



Trabajo Fin de Grado

Estudio de viabilidad de la incorporación de un sistema de propulsión sin ruido basado en un reformador y una pila de combustible alimentado por bioetanol en un submarino

Feasibility study of the incorporation of a noise-free propulsion system based on a reformer and a fuel cell powered by bioethanol in a submarine

Autor

Francisco de Asís Lacruz Sanz

Directores

Enrique Romero Pascual

Jaime Soler Herrero

Titulación

Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

Escuela de Ingeniería y Arquitectura.

2024

Índice

INTRODUCCIÓN	7
Objetivo del proyecto	7
Justificación	7
MARCO TEÓRICO	8
El submarino	8
El submarino diésel	8
El sistema propuesto	9
El bioetanol	9
La pila de combustible	10
LA INSTALACIÓN.....	12
El reformador	13
La pila	13
Voltaje de celda	13
La refrigeración	14
LAS EFICIENCIAS.....	16
Eficiencia eléctrica de la pila	16
Eficiencia eléctrica de la instalación.....	17
SIMULACIÓN.....	17
Sistema 1	18
Sistema 1 simple	18
Si se calienta la entrada de aire al combustor.....	20
Si se calienta la corriente combustible	21
Aumento de la temperatura de reformado vs temperatura combustible	22
Sistema 2	26
Si solamente se introduce la salida del ánodo en el sistema compresor-turbina.....	27
COMPARACIÓN	31
CONCLUSIONES	33
Bibliografía	34
ÍNDICE ILUSTRACIONES	40

ÍNDICE TABLAS	41
ÍNDICE GRÁFICAS.....	42
ANEXO I EL SUBMARINO.....	44
Consumo	46
Potencia de la propulsión	47
Cálculo de resistencias del submarino.....	51
Potencia total necesaria	54
ANEXO II LA PILA.....	55
Las pila SOFC.....	56
Materiales de la pila	59
Durabilidad.....	61
Degradación del Cátodo.....	61
Degradación del Ánodo	62
Degradación del Electrolito.....	62
Degradación del Soporte Metálico	63
ANEXO III MODELADO DE LA PILA.....	64
El voltaje de Nernst.....	65
Sobrepotencial óhmico.	65
Sobrepotencial de activación	66
Potencia.....	68
Temperatura de operación.....	69
ANEXO IV DIAGRAMAS DE INSTALACIÓN COMPLETOS	70
ANEXO V. EL REFORMADO.....	75
El catalizador	75
Los valores de K.....	76
El volumen del reformador.....	78
ANEXO VI TABLAS Y GRÁFICAS.....	81
Relación agua etanol para instalación turbina	81
Relación agua etanol para instalación turbina y precalentamiento de aire	82
Relación agua etanol para instalación turbina y precalentamiento corriente de entrada al combustor.....	83

Estudio de viabilidad de la incorporación de un sistema de propulsión sin ruido basado en un reformador y una pila de combustible alimentado por bioetanol en un submarino

Aumento temperatura reformado y calentamiento de la corriente de entrada combustor.....	84
Compresor y turbina de alta presión.....	86
Introducimos la salida del ánodo en el sistema compresor turbina.....	87
Aumento temperatura reformado y calentamiento de la corriente de salida del cátodo.....	88
Valores de K_i respecto a la temperatura.....	89
Reformado Tablas	90
Gráficas Reformado.....	97
Datos celda.....	102

Resumen

Las tecnologías de hidrógeno y en concreto las pilas de combustible están avanzando mucho los últimos años. Uno de los fines de estas tecnologías es el de sustituir a los motores de combustión o al menos disminuir la producción de esto. Se presenta entonces la pregunta: ¿podrían sustituir al generador diésel de un submarino?

Los submarinos son increíbles obras de ingeniería capaces de navegar bajo la superficie del agua y son una herramienta vital de la marina. Para obtener energía muchos hacen uso de enormes generadores diésel, muy ruidosos. La pila de hidrógeno en cambio no produce el ruido de un motor de explosión, por ello es de utilidad la comparación de este trabajo.

A continuación, se explorará los parámetros de pila e instalación adecuados para el funcionamiento más eficiente. La instalación tendrá que producir 1250 kW de potencia a partir de bioetanol. Éste será calentado e introducido en un reformador, donde producirá hidrógeno, el cual a continuación entrará en la pila. Sin embargo, hay diferentes maneras de llevar a cabo esta tarea. Para averiguar la disposición adecuada se han simulado diferentes estructuras de instalación bajo diferentes factores.

Otro aspecto que se ha averiguado es la relación óptima agua: etanol a utilizar, la temperatura de reformado, y cómo afecta el cambio de estas variables a la instalación.

Por último, se ha procedido a comparar el sistema de pila de hidrógeno con el generador diésel, evaluando su rendimiento y cómo afecta esto al submarino.

Palabras clave

Hidrógeno, bioetanol, pila de hidrógeno, SOFC, submarino, marina, ejército, generador, reformador, defensa, pila de combustible, óxido sólido, soporte metálico.

Abstract

Hydrogen technologies and in particular fuel cell technologies are rapidly developing in recent days. One of the end goals of these technologies is to replace combustion engines, or at least to diminish production. This poses the question: Could they replace a submarine's diesel generator?

Submarines are tremendous feats of engineering capable of navigating submerged and they are a key component of a navy. In order to obtain energy, most of them use very noisy diesel generators. In contrast, the hydrogen fuel cell barely produces any noise.

Next, we will explore the appropriate stack parameters and installation for the most efficient operation. The system will need to produce 1250 kW of power from bioethanol, which will be heated and introduced into a reformer, where it will produce hydrogen, and then this hydrogen enters the fuel cell. However, there are different ways to carry out this task. To determine the appropriate configuration, different installation structures have been simulated under several factors.

Another aspect that has been investigated is the optimal water-to-ethanol ratio to use, the reforming temperature, and how changes in these variables affect the installation.

Finally, the hydrogen fuel cell system has been compared to the diesel generator, evaluating its performance and how this affects the submarine.

Keywords

Hydrogen, bioethanol, hydrogen fuel cell, SOFC, submarine, navy, military, generator, reformer, defence, fuel cell, solid oxide, metallic support.

INTRODUCCIÓN

Objetivo del proyecto

El proyecto tiene como objetivo estudiar la viabilidad de un sistema de generación de electricidad mediante una pila SOFC en un submarino militar, sustituyendo al generador diésel, mediante el diseño preliminar de una planta de reformado de bioetanol y una pila SOFC, así como su simulación y comparación con el sistema de generador diésel actual.

Justificación

Tras el surgimiento de nuevos conflictos militares en los últimos años, como la guerra en Ucrania o el conflicto de Gaza, los estados miembros de la OTAN, especialmente los de la Unión Europea, han decidido aumentar el gasto en defensa y apostar por una mayor inversión en tecnologías militares [1].

Uno de los aspectos con posibilidad de mejora es la marina, en concreto los submarinos. El 30 de noviembre de 2023, la empresa estatal Navantia entregó a la marina española su primer submarino S-80 plus, el S-81 Isaac Peral, que es el primero de los 4 que recibirá en los próximos años [2]. Este encargo y su ejecución ha supuesto para Navantia afrontar el diseño de un submarino de nueva generación, silencioso, eficiente y que ha colocado a esta industria a la vanguardia del diseño de submarinos además de en un sobrecoste que a acabado con un precio total de casi 4000 millones de euros [3]. La pila de hidrógeno es una tecnología ya conocida e incluso utilizada en la última generación de submarinos como el S-80 o el 212A alemán [4], ya que no genera ningún ruido y es por lo tanto muy silenciosa, sin embargo, nunca se ha utilizado a gran escala para sustituir el generador diésel de estos submarinos. Al sustituir al generador diésel por la tecnología de hidrógeno no solo se disminuiría el ruido y aumentaría la eficiencia, sino que también contribuiría a la independencia energética de la marina española, una cuestión de suma importancia, especialmente tras la guerra de Ucrania.

Estudio de viabilidad de la incorporación de un sistema de propulsión sin ruido basado en un reformador y una pila de combustible alimentado por bioetanol en un submarino

Tras observar la situación geopolítica y los beneficios de la tecnología de hidrógeno, tocaba elegir el tipo de pila. En este caso, se decidió utilizar la pila de combustible de óxido sólido de soporte metálico plana, al ser la que mejor se adaptaba a los requerimientos (ver anexo I).

MARCO TEÓRICO

El submarino

Según la RAE, un submarino es una nave capaz de desplazarse bajo la superficie del agua, lo que implica muchas complicaciones. Una de ellas es cómo obtener energía para el correcto funcionamiento del submarino en un medio donde el aire es escaso. Para ello existen dos principales tipos, los submarinos diésel y los nucleares.

El submarino diésel



Ilustración 1. Submarino Aukus (Fuente: royalnavy)

El submarino diésel consta de un sistema generador de energía eléctrica mediante uno o varios generadores diésel que alimentan unas baterías y un motor eléctrico. El problema de este sistema es que el submarino debe estar en la superficie para poner en funcionamiento los generadores, que además generan mucho ruido que es fácilmente detectable. Para no ser tan visibles y así ser menos vulnerables los submarinos utilizan un snorkel que conecta el submarino con el aire exterior para permitirle “respirar” y, una vez cargadas las

Estudio de viabilidad de la incorporación de un sistema de propulsión sin ruido basado en un reformador y una pila de combustible alimentado por bioetanol en un submarino

baterías, el submarino apaga sus motores diésel para sumergirse y depender únicamente de sus baterías y su sistema AIP [5].

El sistema propuesto

Lo que se pretende en este trabajo es diseñar un sistema que sustituya el generador y el combustible diésel. En el primer caso se optará por una pila de combustible y puesto que esta va alimentada por hidrógeno, se precisa de un sistema para su obtención, un sistema de reformado de bioetanol. La razón por la cual no se utiliza hidrógeno directamente es debido a su difícil transporte y almacenamiento, entre otras razones, resultando en la utilización de bioetanol, al igual que la marina española para el S80.

El bioetanol

El bioetanol es un alcohol que se obtiene a partir de plantas ricas en celulosa o almidón, para su producción se fermentan estos compuesto y a continuación se destilan. Por último, se deshidrata absorbiendo el agua mediante tamices moleculares y así obtener etanol con una concentración mínima del 99,5% en volumen [6]. Las ventajas de este combustible es que produce menores emisiones de NO_x, CO₂ y partículas además de evitar el abandono del campo y contribuir al desarrollo industrial y agrario [7,8].

En el año 2019 se produjeron en España 433.136 t de bioetanol, marcando un crecimiento progresivo de la producción de esta sustancia, aunque aún estemos lejos del volumen de producción de países como EEUU, Brasil o Francia en el caso europeo [9,10].

Estudio de viabilidad de la incorporación de un sistema de propulsión sin ruido basado en un reformador y una pila de combustible alimentado por bioetanol en un submarino

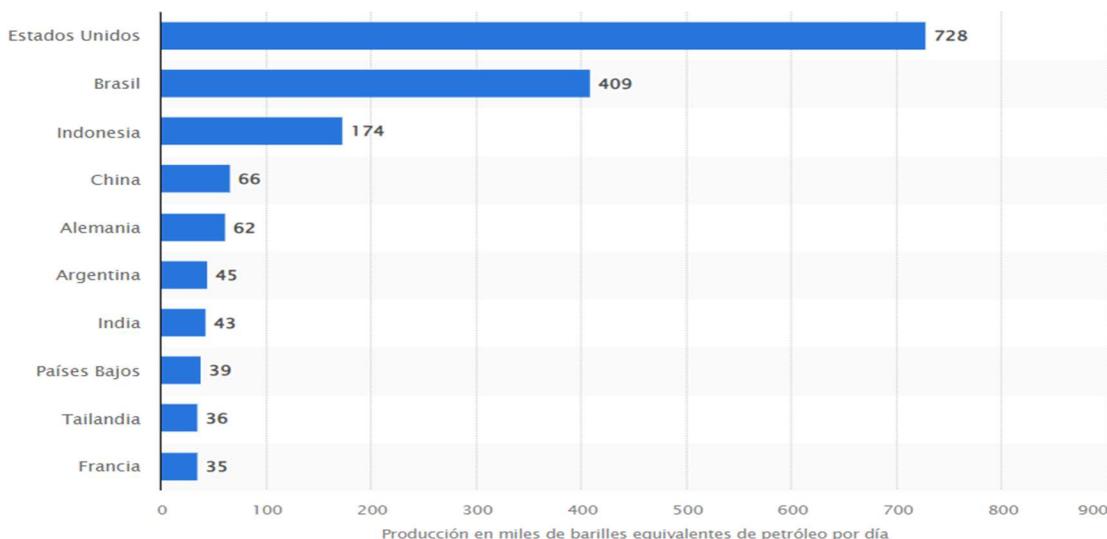


Ilustración 2. Producción de bioetanol en diferentes países. (Fuente Statista)

La pila de combustible

Una pila de combustible de Hidrógeno es un dispositivo que convierte la energía química de la reacción entre Hidrógeno y Oxígeno, generando agua, en energía eléctrica.



Ilustración 3. Esquema Pila (Fuente: Fuel Cell Fundamentals)

Hay numerosos tipos de pilas de combustible. En nuestro caso hemos utilizado la pila SOFC, que puede alcanzar una eficiencia muy alta y es más robusta especialmente ante el monóxido de carbono que se puede formar en la etapa de reformado. Además, son las que mayor eficiencia teórica tienen, pero poseen el inconveniente de operar a mayor temperatura y estar hechas por

Estudio de viabilidad de la incorporación de un sistema de propulsión sin ruido basado en un reformador y una pila de combustible alimentado por bioetanol en un submarino

materiales cerámicos que soporten estas condiciones, y por ello pueden tener problemas de sellado y resultar más cara [11].

Sin embargo, la SOFC de soporte metálico (MS-SOFC) consigue aminorar algunos de estos inconvenientes. La MS-SOFC utiliza placas metálicas porosas con un coeficiente de expansión similar a los demás elementos entre las celdas para aportar la rigidez estructural necesaria en vez de aumentar el grosor del ánodo, electrolito o cátodo. Las consecuencias de este tipo de pila son una menor utilización de materiales anódicos, catódicos y de electrolito, que conllevan una disminución del precio y del tamaño y una mayor robustez [12]. Por otra parte, esta pila aguanta mejor los cambios de temperatura y opera a temperaturas más bajas, mejorando sensiblemente su tiempo de arranque hasta 15 minutos o incluso menos [13].

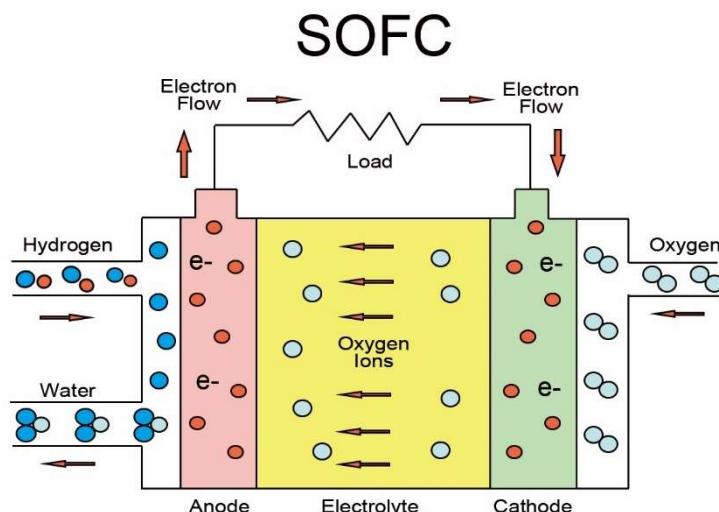


Ilustración 4. Esquema SOFC (Fuente: TOPTITECHS)

LA INSTALACIÓN

La instalación consta de numerosas partes que trabajan en armonía para el correcto funcionamiento del sistema. Para simularlas en su conjunto se ha utilizado el Software AspenHYSYS de AspenTech; un simulador de procesos químicos que permite analizar desde pequeños procesos, como el reformado, hasta instalaciones enteras, para simular la pila se han introducido los cálculos (Anexo III) en Excel y mediante una extensión de AspenHYSYS se han podido utilizar a la vez, complementandose.

- El reformador: El reformador se alimenta con el etanol y el agua caliente (vapor) para realizar la reacción de reformado y así obtener el hidrógeno necesario para el funcionamiento correcto de la pila.
- La pila: La pila SOFC de soporte metálico se alimenta con las corrientes de aire y de salida del reformador calientes y a presión para obtener energía eléctrica.
- El combustor: El combustor quema los restos de la corriente del ánodo con aire y se le añade etanol extra si el sistema lo necesita. Los gases de salida calientes intercambian energía térmica, necesaria para varias partes de la instalación.
- Sistemas compresor-turbina: La pila funciona bajo presión y necesita unos compresores para comprimir las corrientes de salida del reformador y de la entrada de aire. También se coloca un compresor para elevar hasta 6 bares los gases de salida del cátodo que van a la cámara de combustión y una bomba para comprimir e impulsar el etanol que se quiera añadir al combustor. Por último, se utiliza una turbina a la salida del combustor, para obtener energía eléctrica y así mejorar la eficiencia de la instalación.
- Sistema de calentamiento-refrigeración: Las corrientes de entrada al reformador y las de aire deben de ser calentadas mediante la utilización de los gases del combustor entre otros. Sin embargo, la pila debe de

ser refrigerada al perder una gran cantidad de energía en forma de calor. Además, la corriente de salida del compresor de la corriente de entrada del ánodo está demasiado caliente y también debe de ser refrigerada. Por último, los gases de la combustión aún calientes tras calentar las corrientes necesarias deben de ser refrigerados para poder reaprovechar el agua y de paso proporcionar calefacción para el submarino.

El reformador

El reformador es un reactor capaz de llevar a cabo la obtención de hidrógeno a través de etanol y agua. Con base en la literatura existente se ha escogido un reformador con un catalizador Rh/Pd-CeO₂ (0,5%Rh y 0,5%Pd en peso) que funciona mejor a altas temperaturas [14], [15]. La reacción que se lleva a cabo es endotérmica, es decir, absorbe energía cuando se produce. Por lo tanto, tiene que estar en contacto con una corriente lo suficientemente caliente para mantener su actividad. Las reacciones que se llevan a cabo son las siguientes:



La pila

En la pila se obtiene la energía eléctrica a partir de las reacciones químicas llevadas a cabo en su interior. El modelo electroquímico bajo el que se rigen los comportamientos de la pila [16] es complejo debido a los numerosos parámetros de los que depende y de las diferentes pérdidas a las que se ve expuesta.

Voltaje de celda

El voltaje de una celda viene determinado por la siguiente ecuación

Estudio de viabilidad de la incorporación de un sistema de propulsión sin ruido basado en un reformador y una pila de combustible alimentado por bioetanol en un submarino

$$V_{Cell} = U_{Nerst} - E_{Ohm} - E_{act} \quad (\text{ec.1})$$

Donde U_{Nerst} es el voltaje de Nernst de la celda, E_{ohm} es el sobrepotencial óhmico, y E_{act} el sobrepotencial de activación.

U_{Nerst} viene determinado por la siguiente ecuación:

$$U_{Nerst} = \frac{-\Delta g^0(T)}{2F} + \frac{RT}{F} \ln \left(\frac{p_{H_2} \cdot p_{O_2}^{1/2}}{p_{H_2O}} \right) = U_{Nerst}^0 + \frac{RT}{4F} \ln \left(\frac{p_{O_2} \cdot p_{H_2}^2}{p_{H_2O}^2} \right) \quad (\text{ec.2})$$

Siendo Δg^0 la energía de Gibbs de la reacción, F la constante de Faraday, R la constante de gases ideales, T la temperatura en Kelvin y p las presiones parciales para cada gas.

E_{ohm} se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$E_{Ohm} = J \cdot R_{ohm} \quad (\text{ec.3})$$

Siendo J la intensidad de la pila y R_{ohm} la resistencia óhmica.

Cómo se han calculado cada uno de estos parámetros será visto más a fondo en el anexo II.

La refrigeración

Como se ha mencionado anteriormente, encontramos dos sistemas de refrigeración principales en la instalación, uno de la pila, y otro de los gases de salida, ambos utilizan el mismo tipo de líquido refrigerante, Texatherm, un fluido sintético utilizado en diferentes industrias y cuyos datos se encuentran en AspenHYSYS.

El sistema de refrigeración de la pila es el sistema de refrigeración más complejo e importante de la instalación, y tiene numerosas fases. Por ello se explicará más detenidamente (Ver Ilustración 5).

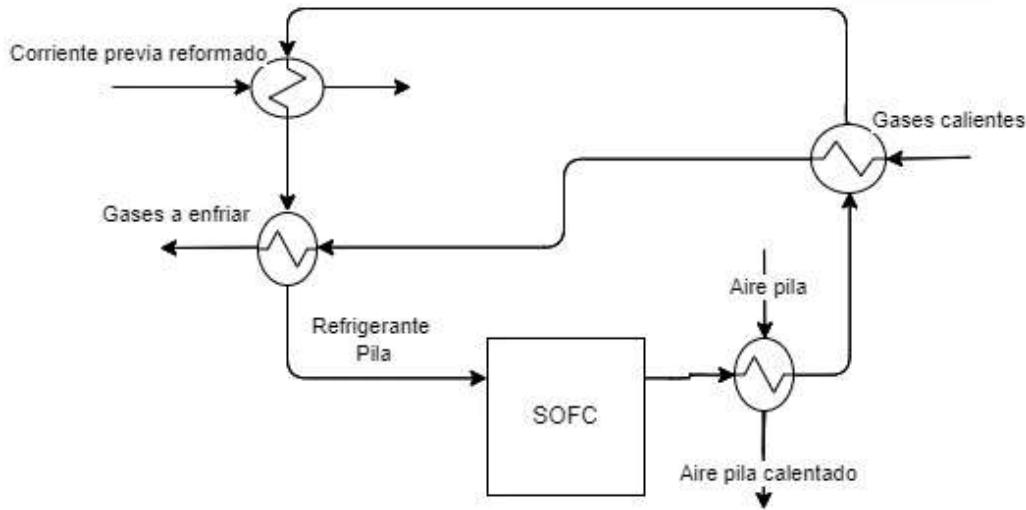


Ilustración 5. Esquema del sistema de refrigeración pila (Fuente: Elaboración propia)

- a) *Refrigeración de la pila.* El líquido refrigerante refrigerará la pila saliendo a 580°C de esta, la temperatura a la que entra el líquido influye en la cantidad de refrigerante necesario.
- b) *Calentamiento del aire del cátodo.* El aire del cátodo es calentado por la corriente de refrigeración de la pila, esto hace aumentar la temperatura del aire del cátodo, sin llegar a los 600°C deseados, pero lo suficiente para acercarse a esta temperatura, quitándole trabajo a la corriente de aire caliente proveniente de la turbina, reduciendo el caudal de aire caliente necesario para calentar el aire del cátodo y aumentando la disponibilidad de aire caliente para calentar la corriente de entrada al reformador. La ventaja de tener un caudal más alto de refrigerante de pila es que el aumento de temperatura del aire debido al refrigerante proveniente de la pila es mayor y menor es el aire caliente utilizado para calentar el aire del cátodo.
- c) *Refrigeración corriente aire caliente.* La temperatura del refrigerante de la pila es algo inferior a la del aire caliente cuando ambos salen de refrigerar el aire del cátodo. Por ello se introduce en un intercambiador de calor, reduciendo la temperatura del aire caliente y aumentando la del refrigerante de la pila.

- d) *Calentamiento corriente reformador.* El agua y el etanol deben de calentarse antes de entrar al reformador. Esto demanda mucha energía. La corriente del refrigerante de la pila puede precalentar esta corriente antes de ser calentada por la corriente de aire caliente sobrante, reduciendo la energía necesitada por esta última. Reducir la energía necesitada por la corriente del aire caliente proveniente de la turbina hace que se necesite añadir menos etanol en el combustor para aumentar la temperatura y el caudal del aire caliente, siendo así más eficiente todo el sistema.
- e) *Refrigeración gases de salida.* Ambas corrientes de aire caliente se juntan y se enfrian para llegar a la temperatura deseada y así poder condensar y reaprovechar parte del agua utilizada en el sistema. La intención de este intercambio de calor es doble, no solo se quieren refrigerar los gases de salida, sino que también se quiere calentar lo suficiente el refrigerante para volver a ser utilizado en la pila.

LAS EFICIENCIAS

Para poder realizar comparativas entre los diferentes modelos de pila o cómo afecta cada parámetro es necesario evaluar el rendimiento de cada ensayo. Con este fin se evaluaron las siguientes eficiencias [17].

Eficiencia eléctrica de la pila.

Es la relación entre la potencia obtenida por la pila y la cantidad de hidrógeno a la entrada por unidad de tiempo (flujo). La energía aportada por este se traduce en calor disipado y energía eléctrica.

$$\mu_{el,pil} = \frac{Potencia}{\dot{n}_{H_2} \cdot PCI_{H_2}} \quad (\text{ec.4})$$

Donde la energía contenida en el hidrógeno se puede determinar como el producto del flujo mísico (\dot{n}_{H_2}) multiplicado por el poder calorífico inferior del hidrógeno (PCI_{H_2}). Se utiliza el poder calorífico inferior porque toda la corriente

Estudio de viabilidad de la incorporación de un sistema de propulsión sin ruido basado en un reformador y una pila de combustible alimentado por bioetanol en un submarino

de salida de la pila (con el agua correspondiente) está en fase vapor, a la temperatura de operación de la pila.

Eficiencia eléctrica de la instalación

Es la relación entre la potencia obtenida por la instalación (todo el sistema prediseñado) y la cantidad de etanol consumido.

$$\mu_{el,inst} = \frac{Potencia}{\dot{n}_{EtOH} \cdot PCS_{EtOH}} \quad (\text{ec.5})$$

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, excepto una pequeña cantidad incluida en los gases de salida) y \dot{n}_{EtOH} es el flujo másico de etanol introducido al proceso (sistema), tanto al proceso de combustión como al de reformado con vapor de agua.

SIMULACIÓN

El objetivo de estas simulaciones es averiguar cuál es la configuración óptima para obtener una potencia similar al sistema generador de un submarino diésel como el modelo S80 español. Este modelo tiene 3 generadores diésel de 1200kW [18], sin embargo, estos motores no son la última tecnología en lo que a generadores diésel para submarino se refiere, además de ser imposible encontrar suficiente información para comparar ambos sistemas. Es por ello que se ha optado por comparar con un modelo más nuevo de 1250 kW de MTU del cual hay más información disponible [19]. Por ello, el objetivo de todas las simulaciones será alcanzar 1250 kW de potencia a través de la pila y la turbina y restando la consumida por los compresores y bombas de combustible. Los dos sistemas principales son:

1. Turbina a la salida del combustor.
2. Sistema compresor-turbina.

Se partirá del sistema 1 más básico, que es el de pila, combustor y turbina, sin precalentar las corrientes de entrada al combustor.

Sistema 1

Sistema 1 simple

Como se ha mencionado anteriormente, se utiliza el proceso de reformado de etanol para obtener hidrógeno y así poder operar la pila, se comenzará con la relación estequiométrica de 3 moles de agua por cada mol de etanol, y se aumentará hasta una relación de 5:1 para así observar el comportamiento de la instalación según la relación de agua:etanol (Ver ilustración 6 ó 19).

Las condiciones iniciales de operación suponen una temperatura de reformado de 600°C, una presión de pila de 6 bares y una temperatura de pila de 600°C. La razón por la que se escogen 6 bar de presión es debido a que en las simulaciones con diferentes tipos de instalación y de temperaturas de reformado, la instalación más eficiente es la que más bares tiene, y permite aumentar la temperatura de reformado más que las instalaciones con menor presión de pila. Además, la eficiencia de la pila es mayor debido a la mayor presión parcial. En el combustor se introducen la corriente saliente del ánodo, el etanol extra que se decida añadir para aumentar la temperatura, el aire necesario para la combustión y la corriente saliente del cátodo comprimida de nuevo a 6 bar, ya que pierde presión debido al consumo de oxígeno en la pila. Los resultados completos se encuentran en la tabla 10, Anexo VI. También se procurará que el voltaje de celda sea de 0,7 V o se acerque, ya que es el voltaje al que se suelen operar [20]; para ello se ha decidido que la intensidad por área de la pila tiene que ser de 4950 A/m² en todas las simulaciones y que la utilización de hidrógeno y oxígeno sea del 90%[21]..

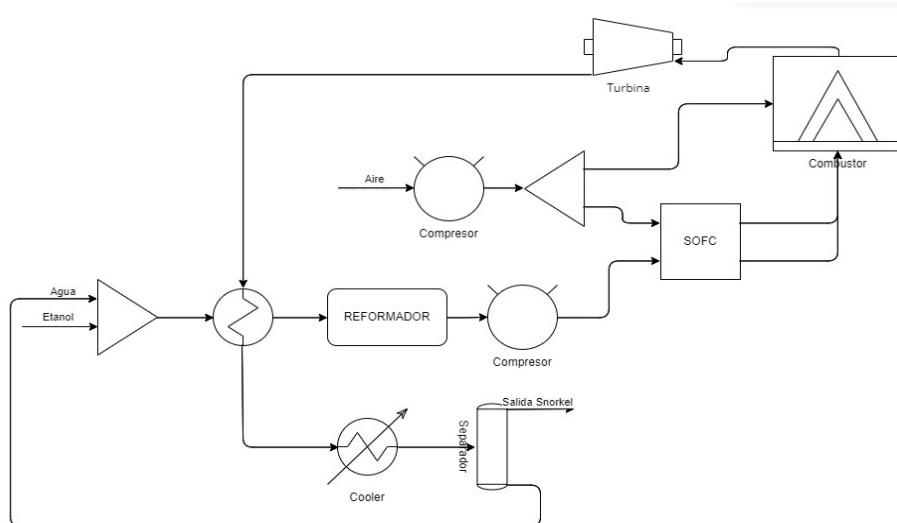
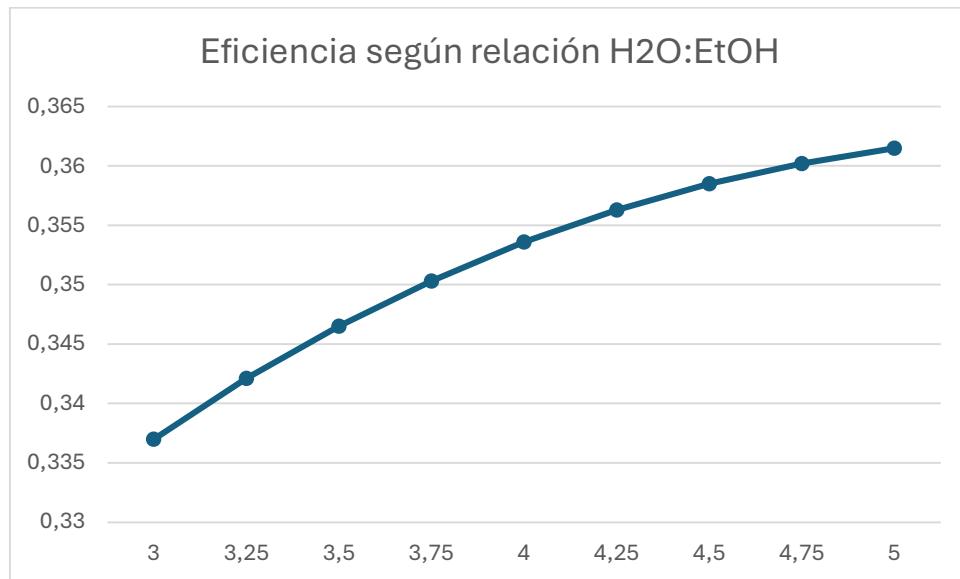


Ilustración 6. Esquema instalación simple (Fuente: Elaboración propia)

Conforme se aumenta la relación agua etanol, la producción de hidrógeno es más eficiente y se podría pensar que la evolución sería lineal, incluso que la pila incluso tendría que disminuir de tamaño, pero no es así.

