

5

**SISTEMA DE GENERACIÓN
CON PILA DE COMBUSTIBLE
DE ÓXIDO SÓLIDO**

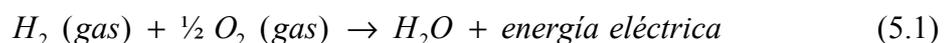
5.1 INTRODUCCIÓN.

Una pila de combustible es un dispositivo electroquímico que convierte la energía química de reacción directamente en energía eléctrica. Para ello, es necesario el suministro de combustible y oxidante en sus electrodos. El resultado de la reacción es la producción de agua y energía eléctrica. El agua abandona la célula a través de los electrodos y la corriente eléctrica mediante un circuito externo [29, 45, 46, 57, 77].

La tensión generada es aproximadamente de un voltio o inferior con una densidad de corriente de aproximadamente 2.000 A/m². Por ello, se hace necesaria la agrupación de unidades básicas para alcanzar las potencias deseadas [31]. La pila de combustible permite alcanzar rendimientos de hasta el 60 % siempre referidos al poder calorífico inferior del combustible empleado.

La diferencia entre la pila de combustible y la pila eléctrica o batería, es que esta última es un elemento que almacena energía eléctrica, la energía disponible máxima se determina por la cantidad de reactivos químicos almacenados dentro de la propia batería, mientras que la pila de combustible no almacena energía, sino que necesita de un suministro continuo de combustible y oxidante que permita mediante reacciones químicas la transformación en energía eléctrica de la energía química que posee el combustible.

La reacción principal en la pila de combustible es la inversa de la electrolisis del agua, es decir, es la combinación de hidrógeno y oxígeno para formar agua y energía eléctrica. Para una pila de membrana polimérica (PEMFC) la reacción es:



Siendo la semi-reacción en el ánodo:



Y en el cátodo:



En la figura 5.1 se puede observar de forma esquemática las reacciones que se producen en una pila de combustible genérica cuando el combustible es hidrógeno y el oxidante oxígeno puro:

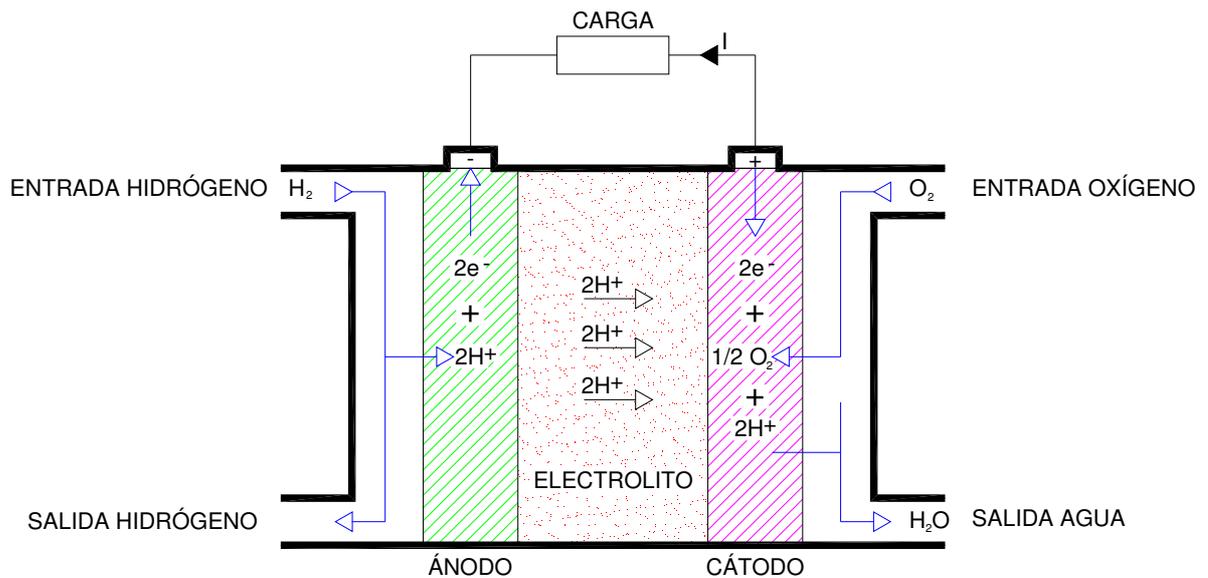


Figura 5.1: Funcionamiento genérico de una pila de combustible.

Las pilas de combustible están constituidas por un conjunto de celdas apiladas, cada una de las cuales se compone básicamente de los siguientes elementos:

A) EL ELECTROLITO:

El electrolito es el componente básico de la pila de combustible. Se encarga de transportar los iones producidos en las reacciones de oxidación y reducción, desde un electrodo a otro, de manera que se cierre el circuito eléctrico. El electrolito puede ser sólido o líquido, su estado, composición y características determinan el funcionamiento de la pila, las reacciones que tienen lugar y los cambios en el comportamiento con las condiciones operativas. Las pilas de combustible se clasifican en función del electrolito empleado. Esta clasificación es la siguiente:

- a) Pilas de combustible poliméricas (PEMFC).
- b) Pilas de combustible alcalinas (AFC).
- c) Pilas de combustible de carbonatos fundidos (MCFC).
- d) Pilas de combustible de óxido sólido (SOFC).
- e) Pilas de combustible de ácido fosfórico (PAFC).

B) LOS ELECTRODOS:

Los electrodos están compuestos por el cátodo (polo positivo) y el ánodo (polo negativo). Las principales características que deben reunir los electrodos para desempeñar sus funciones satisfactoriamente son [57]:

- Proporcionar una superficie donde pueda tener lugar la ionización o desionización de los gases y líquidos que intervienen en las reacciones electroquímicas.
- Capacidad para desalojar los iones que se forman o de llevarlos a las zonas reactivas.
- Constituir una barrera que impida el contacto directo de las corrientes de gases con el electrolito.

- Los electrodos deben ser buenos conductores eléctricos.
- Deben de componerse por materiales permeables, tanto al electrolito como a los gases.
- Disponer de catalizadores que favorezcan las reacciones electroquímicas. Esta función catalítica de los electrodos será tanto más importante en la pila de combustible cuanto más baja sea la temperatura de funcionamiento, puesto que la velocidad de las reacciones de ionización aumenta con la temperatura.

C) CATALIZADOR:

Las principales reacciones electroquímicas en una pila de combustible son: la oxidación en el ánodo y la reducción en el cátodo. En algunos tipos de pilas, las dos semi-reacciones ocurren de forma lenta. Para conseguir mayor velocidad en las reacciones, los electrodos son revestidos por catalizadores que aceleran el proceso químico. Los catalizadores son finas capas constituidas, generalmente, de platino.

D) PLACAS BIPOLARES O COLECTORAS:

La placa bipolar es un elemento no activo que se localiza entre cada celda (ánodo, electrolito y cátodo) y desarrolla las siguientes funciones:

- Conexión eléctrica entre celdas. Las placas bipolares sirven de colector de la corriente generada en cada celda.
- Evitan la mezcla entre los gases combustible y oxidante facilitando el acceso homogéneo de éstos y las reacciones químicas que se producen entre ellos.

- Extraen parte del calor producido en la reacción electroquímica y lo ceden al sistema en el lugar que se necesite facilitando el control de la temperatura de las celdas que resulta crítico en muchas aplicaciones.

Para la fabricación de la placa bipolar se debe de tener en cuenta la necesidad de una buena conducción electrónica y térmica de los materiales empleados, su fácil mecanización, el mínimo peso y el coste.

