los espesores de cada apartado de la pila:

$$L_{celda} = \tau_{ánodo} + \tau_{cátodo} + \tau_{electrolito} + \tau_{canales\ separadores} \quad (ec.28)$$

Respecto la longitud total; hay que tener en cuenta que la pila contiene un canal separador de ánodo y otro de cátodo más que el número de celdas total, por tanto:

$$L_{total} = (L_{celda} * N^{\circ}celdas) + \tau_{interconexión} \quad (ec.29)$$

Donde

$\tau_{ánodo}$, $\tau_{cátodo}$, $\tau_{electrolito}$, $\tau_{interconexión}$ son los espesores de ánodo, cátodo, electrolito y los canales de separación de ánodo y cátodo respectivamente.

L_{celda} es la longitud correspondiente a una celda.

$N^{\circ}celdas$ representa la cantidad de celdas de la pila.

L_{total} se refiere a la longitud total.

Tabla 5. Longitud total de la pila.

$\tau_{ánodo}$	660	μm
$\tau_{cátodo}$	30	μm
$\tau_{electrolito}$	20	μm
$\tau_{interconexión}$	1200	μm
L_{celda}	1910	μm
$N^{\circ}celdas$	85	celdas
L_{total}	16,355	cm

El volumen que ocupará la respectiva pila:

$$V = L_{total} * A_{celda} \quad (ec. 30)$$

Donde

L_{total} la longitud total.

A_{celda} representa el área total de una celda.

V es el volumen total de pila.

Tabla 6. Cálculo del volumen final ocupado por la pila de combustible

L_{total}	16,355	cm
A_{celda}	144	cm^2
V	2355,1	cm^3

El volumen de pila obtenido para que la pila trabaje de forma eficiente y estable obteniendo los correspondientes 5 kW de potencia es de 2355,1 cm^3 .

5. SIMULACIÓN Y ELECCIÓN DE PARÁMETROS

Se ha empleado el software de apoyo AspenOne HYSYS® para la realizar la simulación de nuestro sistema micro-CHP de acuerdo con el trabajo, obteniendo así los datos necesarios para los diferentes casos de simulación

HYSYS es una herramienta informática que nos va a permitir el diseño y modelado de procesos químicos mediante la ayuda de un software. Es utilizado para simular procesos tanto en estado estacionario como no estacionario de procesos químicos.

Posee numerosas herramientas que nos permiten estimar propiedades físicas, balances de materia y energía, equilibrios líquido-vapor, además de poder simular numerosos sistemas gracias a la cantidad de equipos de Ingeniería Química que contiene como pueden ser separadores líquido-líquido, diferentes tipos de reactores, columnas de destilación etc.

Gracias a esto podremos simular nuestro sistema incluyendo todos los equipos, reacciones, balances... que intervienen en él.

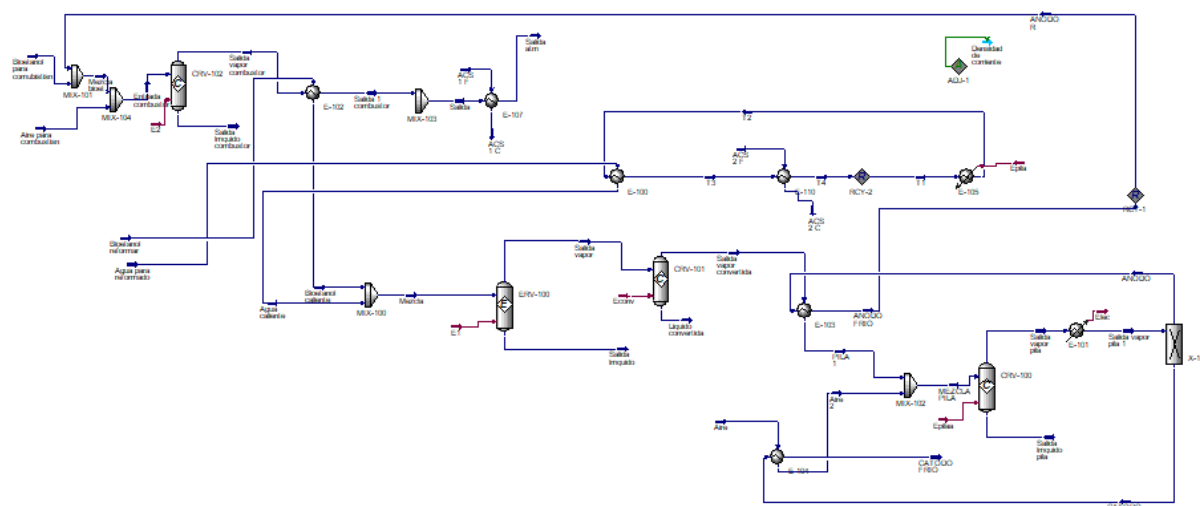


Figura 5. Esquema general (AspenOne HYSYS®)

5.1.EFICIENCIAS DE LA INSTALACIÓN.

Las condiciones óptimas de operación se pueden obtener a partir de las diferentes eficiencias; se realiza una comparación entre eficiencia eléctrica de pila, eficacia eléctrica total, eficiencia térmica y eficiencia global de la instalación.

5.1.1. EFICIENCIA ELÉCTRICA DE LA PILA

La eficiencia eléctrica de la pila en concreto se calcula como la relación entre la potencia neta obtenida con respecto a la cantidad de energía del hidrógeno a la entrada. Toda la energía obtenida en la pila está constituida en electricidad y calor disipado.

El cálculo de este tipo de eficiencia se hace de acuerdo a la ecuación (ec.31).

$$\mu_{el\acute{e}ctrica,pila} = \frac{Potencia}{\dot{n}_{H_2} * PCI_{H_2}} \quad (ec.31)$$

Donde la energía contenida en el hidrógeno se puede determinar como el producto del flujo másico (\dot{n}_{H_2}) multiplicado por el poder calorífico inferior del hidrógeno (PCI_{H_2})

5.1.2. EFICIENCIA ELÉCTRICA DE LA INSTALACIÓN

En este apartado se calcula la eficiencia total del sistema de cogeneración (ec.32), se define como la relación entre la potencia eléctrica obtenida en la pila de combustible y la energía introducida con el combustible al proceso, en este caso etanol.

$$\mu_{el\acute{e}ctrica,total} = \frac{Potencia}{\dot{n}_{EtOH} * PCS_{EtOH}} \quad (ec.32)$$

Donde

PCS_{EtOH} hace referencia al poder calorífico superior de etanol (el agua producto de la reacción va a salir del sistema siempre en estado líquido)

\dot{n}_{EtOH} es el flujo másico de etanol introducido al proceso, tanto al proceso de combustión como al de reformado con vapor de agua.

5.1.3. EFICIENCIA TÉRMICA DE LA INSTALACIÓN

Se define eficiencia térmica a la relación entre el calor aprovechado para obtener ACS y el flujo molar de etanol total introducido a la instalación (\dot{n}_{EtOH}) multiplicado por su poder calorífico inferior (PCI_{EtOH}).

$$\mu_{t\acute{e}rmica,total} = \frac{Q}{\dot{n}_{EtOH} * PCS_{EtOH}} \quad (ec.33)$$

Donde

Q es el calor intercambiado (aprovechado) en las corrientes calientes producto de los procesos y las corrientes de agua a temperatura ambiente con el objetivo de obtener ACS.

5.1.4. EFICIENCIA GLOBAL DE LA INSTALACIÓN

La relación entre la energía total obtenida y la energía contenida en el etanol a la entrada de la instalación (ec. 34) da como resultado la eficiencia global para el sistema micro-CHP.

$$\mu_{global} = \frac{Potencia+Q}{\dot{n}_{EtOH} * PCS_{EtOH}} \quad (ec. 34)$$

[38]

5.2. CASO PRINCIPAL

Un sistema de cogeneración basado en una pila de combustible y un reformador externo de bioetanol hace que se combinen numerosas condiciones. Con el objetivo de conocer la respuesta del sistema ante los diferentes cambios y averiguar cuáles son las mejores condiciones de operación se lleva a cabo la simulación del proceso.

El objetivo principal es la obtención de 5 kW de potencia a partir del hidrógeno. La cantidad de hidrógeno a introducir en la pila de combustible en cada caso viene determinada por la (ec.35)[39].

$$n_{h2} = \frac{i * A_{ef}}{n * F * U_f} \quad (\text{ec.35})$$

Donde

U_f representa el factor de utilización.

n_{h2} (mol/s) es la cantidad de hidrógeno necesario para la obtención de 5kW de potencia.

i (A/m²) se refiere a la densidad de corriente

A_{ef} área total efectiva de la pila

$$A_{ef} = N^{\circ} \text{ de celdas} * A_{celdaef} \quad (\text{ec. 36})$$

Los dos apartados en los que se centra el estudio son: el reformado y la pila de combustible.

Las condiciones principales a partir las cuales se va a realizar la simulación del sistema como se ha comentado en 4.1. PARÁMETROS DE ENTRADA Y CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO. vienen representadas en la Tabla 7.

Tabla 7. Parámetros utilizados en el caso base.

T_{reformado}	973	K
T_{pila}	1073	K
Relación [Agua:EtOH]	3	[Adim]

5.3. CONDICIONES DE OPERACIÓN

5.3.1. VARIACIÓN DE LA RELACIÓN [H₂O /EtOH]

Para este estudio se mantienen las condiciones de temperatura del caso base, es decir:

- Temperatura de reformado: 973 K (700 °C)
- Temperatura de la pila: 1073 K (800 °C)

Variando la relación agua/etanol a la entrada del reformador se obtienen los datos de eficacias representados en la Tabla 8

Tabla 8. Eficiencias en función de la relación agua:etanol utilizada a la entrada del reformador.

Relación [H₂O/EtOH]	$\mu_{el\acute{e}ctrica,pila}$	$\mu_{el\acute{e}ctrica,total}$	$\mu_{t\acute{e}rmica,total}$	μ_{global}
3,00	44,90	44,69	52,56	97,47
3,50	43,84	44,18	52,94	97,12
4,00	43,04	43,41	53,37	96,78
4,50	42,40	42,70	53,72	96,42
5,00	41,75	42,03	54,06	96,09
5,50	41,18	41,43	54,31	95,74
6,00	40,62	40,85	54,56	95,41

Como se puede observar el mayor rendimiento tanto global como eléctrico lo encontramos para la relación estequiométrica entre etanol y agua. Esto se debe a que conforme se aumenta la relación de agua a la entrada del reformador, aumenta también la cantidad de agua a la salida de este, lo que conlleva un aumento en la presión parcial a la entrada de la pila de H₂O junto con su correspondiente disminución de presión parcial tanto de H₂ como de O₂.

La disminución de la presión parcial de hidrógeno provoca que la pila tenga que actuar a una mayor densidad de corriente para obtener los 5kW estipulados. Esta densidad de corriente está directamente relacionada con el flujo molar hidrógeno necesario (ec.35), por tanto, necesitaremos introducir una mayor cantidad de hidrógeno a la pila (disminución de la eficacia eléctrica de la pila) aumentando la alimentación de bioetanol. Este aumento en la alimentación provoca una disminución en la eficacia eléctrica del sistema.