Al aumentar la cantidad de agua se produce más hidrógeno con menos etanol. Sin embargo, la concentración de hidrógeno disminuye al haber más agua, y por lo tanto la presión parcial de este disminuye y aumenta la de agua, lo que disminuye la eficiencia de la pila. Otro doble problema de la mayor cantidad de agua es el aumento de caudal en el ánodo y la mayor conversión de metano en hidrógeno en el reformador. Al reformar el metano producido por la descomposición del etanol, se aumenta la eficiencia de la pila, al aumentar la producción de hidrógeno y la concentración de este. Sin embargo, en el combustor todo este metano se quema con el hidrógeno sobrante. Al tener menor cantidad de metano junto con la mayor cantidad de agua, se produce menos calor en el combustor y se calientan menos los gases de salida, disminuyendo la eficiencia y potencia de la turbina, obligando a la pila a aportar mayor potencia para entre las dos llegar a la nominal (1250 kW).

Pese a esto, la relación de agua etanol más eficiente ha demostrado ser la mayor de todas, la de 5:1, aunque la instalación parece tener un techo de eficiencia máxima por los motivos comentados en el párrafo anterior como se observa en la gráfica 1.



Gráfica 1. Eficiencia eléctrica de la instalación según relación agua etanol para instalación simple.
(Fuente: Elaboración propia)

Si se calienta la entrada de aire al combustor.

Se puede calentar el aire proveniente del snorkel antes de entrar al combustor, aumentando así la temperatura de salida de este y también la eficiencia de la turbina. Las condiciones de operación son las mismas que en el apartado anterior, es decir, misma temperatura de reformado, volumen, presión y temperatura de pila y misma potencia, 1250kW (Ver ilustración 7 ó 20).

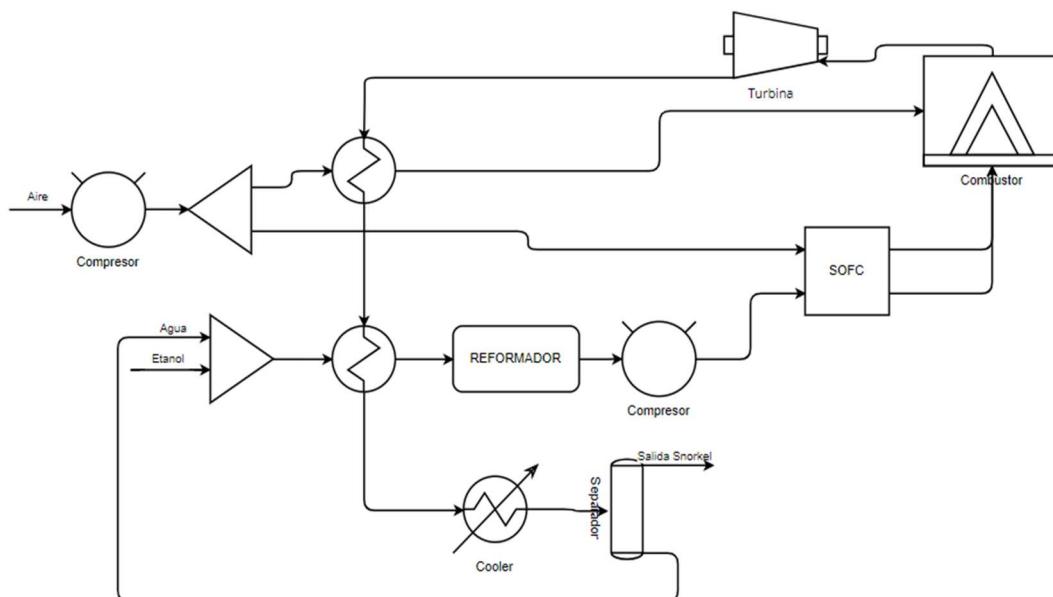
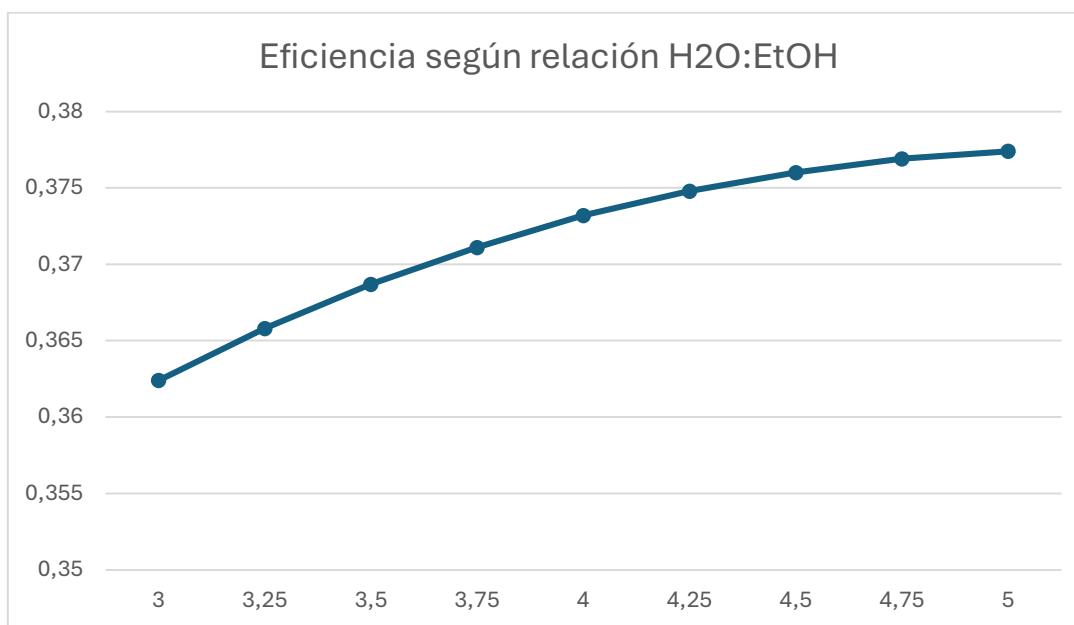


Ilustración 7. Esquema instalación con aire calentado (Fuente: Elaboración propia)

Estudio de viabilidad de la incorporación de un sistema de propulsión sin ruido basado en un reformador y una pila de combustible alimentado por bioetanol en un submarino

Los resultados se encuentran en la tabla 11 (Apéndice VI), cuyos valores de eficiencia eléctrica se observan en el gráfico 2, en el que se aprecia como la curva va creciendo cada vez a menos conforme se aumenta la relación agua etanol. Esto se debe a que conforme se va aumentando la relación agua etanol aumenta el caudal de agua, y el caudal de entrada al ánodo; también aumenta el caudal de aire necesario para la pila pero disminuye el de metano. Esto tiene como consecuencia que cada vez haya menos energía disponible para ceder a la corriente de aire de entrada al combustor; que a su vez esta sea cada vez mayor y por lo tanto precisa de mayor cantidad de energía para subir de temperatura la corriente de aire; y la corriente de aire caliente causa cada vez menos cambio de temperatura ya que la corriente de salida del ánodo que sale a 600°C es cada vez mayor. Pese a esto, la relación más eficiente sigue siendo la de 5:1, la más alta simulada en estas condiciones.



Gráfica 2. Eficiencia eléctrica de la instalación según relación H₂O:EtOH para instalación con aire caliente. (Fuente: Elaboración propia)

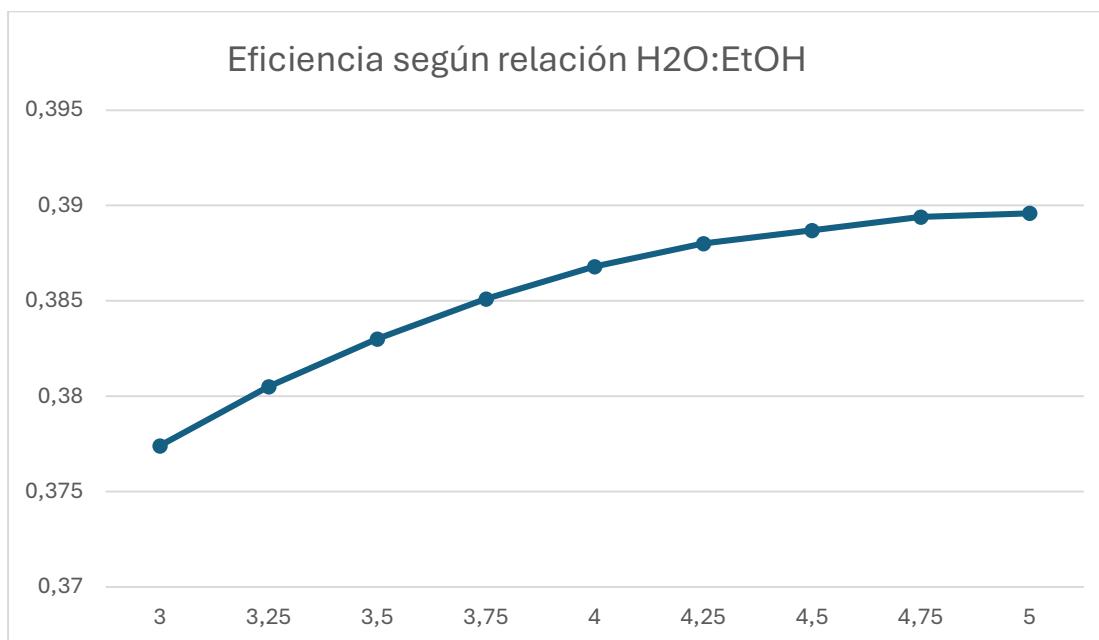
Si se calienta la corriente combustible.

Si ahora no se calienta únicamente el aire, sino que se calienta la mezcla de aire proveniente del snorkel y la salida del ánodo antes de entrar al combustor, la ventaja de esto es que permite aprovechar mucho más el calor disponible a la

Estudio de viabilidad de la incorporación de un sistema de propulsión sin ruido basado en un reformador y una pila de combustible alimentado por bioetanol en un submarino

salida de la turbina, ya que el caudal másico es mucho mayor. Las condiciones son las mismas que en los ensayos anteriores (Ilustración 21).

Esto permite una mayor eficiencia al aprovechar mejor el calor proporcionado por el combustor como se aprecia tanto en la gráfica 3 como en la tabla 12 (Apéndice VI). La forma de la curva es la misma que la resultante de las simulaciones en las que se calentaba únicamente el aire de la combustión, ya que ambas simulaciones se ven afectadas por los mismos factores.



Gráfica 3. Eficiencia eléctrica de la instalación según relación H₂O:EtOH para instalación con combustible calentador calentado. (Fuente: Elaboración propia)

Aumento de la temperatura de reformado vs temperatura combustible

Si se aumenta la temperatura de reformado, éste se hará más eficiente, lo que resultará más beneficioso especialmente para instalaciones con menores relación de agua etanol, ya que aquellas con mayor relación de agua etanol no tienen tanto calor disponible, cuesta más energía calentarlas y no tienen tanto margen de mejora de conversión.

Los resultados completos de las simulaciones se encuentran en el apéndice de tablas, los resultados de eficiencia se encuentran en el gráfico 4, en el cual cada línea corresponde a una relación de agua etanol y se evalúa la eficiencia

eléctrica de la instalación para diferentes temperaturas. El objetivo de cada simulación es aprovechar al máximo el trabajo ejercido por la turbina, calentando la corriente de entrada al combustor lo máximo posible, siempre teniendo suficiente energía restante para calentar la corriente de combustible de entrada al reformador y de aire a la pila.

En la gráfica se ve como para cada temperatura de reformado, la corriente con mayor relación de agua etanol es la que más eficiencia tiene, aunque para corrientes con relaciones de 4,25:1 y superior la mejora es muy pequeña. El problema se encuentra cuando la corriente de salida de la turbina no posee suficiente energía para calentar lo máximo posible la corriente del calentador y calentar lo suficiente las corrientes de reformado y de aire. En este caso hay que disminuir la temperatura de entrada del combustible del calentador, lo que disminuye la temperatura de la turbina, tanto de entrada como de salida; a esto hay que añadir que al perder potencia la turbina, se incrementa el tamaño de la pila y el combustible consumido por esta, lo que aumenta el caudal a calentar a la entrada del reformado, el caudal de aire, y el caudal de combustible a la entrada del combustor. Al aumentar el caudal de entrada al reformador, la efectividad de este disminuye, no siendo lineal el aumento de caudal. El único punto positivo de esto es que se aumenta la producción de metano y el porcentaje de éste, aumentando la temperatura de salida del combustor y por lo tanto la de la turbina.

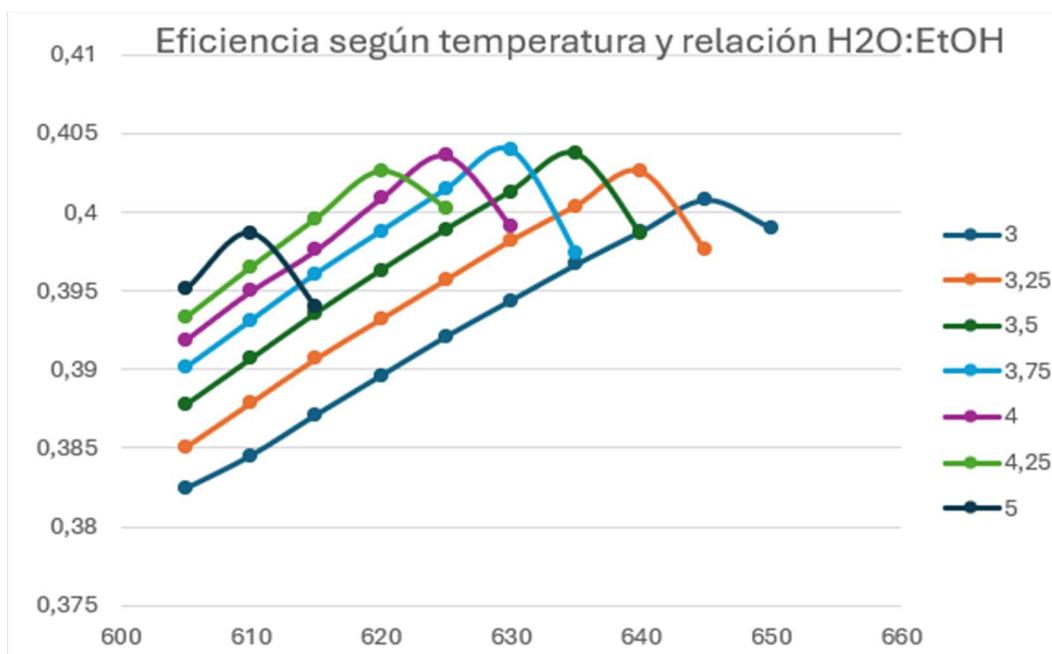
Cuando la simulación se encuentra en la situación descrita en el párrafo anterior, la eficiencia cae rápidamente, y llegada cierta temperatura de reformado, la energía aportada por la corriente de salida de la turbina no es suficiente para calentar siquiera todas las corrientes de la instalación.

Es en estas simulaciones en las que se puede apreciar la interacción entre reformador, pila, combustor y turbina y de donde se saca la siguiente información que confirma lo ya mencionado anteriormente:

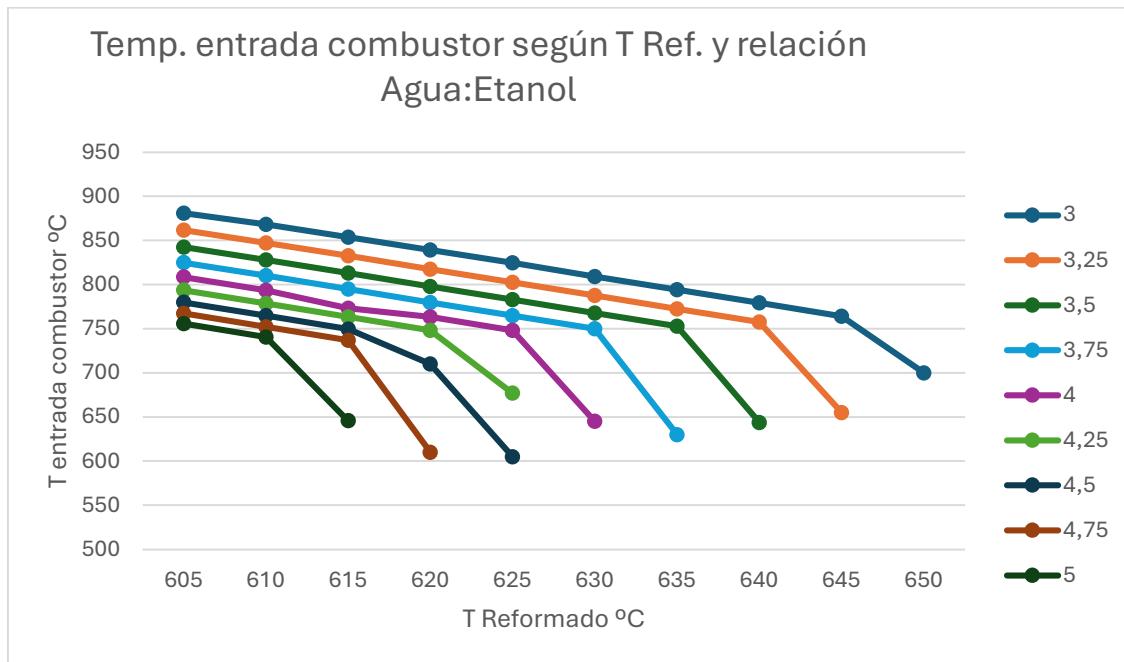
- En el caso en el que se tenga la misma temperatura de reformado y no se tenga que comprometer el funcionamiento de la turbina, la

instalación con mayor relación de agua etanol será la más eficiente.

- La disminución de la cantidad de metano producido afecta el rendimiento de la instalación, disminuyendo la temperatura de la turbina y por ende el funcionamiento de esta y su capacidad para calentar las corrientes requeridas. Esto se aprecia en la disminución de las temperaturas de calentamiento de la corriente de entrada al calentador en el gráfico conforme aumenta la temperatura de reformado.
- Existe un punto de máxima eficiencia de instalación eléctrica para cada relación de agua etanol, en la cual tanto la temperatura de reformado como el sistema de intercambio de calor tiene que aprovecharse al máximo.
- Tener un reformado más eficiente ayuda a mejorar la eficiencia de la instalación, pero no es el único factor a tener en cuenta a la hora de determinar la eficiencia eléctrica.



Gráfica 4. Eficiencia inst. según temp. reformado y relación Agua:Etanol. (Fuente: Elaboración propia)



Gráfica 5. *T entrada combustor según T reformado y relación H₂O:EtOH (Fuente: Elaboración propia)*

Por último, como se puede observar en las gráficas y en las tablas, el sistema más eficiente es el de relación 3,75:1 de agua:etanol, con una temperatura de reformado de 630°C; una temperatura de entrada al combustor de 749,8°C; y una eficiencia máxima de 40,22%, aunque se encuentra muy cerca de las eficiencias máximas de las simulaciones con proporción 3,5:1 (40,19 a 635°C) y 4:1 (40,18 a 625°C de reformado). Los datos obtenidos de la instalación se encuentran en la siguiente tabla (Tabla 1).

Tabla 1. Características Instalación (Fuente: Elaboración propia)

3,75:1	Ef. Eléc. pila	Ef eléctrica instal	nro celdas	Et comb kmol/h	T reformado
	0,6243	0,4040	30676,0164	0,0000	630,0000
	Et pila kmol/h	KMoles H ₂ /h	Conc. H ₂	Pot. Pila kw	Pot. Turbina (kW)
	8,127	31,16	0,477	1296,960	600,514

Cabe recalcar que en ninguna de las simulaciones se ha añadido etanol en el proceso de combustión para calentar la instalación. Añadir etanol al combustor aumenta la temperatura de la corriente de salida de este y la potencia entregada por la turbina, pero baja la eficiencia eléctrica de la instalación..

Sistema 2.

Si le añadimos un compresor y una turbina previo y posterior (respectivamente) a la cámara de combustión, se puede producir energía extra al comprimir a 30 bares y expandir a la presión atmosférica a continuación.

Para una temperatura de reformado de 600°C y las mismas condiciones iniciales que el sistema inicial, es decir, presión de 6 bares en la pila; reformador de 6 m³; 1250kW de instalación y reformado a 1 atmósfera, se añade tanto la salida del ánodo como la del cátodo al sistema compresor-turbina, comprimiendo ambas corrientes a 30bar , quemando su contenido y expandiéndolas después a 1 atmósfera (Ilustración 8 ó 23).

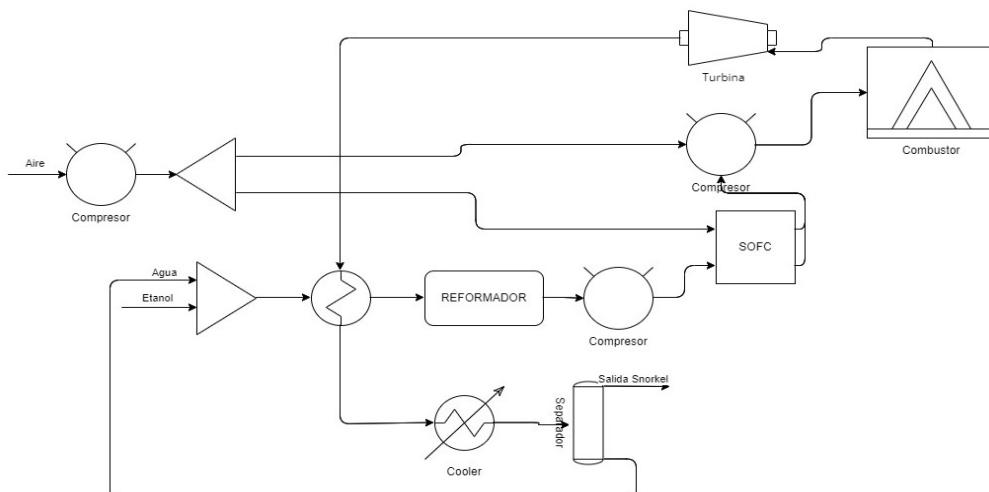
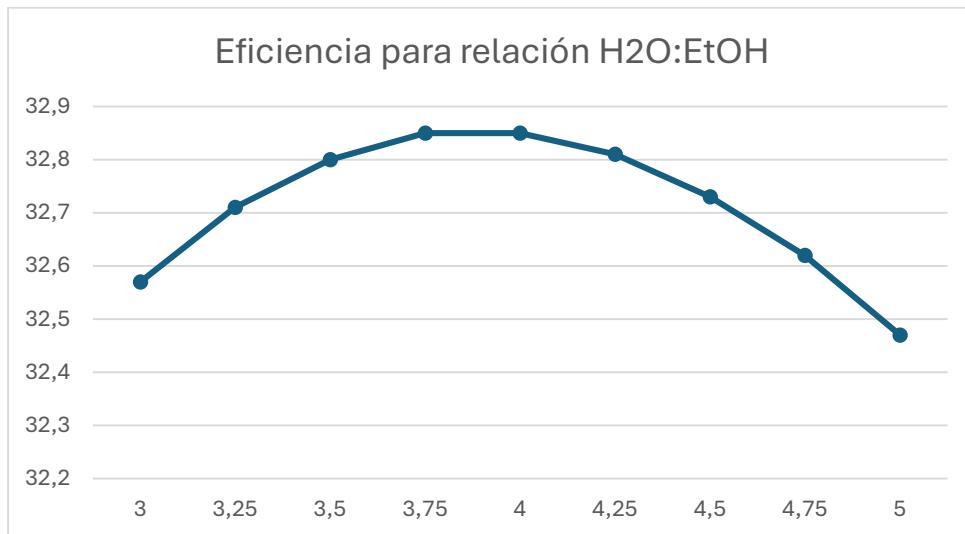


Ilustración 8. Esquema instalación con turbina compresor (Fuente: Elaboración propia)

A continuación se evaluará la eficiencia eléctrica de la instalación para diferentes relaciones de agua etanol.

La eficiencia eléctrica de la instalación es menor que la instalación con únicamente la turbina a 30bar, aunque en este caso la relación de agua:etanol que proporciona mayor eficiencia no es la de mayor proporción de agua (ver gráfica 6). Esto se debe a que se debe consumir más potencia para comprimir la corriente de entrada al combustor y que esta posee una menor concentración de metano, lo que hace que no aumente tanto la temperatura y la turbina entregue menos potencia.



Gráfica 6. Eficiencia eléctrica de la instalación según relación H₂O:EtOH para instalación con compresor-turbina. (Fuente: Elaboración propia)

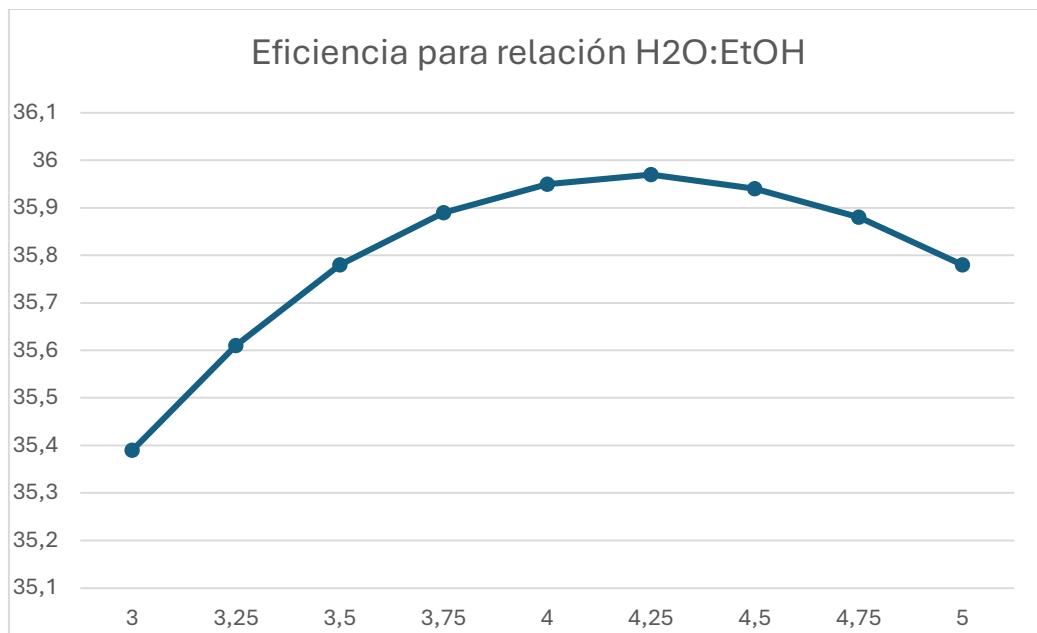
Si solamente se introduce la salida del ánodo en el sistema compresor-turbina.

Si únicamente se introduce la salida del ánodo en el compresor para luego pasar por el combustor y la turbina a 30 bar; y se pasa la salida del cátodo por una turbina que lo baje hasta 1 atmósfera para reunirlo con los gases para calentar., también se calentarán los gases de salida del cátodo antes de entrar en la turbina para aumentar la eficiencia (Ilustración 9 o 23). La ventaja de esto es que se gasta menos potencia en comprimir la corriente del cátodo, que contiene más de un 96% de nitrógeno y por lo tanto se consume energía en comprimir una corriente en su mayoría inerte en el anterior modelo de instalación, resultando en una temperatura de salida del combustor menor, y además tiene un mayor caudal a comprimir y se consume más energía.

Esto aumenta la eficiencia para todas las relaciones de agua etanol; disminuye el tamaño de la pila y permite aumentar la temperatura de salida del combustor y por lo tanto mejorar el funcionamiento de la turbina y disminuir la potencia consumida por el compresor a 30 bar. También se disminuye la potencia consumida por los compresores de aire y de la corriente del ánodo al disminuir el caudal a comprimir, aunque el aire necesario para la combustión no

Estudio de viabilidad de la incorporación de un sistema de propulsión sin ruido basado en un reformador y una pila de combustible alimentado por bioetanol en un submarino

disminuye tan drásticamente al no aprovechar el oxígeno de la corriente de aire catódica.



Gráfica 7 . Eficiencia eléctrica de la instalación según relación H₂O:EtOH para instalación con compresor turbina ánodo. (Fuente: Elaboración propia)

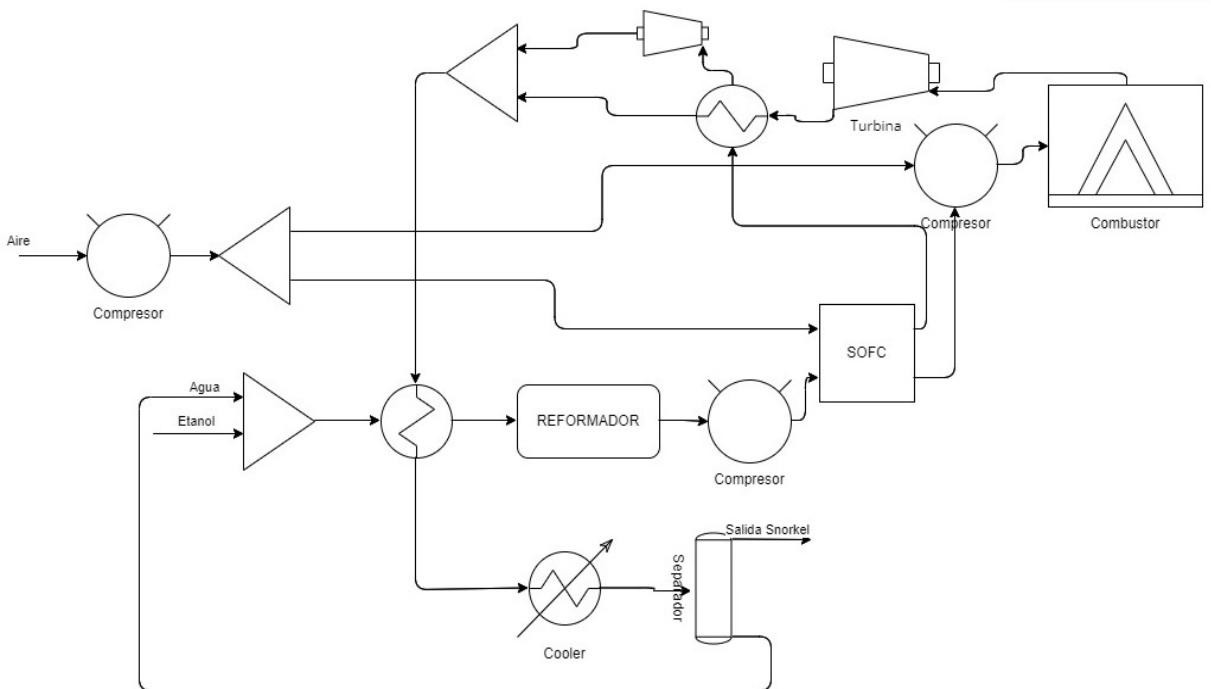
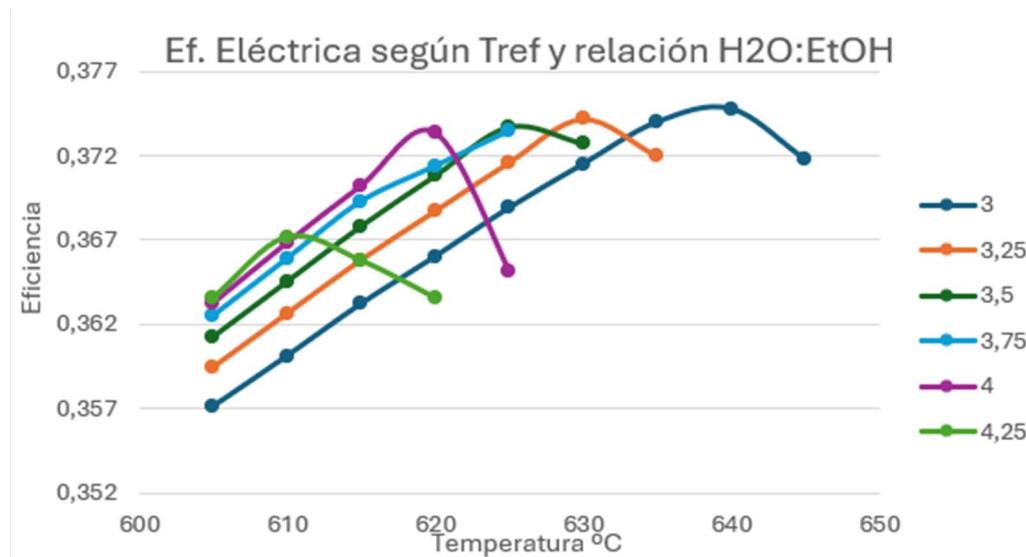


Ilustración 9. Esquema instalación con turbina-compresor y cátodo calentado aparte (Fuente: Elaboración propia)

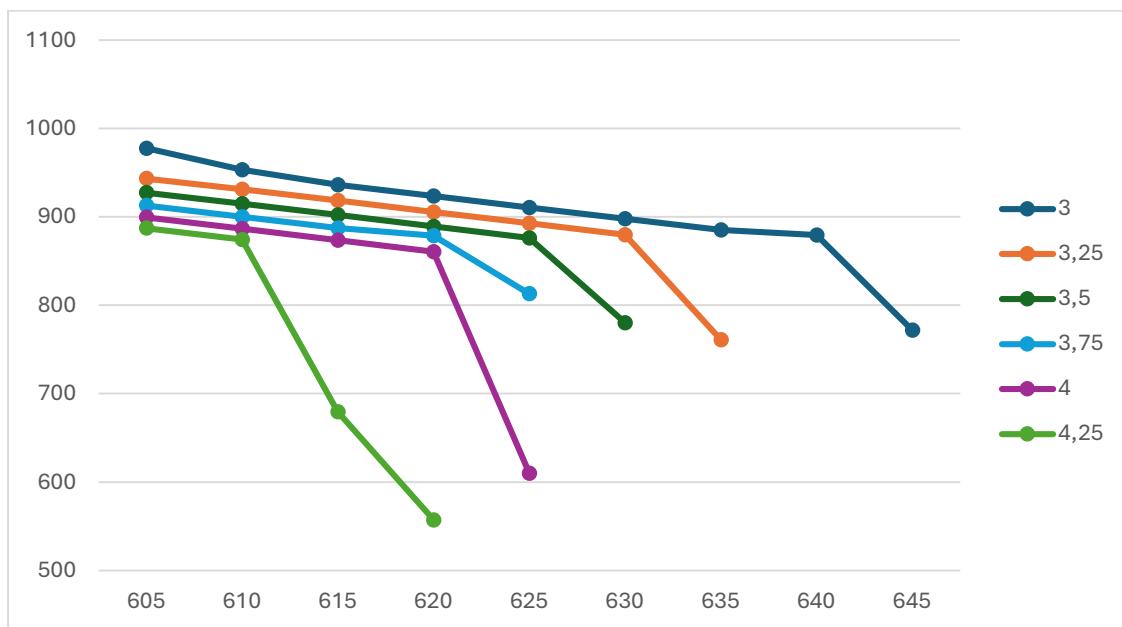
Aumento de la temperatura de reformado y la de turbina
Esto se hará únicamente para corrientes con menor relación agua:etanol, ya que serán las más beneficiadas al tener menor proporción de agua y por lo tanto ser más fáciles de calentar, tener un mayor margen de mejora en la producción de hidrógeno y obtener mayor temperatura a la salida del combustor. Tampoco se hará para corrientes que son menos eficientes y tienen una mayor proporción de agua, es decir, no se harán simulaciones para las relaciones de 4,5, 4,75 y 5 a 1 de relación agua:etanol.