Los materiales empleados en la fabricación de las pilas de combustible deben de cumplir los siguientes requisitos:

- Capacidad para el transporte de cargas eléctricas (electrones en los electrodos e iones en el electrolito).
- Estabilidad química a largo plazo en ambientes oxidantes y/o reductores.
- Resistencia mecánica estructural. Si el electrodo sirve de soporte al conjunto, no es necesaria una estructura resistente adicional.
- Compatibilidad con las dilataciones térmicas de las capas de material que están en contacto (al menos tres: electrolito, ánodo y cátodo).
- La interconexión entre celdas debe tener alta conductividad eléctrica, estabilidad química y un comportamiento ante deformaciones de origen térmico similar al de los electrodos y el electrolito. El material más empleado es la cromita de lantano, LaCrO_3 . Al estar en contacto con el ánodo y el cátodo debe resistir ambos ambientes.

En las pilas de combustible el oxidante y el combustible no entran en contacto directo. En el ánodo se produce el proceso de oxidación del combustible, y en el cátodo

el oxidante consume los iones positivos del electrolito y los electrones generados en el ánodo (proceso de reducción).

La tensión de salida de la pila y su rendimiento van ligados y dependen fundamentalmente de las siguientes pérdidas:

- Pérdidas de activación: Resultan por la energía requerida en el inicio de la reacción química.
- Pérdidas de concentración: Provocadas por la reducción en las concentraciones de hidrógeno y oxígeno en los electrodos.
- Pérdidas óhmicas: Propiciadas por la resistencia que ofrecen determinados componentes de la pila.
- Pérdidas provocadas por corrientes internas: Debido a la circulación de electrones directamente a través del electrolito.

Las pilas de combustible tienen un alto potencial de reducción de las emisiones de gases nocivos y de vapor de agua asociadas a los procesos de producción de electricidad. El mayor rendimiento disminuye la cantidad de vapor de agua emitido mientras que las emisiones de dióxido de carbono y óxidos de nitrógeno son prácticamente nulas [31].

Cualquier sustancia susceptible de oxidación química y con suministro continuo puede utilizarse de combustible. El hidrógeno es sin duda el combustible idóneo para las pilas de combustible, posee una alta reactividad en presencia de catalizadores adecuados y puede alcanzar una alta densidad energética. Sin embargo, no se presenta en la naturaleza de forma libre y se necesita energía para extraerlo del agua, de los hidrocarburos o de la biomasa. Además, es necesaria la creación de una infraestructura del hidrógeno que se ocupe de su producción, almacenamiento, distribución y

suministro, que en la actualidad no está disponible. Alternativamente, se pueden emplear compuestos que contengan hidrógeno, como los hidrocarburos [101]. Como oxidante se utiliza el oxígeno, éste se encuentra de manera muy abundante en la atmósfera y su abastecimiento no plantea dificultades.

Los hidrocarburos tales como el gas natural, gasolina, gasóleo, etc., aunque su utilización produce gases contaminantes que no aparecen con la utilización de hidrógeno puro, si disponen de una infraestructura de producción, almacenamiento, distribución y suministro, por lo que podrían sustituir al hidrógeno, ya que éste es un componente principal de su estructura molecular. Sin embargo, necesitan de un proceso previo para su utilización como combustible. El proceso de conversión del hidrocarburo a hidrógeno se realiza en un módulo auxiliar externo denominado procesador de combustible que puede estar integrado en el interior de determinados tipos de pila. La existencia de procesador externo lleva asociado un mayor tamaño de la instalación.

La utilización de hidrocarburos reduce drásticamente las emisiones de óxidos de nitrógeno y de dióxido de carbono, en comparación con las que producen los combustibles fósiles en los motores de combustión interna. No obstante, la mejor elección es la producción del hidrógeno por métodos limpios (a partir de la biomasa o mediante el uso de las energías renovables) [133], aunque esta opción depende del avance tecnológico que se produzca en la obtención del hidrógeno, su distribución y almacenamiento.

Los principales métodos de obtención de hidrógeno son los siguientes:

- a) La descomposición del metano.
- b) La oxidación parcial de combustibles fósiles con defecto de O₂.
- c) La electrolisis del agua. El empleo de fuentes de energías renovables para generar la energía eléctrica necesaria, tales como, la eólica, la solar fotovoltaica y la solar térmica de alta temperatura, facilita la sostenibilidad energética [86, 133].

- d) La descomposición del metanol o etanol [54, 58, 78].
- e) A partir de la biomasa y mediante procesos termoquímicos o biológicos como la gasificación (sistema adoptado en esta Tesis), el bioetanol, el biogás, la biofotólisis o la pirólisis [133, 58, 78].

Actualmente y junto con los inconvenientes que de momento presenta el uso del hidrógeno como combustible, los principales problemas de las pilas de combustible son su coste de fabricación y la vida útil de sus componentes.

Las pilas de combustible pueden abarcar una amplia variedad de aplicaciones. Como fuentes de calor y energía eléctrica en aplicaciones estacionarias de generación distribuida, para empresas, zonas residenciales, hoteles, hospitales, etc. Para dispositivos portátiles como teléfonos móviles, ordenadores, electrodomésticos, pequeñas herramientas eléctricas, etc. Y en tracción eléctrica en vehículos para transporte terrestre, trenes, barcos, submarinos, naves espaciales, industria militar, etc.

5.2 PILA DE COMBUSTIBLE DE ÓXIDO SÓLIDO (SOFC)

5.2.1 Componentes

En las pilas de combustible de óxido sólido, SOFC, el electrolito está formado por un óxido metálico. La temperatura de funcionamiento está próxima a 1.000 °C y en estas condiciones los iones O^- son los encargados de transportar las cargas del cátodo al ánodo [57]. Esta temperatura de operación impone restricciones en los materiales empleados. Recientes investigaciones pretenden encontrar otras alternativas tecnológicas relacionadas con el electrolito empleado [113, 152, 168] y con la mejora de los electrodos particularmente, en su estructura, morfología y composición [156].

Actualmente se emplea como electrolito el óxido de zirconio (ZrO_2) estabilizado con óxido de itrio (Y_2O_3), conocido como YSZ (“Ytria Stabilized Zirconia”). La conductividad de este material alcanza valores aceptables a partir de una temperatura de operación de $900\text{ }^\circ\text{C}$, a $1.000\text{ }^\circ\text{C}$ la conductividad del YSZ es cinco veces mayor que a $800\text{ }^\circ\text{C}$ [57], y aún así, es bastante inferior a la de los electrodos. Aunque una temperatura de operación tan elevada puede fomentar la inestabilidad química frente a la acción reductora del hidrógeno, el comportamiento del YSZ en este sentido es bueno. El YSZ es un material no poroso, por lo que no permite que entren en contacto las corrientes de combustible y oxidante. Por último, el YSZ está caracterizado por su poca resistencia mecánica, aunque su buen comportamiento electroquímico, hace que sea el material más apropiado y empleado en la actualidad [121].

Los electrodos están formados por materiales cerámicos que resisten la acción del oxígeno y son buenos conductores. Se suelen utilizar níquel y óxido de zirconio, en el ánodo, y permanganato de lantano ($LaMnO_3$) dopado con estroncio (Sr), en el cátodo [121]. Adicionalmente, al cátodo se le confiere una porosidad aproximada del 40 % para facilitar el transporte de masa desde la corriente de oxidante hasta el electrolito.

Las altas temperaturas de funcionamiento de los electrodos suponen un inconveniente importante en lo que se refiere a los materiales, su composición, coste y vida útil. Sin embargo, también presentan una serie de ventajas:

- Permiten realizar el procesado de combustibles, como el metano, en el propio ánodo, siempre que haya una presencia suficiente de agua.
- Favorecen la cinética de las reacciones de oxidación-reducción en los electrodos.
- Eliminan la necesidad de emplear catalizadores que encarezcan la tecnología.

