

**SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA  
PILA DE COMBUSTIBLE – TURBINA DE GAS ALIMENTADO CON GAS RICO  
EN HIDRÓGENO PRODUCIDO POR GASIFICACIÓN DE CARBÓN**

**FAVER ADRIÁN CHAPARRO BONILLA  
DIANA ISABEL SÁNCHEZ FORERO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2007**

**SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA  
PILA DE COMBUSTIBLE- TURBINA DE GAS ALIMENTADO CON GAS RICO  
EN HIDRÓGENO PRODUCIDO POR GASIFICACIÓN DE CARBÓN**

**FAVER ADRIÁN CHAPARRO BONILLA  
DIANA ISABEL SÁNCHEZ FORERO**

**Trabajo de grado presentado como requisito  
parcial para optar por el título de Ingeniero Químico**

**Dr. Sc. VIATCHESLAV KAFAROV**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2007**

## DEDICATORIA

*Le dedico este trabajo principalmente a Dios por haberme  
dado el privilegio de la vida,  
y por ofrecerme lo necesario para el alcance de mis metas.*

*A mis Padres por todo su apoyo, comprensión y  
compromiso en cada una de las etapas de mi vida .porque sin  
ellos ninguno de mis logros serian posibles.*

*A mis hermanos, por su voz de aliento y colaboración en los  
momentos más difíciles.*

*Y en general a todas aquellas personas que hicieron posible  
la culminación de esta etapa de mi vida.*

*DJANA*

## DEDICATORIA

*El presente trabajo está dedicado a mi padre Jairo  
quien no esta presente en cuerpo pero que desde el cielo  
ha estado apoyándome y confiando en mí  
como siempre lo hizo en vida.*

*A mi querida madre Blanca  
por que gracias a ella he llegado a ser lo que soy,  
por su amor, aliento y fuerza,  
siempre será parte fundamental de mi vida.*

*A mis hermanos Iván y Paola  
por ser incondicionales y aguantarme tanto.*

*A todas las personas que de una u otra forma  
colaboraron con la consecución de este gran logro  
...mil gracias.*

**FAVER ADRIAN**

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	14
<b>1. MARCO TEORICO</b> .....	16
1.1 PILAS DE COMBUSTIBLE .....	16
1.1.1 Estructura Básica.....	16
1.2 TIPOS DE PILAS DE COMBUSTIBLE .....	17
1.3 PILA DE COMBUSTIBLE DE ÓXIDO SÓLIDO (SOFC).....	18
1.3.1 Principio De Funcionamiento .....	19
1.3.2 Diseño De Una SOFC.....	21
1.4 TURBINA DE GAS (GT).....	22
<b>2. MODELAMIENTO DEL SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA PILA DE COMBUSTIBLE–TURBINA DE GAS ALIMENTADO CON GAS RICO EN HIDRÓGENO PRODUCIDO POR GASIFICACIÓN DE CARBÓN</b> .....	24
2.1 SISTEMA SELECCIONADO PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE GAS RICO EN HIDRÓGENO PRODUCIDO POR GASIFICACIÓN DE CARBÓN .....	24
2.2 DESARROLLO DEL MODELO DEL SISTEMA DE PILA DE COMBUSTIBLE (PILA DE COMBUSTIBLE, INTERCAMBIADOR DE CALOR Y COMBUSTOR).....	26
2.2.1. Selección Del Modelo Para La Pila De Combustible SOFC .....	27
2.2.2 Selección De La Composición Del Combustible.....	28
2.2.3 Selección De Parámetros De Operación Para El Modelamiento De Pila De Combustible SOFC .....	29
2.2.4 Selección De Parámetros De Entrada Para La Corriente De Aire Suministrado A La Pila De Combustible .....	30
2.2.5 Selección Del Modelo De Combustor .....	31

2.2.6 Definición Del Voltaje De La Pila Y Flujo De Combustible Fresco Requerido .....	32
2.2.7 Definición Del Calor Generado En La Pila De Combustible.....	33
2.2.8 Realización De Cálculos .....	34
2.3. RESULTADOS DEL MODELAMIENTO DEL SISTEMA DE UNA PILA DE COMBUSTIBLE DE ÓXIDO SÓLIDO (SOFC) (PILA DE COMBUSTIBLE, INTERCAMBIADOR DE CALOR Y COMBUSTOR).....	34
<b>3. SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE PILA DE COMBUSTIBLE SOFC (PILA DE COMBUSTIBLE, INTERCAMBIADOR DE CALOR Y COMBUSTOR) .....</b>	<b>36</b>
3.1 EFECTO DE LA UTILIZACIÓN DEL FACTOR $U_F$ .....	36
3.2 EFECTO DE LA DENSIDAD DE CORRIENTE $I_C$ .....	38
3.3 EFECTO DE LA PRESIÓN DE OPERACIÓN .....	40
<b>4. MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA HIBRIDO (PILA DE COMBUSTIBLE, INTERCAMBIADOR DE CALOR, COMBUSTOR, TURBINA DE GAS Y COMPRESOR) .....</b>	<b>42</b>
<b>5. CONCLUSIONES .....</b>	<b>45</b>
<b>6. BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>47</b>
<b>7. ANEXOS.....</b>	<b>49</b>

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1.</b> Reacciones anódica y catódica de los distintos tipos de pila de combustible.....	18
<b>Tabla 2.</b> Composición del gas rico en Hidrógeno .....	28
<b>Tabla 3.</b> Ecuaciones empíricas para la determinación del voltaje de una SOFC. .	32
<b>Tabla 4.</b> Resultados del modelamiento para la pila de combustible .....	35
<b>Tabla 5.</b> Resultados de la simulación para el sistema pila de combustible-turbina de gas .....	43

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1.</b> Estructura básica de una pila de combustible .....	16
<b>Figura 2.</b> Esquema de una pila de combustible de óxido sólido SOFC.....	19
<b>Figura 3a.</b> Diseño tubular de una SOFC .....	21
<b>Figura 3b.</b> Apilado de pilas tubulares.....	21
<b>Figura 4.</b> Esquema de un ciclo de Brayton .....	23
<b>Figura 5.</b> Diagrama de flujo del sistema de pila de combustible (SOFC)-turbina de gas alimentado con gas rico en hidrogeno obtenido por gasificación de carbón para la generación de energía eléctrica.....	25
<b>Figura 6.</b> Diagrama del modelo de una pila de combustible usando HYSYS <sup>®</sup> , incluyendo intercambiador de calor y combustor.....	35
<b>Figura 7.</b> Efecto de $U_f$ en eficiencia, voltaje, combustible fresco y densidad de corriente (potencia constante 120 kW DC) .....	37
<b>Figura 8.</b> Efecto de $U_f$ en la composición del gas de salida del ánodo (base seca). .....	38
<b>Figura 9.</b> Efecto de la densidad de corriente en la potencia, eficiencia, voltaje, combustible fresco y aire requerido. ( $U_f$ contante 0.85).....	39
<b>Figura 10.</b> Variación del voltaje con $U_f$ a distintas presiones ( $T=1000^{\circ}\text{C}$ ). .....	40
<b>Figura 11.</b> Variación de la eficiencia con $U_f$ a distintas presiones ( $T=1000^{\circ}\text{C}$ ).....	41
<b>Figura 12.</b> Diagrama del modelo del sistema pila de combustible-turbina de gas usando HYSYS <sup>®</sup> .....	42
<b>Figura 13.</b> Variación de la eficiencia para la pila de combustible y el sistema pila de combustible-turbina de gas .....	44