El aumento de agua tiene como consecuencia un aumento en los flujos internos de la instalación por lo que la cantidad de ACS obtenida gracias a los gases de salida del combustor aumenta. Aunque el ACS obtenido por disipación de calor en la pila sea menor, el conseguido gracias a ese aumento de flujos implica un aumento neto de ACS a mayor relación [H₂O: EtOH]. En consecuencia, la eficacia térmica del sistema es mayor compensando la bajada de la eficacia eléctrica y haciendo que, globalmente, tengan eficacias muy similares.

En la Tabla 9 se adjuntan los valores de etanol consumido para cada relación [H₂O:EtOH] así como el agua caliente sanitaria total obtenida en cada caso.

Tabla 9. Etanol consumido y agua caliente sanitaria acondicionada total en función de la relación agua:etanol.

Relación [H₂O/EtOH]	Etanol consumido (kg/h)	ACS_{total} (kg/h)
3,00	1,28	126,67
3,50	1,30	130,70
4,00	1,33	134,39
4,50	1,35	137,78
5,00	1,37	141,13
5,50	1,39	144,18
6,00	1,41	147,20

Para la instalación, se considera óptima la relación más cercana a la estequiométrica, es decir una relación [Agua: EtOH] lo más parecida a tres posible. Esta será la utilizada en la simulación correspondiente a las variaciones de temperatura.

5.3.2. VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA DE LA PILA

En este apartado se deja fijada la relación más adecuada a la entrada del reformador y se varía la temperatura de operación de la pila, con motivo de conocer el comportamiento y las mejores condiciones de operación.

- Temperatura de reformado: 973 K
- Relación [H₂O:EtOH]: 3

5.3.2.1. DISMINUCIÓN DE TEMPERATURA

Como se ha comentado anteriormente, uno de los retos para este tipo de pilas de combustible basadas en óxidos sólidos es disminuir su temperatura de operación, alcanzando altas eficacias y consiguiendo la misma potencia eléctrica que a una temperatura superior.

Tabla 10. Eficiencias de la instalación ante una disminución de la temperatura.

T(°C)	$\mu_{eléctrica,pila}(\%)$	$\mu_{eléctrica,total}(\%)$	$\mu_{térmica,total}(\%)$	$\mu_{global}(\%)$
795	43,29	43,64	53,80	97,44
790	41,74	42,09	55,31	97,40
785	39,97	40,27	57,11	97,38
780	37,97	38,24	59,11	97,35
775	35,48	35,72	61,60	97,32

Como muestra la Tabla 10 una disminución en la temperatura de operación de la pila provoca un gran descenso en la eficiencia eléctrica tanto de pila como global.

Esto es debido al aumento de hidrógeno necesario para la obtención de la potencia eléctrica de 5kW al igual que ocurría al aumentar la relación de agua:etanol. Una menor temperatura provoca mayores pérdidas en la pila y hace que esta actúe a una densidad de corriente superior, relacionada directamente con el hidrógeno necesario. Este hidrógeno adicional provoca un aumento en el calor disipado por la pila de combustible, además de un aumento del flujo molar de los gases a salida del combustor. Estos hechos hacen que se aumente la eficiencia térmica y la eficacia global del sistema se compense, siendo así muy similar para todos los casos.

Estos hechos se pueden comprobar en la Tabla 11:

Tabla 11. Resultados obtenidos bajando la temperatura de operación de la pila de combustible.

$T(^{\circ}\text{C})$	$\text{ACS}_{\text{total}}(\text{kg/h})$	$V_{\text{celda}}(\text{V})$	$i \text{ (A/m}^2\text{)}$
795	134,14	0,64	9211
790	142,86	0,62	9554
785	154,06	0,59	9972
780	167,80	0,56	10500
775	186,99	0,52	11230

Para temperaturas menores de 775 °C no se realiza el estudio, ya que para la pila diseñada no hay una relación de densidad de corriente-voltaje de celda con la que se consiga una potencia eléctrica de pila de 5kW, ni si quiera actuando en condiciones de máxima densidad de potencia.

Para comprender mejor el efecto de una disminución en la temperatura en la pila consultar el ANEXO III.

5.3.2.2. AUMENTO DE LA TEMPERATURA EN EL SISTEMA

Con el objetivo de aumentar el rendimiento del sistema se puede intentar un incremento en la temperatura de operación la pila, obteniéndose las eficacias que se muestran en la Tabla 12.

En el caso aumentar la temperatura operación ocurre lo contrario al caso anterior, una temperatura superior provoca menores pérdidas, por lo que la pila trabaja a menores densidades de corriente, menor cantidad de hidrógeno necesario, menos combustible, disminución de ACS obtenida tanto por la energía disipada en la pila como por el calor de los gases de salida del combustor. Rendimiento eléctrico y rendimiento térmico se compensan y por ello dan rendimientos totales muy parecidos para todas las temperaturas.

Tabla 12. Eficiencias de la instalación ante un aumento de temperatura de trabajo de la pila de combustible.

T(°C)	$\mu_{eléctrica,pila}(\%)$	$\mu_{eléctrica,total}(\%)$	$\mu_{térmica,total}(\%)$	$\mu_{global}(\%)$
810	47,09	47,51	50,02	97,53
820	49,08	49,55	48,03	97,58
830	50,70	51,30	46,34	97,64
840	52,19	52,75	44,94	97,69
850	53,36	53,47	43,46	96,93
860	54,35	55,01	42,48	97,49

Para escoger la temperatura de pila a la que operar habría que fijarse también en los parámetros de la Tabla 13.

Tabla 13. Resultados obtenidos aumentando la temperatura de operación de la pila de combustible.

T(°C)	ACS_{total}(kg/h)	V_{celda}(V)	i (A/m²)
810	114,77	0,6945	8471
820	105,8	0,7241	8123
830	98,71	0,7489	7855
840	93,18	0,7696	7643
850	88,16	0,7871	7474
860	84,62	0,8016	7338

Observando los valores de la Tabla 13 se puede ver como el aumento de temperatura provoca un aumento en el voltaje de celda al que actúa la pila. Para las temperaturas de 810°C y 820°C estos valores (0,6945 y 0,7241 V) son admisibles, en cambio, a partir de 820 °C el voltaje de la celda se aleja bastante de lo ideal, además, se tendría que estudiar la degradación de los materiales a temperaturas superiores.

Una ventaja de trabajar a temperaturas más altas aparte de obtener una mayor eficiencia global gracias al ahorro de combustible es que se obtienen unos números de ACS más adecuados para una vivienda, ya que generalmente no hacen falta cantidades de ACS tan altas, (los datos de consumo aparecen en el apartado PARÁMETROS FINALES Y CONCLUSIÓN). Por tanto, se podría decir que para una vivienda es mejor trabajar a mayores temperaturas mejorando la eficacia, ahorrando combustible y consiguiendo la cantidad de ACS necesaria.

El principal problema de trabajar a mayores temperaturas es que; debido a que la pila está diseñada para actuar de forma eficaz a 800 °C, a una temperatura relativamente superior se podría llegar a fatigar antes de tiempo, disminuyendo su vida útil.

En esta instalación se podría plantear el trabajar a una temperatura de pila de entre 810 y 820 °C ya que aproximadamente trabajan entre los límites propuestos y cumple mejor los requisitos para una vivienda.

En el ANEXO III se amplía información acerca del efecto de aumentar la temperatura de operación de la pila.

Para mayor información del proceso de simulación, así como resultados, consultar ANEXO II.

6. PARÁMETROS FINALES Y CONCLUSIÓN

En el presente trabajo se ha realizado un análisis de la viabilidad de un sistema micro-CHP basado en una pila de combustible tipo SOFC para la obtención de 5kW de potencia eléctrica y su correspondiente aprovechamiento de calor.

Se ha diseñado una pila de combustible específica para este tipo de sistemas con la intención de que se trabaje en las mejores condiciones posibles para la obtención de la potencia requerida.

La pila de combustible SOFC se compone de 85 celdas de 120x120 mm, una longitud de 1,91 mm cada una, lo que conlleva un volumen total de pila de 2355 cm³. Se trata de un sistema compacto, con un volumen reducido capaz de suministrar 5 kW de potencia.

Se han obtenido las mejores condiciones de operación en la instalación comparando las eficacias obtenidas para diferentes relaciones aire:bioetanol a la entrada del reformador. Se obtiene como resultado que una relación estequiométrica entre ambos es la mejor opción.

Una vez conocido el valor de la relación se ha realizado la simulación aumentando y disminuyendo la temperatura de operación de la pila. Observando los valores de eficiencia obtenidos y la densidad de corriente y voltaje de celda a la que trabajaría la pila se obtienen mejores prestaciones a una temperatura de 810°C.

Para una relación estequiométrica de aire:bioetanol a la entrada y una temperatura de operación de pila de 810°C:

- La energía eléctrica necesaria para una vivienda estándar es de 3487 kWh/año por lo que la pila estará en funcionamiento (al máximo de potencia) $3487 \text{ kWh}/5\text{kW} = 697,4$ horas al año, 58,12 horas al mes.
- El agua caliente sanitaria obtenida será $114,77 \text{ kg/h} \times 58,12 \text{ h} = 6670$ litros ACS/mes. El consumo medio de un ciudadano es de 28 l/día [40], en un piso de 4 personas consumiría $28 \text{ l/día} \times 4 \text{ personas} \times 30 \text{ días} = 3360$ litros ACS/mes. Sobran 3310 l de agua caliente sanitaria todavía, que podrían ser destinados a calefacción, aunque otra opción sería trabajar a temperaturas más altas de pila, esto acarrearía un mayor desgaste y reducción de su vida útil, pero se obtienen mayores eficacias eléctricas y menos cantidad de ACS, además de suponer un pequeño ahorro de combustible.
- El precio del bioetanol actualmente en España es de 1,432 €/l o 1,82 €/kg aproximadamente
- La instalación en las condiciones óptimas de funcionamiento introduce 1,273 kg/h de bioetanol: 0,06 kg/h destinados al combustor y 1,213 kg/h al reformador.
- Los gastos aproximados en un mes serían: $1,273 \text{ kg/h} \times 58,12 \text{ h} \times 1,82 \text{ €/kg}$ [41] = 134 €/mes.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Arsalis, «A comprehensive review of fuel cell-based micro-combined-heat-and-power systems», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 105, pp. 391-414, may 2019.
- [2] «BOE.es - Documento BOE-A-2007-9691». [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2007-9691>. [Accedido: 21-nov-2019].
- [3] «Directiva 2012/27/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de octubre de 2012, relativa a la eficiencia energética, por la que se modifican las Directivas 2009/125/CE y 2010/30/UE, y por la que se derogan las Directivas 2004/8/CE y 2006/32/CE Texto pertinente a efectos del EEE», p. 56.
- [4] «Combined Heat and Power Basics», *Energy.gov*. [En línea]. Disponible en: <https://www.energy.gov/eere/amo/combined-heat-and-power-basics>. [Accedido: 23-oct-2019].
- [5] M. Pehnt, «Environmental impacts of distributed energy systems—The case of micro cogeneration», *Environ. Sci. Policy*, vol. 11, n.º 1, pp. 25-37, feb. 2008.
- [6] H. Ren y W. Gao, «Economic and environmental evaluation of micro CHP systems with different operating modes for residential buildings in Japan», *Energy Build.*, vol. 42, n.º 6, pp. 853-861, jun. 2010.
- [7] «Advantages And Disadvantages Of Solid Oxide Fuel Cells Engineering Essay», *UKEssays.com*. [En línea]. Disponible en: <https://www.ukessays.com/essays/engineering/advantages-and-disadvantages-of-solid-oxide-fuel-cells-engineering-essay.php>. [Accedido: 23-oct-2019].
- [8] S. Douvartzides, «Electricity from ethanol fed SOFCs: the expectations for sustainable development and technological benefits», *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 29, n.º 4, pp. 375-379, mar. 2004.
- [9] J. Twidell, T. Weir, y T. Weir, *Renewable Energy Resources*. Routledge, 2015.
- [10] G. Johnson, I. Beausoleil-Morrison, B. Strathearn, E. Thorsteinson, y T. Mackintosh, «The calibration and validation of a model for simulating the thermal and electrical performance of a 1 kWAC proton-exchange membrane fuel-cell micro-cogeneration device», *J. Power Sources*, vol. 221, pp. 435-446, ene. 2013.
- [11] A. Hawkes y M. Leach, «Cost-effective operating strategy for residential micro-combined heat and power», *Energy*, vol. 32, n.º 5, pp. 711-723, may 2007.
- [12] S. Martinez, G. Michaux, P. Salagnac, y J.-L. Bouvier, «Micro-combined heat and power systems (micro-CHP) based on renewable energy sources», *Energy Convers. Manag.*, vol. 154, pp. 262-285, dic. 2017.
- [13] I. Verhaert, G. Mulder, y M. De Paepe, «Evaluation of an alkaline fuel cell system as a micro-CHP», *Energy Convers. Manag.*, vol. 126, pp. 434-445, oct. 2016.
- [14] R. Napoli, M. Gandiglio, A. Lanzini, y M. Santarelli, «Techno-economic analysis of PEMFC and SOFC micro-CHP fuel cell systems for the residential sector», *Energy Build.*, vol. 103, pp. 131-146, sep. 2015.
- [15] O. A. Shaneb, G. Coates, y P. C. Taylor, «Sizing of residential μ CHP systems», *Energy Build.*, vol. 43, n.º 8, pp. 1991-2001, ago. 2011.
- [16] A. Adam, E. S. Fraga, y D. J. L. Brett, «Options for residential building services design using fuel cell based micro-CHP and the potential for heat integration», *Appl. Energy*, vol. 138, pp. 685-694, ene. 2015.
- [17] J. R. Correa, «Bioetanol, el combustible ecológico». [En línea]. Disponible en: <https://www.santacruzlimpia.info/index.php/blog/item/245-bioetanol-el-combustible-ecologico>. [Accedido: 10-nov-2019].

- [18] «Récord mundial de bioetanol en 2018», *Agrodigital*, 27-jul-2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.agrodigital.com/2018/07/27/record-mundial-de-bioetanol-en-2018/>. [Accedido: 10-nov-2019].
- [19] Besel, *Nuevos combustibles y tecnologías de propulsión situación y perspectivas para automoción*. Alcobendas, Madrid: Fundación Instituto Tecnológico para la Seguridad del Automóvil, 2008.
- [20] «Clean hydrogen demand». [En línea]. Disponible en: <https://www.iea.org/topics/hydrogen/demand/>. [Accedido: 21-nov-2019].
- [21] «05/01470 On hydrogen and hydrogen energy strategies I: Current status and needs», *Fuel Energy Abstr.*, vol. 46, n.º 4, p. 222, jul. 2005.
- [22] P. Breeze, «Chapter 1 - An Introduction to Fuel Cells», en *Fuel Cells*, P. Breeze, Ed. Academic Press, 2017, pp. 1-10.
- [23] C. F.-B. Badía, «3.4 Células de Combustible», p. 14.
- [24] B. Stoeckl, V. Subotić, D. Reichholf, H. Schroettner, y C. Hochenauer, «Extensive analysis of large planar SOFC: Operation with humidified methane and carbon monoxide to examine carbon deposition based degradation», *Electrochimica Acta*, vol. 256, pp. 325-336, dic. 2017.
- [25] N. Q. Minh, «Solid oxide fuel cell technology—features and applications», *Solid State Ion.*, vol. 174, n.º 1, pp. 271-277, oct. 2004.
- [26] S. M. Jamil, M. H. D. Othman, M. A. Rahman, J. Jaafar, A. F. Ismail, y K. Li, «Recent fabrication techniques for micro-tubular solid oxide fuel cell support: A review», *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 35, n.º 1, pp. 1-22, ene. 2015.
- [27] S. C. Singhal y K. Kendall, «Solid Oxide Fuel Cells», p. 430.
- [28] L. E. Arteaga, L. M. Peralta, V. Kafarov, Y. Casas, y E. Gonzales, «Bioethanol steam reforming for ecological syngas and electricity production using a fuel cell SOFC system», *Chem. Eng. J.*, vol. 136, n.º 2-3, pp. 256-266, mar. 2008.
- [29] L. Hernández y V. Kafarov, «Use of bioethanol for sustainable electrical energy production», *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 34, n.º 16, pp. 7041-7050, ago. 2009.
- [30] P. Tippawan y A. Arpornwichanop, «Energy and exergy analysis of an ethanol reforming process for solid oxide fuel cell applications», *Bioresour. Technol.*, vol. 157, pp. 231-239, abr. 2014.
- [31] P. Aguiar, C. S. Adjiman, y N. P. Brandon, «Anode-supported intermediate temperature direct internal reforming solid oxide fuel cell. I: model-based steady-state performance», *J. Power Sources*, vol. 138, n.º 1-2, pp. 120-136, nov. 2004.
- [32] P. Aguiar, C. S. Adjiman, y N. P. Brandon, «Anode-supported intermediate temperature direct internal reforming solid oxide fuel cell. I: model-based steady-state performance», *J. Power Sources*, vol. 138, n.º 1-2, pp. 120-136, nov. 2004.
- [33] A. Arpornwichanop, N. Chalermpanchai, Y. Patcharavorachot, S. Assabumrungrat, y M. Tade, «Performance of an anode-supported solid oxide fuel cell with direct-internal reforming of ethanol», *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 34, n.º 18, pp. 7780-7788, sep. 2009.
- [34] M. A. Ashraf, K. Rashid, I. Rahimipetroudi, H. J. Kim, y S. K. Dong, «Analyzing different planar biogas-fueled SOFC stack designs and their effects on the flow uniformity», *Energy*, p. 116450, nov. 2019.
- [35] Y. Sahli, B. Zitouni, y H. Ben-Moussa, «Solid Oxide Fuel Cell Thermodynamic Study», n.º 2, p. 18, 2017.
- [36] M. Saidi, F. Siavashi, y M. R. Rahimpour, «Application of solid oxide fuel cell for flare gas recovery as a new approach; a case study for Asalouyeh gas processing plant, Iran», *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, vol. 17, pp. 13-25, mar. 2014.

- [37] Y. Patcharavorachot, W. Paengjuntuek, S. Assabumrungrat, y A. Arpornwichanop, «Performance evaluation of combined solid oxide fuel cells with different electrolytes», *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 35, n.º 9, pp. 4301-4310, may 2010.
- [38] S. Inac, S. O. Unverdi, y A. Midilli, «A parametric study on thermodynamic performance of a SOFC oriented hybrid energy system», *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 44, n.º 20, pp. 10043-10058, abr. 2019.
- [39] W. Yang, Y. Zhao, V. Liso, y N. Brandon, «Optimal design and operation of a syngas-fuelled SOFC micro-CHP system for residential applications in different climate zones in China», *Energy Build.*, vol. 80, pp. 613-622, sep. 2014.
- [40] «Consumo diario de ACS en el certificado energético». [En línea]. Disponible en: <https://www.certificadosenergeticos.com/consumo-diario-acscertificado-energetico>. [Accedido: 21-nov-2019].
- [41] J. Camós, «Los precios del bioetanol: ¿compensa abandonar la gasolina?», *Motorpasion*, 29-mar-2012. [En línea]. Disponible en: <https://www.motorpasion.com/coches-hibridos-alternativos/los-precios-del-bioetanol-compensa-abandonar-la-gasolina>. [Accedido: 21-nov-2019].
- [42] D. W. Bujalski, «Solid Oxide Fuel Cells (SOFC)», p. 49.
- [43] «Solid Oxide Fuel Cells | Products», *Elcogen*. .
- [44] B. Shri Prakash, S. Senthil Kumar, y S. T. Aruna, «Properties and development of Ni/YSZ as an anode material in solid oxide fuel cell: A review», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 36, pp. 149-179, ago. 2014.
- [45] F. Zhao y A. Virkar, «Dependence of polarization in anode-supported solid oxide fuel cells on various cell parameters», *J. Power Sources*, vol. 141, n.º 1, pp. 79-95, feb. 2005.
- [46] J. Alvarado-Flores, «Materiales para ánodos, cátodos y electrolitos utilizados en celdas de combustible de óxido sólido (SOFC)», *Rev Mex Fis*, p. 22, 2013.
- [47] M. Han, X. Tang, H. Yin, y S. Peng, «Fabrication, microstructure and properties of a YSZ electrolyte for SOFCs», *J. Power Sources*, vol. 165, n.º 2, pp. 757-763, mar. 2007.
- [48] D. Saebea, Y. Patcharavorachot, S. Assabumrungrat, y A. Arpornwichanop, «Analysis of a pressurized solid oxide fuel cell–gas turbine hybrid power system with cathode gas recirculation», *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 38, n.º 11, pp. 4748-4759, abr. 2013.
- [49] A. Heidarpour, G. M. Choi, M. H. Abbasi, y A. Saidi, «A novel approach to co-sintering of doped lanthanum chromite interconnect on Ni–YSZ anode substrate for SOFC applications», *J. Alloys Compd.*, vol. 512, n.º 1, pp. 156-159, ene. 2012.
- [50] «Guía Técnica Agua Caliente Sanitaria Central. | IDAE». [En línea]. Disponible en: <https://www.idae.es/publicaciones/guia-tecnica-agua-caliente-sanitaria-central>. [Accedido: 22-nov-2019].

ANEXO I.
DISEÑOS Y MATERIALES DE CELDAS
PARA PILAS DE COMBUSTIBLE TIPO
SOFC.