- Incrementan la tolerancia a las impurezas del combustible empleado, aunque, por otra parte, esto acarrea problemas de corrosión.

5.2.2 Configuraciones geométricas de la pila SOFC

Al carecer de componentes líquidos, la pila de óxido sólido puede ser fabricada con diferentes formas geométricas con el objeto de aumentar la compacidad y mejorar el comportamiento del conjunto. Se pueden hablar de dos configuraciones básicas: plana y tubular [87, 147].

Configuración plana:

La configuración plana es la estructura típica de pilas de ácido fosfórico o de carbonatos fundidos y presenta la ventaja de que la conexión en serie entre celdas es interna a éstas mientras que en el caso de configuración tubular esta conexión es externa, lo que genera más pérdidas. El sellado del gas por compresión de los elementos que forman la celda es complicado y suele llevar asociada una degradación de las superficies en contacto por lo que el grado de desarrollo se encuentra un paso por detrás del de las celdas tubulares.

Configuración tubular:

Originalmente, la configuración planteada fue plana, sin embargo, los problemas de sellado del gas entre las finas láminas que componían las celdas motivó la adopción de un modelo tubular. En este diseño dos cilindros huecos cuyas paredes están formadas por los dos electrodos y el electrolito entre ellos, garantiza la estanqueidad de los conductos por los que circula el gas tal y como se representa en la figura 5.2. Estos tubos se agrupan posteriormente mediante conexiones externas.

La figura 5.3 representa un acoplamiento de varias unidades. En cada extremo de estos agrupamientos se disponen unas placas o bandejas metálicas que actúan de colectores que recogen la corriente generada por los tubos.

Al igual que en todos los tipos de pilas de combustible, se hace necesario combinar un elevado número de celdas para alcanzar los niveles deseados de tensión y potencia eléctrica de generación.

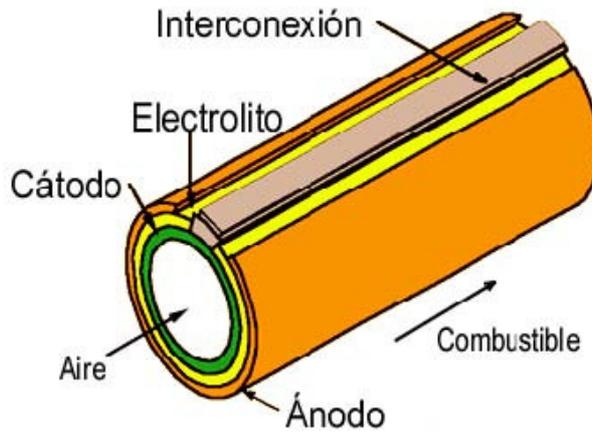


Figura 5.2: Pila con configuración tubular.

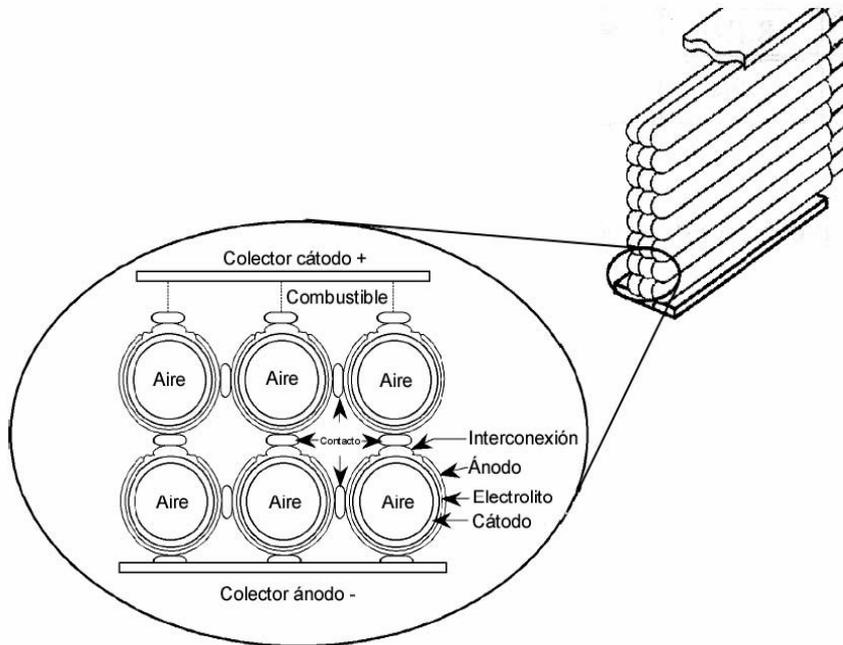


Figura 5.3: Acoplamiento de unidades en la configuración tubular.

5.2.3 Reacciones químicas en la pila SOFC

En una pila SOFC se suceden numerosas reacciones de las que sólo unas pocas son representativas. Se pueden distinguir cuatro tipos de reacciones: de conversión, de descomposición, de desplazamiento y de disociación. En la tabla 5.1 se recogen las ocho reacciones que, en mayor o menor medida, aparecen en la pila SOFC. Se consideran como gases combustibles de entrada a la pila el hidrógeno, el metano y el monóxido de carbono, procedentes de un proceso anterior de gasificación de biomasa.

Tabla 5.1: REACCIONES EN LA PILA SOFC.

TIPO DE REACCIÓN	REACCIÓN
<i>De conversión</i>	$H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$ (5.4)
	$CO + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO_2$ (5.5)
	$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$ (5.6)
<i>De descomposición</i>	$CH_4 + H_2O \rightarrow 3H_2 + CO$ (5.7)
	$CH_4 + CO_2 \rightarrow 2H_2 + 2CO$ (5.8)
<i>De desplazamiento</i>	$CO + H_2O \rightarrow H_2 + CO_2$ (5.9)
<i>De disociación</i>	$CH_4 \rightarrow C + 2H_2$ (5.10)
	$2CO \rightarrow C + CO_2$ (5.11)

Las reacciones de conversión u oxidación están asociadas a la generación de energía eléctrica partiendo de hidrógeno, monóxido de carbono o metano. Las reacciones de descomposición del metano (también conocidas como reacciones de reformación o reformado del metano) y desplazamiento del monóxido de carbono aumentan la concentración de hidrógeno. Por último, las reacciones de disociación del metano y del monóxido de carbono deben ser evitadas en la medida de lo posible, ya que el carbono que se forma en estos casos se deposita sobre el catalizador bloqueando sus sitios activos y dejándolo inservible. Para evitar la formación de estos depósitos

carbonosos se enriquece el combustible con vapor de agua favoreciendo así las reacciones de descomposición del metano y desplazamiento, siendo sólo una fracción minúscula de estas especies la que se disocia.

La reacción de descomposición del metano en hidrógeno es fuertemente endotérmica realizándose a velocidad y temperaturas elevadas (alrededor de 700 °C). En ésta reacción se producen concentraciones de monóxido de carbono. Mediante una segunda reacción (de desplazamiento), al combinar CO con agua, se obtienen nuevas cantidades de hidrógeno. De esta manera se incrementa la producción de hidrógeno y se reducen las concentraciones de CO.

La oxidación electroquímica del hidrógeno es exotérmica, por lo que el calor liberado puede ser aprovechado para favorecer la reacción (5.7) de descomposición del metano [134], si ésta tiene lugar en el interior de la pila. Este proceso se conoce como descomposición o reformación interna y descarta la existencia de un procesador de metano externo a la pila. Este aprovechamiento del calor liberado en la zona de intercambio electroquímico tiene un efecto colateral beneficioso por cuanto mejora la refrigeración del núcleo de la celda. Como consecuencia, aumenta la longevidad de los materiales a la par que se reduce el coste de la tecnología.