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
<b>ANEXO A.</b> BASES TERMODINAMICAS .....	49
<b>ANEXO B.</b> TIPOS DE PILAS DE COMBUSTIBLE Y SUS PRINCIPALES CARACTERISTICAS .....	52
<b>ANEXO C.</b> EFECTO DEL CO <sub>2</sub> EN EL AMBIENTE Y MECANISMOS DE CAPTURA.....	53
<b>ANEXO D.</b> EFECTOS DE LA TEMPERATURA EN LA CELDA DE COMBUSTIBLE DE ÓXIDO SÓLIDO (SOFC).....	56
<b>ANEXO E.</b> MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN PARA EL SISTEMA PILA DE COMBUSTIBLE (SOFC)-TURBINA DE GAS PARA LA GENERACIÓN DE 12 MW DE POTENCIA.....	59
<b>ANEXO F.</b> SISTEMA DE GENERACION DE ENERGIA ELECTRICA EN COLOMBIA.....	63

# TITULO: SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA PILA DE COMBUSTIBLE- TURBINA DE GAS ALIMENTADO CON GAS RICO EN HIDRÓGENO PRODUCIDO POR GASIFICACIÓN DE CARBÓN\*

**AUTORES:** CHAPARRO BONILLA, Faver Adrián. SÁNCHEZ FORERO, Diana Isabel\*\*

**Palabras Claves:** Hidrogeno, Carbón, Pila de Combustible, Turbina de gas, Modelamiento, Simulación, ASPEN HYSYS.

## RESUMEN

El carbón es uno de los combustibles fósiles más abundantes en el mundo y una de las principales fuentes de energía. Procesos como la gasificación de carbón son usados para obtener gas de síntesis, que sirve como combustible para la generación de energía eléctrica por medio de pilas de combustible, las cuales se vislumbran como una de las tecnologías capaces de cambiar la forma de producir y usar la energía, por sus características de alta eficiencia y bajas emisiones contaminantes, ya que los únicos productos emitidos a la atmósfera son H<sub>2</sub>O y CO<sub>2</sub>.

En el presente trabajo se modela un sistema de generación de energía eléctrica de pila de combustible de oxido solido (SOFC), integrado con una turbina de gas (GT), utilizando como combustible un gas rico en hidrogeno. El proceso fue simulado en ASPEN HYSYS 2004.2<sup>®</sup>. Se realizó un análisis de sensibilidad variando los principales parámetros de operación, encontrándose que las condiciones óptimas de funcionamiento se encuentran a una temperatura de 1000°C, una presión de 5atm y un factor de utilización de combustible  $U_f$  de 0.85. Bajo éstas condiciones de operación se logra una eficiencia del 44.7% (LHV) para la pila de combustible y de 56.8% (LHV) para la pila de combustible integrada con la turbina de gas, demostrando que se obtiene un rendimiento más alto que el logrado por sistemas de generación de energía tradicionales a partir de carbón, los cuales alcanzan eficiencias hasta del 25 %. El modelo fue diseñado para una potencia de 150 KW y escalado para una potencia de 12 MW donde se encontró que la pila hace un aporte del 77% y la turbina de gas un 23% en la generación total de energía en el sistema.

---

\* Tesis de pregrado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Dr. M.Sc. VIATCHESLAV KAFAROV

**TITLE: SIMULATION OF POWER GENERATION SYSTEM FUEL CELL-GAS TURBINE USING SYNGAS PRODUCED BY COAL GASIFICATION\***

**AUTHORS:** CHAPARRO BONILLA, Faver Adrián. SÁNCHEZ FORERO, Diana Isabel\*\*

**Keywords:** Hydrogen, Coal, Fuel Cell, Gas Turbine, Modeling, Simulation, ASPEN HYSYS.

**ABSTRACT**

The coal is one of the most plentiful fossil fuels in the world and one of the main energy sources. Processes like coal gasification, are used to obtain syngas that is used as fuel for electric power generation through fuel cells, which appear like one of the capable technologies to way of producing and using energy, because of this high efficiency characteristics and low and pollution emissions emitted to the atmosphere ( $H_2O$ ,  $CO_2$ ).

This piece of work models a solid oxide fuel cell (SOFC) generation system for electric power integrated with a gas turbine (GT), using a rich hydrogen gas as fuel. The process was simulated using the program ASPEN HYSYS 2004.2®. A sensibility analysis was made changing the main operation parameters, finding that the best function conditions are temperature of  $1000^{\circ}C$ , pressure of 5atm and a fuel use factor ( $U_f$ ) of 0.85, under this operation conditions a efficiency of 44.7% (LHV) for a fuel cell and 56.8% (LHV) for a fuel cell integrated with the gas turbine, this shows that you can get a higher efficiency than the one obtained by the traditional energy generation systems which achieve 25% of efficiency. The model was designed for 150 KW of power, scaled for 120Mw where the fuel cell contributes a 77% and the gas turbine a 23% of the total generation in the energy system.

---

\* Undergraduate thesis

\*\* Faculty of Physicochemical Engineering. School of Chemical Engineering. Director: Dr. M.Sc. VIATCHESLAV KAFAROV

## INTRODUCCIÓN

La búsqueda continua por satisfacer necesidades tales como el consumo de energía ha generado una gran presión sobre el medio ambiente, donde el cambio climático es la mayor amenaza medioambiental a la que se enfrenta la humanidad. Dentro de las medidas adoptadas a nivel internacional por el Protocolo de Kyoto para la reducción de las emisiones de gases que producen el efecto invernadero, se establece el mecanismo de desarrollo limpio (MDL), con el fin de establecer nuevas tecnologías que permitan dicho desarrollo sostenible; donde las pilas de combustible se vislumbran como una de estas tecnologías capaces de enfrentar este reto.

La pila de combustible se adapta perfectamente a la integración de los dos extremos de la cadena energética (producción y consumo) de manera armónica debido a sus características de alto rendimiento (bajo consumo), y mínimas emisiones contaminantes; estos sistemas se destacan por no generar agentes destructores de la capa de ozono (óxidos de nitrógeno), siendo agua y dióxido de carbono los únicos productos emitidos brindando la posibilidad de su captura debido a su concentración en la corriente de salida del proceso.

El carbón es el combustible fósil más abundante del mundo, tanto, que sus reservas probadas han sido definidas en más de 100 países y, con la rata actual de producción, su vida útil sería superior a 200 años, en contraste con las reservas de petróleo y gas cuyas duraciones previstas son de 40 y 60 años respectivamente, y su proceso de gasificación es la principal manera de generar un gas rico en hidrógeno que sirve como combustible para la generación de energía eléctrica usando pilas de combustible.

El presente trabajo tiene como fin analizar los parámetros de operación del sistema pila de combustible - turbina de gas, para lograr su mayor eficiencia

dentro del contexto de generación de energía utilizando como combustible gas rico en hidrógeno, que es producido por gasificación de carbón. Para el análisis se utiliza el simulador de procesos HYSYS<sup>®</sup>, el cual permite el estudio del funcionamiento del sistema compuesto por una pila de combustible de óxido sólido (SOFC) que se caracteriza por su electrolito cerámico y su alta temperatura de funcionamiento, próximas a los 1000°C; propiedad más interesante de las pilas cerámicas por cuanto genera una corriente de gases de escape de alto contenido energético, susceptible de ser aprovechada por una máquina térmica. En este sentido, se desea mostrar que la integración de una turbina de gas con una pila de este tipo presenta un potencial muy elevado desde el punto de vista energético, donde rendimientos de hasta el 70% a largo plazo parecen posibles.

El tema se desarrollará en tres bloques, en el primero se realiza una descripción de los fundamentos teóricos que rigen el funcionamiento, bases termodinámicas y tipos de pilas de combustible existentes, y su integración con una turbina de gas para lograr el sistema (SOFC/GT).

En el segundo bloque se plantea el modelo de pila de combustible SOFC, se hace un análisis de resultados, incluyendo un estudio de los parámetros característicos del sistema y un análisis de sensibilidad a las condiciones operativas a fin de determinar las condiciones óptimas de funcionamiento par lograr un mayor rendimiento energético. Por último se integra la pila de combustible a una turbina de gas y se analiza el rendimiento obtenido por el sistema SOFC/GT.