1. DISEÑOS CELDAS SOFC

Estas pueden clasificarse ampliamente en dos categorías:

Los más típicos los denominados autoportantes, donde uno de los componentes de la celda (a menudo la capa más gruesa) actúa como soporte estructural de la celda (por lo tanto, la celda individual puede diseñarse como electrolito, ánodo o cátodo).

En la configuración de soporte externo, la celda individual se configura como capas delgadas en la interconexión o en un sustrato poroso.

Algunos de los tipos de diseño para pilas de combustible de óxido sólido planas se muestran a continuación en la Figura 6.

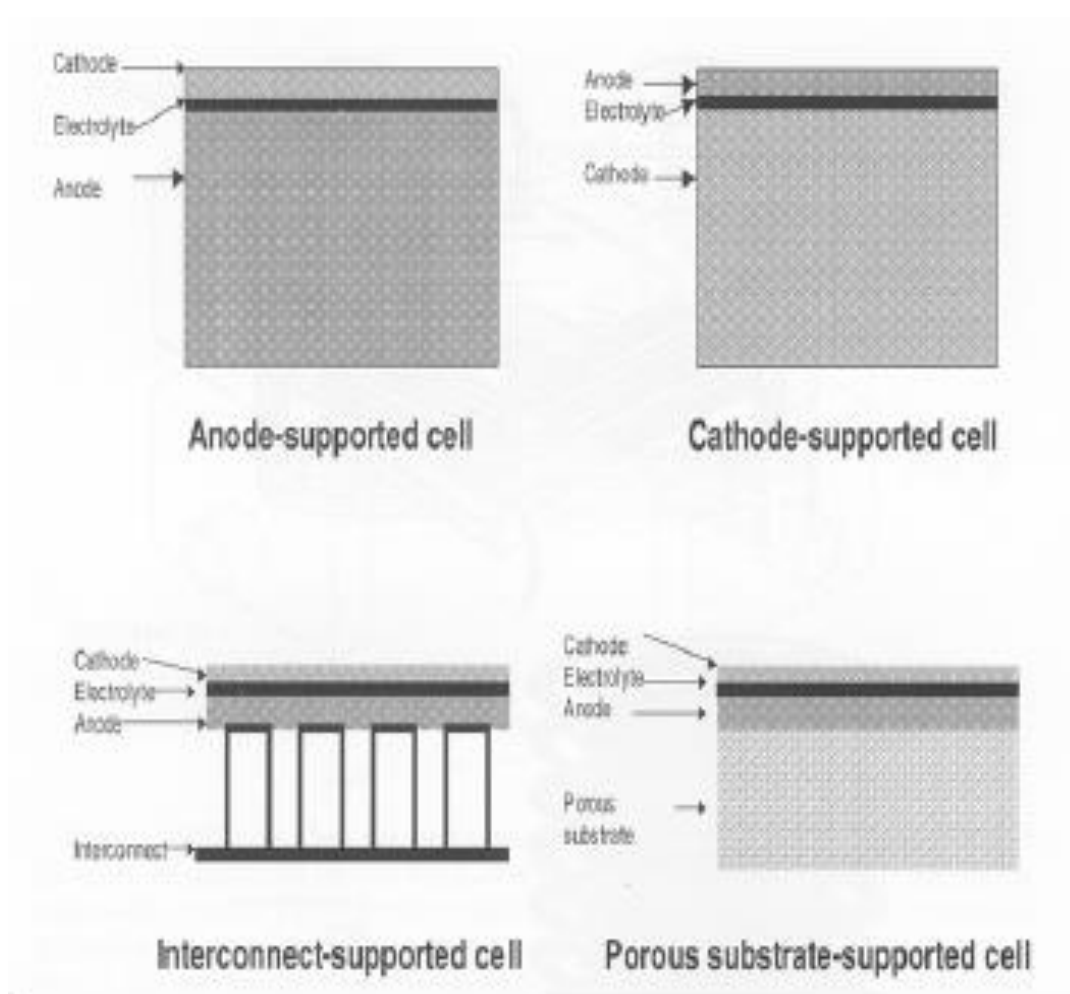


Figura 6. Diferentes diseños SOFC plana. Celda soportada en el ánodo (Anode-supported cell, en inglés), celda soportada en el cátodo (Cathode-supported cell, en inglés), celda soportada en la interconexión (Interconnect-supported cell, en inglés) y celda soportada en un sustrato poroso (Porous substrate-supported cell, en inglés)

Los principales diseños de celdas planas SOFC con sus correspondientes ventajas y desventajas vienen dados en la Tabla 14:

Tabla 14. Ventajas y desventajas de las principales configuraciones de celdas SOFC.

Configuración	Ventajas	Desventajas
Soporte electrolito	-Soporte estructural relativamente fuerte -Menos susceptible a fallos debidos a la oxidación anódica.	-Menor conductividad electrolítica. - Se requieren temperaturas de funcionamiento más altas para minimizar la pérdida óhmica
Soporte anódico	-Ánodo altamente conductivo -Baja temperatura de funcionamiento mediante el uso de electrolito delgado	-Aumenta el potencial de oxidación anódica -Limitaciones de transporte masivo debido a ánodos gruesos
Soporte catódico	-Sin problemas de oxidación. -Baja temperatura de funcionamiento mediante el uso de electrolito delgado	-Baja conductividad -Limitación del transporte de masas debido a cátodos gruesos

Respecto a diseños tubulares existen dos tipos básicamente:

- Gran diámetro (> 15 mm)
- Diámetro muy pequeño (<5 mm)

[42]

2. MATERIALES

2.1.ÁNODO

En los últimos tiempos, la síntesis, el desarrollo y la fabricación del componente anódico de la celda de combustible de óxido sólido (SOFC) han ganado una importancia significativa, especialmente después de la llegada del SOFC con soporte anódico. La función del electrodo anódico implica la facilitación de la difusión del gas combustible, la oxidación del combustible, el transporte de electrones y el transporte de subproductos de la reacción electroquímica.

Si bien se ha logrado un progreso impresionante en el desarrollo de materiales de ánodo alternativos con propiedades de conducción mixtas como los materiales metalcerámicos, Ni / YSZ (componente metálico (níquel) en una matriz cerámica de circonita estabilizada con itria (YSZ), continúa siendo el ánodo más buscado para aplicaciones de SOFC de alta e intermedia temperatura (IT-SOFC). A pesar de sus pobres capacidades de carburación y sulfuración durante la operación de SOFC directamente en hidrocarburos, Ni / YSZ continúa siendo el material de electrodo anódico más elegido debido a su alta actividad catalítica para oxidación de hidrógeno, reformado de metano, alta conductividad y estabilidad electrónica e iónica [43],[44],[45].

2.2.CÁTODO:

El cátodo al igual que el ánodo es una estructura porosa que debe permitir el transporte de masa rápido de los gases, tanto reactantes como los productos. La manganita de lantano dopada con $(\text{La}_{0.84}\text{Sr}_{0.26})\text{MnO}_3$ o mejor conocida como LSM es el material más utilizado para los cátodos en pilas de combustible SOFC [45],[32].

Se ha observado una disminución en la conductividad eléctrica, si las concentraciones de estroncio son demasiado bajas. Además, el LSM se ha mezclado con YSZ para aumentar la triple frontera de fase y los sitios de reacción para reducir significativamente la polarización del electrodo.

Para el LSM y otros cátodos basados en lantano, la compatibilidad con los electrolitos de YSZ es particularmente importante, ya que el LSM reacciona con el YSZ a temperaturas cercanas a los 1300°C, al igual que los electrolitos tipo YSZ, solo son compatibles con el LSM a temperaturas por debajo de los 1200°C[46].

2.3.ELECTROLITO:

Los electrolitos de estado sólido utilizados en los SOFC son necesarios para una alta conductividad iónica, una mejor estabilidad, compatibilidad química y térmica, impermeabilidad por los gases que reaccionan, alta resistencia y tenacidad, fácil fabricación y bajo costo. Como componente clave de los SOFC, los materiales electrolíticos sólidos incluyen principalmente zirconia estabilizada estructurada con fluorita, ceria dopada y LaGaO₃ estructurada con perovskita La zirconia estabilizada con itria (YSZ) todavía se usa principalmente en la pila de SOFC[47].

Por lo general, para pilas SOFC de alta temperatura se utiliza materiales a base de zirconia, (esto presenta desafíos tanto para la construcción como para la durabilidad) [42]. Para pilas de combustible de óxido sólido de temperaturas intermedias (IT-SOFC) también se está usando este tipo de material principalmente[33],[48].

2.4.INTERCONEXIÓN:

Proporciona el camino conductor para que pase la corriente eléctrica del ánodo de una celda al cátodo de la siguiente, así como separa el gas combustible del oxidante. Por lo tanto, debe ser completamente denso, suficientemente conductor y bastante estable en ambas atmósferas, tanto oxidantes como reductoras.

Debido a estos exigentes requisitos, solo se pueden usar pocos materiales para la interconexión para las celdas de combustible SOFC.

Los materiales de perovskita a base de cromato de lantano (LaCrO₃) son los más prometedores ya que tienen alta estabilidad térmica y química en atmosferas tanto de reducción como de oxidación, así como buena conductividad eléctrica; Debido a estas propiedades, han sido ampliamente investigados. El principal avance respecto a este tipo de pilas de combustible se basa en la reducción de la temperatura de operación de SOFC a 600–800°C, temperatura en las cuales se podrían usar materiales metálicos para reemplazar LaCrO₃ como interconexiones debido a sus ventajas superiores; una alta conductividad térmica podría eliminar la presencia de gradiente térmico tanto a lo largo del plano de interconexión como a través de los componentes, así como su alta conductividad electrónica que disminuiría la resistencia de la celda aumenta el rendimiento. Además, son fácilmente disponibles, de fabricación sencilla y bajo coste.[49]

ANEXO II

SIMULACIÓN DETALLADA

Se expone una explicación detallada del apartado de la simulación del sistema CHP utilizando el software específico de ingeniería química AspenOne HYSYS®

La obtención de 5kW de potencia eléctrica es el punto de partida del proceso a partir del cual variarán las corrientes según las necesidades del sistema. En cambio, hay condiciones que serán constantes y que vendrán fijadas en el proceso. En la Tabla 15 se especifican las propiedades de las diferentes corrientes de entrada al sistema, así como las de las corrientes de salida de ACS, cumpliendo los requisitos propuestos en la “Guía técnica” de “Agua Caliente Sanitaria Central” que propone el IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía) perteneciente al ministerio de industria, turismo y comercio[50].

Tabla 15. Condiciones de las corrientes de entrada.

Corriente	Temperatura(°C)	Presión (atm)
Alimentación de bioetanol	20	1
Alimentación de aire	20	1
Alimentación de agua	20	1
ACS salida	60	1
Texatherm	40	1

En la Figura 7 se puede ver la instalación completa con todas las corrientes, equipos y funciones de HYSYS® necesarias para realizar la simulación completa.