Gráfica 8. Ef. eléctrica de la inst, según la T. reformado y Agua:Etanol (Fuente: Elaboración propia)

Los resultados de las simulaciones son un aumento de la eficiencia; y al igual que en el modelo de instalación con únicamente la turbina a la salida del combustor, llega un punto en el cual la temperatura de reformado es demasiado elevada para poder aportar todo el calor requerido y se baja la potencia máxima a entregar por la turbina. Todo ello se puede observar tanto en la gráfica 8 de eficiencia frente a la temperatura de reformado, y la gráfica 9 de temperatura de entrada a la turbina catódica frente a la temperatura de reformado, creadas a partir de los datos obtenidos en el Anexo VI (Tabla 16).

Estudio de viabilidad de la incorporación de un sistema de propulsión sin ruido basado en un reformador y una pila de combustible alimentado por bioetanol en un submarino



Gráfica 9 T entrada combustor según T reformado y relación $H_2O:EtOH$ (Fuente: Elaboración propia)

La eficiencia eléctrica de instalación máxima alcanzada por esta configuración es de 37,48% para una relación de 3:1 de agua:etanol (Tabla 2). Esto se debe a la gran cantidad de potencia consumida por el compresor y la necesidad de obtener la máxima temperatura posible a la salida del combustor. Esta eficiencia es sensiblemente inferior a la proporcionada por el sistema con únicamente una turbina a la salida del combustor, por ello se descarta este tipo de instalación (compresor-turbina) como sistema generador para el submarino.

Tabla 2. Datos instalación Compresión-Turbina más eficiente

Relación Agua : Etanol	T reformado(°C)	Ef eléctrica instal	T Combustible Combustor (°C)
3:1	640	0,3748	879,4

COMPARACIÓN

La instalación más eficiente es la que contiene una turbina a la salida del combustor (sin compresor anterior) y utiliza los gases de la turbina para calentar la salida del ánodo y el gas de entrada al combustor. Las especificaciones de la instalación son las siguientes (Tabla 3).

Tabla 3. Datos instalación final. (Fuente: Elaboración propia)

	Ef. Eléc. pila	Ef eléctrica instal	nro celdas	Intensidad (A)	T reformado
3:1	0,6243	0,4040	30676,0164	49,005	630,0000
	Et pila kmol/h	KMoles H2/h	Conc. H2	Pot. Pila kw	Pot. Turbina (kW)
	8,127	31,16	0,477	1296,960	600,514
	Ef. Eléc. pila	kg etanol/h	Conc. CH4	T Com. (°C)	Pot. Compresor (kW)
	31,1609	374,3935	0,0447	749,4000	647,4708
	Conc. CO2 salida	Kg CO2/h salida	Et comb kmol/h	kg CO/h salida	Pot. Por celda (W)
	0,083	454,66	0,0000	165,886	42,279

La eficiencia eléctrica de la pila es del 62,17%, demostrando la alta eficiencia de este tipo de pila de combustible. La instalación tiene una potencia de 1250 kW y 30677 celdas.

Las dimensiones de la pila variarán dependiendo de la configuración de ésta; en este caso se ha optado por 30 bloques, para lo cual el volumen de la pila será:

$$L_{celda} = \tau_{anodo} + \tau_{catodo} + \tau_{elect} + \tau_{soporte} + \tau_{canal} = 1,58 \text{ cm} \quad (\text{ec.6})$$

$$L_{bloque} = L_{celda} * n_{celda} + \tau_{canal} = 1,615 \text{ m} \quad (\text{ec.7})$$

$$V_{bloque} = L_{bloque} \cdot A_{celda} = 232,827 \text{ cm}^3 \quad (\text{ec.8})$$

$$V_{total} = V_{bloque} \cdot n_{bloques} = 698,5 \text{ dm}^3 \quad (\text{ec.9})$$

Donde τ es el espesor de los diferentes componentes de la celda, L_{celda} es la longitud total de celda, V_{bloque} es el volumen total de cada bloque, y V_{total} es el

volumen total de la pila de combustible de 1250 kW. Por lo tanto cada pila de 1250 kW ocupa 698,5 dm³, aproximadamente 0,7 m³ y tiene un consumo específico (C_e) de 374,3935 kg/h de etanol, o lo que es lo mismo; 299,515 g/kWh. Cabe recalcar que la parte que más ocupa de cada instalación de 1250 kW es el reformador, de 6 m³.

Por su parte, el motor diésel con el que se compara la pila tiene un C_e de 222 g/kWh en el modo eficiente, un 25,88% menos.

Si el submarino precisa de 450307,2 kWh de energía para cumplir con las especificaciones como se ha calculado en el Anexo I, entonces el depósito del submarino necesitará una masa de combustible en el depósito, M_{dep}

$$E_{sub} = 450307,2 \text{ kWh} = \frac{M_{dep}}{C_e} \quad (\text{ec.10})$$

Para la instalación de la pila de hidrógeno, se necesitaría una M_{dep} de 134874 kg o 134,87 toneladas de combustible. Para la instalación diésel se precisarían de 99968,2 kg o 99,97 toneladas de combustible. Si se dividen ambas masas por la densidad de cada combustible, obtenemos que el depósito de etanol ocuparía 170,94 m³ y el depósito diésel 117,61 m³.

Con esta comparativa se puede concluir que la instalación de hidrógeno ocupa más espacio y conlleva un mayor peso debido al aumento de la cantidad de combustible.

Los aspectos positivos de la instalación de hidrógeno son dos:

- **Sigilo:** Los motores diésel generan mucho ruido y emiten humo de color negro a alta temperatura. Las desventajas del ruido que generan hace que pueda ser detectado cada vez que recarga sus baterías, sea mediante snorkel o al aire libre. En cuanto al segundo aspecto, el humo emitido por el submarino diésel puede ser detectado mediante diferentes aparatos que detectan variaciones en la temperatura, sin embargo, los fabricantes de motores y submarinos van mejorando la tecnología snorkel, reduciendo la temperatura de los gases de salida.

- **Emisiones:** Los motores diésel emiten NO_x y SO₂ entre otros, que son altamente contaminantes y tienen efectos negativos en el medio ambiente.

CONCLUSIONES

La planta diseñada hace uso del sistema pila-turbina, que ha demostrado ser el más eficiente, con una pila de óxido sólido con soporte metálico de 30677 celdas y 42,279 W por celda. Esto se hace con el reformador funcionando a 630°C y la pila funcionando a 6 bar y 600°C. La relación adecuada de agua: etanol es de 3,75:1, y consume 374,3935 kg/h o 299,515 g/kWh de bioetanol.

Las ventajas de este sistema son su mayor sigilo debido principalmente al menor ruido, y sus emisiones, ya que no producen óxidos de nitrógeno ni SO₂.

Las desventajas son numerosas. Primero de todo es que se necesita mucho más combustible, un 34,91% más de masa, o un 45,34% más en volumen. Otro gran problema es el arranque: el tiempo de arranque de una pila SOFC de soporte metálico es mucho mayor que el de un motor diésel, lo que aumenta el factor de indiscreción. Por último, el sistema diésel es mucho más barato y es una tecnología mucho más madura. Esto aún no descarta completamente la tecnología de la pila de hidrógeno, ya que tiene mucho potencial de desarrollo.

El veredicto de este sistema es que aparte de que no es todavía viable ya que el precio sería muy elevado, el peso y el volumen del submarino aumentarían. Sin embargo, hacer cálculos similares a estos sería impensable hace una década. Por ello no se debería de descartar a futuro cuando esta tecnología alcance madurez, fundamentalmente por el sigilo obtenido, nada comparable al modelo diésel.

BIBLIOGRAFÍA

1. El economista (Abril 2024). *El gasto en defensa aumenta en España un 62,4% desde la llegada de Sánchez.*
<https://www.eleconomista.es/economia/noticias/12782086/04/24/el-gasto-militar-aumenta-en-espana-un-624-desde-la-llegada-de-sanchez.html>
2. La Moncloa (Noviembre 2023). *La Armada recibe el submarino S-81 'Isaac Peral', un hito histórico que sitúa a España en la vanguardia tecnológica naval.*
<https://www.lamoncloa.gob.es/serviciosdeprensa/notasprensa/defensa/Paginas/2023/301123-robles-submarino-isaac-peral.aspx>
3. La Vanguardia (Abril 2022). *S80 plus, el submarino que llegó tarde.*
<https://www.lavanguardia.com/politica/20210422/6989448/s80-plus-submarino-llego-tarde.html>
4. Thyssenkrupp marine systems (Consultado en Agosto 2024) *HDW class 212a submarine.*
<https://www.thyssenkrupp-marinesystems.com/en/products-services/submarines/class-212>
5. Burcher, R., Rydill, L. J. (1994). *Concepts in Submarine Design. Powering of submarines* (pp. 124-120). Cambridge: Cambridge University Press.
6. Bio4 (Consultado Agosto 2024) *Productos/bioetanol*
<https://www.bio4.com.ar/productos/bioetanol/#:~:text=El%20bioetanol%20es%20un%20alcohol,las%20naftas%20en%20diferentes%20proporciones.>
7. Asociación española del bioetanol (Consultado Agosto 2024) *¿Qué es el Bioetanol?*
<https://bio-e.es/>
8. Repsol (Consultado Agosto 2024) *¿Qué es el bioetanol y para qué sirve?*
<https://www.repsol.com/es/energia-futuro/movilidad-sostenible/bioetanol/index.cshtml>

9. Asociación española del bioetanol (Noviembre 2020) *La cuota en España de la industria nacional del bioetanol aumentó en 2019 hasta el 95,6%.* <https://bio-e.es/estudio-del-impacto-macroeconomico-de-las-energias-renovables-en-espana-de-appa/#:~:text=La%20producci%C3%B3n%20de%20las%20cuatro,con%20respecto%20al%20a%C3%B3n%20anterior>
10. Tecnicaña (Abril 2024) *Ranking mundial de los principales productores de biocombustible en 2022.* <https://tecnicana.org/2024/04/26/mercados/ranking-mundial-de-los-principales-paises-productores-de-biocombustible-en-2022/#:~:text=Los%20cinco%20mayores%20productores%20de,%2C%20Argentina%2C%20Francia%20y%20Alemania>
11. EG&G Technical Services, Inc., US Department of Energy (2004). Fuel Cell Handbook (p. 31).
12. Tucker, Michael C., (2010). Progress in metal-supported solid oxide fuel cells: A review. *Journal of Power Sources*, Volume 195, Issue 15 (pp. 4570-4582) <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.02.035>.
13. Udomsilp D., Rechberger J., Neubauer R., Bischof C., Thaler F., Schafbauer W., Menzler N. H., de Haart L.G.J., Nenning A, Opitz A. K., Guillou O., Bram M.. (2024), Metal-Supported Solid Oxide Fuel Cells with Exceptionally High Power Density for Range Extender Systems. *Cell Reports Physical Science*, Volume 1, Issue 6 (pp. 2666-3864) <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2020.100072>
14. López, E., Divins, N. J., Anzola, A., Schbib, S., Borio, D., Llorca, J. (2013). Ethanol steam reforming for hydrogen generation over structured catalysts. *Int. J. Hydrogen Energy*, 38(11), 4418 4428; <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.01.174>
15. Sánchez Sánchez R. (2021). *Simulación de un reactor de reformado con vapor de etanol para alimentar una pila de combustible tipo PEM.* [Trabajo de Fin de Grado, Universidad de Zaragoza] <https://zaguan.unizar.es/record/110208>

16. R.T. Leah, N.P. Brandon, P. Aguiar. (2004). Modelling of cells, stacks and systems based around metal-supported planar IT-SOFC cells with CGO electrolytes operating at 500–600°C. *Journal of Power Sources*, Volume 145, Issue 12 (pp. 336–352)
DOI:10.1016/j.jpowsour.2004.12.067
17. Sánchez Romero P. (2019). *Aplicación de una pila SOFC a un sistema combinado de producción de electricidad y calor alimentado con bioetanol*. [Trabajo de Fin de Grado, Universidad de Zaragoza]
<https://zaguán.unizar.es/record/87286>
18. Navantia (Consultado Julio 2024) *Líneas de negocio, submarinos*
<https://www.navantia.es/es/líneas-de-negocio/submarinos/#ficha>
19. Keller B., MTU Solutions, Rolls-Royce Power Systems, Comunicación personal (23 Noviembre 2023).
20. Chao Su, Zongping Shao, Ye Lin, Yuzhou Wu and Huanting Wang (2012). Solid oxide fuel cells with both high voltage and power output by utilizing beneficial interfacial reaction. *Physical Chemistry Chemistry Physics*, Volume 14 (pp. 12173–12181)
DOI:10.1039/c2cp41166k
21. EG&G Technical Services, Inc., US Department of Energy (2004). Fuel Cell Handbook (p. 2.25).
22. Gorka L. Martínez Mezo. (24 Abril 2021) El submarino S-80, futuro del arma submarina española. *Foro Naval*.
<https://foronaval.com/2021/04/24/el-submarino-s-80-futuro-del-arma-submarina-espanola/>
23. Rothmund M. (Diciembre 2014) Underwater. *MTU solutions*.
<https://www.mtu-solutions.com/eu/en/stories/marine/military-governmental-vessels/underwater.html>
24. Burcher, R., Rydill, L.J. (1994). *Concepts in Submarine Design*. Generating a concept design (pp. 257-258). Cambridge: Cambridge University Press.
25. Vogler F., Sattler G. (2016). Hydrogen fueled marine transportation; *Compendium on Hydrogen energy*, Volumen 4 (pp. 35-65)
<https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-364-5.00003-8>

26. Stenard, J. K. (1988). *Comparative Naval Architecture of Modern Foreign Submarines*, Master's Thesis, Ocean Engineering Department, Massachusetts Institute of Technology, Mayo 1988.
27. Mart P. L., Margeridis J. (1995). *Fuel Cell Air Independent Propulsion of Submarines*. Defence Science and Technology Organization Canberra (Australia). <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA304112>
28. Burcher, R., & Rydill, L. J. (1994). *Concepts in Submarine Design*. Appendix V (pp. 290-292). Cambridge: Cambridge University Press.
29. Molland, A. F., Turnock, S. R., & Hudson, D. A. (2011). *Ship Resistance and Propulsion: Practical Estimation of Propulsive Power*; Model–Ship Extrapolation (pp 70-84): Cambridge: Cambridge University Press.
30. Molland, A. F., Turnock, S. R., & Hudson, D. A. (2011). *Ship Resistance and Propulsion: Practical Estimation of Propulsive Power*; Resistance design data (pp 245-249): Cambridge: Cambridge University Press.
31. Mascaraquez Remírez, Asensio, C., Universidad Politécnica de Cartagena, Comunicación personal (2 julio 2024)
32. Burcher, R., & Rydill, L. J. (1994). *Concepts in Submarine Design*. Appendix V (pp. 292-293). Cambridge: Cambridge University Press.
33. MacPherson D.,(2020). Electric Motor Selection for Underwater Vehicles: Considerations of Partial Load Efficiency, *Marine Technology news*, (Consultado Agosto 2024)
<https://www.marinetechnews.com/news/electric-motor-selection-underwater-600118>
34. Pete, (2022) *Submarine and other matters*,(Consultado Agosto 2024)
<https://gentleseas.blogspot.com/2022/11/c-on-submarine-hotel-load-power-uses.html>
35. Daghigh, R., Shafieian, A. (2016). An investigation of heat recovery of submarine diesel engines for combined cooling, heating and power systems. *Energy Convers. Manag.* 108, 50–59.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.11.004> .

36. Andrew L. Dicks, David A. J. Rand (2018) *Fuel Cell Systems Explained*. Introduction (pp. 14-16). John Wiley & Sons.
37. Andrew L. Dicks, David A. J. Rand (2018) *Fuel Cell Systems Explained*. Medium and High Temperature Fuel Cells (pp. 207-226). John Wiley & Sons.
38. Kuterbekov, K.A., Nikonorov, A.V., Bekmyrza, K.Z., Pavzderin, N.B., Kabyshev, A.M., Kubanova, M.M., Kabdrakhimova, G.D., Aidarbekov, N. (2022). Classification of Solid Oxide Fuel Cells. *Nanomaterials*, 12, 1059. <https://doi.org/10.3390/nano12071059>.
39. P. Breeze (2017). An introduction to fuel cells, *Fuel Cell*. 1–10, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101039-6.00001-7>.
40. Roehrens D, Packbier U, Fang Q, Blum L, Sebold D, Bram M, Menzler N. (2016). Operation of Thin-Film Electrolyte Metal-Supported Solid Oxide Fuel Cells in Lightweight and Stationary Stacks: Material and Microstructural Aspects, *Materials*, 9(9),762. <https://doi.org/10.3390/ma9090762>
41. Ceres (Consultado julio 2024) <https://www.ceres.tech/technology/>
42. R.T. Leah, N.P. Brandon, P. Aguiar (2005). Modelling of cells, stacks and systems based around metal-supported planar IT-SOFC cells with CGO electrolytes operating at 500–600°C, *J. Power Sources*, 145 (2), 336–352, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2004.12.067>
43. Yatoo, M.A., Habib, F., Malik, A.H. et al. (2023). Solid-oxide fuel cells: A critical review of materials for cell components. *MRS Communications*, 13, 378–384. <https://doi.org/10.1557/s43579-023-00371-0>
44. Zhou, Z., Nadimpalli, V.K., Pedersen, D.B.; Esposito, V. (2021). Degradation Mechanisms of Metal-Supported Solid Oxide Cells and Countermeasures: A Review. *Materials*, 14, 3139. <https://doi.org/10.3390/ma14113> .
45. E. Konysheva, H. Penkalla, E. Wessel, J. Mertens, U. Seeling, L. Singheiser and K. Hilpert (2006). Chromium Poisoning of Perovskite Cathodes by the ODS Alloy Cr₅Fe₁Y₂O₃ and the High Chromium

Ferritic Steel Crofer22APU. *Journal of The Electrochemical Society*, Volume 153, Number 4, A765. DOI 10.1149/1.2172563

46. H. Xu, Y. Han, J. Zhu, M. Ni, Z. Yao (2024). Status and progress of metal-supported solid oxide fuel cell: Towards large-scale manufactory and practical applications, *Energy Reviews*, 3 100051, <https://doi.org/10.1016/j.enrev.2023.100051>.
47. P. Aguiar, C. S. Adjiman, y N. P. Brandon (2004). 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. doi:10.1016/j.jpowsour.2004.06.040 .
48. Ma S., Hu X., Zhao Y., Wang X., Dong C. (2022). Design and Evaluation of a Metal-Supported Solid Oxide Fuel Cell Vehicle Power System with Bioethanol Onboard Reforming; *ACS Omega*, Vol 6, Issue 43, 29201-29214. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c04698>
49. Hoff Y., *Operational characteristics of a metal supported solid oxide fuel cell power generation system on methanol for naval applications*, Master's Thesis, Delft University of Technology, Febrero 2021. <https://resolver.tudelft.nl/uuid:50d94e0f-058d-4853-8a72-203e3c3c86ac> .

ÍNDICE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 1. SUBMARINO AUKUS (FUENTE: ROYALNAVY)	8
ILUSTRACIÓN 2. PRODUCCIÓN DE BIOETANOL EN DIFERENTES PAÍSES. (FUENTE STATISTA)	10
ILUSTRACIÓN 3. ESKEMA PILA (FUENTE: FUEL CELL FUNDAMENTALS)	10
ILUSTRACIÓN 4. ESKEMA SOFC (FUENTE: TOPTITECHS)	11
ILUSTRACIÓN 5. ESKEMA DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN PILA (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	15
ILUSTRACIÓN 6. ESKEMA INSTALACIÓN SIMPLE (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	19
ILUSTRACIÓN 7. ESKEMA INSTALACIÓN CON AIRE CALENTADO (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	20
ILUSTRACIÓN 8. ESKEMA INSTALACIÓN CON TURBINA COMPRESOR (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	26
ILUSTRACIÓN 9. ESKEMA INSTALACIÓN CON TURBINA-COMPRESOR Y CÁTODO CALENTADO APARTE (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	28
ILUSTRACIÓN 10. SUBMARINO S-80 PLUS MARINA ESPAÑOLA. (FUENTE: DEFENSAYAVIACION.INFO)	44
ILUSTRACIÓN 11. SUPERFICIES DE APÉNDICES DEL SUBMARINO (FUENTE: SUBMARINE DESIGN)	48
ILUSTRACIÓN 12. DIFERENCIA ENTRE LA SUP.,, DEL CASCO Y LA SUP. CON APÉNDICES (FUENTE: COMUNICACIÓN PERSONAL)	49
ILUSTRACIÓN 13. SOFC PLANA (DCHA) 7 TUBULAR (IZQ.). (FUENTE: HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.JEURCERAMSOC.2014.08.034)	56
ILUSTRACIÓN 14. DIFERENTES TIPOS DE SOFC SEGÚN SOPORTE (FUENTE: HTTPS://DOI.ORG/10.3390/MA16113978)	57
ILUSTRACIÓN 15. ESKEMA SOBRE EL DESARROLLO DE LAS SOFC PLANAS (FUENTE: HTTPS://DOI.ORG/10.3390/MA14113139)	58
ILUSTRACIÓN 16. ESTRUCTURA CERES MS-SOFC. (FUENTE: HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.JPOWSOUR.2004.12.067)	59
ILUSTRACIÓN 17. SECCIÓN TRANSVERSAL DE UNA SOFC DE SOPORTE METÁLICO (FUENTE: DOI: 10.1361/10599490419135)	61
ILUSTRACIÓN 18. DIAGRAMA DEL FENÓMENO DE TRANSPORTE A TRAVÉS DEL SUBSTRATO METÁLICO (FUENTE: HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.JPOWSOUR.2004.12.067)	67
ILUSTRACIÓN 19. ESKEMA INSTALACIÓN SIMPLE (FUENTE: ASPENONE HYSYS®)	70
ILUSTRACIÓN 20. ESKEMA INSTALACIÓN CON AIRE CALENTADO (FUENTE: ASPENONE HYSYS®)	71
ILUSTRACIÓN 21. ESKEMA INSTALACIÓN ENTRADA COMBUSTOR CALENTADA (FUENTE: ASPENONE HYSYS®)	72
ILUSTRACIÓN 22. ESKEMA INSTALACIÓN CON TURBINA COMPRESOR (FUENTE: ASPENONE HYSYS®).....	73
ILUSTRACIÓN 23. ESKEMA INSTALACIÓN CON TURBINA COMPRESOR Y CÁTODO CALENTADO APARTE (FUENTE: ASPENONE HYSYS®).....	74

ÍNDICE TABLAS

TABLA 1. CARACTERÍSTICAS INSTALACIÓN (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	25
TABLA 2. DATOS INSTALACIÓN COMPRESIÓN-TURBINA MÁS EFICIENTE.....	30
TABLA 3. DATOS INSTALACIÓN FINAL. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	31
TABLA 4. DATOS DEL SUBMARINO S80 PLUS (FUENTE: FICHA S80 ESPAÑOL, NAVANTIA)	45
TABLA 5. DATOS DEL SUBMARINO S80 PLUS (FUENTE: FICHA S80 ESPAÑOL, NAVANTIA)	46
TABLA 6. DATOS RELEVANTES SUBMARINO (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	51
TABLA 7. DIFERENTES TIPOS DE PILA DE COMBUSTIBLE (FUENTE: FUEL CELL SYSTEMS EXPLAINED)	55
TABLA 8. TABLA 9 DIFERENTES TIPOS DE SOFC (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	57
TABLA 9. DIFERENTES VALORES DE $K_{(\infty,i)}$ (FUENTE: HTTP://DX.DOI.ORG/10.1016/J.IJHYDENE.2013.01.174) .	76
TABLA 10. DATOS SIMULACIÓN TURBINA SIMPLE (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).....	81
TABLA 11. DATOS SIMULACIÓN AIRE COMBUSTOR CALENTADO. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).....	82
TABLA 12. TABLA 13-. DATOS SIMULACIÓN COMBUSTIBLE COMBUSTOR CALENTADO. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	83
TABLA 13. DATOS SIMULACIÓN COMBUSTIBLE COMBUSTOR CALENTADO Y TEMPERATURA REFORMADO AUMENTADA. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	84
TABLA 14. DATOS SIMULACIÓN COMBUSTOR TURBINA. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).....	86
TABLA 15. DATOS SIMULACIÓN COMBUSTOR TURBINA CON CÁTODO APARTE. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)....	87
TABLA 16. DATOS AUMENTO TEMPERATURA REFORMADO Y CALENTAMIENTO DE LA CORRIENTE DE SALIDA DEL CÁTODO. SISTEMA COMPRESOR-TURBINA. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).....	88
TABLA 17. VALORES DE K EQUILIBRIO SEGÚN LA TEMPERATURA (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	89
TABLA 18. VALORES REFORMADO PARA VOLUMEN DE REFORMADOR 4 M3(FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).....	90
TABLA 19. VALORES REFORMADO PARA VOLUMEN DE REFORMADOR 5 M3(FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).....	92
TABLA 20. VALORES REFORMADO PARA VOLUMEN DE REFORMADOR 6 M3(FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).....	94
TABLA 21. VALORES REFORMADO PARA VOLUMEN DE REFORMADOR 7 M3(FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).....	95
TABLA 22. DATOS CÁLCULO PILA. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	102

Estudio de viabilidad de la incorporación de un sistema de propulsión sin ruido basado en un reformador y una pila de combustible alimentado por bioetanol en un submarino

ÍNDICE GRÁFICAS

GRÁFICA 1. EFICIENCIA ELÉCTRICA DE LA INSTALACIÓN SEGÚN RELACIÓN AGUA ETANOL PARA INSTALACIÓN SIMPLE. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	20
GRÁFICA 2. EFICIENCIA ELÉCTRICA DE LA INSTALACIÓN SEGÚN RELACIÓN H ₂ O:ETOHL PARA INSTALACIÓN CON AIRE CALIENTE. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	21
GRÁFICA 3. EFICIENCIA ELÉCTRICA DE LA INSTALACIÓN SEGÚN RELACIÓN H ₂ O:ETOHL PARA INSTALACIÓN CON COMBUSTIBLE CALENTADOR CALENTADO. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	22
GRÁFICA 4. EFICIENCIA INST. SEGÚN TEMP. REFORMADO Y RELACIÓN AGUA:ETANOL. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	24
GRÁFICA 5. T ENTRADA COMBUSTOR SEGÚN T REFORMADO Y RELACIÓN H ₂ O:ETOH (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	25
GRÁFICA 6. EFICIENCIA ELÉCTRICA DE LA INSTALACIÓN SEGÚN RELACIÓN H ₂ O:ETOH PARA INSTALACIÓN CON COMPRESOR-TURBINA. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).....	27
GRÁFICA 7 . EFICIENCIA ELÉCTRICA DE LA INSTALACIÓN SEGÚN RELACIÓN H ₂ O:ETOHL PARA INSTALACIÓN CON COMPRESOR TURBINA ÁNODO. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	28
GRÁFICA 8. EF. ELÉCTRICA DE LA INST, SEGÚN LA T. REFORMADO Y AGUA:ETANOL (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	29
GRÁFICA 9 T ENTRADA COMBUSTOR SEGÚN T REFORMADO Y RELACIÓN H ₂ O:ETOH (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	30
GRÁFICA 10. δCR SEGÚN FN (FUENTE:COMUNICACIÓN PERSONAL [30])	50
GRÁFICA 11. EVOLUCIÓN DE LAS PÉRDIDAS DE VOLTAJE EN LA CELDA (FUENTE: HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.IJHYDENE.2023.06.082)	64
GRÁFICA 12 VOLTAJE Y POTENCIA DE LA CELDA SEGÚN DENSIDAD CORRIENTE Y T. (FUENTE: ELABORACIÓN PRO... 69	69
GRÁFICA 13 VALORES DE K ₂ PARA DIFERENTES TEMPERATURAS. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	77
GRÁFICA 14. VALORES DE K ₃ PARA DIFERENTES TEMPERATURAS. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	77
GRÁFICA 15. VALORES DE K ₄ PARA DIFERENTES TEMPERATURAS. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	78
GRÁFICA 16 KMOL/H DE HIDRÓGENO PRODUCIDO SEGÚN LA TEMPERATURA Y EL VOLUMEN DEL REFORMADOR (M ³) PARA UNA RELACIÓN 3:1 DE AGUA ETANOL. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	79
GRÁFICA 17. KMOL/H DE HIDRÓGENO PRODUCIDO SEGÚN LA TEMPERATURA Y EL VOLUMEN DEL REFORMADOR (M ³) PARA UNA RELACIÓN 5:1 DE AGUA ETANOL. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	80
GRÁFICA 18. KMOL/H DE HIDRÓGENO PRODUCIDO SEGÚN LA TEMPERATURA Y EL VOLUMEN DEL REFORMADOR (M ³) PARA UNA RELACIÓN 3:1 DE AGUA ETANOL. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	97
GRÁFICA 19 KMOL/H DE HIDRÓGENO PRODUCIDO SEGÚN LA TEMPERATURA Y EL VOLUMEN DEL REFORMADOR (M ³) PARA UNA RELACIÓN 3,25:1 DE AGUA ETANOL. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).....	97
GRÁFICA 20 KMOL/H DE HIDRÓGENO PRODUCIDO SEGÚN LA TEMPERATURA Y EL VOLUMEN DEL REFORMADOR (M ³) PARA UNA RELACIÓN 3,5:1 DE AGUA ETANOL. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).....	98

Estudio de viabilidad de la incorporación de un sistema de propulsión sin ruido basado en un reformador y una pila de combustible alimentado por bioetanol en un submarino

GRÁFICA 21. KMOL/H DE HIDRÓGENO PRODUCIDO SEGÚN LA TEMPERATURA Y EL VOLUMEN DEL REFORMADOR (M ³)	
PARA UNA RELACIÓN 3,75:1 DE AGUA ETANOL. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).....	98
GRÁFICA 22. KMOL/H DE HIDRÓGENO PRODUCIDO SEGÚN LA TEMPERATURA Y EL VOLUMEN DEL REFORMADOR (M ³)	
PARA UNA RELACIÓN 4:1 DE AGUA ETANOL. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	99
GRÁFICA 23 . KMOL/H DE HIDRÓGENO PRODUCIDO SEGÚN LA TEMPERATURA Y EL VOLUMEN DEL REFORMADOR (M ³)	
PARA UNA RELACIÓN 4,25:1 DE AGUA ETANOL. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).....	99
GRÁFICA 24 KMOL/H DE HIDRÓGENO PRODUCIDO SEGÚN LA TEMPERATURA Y EL VOLUMEN DEL REFORMADOR (M ³)	
PARA UNA RELACIÓN 4,5:1 DE AGUA ETANOL. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).....	100
GRÁFICA 25. KMOL/H DE HIDRÓGENO PRODUCIDO SEGÚN LA TEMPERATURA Y EL VOLUMEN DEL REFORMADOR (M ³)	
PARA UNA RELACIÓN 4,75:1 DE AGUA ETANOL. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).....	100
GRÁFICA 26. KMOL/H DE HIDRÓGENO PRODUCIDO SEGÚN LA TEMPERATURA Y EL VOLUMEN DEL REFORMADOR (M ³)	
PARA UNA RELACIÓN 5:1 DE AGUA ETANOL. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	101

Estudio de viabilidad de la incorporación de un sistema de propulsión sin ruido basado en un reformador y una pila de combustible alimentado por bioetanol en un submarino

ANEXO I EL SUBMARINO

El submarino que utilizamos como base es el modelo S-80 plus de la Marina Española fabricado por la empresa Navantia, su primera unidad, el S-81 Isaac Peral fue entregada a la Armada el 30 de noviembre de 2023 y se esperan 3 unidades más.