# 1. MARCO TEORICO

## 1.1 PILAS DE COMBISTIBLE

Las pilas de combustible son dispositivos electroquímicos que convierten la energía química almacenada en un combustible, en energía eléctrica a manera de corriente continua, sin que haya proceso de combustión, a una temperatura y presión dada; obteniendo altas eficiencias y bajo impacto ambiental, puesto que sus únicos subproductos son agua y calor.

A diferencia de las baterías convencionales, la pila de combustible esta diseñada para el reabastecimiento continuo de los reactivos consumidos (combustible y oxidante), de tal manera que se produce energía mientras haya suministro de los mismos.

### 1.1.1 Estructura Básica

Cada celda o unidad elemental de una pila de combustible esta compuesta de una capa de electrolito, en contacto con un electrodo poroso a cada lado, como se muestra en la figura 1.

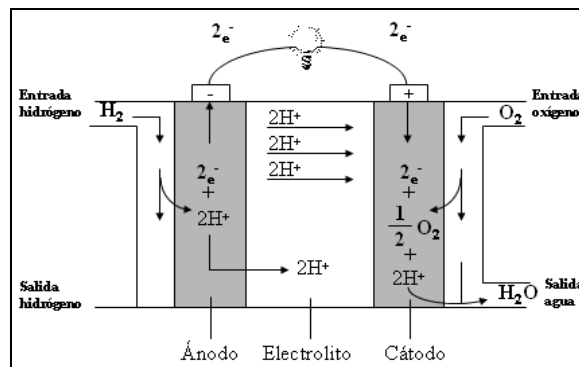


Figura 1. Estructura básica de una pila de combustible

El combustible alimenta continuamente al ánodo (electrodo negativo) donde sufre un proceso de ionización, para su posterior oxidación electroquímica, mientras que el oxidante alimenta al cátodo (electrodo positivo) en donde se reduce. Las reacciones electroquímicas se llevan a cabo en los electrodos para producir corriente eléctrica a través del electrolito.

En teoría cualquier sustancia susceptible a oxidarse o a reducirse puede ser utilizada como combustible o como oxidante dentro de una pila de combustible, dicho uso depende del tipo de pila (electrolito) con que se cuente. Sin embargo el hidrógeno, o gases de síntesis ricos en hidrógeno, se utiliza con mayor frecuencia como combustible, ya que posee una alta reactividad para las reacciones del ánodo y se puede obtener químicamente de una amplia gama de combustibles fósiles o por vía electrolisis; de igual forma el oxígeno gaseoso por su alta disponibilidad en recursos tales como el aire se prefiere como oxidante.

Los principios termodinámicos de una pila de combustible se pueden ver en el **Anexo A**.

## 1.2 TIPOS DE PILAS DE COMBUSTIBLE

Las pilas de combustible se dividen según el rango de temperatura en el cual opera la celda o según el tipo de electrolito empleado, y como se mencionó anteriormente de este depende la clase de reacción, agentes catalíticos, rangos de temperatura, combustible requerido, entre otros factores, que determinan el uso que se le puede dar a la pila. En el **Anexo B** se listan los tipos más comunes de pilas de combustible.

Existen otros tipos de pila denominadas *regenerativas*, las cuales, pueden utilizar además de H<sub>2</sub> como combustible, electricidad procedente de la energía solar o de

otra fuente para dividir el exceso de agua en combustible de oxígeno e hidrógeno, proceso denominado *electrólisis*.

Las reacciones electroquímicas que tienen lugar en los electrodos de las pilas de combustible, son específicas para cada tipo, como se muestra en la Tabla 1.

TIPO	Ánodo	Cátodo
<b>PEM &amp; PAFC</b>	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	$\frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2(OH)^-$
<b>AFC</b>	$H_2 + 2(OH)^- \rightarrow 2H_2O + 2e^-$	$\frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2(OH)^-$
<b>MCFC</b>	$H_2 + CO_3^- \rightarrow 2H_2O + CO_2 + 2e^-$ $CO + CO_3^- \rightarrow 2CO_2 + 2e^-$	$\frac{1}{2}O_2 + CO_2 + 2e^- \rightarrow CO_3^-$
<b>SOFC</b>	$H_2 + O^- \rightarrow H_2O + 2e^-$ $CO + O^- \rightarrow CO_2 + 2e^-$ $CH_4 + 4O^- \rightarrow 2H_2O + CO_2 + 8e^-$	$\frac{1}{2}O_2 + 2e^- \rightarrow O^-$

Tabla 1. Reacciones anódica y catódica de los distintos tipos de pila de combustible

### 1.3 PILA DE COMBUSTIBLE DE ÓXIDO SÓLIDO (SOFC)

Las pilas de combustible de óxido sólido poseen como electrolito un componente de cerámica duro y no poroso, sus temperaturas de operación son extremadamente elevadas (1000°C), evitando el uso de metales nobles como catalizadores, y al igual que las MCFC, permite que exista un reformado interno en la pila, lo que supone la posibilidad de utilizar distintos combustibles.

Aunque estas pilas son las más resistentes a los sulfuros y no se contaminan con monóxido de carbono, sus altas temperaturas hacen que su arranque sea lento y que existan escapes de calor, además de afectar los materiales que utiliza, haciéndola menos duradera.

Su uso se limita a ciertas aplicaciones, y por su posibilidad de integración con máquinas térmicas, se utiliza en sistemas híbridos de pila de combustible y máquina térmica, aumentando así su rendimiento, ya que, como se dijo anteriormente permite aprovechar el calor residual.

### 1.3.1 Principio De Funcionamiento

En la región trifásica entre el cátodo, el oxígeno gaseoso y el electrolito, existe una transferencia de electrones desde el cátodo al oxígeno (R 1.1), y los iones del oxígeno emigran a través del electrolito. En la región trifásica que comprende al ánodo, los iones del oxígeno reaccionan con el CO y H<sub>2</sub> a la forma de H<sub>2</sub>O y CO<sub>2</sub>. El combustible se provee sobre la superficie del ánodo y se reforma completamente a CO y H<sub>2</sub> sobre esta. El CO y H<sub>2</sub> se difunden a través del ánodo poroso a la superficie del electrolito donde reaccionan con los iones de oxígeno según (R 1.2 y R 1.3). Los electrones se conducen a través de un circuito externo del ánodo al cátodo de tal forma que se crea una corriente eléctrica.

El CO puede reaccionar con vapor a CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub> mediante una reacción de desplazamiento del agua-gas"shift" (R 1.4).

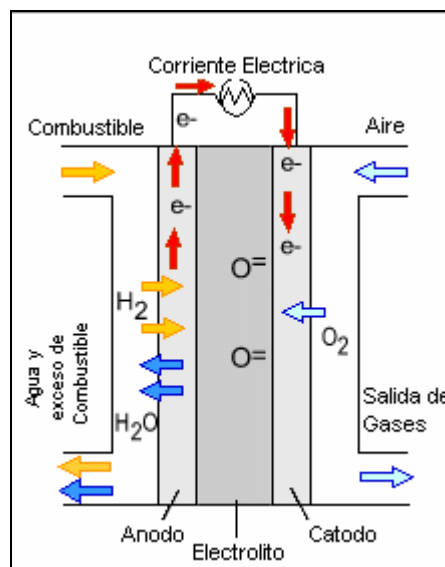


Figura 2. Esquema de una pila de combustible de óxido sólido SOFC

$O_2 + 4e^- \rightarrow 2O^{2-}$	Reacción en el Cátodo	(R 1.1)
$H_2 + O^{2-} \rightarrow H_2O + 2e^-$	Reacción en el Ánodo por $H_2$	(R 1.2)
$CO + O^{2-} \rightarrow CO_2 + 2e^-$	Reacción en el Ánodo por CO	(R 1.3)
$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$	Reacción de desplazamiento "shift"	(R 1.4)

La diferencia de potencial obtenida por una sola pila (0.5-1 voltio de corriente continua) no es suficiente, es por esto que para aplicaciones prácticas se deben realizar combinaciones en serie o en paralelo, que permitan elevar la tensión y la densidad de corriente, dichos arreglos son denominados "stack". Cada unidad del apilado o "stack" presenta cuatro capas tres de las cuales son cerámicas:

- **Cátodo** La capa de cerámica del cátodo debe ser porosa, de modo que permita el transporte desde la corriente de aire hasta el electrolito. Existen varios tipos de materiales de cerámica usados para el cátodo, los cuales deben ser eléctricamente conductores como el óxido de manganeso y lantano ( $LaMnO_3$ ) dopado con cationes alcalinotérreos.
- **Electrolito** Es la capa más densa, que actúa como membrana que separa las corrientes de combustible y oxidante. El material empleado debe ser buen conductor de iones y mal conductor de electrones, además debe ser resistente a la acción reductora del hidrogeno; el material cerámico más común es el óxido de circonio estabilizado con óxido de itrio YSZ.
- **Ánodo** La capa cerámica del ánodo debe ser muy porosa, para permitir que el combustible fluya al electrolito. Está fabricado por un cerameto ("cermet") de níquel e YSY; donde el níquel confiere la conductividad electrónica y la matriz cerámica actúa como elemento resistente.