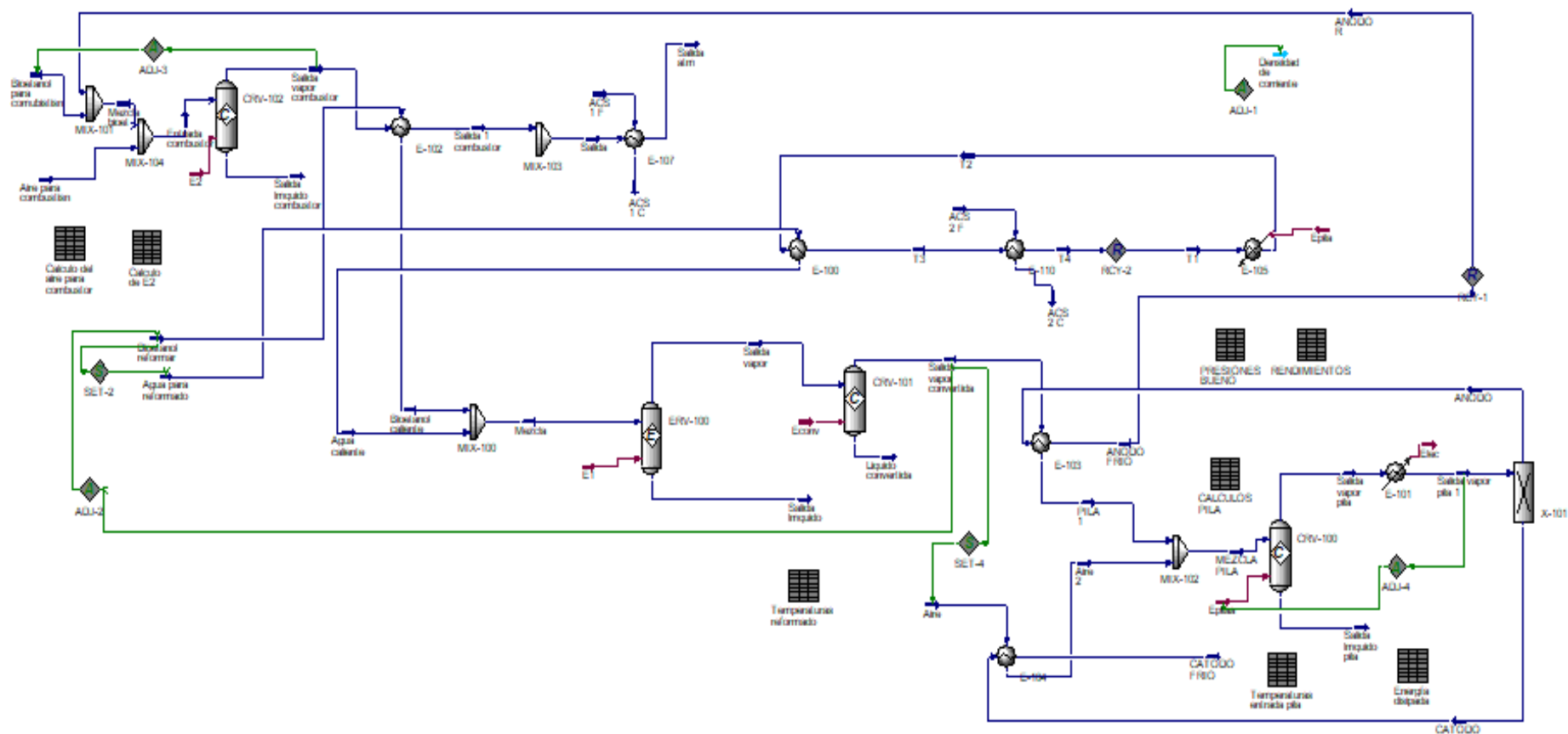


Figura 7. Proceso introducido en HYSYS® con todos los detalles necesarios para la simulación completa de la instalación.

Se divide la instalación en 4 partes:

1. COMBUSTOR

Este equipo es alimentado por una corriente de bioetanol a temperatura ambiente mezclada con la recirculación de la corriente correspondiente a la salida del ánodo, portadora del hidrógeno no reaccionado, el cual será aprovechado energéticamente ya que reaccionará en el combustor. La corriente de ánodo recirculada también hace que la alimentación entre al reactor a mayor temperatura con la intención de que no se produzca un gradiente térmico. La corriente mezclada se introduce junto con una corriente de aire a temperatura ambiente de la cual proviene el oxígeno necesario para conseguir una reacción completa del bioetanol e hidrógeno, en este caso $1,3 \times \text{Aire estequiométrico}$.

La importancia del combustor es máxima ya que se depende de la energía obtenida en él para la no dependencia de suministro energético exterior en el sistema de cogeneración, es decir, sea autosuficiente energéticamente. Aquí se refleja una de las claras ventajas de estos sistemas; si hubiese un fallo en el suministro exterior, la instalación seguiría funcionando, esto es muy útil en lugares donde es necesario obtener energía de alguna manera en caso de fallo en la red como es el caso de hospitales.

En el software se representa como un reactor de conversión en el cual se convierte el 100% tanto de hidrógeno como de bioetanol ya que existe el oxígeno necesario para la combustión completa de ambos compuestos. Las reacciones introducidas en el reactor son las siguientes:

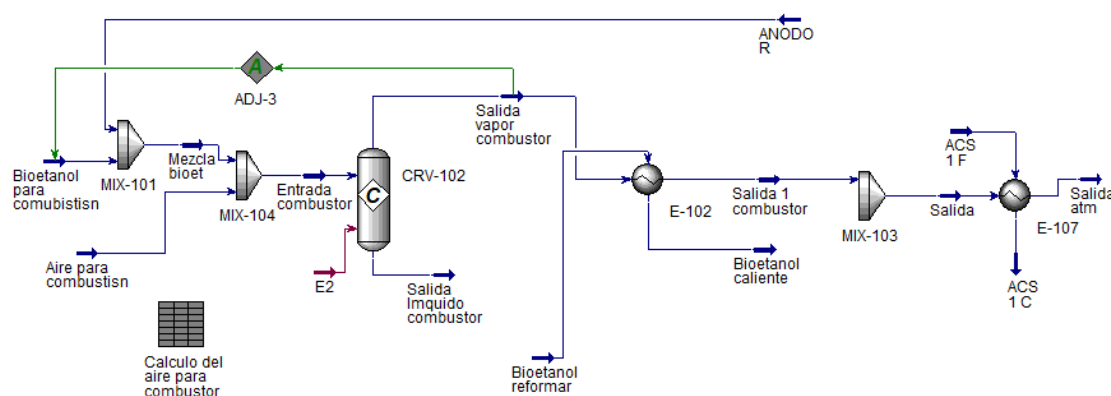


Figura 8. Representación proceso de combustión en HYSYS®

Como se puede observar en la Figura 8 el combustor está representado como un reactor de conversión, el cual es necesario para mantener constante la temperatura del reformador gracias al “E2” (energía producida en el combustor) ya que en el proceso de reformado la mayoría de reacciones son de carácter endotérmico. Otra función del combustor es precalentar la corriente de bioetanol con los gases de salida para alimentar el reformador a una temperatura de 700°C (temperatura de operación del proceso de reformado). La

cantidad de bioetanol introducida es la justa para llevar a cabo lo nombrado anteriormente haciendo que la temperatura de salida de gases sea la mínima, esto es posible automatizarlo en HYSYS gracias a la función “ADJUST 3” que contiene el software. Los gases de salida, aun a una temperatura bastante elevada se utilizan para la obtención de agua caliente sanitaria ACS.

En la Tabla 16. y la Tabla 17. se muestran las cantidades de etanol consumidas y la cantidad de ACS obtenida gracias al proceso de combustión para diferentes parámetros estudiados tanto de relación agua:etanol como variaciones en la temperatura.

Tabla 16. Valores obtenidos variando la relación agua:etanol. $T_{pila}=800^{\circ}\text{C}$

Relación $[\text{H}_2\text{O}:\text{EtOH}]$	$\dot{n}_{\text{EtOH},\text{combustor}}$ (kg/h)	$\text{ACS}_{\text{combustión}}$ (kg/h)
3,00	0,066	70,94
3,50	0,068	78,33
4,00	0,070	85,83
4,50	0,071	93,44
5,00	0,073	101,20
5,50	0,074	109,10
6,00	0,076	117,10

Tabla 17. Valores obtenidos variando temperatura de operación de la pila. Relación $[\text{H}_2\text{O}:\text{EtOH}]=3$

$T(^{\circ}\text{C})$	$\dot{n}_{\text{EtOH},\text{combustor}}$ (kg/h)	$\text{ACS}_{\text{combustión}}$ (kg/h)
780	0,07949	83,6
790	0,07016	75,77
820	0,05847	41,3
840	0,0535	32,61
860	0,04996	26,54

2. INTERCAMBIADORES DE CALOR

El rasgo diferenciador de los sistemas de cogeneración es la alta eficacia que proporcionan gracias al aprovechamiento de calor generado en el proceso. En la instalación los intercambiadores de calor tienen principalmente dos funciones: Por un lado, intercambian calor entre corrientes del proceso con motivo del precalentamiento de las alimentaciones tanto del reformador como la de la pila de combustible y, por el otro lado, se obtiene ACS en dos puntos de intercambio de calor instalados en el proceso.

Tabla 18 Valores de ACS obtenidos para diferentes relaciones a la entrada del reformador. $T_{pila}=800^{\circ}\text{C}$

Relación $[\text{H}_2\text{O}:\text{EtOH}]$	ACS _{combustión} (kg/h)	ACS _{pila} (kg/h)	ACS _{total} (kg/h)
3	70,94	55,73	126,67
3,5	78,33	52,37	130,70
4	85,83	48,56	134,39
4,5	93,44	44,34	137,78
5	101,20	39,93	141,13
5,5	109,10	35,08	144,18
6	117,10	30,10	147,20

Como demuestra la Tabla 18, a medida que se aumenta la relación de agua:etanol aumenta el agua caliente sanitaria obtenida con los gases de combustión a la vez que disminuye la obtenida gracias al calor disipado de la pila. En cómputo global afecta más el ACS obtenido tras el proceso de combustión lo que provoca que con el aumento de relación agua:etanol consigamos una mayor cantidad de ACS total.