El proceso de descomposición es particularmente intenso en la zona próxima a la entrada de combustible, mientras que prácticamente no existe en el tramo final. Esta distribución desigual genera gradientes de temperaturas que requieren una refrigeración excesiva en la zona de entrada y escasa en la zona próxima al escape. Si este gradiente no se controla y supera los valores aceptados por el conjunto electrodos-electrolito tiene lugar el fallo mecánico de la pila.

La descomposición interna del metano puede ser directa o indirecta dependiendo de si el contacto térmico directo existente entre la zona de procesado de combustible y la zona de intercambio electroquímico está acompañado de un intercambio de masa o hay una separación espacial entre las dos zonas, mediante una placa metálica. La

descomposición interna directa es la más empleada teniendo lugar en el propio ánodo, por lo que la configuración de la pila es más sencilla. Además, la distribución de temperaturas en el interior de la pila es más homogénea lo que redundaría en un mejor comportamiento global [36, 112].

La pila SOFC necesita de una etapa previa a la entrada para calentar el combustible a una temperatura adecuada. Lo óptimo es la utilización de recuperadores de calor aprovechando el gas de escape de la pila para que el sistema sea térmicamente auto-mantenido. Para ello, se necesitan bombas y reguladores que controlen el gas que pasa por los intercambiadores de calor y por la pila. También se requieren calentadores que aumenten la temperatura de la pila lo suficiente para iniciar su funcionamiento.

Las reacciones químicas que tienen lugar en la pila SOFC proporcionan calor suficiente para mantener su temperatura. La energía auxiliar para los dispositivos de control, bombas y reguladores se suministra desde la energía generada en corriente alterna de la pila SOFC, cuando está auto-controlada, o en caso contrario, desde la red eléctrica. Si no hay carga suficiente para permitir que la pila se caliente de forma automática, entonces tienen que activarse los calentadores auxiliares.

5.2.4 Consideraciones sobre su funcionamiento y aplicaciones

Las elevadas temperaturas de operación en las pilas de óxido sólido presentan las llamadas dilataciones térmicas diferenciales, provocadas por los gradientes de temperatura a que están sometidas las capas de material. Este problema es significativo, y se debe de tener en cuenta en el arranque de la pila, en la parada y en los regímenes transitorios provocados por las variaciones de la carga.

Para garantizar que en cualquier momento se mantenga el contacto entre los electrodos y el electrolito, los coeficientes de dilatación térmica de los materiales empleados han de ser muy similares.

Las altas temperaturas presentes en las pilas SOFC llevan asociadas ventajas que tienen como resultado una gran flexibilidad en el uso de combustibles. Por esta razón estas pilas toleran tanto el monóxido de carbono (CO), que se puede oxidar a dióxido de carbono (CO₂) en presencia de agua y alta temperatura para formar hidrógeno, como el dióxido de carbono y los hidrocarburos, si bien estos últimos pueden originar problemas cuando son de elevado peso molecular.

La concentración de sustancias ácidas, ácido sulfhídrico (H₂S) y sulfuro de carbonilo (COS), debe reducirse hasta cantidades tan pequeñas como 1 ppm, al igual que la de los halogenuros. Se puede aceptar un 0,5 % en volumen de amoníaco (NH₃).

Por todo lo anterior, las altas temperaturas de funcionamiento de la pila SOFC permiten que además del hidrógeno (H₂), se puedan utilizar como combustible el monóxido de carbono (CO) y el metano (CH₄). La gasificación de la biomasa produce elevadas cantidades de estos gases, por lo que cobra por tanto una especial importancia en la alimentación y funcionamiento de las pilas SOFC.

Además, el funcionamiento a elevadas temperaturas de la pila de combustible de óxido sólido proporciona energía calorífica que puede utilizarse en una planta de cogeneración tal como un sistema CHP, que puede alcanzar una eficacia total superior al 80%.

La sensibilidad de la conducción de iones a la temperatura hace que el rendimiento global de la SOFC también sea sensible a la temperatura, y debido a que la energía térmica generada es proporcional a la intensidad, la energía eléctrica que se extrae de la pila tiene una relación directa sobre el rendimiento. Desde el punto de vista práctico, sería importante que la pila SOFC se auto-calentase, excepto bajo condiciones de arranque o mínimo consumo en las que se genera energía eléctrica de forma insuficiente para mantener su propio calentamiento eléctrico.

Dadas las características especiales de funcionamiento de las pilas SOFC se deben de tener en cuenta algunas consideraciones para alargar su vida útil y no dañar algunos de sus componentes:

- Limitar la energía eléctrica que se extrae de la pila SOFC, ya que, si se permite que la tensión descienda por debajo del 50% en vacío, la pila se dañará. La limitación de la energía generada condiciona el margen de variación de la corriente que se extrae de la pila y reduce la posibilidad de un cambio repentino en la temperatura (principal causa de la rotura del electrolito). Esto conlleva consecuencias en las variaciones bruscas de carga de la pila SOFC.
- La pila no debe comportarse como carga, debido a un consumo de corriente eléctrica.
- El ánodo de la pila debe limpiarse con un gas inerte durante los períodos programados de mantenimiento.

La pila SOFC se ha desarrollado para una gama amplia de aplicaciones de generación de energía eléctrica. Así, se extienden desde dispositivos portátiles (cargadores de baterías de 500 W), sistemas eléctricos de potencia pequeños (generadores de energía eléctrica auxiliares de varios kW) hasta centrales eléctricas de GD (sistemas eléctricos de varios MW).

El calor residual de la pila SOFC puede ser aprovechado mediante la integración de la pila con alguna máquina, sistema o instalación térmica. Los sistemas combinados o híbridos de pila de combustible y máquina térmica permiten alcanzar un rendimiento global mayor.

Las pilas SOFC tienen una elevada eficiencia en la conversión de energía eléctrica y producen cantidades reducidas de compuestos derivados del nitrógeno y el

oxígeno (NO_x) por lo que se consideran favorables desde el punto de vista medioambiental. Sin embargo, son las pilas de combustible menos desarrolladas por lo que presentan desafíos a la ingeniería relacionados con su diseño y selección de materiales.

5.3 ESTRUCTURA DE UNA PLANTA SOFC

La figura 5.4 muestra la estructura genérica de una planta con pila de combustible [129], aplicable a la tecnología de las pilas SOFC.

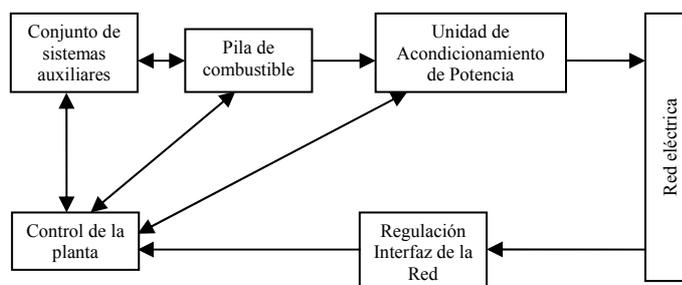


Figura 5.4: Estructura de un sistema de generación con pilas de combustible.

El conjunto de sistemas auxiliares se encarga de la preparación y suministro del combustible, la alimentación de la pila, los procesos complementarios de funcionamiento de la pila y los escapes de ésta.

La pila de combustible, debido a su funcionamiento, lleva a cabo la oxidación del combustible y suministra la energía en corriente continua. La Unidad de Acondicionamiento de Potencia se ocupa de la conversión de corriente continua a corriente alterna según las condiciones de la red en la que se conecta el sistema e incluye el control de la intensidad, tensión y frecuencia.