- **Interconexión** Su propósito es conectar cada unidad, para poder combinar la electricidad que cada celda genera. La interconexión debe tener alta conductividad eléctrica, estabilidad química y un comportamiento ante deformaciones térmicas. El material más utilizado es la cromita de lantano ( $\text{LaCrO}_3$ ), y puesto que está expuesto al ánodo y al cátodo debe resistir ambos ambientes.

### 1.3.2 Diseño De Una SOFC

A diferencia de los otros tipos de pilas las SOFC's, por carecer de componentes líquidos, pueden ser construidas en distintas geometrías o configuraciones como son: plana y tubular.

La geometría plana es la más utilizada por la mayoría de tipos de pilas de combustible donde el electrolito se intercala entre los electrodos; mientras que la tubular se usa para las SOFC, ya que es mucho más fácil de sellar y separa al combustible del aire, haciendo esta configuración más ventajosa, además de presentar mayor resistencia al desgaste y facilitar la expansión térmica.

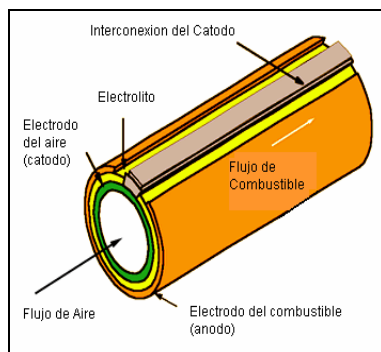


Figura 3a. Diseño tubular de una SOFC

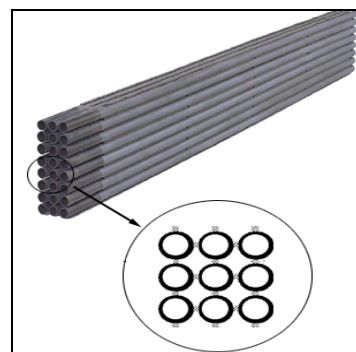


Figura 3b. Apilado de pilas tubulares

La figura 3a muestra el diseño tubular el cual consta de un cilindro hueco cuya pared esta formada por los dos electrodos y el electrolito, donde el aire pasa a través del interior del tubo y el combustible a lo largo del exterior de este.

La unidad básica de una pila de referencia es un tubo 1,5 m de longitud por 22 mm de diámetro exterior siendo el espesor de la pared de unos 2 mm y un área activa de cerca de 834 cm<sup>2</sup>, esta unidad básica fue desarrollada por Siemens Westinghouse y su potencia nominal funcionando a presión atmosférica es baja por lo cual hay que agrupar un gran número de ellos para lograr potencias elevadas, la figura 3b representa un acoplamiento de este tipo.

#### **1.4 TURBINA DE GAS (GT)**

Una Turbina a Gas, es una turbo máquina motora de reacción, cuyo fluido de trabajo es un gas. Como la compresibilidad de los gases no puede ser despreciada, las turbinas a gas son turbo máquinas térmicas. Comúnmente se habla de las turbinas a gas por separado de las turbinas corrientes, ya que, aunque funcionan con sustancias en estado gaseoso, sus características de diseño son diferentes.

Un ciclo de turbina de gas, se basa en el ciclo teórico de Brayton, ciclo termodinámico de compresión, calentamiento y expansión de un fluido compresible, generalmente aire, que se emplea para producir trabajo neto y su posterior aprovechamiento como energía mecánica o eléctrica. Al emplear como fluido termodinámico el aire, el ciclo Brayton puede operar a temperaturas elevadas, por lo que es idóneo para aprovechar fuentes térmicas de alta temperatura y obtener un alto rendimiento termodinámico.

Las turbinas de gas se usan dentro de la producción de energía eléctrica trabajando una gama de aproximadamente 70 Kw a 330 Mw; las eficiencias que

se logran son del 30 y 40%, dependiendo del diseño, de la disposición del ciclo y del tamaño de la planta.

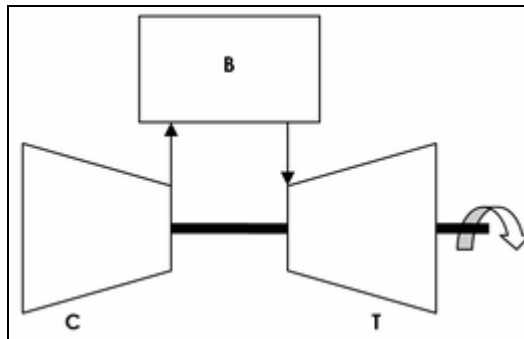


Figura 4 Esquema de un ciclo de Brayton

La turbina de gas se puede integrar con una pila de combustible de alta temperatura de forma directa o indirecta. En una integración indirecta, la cámara de combustión del proceso de la turbina de gas, se reemplaza por un intercambiador de calor, donde el extractor del apilado de la pila de combustible se utiliza para calentar el aire que viene del compresor (la pila se puede utilizar a presión atm). Esta integración pueda presentar bajo rendimiento, debido a los altos gradientes de temperatura y de presión en el intercambiador, resultando un sistema muy costoso por los materiales a utilizar.

En una integración directa con el apilado de la pila de combustible, el apilado sustituye la cámara de combustión en el proceso convencional de turbina de gas, y mediante una presurización del apilado se aumenta la salida de energía, aunque se deben prevenir los gradientes de presión entre el ánodo y el cátodo, además del efecto que produzca en los sellantes.

Las ventajas de utilizar una turbina de gas integrada con una SOFC serían: un aumento total de la energía de 20-50%, un aumento de la eficacia de combustible de 20-30% y una reducción de costos totales de hasta 40%. Las turbinas comerciales podrían ser utilizadas en los usos de la primera generación SOFC/GT para reducir costos.

## **2. MODELAMIENTO DEL SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA PILA DE COMBUSTIBLE – TURBINA DE GAS ALIMENTADO CON GAS RICO EN HIDRÓGENO PRODUCIDO POR GASIFICACIÓN DE CARBÓN**

### **2.1 SISTEMA SELECCIONADO PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE GAS RICO EN HIDRÓGENO PRODUCIDO POR GASIFICACIÓN DE CARBÓN**

Una de las problemáticas que afrontan investigadores se refiere al desarrollo sostenible de la energía eléctrica, y la búsqueda de nuevas tecnologías de generación que impliquen alto rendimiento, bajas emisiones contaminantes y proximidad a los puntos de consumo; una de estas tecnologías es el llamado *sistema híbrido de pila de combustible*.

Un sistema híbrido se refiere a un sistema de producción de potencia formado por diferentes dispositivos de generación de energía, el cual combina mecanismos de producción diferentes. Actualmente el sistema híbrido más desarrollado es el compuesto por la pila de combustible y la turbina de gas, presentándose en dos configuraciones: presurizado y a presión atmosférica; donde la pila de combustible actúa como combustor para la turbina de gas.