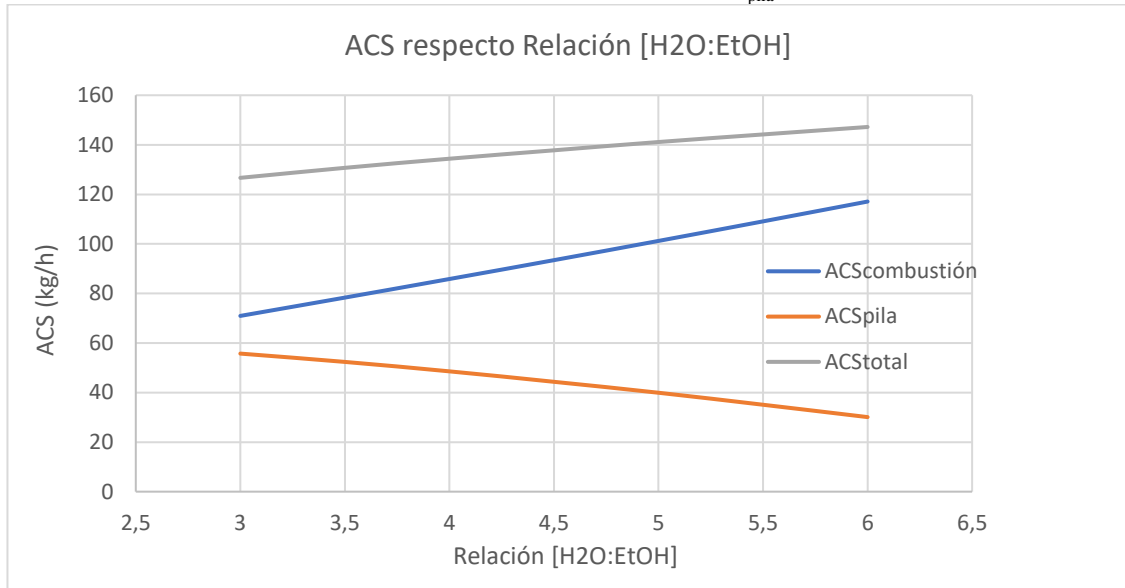
Tabla 19. Valores de ACS obtenidos. Relación $[\text{H}_2\text{O}:\text{EtOH}]=3$

T($^{\circ}\text{C}$)	ACS _{combustión} (kg/h)	ACS _{pila} (kg/h)	ACS _{total} (kg/h)
780	83,60	84,20	167,80
790	75,77	67,09	142,86
800	70,94	55,73	126,67
820	64,50	41,30	105,80
840	60,57	32,61	93,18
860	58,08	26,54	84,62

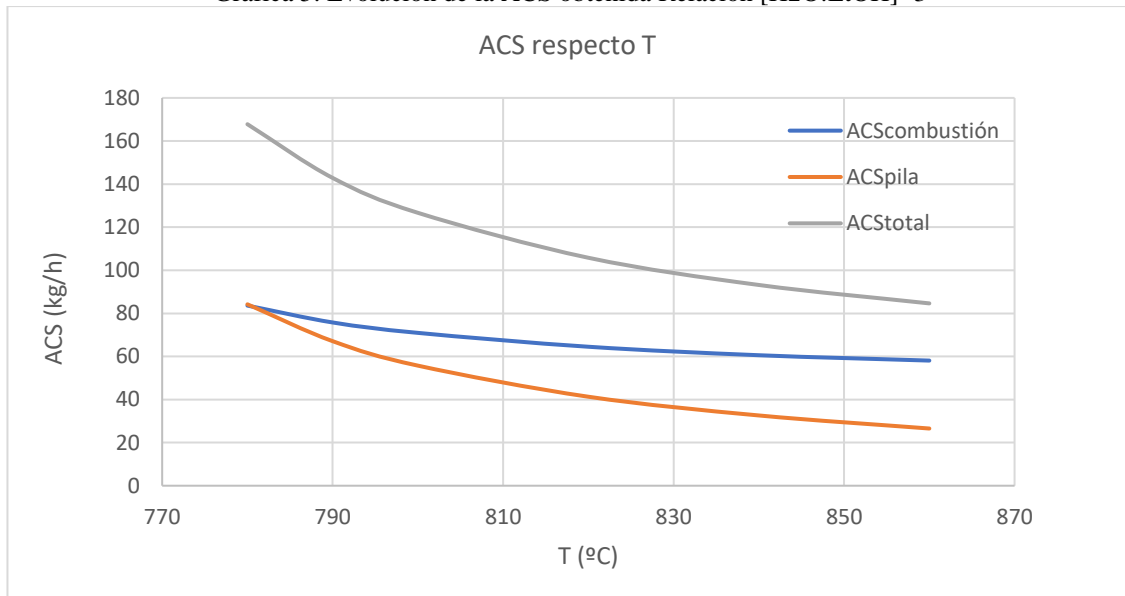
Un aumento de la temperatura provoca un efecto inverso al estudiado para el aumento de relación etanol:agua, ya que al aumentar la temperatura de la pila se reducen las pérdidas y es necesaria menor cantidad de hidrógeno a la entrada de la SOFC, lo que provocará una disminución tanto en el ACS obtenida gracias a los gases de combustión como por el calor disipado de pila. Es decir, aumentar la temperatura de operación de la pila supone una bajada considerable del ACS total acondicionada. Se comprueba con los datos de la Tabla 19.

Las gráficas siguientes (Gráfica 4 y Gráfica 5) representan la evolución del acondicionamiento de ACS para los diferentes parámetros estudiados.

Gráfica 4. Evolución de la ACS obtenida $T_{pila}=800^{\circ}\text{C}$



Gráfica 5. Evolución de la ACS obtenida Relación [H₂O:EtOH]=3



3. REFORMADO

El proceso de reformado se ha realizado en un reactor de tipo Gibbs cuya alimentación está compuesta por etanol y agua, precalentadas a la temperatura de operación gracias a los gases de salida del combustor y al calor desprendido de la pila.

Las reacciones de equilibrio introducidas en el reactor son las siguientes:



En la Figura 9 se muestra el apartado que tiene que ver con el reformado de bioetanol con vapor de agua.

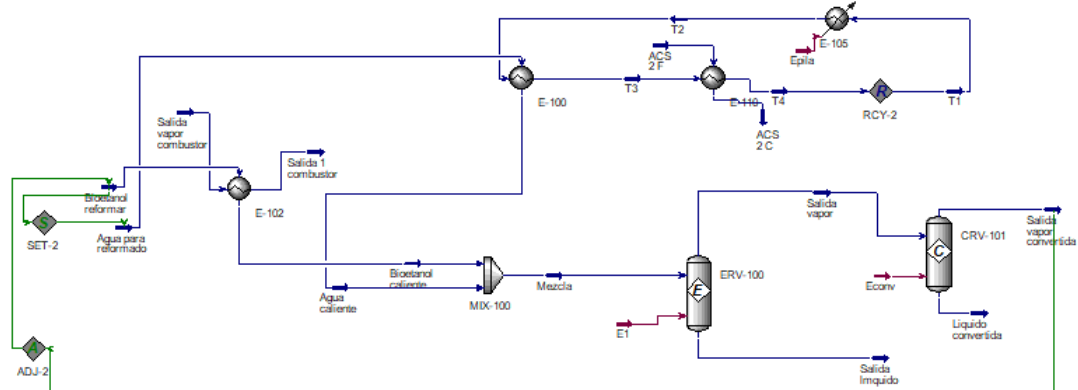
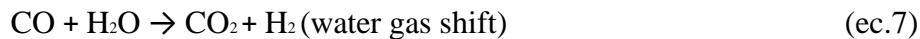
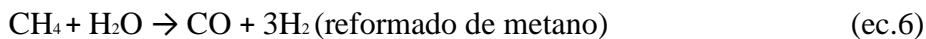


Figura 9. Representación proceso de reformado en HYSYS®

El caudal de bioetanol introducido viene determinado por el Hidrógeno necesario para conseguir la Potencia de 5kW en la pila de combustible. Gracias a la función que integra el software (ADJ-2) se calcula flujo de bioetanol a introducir en el reformador para obtener dicha cantidad de H₂.

El caudal de agua en cambio viene determinado por la relación [EtOH/H₂O] a introducir, el cual será variado gracias al “SET-2” que modifica dicha relación entre etanol y agua con la función de obtener los valores óptimos para dicho proceso.

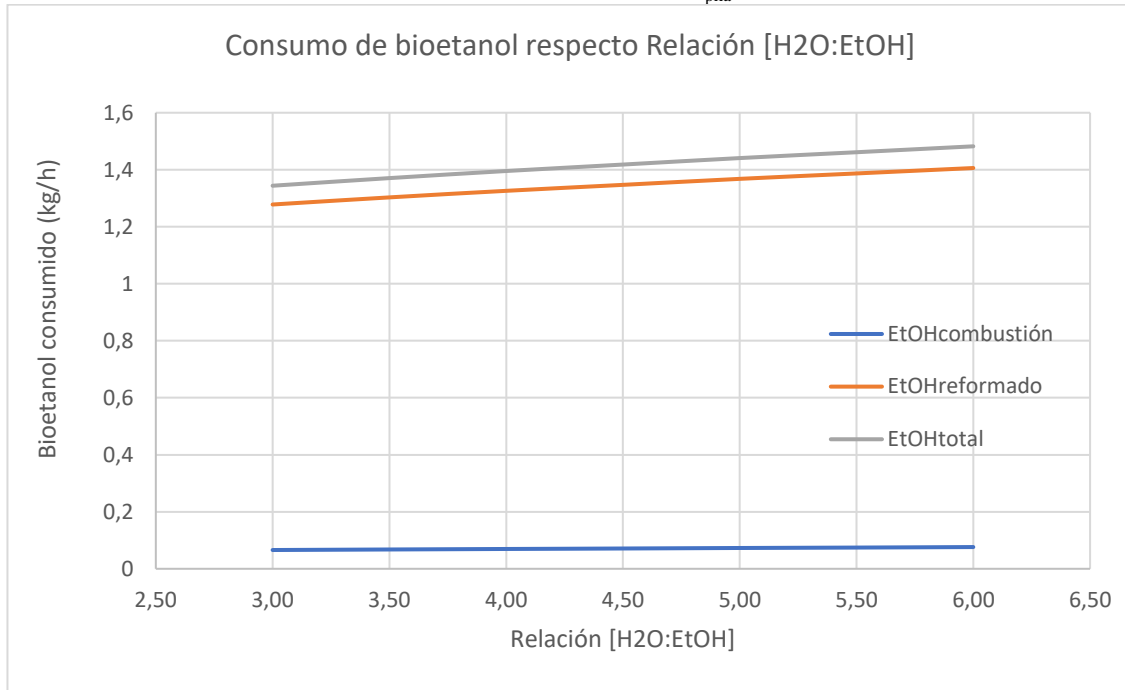
Respecto al reactor de conversión CRV-101 (100% de conversión) es un reactor ficticio integrado en el sistema debido a que parte de los gases de la corriente del reformado externo son metano (CH₄) y CO, estos al ser introducidos en la pila de combustible reaccionarían obteniéndose mayor cantidad de hidrógeno. Las reacciones correspondientes son el reformado de metano con vapor de agua y la reacción wáter-gas shift (ec. 6),(ec. 7) respectivamente:



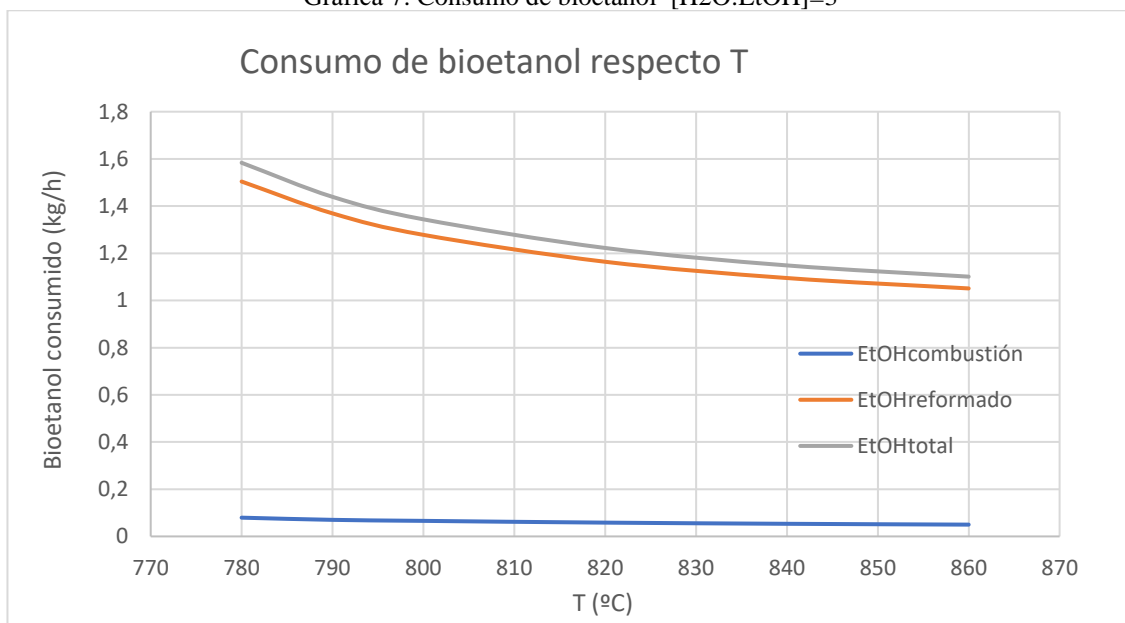
Esto hace que el hidrógeno obtenido por el proceso de reformado de bioetanol más el formado obtenido gracias a estas reacciones proporcione el hidrógeno necesario para la obtención de 5000 W de potencia eléctrica.

El consumo de bioetanol es en el proceso de reformado donde la mayor parte de este se utiliza como se puede observar en la Gráfica 6 y Gráfica 7. que representan la fracción de etanol consumido en el combustor y en el reformador en comparación con el etanol total consumido en la instalación.

Gráfica 6. Consumo de bioetanol $T_{pila}=800^{\circ}\text{C}$



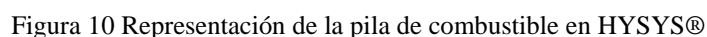
Gráfica 7. Consumo de bioetanol [H₂O:EtOH]=3



4. PILA DE COMBUSTIBLE

Para comenzar, AspenOne HYSYS® aún no incorpora ningún equipo que simule el funcionamiento de una pila de combustible, debido a esto se ha realizado una aproximación al comportamiento.

La forma de simular una pila de combustible se puede observar en la Figura 10:



- Reactor de conversión CRV-100

La reacción electroquímica (ec. 8) se da en un reactor de conversión en el cual se fija una conversión de H₂ del 85% ya que normalmente las pilas de combustible actuales no son capaces de hacer reaccionar el 100% del hidrógeno introducido, además, si se agotase todo el H₂, tendríamos un problema de eficacia debido a las bajas presiones parciales de hidrógeno a lo largo de la pila.



En lo que respecta a la energía eléctrica obtenida se simula con un intercambiador de calor ("E-101) a la salida del reactor en el cual retiramos 18000 KJ/h que equivalen a 5KW. El calor disipado viene determinado por el programa; este es el necesario para que la pila actúe a temperatura constante gracias a la función "ADJ-4" donde fijamos la temperatura de operación de la pila a su salida tras haber retirado la energía eléctrica y el programa nos devuelve el calor disipado en las condiciones de operación.

47

líquido se enfría debido a esta pérdida de energía y se vuelve a introducir para refrigerar la pila de combustible.

- Separador

El siguiente paso es diferenciar entre corrientes de ánodo y cátodo, esto se realiza mediante un separador ideal “X-101” teniendo en cuenta la composición de las corrientes que circularían por cada uno de ellos en un caso real. Se realiza de esta manera debido a que AspenOne HYSYS® no permite separar las dos corrientes vapor de una forma alternativa. Por el ánodo sale el agua, el CO₂ y el hidrógeno que no ha reaccionado, por el cátodo sale el oxígeno y el nitrógeno, ambas corrientes se utilizan para precalentar las respectivas corrientes a la entrada de la pila.

Es interesante mostrar a las densidades de corriente y voltaje de celda a las que trabaja la pila en cada caso, ya que podemos comprobar si están dentro del rango de voltaje óptimo de trabajo de celda (0,6-0,7). Estos datos se muestran en las siguientes tablas:

Tabla 20. Voltaje de celda y densidad de corriente $T_{pila}=800^{\circ}\text{C}$

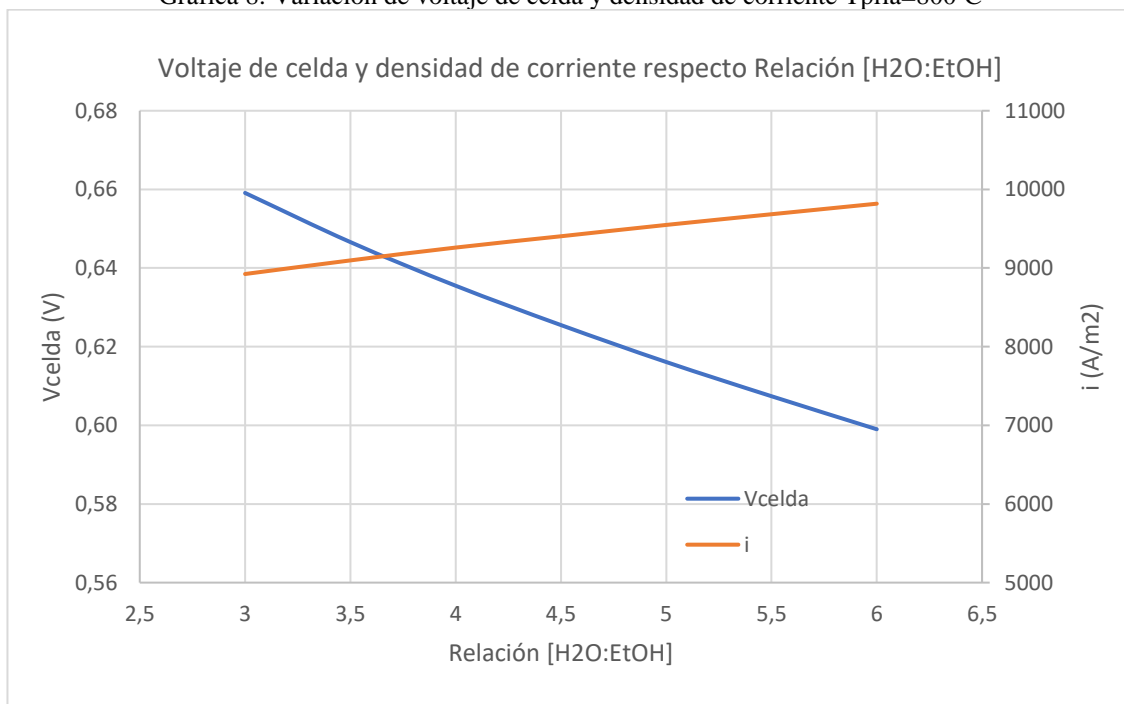
Relación [H ₂ O:EtOH]	V _{celda} (V)	i (A/m ²)
3,00	0,66	8924
3,50	0,65	9097
4,00	0,63	9260
4,50	0,63	9404
5,00	0,62	9548
5,50	0,61	9684
6,00	0,60	9818

Tabla 21. Voltaje de celda y densidad de corriente Relación [H₂O:EtOH] =3

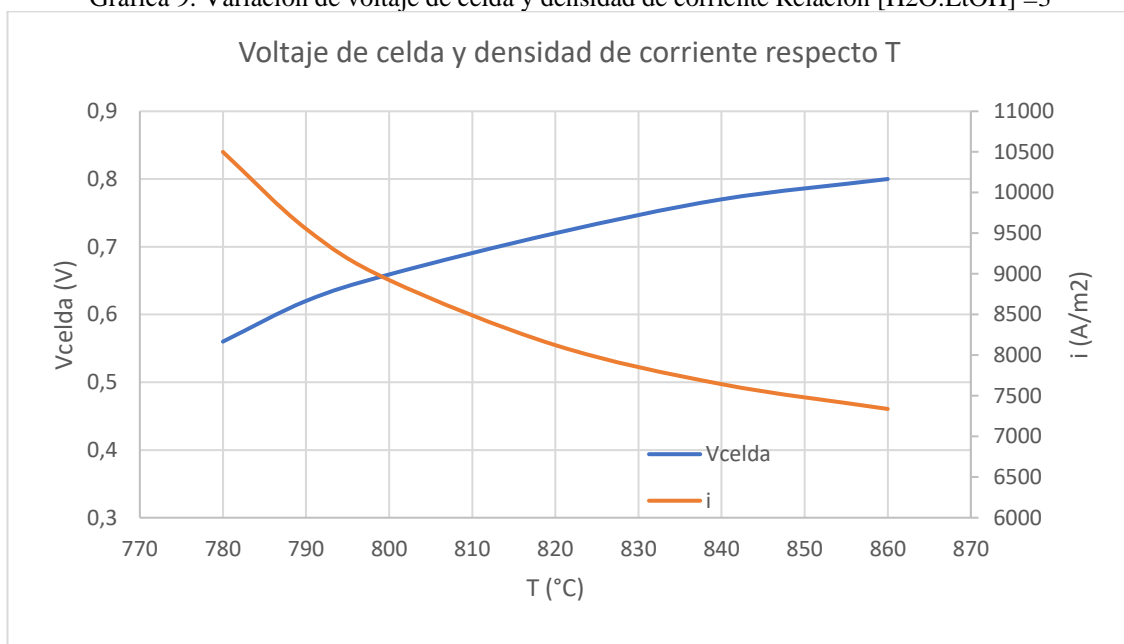
T(°C)	V _{celda} (V)	i (A/m ²)
780	0,56	10500
790	0,62	9554
800	0,66	8924
820	0,72	8123
840	0,77	7643
860	0,80	7338

Analizando las tablas anteriores se observa que para todas las relaciones de agua/etanol estudiadas el voltaje de celda está dentro del rango óptimo de funcionamiento. En cambio, las únicas temperaturas que trabajan a un voltaje de celda unitario entre 0,6 y 0,7 V son las comprendidas entre 785 y 810 °C.