Las funciones de regulación y control de la planta se dividen en dos bloques:

- 1) El primero se ocupa de la interacción con la red eléctrica y del establecimiento de las órdenes para que el sistema inyecte a la red eléctrica la potencia activa demandada según las condiciones de la red en cada momento. Este primer bloque se indica en la figura 5.4 como Regulación Interfaz de la Red (RIR).
- 2) El segundo bloque, Control de la planta, transmite las instrucciones apropiadas al conjunto de sistemas auxiliares, a la pila de combustible y a la Unidad de Acondicionamiento de Potencia, en función de las órdenes emitidas por el RIR.

5.4 SISTEMAS HÍBRIDOS CON PILA DE COMBUSTIBLE

Se entiende por sistema híbrido el formado por diferentes sistemas de generación de energía. Es decir, una combinación de sistemas capaces de generar energía por sí mismos y configurados de tal manera que permitan alcanzar un rendimiento global superior al de las partes por separado. Para que un sistema se considere híbrido los mecanismos de generación deben ser diferentes, por ejemplo, en un sistema de ciclo combinado constituido por una turbina de gas y otra de vapor, los dos sistemas que se integran son máquinas térmicas que presentan ciclos de trabajo similares por lo que no se puede hablar propiamente de sistema híbrido. En el caso de sistemas formados por una pila de combustible combinada con una máquina térmica convencional la situación es diferente. La pila de combustible es un dispositivo electroquímico que convierte energía química en eléctrica directamente. Al combinar la pila con un ciclo de vapor o de gas sí se puede hablar de sistema híbrido.

Existen multitud de configuraciones posibles para formar sistemas híbridos, incluyendo ciclos de gas, ciclos de vapor o ambos [110]. El uso de ciclos de vapor para recuperar la energía contenida en los gases calientes de escape de la pila no aparece como una alternativa viable, ya que aumenta notablemente la complejidad de la planta.

En la actualidad, los sistemas híbridos con mayor potencial de desarrollo son los formados por pila de combustible y turbina de gas, existiendo dos configuraciones posibles: pila de combustible presurizada o a presión atmosférica.

El funcionamiento presurizado de la pila SOFC supone la mejora de varias prestaciones [11], pero sobre todo, el aumento de potencia específica (W/m^2). Este parámetro está fuertemente penalizado en cualquier sistema compuesto por pilas de combustible.

Aunque se pueda definir un sistema híbrido de manera simplificada como una pila de combustible sobrealimentada, es más sencillo realizar una analogía con una turbina de gas de ciclo regenerativo. En efecto, un sistema híbrido es, en su configuración más extendida, una turbina de gas regenerativa en la que se ha sustituido total o parcialmente el proceso de aporte de calor en la cámara de combustión por una pila de combustible.

La generación de energía eléctrica mediante pilas SOFC despierta actualmente gran interés. Este sistema es el que más promete como fuente de energía debido a su alta eficiencia y emisiones reducidas. El sistema híbrido compuesto por la pila SOFC y la turbina de gas proporciona mayor eficiencia que con ambos por separado [22, 110]. Este hecho, junto con la compatibilidad y ventajas de los dos sistemas, indica que su desarrollo y comercialización es inminente en los próximos años.

5.4.1 Sistema híbrido de pila SOFC con turbina de gas

El sistema híbrido formado por pila de combustible de óxido sólido y turbina de gas (SOFC-TG) es uno de los más aceptados. Este sistema ha sido sometido a varios análisis, estudios y simulaciones presentando una eficiencia considerablemente elevada.

En las publicaciones existentes sobre sistemas híbridos de pilas de combustible SOFC y turbinas de gas, las simulaciones realizadas convergen a una estimación de la eficiencia eléctrica que puede alcanzar hasta el 75 % [12, 32, 75, 88, 128].

El valor de la eficiencia se considera uno de los objetivos principales. Las investigaciones actuales se centran en nuevos diseños de los sistemas SOFC-TG para mejorar la eficiencia. Sin embargo, el desarrollo y comercialización de éstas nuevas plantas no se realizará en breve sino a medio plazo.

En las turbinas de gas que se comercializan actualmente, la temperatura requerida del gas de entrada es más alta que la temperatura del gas catódico de salida de la pila SOFC, por tanto, es necesario proporcionar combustible adicional en ese punto del ciclo para incrementar la temperatura. No obstante, se puede evitar la utilización de este combustible si el gas de salida de la pila SOFC contiene combustible sin quemar y la temperatura es bastante alta. Mediante la combustión de esta fracción de combustible se alcanza la temperatura deseada. [75].

La pila SOFC combinada con turbinas de gas de pequeño tamaño (menores de 1 MW) o micro-turbinas tienen un especial interés [144]. Estos sistemas permiten resolver algunos de los problemas que presentan por separado las turbinas de gas, como pueden ser la baja eficiencia y las emisiones de NO_x debidas al funcionamiento del quemador. La pila SOFC presurizada sustituye al quemador, imprescindible para la turbina de gas. El gas de salida de la pila es relativamente limpio y entra en la turbina a una temperatura de unos 900 °C, satisfaciendo los condicionantes de ésta.

Los sistemas SOFC-TG presentan respuestas transitorias aceptables frente a las variaciones de la carga [144]. Igualmente, el control de la potencia, temperatura y eficiencia del sistema SOFC-TG alimentado con gas procedente de la biomasa ya ha sido simulado mostrando resultados muy favorables [94].

A continuación se detallan algunas de las características de estos sistemas híbridos:

- El calor liberado en el proceso de oxidación electroquímica se aprovecha para precalentar el aire de entrada a la pila (que en este caso actúa de refrigerador de la pila) a modo de calentamiento regenerativo. En este sentido la regeneración es más intensa que en el caso de la turbina de gas convencional y el aire entra a la zona de reacción a mayor temperatura.
- La oxidación del combustible se realiza mediante reacción electroquímica, este proceso es más eficiente que una combustión convencional.
- El proceso de oxidación del combustible se realiza a temperatura prácticamente constante por lo que, en términos de rendimiento equivalente, para una temperatura de entrada a la turbina determinada el rendimiento del sistema aumenta.
- En el proceso de oxidación del combustible no sólo se aporta calor a las corrientes de gases que circulan por el interior de la pila sino que se genera energía eléctrica. Esta energía puede llegar a ser del orden del 60-70 % de toda la generada por el sistema.

5.4.2 Configuración de un sistema SOFC-TG

La figura 5.5 muestra un sistema SOFC con micro-turbina. La cámara de combustión (o quemador) se ocupa de completar la oxidación de los gases procedentes de la pila. El oxígeno del aire de salida del cátodo se usa en el proceso de combustión para quemar el hidrógeno residual, monóxido de carbono y metano existente. Los gases obtenidos en el quemador se expanden en la turbina de gas y posteriormente se aprovecha la energía calorífica resultante a través de recuperadores. Para esta configuración la eficiencia supera el 60 %.