Puesto que la pila de combustible de óxido sólido (SOFC), se encuentra como una de las tecnologías más prometedoras debido a su alta eficiencia, diseño de estado sólido y potencial de reformado interno de combustible gaseoso, al ser combinada con una turbina de gas (GT), puede satisfacer la necesidad de recuperar el calor rechazado por la pila y obtener una eficiente conversión de la electricidad.

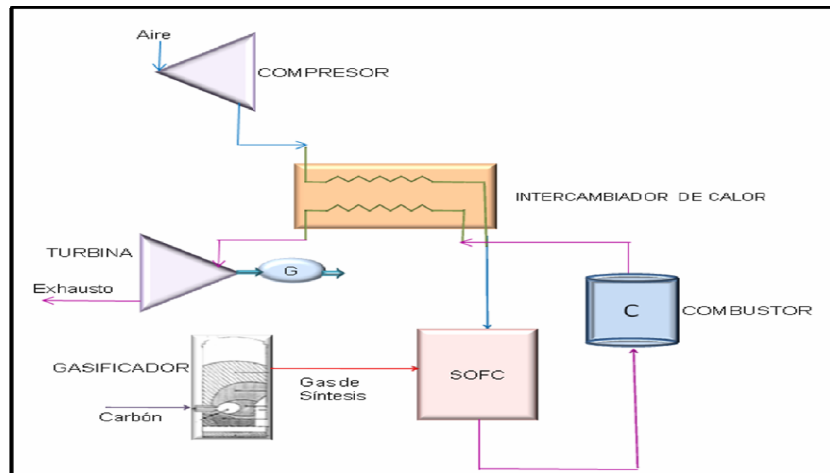


Figura 5. Diagrama de flujo del sistema de pila de combustible (SOFC)-turbina de gas alimentado con gas rico en hidrogeno obtenido por gasificación de carbón para la generación de energía eléctrica.

En la figura 5 se observa que el carbón entra al gasificador y allí se convierte en gas de síntesis, dicho gas rico en hidrogeno alimenta a una pila de combustible de óxido sólido (SOFC) y reacciona con el aire que previamente ha sido presurizado. La corriente de los productos de reacción (corriente que sale de la pila), pasan por un combustor para eliminar los posibles excesos de  $H_2$  y  $CO$ . Gracias a las altas temperaturas que se obtienen después de la combustión, se calienta el aire de entrada, por medio de un intercambiador de calor. El gas resultante ingresa a una turbina para así obtener la energía eléctrica deseada.

El objetivo de esta simulación es el análisis del sistema híbrido de generación de energía eléctrica compuesto por una pila de combustible de óxido sólido y una turbina de gas, alimentado por un gas de síntesis obtenido del proceso de gasificación de carbón en una previa investigación realizada en la escuela de Ingeniería Química [12]; este sistema puede producir electricidad eficientemente y entregar una corriente con  $CO_2$  concentrado posibilitando su captura, en el **Anexo C** se presentan los principales métodos de su captura. El proceso fue simulado en estado estacionario debido a que en pilas de este tipo la alimentación de

combustible es constante y no hay piezas móviles (no hay conversión de energía térmica en mecánica) por lo que, una vez transcurrido un transitorio desde la puesta en marcha del sistema se alcanzan unas condiciones operativas estables definidas, la simulación fue realizada empleando una herramienta comercial para la simulación de procesos tal como lo es HYSYS®.

Se escogió una pila de combustible de óxido sólido para el presente trabajo debido a que presenta como ventaja que tolera tanto el monóxido de carbono, que se puede oxidar a dióxido de carbono en presencia de agua y alta temperatura para formar hidrógeno, como el dióxido de carbono, además de su alta temperatura de funcionamiento que permite aprovechar el calor como cogeneración.

El sistema general fue simulado en dos etapas:

1. Modelamiento del sistema de pila de combustibles (pila de combustible, intercambiador de calor y combustor)
2. Modelamiento del sistema integrado con turbina de gas (sistema de pila de combustible, turbina de gas y compresor).

## **2.2 DESARROLLO DEL MODELO DEL SISTEMA DE PILA DE COMBUSTIBLE (PILA DE COMBUSTIBLE, INTERCAMBIADOR DE CALOR Y COMBUSTOR)**

El modelamiento del sistema de pila de combustible (pila de combustible, intercambiador de calor y combustor) tiene las siguientes etapas:

1. Selección del modelo para la pila de combustible SOFC.
2. Selección de la composición del combustible.
3. Selección de parámetros de operación para el modelamiento de pila de combustible SOFC.
4. Selección de parámetros de entrada para la corriente de aire suministrada a la pila de combustible.

5. Selección del modelo de combustor.
6. Definición del voltaje de la pila y flujo de combustible fresco requerido.
7. Definición del calor generado en la pila de combustible.
8. Realización de cálculos.
9. Integración y simulación del sistema de pila de combustible SOFC (pila de combustible, intercambiador de calor y combustor).

### **2.2.1. Selección Del Modelo Para La Pila De Combustible SOFC**

Para realizar el modelamiento y consiguiente simulación se siguió una metodología definida, para la pila de combustible se uso un modelo cero-dimensional (0D) o, más comúnmente, de caja negra por cuanto las dimensiones geométricas del sistema no son tenidas en cuenta de manera directa. En este caso los comportamientos electroquímico y térmico se estiman a partir de unas ecuaciones de balance macroscópicas aplicadas a un volumen de control que engloba toda la pila de combustible. En el balance de masa y energía se consideran las corrientes de entrada/salida de combustible/oxidante y los intercambios de energía con el exterior. Los fenómenos que tienen lugar en el interior de la pila no son de interés y sólo se toma una idea de los mismos a través de los valores medios entre la entrada y salida de los gases [1].

Dado que estos modelos de caja negra permiten solamente un estudio global de la pila (y no uno local) suelen recurrir a hipótesis que simplifiquen las ecuaciones generales de balance o, en algunos casos, permitan la resolución; las hipótesis planteadas son:

- La reacción de desplazamiento de monóxido de carbono alcanza el equilibrio a la temperatura de salida de la pila.[2] [3]

- Las pérdidas por concentración son despreciables puesto que la pila trabaja lejos de la zona de intensidades de corriente elevadas.[4] [5]
- Los gases presentan comportamiento de gas perfecto.[6] [7] [8]

### 2.2.2 Selección De La Composición Del Combustible

Se asume que el gas de síntesis producido por la gasificación del carbón se ha tratado previamente para eliminar impurezas tales como ácido sulfhídrico ( $H_2S$ ), ácido clorhídrico ( $HCl$ ) y amoníaco ( $NH_3$ ) que son impurezas típicas encontradas en la producción de hidrógeno por gasificación de carbón) [9]. La concentración de ácido sulfhídrico debe reducirse hasta cantidades tan pequeñas como 1 ppm, al igual que la de halogenuros, se puede aceptar un 0,5% (v) de amoníaco, concentraciones mayores de éstas sustancias pueden alterar el funcionamiento de la pila de combustible.

El proceso de simulación de la gasificación de carbón fue desarrollado anteriormente y se toma como referencia un gas de síntesis con la siguiente composición [12].