Ilustración 10. Submarino S-80 plus Marina Española. (Fuente: DEFENSA Y AVIACION.INFO)

El S-80 plus es un submarino diésel con 81m de eslora; 11,6m de manga y un desplazamiento bajo el agua de 2965 toneladas, esta masa es impulsada por un motor eléctrico síncrono de 3500 kW fabricado por Siemens Gamesa. Tanto el motor como los demás sistemas eléctricos del submarino (auxiliares) tienen como fuente de energía 2 compartimentos de baterías que se cargan gracias a los generadores diésel del submarino. El submarino posee en concreto 3 generadores diésel MTU-396 de 1200 kW, 16 cilindros en V y una cilindrada total de 63,4 L cada uno, adaptado para su uso en submarinos [22].

Para recargar las baterías el submarino normalmente asciende a la superficie y respira mediante el snorkel, un tubo que conecta el motor con el aire exterior para no tener que salir a la superficie y ser detectado más fácilmente [23]. Aun así, este sistema tiene sus desventajas, una de ellas es que el snorkel y la ola que genera puede ser visto a plena luz del día por otros barcos a suficiente distancia, así como el humo negro proveniente de la combustión. Otro problema cuando el submarino enciende sus motores para recargar las baterías es que

Estudio de viabilidad de la incorporación de un sistema de propulsión sin ruido basado en un reformador y una pila de combustible alimentado por bioetanol en un submarino

puede ser oido por otros submarinos, y es que el generador de un submarino diésel produce mucho ruido y es detectado por submarinos que se encuentren cerca.

Por ello, el tiempo que el submarino se encuentra recargando baterías, cerca de la superficie con el snorkel o en la superficie, se denomina tiempo de indiscreción, y el tiempo que se encuentra bajo el agua sin los motores encendidos se denomina tiempo de discreción. Una de las maneras de medir la sigilosidad de un submarino es gracias al ratio de indiscreción (IR), que es el tiempo que se encuentra cargando baterías entre el tiempo que se encuentra cargando baterías y bajo el agua [24].

$$IR = \frac{T_{snort}}{T_{snort} + T_{sub}} \quad (\text{ec.11})$$

Tabla 4. Datos del submarino S80 plus (Fuente: Ficha S80 español, Navantia)

Concepto	<ul style="list-style-type: none"> • Monocasco • Silencioso
Planta propulsora	<ul style="list-style-type: none"> • Sistema AIP: Reformador Bioetanol y pila de combustible. • 3 Generadores Diésel MTU-16V-396SE-85L de 16 cilindros en V y 1200kw cada uno [21]. • Motor eléctrico de propulsión síncrono de 3500 kw • 2 compartimentos de baterías de 180 cada uno (2 x 180)

Una forma que se ha encontrado de disminuir este ratio de indiscreción es mediante la introducción del sistema AIP (Air Independent Propulsion), un sistema que permite producir energía eléctrica cuando el submarino se encuentra bajo el agua, Hay numerosos tipos de sistemas AIP, pero los más comunes son el motor Stirling, utilizado por Suecia y China, y las pilas PEM, utilizadas por Alemania y muy pronto España, en el caso de Alemania utilizan metanol para luego producir hidrógeno, y en el caso de España bioetanol. Este sistema es beneficioso por dos motivos principalmente, uno de ellos es que aumenta el tiempo bajo la superficie del submarino [24], el segundo es que el

Estudio de viabilidad de la incorporación de un sistema de propulsión sin ruido basado en un reformador y una pila de combustible alimentado por bioetanol en un submarino

submarino está diseñado para ser más eficiente bajo el agua, y por ello permite aprovechar mejor la energía.

Tabla 5. Datos del submarino S80 plus (Fuente: Ficha S80 español, Navantia)

Eslora	80,8 metros	Autonomía	50 días 8500nm
Manga máxima	11,6 metros	Tripulación	32marineros + 8fuerzas especiales
Calado	6,3 metros	Vel en superficie	>10 nudos
Diámetro casco	7,3 metros	Vel en inmersión	>19 nudos
Desplazamiento inmersión	2965 toneladas	Autonomía AIP	Hasta 3 semanas

Consumo

El submarino debe producir suficiente energía para recargar las baterías y poder operar las misiones para las que ha sido diseñado, el consumo de electricidad está formado por dos tipos principales [25].

- Los sistemas eléctricos auxiliares, llamada carga hotel, abarcan todos los sistemas desde calefacción hasta sistemas de armas o el sónar, se encuentra entre 100 y 200 kW, en el caso del S80 tomaremos un valor de 140 kW [26,27], ya que aunque es un submarino de tamaño considerable los submarinos diésel consumen menos que los nucleares al no disponer de tanta potencia.
- La propulsión.

El S-80 es capaz de llevar a cabo misiones de hasta 50 días y 8500 millas (Tabla 5) náuticas, si asumimos que estos 50 días se realizan a profundidad constante y utilizando en todo momento el snorkel, se puede estimar la potencia necesaria para mover el submarino a esa velocidad, sumarle la carga hotel y así obtener la potencia consumida en este trayecto.

Potencia de la propulsión

Durante la propulsión a velocidad constante, el submarino se ve sometido a fuerzas de rozamiento con el agua, además, al realizarse a profundidad de snorkel, cercana a la superficie, se verá afectado por la creación de olas, aumentando la resistencia al avance y por lo tanto la potencia necesaria [28].

La resistencia total de un submarino se puede encontrar mediante la siguiente fórmula [26]:

$$R_T = \frac{C_T \rho S V^2}{2} \quad (\text{ec.12})$$

Siendo C_T el coeficiente total de resistencia, ρ la densidad del fluido en kg/m³, S la superficie mojada y V la velocidad del submarino en m/s.

El coeficiente total de resistencia se calcula como la suma de todos los coeficientes de resistencia del submarino [29]:

$$C_T = (1 + k)C_F + C_W \quad y \quad C_V = (1 + k)C_F \quad (\text{ec.13})$$

C_F es el coeficiente de rozamiento; C_W el coeficiente de resistencia de olas; y $1 + k$ el factor de forma, que depende de la forma del submarino, que multiplicado por el coeficiente de rozamiento da el coeficiente viscoso, C_V , y que tiene en cuenta no solo el rozamiento sino también la resistencia debido a la presión viscosa.

Cálculo de C_f

Para calcular el C_f del submarino se debería de calcular el sumatorio de los coeficientes de rozamiento de cada parte del submarino multiplicado por la superficie de esta, y dividirla por la superficie total del submarino [28], es decir:

$$C_{FT} = C_{FH} \cdot \frac{S_H}{S} + C_{FSail} \cdot \frac{S_{Sail}}{S} + C_{FRudder} \cdot \frac{S_{Rudder}}{S} + \dots = \sum C_{Fi} \cdot \frac{S_i}{S} \quad (\text{ec.14})$$

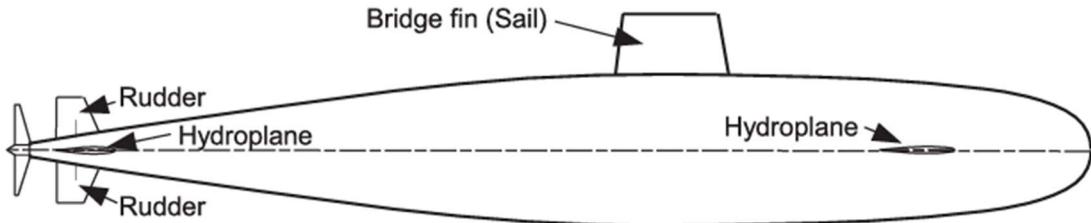


Ilustración 11. Superficies de apéndices del submarino (Fuente: Submarine Design)

Sin embargo, no solo no se tiene suficiente información sobre el submarino para poder calcular todo esto, sino que también sería muy costoso este cálculo y no es el objetivo de este trabajo centrarse en este cálculo. El coeficiente de rozamiento de un submarino se puede dividir en dos, por un lado, el del casco, y por otro lado, el de los apéndices, se puede entonces decir [30]:

$$C_{FT} = C_{Fhul} + C_{Fapp} \quad (\text{ec.15})$$

El casco de un submarino es la estructura principal de este, tiene la mayor superficie y provoca la mayoría de las pérdidas al avance del submarino.

El C_F del casco se calcula gracias al número de Reynolds Re [30],

$$C_{Fhull} = \frac{0,075}{(\log_{10} Re - 2)^2} \quad (\text{ec.16})$$

El número de Reynolds es $Re = \frac{L \cdot V}{\nu}$ (ec.17), L es la longitud, V la velocidad y ν la viscosidad cinemática del fluido.

Por su parte, el factor de forma $1 + k$ se puede calcular de diferentes maneras, se ha optado por la de Moonesum et al. [30]

$$(1 + k) = 1 + \left[\frac{D_h}{L} + 1,5 \left(\frac{D_h}{L} \right)^3 \right] \quad (\text{ec.18})$$

En cuanto a los apéndices, según los apuntes de la asignatura de Introducción al proyecto de submarinos del Máster en Ingeniería Naval y Oceánica de la Universidad Politécnica de Madrid [30], se estiman que ocasionan entre el 25 y

Estudio de viabilidad de la incorporación de un sistema de propulsión sin ruido basado en un reformador y una pila de combustible alimentado por bioetanol en un submarino

el 30% de las pérdidas viscosas totales, y según Anthony F. Molland et al [30], ocasionan pérdidas viscosas equivalentes al 35% de las producidas por el casco del submarino, que se encuentra en el rango de 25-30%, por lo tanto:

$$R_{Vapp} = R_{VHull} \cdot 0,35 \quad (\text{ec.19})$$

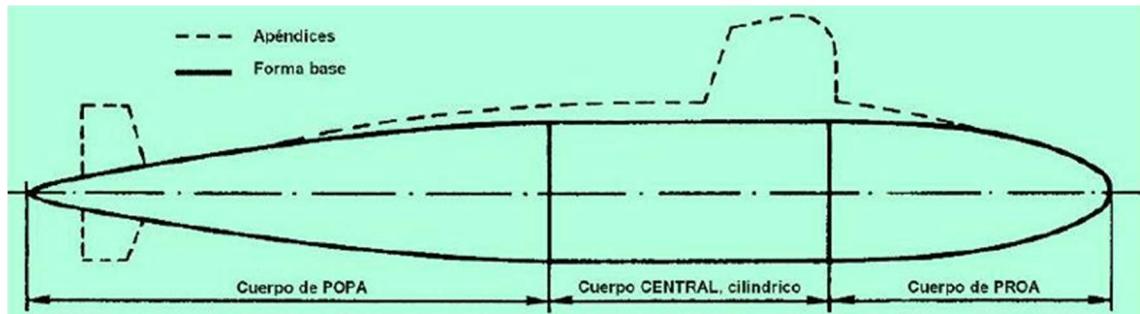


Ilustración 12. Diferencia entre la sup., del casco y la sup. con apéndices (Fuente: Comunicación personal)

Cálculo de C_w

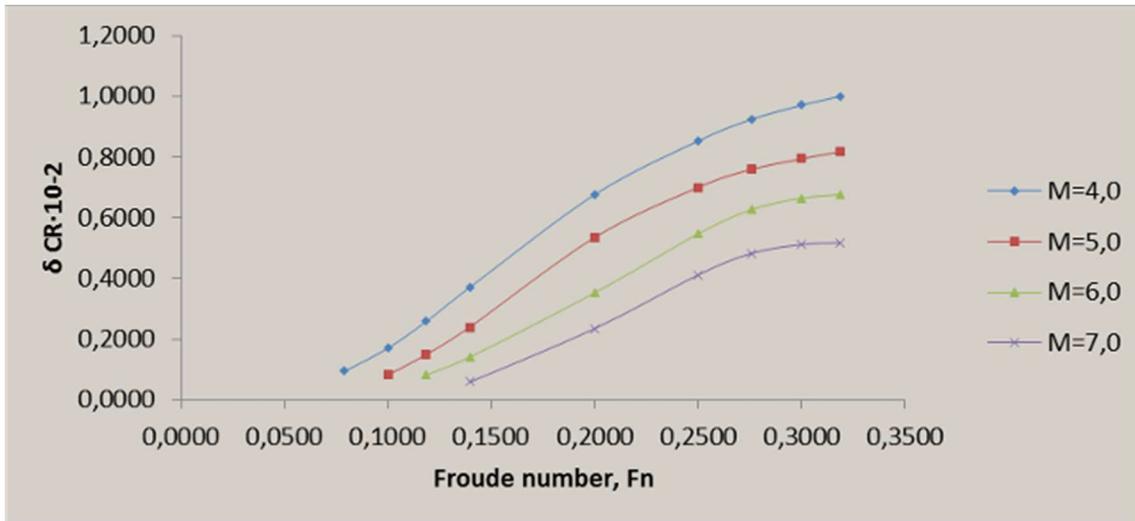
Para el cálculo de C_w se hace uso de los apuntes de la asignatura de Introducción al proyecto de submarinos del Máster en Ingeniería Naval y Oceánica de la Universidad Politécnica de Cartagena [31]. En estos apuntes se trata el coeficiente de resistencia a las olas como un coeficiente adicional, llamado coeficiente de resistencia residuo en snorkel, $\delta C'_R$.

$$\delta C'_R = \delta C_R e^{\left[\frac{3(D-d)}{D} \right]} \quad (\text{ec.20})$$

En esta ecuación δC_R es el coeficiente de resistencia residuo que veremos más adelante, D es el diámetro del submarino y d la cota de inmersión.

Para calcular δC_R se utiliza la gráfica proporcionada en los apuntes [31], que relaciona el número de Froude y un parámetro de formas del submarino con δC_R .

Estudio de viabilidad de la incorporación de un sistema de propulsión sin ruido basado en un reformador y una pila de combustible alimentado por bioetanol en un submarino



Gráfica 10. δC_R según Fn (Fuente:Comunicación personal [30])

M es el parámetro de formas que se calcula dividiendo la eslora del submarino L, entre la raíz cúbica del volumen sumergido ∇ .

$$M = \frac{L}{\nabla^{1/3}} \quad (\text{ec.21})$$

Y el número de Froude Fn

$$Fn = \frac{V}{\sqrt{g \cdot D_h}} \quad (\text{ec.22})$$

Cálculo de la superficie mojada y el volumen sumergido

La superficie mojada, S, se ha decidido calcular de la siguiente manera [30]:

$$S = 4\pi \left[\left(2 \times \left(\frac{L}{2} \right)^P \times \left(\frac{D_h}{2} \right)^P + \left(\frac{D_h}{2} \right)^{2P} \right) \times 0,333 \right]^{\frac{1}{P}} \quad (\text{ec.23})$$

Con $P = 1,6075$.

El volumen sumergido ∇ es:

$$\nabla = \left(\frac{4}{3} \right) \pi \left(\frac{L}{2} \right) \left(\frac{D_h}{2} \right)^2 \quad (\text{ec.24})$$

Estudio de viabilidad de la incorporación de un sistema de propulsión sin ruido basado en un reformador y una pila de combustible alimentado por bioetanol en un submarino

Cálculo de resistencias del submarino.

Primero de todo, se van a recordar los datos relevantes del submarino:

Tabla 6. Datos relevantes submarino (Fuente: Elaboración propia)

Eslora	80,8 metros	Autonomía	50 días 8500 nm
Manga máxima	11,6 metros	Diámetro Casco	7,3 metros
Calado	6,3 metros	Cota Snorkel	17 metros

La viscosidad cinemática del agua de mar es de $1,19 \times 10^{-6}$ St y su densidad es de 1026 kg m^{-3} .

La velocidad a la que viajará el submarino en nuestro cálculo será la necesaria para viajar 8500 millas náuticas en 50 días, 7,083 nudos, 3,6437 m/s. Con estos datos se puede calcular el C_F del casco, mediante la ecuación 14.

$$C_{Fhull} = \frac{0,075}{(\log_{10} Re - 2)^2} = \frac{0,075}{(\log_{10} 247401904,8 - 2)^2} \\ = 0,001834835$$

El número de Reynolds es (ec.17) $Re = \frac{L \cdot V}{\nu}$, por lo tanto

$$Re = \frac{80,8 \cdot 3,6437}{1,19 \times 10^{-6}} = 247401904,8$$

A continuación, se calcula el factor de forma $1 + k$ gracias a la ecuación 18.

$$(1 + k) = 1 + \left[\frac{D_h}{L} + 1.5 \left(\frac{D_h}{L} \right)^3 \right] = 1 + \left[\frac{7,3}{80,8} + 1.5 \left(\frac{7,3}{80,8} \right)^3 \right] \\ = 1,091452715$$

Por lo tanto, $C_{Fhull}(1 + k) = 0,002167657$

Estudio de viabilidad de la incorporación de un sistema de propulsión sin ruido basado en un reformador y una pila de combustible alimentado por bioetanol en un submarino

A continuación calculamos el volumen sumergido, ∇ , y la superficie mojada, S , gracias a las ecuaciones 23 y 24 respectivamente.

$$\nabla = \left(\frac{4}{3}\right) \pi \left(\frac{L}{2}\right) \left(\frac{D_h}{2}\right)^2 = \left(\frac{4}{3}\right) \pi \left(\frac{80,8}{2}\right) \left(\frac{7,3}{2}\right)^2 = 2254,528363 \text{ m}^3$$

$$S = 4\pi \left[\left(2 \times \left(\frac{L}{2}\right)^P \times \left(\frac{D_h}{2}\right)^P + \left(\frac{D_h}{2}\right)^{2P} \right) \times 0,333 \right]^{\frac{1}{P}} = 1448,399575 \text{ m}^2$$

Siendo $P=1,6075$

Para calcular el coeficiente de resistencia residuo en snorkel, $\delta C'_R$, se utiliza la ecuación 20.

$$\delta C'_R = \delta C_R e^{\left[\frac{3(D-d)}{D}\right]} = 0,007 e^{\left[\frac{3(7,3-17)}{7,3}\right]} = 0,001853625$$

δC_R se obtiene de la gráfica X, calculando el parámetro M mediante la ecuación 21:

$$M = \frac{L}{\nabla^{1/3}} = 6,16$$

Y el número de Froude (ec.22)

$$Fn = \frac{V}{\sqrt{g \cdot D_h}} = \frac{3,6437}{\sqrt{9,8 \cdot 7,3}} = 0,43078857$$

Podemos deducir en la gráfica que $\delta C_R = 0,008$ aproximadamente

La resistencia se calcula con la ecuación 12.

$$R_T = \frac{C_T \rho S V^2}{2}$$

Por lo tanto, la resistencia viscosa del casco será:

Estudio de viabilidad de la incorporación de un sistema de propulsión sin ruido basado en un reformador y una pila de combustible alimentado por bioetanol en un submarino

$$R_{Vhull} = \frac{C_{Fhull}(1+k)\rho SV^2}{2} = 19755,36488 N$$

La resistencia debida a las olas creadas por el snorkel

$$R_W = \frac{\delta C' R \rho SV^2}{2} = 20897,61821 N$$

La resistencia viscosa creada por los apéndices será el 35% de la creada por el casco, por lo tanto con la ecuación 19.

$$R_{Vapp} = 0,35R_{Vhull} = 6914,377706 N$$

Y la suma de todas será la resistencia total.

$$R_T = R_{Vhull} + R_{Vapp} + R_W = 47567,36079 N$$

La potencia necesaria se encuentra multiplicando la resistencia por la velocidad.

$$P = R_T \times V = 173319,6069 W = 173,32 kW$$

Esta, es la potencia que debe ser transmitida por la hélice, si utilizamos una eficiencia del 75%, se necesita que la hélice produzca [32].

$$P_H = P / 0,75 = 231092,8093 W$$

La potencia que consumirá el motor eléctrico será la consumida por la hélice dividida por la eficiencia del motor eléctrico, al ser un motor trifásico síncrono de gran tamaño se puede suponer una alta eficiencia del 95% [33].

$$P_M = P_H / 0,95 = 243255,5887 W = 243,256 kW$$

Por lo tanto, la potencia necesaria para mover el submarino será de 243,56kW

Potencia total necesaria

La potencia total necesaria sería la total aportada por el generador, no solamente para desplazar el submarino, sino para cubrir todas las necesidades. Como se ha mencionado anteriormente, la carga hotel del submarino se estima en unos 140 kW, sin embargo, mientras funcionen los generadores, se produce calor, parte de este calor es utilizado para suplir las necesidades de ACS del submarino, según la bibliografía consultada [34] y dado que no es el objetivo principal de este documento se puede realizar una primera aproximación del gasto en ACS a 8 kW. Es decir, mientras la pila funcione se restarán 8 kW de la carga hotel, este sistema de aprovechamiento de los gases de escape también funciona en los submarinos diésel, [35], por lo que también se restarán. La potencia total será la potencia del motor más la carga hotel.

$$P_T = P_M + P_{Hotel} = 243,256 + 140 - 8 = 375,256 \text{ kW}$$

El consumo de potencia sería de 375,256 kW, se necesita que funcione durante 50 días, constantemente, en esta suposición, lo que equivaldrían a 1200h y por lo tanto 450307,2 kWh.

ANEXO II LA PILA.

La pila de hidrógeno es un reactor químico en el cual se reacciona el hidrógeno con el oxígeno para obtener agua y aprovechar la energía eléctrica liberada en el proceso. Dentro de las pilas de hidrógeno encontramos diferentes tipos que podemos utilizar (Tabla 7).

Tabla 7. Diferentes Tipos de pila de combustible (Fuente: Fuel cell Systems Explained)

Fuel cell type	Mobile ion	Operating temperature	Applications and notes
Alkaline (AFC)	OH^-	50–200°C	Used in space vehicles, e.g. Apollo, Shuttle.
Proton exchange membrane (PEMFC)	H^+	30–100°C	Vehicles and mobile applications, and for lower power CHP systems
Direct methanol (DMFC)	H^+	20–90°C	Suitable for portable electronic systems of low power, running for long times
Phosphoric acid (PAFC)	H^+	~220°C	Large numbers of 200-kW CHP systems in use.
Molten carbonate (MCFC)	CO_3^{2-}	~650°C	Suitable for medium- to large-scale CHP systems, up to MW capacity
Solid oxide (SOFC)	O^{2-}	500–1000°C	Suitable for all sizes of CHP systems, 2 kW to multi-MW.

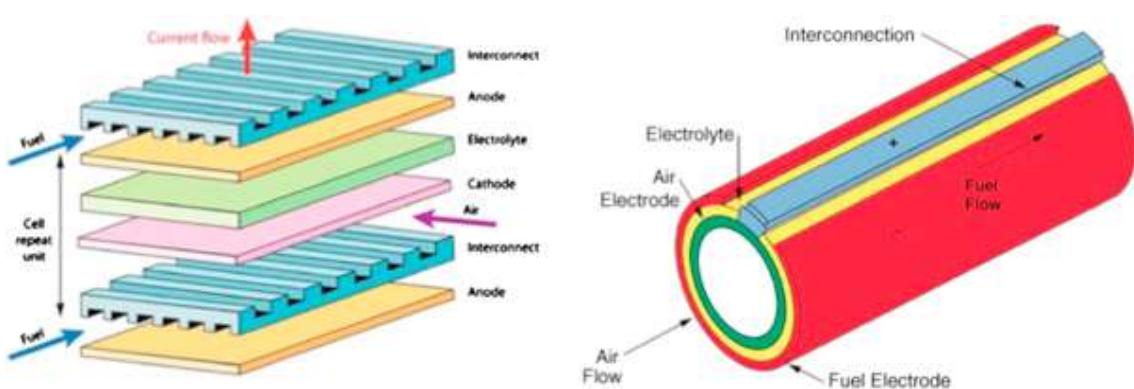
Las pilas consideradas son las de tipo PEM, las PAFC, las MCFC y las SOFC. Dentro de este tipo de pilas las PAFC fueron descartadas rápidamente debido a su poca utilización y alto coste pese a tener una eficiencia de hasta 42%; las pilas PEM tienen la ventaja de tardar poco en activarse pero son muy susceptibles al envenenamiento por CO y no suelen usarse para altas potencias. Las pilas HTPEM, High Temperature Proton Exchange Fuel Cell, también sufren de estos problema pese a ser algo más eficientes. Esto nos deja con las pilas de carbonato fundido o de óxido sólido. Estas últimas son más utilizadas y ya están saliendo al mercado pese a llegar a tener una eficiencia similar. Las SOFC son más resistentes al no sufrir tanto de corrosión pese a que también llevan un alto precio y desgaste especialmente las de alta temperatura debido a el desgaste en el sellado y en materiales [36].

La pila SOFC

La pila SOFC (Solid Oxide Fuel Cell) opera a altas temperaturas entre 600 y 800 °C y utilizan el ion de Oxígeno cargado negativamente transferido desde el cátodo al ánodo a través del electrolito. Es decir, por el ánodo entra el hidrógeno y por el cátodo el oxígeno, y sale agua por el ánodo.

Dentro de las SOFC tenemos, 2 tipos de configuraciones de pila, la configuración tubular y la configuración plana. La primera es de más fácil sellado pero ocupa más, es más difícil su configuración y tienen mayores pérdidas óhmicas. Por otra parte, la configuración plana tiene la ventaja de ocupar menos y ser más fácil su disposición en serie o en paralelo y tener menores pérdidas óhmicas. Sin embargo, su fabricación es difícil debido a las complicaciones derivadas del sellado de alta temperatura [37].

Últimamente, se ha avanzado mucho la tecnología de las SOFC planas, y gracias a su mayor eficiencia y menor volumen es la que utilizaremos. En cuanto a sus tipos, se pueden discernir según el soporte, en cuyo caso hay 4 diferentes tipos de pila (Tabla 8).



Planar SOFC [1]

Tubular SOFC [2]

Ilustración 13. SOFC plana (dcha) 7 tubular (izq.). (Fuente:
<https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2014.08.034>)

Estudio de viabilidad de la incorporación de un sistema de propulsión sin ruido basado en un reformador y una pila de combustible alimentado por bioetanol en un submarino

Tabla 8. Tabla 9 Diferentes tipos de SOFC (Fuente: Elaboración propia)

Tipo	Ventajas	Desventajas
Soporte electrolito	-Relativamente fuerte estructuralmente debido al soporte electrolítico. - Menores fallos debido a reoxidación anódica y reducción catódica.	-Altas temperaturas de operación (1000º C) -Menor conductividad electrolítica
Soporte catódico	-Temperaturas más baja -Sin problemas de oxidación	-Posible reducción catódica -Menor conductividad -Limitado por el gran grosor del cátodo
Soporte anódico	-Temperaturas más bajas -Ánodo muy conductor	-Posible reoxidación anódica -Limitado por el gran grosor del ánodo
Soporte metálico	-Temperaturas mucho más bajas -Mayor resistencia -Arranque más rápido -Menor tamaño	-Oxidación en la interconexión

Dentro de esta tabla, las pilas sobre las que más desarrollo se ha llevado a cabo han sido las de soporte electrolito, anódico y recientemente el metálico (Ilustración 14).

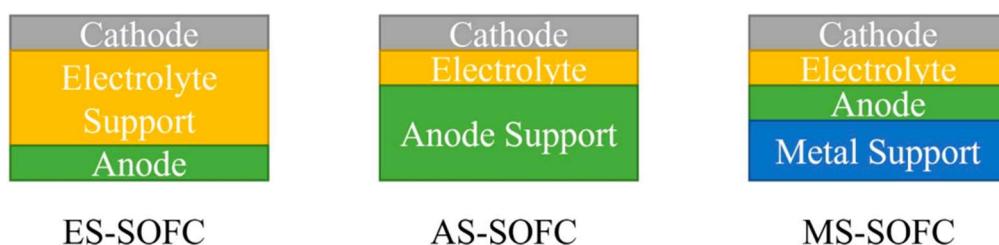


Ilustración 14. Diferentes tipos de SOFC según soporte (Fuente: <https://doi.org/10.3390/ma16113978>)

Las primeras pilas diseñadas fueron de soporte electrolito, el cual aumenta el grosor del electrolito de la pila para aguantar las tensiones y poder tener un ánodo y un cátodo más fino. El problema de esto es que tiene una mayor impedancia óhmica y se tiene que aumentar la temperatura hasta 1000° C lo que dificulta mucho el sellado, aumenta el coste de fabricación y disminuye su vida útil [38,39]. Las pilas con soporte anódico aumentan el grosor del ánodo para soportar las tensiones, lo que le permite operar a temperaturas de 800° C. Aún así, el grosor de las pilas es mayor y está compuesta por elementos cerámicos que son más frágiles y de mayor costo, y aunque opera a menor temperatura el sellado sigue siendo complicado y necesita mucho tiempo para calentarse y funcionar correctamente sin dañar la pila [38].