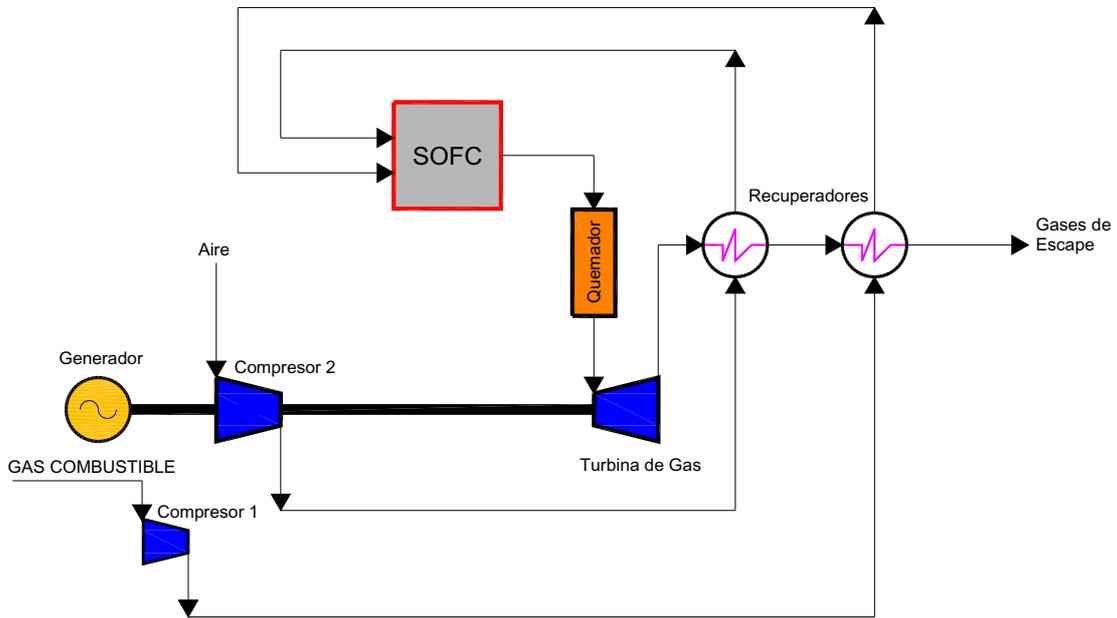


Figura 5.5: Sistema híbrido con pila SOFC y turbina de gas.

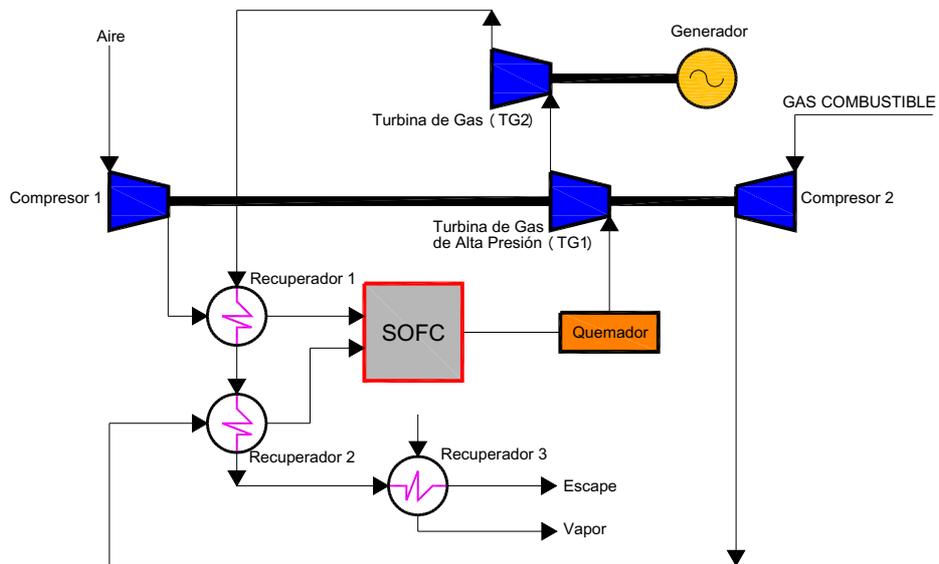


Figura 5.6: Sistema híbrido compuesto por pila SOFC y dos turbinas de gas.

La figura 5.6 muestra otro sistema híbrido SOFC-TG más completo. Se le incluye, además de la pila SOFC, un sistema de dos etapas con turbina de gas compuesto por: una turbina de gas de alta presión (TG1) y una segunda turbina de gas (TG2). El sistema se completa con dos compresores y 3 recuperadores de calor.

El trabajo desarrollado por la turbina TG1 se utiliza exclusivamente para proporcionar la energía mecánica que necesitan los dos compresores. La única energía mecánica que se transforma en eléctrica es la procedente de la turbina TG2.

En la puesta en marcha de la planta, la energía eléctrica necesaria para el arranque procede de baterías o de la red eléctrica. Posterior al arranque, el suministro de energía para los compresores y otros elementos procede de la propia planta. Por lo tanto, el consumo interno de la planta influye en la eficiencia eléctrica real del sistema.

El aire y gas combustible comprimido son precalentados antes de su entrada en la pila SOFC, y convenientemente canalizados a los electrodos. El gas combustible utilizado sufre procesos de descomposición y desplazamiento que permiten enriquecerlo en hidrógeno. El calor generado en los procesos de oxidación se aprovecha para las reacciones de cambio del gas combustible a hidrógeno.

Los gases de salida de la pila SOFC (temperatura de salida entorno a 1000 °C), son conducidos hasta la cámara de combustión o quemador donde éstos (hidrógeno, metano y monóxido de carbono) junto con aire, procedente del compresor de aire, se mezclan y queman alcanzando la temperatura adecuada de entrada en la turbina de gas (aproximadamente 1200 °C). El gas producido se expande a través de TG1 transformando energía mecánica en eléctrica. Posteriormente, el gas de salida de TG1 se expande en TG2 incrementando la generación de energía eléctrica. Los gases de salida de TG2 se aprovechan a través de los recuperadores previos a la pila SOFC, calentando el aire y gas combustible.

5.5 MODELO DE SISTEMA SOFC-TG

5.5.1 Objetivo del modelo y supuestos iniciales

El principal objetivo de este modelo de sistema híbrido con pila SOFC y turbina de gas es el cálculo de la potencia eléctrica de salida para su aplicación al problema que se plantea en esta Tesis que es la optimización de un sistema de generación SOFC-TG alimentado por biomasa residual forestal que se encuentra dispersa geográficamente. Para este propósito, no se pretende desarrollar un modelo complejo e inútil, sino directo, eficaz y eficiente que pueda incluirse en el modelo técnico, económico y geográfico global que se desarrolla. El sistema elegido es el representado en la figura 5.5.

Para el modelado de la pila SOFC se consideran una serie de supuestos iniciales que se detallan a continuación:

- El modelo está diseñado para el funcionamiento del sistema en régimen permanente. El inicio, interrupción y funcionamiento ajeno a la producción de energía eléctrica están fuera del alcance.
- La variable principal que genera el modelo es la potencia activa.
- La pila de combustible se alimenta de hidrógeno, metano, monóxido de carbono y aire. Los gases combustibles proceden de la gasificación de residuos forestales.
- Los gases que intervienen se consideran ideales.
- Las presiones y las temperaturas son constantes en cada uno de los puntos del sistema.

- Para la obtención de la fuerza electromotriz generada en la pila SOFC se aplica la ecuación de Nernst.

5.5.2 Reacciones químicas que se consideran en la pila

En la tabla 5.1 se han recogido las reacciones más importantes que se suceden en el interior de una pila SOFC. De las reacciones de conversión-oxidación sólo se va a considerar la del hidrógeno, si bien las altas temperaturas de funcionamiento hacen posible la oxidación directa del metano y el monóxido de carbono. No obstante, el combustible se enriquece con una elevada concentración de vapor de agua para favorecer las reacciones de descomposición y desplazamiento por encima de las anteriores y evitar, en la medida de lo posible, las reacciones de disociación. Por tanto, las reacciones que se consideran en este modelo son las indicadas en la tabla 5.2:

Tabla 5.2: REACCIONES EN LA PILA SOFC QUE SE CONSIDERAN

TIPO DE REACCIÓN	REACCIÓN
<i>De conversión</i>	$H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$ (5.12)
<i>De descomposición</i>	$CH_4 + H_2O \rightarrow 3H_2 + CO$ (5.13)
<i>De desplazamiento</i>	$CO + H_2O \rightarrow H_2 + CO_2$ (5.14)

Bajo esta aproximación se denomina hidrógeno de entrada equivalente a la suma del hidrógeno que entra con el combustible más el que se forma por descomposición y desplazamiento. El hidrógeno de entrada equivalente viene dado por la siguiente expresión:

$$q_{H_2,eq}^{entrada} = q_{H_2}^{entrada} + q_{CO}^{entrada} + 4q_{CH_4}^{entrada} \quad (5.15)$$

Donde:

- $q_{H_2,eq}^{entrada} \equiv$ caudal de hidrógeno equivalente de entrada a la pila.