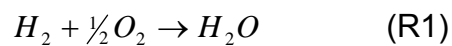
Composición del gas de síntesis (%mol)	
$H_2$	35,8
$CO$	42,3
$CO_2$	9,6
$H_2O$	10,5
$N_2$	1,5
$CH_4$	0,3

Tabla 2. Composición del gas rico en Hidrógeno

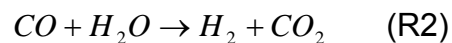
### 2.2.3 Selección De Parámetros De Operación Para El Modelamiento De Pila De Combustible SOFC

A 1000 °C, la oxidación directa del CO y CH<sub>4</sub> contenidos en el gas combustible es factible en la pila de combustible sin el uso de catalizador, pero es menos favorable la reacción de desplazamiento para convertir CO a H<sub>2</sub> y el reformado de CH<sub>4</sub> a H<sub>2</sub> [9]. Es comúnmente práctico para estos sistemas asumir que el H<sub>2</sub>, el combustible rápidamente oxidado es el único reaccionando electroquímicamente [9]. Es una fortuna que el desplazamiento de CO a H<sub>2</sub> y el reformado de CH<sub>4</sub> a H<sub>2</sub> ocurran dentro de la pila porque simplifica el análisis y predice exactamente el funcionamiento electroquímico dentro de ella [9]. Para simular las reacciones dentro de la pila, en equilibrio, se usó un reactor de Gibbs que se encuentra disponible en el menú de unidades de operación de HYSYS®. Existen tres fuentes o causas del cambio de composición de las corrientes de combustible y oxidante en la pila:

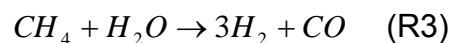
- Reacción de oxidación de hidrógeno:



- Reacción de desplazamiento de monóxido (shift)



- Reacción de reformado de metano:



Estas tres reacciones son especificadas para alcanzar el equilibrio termodinámico a la temperatura de operación y así simplificar la simulación. La reacción de desplazamiento aumenta el contenido de hidrógeno y dióxido de carbono en la corriente de combustible mientras disminuye el de agua. Puesto que esta reacción ocurre a gran velocidad se puede suponer que alcanza el equilibrio [11]. La reacción de reformado no se analizará en detalle debido a la baja concentración de metano en el gas de síntesis, pero se sabe que a la temperatura de operación el reformado está cercanamente completado [10].

#### **2.2.4 Selección De Parámetros De Entrada Para La Corriente De Aire Suministrado A La Pila De Combustible**

La corriente de aire que entra a la pila de combustible (2a), es precalentada por el gas que sale del combustor (12), éste proceso es simulado en HYSYS® usando un intercambiador de calor del menú de unidades de operación; el gas calentado se introduce en el cátodo de la pila para proporcionar oxígeno para la reacción. En el cátodo cierta cantidad de oxígeno (6) es separada y llevada al ánodo para oxidar el combustible, éste paso pretende simular los iones de oxígeno cruzando sobre la parte lateral del ánodo. El cátodo es simulado como un separador, anteriormente de este paso la corriente de aire es separada en una tee (Tee 1), la separación depende de la cantidad necesaria de oxígeno requerido por la reacción. Dentro de la pila el aire es nuevamente calentado con el calor producido por la reacción electroquímica, para este paso se utiliza un calentador disponible en el menú de operaciones de HYSYS®.

El cálculo del flujo molar de oxígeno requerido ( $n_{o_2\text{requerido}}$ ) para la oxidación (6) se hace con base en el flujo molar de H<sub>2</sub> equivalente ( $n_{H_2\text{equivalente}}$ ) del combustible y factor de utilización de combustible ( $U_f$ ) así:

$$n_{O_2\text{requerido}} = 0,5(U_f)(n_{H_2\text{equivalente}}) \quad (\text{Ec. 2.1})$$

El  $(n_{H_2\text{equivalente}})$  es el  $H_2$  equivalente contenido en el combustible fresco y se calcula:

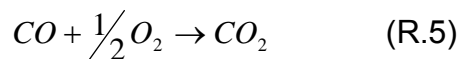
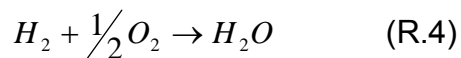
$$n_{H_2\text{equivalente}} = n_{H_2\text{entrada}} + 1 * n_{CO\text{entrada}} + 4 * n_{CH_4\text{entrada}} \quad (\text{Ec.2.2})$$

Donde  $n_{H_2\text{entrada}}$  representa el flujo molar de  $H_2$  contenido en el combustible fresco,  $1 * n_{CO\text{entrada}}$  representa el flujo molar de  $H_2$  que puede ser producido por CO contenido en el combustible fresco por la reacción de desplazamiento (R2); y  $4 * n_{CH_4\text{entrada}}$  representa el flujo molar de  $H_2$  que puede ser producido por el  $CH_4$  contenido en el combustible fresco (cada mol de  $CH_4$  puede producir 4 moles de  $H_2$ ) en la reacción (R3).

La utilización de combustible ( $U_f$ ) es definida como  $U_f = n_{H_2\text{consumida}} / n_{H_2\text{equivalente}}$ , donde  $n_{H_2\text{consumida}}$  representa el flujo molar de  $H_2$  consumida en la reacción electroquímica (R1).

### 2.2.5 Selección Del Modelo De Combustor

Los gases que salen del ánodo (8) y cátodo (10) de la pila de combustible son mezclados en el mezclador (Mix 2) para formar una sola corriente (11) que es llevada a combustión completa, este paso es simulado como un reactor de conversión donde se considera 100% conversión, el  $H_2$  y CO reaccionarán con el oxígeno según las siguientes reacciones:



## 2.2.6 Definición Del Voltaje De La Pila Y Flujo De Combustible Fresco Requerido

El cálculo del voltaje de la pila es el corazón de los modelos de pilas de combustible, el método adoptado utiliza una curva de funcionamiento obtenida por interpolación de datos experimentales operando a condiciones estándar de referencia y en donde se predice el voltaje de la pila de combustible usando correlaciones semi-empíricas. El modelo corrientemente adoptado es una curva experimental publicada en el Fuel Cell Handbook [9], la curva de referencia define el voltaje de referencia  $V_{ref}$  a las siguientes condiciones (composición del combustible de entrada: 67%  $H_2$  / 22%  $CO$  / 11%  $H_2O$ ; 85%  $U_f$  ; 25%  $U_a$  ;  $T = 1000^\circ C$  y  $P = 1$  bar). Se incorporan cuatro ecuaciones semi-empíricas para responder a los efectos de la presión, la temperatura, la densidad de corriente y la composición de combustible/aire en el voltaje real, estas son:

Parámetro	Ecuación	Referencia
Presión	$\Delta V_p (mV) = 76 * \log \frac{P}{P_{ref}}$	$P_{ref} = 1bar$
Temperatura	$\Delta V_T (mV) = 0.008 * (T - T_{ref}) (^o C) * I_c (mA / cm^2)$	$T_{ref} = 1000^\circ C$
Oxidante	$\Delta V_{catodo} (mV) = 92 * \log \frac{P_{O_2}}{(P_{O_2})_{ref}}$	$(P_{O_2})_{ref} = 0,164$
Combustible	$\Delta V_{anodo} (mV) = 172 * \log \frac{P_{H_2} / P_{H_2O}}{(P_{H_2} / P_{H_2O})_{ref}}$	$(P_{H_2} / P_{H_2O})_{ref} = 0,15$
Voltaje Real	$V(mV) = \Delta V_{ref} + \Delta V_p + \Delta V_T + \Delta V_{catodo} + \Delta V_{anodo}$	

Tabla 3. Ecuaciones empíricas para la determinación del voltaje de una SOFC.

$P$ ,  $T$ , son presión y temperatura de operación respectivamente,  $(P_{O_2})$  es la presión parcial de oxígeno en el cátodo,  $(P_{H_2} / P_{H_2O})$  es el ratio de las presiones parciales

de H<sub>2</sub> y vapor en el sistema. Cabe resaltar que las composiciones para hallar  $\Delta V_{anodo}$  y  $\Delta V_{catodo}$  son calculadas a la salida de la pila.

La potencia suministrada por la pila es el producto entre la corriente y el voltaje. Existe otra opción que es desarrollada en el presente trabajo para hallar el flujo de H<sub>2</sub> equivalente y el flujo de combustible fresco requerido por la pila:

$$n_{H_2equivalente} (mol/h) = \frac{n_{H_2consumido}}{U_f} = \left( \frac{Corriente(A)}{2U_f F(C/mol)} \right) \left( \frac{3600s}{h} \right) = \frac{0,018655 * Corriente(A)}{U_f} \quad (Ec.2.3)$$

$$n_{combustible-fresco} (mol/h) = \frac{n_{H_2equivalente} (mol/h)}{C_{H_2} + C_{CO} + 4 * C_{CH_4}} \quad (Ec.2.4)$$

Donde  $C_i$  es la composición conocida del combustible de entrada.