Esto nos deja con las pilas de óxido sólido con soporte metálico (MS-SOFC). Este tipo de pilas utiliza un metal poroso con una alta conductividad térmica y estabilidad mecánica para separar cada celda. Además, gracias a la utilización del metal para aportar la rigidez estructural necesaria, el ánodo disminuye su grosor, mejorando el precio ya que se precisa de menor del caro material anódico, mejora su resistencia térmica y su rigidez. No solo eso, sino que las nuevas tecnologías de fabricación permiten un menor grosor, ayudando a bajar la temperatura de operación y disminuyendo la impedancia y disminuyendo el tamaño de la pila. La mayor resistencia térmica y mecánica, y la conductividad de la MS-SOFC también le otorga un mucho menor tiempo de arranque del sistema, un aspecto importante en el caso de los submarinos [38].

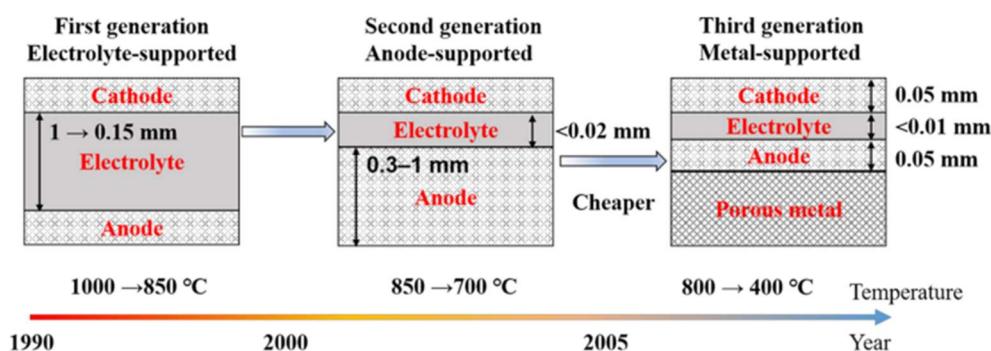


Ilustración 15. Esquema sobre el desarrollo de las SOFC planas (Fuente: <https://doi.org/10.3390/ma14113139>)

Pese a ello las pilas soportadas por metal tienen sus problemas aparte de los que tienen las pilas SOFC convencionales. Como todas las pilas SOFC, tiene que alcanzar una alta temperatura de operación para funcionar correctamente, aunque mucho menor en el caso de la soportada por metal. También los metales pueden ser sometidos a corrosión a altas temperaturas, empeorando sus prestaciones y teniendo que aplicar etapas de protección de óxido en su fabricación [34012].

Visto las ventajas de las pilas de soporte metálico empresas como BOSCH han colaborado con CERES para desarrollar sistemas de generación de energía y calor para edificios e industria. Además, la empresa CERES está intentando implementar esta tecnología en buques mercantes, para disminuir drásticamente la contaminación y aumentar la eficiencia [41].

Materiales de la pila

El modelo de pila utilizado se basa en la MS-SOFC de Ceres, que está saliendo al mercado junto a Bosch para proporcionar energía en zona residenciales gracias al gas natural. Este tipo de pila está formada por un ánodo, un cátodo, un electrolito y un soporte metálico como se observa en la figura [42]

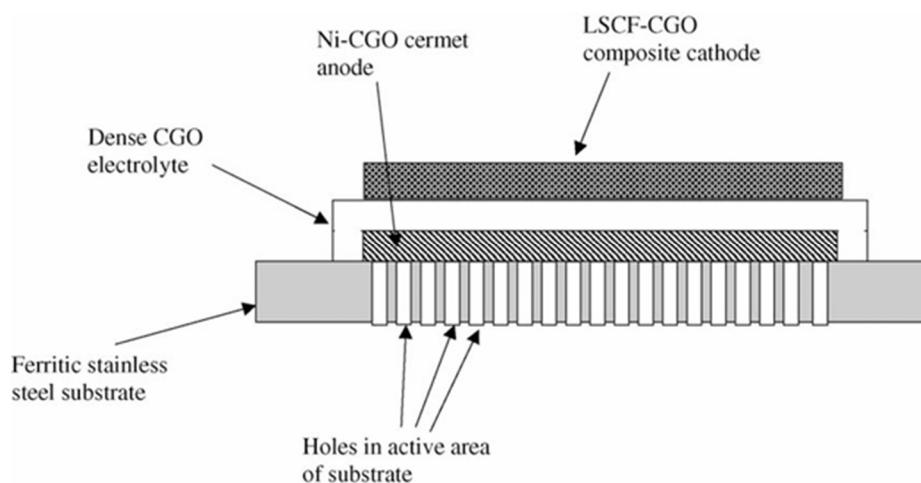


Ilustración 16. Estructura Ceres MS-SOFC. (Fuente: <https://doi.org/10.1016/j.ipowsour.2004.12.067>)

El ánodo tiene como función catalizar la oxidación del combustible y conducir los electrones generados al circuito externo. Es por ello que debe tener buena actividad catalítica y buena conductividad electrónica e iónica [43]. El material utilizado por Ceres es un cermet compuesto poroso de Níquel-CGO (Óxido de Cerio Gadolinio), con un grosor de unos 15 µm [42].

En el cátodo de la pila se introduce el oxígeno, el cual se debe reducir. Por ello debe de tener una gran conductividad electrónica y al igual que el ánodo, no debe de tener reacciones con los otros elementos de la pila [43]. El material elegido es un compuesto de ferrita lantano estroncio cobalto con óxido de cerio gadolinio (LSCF/CGO) [42].

El electrolito es una capa de material cerámico de alta densidad a través de la cual viajan los iones del cátodo al ánodo, por lo tanto debe de tener una muy buena conductividad de iones de óxido [43]. Se instala entre el cátodo y el ánodo y envuelve el ánodo sellando los lados de este (ver Ilustración 16). Para esto se utiliza de nuevo una densa capa de CGO con un espesor de 10-15 µm [42].

Por último, el sustrato metálico es un acero ferrítico poroso en la región central pero no por los lados de unos 200-300 µm [42]. La razón por la cual no es poroso en los lados es para poder sellar el stack mediante soldadura o una junta compresiva. La razón por la que se utilizan placas metálicas como soporte en vez de al ánodo es por numerosas razones. La primera es que el metal es más resistente al choque térmico que el ánodo, también posee una mejor conductividad térmica reduciendo así el gradiente térmico, tiene el coeficiente de dilatación deseado [12], permite el sellado mediante soldadura, es más barato y reduce el grosor de los otros elementos de la pila.

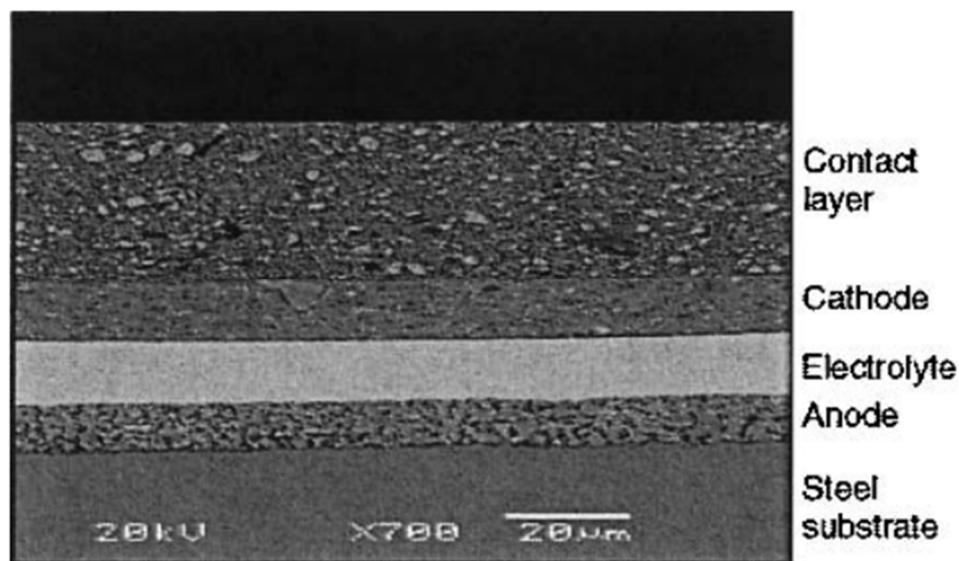


Ilustración 17. Sección transversal de una SOFC de soporte metálico (Fuente: DOI: 10.1361/10599490419135)

Durabilidad

Como ya se ha mencionado anteriormente, la pila de soporte metálico es más resistente a los arranque y apagados bruscos que otras SOFC. Pese a ello, la pila y la utilización de metales pueden conllevar a degradación y pérdida de potencia con el tiempo.

Degradación del Cátodo

- **Descomposición térmica:** Las altas temperaturas pueden provocar cambios en la microestructura del cátodo, afectando su rendimiento [44].
- **Oxidación:** En cátodos con base de LSC el metal se puede oxidar formando $\text{La}(\text{OH})_3$, disminuyendo la eficiencia y la durabilidad del cátodo [12].
- **Envenenamiento por cromo:** El cromo puede volatilizarse desde los interconectores metálicos y depositarse en el cátodo, inhibiendo la actividad catalítica. En el caso del LSCFe se puede formar SrCrO_4 [45].

Degradación del Ánodo

- **Envenenamiento por azufre:** Los compuestos de azufre que pueden estar presentes en el combustible pueden envenenar el ánodo, reduciendo su actividad catalítica [44].
- **Deposición de carbono:** En presencia de hidrocarburos, puede formarse carbono, “coque”, en el ánodo, lo que reduce la superficie activa y disminuye la eficiencia del electrodo [44].
- **Acrecentamiento y migración de Níquel:** El níquel puede aumentar de tamaño o migrar, es decir, las partículas pequeñas de níquel en la pila se sueltan de la estructura disolviéndose y sus átomos viajan mediante difusión para juntarse con otras partículas de níquel, aumentando el tamaño de estas, disminuyendo la superficie del catalizador y por lo tanto su actividad. Esta difusión de los átomos de Ni anódicos también puede producirse en el soporte metálico, causando una conversión a la fase austenítica de este y disminuyendo su resistencia a la oxidación y modificando el coeficiente de expansión térmica del metal [12].
- **Corrosión y oxidación:** A altas temperaturas, los componentes metálicos del ánodo pueden oxidarse o corroerse, afectando su conductividad y estabilidad estructural [44].

Degradación del Electrolito

- **Fracturas y grietas:** Las tensiones térmicas pueden provocar fracturas en el electrolito, comprometiendo su integridad y capacidad de conducción iónica [44].
- **Reacciones químicas indeseadas:** A altas temperaturas, el electrolito puede reaccionar con el ánodo o el cátodo, formando fases no conductoras que aumentan la resistencia. En el caso de los electrolitos con CGO, el ión de Ce^{+4} puede reducirse a Ce^{+3} especialmente con temperaturas por encima de los 600 °C.[12]

Estudio de viabilidad de la incorporación de un sistema de propulsión sin ruido basado en un reformador y una pila de combustible alimentado por bioetanol en un submarino

- **Contaminación:** Impurezas en los materiales o el ambiente operativo pueden contaminar el electrolito, afectando su conductividad [44].

Degradación del Soporte Metálico

- **Fatiga térmica:** Los ciclos repetidos de calentamiento y enfriamiento pueden inducir fatiga en el soporte metálico, causando deformaciones o fallos.
- **Oxidación:** A altas temperaturas, los metales pueden oxidarse, lo que afecta la conductividad y puede provocar fallos estructurales [46].
- **Corrosión:** En ambientes húmedos o con presencia de gases corrosivos, el soporte metálico puede corroerse, debilitando la estructura de la celda.
- **Difusión:** Al igual que en el ánodo, los átomos de Hierro y Cromo pueden estar sujetos al fenómeno de difusión, trasladándose al ánodo, donde pueden formar óxidos como el Cr₂O₃, FeO, NiCr₂O₄, etc [12].

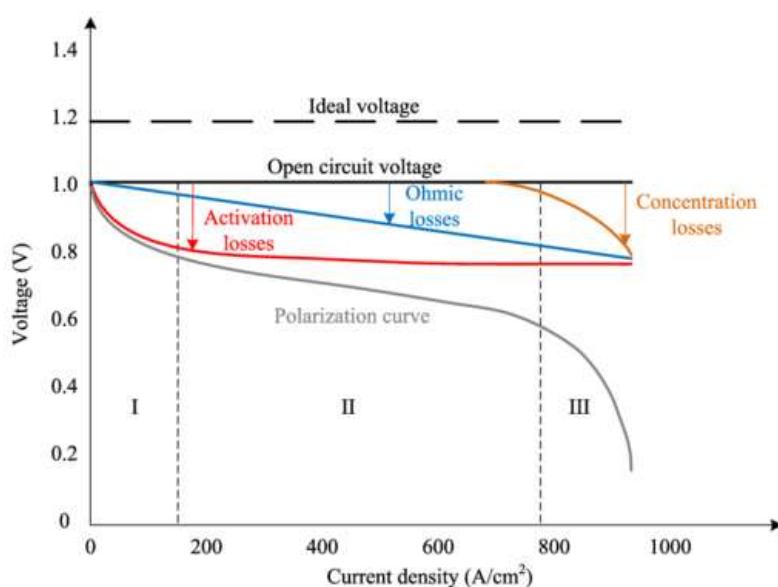
ANEXO III MODELADO DE LA PILA

El modelo de la pila se ha basado en la bibliografía [42,47], para obtener las ecuaciones, al igual que otras simulaciones llevadas a cabo por otros trabajos [48,49]. Los valores utilizados para los cálculos [42,48,17], se encuentran en el Anexo VI, en la tabla 22.

Como ya se ha comentado, la pila posee un voltaje de Nernst al cual se le restan las pérdidas ocurridas por los distintos fenómenos en la pila.

$$V_{Cell} = U_{Nern} - E_{Ohm} - E_{act} \quad (\text{ec.1})$$

Es decir, el voltaje de celda V_{cell} es igual al voltaje de Nernst U_{Nern} menos el sobrepotencial por pérdidas óhmicas E_{ohm} y por activación E_{act} . Se han obviado las pérdidas por concentración al no considerarse importantes.



Gráfica 11. Evolución de las pérdidas de voltaje en la celda (Fuente: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.06.082>)

El voltaje de Nernst

EL voltaje de Nernst sigue la fórmula

$$U_{Ner} = \frac{-\Delta g^0(T)}{2F} + \frac{RT}{F} \ln \left(\frac{p_{H_2}^{inter} \cdot (p_{O_2}^{inter})^{1/2}}{p_{H_2O}^{inter}} \right) = U_{Nernst}^0 + \frac{RT}{4F} \ln \left(\frac{p_{O_2}^{inter} \cdot (p_{H_2}^{inter})^2}{(p_{H_2O}^{inter})^2} \right)$$

(ec. 2)

$$\text{Siendo } U_{Nernst}^0: U_{Nernst}^0 = 1.2723 - 2.7645 \times 10^{-4}T \quad (\text{ec.25})$$

Donde Δg^0 es la energía de Gibbs de la reacción, F la constante de Faraday, R la constante de gases ideales, T la temperatura en Kelvin y p_{inter} las presiones parciales para cada gas en la interfaz, en bar, y U_{Nernst}^0 el voltaje de Nernst a presión estándar. El voltaje de Nernst es el voltaje en circuito abierto de la pila, es decir, la energía electroquímica que proporciona la reacción si no hubiera pérdidas.

Sobrepotencial óhmico.

El sobrepotencial óhmico E_{ohm} es el ocasionado por las perdidas óhmicas de la pila, es decir, la suma de las resistencias electrónicas de los materiales anódicos y catódicos, así como las resistencia a la corriente iónica en el electrolito y un término equivalente a la resistencia de contacto.

$$R_{ohm} = \frac{\tau_{anode}}{\sigma_{anode}} + \frac{\tau_{cathode}}{\sigma_{catho}} + \frac{\tau_{el}}{\sigma_{eli}} + R_{cont} \quad (\text{ec.26})$$

La resistencia del ánodo y del cátodo se toman como constantes con la temperatura, la conductividad del electrolito sigue la fórmula:

$$\sigma_{eli} = K_i \frac{\exp\left(\frac{-0.64}{8.6173 \times 10^{-5}T}\right)}{T} \quad (\text{ec.27})$$

τ es el grosor del ánodo, cátodo y electrolito (ver subíndice), σ es la conductividad de las diferentes partes y R_{cont} la resistencia de contacto. K es factor preexponencial de conductividad iónica y T la temperatura.

Estudio de viabilidad de la incorporación de un sistema de propulsión sin ruido basado en un reformador y una pila de combustible alimentado por bioetanol en un submarino

Las pérdidas óhmicas son el resultado de multiplicar la resistencia por la intensidad, es decir:

$$E_{Ohm} = J \cdot R_{ohm} \quad (\text{ec.3})$$

Siendo J la intensidad en A/m².

Sobrepotencial de activación

El sobrepotencial de activación son las pérdidas ocasionadas por la energía de activación en los electrodos, es el voltaje necesario para comenzar la reacción en la superficie catalítica de estos y son prevalentes a bajas velocidades de reacción (bajo amperaje).

Las pérdidas por activación se han modelado según la siguiente fórmula.

$$E_{act,i} = \frac{2 \cdot R \cdot T}{n_e \cdot F} \cdot \sinh^{-1} \left(\frac{j}{2 \cdot j_{0,i}} \right) \quad (\text{ec.28})$$

Cada electrolito tiene su energía de activación $E_{act,i}$, siendo el subíndice i el electrodo, ánodo o cátodo. R, T y F son la constante de los gases ideales, la temperatura en Kelvin y la constante de Faraday respectivamente, n_e es el número de electrones intercambiados en la reacción, 2 en el caso del ánodo y 4 en el caso del cátodo. j es la densidad de corriente de la pila y $j_{0,i}$ la densidad de corriente de intercambio, que se calcula de la siguiente forma para cada electrodo:

$$j_{0,c} = K_C \cdot \frac{RT}{2F} \cdot \exp \left(\frac{-E_{AC}}{RT} \right) \quad (\text{ec.29})$$

$$j_{0,a} = (p_{H_2}^{inter})^{0.5} \cdot K_A \cdot \frac{RT}{2F} \cdot \exp \left(\frac{-E_{AA}}{RT} \right) \quad (\text{ec.30})$$

K_C y K_A son las constantes preexponenciales del cátodo y el ánodo con unidades Sm⁻² y Sm⁻² bar^{-0.5} respectivamente y $E_{a,i}$ es la energía de activación de cada electrodo, en J mol⁻¹.

Por último, las presiones en la interfaz; cuando la pila está en funcionamiento se consume hidrógeno y oxígeno en el ánodo y en el cátodo respectivamente, produciendo agua en el ánodo. El transporte de los reactivos hasta la interfaz con el electrolito y sustraer el producto (agua) desde la interfaz electrolito-ánodo hasta la corriente anódica mediante difusión por el electrodo poroso hace que la concentración sea menor en las zonas cercanas a la interfaz de la pila donde se produce este intercambio, especialmente en el ánodo. Al ser el cátodo muy fino y poroso, y no recibir los productos de la reacción, la presión de interfaz es prácticamente la misma que la corriente catódica. No es el caso del ánodo.

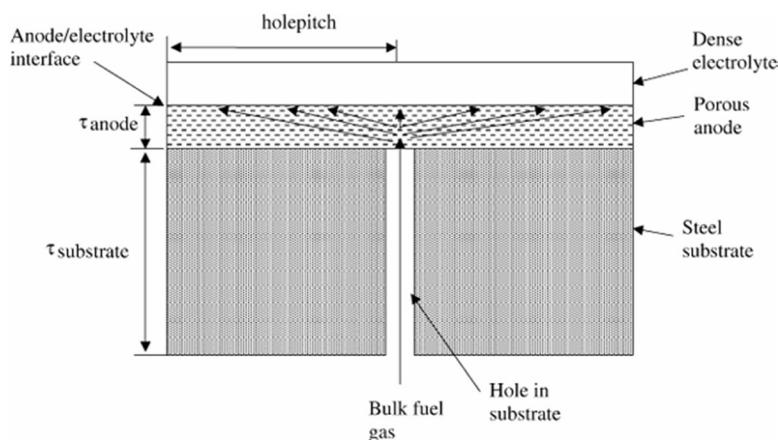


Ilustración 18. Diagrama del fenómeno de transporte a través del substrato metálico (Fuente: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2004.12.067>)

Las presiones en la interfaz son:

$$p_{H_2}^{inter} = p_{H_2}^0 - \frac{R_m T (\tau_{holepitch} + \tau_{substrate})}{2 D_{eff,anode}} j \quad (ec.31)$$

$$p_{H_2O}^{inter} = p_{H_2O}^0 + \frac{RT (\tau_{holepitch} + \tau_{substrate})}{2 D_{eff,anode}} j \quad (ec.32)$$

$$p_{O_2}^{inter} = p_{O_2}^0 \quad (ec.33)$$

Donde $p_{H_2}^0$, $p_{H_2O}^0$ y $p_{O_2}^0$ son las presiones parciales de cada componente; T es en Kelvin; $\tau_{holepitch}$ la distancia media entre los agujeros del substrato; $\tau_{substrate}$ el grosor del substrato, ambos en m; $D_{eff,anode}$ la difusión efectiva del ánodo en $m^2 s^{-1}$ y j la densidad de corriente en $A m^{-2}$.

Potencia

La intensidad de la pila, I , será la densidad de corriente j multiplicada por el Área efectiva de la pila A_{ef} .

$$I = j \cdot A_{ef} \quad (\text{ec.34})$$

Y la potencia de celda W_{cell} será la intensidad multiplicada por el voltaje de celda V_{cell} .

$$W_{cell} = I \cdot V_{cell} \quad (\text{ec.35})$$

La potencia del bloque de celdas o stack, será igual al número de celdas, n , multiplicado por la potencia de esta.

$$W = W_{cell} \cdot n \quad (\text{ec.36})$$

La cantidad de hidrógeno necesario para poner en marcha la instalación viene determinada por la siguiente ecuación.

$$\dot{n} = \frac{i \cdot A_{ef}}{n \cdot F \cdot U_f} \quad (\text{ec.37})$$

Donde:

n (mol/s) es la cantidad de hidrógeno necesaria para obtener la potencia demandada.

i es la densidad de corriente (amperios/ m²)

A_{ef} es el área efectiva de la pila en m².

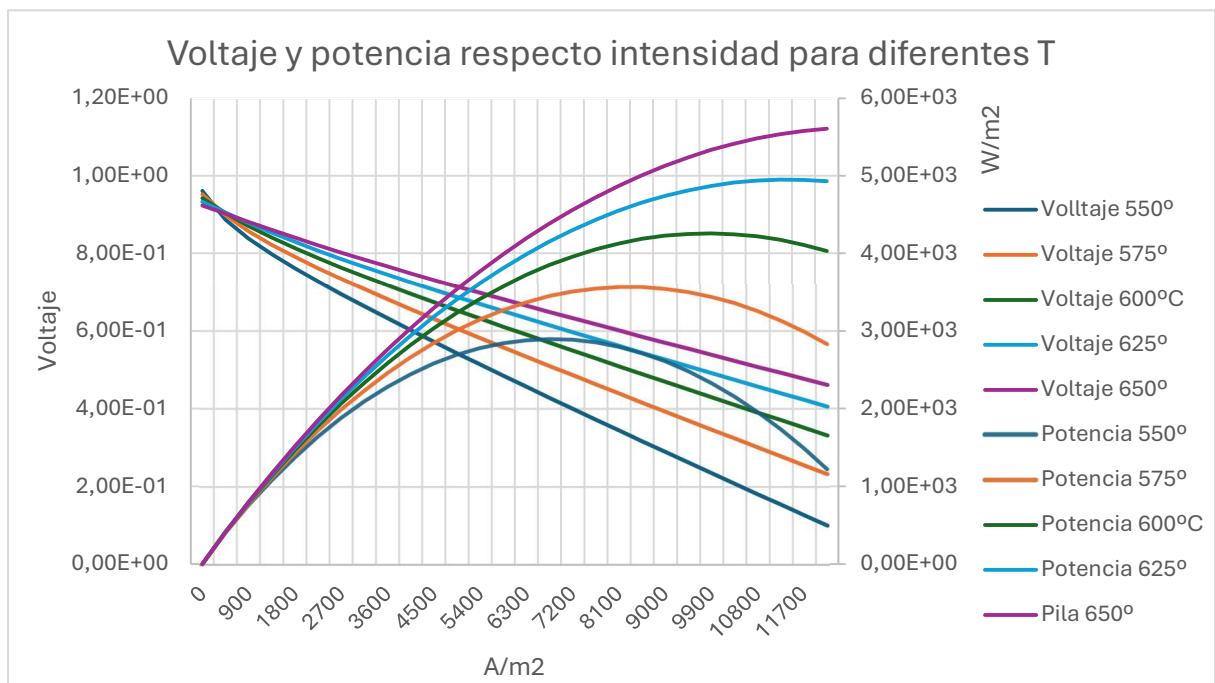
n es el número de celdas de la pila.

F es la constante de Faraday

U_f es el factor de utilización (Fracción de hidrógeno alimentado que consume la pila)

Temperatura de operación

Un parámetro muy importante a determinar antes de empezar las simulaciones es la temperatura de operación. Como se ha podido observar en las ecuaciones anteriores, las resistencias y voltaje de la pila varían con la temperatura, es por ello que se debe encontrar una temperatura adecuada para alcanzar la mayor potencia posible de la manera más eficiente. Como se puede observar en la gráfica, conforme aumenta la temperatura aumenta la potencia de la pila. La máxima temperatura permitida por la pila es de 600 °C si no se quiere incurrir en fallos por degradación. Este examen preliminar de la temperatura indicada para la pila se realizó a presión atmosférica, con una presión parcial de hidrógeno inicial de 0,6 bar y un factor de utilización del 90%.



Gráfica 12 Voltaje y potencia de la celda según densidad corriente y T. (Fuente: Elaboración pro

ANEXO IV DIAGRAMAS DE INSTALACIÓN COMPLETOS

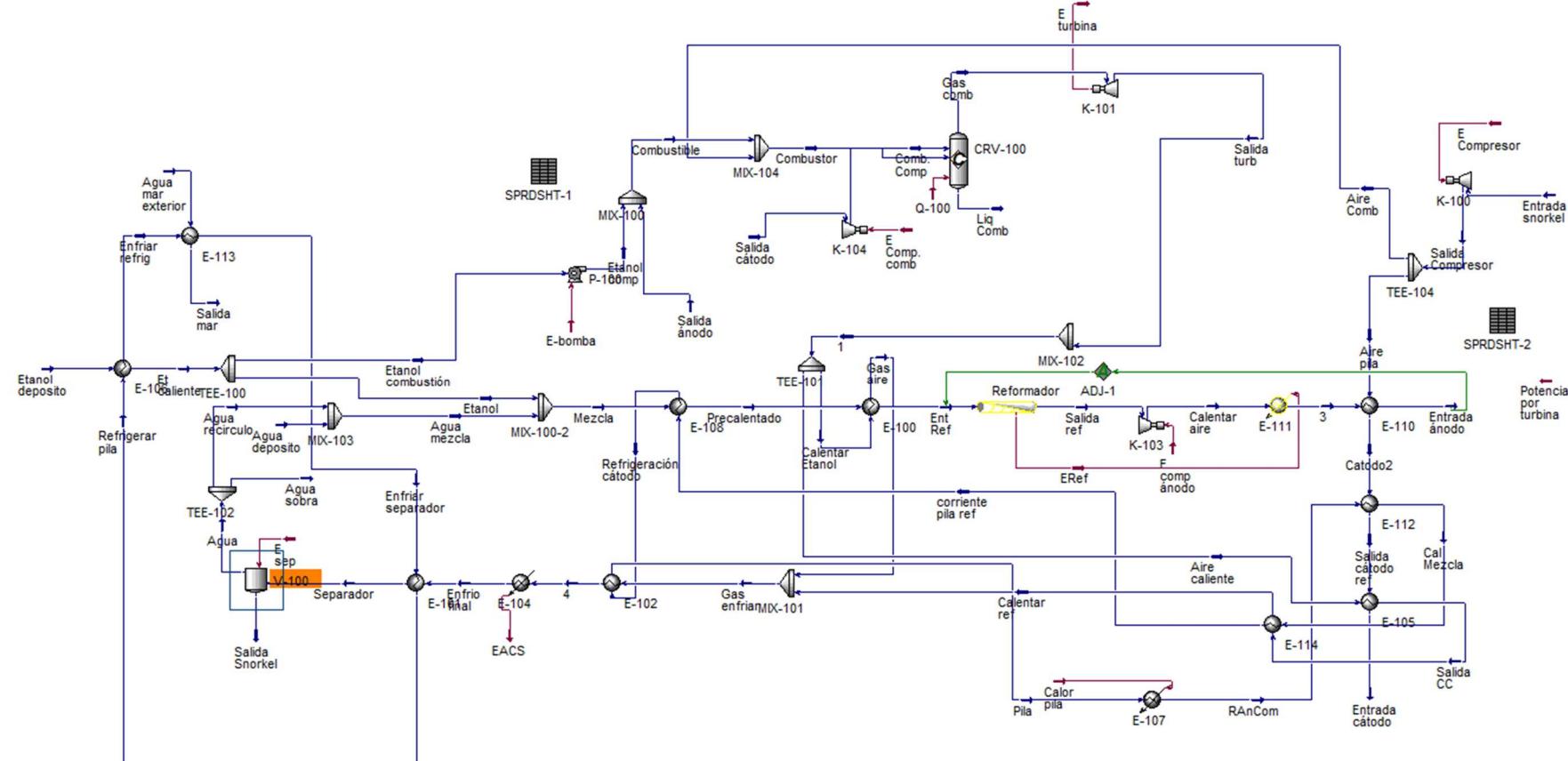


Ilustración 19. Esquema instalación simple (Fuente: AspenOne HYSYS®)

Estudio de viabilidad de la incorporación de un sistema de propulsión sin ruido basado en un reformador y una pila de combustible alimentado por bioetanol en un submarino

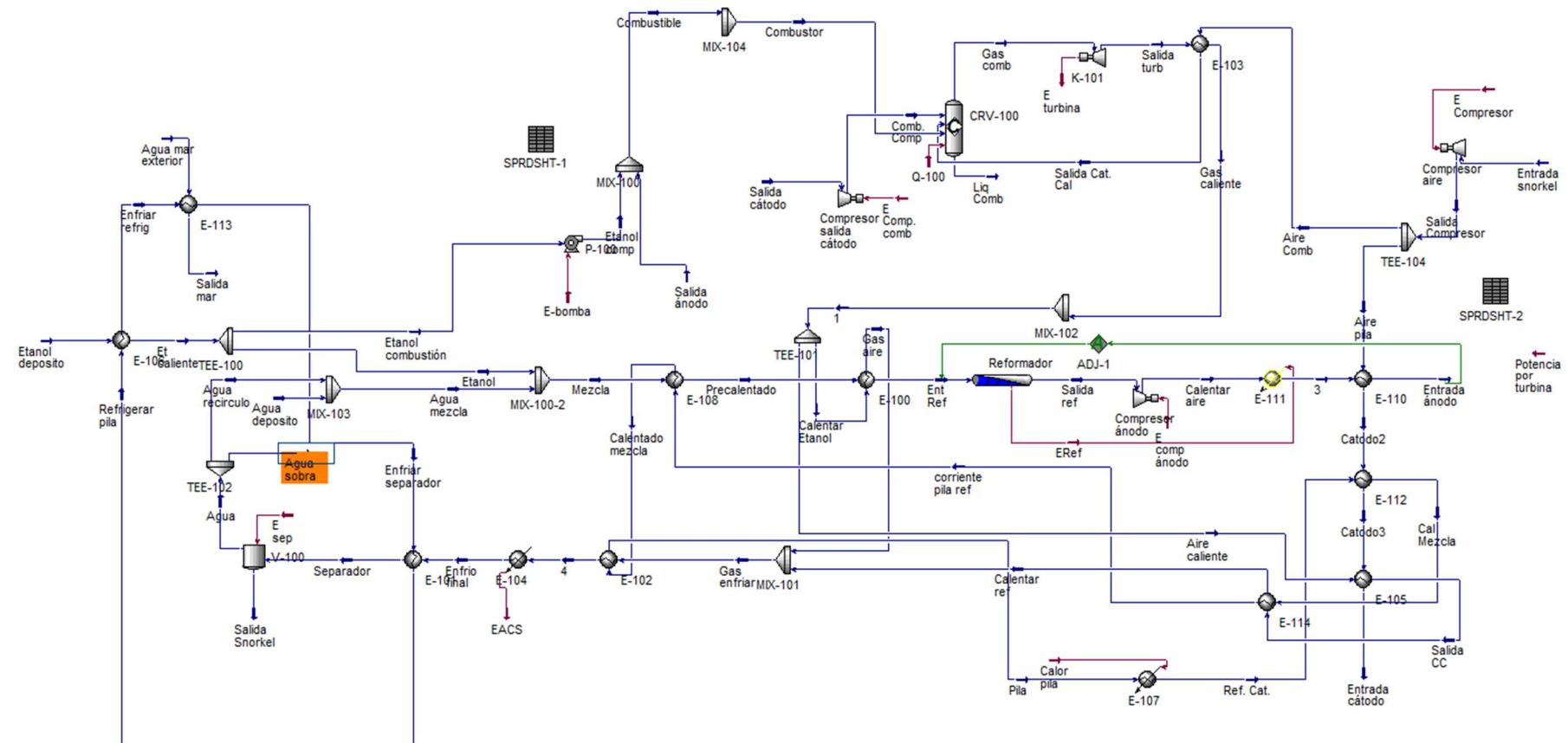


Ilustración 20. Esquema instalación con aire calentado (Fuente: AspenOne HYSYS®)