- $q_{H_2}^{entrada} \equiv$ caudal de hidrógeno real de entrada a la pila.
- $q_{CO}^{entrada} \equiv$ caudal de monóxido de carbono de entrada a la pila.
- $q_{CH_4}^{entrada} \equiv$ caudal de metano de entrada a la pila.

Basándonos en la expresión (5.15), el análisis se simplifica si se considera que el único gas combustible que alimenta a la pila es el hidrógeno equivalente. Pero no todo el gas combustible reacciona en el interior de la pila, por ello, se define el factor de utilización, U_f , como la relación entre el flujo de combustible introducido en la pila y el flujo de combustible que reacciona. Considerando el hidrógeno equivalente como el gas de entrada, U_f viene dado por:

$$U_f = \frac{q_{H_2}^r}{q_{H_2,eq}^{entrada}} \quad (5.16)$$

Donde $q_{H_2}^r$ es la cantidad de hidrógeno que reacciona con el oxígeno.

5.5.3 Análisis del modelo de pila SOFC

El modelo que se desarrolla a continuación persigue la obtención de la potencia eléctrica activa que se genera en una pila SOFC en función del combustible utilizado. No se tienen en cuenta las características geométricas de la pila, el número de celdas, el tipo de conexión entre ellas, etc.

La fuerza electromotriz generada en la pila de combustible viene dada aplicando la ecuación de Nernst como:

$$E = E_0 + \frac{R_u T_K}{2F} \left[\ln \frac{p_{H_2} \sqrt{p_{O_2}}}{p_{H_2O}} \right] \quad (5.17)$$

Donde:

- $E \equiv$ fuerza electromotriz generada en la pila.
- $E_0 \equiv$ tensión asociada con la energía libre de reacción.
- $R_u \equiv$ constante del gas universal.
- $T_K \equiv$ Temperatura absoluta en °K.
- $F \equiv$ constante de Faraday.
- $p_{H_2} \equiv$ presión parcial del hidrógeno.
- $p_{O_2} \equiv$ presión parcial del oxígeno.
- $p_{H_2O} \equiv$ presión parcial del vapor de agua.

Considerando los gases que intervienen como ideales, el cálculo de las presiones parciales puede realizarse aplicando la ecuación de los gases perfectos.

Para el cálculo de la tensión de salida de la pila de combustible se han de tener en cuenta las pérdidas óhmicas, de activación y de concentración, que ocurren en el interior de la pila. La tensión de salida de la pila SOFC se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$V_{pc} = E_0 + \frac{R_u T_K}{2F} \left[\ln \frac{p_{H_2} \sqrt{p_{O_2}}}{p_{H_2O}} \right] - V_{ohm} - V_{act} - V_{con} \quad (5.18)$$

Donde:

- $V_{pc} \equiv$ tensión de salida de la pila de combustible [V].
- $V_{ohm} \equiv$ pérdidas de tensión óhmicas [V].
- $V_{act} \equiv$ pérdidas de tensión por activación [V].
- $V_{con} \equiv$ pérdidas de tensión por concentración [V].

En la práctica, la tensión de la pila está regulada por los equipos de control del sistema a un valor constante. Por esta razón, no se va a profundizar en el cálculo exacto

de las pérdidas que se producen y, por tanto, de la tensión de salida. Para el análisis del modelo, el valor de la tensión de salida se considera como un parámetro de entrada constante.

Aplicando la Ley de Faraday de la electrolisis, la intensidad de corriente de la pila viene dada, en función del flujo molar de hidrógeno equivalente que reacciona, $q_{H_2}^r$, por la siguiente expresión:

$$I = j \cdot F \cdot q_{H_2}^r = 2 \cdot F \cdot q_{H_2}^r \quad (5.19)$$

Donde:

- $I \equiv$ intensidad de la pila.
- $j \equiv$ número de electrones que se generan, para el hidrógeno toma el valor 2.
- $F \equiv$ constante de Faraday.
- $q_{H_2}^r \equiv$ flujo de hidrógeno que reacciona.

La potencia eléctrica generada en una pila de combustible se simplifica a:

$$P_{SOFC,cc} = 2 \cdot F \cdot V_{pc} \cdot q_{H_2}^r \quad (5.20)$$

Donde $P_{SOFC,cc}$ es la potencia de salida de la pila SOFC en corriente continua. En la ecuación (5.20) se puede advertir que si la tensión de salida de la pila, V_{pc} , es constante, la potencia eléctrica generada es directamente proporcional al flujo de combustible que reacciona en el interior de la pila. Considerando las ecuaciones (5.15) y (5.16) se obtiene que:

$$P_{SOFC,cc} = 2 \cdot F \cdot V_{pc} \cdot U_f \left[q_{H_2}^{entrada} + q_{CO}^{entrada} + 4q_{CH_4}^{entrada} \right] \quad (5.21)$$

En definitiva, la potencia eléctrica generada en la pila de combustible es directamente proporcional a los gases combustibles que la alimentan. En esta Tesis estos gases proceden de un proceso de gasificación de residuos forestales, por tanto, la potencia de la pila de combustible depende de la cantidad de residuos aprovechados, el tipo y procedencia, la composición y las propiedades energéticas de estos residuos forestales.

Teniendo en cuenta las pérdidas que se producen en la unidad de acondicionamiento de potencia, en la conversión a corriente alterna y en la transformación de los parámetros de salida de la pila a los valores nominales de la red eléctrica. La potencia de salida de la pila en corriente alterna será:

$$P_{SOFC,ca} = P_{SOFC,cc} \cdot \eta_{conv} \quad (5.22)$$

Siendo η_{conv} el rendimiento de la conversión.

5.5.4 Análisis de otros componentes del sistema

Otros componentes que influyen en el comportamiento y análisis del sistema SOFC-TG son, fundamentalmente, los intercambiadores o recuperadores de calor, los compresores de gas y aire y, naturalmente, la turbina de gas.

La energía calorífica procedente del flujo de gas de salida de la turbina de gas se utiliza para su intercambio en los recuperadores de calor. Considerando un intercambio de energía calorífica adiabático y reversible, se debe de cumplir para el recuperador que calienta el flujo de aire que entra en la pila lo siguiente:

$$\dot{m}_g \cdot (h_{ent,g} - h_{sal,g}) = \dot{m}_{aire} \cdot (h_{ent,aire} - h_{sal,aire}) \quad (5.23)$$

Donde:

- $\dot{m}_g \equiv$ flujo de gas que atraviesa el intercambiador.
- $\dot{m}_{aire} \equiv$ flujo de aire que atraviesa el intercambiador.
- $h_{ent,g} \equiv$ entalpía del gas de entrada.
- $h_{sal,g} \equiv$ entalpía del gas de salida.
- $h_{ent,aire} \equiv$ entalpía del aire de entrada.
- $h_{sal,aire} \equiv$ entalpía del aire de salida.