La potencia generada por la pila de combustible es de tipo DC por lo cual es necesario convertirlo en AC que es el utilizado por las cargas estacionarias, aplicaciones automotores y utilidades eléctricas. Se adopta en el presente trabajo una eficiencia de conversión del 95%.

La eficiencia eléctrica LHV de la pila es determinada mediante:

$$\eta = \frac{Potencia}{n_{combustible-fresco} * LHV_{combustible}} = \frac{Corriente * Voltaje}{n_{combustible-fresco} * LHV_{combustible}} \quad (Ec. 2.5)$$

### 2.2.7 Definición Del Calor Generado En La Pila De Combustible

Las pilas de combustible convierten parte de la energía química en potencia, el calor sobrante resulta en pérdidas para el sistema. Gran parte de este calor es usado para calentar la corriente de aire, este paso es simulado usando un calentador. El calor neto es hallado de la siguiente manera:

$$Q = Q1 - Q2 \quad (Ec. 2.6)$$

Donde  $Q_1$  representa el calor generado por las reacciones en el ánodo y  $Q_2$  representa el calor dado a la corriente de aire que pasa por el cátodo. Asumiendo una cierta cantidad de calor perdido  $Q_p$  (2%) se debe cumplir que:

$$Q - Q_p - W = 0 \quad (\text{Ec. 2.7})$$

### **2.2.8 Realización De Cálculos**

Para la realización de los cálculos descritos anteriormente se usó una herramienta de HYSYS® llamada spreadsheet que está disponible es el menú de operaciones lógicas, en donde se hallaron valores para el voltaje, corriente, flujo de oxígeno suplido y flujo de combustible fresco para producir la potencia deseada.

### **2.3. RESULTADOS DEL MODELAMIENTO DEL SISTEMA DE UNA PILA DE COMBUSTIBLE DE ÓXIDO SÓLIDO (SOFC) (PILA DE COMBUSTIBLE, INTERCAMBIADOR DE CALOR Y COMBUSTOR)**

El modelo se ha desarrollado para una pila de combustible de óxido sólido (SOFC) clase tubular capaz de generar 120 KW usando como combustible gas de síntesis producido por gasificación de carbón, operado a 1000°C y 1 atm; en el **Anexo D** se realiza un análisis a diferentes temperaturas de operación. El diagrama del modelo propuesto de una pila de combustible usando HYSYS®, incluyendo intercambiador de calor y combustor presentada en la figura 6.

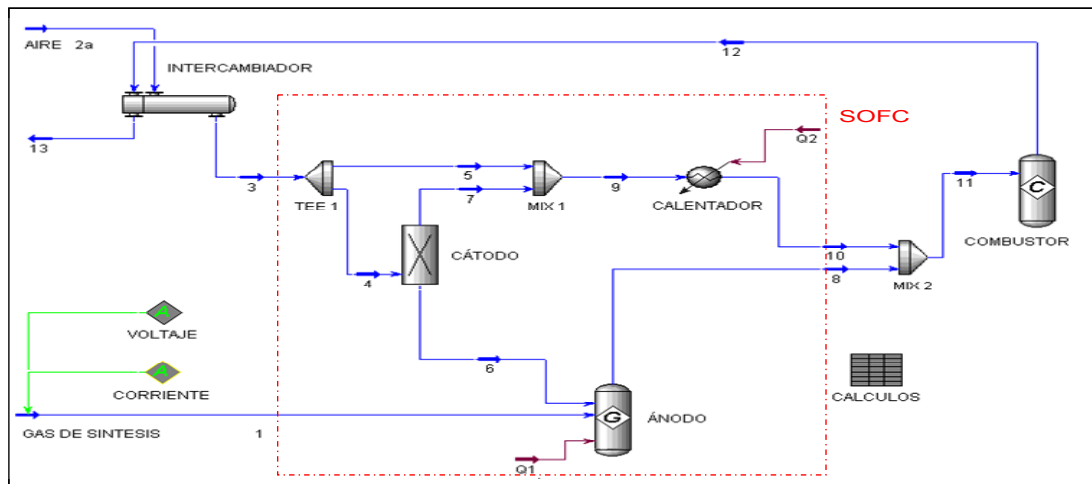


Figura 6. Diagrama del modelo de una pila de combustible usando HYSYS<sup>®</sup>, incluyendo intercambiador de calor y combustor.

A continuación se presentan una tabla con los resultados obtenidos.

Corriente	Temperatura °C	Presión Atm.	Flujo Molar Kmol/h	Composición del gas (%mol)						
				H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
1	700	1	4.635	35.8	42.3	9.6	10.5	0.3	0	1.5
2 <sup>a</sup>	450	1	43.48	-	-	-	-	-	21	79
3	753.4	1	43.48	-	-	-	-	-	21	79
4	753.4	1	7.566	-	-	-	-	-	21	79
5	753.4	1	35.92	-	-	-	-	-	21	79
6	753.4	1	1.663	-	-	-	-	-	94	6
7	753.4	1	5.903	-	-	-	-	-	0.45	99.5
8	1000	1	4.763	4.19	7.39	43.41	41.45	-	-	3.57
9	753.4	1	41.82	-	-	-	-	-	18.1	81.9
10	1000	1	41.82	-	-	-	-	-	18.1	81.9
11	1000	1	46.58	0.43	0.76	4.44	4.24	-	16.2	73.8
12	1089	1	46.31	-	-	5.22	4.69	-	15.8	74.3
13	829.1	1	46.31	-	-	5.22	4.69	-	15.8	74.3

Tabla 4. Resultados del modelamiento para la pila de combustible

### **3. SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE PILA DE COMBUSTIBLE SOFC (PILA DE COMBUSTIBLE, INTERCAMBIADOR DE CALOR Y COMBUSTOR)**

Uno de los principales beneficios de hacer este estudio usando un simulador de procesos como HYSYS® es la manera fácil y rápida de analizar la sensibilidad del sistema entendiendo los efectos de la variación en los parámetros de operación. A continuación se analizan algunos de estos parámetros con el fin de identificar la mejor condición de operación para integrar la pila de combustible con una turbina de gas.

#### **3.1 EFECTO DE LA UTILIZACIÓN DEL FACTOR $U_f$**

El factor de utilización de combustible  $U_f$  es el grado de aprovechamiento de combustible y uno de los principales parámetros de operación para las pilas de combustible y tiene efectos significativos en el voltaje y la eficiencia de la pila, la figura 7 muestra el efecto de la utilización de combustible en el voltaje, eficiencia, densidad de corriente y flujo de combustible fresco necesario para una generación constante de 120kW (DC) en la pila.

Cuando  $U_f$  es incrementado desde 0,6 hasta 0,95 el voltaje de la pila decrece, debido a que el  $H_2$  aportado por el gas se reduce y las pérdidas en el ánodo se incrementan; la densidad de corriente aumenta debido al incremento en el flujo de aire, resultando en mayor cantidad de  $H_2$  consumido (Ec.2.3 ).

Se nota claramente que a valores de  $U_f$  menores de 0.85 el requerimiento de combustible fresco decrece cuando  $U_f$  aumenta, en esta región el cambio de voltaje en la pila es insignificante; para valores de  $U_f$  mayores a 0.85 el voltaje sufre un cambio significativo debido a que las pérdidas por concentración llegan a ser más importantes que el incremento en la utilización de combustible lo cual se

ve reflejado con el incremento en la densidad de corriente (cambio de pendiente), como consecuencia se requiere mayor cantidad de combustible fresco.