Estudio de viabilidad de la incorporación de un sistema de propulsión sin ruido basado en un reformador y una pila de combustible alimentado por bioetanol en un submarino

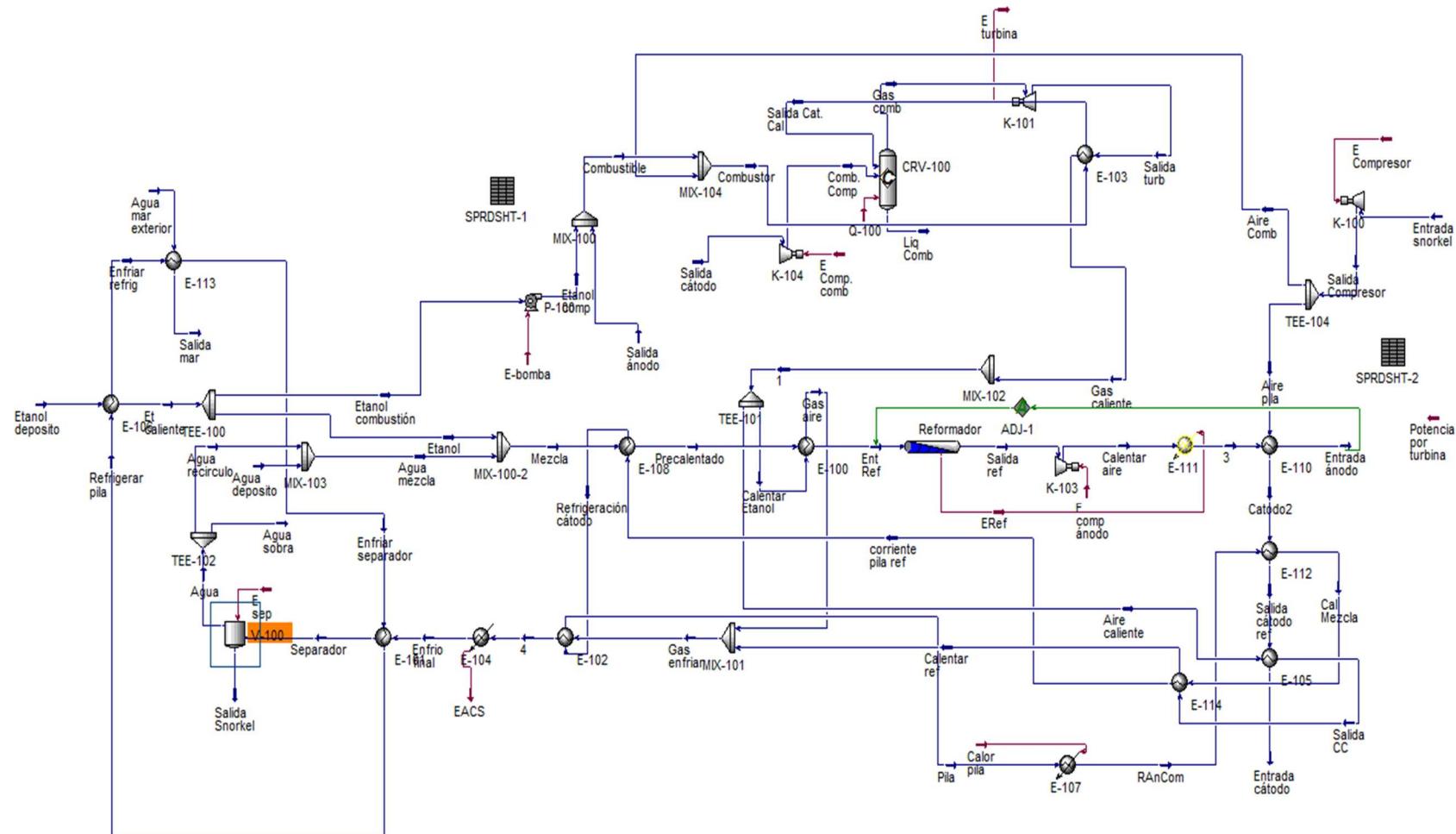


Ilustración 21. Esquema instalación entrada combustor calentada (Fuente: AspenOne HYSYS®)

Estudio de viabilidad de la incorporación de un sistema de propulsión sin ruido basado en un reformador y una pila de combustible alimentado por bioetanol en un submarino

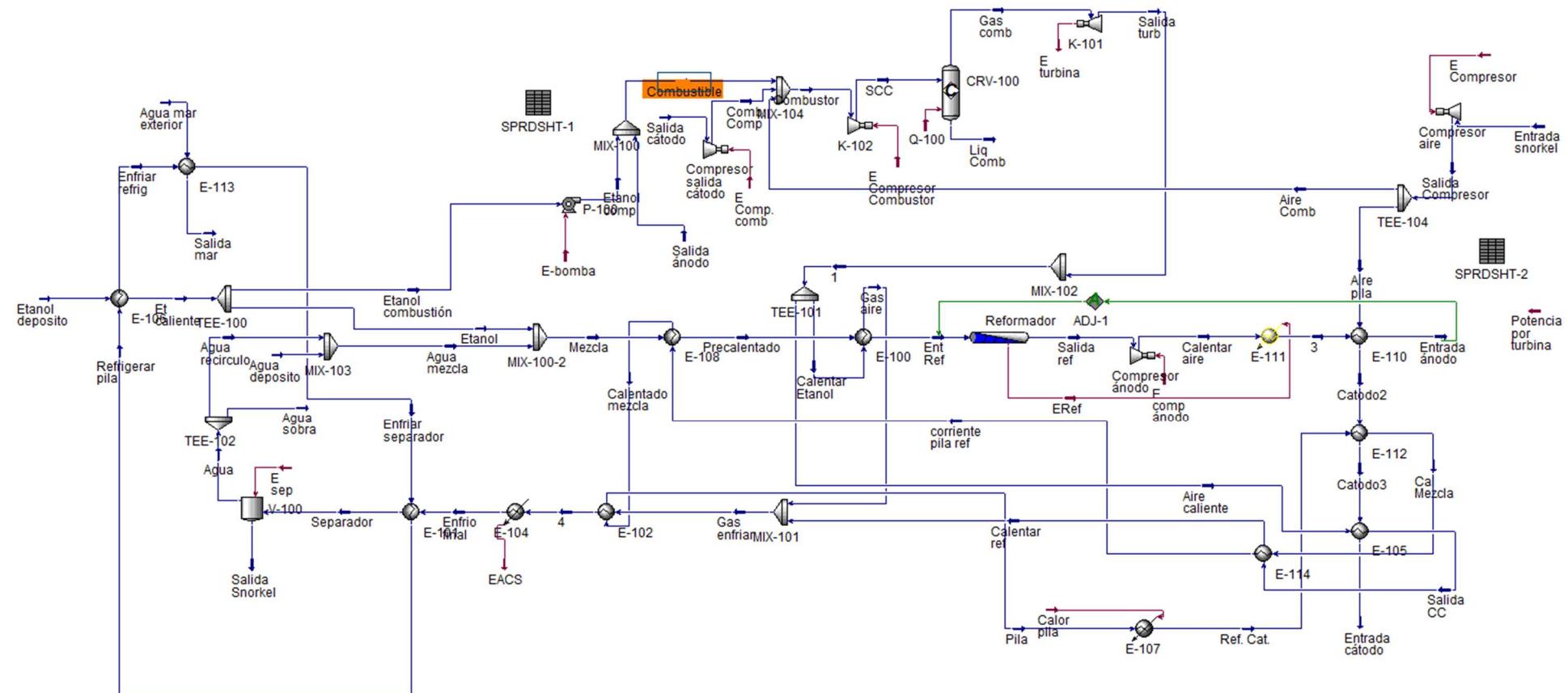


Ilustración 22. Esquema instalación con turbina compresor (Fuente: AspenOne HYSYS®)

Estudio de viabilidad de la incorporación de un sistema de propulsión sin ruido basado en un reformador y una pila de combustible alimentado por bioetanol en un submarino

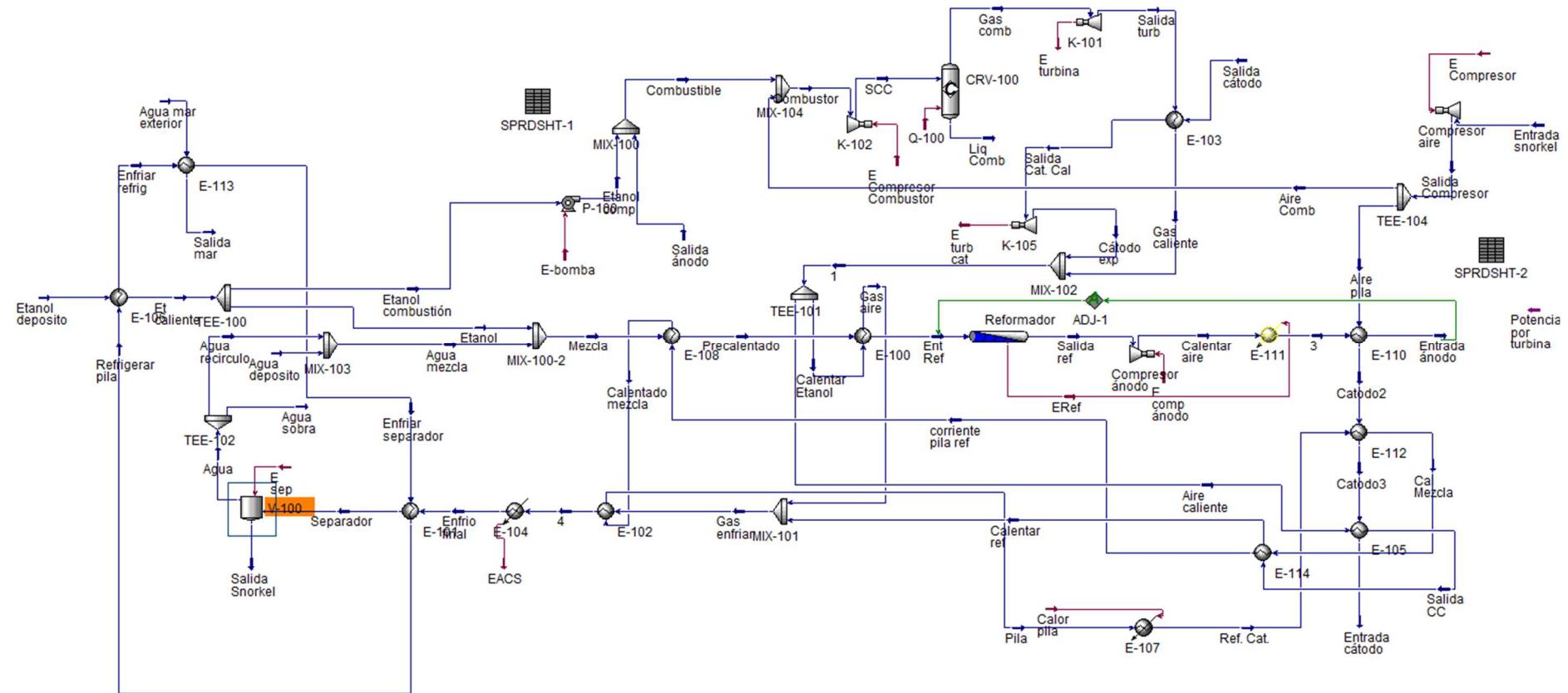


Ilustración 23. Esquema instalación con turbina compresor y cátodo calentado aparte (Fuente: AspenOne HYSYS®)

ANEXO V. EL REFORMADO

En la etapa de reformado se obtiene hidrógeno a partir de etanol y agua, para favorecer esta reacción a la temperatura deseada se utiliza un catalizador y se le aporta energía ya que es una reacción endotérmica.

El catalizador

El catalizador escogido contiene un 0,5% de Rodio; un 0,5% de Paladio y el resto de óxido de cerio(IV), ya que es el que mejor se comporta a altas temperaturas [15] y en el cual se producen las siguientes reacciones de reformado. [14]



Las ecuaciones que rigen el comportamiento del reformador se encuentran en el mismo artículo y son las siguientes.

$$r_1 = k_1 p_e \quad (\text{ec.38})$$

$$r_2 = k_2 \left[p_{\text{CO}} p_{\text{H}_2\text{O}} - \frac{p_{\text{CO}_2} p_{\text{H}_2}}{K_2} \right] \quad (\text{ec.39})$$

$$r_3 = k_3 \left[p_{\text{CH}_4} p_{\text{H}_2\text{O}} - \frac{p_{\text{CO}} p_{\text{H}_2}^3}{K_3} \right] \quad (\text{ec.40})$$

$$r_4 = k_4 \left[p_{\text{CH}_4} p_{\text{H}_2\text{O}}^2 - \frac{p_{\text{CO}_2} p_{\text{H}_2}^4}{K_4} \right] \quad (\text{ec.41})$$

$$k_i = k_{\infty,i} e^{-E_i/RT} \quad (\text{ec.42})$$

Siendo r_i las ratios de reacción, p las presiones parciales en bares de cada sustancia, $k_{\infty,i}$ las constantes pre exponenciales de reacción, k_i las constantes de reacción, E_i las energías de activación, R y T la constante de los gases ideales y la temperatura en Kelvin respectivamente y K_i las constantes de equilibrio para cada reacción.

Los valores de $k_{\infty,i}$ y de E_i se encuentran en la siguiente tabla:

Tabla 9. Diferentes valores de $k_{(\infty,i)}$ (Fuente: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.01.174>)

Reaction i	$k_{\infty,i}$ [mol/(mg _{cat} min bar ⁿ)]	E_i [kJ mol ⁻¹]
1	4.3×10^1	87
2	3.6×10^{-1}	70
3	5.3×10^2	154
4	5.2×10^3	156

Como se puede observar, la constante preexponencial depende de la masa de catalizador. Esta se puede recalcular para poder introducirla en AspenHYSYS multiplicándola por la densidad del lecho del catalizador. El valor de la densidad es 5.5×10^4 g_{cat} m_R³.

La reacción 1, de conversión del etanol, no es una reacción reversible, y en todas las simulaciones llevadas a cabo se consume un 100% del etanol, sin embargo, para producir más hidrógeno hay que conseguir aumentar la conversión de metano y monóxido de carbono a H₂ es decir, favorecer las ecuaciones 2, 3 y 4.

Los valores de K_i

Recordemos las reacciones 2, 3 y 4:

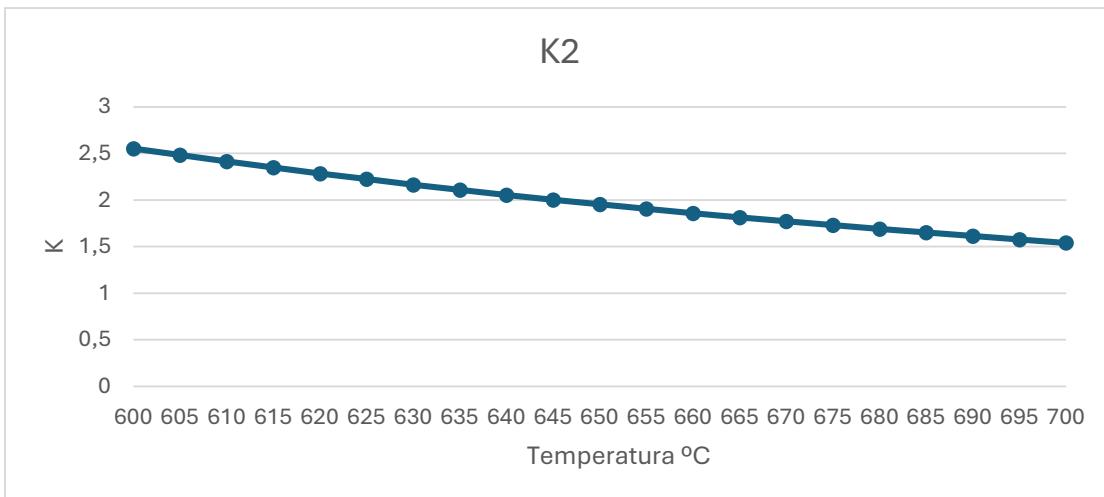
$$r_2 = k_2 \left[p_{CO} p_{H_2O} - \frac{p_{CO_2} p_{H_2}}{K_2} \right] \quad (\text{ec.39})$$

$$r_3 = k_3 \left[p_{CH_4} p_{H_2O} - \frac{p_{CO} p_{H_2}^3}{K_3} \right] \quad (\text{ec.40})$$

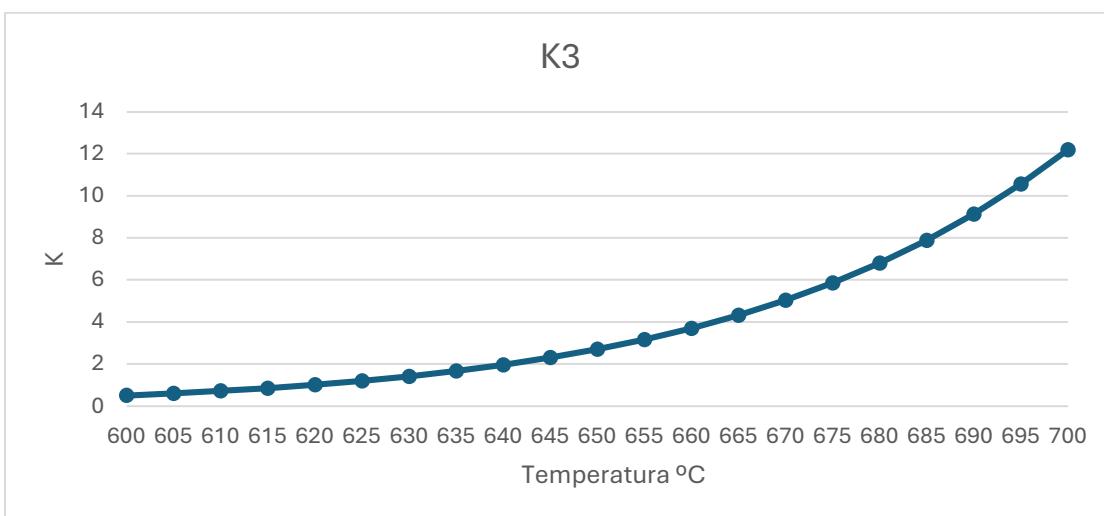
$$r_4 = k_4 \left[p_{CH_4} p_{H_2O}^2 - \frac{p_{CO_2} p_{H_2}^4}{K_4} \right] \quad (\text{ec.41})$$

Como se puede ver, la constante de equilibrio K_i de cada una influye en el comportamiento de la reacción, cuanto mayor sea esta constante, mayor será la ratio de la reacción.

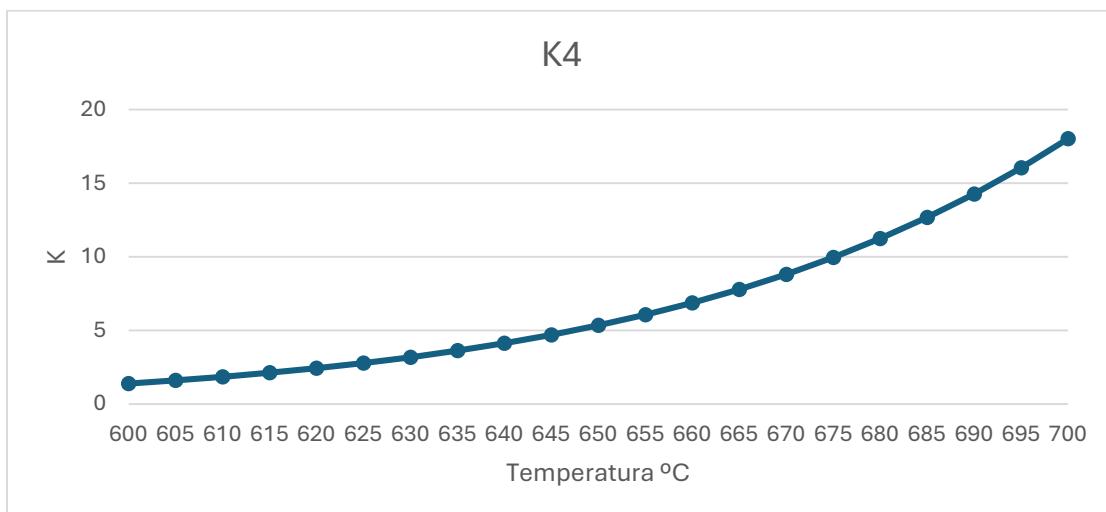
Estudio de viabilidad de la incorporación de un sistema de propulsión sin ruido basado en un reformador y una pila de combustible alimentado por bioetanol en un submarino



Gráfica 13 Valores de K_2 para diferentes temperaturas. (Fuente: Elaboración propia)



Gráfica 14. Valores de K_3 para diferentes temperaturas. (Fuente: Elaboración propia)



Gráfica 15. Valores de K_4 para diferentes temperaturas. (Fuente: Elaboración propia)

Como se observa en las gráficas anteriores (Gráficas 13, 14 y 15), los valores de K son diferentes para cada reacción y para cada temperatura. Estas gráficas plasman los resultados obtenidos en la tabla que encontrará en el Anexo tablas. Para la reacción WGS, la reacción 2, encontramos que K disminuye conforme aumenta la temperatura (gráfica 13), es decir, que se producirá menos hidrógeno mediante esa reacción conforme se aumenta la temperatura.

Esto no sucede con las reacciones restantes (2 y 3) ya que como se ve en las gráficas (14 y 15); K crece con la temperatura. También cabe recalcar que en el caso de la reacción 2, K es menor que la unidad para las temperaturas simuladas más bajas.

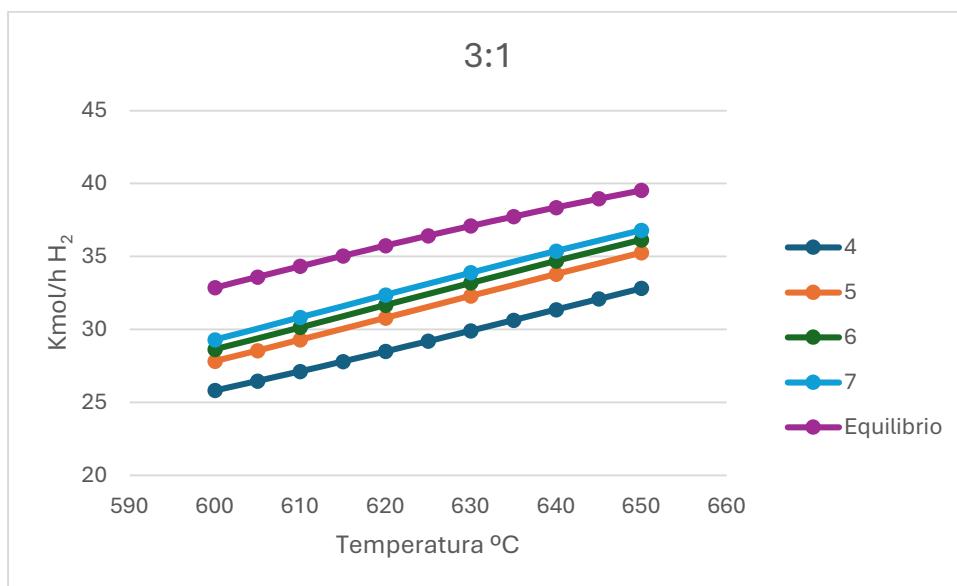
El volumen del reformador

El reformador es el reactor que contiene el catalizador donde se realizan las reacciones de reformado, cuanto mayor es el volumen del reactor; mayor es la conversión. Se ha optado por simular el comportamiento del reformador en función del volumen, la temperatura y la relación agua etanol. Para ellos se han introducido 10 kmol/h de etanol y se han comparado los resultados obtenidos con un reactor de equilibrio de Gibbs. Los valores encontrados se encuentran en el Anexo VI (Tablas 18, 19, 20, 21).

Estudio de viabilidad de la incorporación de un sistema de propulsión sin ruido basado en un reformador y una pila de combustible alimentado por bioetanol en un submarino

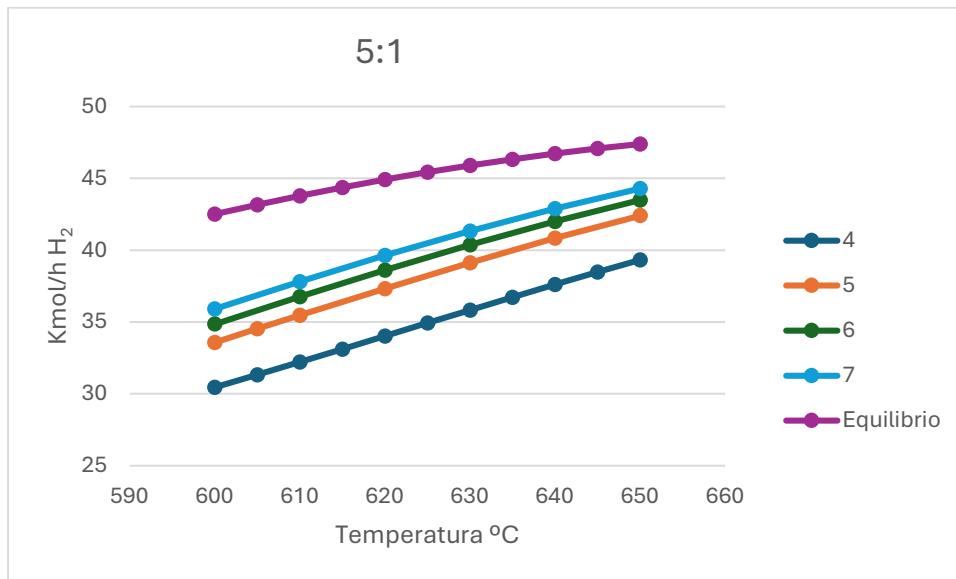
Las gráficas 16 y 17 representan la producción de hidrógeno para una relación de agua; etanol, de 3:1 y 5:1 respectivamente. Como se comprueba en estas gráficas, las curvas para ambas condiciones son idénticas, variando únicamente en la cantidad de H₂ producido a partir de los 10kmol/h de etanol que se introducen para todas las simulaciones llevadas a cabo.

Como bien es sabido, el espacio en un submarino es reducido, y el aumento de producción de hidrógeno conforme aumenta el volumen va disminuyendo, por ello se ha optado por un reformador de 6 m³, un punto medio entre 5 y 7 m³, que supone un compromiso entre volumen y coste.



Gráfica 16 Kmol/h de hidrógeno producido según la temperatura y el volumen del reformador (m³) para una relación 3:1 de agua etanol. (Fuente: Elaboración propia)

Estudio de viabilidad de la incorporación de un sistema de propulsión sin ruido basado en un reformador y una pila de combustible alimentado por bioetanol en un submarino



Gráfica 17. Kmol/h de hidrógeno producido según la temperatura y el volumen del reformador (m^3) para una relación 5:1 de agua etanol. (Fuente: Elaboración propia)

Estudio de viabilidad de la incorporación de un sistema de propulsión sin ruido basado en un reformador y una pila de combustible alimentado por bioetanol en un submarino

ANEXO VI TABLAS Y GRÁFICAS

Relación agua etanol para instalación turbina

Tabla 10. Datos simulación turbina simple (Fuente: Elaboración propia)

	Ef. Eléc. pila	Ef eléctrica instal	nro celdas	Etanol quemador	T reformado (°C)
3:1	0,619	0,337	28314,104	0	600
	Et pila kmol/h	KMoles H2/h	Conc. H2	Pot. Pila kw	Presión pila (bar)
	9,744	28,76	0,438	1186,96	6
3,25:1	Ef. Eléc. pila	Ef eléctrica instal	nro celdas	Etanol quemador	T reformado
	0,6167	0,3421	28994,1505	0	600
	Et pila kmol/h	KMoles H2/h	Conc. H2	Pot. Pila kw	Presión pila (bar)
3,5:1	9,599	29,45	0,435	1210,88	6
	Ef. Eléc. pila	Ef eléctrica instal	nro celdas	Etanol quemador	T reformado (°C)
	0,6144	0,3465	29632,7553	0	600
3,75:1	Et pila kmol/h	KMoles H2/h	Conc. H2	Pot. Pila kw	Presión pila (bar)
	9,476	30,1	0,432	1232,96	6
	Ef. Eléc. pila	Ef eléctrica instal	nro celdas	Etanol quemador	T reformado
4:1	0,6122	0,3503	30235,0201	0	600
	Et pila kmol/h	KMoles H2/h	Conc. H2	Pot. Pila kw	Presión pila (bar)
	9,373	30,71	0,429	1253,42	6
4,25:1	Ef. Eléc. pila	Ef eléctrica instal	nro celdas	Etanol quemador	T reformado (°C)
	0,61	0,3536	30805,9823	0	600
	Et pila kmol/h	KMoles H2/h	Conc. H2	Pot. Pila kw	Presión pila (bar)
4,5:1	9,287	31,29	0,425	1272,48	6
	Ef. Eléc. pila	Ef eléctrica instal	nro celdas	Etanol quemador	T reformado
	0,6078	0,3563	31349,8197	0	600
4,75:1	Et pila kmol/h	KMoles H2/h	Conc. H2	Pot. Pila kw	Presión pila (bar)
	9,216	31,85	0,42	1290,32	6
	Ef. Eléc. pila	Ef eléctrica instal	nro celdas	Etanol quemador	T reformado (°C)
5:1	0,6056	0,3585	31870,279	0	600
	Et pila kmol/h	KMoles H2/h	Conc. H2	Pot. Pila kw	Presión pila (bar)
	9,159	32,37	0,416	1307,1	6
4,75:1	Ef. Eléc. pila	Ef eléctrica instal	nro celdas	Etanol quemador	T reformado
	0,6035	0,3602	32370,0888	0	600
	Et pila kmol/h	KMoles H2/h	Conc. H2	Pot. Pila kw	Presión pila (bar)
5:1	9,115	32,88	0,411	1322,94	6
	Ef. Eléc. pila	Ef eléctrica instal	nro celdas	Etanol quemador	T reformado (°C)
	0,6014	0,3615	32852,7681	0	600
Et pila kmol/h	KMoles H2/h	Conc. H2	Pot. Pila kw	Presión pila (bar)	
	9,082	33,37	0,405	1337,99	6

Estudio de viabilidad de la incorporación de un sistema de propulsión sin ruido basado en un reformador y una pila de combustible alimentado por bioetanol en un submarino

Relación agua etanol para instalación turbina y precalentamiento de aire

Tabla 11. Datos simulación aire combustor calentado. (Fuente: Elaboración propia)

	Ef. Eléc. pila	Ef eléctrica instal	nro celdas	Et comb kmol/h	T reformado (°C)
3:1	0,6197	0,3624	26584,3226	0	600
	Et pila kmol/h	KMoles H2/h	Conc. H2	Pot. Pila kw	Presión pila (bar)
	9,06	27	0,441	1115,56	6
	Ef. Eléc. pila	Ef eléctrica instal	nro celdas	Et comb kmol/h	T reformado
3,25:1	0,6173	0,3658	27368,3897	0	600
	Et pila kmol/h	KMoles H2/h	Conc. H2	Pot. Pila kw	Presión pila (bar)
	8,976	27,8	0,438	1144,1	6
	Ef. Eléc. pila	Ef eléctrica instal	nro celdas	Et comb kmol/h	T reformado (°C)
3,5:1	0,615	0,3687	28100,9577	0	600
	Et pila kmol/h	KMoles H2/h	Conc. H2	Pot. Pila kw	Presión pila (bar)
	8,905	28,55	0,435	1170,34	6
	Ef. Eléc. pila	Ef eléctrica instal	nro celdas	Et comb kmol/h	T reformado
3,75:1	0,6127	0,3711	28786,8986	0	600
	Et pila kmol/h	KMoles H2/h	Conc. H2	Pot. Pila kw	Presión pila (bar)
	8,846	29,24	0,432	1194,5	6
	Ef. Eléc. pila	Ef eléctrica instal	nro celdas	Et comb kmol/h	T reformado (°C)
4:1	0,6105	0,3732	29433,0972	0	600
	Et pila kmol/h	KMoles H2/h	Conc. H2	Pot. Pila kw	Presión pila (bar)
	8,798	29,9	0,427	1216,88	6
	Ef. Eléc. pila	Ef eléctrica instal	nro celdas	Et comb kmol/h	T reformado
4,25:1	0,6083	0,3748	30043,5637	0	600
	Et pila kmol/h	KMoles H2/h	Conc. H2	Pot. Pila kw	Presión pila (bar)
	8,76	30,52	0,423	1237,66	6
	Ef. Eléc. pila	Ef eléctrica instal	nro celdas	Et comb kmol/h	T reformado (°C)
4,5:1	0,6062	0,376	30622,8796	0	600
	Et pila kmol/h	KMoles H2/h	Conc. H2	Pot. Pila kw	Presión pila (bar)
	8,731	31,11	0,418	1257,04	6
	Ef. Eléc. pila	Ef eléctrica instal	nro celdas	Et comb kmol/h	T reformado
4,75:1	0,604	0,3769	31176,3844	0	600
	Et pila kmol/h	KMoles H2/h	Conc. H2	Pot. Pila kw	Presión pila (bar)
	8,711	31,67	0,413	1275,25	6
	Ef. Eléc. pila	Ef eléctrica instal	nro celdas	Et comb kmol/h	T reformado (°C)
5:1	0,6019	0,3774	31703,2607	0	600
	Et pila kmol/h	KMoles H2/h	Conc. H2	Pot. Pila kw	Presión pila (bar)
	8,699	32,2	0,408	1292,27	6

Estudio de viabilidad de la incorporación de un sistema de propulsión sin ruido basado en un reformador y una pila de combustible alimentado por bioetanol en un submarino

Relación agua etanol para instalación turbina y precalentamiento corriente de entrada al combustor.