En este modelo se supone que el gas de salida de la turbina de gas dispone del calor suficiente para hacer frente a los requerimientos energéticos de los recuperadores que forman parte del sistema y preparar el gas y el aire de entrada de la pila SOFC a los puntos de diseño y funcionamiento óptimos. Por tanto, en este modelo no se utiliza la ecuación (5.23).

La potencia en el eje que produce la turbina de gas viene dada en función de la entalpía de entrada y salida del gas por la siguiente expresión:

$$P_{TG} = \eta_{TG} \cdot \dot{m}_g \cdot (h_{ent,g} - h_{sal,g}) \quad (5.24)$$

Donde:

- $P_{TG} \equiv$ Potencia mecánica generada por la turbina de gas.
- $\eta_{TG} \equiv$ rendimiento mecánico de la turbina de gas.
- $\dot{m}_g \equiv$ flujo de gas que pasa por la turbina.
- $h_{ent,g} \equiv$ entalpía que dispone el gas en la entrada a la turbina.
- $h_{sal,g} \equiv$ entalpía con la que el gas sale de la turbina.

Una parte de esta potencia generada por la turbina de gas y disponible en el eje la aprovecha el compresor de aire. Así, la potencia mecánica que necesita el compresor de aire viene expresada mediante la siguiente ecuación:

$$P_{comp,aire} = \frac{\dot{m}_{aire} \cdot (h_{ent,aire} - h_{sal,aire})}{\eta_{comp}} \quad (5.25)$$

Donde:

- $P_{comp,aire} \equiv$ Potencia mecánica empleada por el compresor.
- $\dot{m}_{aire} \equiv$ flujo de aire que es comprimido.
- $h_{ent,aire} \equiv$ entalpía de entrada en el compresor.
- $h_{sal,aire} \equiv$ entalpía de salida en el compresor.
- $\eta_{comp} \equiv$ rendimiento mecánico del compresor.

La potencia eléctrica de salida del generador eléctrico acoplado en el mismo eje que la turbina de gas y el compresor de aire, viene dada por la siguiente expresión:

$$P_{GEN} = (P_{TG} - P_{comp,aire}) \cdot \eta_{gen} \quad (5.26)$$

Donde η_{gen} es el rendimiento mecánico del generador eléctrico.

5.5.5 Potencia de salida del sistema

Por último, considerando P_{AUX} como la potencia que se necesita para el funcionamiento del compresor de gases, los equipos auxiliares (bombas, sopladores, instalaciones complementarias, etc.), el proceso de gasificación y el tratamiento inicial de los residuos (astillado y molienda). La potencia de generación eléctrica de salida del sistema híbrido SOFC-TG se expresa como:

$$P_{SOFC-TG} = P_{SOFC,ca} + P_{GEN} - P_{AUX} \quad (5.27)$$

La mayoría de modelos que simulan el funcionamiento de una pila SOFC o un sistema SOFC-TG buscan el resultado y el efecto de diversas variables en función de otros parámetros de diseño y, prácticamente, con una potencia eléctrica de generación

fija. Los parámetros internos se manejan en unos márgenes limitados por las características propias de los elementos que conforman el sistema.

Para el cálculo de las potencias de algunos elementos que componen el sistema (como la turbina de gas y los compresores) se necesitan conocer las entalpías de los gases a la entrada y la salida y que dependen de las temperaturas y presiones de cada punto. Nuestro modelo se desarrolla para dar respuesta a la optimización de la capacidad de generación y la situación geográfica de un sistema SOFC-TG alimentado con biomasa residual dispersa, dicho de otra manera, pretende calcular la potencia activa óptima y la posición idónea para reducir los costes de recogida de los residuos. Por ello, la respuesta que se persigue en el modelo del sistema SOFC-TG es la potencia y va a depender de la cantidad de residuos que se consideran combustibles y que alimentan el sistema. Resulta conveniente (y se adopta en este modelo) fijar la diferencia $(P_{GEN} - P_{AUX})$ proporcional a la potencia total generada por el sistema, $P_{SOFC-TG}$. Esta propuesta simplifica el modelo y facilita la optimización del problema. Así, si se define a R_p por la siguiente ecuación:

$$R_p = \frac{P_{GEN} - P_{AUX}}{P_{SOFC-TG}} \quad (5.28)$$

R_p es el porcentaje en tanto por uno de la potencia activa neta que aporta la turbina de gas. La potencia eléctrica de salida del sistema SOFC-TG viene dada en función de $P_{SOFC,ca}$ por:

$$P_{SOFC-TG} = \frac{1}{(1 - R_p)} \cdot P_{SOFC,ca} \quad (5.29)$$

Resultando que $P_{SOFC-TG}$ y $(P_{GEN} - P_{AUX})$ son proporcionales a la cantidad de combustible utilizado, o lo que es lo mismo, a la potencia generada en la pila SOFC. Sustituyendo (5.22) en la ecuación (5.29) se obtiene que:

$$P_{SOFC-TG} = \frac{1}{(1-R_p)} \cdot 2 \cdot F \cdot V_{pc} \cdot U_f \left[q_{H_2}^{entrada} + q_{CO}^{entrada} + 4q_{CH_4}^{entrada} \right] \cdot \eta_{conv} \quad (5.30)$$

Si en esta ecuación se sustituyen los flujos o caudales de combustible por las cantidades anuales de los gases combustibles utilizados se obtendría la energía anual generada por el sistema SOFC-TG, $E_{SOFC-TG}$, tal y como lo indica la ecuación (5.31):

$$E_{SOFC-TG} = \frac{1}{(1-R_p)} \cdot 2 \cdot F \cdot V_{pc} \cdot U_f \left[C_{H_2}^{entrada} + C_{CO}^{entrada} + 4C_{CH_4}^{entrada} \right] \cdot \eta_{conv} \quad (5.31)$$

Donde $C_{H_2}^{entrada}$, $C_{CO}^{entrada}$ y $C_{CH_4}^{entrada}$ son las cantidades anuales de los gases combustibles utilizadas.

5.5.6 Consideraciones finales

A continuación, a modo de resumen, se exponen las características fundamentales del modelo de sistema SOFC-TG planteado:

1. Los gases combustibles que se consideran son el hidrógeno, monóxido de carbono y metano. Estos gases proceden de la gasificación de residuos forestales previamente recogidos, tratados y gasificados.
2. Aunque el CO y el CH₄ son combustibles en la pila SOFC, en este modelo se eligen las reacciones de cambio al hidrógeno (descomposición y desplazamiento), considerando que existe suficiente vapor de agua.
3. La utilización de combustible es la relación entre el flujo de combustible que reacciona y la entrada de flujo de combustible, tal y como se indica en la ecuación (5.16). Normalmente, U_f oscila entre 0.7 y 0.9, el combustible que no reacciona en la pila se quema a la salida de ésta para su aprovechamiento

energético en la turbina de gas. El flujo de combustible que reacciona se regula a un valor constante.

4. Considerando el concepto de hidrógeno equivalente, la reacción total y principal de la pila SOFC es la indicada en la ecuación (5.32). La relación estequiométrica del hidrógeno al oxígeno es 2 a 1. Siempre se acepta el exceso de oxígeno para permitir que reaccione el hidrógeno con el oxígeno completamente.



5. La tensión de salida de la pila SOFC tiene un valor constante durante el funcionamiento en régimen permanente, por tanto, se considera como un parámetro fijo de entrada.
6. Las potencias, $P_{SOFC-TG}$, P_{GEN} y P_{AUX} , y la energía anual generada por el sistema SOFC-TG, $E_{SOFC-TG}$, son proporcionales a la cantidad de combustible utilizado (hidrógeno, monóxido de carbono y metano).
7. Por medio del acondicionador de potencia, el sistema no sólo puede generar potencia activa sino que también puede generar potencia reactiva.