Gráfica 8. Variación de voltaje de celda y densidad de corriente $T_{pila}=800^{\circ}\text{C}$



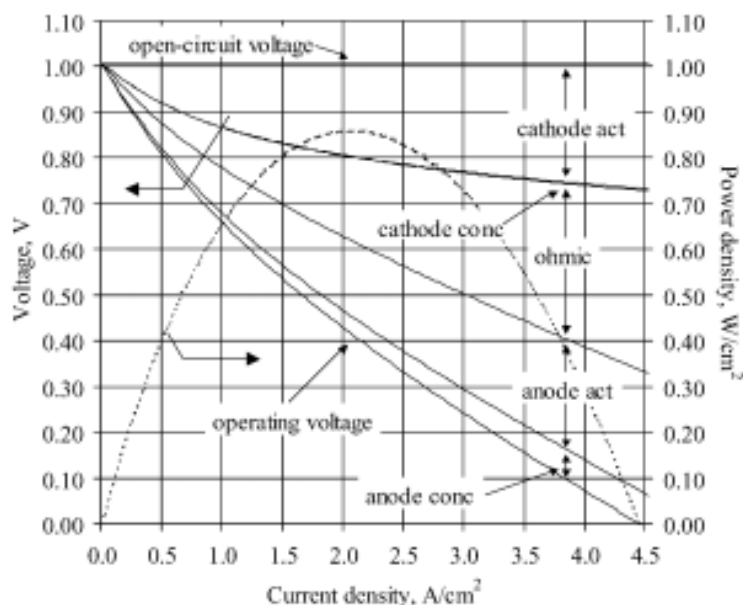
Gráfica 9. Variación de voltaje de celda y densidad de corriente Relación $[\text{H}_2\text{O}:\text{EtOH}] = 3$



Como se puede observar en las gráficas Gráfica 8 y Gráfica 9, para conseguir la potencia requerida en la pila diseñada es necesaria una relación entre voltaje al que actúa la celda y la densidad de corriente de esta.

ANEXO III.
EFEECTO DE LA TEMPERATURA EN
LA CELDA

Es básico conocer cómo afecta los sobrepotenciales a una celda individualmente en la pila de combustible. En la Gráfica 10 se puede observar en como varía cada una de las diferentes pérdidas que ocurren en la pila de combustible en función de la densidad de corriente para una determinada temperatura.



Gráfica 10. Pérdidas de voltaje en una pila de combustible, en inglés.

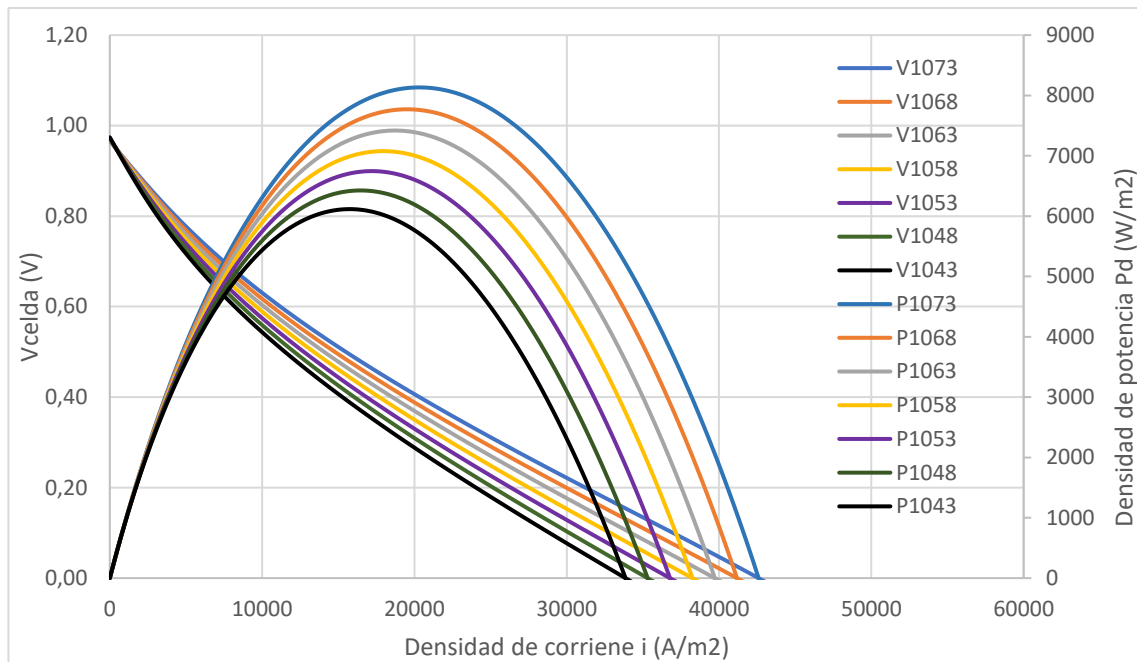
A continuación, se muestra cómo influyen los cambios en la temperatura de operación de la pila, tanto la disminución como el aumento de esta manteniendo constantes el resto de variables y con una relación de agua/etanol a la entrada del reformador igual a la estequiométrica en todos los casos.

DISMINUCIÓN DE LA TEMPERATURA

En la Gráfica 11 se puede observar el comportamiento de la pila de combustible ante una bajada en la temperatura de operación de la pila.

Una disminución de la temperatura provoca un aumento de las pérdidas en la pila de combustible, por tanto, disminuyen tanto voltaje de celda como la densidad de potencia para todas las densidades de corriente.

Una vez diseñada la pila para una temperatura determinada (un voltaje que no suele corresponder con el de máxima densidad de potencia ya que sino no podría actuar a temperaturas menores) provoca que al disminuir un poco la temperatura de operación, la pila encuentra una relación de voltaje-densidad de potencia adecuada con el objetivo de obtener la potencia necesaria, en cambio, si se sigue disminuyendo la temperatura llega un momento en el que ni aunque se trabaje para el máximo de densidad de potencia es posible la obtención de los kilovatios requeridos ya que no existe la relación entre densidad de corriente y voltaje de celda suficiente para ello.

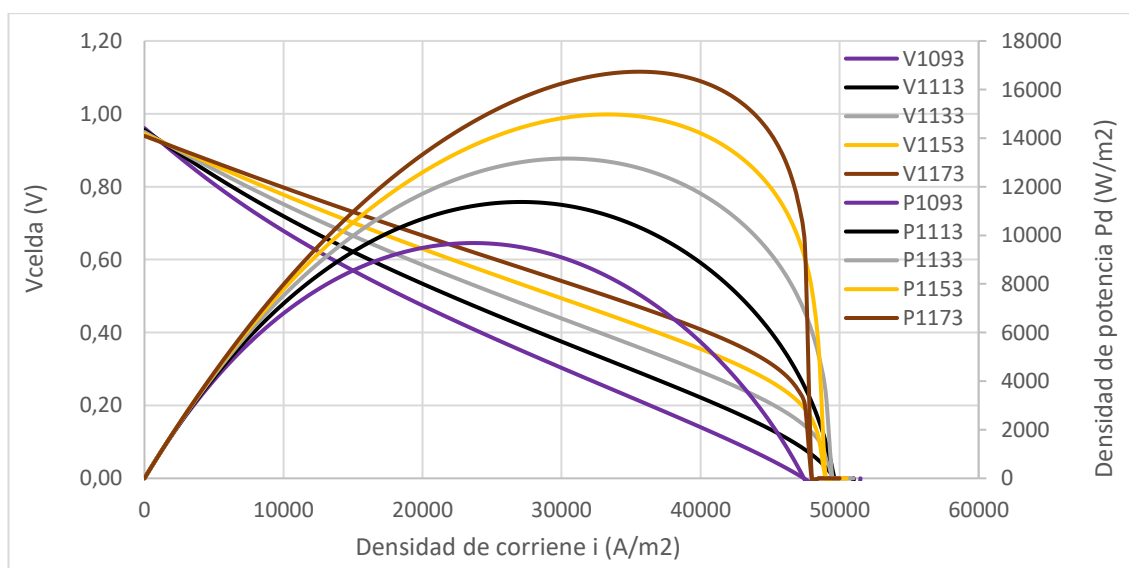


Gráfica 11. Voltaje de celda y densidad de potencia para diferentes densidades de corriente en temperaturas inferiores a 800°C. En la leyenda están las temperaturas correspondientes en grados Kelvin.

Por tanto, en nuestro estudio, para el numero de celdas estipulado a la temperatura de 800°C es posible la obtención de 5kW de potencia eléctrica por encima de los 775°C, en cambio, para menores temperaturas no existe esa relación voltaje de celda-intensidad de corriente necesario para obtener esa cantidad de potencia, por tanto, harían falta una mayor cantidad de celdas en la pila de combustible comentada.

AUMENTO DE TEMPERATURA

La influencia de un aumento de la temperatura de operación de la pila se puede observar en la Gráfica 12



Gráfica 12. Voltaje de celda y densidad de potencia para diferentes densidades de corriente en temperaturas superiores a 800°C. En la leyenda están las temperaturas correspondientes en grados Kelvin.

La forma de las gráficas conforme aumenta la temperatura va cambiando y vemos una curvatura final en el valor del voltaje, esto es debido a que, para menores temperaturas, las pérdidas por concentración no afectan apenas, en cambio a temperaturas altas estas comienzan a ser significantes.

También se puede observar en la Gráfica 12 que un aumento en la temperatura de operación en ningún momento va a impedir la obtención de los 5 kW de potencia pertinentes, lo único que ocurrirá es que lo conseguirá a diferentes relaciones de densidad de corriente-voltaje de celda. Si la temperatura es muy alta aumentará la degradación de los materiales lo que disminuirá la vida útil de la pila de combustible

ANEXO IV

TABLA DE VALORES

R	8,31	J mol ⁻¹ K ⁻¹
n	2,00	adim
F	96487,00	C mol ⁻¹
τ_{ánodo}	6,60E-04	m
τ_{cátodo}	3,00E-05	m
τ_{electrolito}	2,00E-05	m
τ_{interconexión}	1,20E-03	m
σ_{ánodo}	8,00E+04	Ω ⁻¹ m ⁻¹
σ_{electrolito}	33400exp(-10300/T)	Ω ⁻¹ m ⁻¹
σ_{cátodo}	8,40E-03	Ω ⁻¹ m ⁻¹
D_{eff,ánodo}	1,37E-05	m ² s ⁻¹
D_{eff,cátodo}	3,66E-05	m ² s ⁻¹
ε_p	0,30	adim
τ_{tortuosidad}	6,00	adim
α	0,50	adim
E_{ánodo}	140,00	kJmol ⁻¹
E_{cátodo}	137,00	kJmol ⁻¹
k_{ánodo}	6,54E+11	A m ⁻²
k_{cátodo}	2,35E+11	A m ⁻²
A_{celda}	0,014	m ²
A_{celdaef}	0,01	m ²
N^oceldas	85,00	adim
V_{pila}	2,36E-03	m ³
U_f	85,00	%
Aire_{ratio}	8,50	[adim]