Tabla 12. Tabla 13-. Datos simulación combustible combustor calentado. (Fuente: Elaboración propia)

	Ef. Eléc. pila	Ef eléctrica instal	nro celdas	Et comb kmol/h	T reformado (°C)
3:1	0,62	0,3774	25659,7701	0	600
	Et pila kmol/h	KMoles H2/h	Conc. H2	Pot. Pila kw	Presión pila (bar)
	8,699	26,07	0,442	1077,34	6
	Ef. Eléc. pila	Ef eléctrica instal	nro celdas	Et comb kmol/h	T reformado
3,25:1	0,6176	0,3805	26448,7977	0	600
	Et pila kmol/h	KMoles H2/h	Conc. H2	Pot. Pila kw	Presión pila (bar)
	8,628	26,87	0,44	1106,27	6
	Ef. Eléc. pila	Ef eléctrica instal	nro celdas	Et comb kmol/h	T reformado (°C)
3,5	0,6153	0,383	27194,2742	0	600
	Et pila kmol/h	KMoles H2/h	Conc. H2	Pot. Pila kw	Presión pila (bar)
	8,572	27,62	0,437	1133,22	6
	Ef. Eléc. pila	Ef eléctrica instal	nro celdas	Et comb kmol/h	T reformado
3,75:1	0,6131	0,3851	27893,3631	0	600
	Et pila kmol/h	KMoles H2/h	Conc. H2	Pot. Pila kw	Presión pila (bar)
	8,526	28,33	0,433	1158,09	6
	Ef. Eléc. pila	Ef eléctrica instal	nro celdas	Et comb kmol/h	T reformado (°C)
4:1	0,6109	0,3868	28552,159	0	600
	Et pila kmol/h	KMoles H2/h	Conc. H2	Pot. Pila kw	Presión pila (bar)
	8,489	29	0,429	1181,15	6
	Ef. Eléc. pila	Ef eléctrica instal	nro celdas	Et comb kmol/h	T reformado
4,25:1	0,6087	0,388	29177,6365	0	600
	Et pila kmol/h	KMoles H2/h	Conc. H2	Pot. Pila kw	Presión pila (bar)
	8,462	29,64	0,425	1202,7	6
	Ef. Eléc. pila	Ef eléctrica instal	nro celdas	Et comb kmol/h	T reformado
4,5:1	0,6065	0,3887	29781,5888	0	600
	Et pila kmol/h	KMoles H2/h	Conc. H2	Pot. Pila kw	Presión pila (bar)
	8,446	30,25	0,42	1223,23	6
	Ef. Eléc. pila	Ef eléctrica instal	nro celdas	Et comb kmol/h	T reformado (°C)
4,75:1	0,6044	0,3894	30337,5518	0	600
	Et pila kmol/h	KMoles H2/h	Conc. H2	Pot. Pila kw	Presión pila (bar)
	8,431	30,82	0,415	1241,69	6
	Ef. Eléc. pila	Ef eléctrica instal	nro celdas	Et comb kmol/h	T reformado
5:1	0,6023	0,3896	30879,0319	0	600
	Et pila kmol/h	KMoles H2/h	Conc. H2	Pot. Pila kw	Presión pila (bar)
	8,427	31,37	0,409	1259,44	6

Aumento temperatura reformado y calentamiento de la corriente de entrada combustor.

*Tabla 13. Datos simulación combustible combustor calentado y temperatura Reformado aumentada.
(Fuente: Elaboración propia)*

Relación Agua : Etanol	T reformado(°C)	Ef eléctrica instal	T Combustible Combustor (°C)
3:01	605	0,3824	881
	610	0,3845	868,3
	615	0,3871	853,8
	620	0,3896	839
	625	0,3921	824,5
	630	0,3944	809,2
	635	0,3967	794,1
	640	0,3988	779,2
	645	0,4008	764,2
3,25:1	650	0,399	700
	605	0,3851	861,7
	610	0,3879	847,2
	615	0,3907	832,5
	620	0,3932	817,5
	625	0,3957	802,5
	630	0,3982	787,5
	635	0,4004	772,5
	640	0,4026	757,6
3,5:1	645	0,3976	655
	605	0,3878	842,5
	610	0,3907	827,8
	615	0,3936	812,9
	620	0,3963	797,8
	625	0,3989	782,8
	630	0,4013	767,8
	635	0,4037	752,8
	640	0,3986	643,7
3,75:1	605	0,3901	824,9
	610	0,3931	810
	615	0,3961	794,9
	620	0,3988	779,8
	625	0,4015	764,7
	630	0,404	749,4
	635	0,3974	630

Estudio de viabilidad de la incorporación de un sistema de propulsión sin ruido basado en un reformador y una pila de combustible alimentado por bioetanol en un submarino

4:01	605	0,3919	808,6
	610	0,395	793,5
	615	0,3976	773
	620	0,4009	763,3
	625	0,4036	748,3
	630	0,3991	645
4,25:1	605	0,3933	793,7
	610	0,3965	778,5
	615	0,3996	763,3
	620	0,4026	748,2
	625	0,4002	677
4,5:1	605	0,3943	780
	610	0,3976	764,7
	615	0,4008	749,5
	620	0,4015	710
	625	0,3992	605
4,75:1	605	0,3949	767,4
	610	0,3983	752,1
	615	0,4016	736,9
	620	0,3939	610
5:01	605	0,3951	755,8
	610	0,3987	740,5
	615	0,394	645,7

Estudio de viabilidad de la incorporación de un sistema de propulsión sin ruido basado en un reformador y una pila de combustible alimentado por bioetanol en un submarino

Compresor y turbina de alta presión.

Tabla 14. Datos simulación combustor turbina. (Fuente: Elaboración propia)

	Ef. Eléc. pila	Ef eléctrica instal	nro celdas	Etanol quemador	T reformado (°C)
3:1	0,6187	0,3257	29156,208	0	600
	Et pila kmol/h	KMoles H2/h	Conc. H2	Pot. Pila kw	Presión pila (bar)
	10,081	29,62	0,436	1221,67	6
3,25:1	Ef. Eléc. pila	Ef eléctrica instal	nro celdas	Etanol quemador	T reformado
	0,6163	0,3271	30123,3477	0	600
	Et pila kmol/h	KMoles H2/h	Conc. H2	Pot. Pila kw	Presión pila (bar)
	10,037	30,6	0,433	1257,19	6
3,5:1	Ef. Eléc. pila	Ef eléctrica instal	nro celdas	Etanol quemador	T reformado (°C)
	0,6139	0,328	31043,0107	0	600
	Et pila kmol/h	KMoles H2/h	Conc. H2	Pot. Pila kw	Presión pila (bar)
	10,009	31,53	0,43	1290,51	6
3,75:1	Ef. Eléc. pila	Ef eléctrica instal	nro celdas	Etanol quemador	T reformado
	0,6115	0,3285	31922,0596	0	600
	Et pila kmol/h	KMoles H2/h	Conc. H2	Pot. Pila kw	Presión pila (bar)
	9,996	32,43	0,426	1321,93	6
4:1	Ef. Eléc. pila	Ef eléctrica instal	nro celdas	Etanol quemador	T reformado (°C)
	0,6092	0,3285	32765,1847	0	600
	Et pila kmol/h	KMoles H2/h	Conc. H2	Pot. Pila kw	Presión pila (bar)
	9,995	33,28	0,421	1351,66	6
4,25:1	Ef. Eléc. pila	Ef eléctrica instal	nro celdas	Etanol quemador	T reformado
	0,6069	0,3281	33577,2477	0	600
	Et pila kmol/h	KMoles H2/h	Conc. H2	Pot. Pila kw	Presión pila (bar)
	10,007	34,11	0,416	1379,91	6
4,5:1	Ef. Eléc. pila	Ef eléctrica instal	nro celdas	Etanol quemador	T reformado (°C)
	0,6046	0,3273	34362,5731	0	600
	Et pila kmol/h	KMoles H2/h	Conc. H2	Pot. Pila kw	Presión pila (bar)
	10,031	34,91	0,411	1406,87	6
4,75:1	Ef. Eléc. pila	Ef eléctrica instal	nro celdas	Etanol quemador	T reformado
	0,6023	0,3262	35126,0703	0	600
	Et pila kmol/h	KMoles H2/h	Conc. H2	Pot. Pila kw	Presión pila (bar)
	10,066	35,68	0,405	1432,75	6
5:1	Ef. Eléc. pila	Ef eléctrica instal	nro celdas	Etanol quemador	T reformado (°C)
	0,6001	0,3247	35869,4459	0	600
	Et pila kmol/h	KMoles H2/h	Conc. H2	Pot. Pila kw	Presión pila (bar)
	10,111	36,44	0,4	1457,63	6

Estudio de viabilidad de la incorporación de un sistema de propulsión sin ruido basado en un reformador y una pila de combustible alimentado por bioetanol en un submarino

Introducimos la salida del ánodo en el sistema compresor turbina

Tabla 15. Datos simulación combustor turbina con cátodo aparte. (Fuente: Elaboración propia)

	Ef. Eléc. pila	Ef eléctrica instal	nro celdas	Et comb kmol/h	T reformado (°C)
3:1	0,6195	0,3539	27138,7437	0	600
	Et pila kmol/h	KMoles H2/h	Conc. H2	Pot. Pila kw	Presión pila (bar)
	9,277	27,57	0,44	1138,46	6
	Ef. Eléc. pila	Ef eléctrica instal	nro celdas	Et comb kmol/h	T reformado (°C)
3,25:1	0,6171	0,3561	28008,7954	0	600
	Et pila kmol/h	KMoles H2/h	Conc. H2	Pot. Pila kw	Presión pila (bar)
	9,22	28,45	0,437	1170,42	6
	Ef. Eléc. pila	Ef eléctrica instal	nro celdas	Et comb kmol/h	T reformado
3,5:1	0,6147	0,3578	28834,9359	0	600
	Et pila kmol/h	KMoles H2/h	Conc. H2	Pot. Pila kw	Presión pila (bar)
	9,177	29,29	0,434	1200,36	6
	Ef. Eléc. pila	Ef eléctrica instal	nro celdas	Et comb kmol/h	T reformado (°C)
3,75:1	0,6124	0,3589	29622,1936	0	600
	Et pila kmol/h	KMoles H2/h	Conc. H2	Pot. Pila kw	Presión pila (bar)
	9,149	30,09	0,43	1228,5	6
	Ef. Eléc. pila	Ef eléctrica instal	nro celdas	Et comb kmol/h	T reformado
4:1	0,6101	0,3595	30376,3125	0	600
	Et pila kmol/h	KMoles H2/h	Conc. H2	Pot. Pila kw	Presión pila (bar)
	9,133	30,86	0,426	1255,09	6
	Ef. Eléc. pila	Ef eléctrica instal	nro celdas	Et comb kmol/h	T reformado (°C)
4,25:1	0,6079	0,3597	31100,6182	0	600
	Et pila kmol/h	KMoles H2/h	Conc. H2	Pot. Pila kw	Presión pila (bar)
	9,128	31,59	0,421	1280,28	6
	Ef. Eléc. pila	Ef eléctrica instal	nro celdas	Et comb kmol/h	T reformado
4,5:1	0,6057	0,3594	31799,6992	0	600
	Et pila kmol/h	KMoles H2/h	Conc. H2	Pot. Pila kw	Presión pila (bar)
	9,134	32,3	0,416	1304,27	6
	Ef. Eléc. pila	Ef eléctrica instal	nro celdas	Et comb kmol/h	T reformado (°C)
4,75:1	0,6035	0,3588	32475,5731	0	600
	Et pila kmol/h	KMoles H2/h	Conc. H2	Pot. Pila kw	Presión pila (bar)
	9,151	32,99	0,41	1327,15	6
	Ef. Eléc. Pila	Ef eléctrica instal	nro celdas	Et comb kmol/h	T reformado
5:1	0,6013	0,3578	33133,3837	0	600
	Et pila kmol/h	KMoles H2/h	Conc. H2	Pot. Pila kw	Presión pila (bar)
	9,177	33,66	0,405	1349,14	6

Aumento temperatura reformado y calentamiento de la corriente de salida del cátodo.

Tabla 16. Datos Aumento temperatura reformado y calentamiento de la corriente de salida del cátodo. Sistema compresor-turbina. (Fuente: Elaboración propia)

Relación Agua : Etanol	T reformado(°C)	Ef eléctrica instal	T Combustible Combustor (°C)
3:1	605	0,3571	977,5
	610	0,3601	953,2
	615	0,3632	936,1
	620	0,3660	923,4
	625	0,3689	910,6
	630	0,3715	897,8
	635	0,3740	885
	640	0,3748	879,4
	645	0,3718	772
3,25:1	605	0,3594	943,4
	610	0,3626	931
	615	0,3658	918,3
	620	0,3687	905,5
	625	0,3716	892,6
	630	0,3742	879,8
	635	0,3720	761
3,5:1	605	0,3612	927,4
	610	0,3645	914,8
	615	0,3678	902
	620	0,3708	889,1
	625	0,3737	876,2
	630	0,3727	780,2
3,75:1	605	0,3625	912,9
	610	0,3659	900,1
	615	0,3693	887,2
	620	0,3714	878,5
	625	0,3735	813
4:1	605	0,3632	899,5
	610	0,3668	886,6
	615	0,3702	873,6
	620	0,3734	860,6
	625	0,3652	610
4,25:1	605	0,3636	887,3
	610	0,3672	874,2
	615	0,3658	679,6
	620	0,3636	887,3

Valores de Ki respecto a la temperatura

Tabla 17. Valores de K equilibrio según la temperatura (Fuente: Elaboración propia)

T°	K2	K3	K4
600	2,5532	0,5057	1,389
605	2,482	0,6029	1,599
610	2,413	0,7174	1,838
615	2,348	0,852	2,11
620	2,284	1,01	2,419
625	2,224	1,19508438	2,76898701
630	2,165	1,41156845	3,16517923
635	2,109	1,66430806	3,61315519
640	2,055	1,95887206	4,11903379
645	2,003	2,30160562	4,68958049
650	1,953	2,69972712	5,3322659
655	1,905	3,16143569	6,05533019
660	1,85854699	3,69603024	6,86785251
665	1,81375212	4,3140412	7,77982574
670	1,770555619	5,02737605	8,80223694
675	1,7288878	5,84947979	9,94715382
680	1,68867931	6,79551184	11,2278176
685	1,64986662	7,88254054	12,6587428
690	1,612389	9,12975693	14,2558238
695	1,5761888	10,5587093	16,0364496
700	1,54121135	12,1935602	18,0196264

Reformado Tablas

Para 10kmol/h de etanol, diferentes relaciones de agua; etanol, diferente volumen de reformador y temperatura de este.

Tabla 18. Valores reformado para volumen de reformador 4 m3(Fuente: Elaboración propia)

Vol. Ref.	Relación Agua etanol	T reformado	H2	Conc. H2	Conc CH4	H2 Gibbs	Conc,H2 Gibbs
4	3	600	25,8220582	0,39712172	0,11519841	32,8687314	0,4727847
4	3	605	26,4633186	0,40419548	0,11098208	33,6042519	0,47963882
4	3	610	27,1240248	0,41136199	0,10666696	34,3302377	0,48627075
4	3	615	27,802936	0,41860692	0,10227677	35,0445537	0,49266842
4	3	620	28,4960001	0,42586801	0,09782144	35,7449998	0,4988203
4	3	625	29,2021198	0,43314236	0,09333021	36,4293393	0,50471547
4	3	630	29,9171893	0,44036961	0,08881148	37,0953306	0,51034386
4	3	635	30,639662	0,44754315	0,08429124	37,7407636	0,51569638
4	3	640	31,3665639	0,45462539	0,0797858	38,3634998	0,52076515
4	3	645	32,0949697	0,46159226	0,0753102	38,9615151	0,52554365
4	3	650	32,8223342	0,46842106	0,07088214	39,5329437	0,53002694
4	3,25	600	26,6071644	0,39219427	0,10806153	34,3252797	0,47201844
4	3,25	605	27,2829381	0,39941633	0,10392016	35,0617664	0,47861457
4	3,25	610	27,9775846	0,40671604	0,09968916	35,7855739	0,48497297
4	3,25	615	28,6895768	0,41407749	0,09539121	36,4944373	0,49108168
4	3,25	620	29,4145075	0,42143695	0,09103731	37,1860555	0,49692937
4	3,25	625	30,1512458	0,42879133	0,086656	37,8581251	0,5025056
4	3,25	630	30,8953717	0,43607897	0,08225723	38,5083796	0,50780097
4	3,25	635	31,6452663	0,44329292	0,07786649	39,1346323	0,51280732
4	3,25	640	32,3972256	0,45039511	0,07349635	39,7348223	0,51751797
4	3,25	645	33,1485782	0,45736116	0,06916524	40,3070621	0,52192791
4	3,25	650	33,8965475	0,46416857	0,06488989	40,8496839	0,52603396
4	3,50	600	27,3230375	0,38684858	0,10176046	35,7032761	0,47053699
4	3,50	605	28,0312558	0,39419534	0,09769462	36,4368844	0,47686883
4	3,50	610	28,7577622	0,40160664	0,0935471	37,1546209	0,48294845
4	3,50	615	29,5008401	0,40906457	0,08934007	37,8541288	0,48876413
4	3,50	620	30,2558799	0,41650525	0,08508683	38,5330519	0,49430505
4	3,50	625	31,0214017	0,42392414	0,080813	39,1890745	0,49956147
4	3,50	630	31,7925495	0,43125886	0,07652906	39,8199675	0,50452497
4	3,50	635	32,5675904	0,43850133	0,07225948	40,4236368	0,50918866
4	3,50	640	33,342838	0,44561393	0,06801926	40,9981738	0,51354739
4	3,50	645	34,1154078	0,45257144	0,06382639	41,5419044	0,51759796
4	3,50	650	34,8820539	0,45935134	0,05969523	42,0534347	0,52133927
4	3,75	600	27,9752043	0,38119124	0,09616799	37,0064528	0,46845957
4	3,75	605	28,7140941	0,38864201	0,09217833	37,7336539	0,47452255
4	3,75	610	29,4709081	0,39614649	0,08811521	38,441794	0,48031995

Estudio de viabilidad de la incorporación de un sistema de propulsión sin ruido basado en un reformador y una pila de combustible alimentado por bioetanol en un submarino

4	3,75	615	30,243338	0,40368419	0,0839978	39,1284691	0,48584056
4	3,75	620	31,0265089	0,41119083	0,07984058	39,7913191	0,4910743
4	3,75	625	31,818961	0,41866074	0,07566961	40,4280746	0,49601242
4	3,75	630	32,6155777	0,42603123	0,07149659	41,0366087	0,50064777
4	3,75	635	33,4143371	0,43329321	0,06734422	41,6149889	0,50497501
4	3,75	640	34,2112797	0,44040851	0,06322758	42,1615287	0,50899082
4	3,75	645	35,003124	0,44735131	0,0591632	42,6748356	0,51269409
4	3,75	650	35,7869165	0,45409933	0,05516819	43,1538523	0,51608601
4	4,00	600	28,569425	0,37530954	0,09118324	38,2382401	0,4658826
4	4,00	605	29,3373419	0,38284637	0,08726981	38,9558204	0,47167376
4	4,00	610	30,1224252	0,39042662	0,0832871	39,6512038	0,47718728
4	4,00	615	30,9225662	0,39802915	0,07925707	40,3219877	0,48241267
4	4,00	620	31,7325397	0,40558916	0,07519449	40,9658629	0,48734086
4	4,00	625	32,5505017	0,41309908	0,07112314	41,5806673	0,49196437
4	4,00	630	33,3709424	0,42049565	0,067055	42,1644393	0,49627759
4	4,00	635	34,1918144	0,4277692	0,06301325	42,7154723	0,50027699
4	4,00	640	34,9476223	0,43432476	0,05927758	43,2323637	0,50396131
4	4,00	645	35,8188885	0,44180425	0,05507105	43,7140585	0,50733169
4	4,00	650	36,6182808	0,44851697	0,05120292	44,1598813	0,51039174
4	4,25	600	29,1104786	0,36927335	0,0867191	39,4018388	0,46288513
4	4,25	605	29,9058892	0,37688019	0,08288134	40,1069004	0,46840307
4	4,25	610	30,7178735	0,3845219	0,07897862	40,786729	0,4736327
4	4,25	615	31,5442928	0,39217665	0,07503396	41,4389748	0,47856454
4	4,25	620	32,3793365	0,39977765	0,07106074	42,0614366	0,48319073
4	4,25	625	33,2212777	0,40731753	0,06708403	42,6521176	0,48750532
4	4,25	630	34,0643338	0,414732	0,06311692	43,2092815	0,49150448
4	4,25	635	34,9061603	0,42201054	0,05918086	43,731504	0,4951867
4	4,25	640	35,7422366	0,4291131	0,05529065	44,2177171	0,49855293
4	4,25	645	36,569072	0,43601409	0,05146378	44,6672434	0,50160667
4	4,25	650	37,3831451	0,44268957	0,04771597	45,0798167	0,50435394
4	4,50	600	29,603225	0,36314047	0,08270573	40,5002751	0,45953281
4	4,50	605	30,424372	0,37080214	0,07894072	41,1902352	0,46477761
4	4,50	610	31,2618539	0,37849228	0,07511651	41,8520694	0,46972495
4	4,50	615	32,1130972	0,38618713	0,0712542	42,4835332	0,47436654
4	4,50	620	32,9720873	0,39381975	0,06736835	43,0825878	0,47869604
4	4,50	625	33,8368708	0,40138115	0,06348313	43,6474578	0,48270921
4	4,50	630	34,7011807	0,40880622	0,05961122	44,1766843	0,4864042
4	4,50	635	35,5626544	0,41608368	0,0557745	44,6691716	0,48978164
4	4,50	640	36,4166141	0,42317333	0,0519886	45,124223	0,49284478
4	4,50	645	37,2593466	0,43004838	0,04827039	45,5415631	0,49559946
4	4,50	650	38,0869761	0,43668485	0,04463473	45,9213442	0,49805404
4	4,75	600	30,0518696	0,35695756	0,07908319	41,5364415	0,45588082
4	4,75	605	30,8972488	0,36466029	0,07538914	42,2090315	0,46085396
4	4,75	610	31,7590227	0,37238768	0,07164213	42,8507843	0,46552207
4	4,75	615	32,6336936	0,38011203	0,06785892	43,4596123	0,46987833

Estudio de viabilidad de la incorporación de un sistema de propulsión sin ruido basado en un reformador y una pila de combustible alimentado por bioetanol en un submarino

4	4,75	620	33,5152348	0,38776686	0,06405632	44,0336911	0,47391803
4	4,75	625	34,4015317	0,39534145	0,06025775	44,5715154	0,47763887
4	4,75	630	35,286232	0,40277128	0,05647788	45,0719469	0,48104108
4	4,75	635	36,1663989	0,41004294	0,05273588	45,5342531	0,48412753
4	4,75	640	37,0373511	0,41711608	0,04904871	45,958131	0,48690375
4	4,75	645	37,8948775	0,42396273	0,04543175	46,3437155	0,48937785
4	4,75	650	38,73512	0,43055885	0,04190091	46,6915702	0,49156035
4	5,00	600	30,4599615	0,35076066	0,0757992	42,5131265	0,45197602
4	5,00	605	31,3286766	0,35849443	0,07217723	43,166388	0,45668031
4	5,00	610	32,2129145	0,36624674	0,06850217	43,7863165	0,46107368
4	5,00	615	33,1101032	0,37399203	0,06479731	44,3710298	0,4651509
4	5,00	620	34,0132246	0,38166139	0,06107556	44,9189643	0,46890914
4	5,00	625	34,9200208	0,38924264	0,05736031	45,4289253	0,47234811
4	5,00	630	35,8237843	0,39667104	0,05366623	45,9001285	0,4754702
4	5,00	635	36,7217032	0,40393227	0,05001417	46,3322257	0,4782805
4	5,00	640	37,6087069	0,41098558	0,04642011	46,7253159	0,48078676
4	5,00	645	38,4804769	0,41780245	0,04289972	47,0799378	0,4829992
4	5,00	650	39,3327837	0,42435784	0,03946807	47,3970452	0,48493028

Tabla 19. Valores reformado para volumen de reformador 5 m3(Fuente: Elaboración propia)

Vol. Ref.	Relación Agua etanol	T reformado	H2	Conc. H2	Conc CH4	H2 Gibbs	Conc,H2 Gibbs
5	3,00	600	27,831789	0,41964452	0,10314458	32,8687314	0,4727847
5	3,00	605	28,5572952	0,42727745	0,09851463	33,6042519	0,47963882
5	3,00	610	29,2940192	0,43488205	0,09384757	34,3302377	0,48627075
5	3,00	620	30,791205	0,44990572	0,08448791	35,7449998	0,4988203
5	3,00	630	32,3003547	0,46447469	0,07522086	37,0953306	0,51034386
5	3,00	640	33,7991478	0,47839179	0,066184	38,3634998	0,52076515
5	3,00	650	35,265566	0,49149381	0,05750044	39,5329437	0,53002694
5	3,25	600	28,7842868	0,41576624	0,09585302	34,3252797	0,47201844
5	3,25	605	29,5421728	0,42347976	0,09134001	35,0617664	0,47861457
5	3,25	610	30,3094914	0,4311447	0,08679828	35,7855739	0,48497297
5	3,25	620	31,8626572	0,44622672	0,07772106	37,1860555	0,49692937
5	3,25	630	33,418548	0,46076722	0,06877186	38,5083796	0,50780097
5	3,25	640	34,9531344	0,47456831	0,06008552	39,7348223	0,51751797
5	3,25	650	36,4432885	0,48746694	0,05178495	40,8496839	0,52603396
5	3,50	600	29,6587448	0,41133333	0,0894559	35,7032761	0,47053699
5	3,50	605	30,4470249	0,41911322	0,08505311	36,4368844	0,47686883
5	3,50	610	31,2435469	0,4268267	0,08063356	37,1546209	0,48294845
5	3,50	620	32,8488658	0,44194786	0,0718216	38,5330519	0,49430505
5	3,50	630	34,4476912	0,45644815	0,06316978	39,8199675	0,50452497
5	3,50	640	36,0144932	0,47012754	0,05481243	40,9981738	0,51354739
5	3,50	650	37,5243584	0,48282277	0,04686746	42,0534347	0,52133927

Estudio de viabilidad de la incorporación de un sistema de propulsión sin ruido basado en un reformador y una pila de combustible alimentado por bioetanol en un submarino

5	3,75	600	30,461122	0,40646653	0,08381688	37,0064528	0,46845957
5	3,75	605	31,2784449	0,41430095	0,07952122	37,7336539	0,47452255
5	3,75	610	32,1023241	0,42205252	0,07521573	38,441794	0,48031995
5	3,75	620	33,7565601	0,43719744	0,06665323	39,7913191	0,4910743
5	3,75	630	35,3953649	0,45164886	0,05828123	41,0366087	0,50064777
5	3,75	640	36,9910226	0,46520345	0,05022934	42,1615287	0,50899082
5	3,75	650	38,5174421	0,47769784	0,04261482	43,1538523	0,51608601
5	4,00	600	31,1973298	0,40126552	0,07882593	38,2382401	0,4658826
5	4,00	605	32,0419522	0,40914307	0,07463043	38,9558204	0,47167376
5	4,00	610	32,891594	0,41692357	0,07043199	39,6512038	0,47718728
5	4,00	620	34,5922796	0,43208006	0,0621066	40,9658629	0,48734086
5	4,00	630	36,2680462	0,44647555	0,05399469	42,1644393	0,49627759
5	4,00	640	37,8900435	0,45990477	0,04622806	43,2323637	0,50396131
5	4,00	650	39,4306228	0,47220264	0,03892092	44,1598813	0,51039174
5	4,25	600	31,8723322	0,39581027	0,07438801	39,4018388	0,46288513
5	4,25	605	32,7430916	0,40372224	0,07028927	40,1069004	0,46840307
5	4,25	610	33,6173093	0,41152426	0,06619297	40,786729	0,4736327
5	4,25	620	35,3616442	0,42668084	0,05808908	42,0614366	0,48319073
5	4,25	630	37,0721388	0,44101543	0,05022125	43,2092815	0,49150448
5	4,25	640	38,7182724	0,45431956	0,04272044	44,2177171	0,49855293
5	4,25	650	40,2710537	0,46642641	0,03569914	45,0798167	0,50435394
5	4,50	600	32,4912547	0,39016861	0,07042729	40,5002751	0,45953281
5	4,50	605	33,3867149	0,3981062	0,06641988	41,1902352	0,46477761
5	4,50	610	34,2842894	0,40592234	0,06242041	41,8520694	0,46972495
5	4,50	620	36,0700038	0,42106955	0,0545252	43,0825878	0,47869604
5	4,50	630	37,8132707	0,43533979	0,04688637	44,1766843	0,4864042
5	4,50	640	39,4816814	0,44851983	0,03963331	45,124223	0,49284478
5	4,50	650	41,0449183	0,46044167	0,03287684	45,9213442	0,49805404
5	4,75	600	33,058465	0,38439505	0,06687817	41,5364415	0,45588082
5	4,75	605	33,9776822	0,39235114	0,06295908	42,2090315	0,46085396
5	4,75	610	34,8974194	0,40017524	0,05905111	42,8507843	0,46552207
5	4,75	620	36,7224725	0,41530467	0,05135275	44,0336911	0,47391803
5	4,75	630	38,4967355	0,42950741	0,04392872	45,0719469	0,48104108
5	4,75	640	40,1857115	0,44256514	0,03690572	45,958131	0,48690375
5	4,75	650	41,7584451	0,45430926	0,0303964	46,6915702	0,49156035
5	5,00	600	33,578362	0,37853603	0,06368718	42,5131265	0,45197602
5	5,00	605	34,5198784	0,38650256	0,05985064	43,166388	0,45668031
5	5,00	610	35,4608894	0,39432924	0,05603058	43,7863165	0,46107368
5	5,00	620	37,323421	0,40943349	0,04851824	44,9189642	0,46890914
5	5,00	630	39,12699	0,42356609	0,04129526	45,9001284	0,4754702
5	5,00	640	40,8356604	0,43650487	0,03448887	46,7253158	0,48078676
5	5,00	650	42,4150242	0,44807395	0,02820211	47,3970452	0,48493028

Estudio de viabilidad de la incorporación de un sistema de propulsión sin ruido basado en un reformador y una pila de combustible alimentado por bioetanol en un submarino

Tabla 20. Valores reformado para volumen de reformador 6 m³(Fuente: Elaboración propia)

Vol. Ref.	Relación Agua etanol	T reformado	H2	Conc. H2	Conc CH4	H2 Gibbs	Conc,H2 Gibbs
6	3,00	600	28,6410883	0,42843381	0,09837857	32,8687314	0,4727847
6	3,00	610	30,1472736	0,44382644	0,08890737	34,3302377	0,48627075
6	3,00	620	31,6732299	0,45882572	0,07947611	35,7449998	0,4988203
6	3,00	630	33,1958178	0,47321297	0,0702339	37,0953306	0,51034386
6	3,00	640	34,6928787	0,48681463	0,06130914	38,3634998	0,52076515
6	3,00	650	36,1427825	0,49948809	0,05281634	39,5329437	0,53002694
6	3,25	600	29,6629732	0,42497963	0,09101596	34,3252797	0,47201844
6	3,25	610	31,2278612	0,44044319	0,08182524	35,7855739	0,48497297
6	3,25	620	32,8037857	0,45542623	0,07271329	37,1860555	0,49692937
6	3,25	630	34,3657508	0,4697084	0,06382577	38,5083796	0,50780097
6	3,25	640	35,8901957	0,4831167	0,05528944	39,7348223	0,51751797
6	3,25	650	37,3528264	0,49550902	0,04720789	40,8496839	0,52603396
6	3,50	600	30,6040159	0,42092398	0,08456957	35,7032789	0,47053699
6	3,50	610	32,2241514	0,43643992	0,07564267	37,1546237	0,48294845
6	3,50	620	33,8465344	0,45139514	0,06682971	38,5330549	0,49430505
6	3,50	630	35,4441448	0,46556672	0,05827235	39,8199706	0,50452497
6	3,50	640	36,9918935	0,47878075	0,05009579	40,998177	0,51354739
6	3,50	650	38,4643062	0,49089611	0,04240176	42,053438	0,52133927
6	3,75	600	31,4700747	0,41639144	0,07889937	37,0064528	0,46845957
6	3,75	610	33,1424468	0,43194485	0,07022046	38,441794	0,48031995
6	3,75	620	34,8080587	0,44686331	0,06168564	39,7913191	0,4910743
6	3,75	630	36,4381454	0,46092089	0,0534355	41,0366087	0,50064777
6	3,75	640	38,0061045	0,47394299	0,04559326	42,1615287	0,50899082
6	3,75	650	39,4864337	0,48578947	0,03826491	43,1538523	0,51608601
6	4,00	600	32,2669702	0,41148458	0,07389184	38,2382401	0,4658826
6	4,00	610	33,9886955	0,42706218	0,06544491	39,6512038	0,47718728
6	4,00	620	35,6947935	0,441937	0,05716939	40,9658629	0,48734086
6	4,00	630	37,3548065	0,45587952	0,04920554	42,1644393	0,49627759
6	4,00	640	38,9390855	0,4687117	0,0416669	43,2323637	0,50396131
6	4,00	650	40,4250208	0,48029915	0,03467782	44,1598813	0,51039174
6	4,25	600	32,9998692	0,40628751	0,06945107	39,4018388	0,46288513
6	4,25	610	34,7683534	0,42187782	0,06122154	40,786729	0,4736327
6	4,25	620	36,5128108	0,43670395	0,05318968	42,0614366	0,48319073
6	4,25	630	38,2004267	0,45053117	0,04549176	43,2092815	0,49150448
6	4,25	640	39,8015178	0,46318168	0,03824765	44,2177171	0,49855293
6	4,25	650	41,2884626	0,47451662	0,0315589	45,0798167	0,50435394
6	4,50	600	33,6733321	0,40086912	0,06549558	40,500275	0,45953281
6	4,50	610	35,4868282	0,41646334	0,05747375	41,8520694	0,46972495
6	4,50	620	37,2673284	0,43123588	0,04966853	43,0825878	0,47869604
6	4,50	630	38,9806758	0,44494884	0,04221839	44,1766843	0,4864042
6	4,50	640	40,595555	0,4574218	0,03524107	45,124223	0,49284478
6	4,50	650	42,0837397	0,46851663	0,02883831	45,9213441	0,49805404

Estudio de viabilidad de la incorporación de un sistema de propulsión sin ruido basado en un reformador y una pila de combustible alimentado por bioetanol en un submarino

6	4,75	600	34,2927271	0,39528913	0,06196365	41,5364415	0,45588082
6	4,75	610	36,1486697	0,41087727	0,05413485	42,8507843	0,46552207
6	4,75	620	37,9633448	0,42559247	0,04654186	44,0336911	0,47391803
6	4,75	630	39,7008459	0,43919295	0,03932298	45,0719469	0,48104108
6	4,75	640	41,3284233	0,45149456	0,0325948	45,958131	0,48690375
6	4,75	650	42,8149885	0,46235622	0,02644962	46,6915702	0,49156035
6	5,00	600	34,8617599	0,38959436	0,05879613	42,5131266	0,45197602
6	5,00	610	36,7584044	0,40516865	0,05115064	43,7863165	0,46107368
6	5,00	620	38,6057884	0,41982403	0,04375755	44,9189643	0,46890914
6	5,00	630	40,3660639	0,43331345	0,03675441	45,9001285	0,4754702
6	5,00	640	42,0050214	0,44544983	0,0302569	46,7253159	0,48078676
6	5,00	650	43,4923259	0,45609588	0,02436148	47,3970452	0,48493028

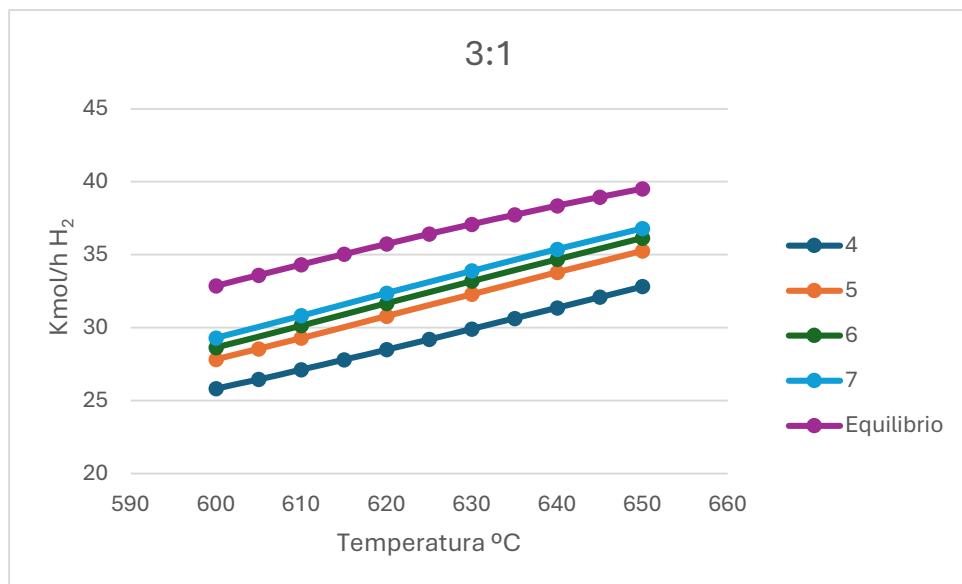
Tabla 21. Valores reformado para volumen de reformador 7 m3(Fuente: Elaboración propia)

Vol. Ref.	Relación Agua etanol	T reformado	H2	Conc. H2	Conc CH4	H2 Gibbs	Conc,H2 Gibbs
7	3,00	600	29,2961878	0,43544134	0,0945481	32,8687314	0,4727847
7	3,00	610	30,8296159	0,45085955	0,0849974	34,3302377	0,48627075
7	3,00	620	32,3698163	0,46574926	0,07556271	35,7449998	0,4988203
7	3,00	630	33,8942348	0,47991136	0,06638928	37,0953306	0,51034386
7	3,00	640	35,3804308	0,49319296	0,05759326	38,3634998	0,52076515
7	3,00	650	36,8086389	0,50546587	0,04929288	39,5329437	0,53002694
7	3,25	600	30,376484	0,43233793	0,08712613	34,3252797	0,47201844
7	3,25	610	31,9634164	0,44776358	0,07788348	35,7855739	0,48497297
7	3,25	620	33,5477254	0,4625714	0,06880004	37,1860555	0,49692937
7	3,25	630	35,1046363	0,47656207	0,06001325	38,5083796	0,50780097
7	3,25	640	36,610938	0,48958249	0,051641	39,7348223	0,51751797
7	3,25	650	38,0433661	0,50150848	0,04378295	40,8496839	0,52603396
7	3,50	600	31,3728019	0,42859841	0,08062759	35,7032761	0,47053699
7	3,50	610	33,0109067	0,44401976	0,07168031	37,1546208	0,48294845
7	3,50	620	34,6357433	0,45873916	0,06292317	38,5330519	0,49430505
7	3,50	630	36,2213579	0,47255714	0,05449513	39,8199674	0,50452497
7	3,50	640	37,7419317	0,48532022	0,04650465	40,9981738	0,51354739
7	3,50	650	39,1760571	0,49690653	0,03906591	42,0534347	0,52133927
7	3,75	600	32,293231	0,42435061	0,07492768	37,0064528	0,46845957
7	3,75	610	33,9785885	0,43975728	0,06624879	38,441794	0,48031995
7	3,75	620	35,6408295	0,45438463	0,0577943	39,7913191	0,4910743
7	3,75	630	37,2518608	0,46803096	0,04969804	41,0366087	0,50064777
7	3,75	640	38,7844636	0,48054239	0,04206652	42,1615287	0,50899082
7	3,75	650	40,2163681	0,49179994	0,03501082	43,1538523	0,51608601
7	4,00	600	33,1416592	0,41969783	0,06989752	38,2382401	0,4658826
7	4,00	610	34,872038	0,43508258	0,06147153	39,6512038	0,47718728
7	4,00	620	36,5690429	0,44961543	0,05329826	40,9658629	0,48734086
7	4,00	630	38,202915	0,46309293	0,0455098	42,1644393	0,49627759

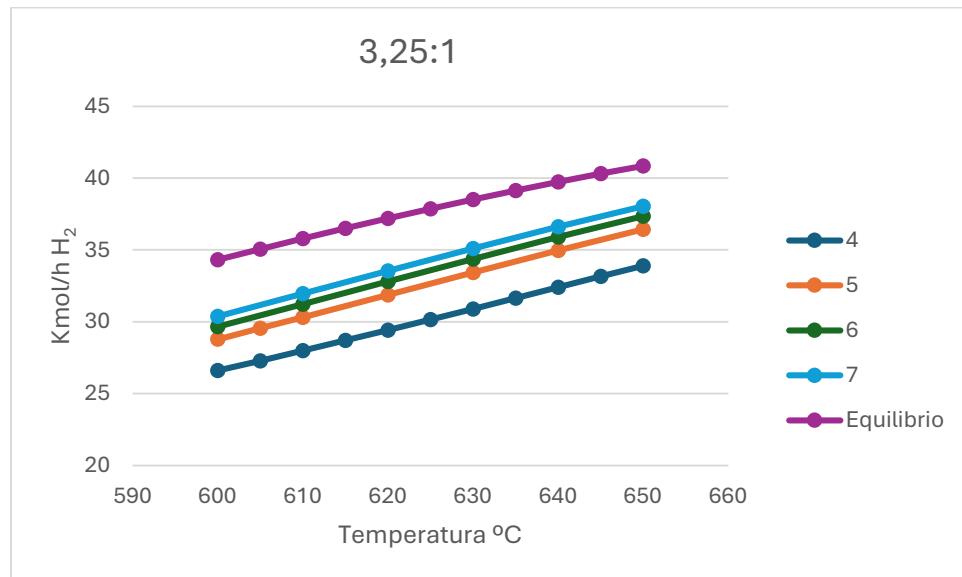
Estudio de viabilidad de la incorporación de un sistema de propulsión sin ruido basado en un reformador y una pila de combustible alimentado por bioetanol en un submarino

7	4,00	640	39,746333	0,47536186	0,03821731	43,2323637	0,50396131
7	4,00	650	41,1723463	0,48630112	0,03150932	44,1598813	0,51039174
7	4,25	600	33,9238634	0,41472634	0,06544448	39,4018388	0,46288513
7	4,25	610	35,696865	0,43008275	0,05725415	40,786729	0,4736327
7	4,25	620	37,4264817	0,4445204	0,04934291	42,0614366	0,48319073
7	4,25	630	39,0811559	0,457833	0,04184065	43,2092815	0,49150448
7	4,25	640	40,6321073	0,46986688	0,0348557	44,2177171	0,49855293
7	4,25	650	42,0515393	0,48050204	0,02847421	45,0798167	0,50435394
7	4,50	600	34,644648	0,40950756	0,06148733	40,5002751	0,45953281
7	4,50	610	36,4584359	0,42483077	0,05351885	41,8520694	0,46972495
7	4,50	620	38,2186974	0,43917296	0,04585136	43,0825878	0,47869604
7	4,50	630	39,8905501	0,45232193	0,03860618	44,1766843	0,4864042
7	4,50	640	41,4476577	0,46413001	0,03190743	45,124223	0,49284478
7	4,50	650	42,8611374	0,47447917	0,02583491	45,9213442	0,49805404
7	4,75	600	35,3089139	0,40410202	0,05796008	41,5364415	0,45588082
7	4,75	610	37,1613117	0,41938655	0,05019803	42,8507843	0,46552207
7	4,75	620	38,9503072	0,4336331	0,0427569	44,0336911	0,47391803
7	4,75	630	40,6396493	0,44662652	0,03575871	45,0719469	0,48104108
7	4,75	640	42,2016066	0,45821859	0,02932399	45,958131	0,48690375
7	4,75	650	43,6068792	0,46829301	0,02353112	46,6915702	0,49156035
7	5,00	600	35,9195097	0,39855599	0,05479809	42,5131266	0,45197602
7	5,00	610	37,8099495	0,41380056	0,04723597	43,7863165	0,46107368
7	5,00	620	39,626469	0,42795305	0,04000739	44,9189643	0,46890914
7	5,00	630	41,3335805	0,44079955	0,03324491	45,9001285	0,4754702
7	5,00	640	42,897879	0,45218065	0,02704907	46,7253159	0,48078676
7	5,00	650	44,293632	0,46199332	0,02151142	47,3970452	0,48493028

Gráficas Reformado

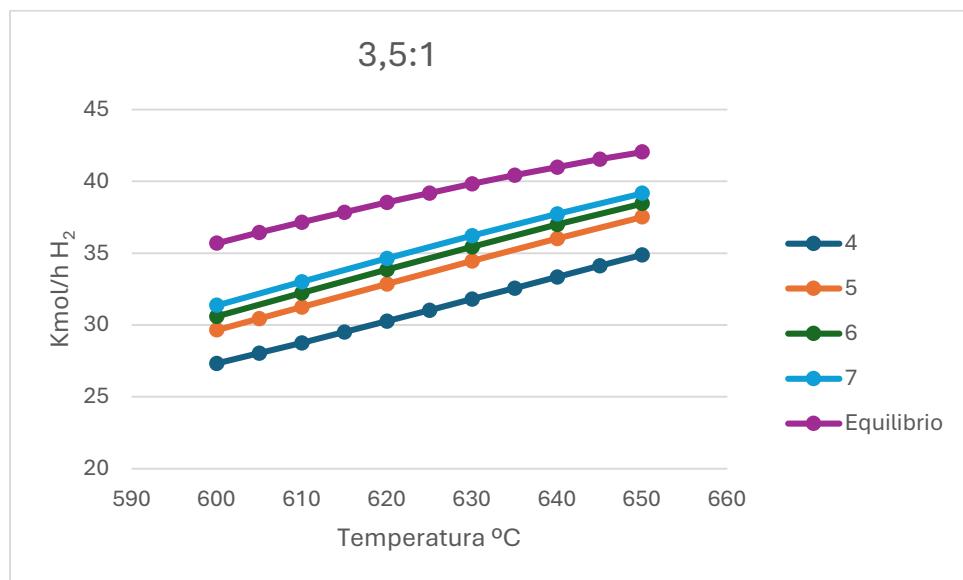


Gráfica 18. Kmol/h de hidrógeno producido según la temperatura y el volumen del reformador (m^3) para una relación 3:1 de agua etanol. (Fuente: Elaboración propia)

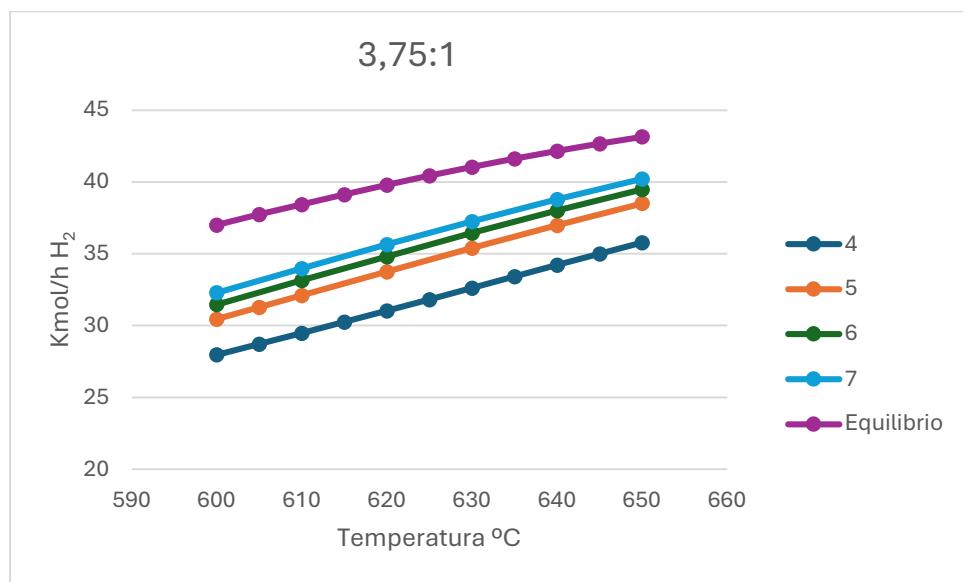


Gráfica 19 Kmol/h de hidrógeno producido según la temperatura y el volumen del reformador (m^3) para una relación 3,25:1 de agua etanol. (Fuente: Elaboración propia)

Estudio de viabilidad de la incorporación de un sistema de propulsión sin ruido basado en un reformador y una pila de combustible alimentado por bioetanol en un submarino

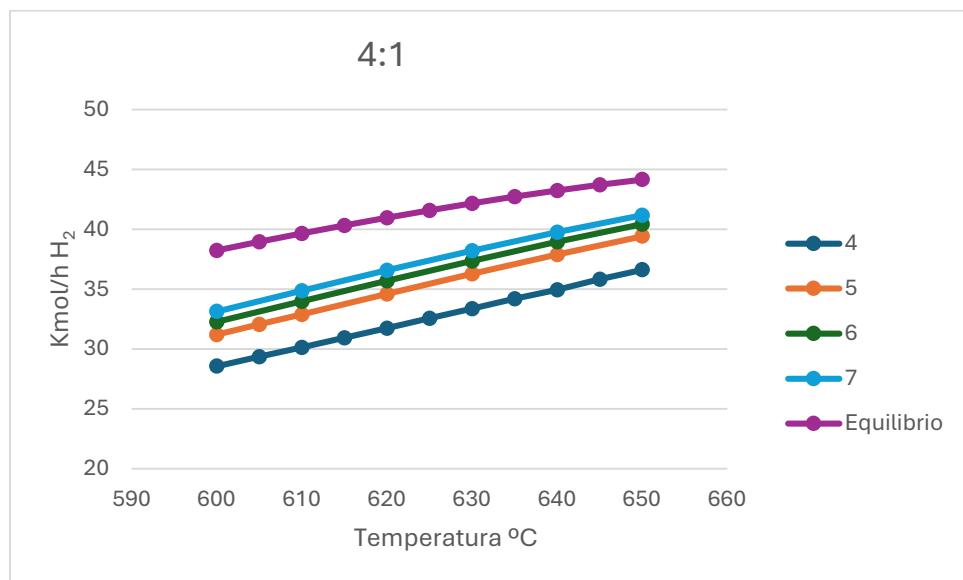


Gráfica 20 Kmol/h de hidrógeno producido según la temperatura y el volumen del reformador (m^3) para una relación 3,5:1 de agua etanol. (Fuente: Elaboración propia)

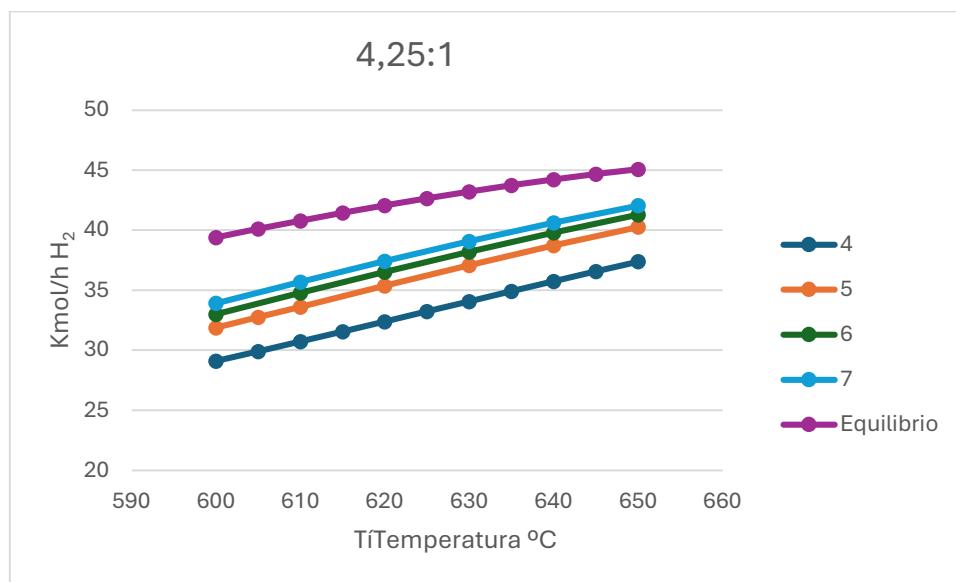


Gráfica 21. Kmol/h de hidrógeno producido según la temperatura y el volumen del reformador (m^3) para una relación 3,75:1 de agua etanol. (Fuente: Elaboración propia)

Estudio de viabilidad de la incorporación de un sistema de propulsión sin ruido basado en un reformador y una pila de combustible alimentado por bioetanol en un submarino

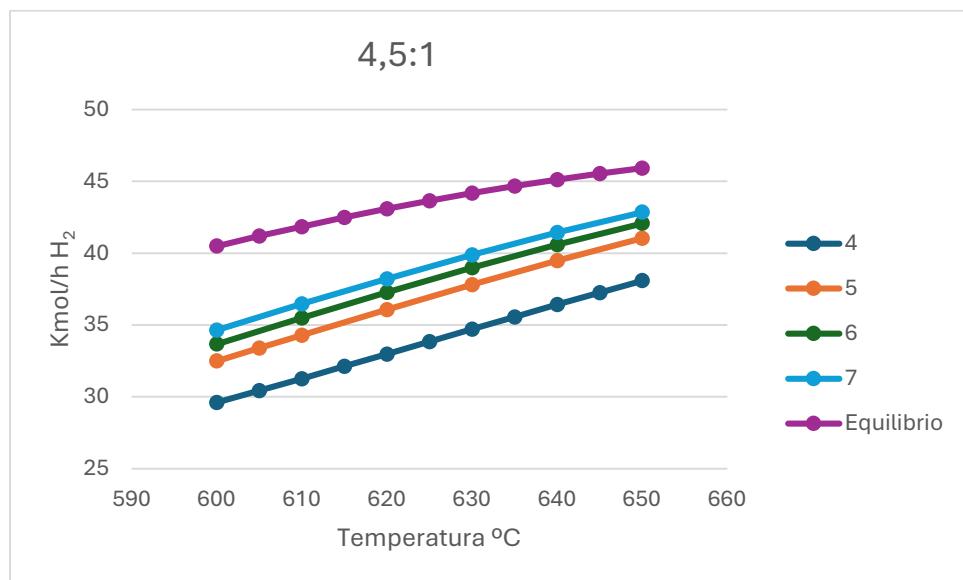


Gráfica 22. Kmol/h de hidrógeno producido según la temperatura y el volumen del reformador (m^3) para una relación 4:1 de agua etanol. (Fuente: Elaboración propia)

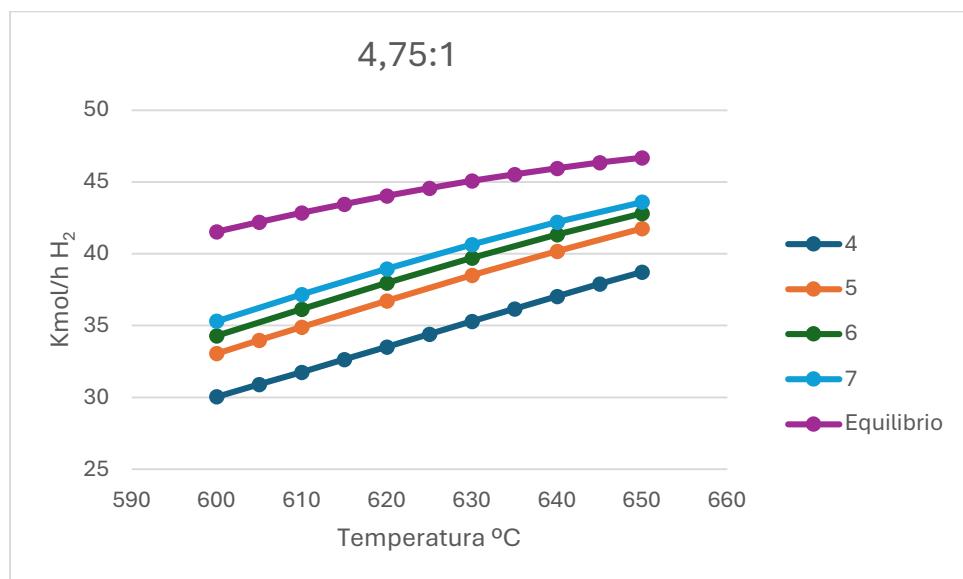


Gráfica 23 . Kmol/h de hidrógeno producido según la temperatura y el volumen del reformador (m^3) para una relación 4,25:1 de agua etanol. (Fuente: Elaboración propia)

Estudio de viabilidad de la incorporación de un sistema de propulsión sin ruido basado en un reformador y una pila de combustible alimentado por bioetanol en un submarino

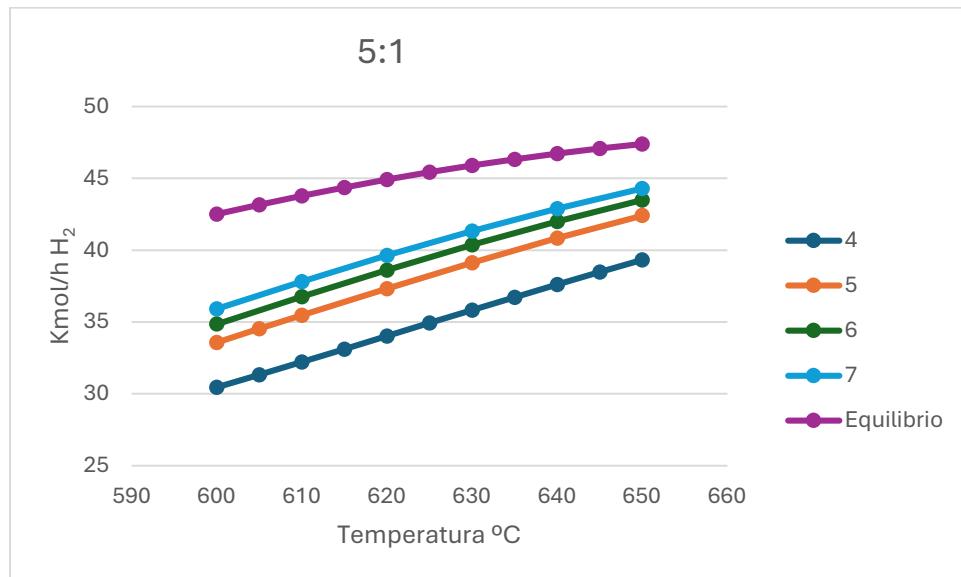


Gráfica 24 Kmol/h de hidrógeno producido según la temperatura y el volumen del reformador (m^3) para una relación 4,5:1 de agua etanol. (Fuente: Elaboración propia)



Gráfica 25. Kmol/h de hidrógeno producido según la temperatura y el volumen del reformador (m^3) para una relación 4,75:1 de agua etanol. (Fuente: Elaboración propia)

Estudio de viabilidad de la incorporación de un sistema de propulsión sin ruido basado en un reformador y una pila de combustible alimentado por bioetanol en un submarino



Gráfica 26. Kmol/h de hidrógeno producido según la temperatura y el volumen del reformador (m³) para una relación 5:1 de agua etanol. (Fuente: Elaboración propia)

Estudio de viabilidad de la incorporación de un sistema de propulsión sin ruido basado en un reformador y una pila de combustible alimentado por bioetanol en un submarino

Datos celda

Tabla 22. Datos cálculo Pila. (Fuente: Elaboración propia)

R	8,314	J·(mol·K) ⁻¹
F	96485	C·mol ⁻¹
Tau anodo	1,5·10 ⁻⁵	m
Tau catodo	5·10 ⁻⁵	m
Tau electrolito	1,5·10 ⁻⁵	m
Sigma anodo	8·10 ⁴	S·m ⁻¹
Sigma catodo	8,4·10 ³	S·m ⁻¹
Rcont	0,00000846	Ω·m ²
Ki	2706000	S·K·m ⁻¹
Kc	7·10 ¹¹	S·m ⁻²
Eac	1,309·10 ⁵	J·mol ⁻¹
Ka	3,2·10 ¹³	S·m ⁻¹ ·bar ^{-0,5}
Eaa	1,294·10 ⁵	J·mol ⁻¹
tau hole	1,25·10 ⁻⁴	m
tau subs	3·10 ⁻⁴	m
Deff anodo	0,01495	m ² · s ⁻¹
A celda	12x12	cm ²
A efectiva	11x11	cm ²