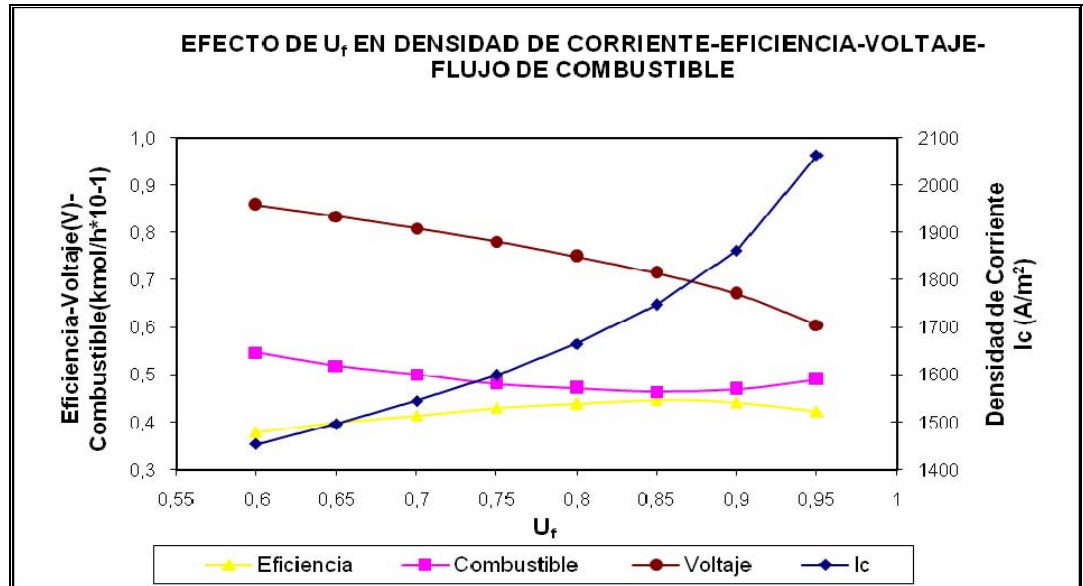


Figura 7. Efecto de  $U_f$  en eficiencia, voltaje, combustible fresco y densidad de corriente (potencia constante 120 kW DC)

A medida que el valor de  $U_f$  crece la eficiencia de la pila aumenta debido a que el combustible fresco requerido es menor y alcanza su valor máximo de 44.7% en un valor de  $U_f$  de 0.85, punto donde se requiere el mínimo de combustible.

El factor de utilización de combustible juega un papel importante en la composición del gas de salida del ánodo si se considera la captura de  $CO_2$  en el sistema.

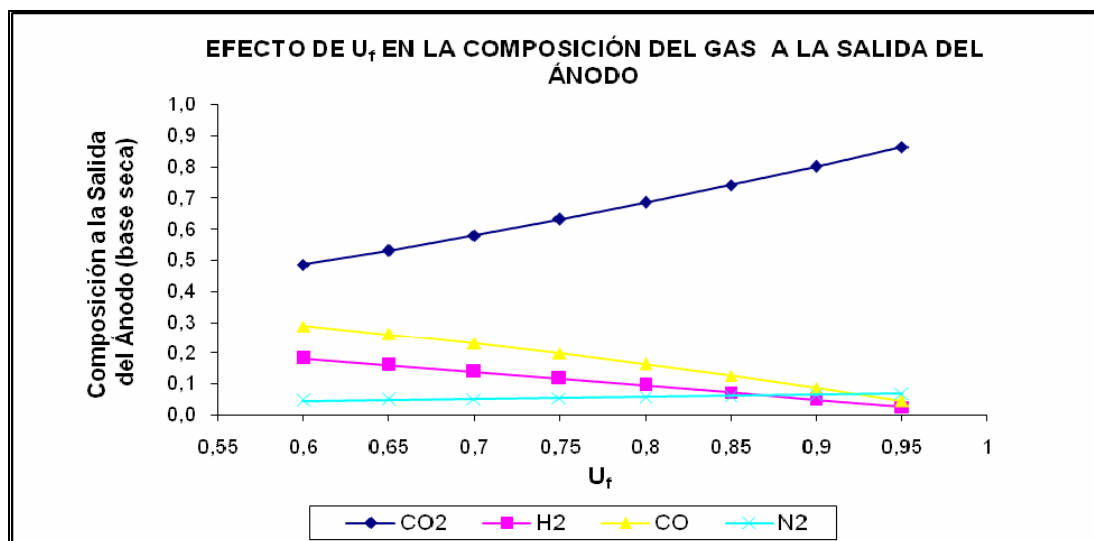


Figura 8. Efecto de  $U_f$  en la composición del gas de salida del ánodo (base seca).

La figura 8 muestra que la composición de  $H_2$  y  $CO$  decrece al aumentar  $U_f$ , por que la cantidad de combustible que entra a la pila es menor y por ende hay menos cantidad de gases expulsados sin reaccionar, por otro lado la composición de  $CO_2$  en la salida del ánodo, aumenta cuando  $U_f$  es incrementado, ya que el combustible es más reducido (menos  $CO$  y  $H_2$ ). Cuando  $U_f$  alcanza el valor de 0.95, la concentración de  $CO_2$  es de 86%(base seca), comparado con 74%(base seca) cuando  $U_f$  es 0.85, lo que significa que cuando se presenta la máxima eficiencia la composición de  $CO_2$  es significativa para un posible proceso de captura.

### 3.2 EFECTO DE LA DENSIDAD DE CORRIENTE IC

La figura 9 muestra el efecto de la variación de la densidad de corriente en el voltaje, eficiencia, potencia, flujos de entrada de combustible y aire, cuando se mantiene constante el valor de  $U_f$  en 0.85.

El voltaje decrece moderadamente cuando la densidad de corriente aumenta durante el incremento de las pérdidas. La eficiencia es proporcional a  $V_c \cdot U_f$ , y decrece moderadamente con el cambio de densidad de corriente.

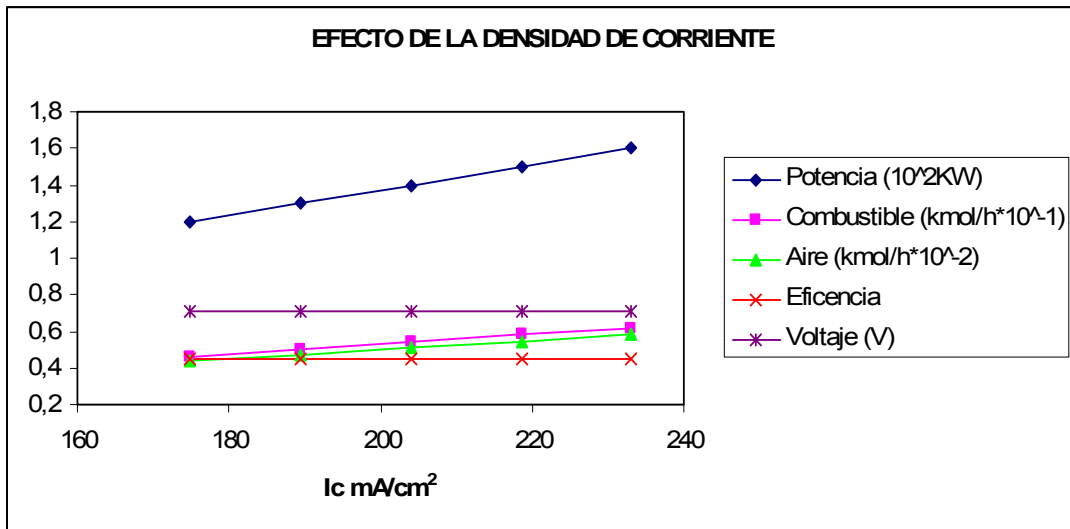


Figura 9. Efecto de la densidad de corriente en la potencia, eficiencia, voltaje, combustible fresco y aire requerido. ( $U_f$  constante 0.85).

El flujo de combustible fresco necesitado se incrementa con el aumento de la densidad de corriente. El incremento en la densidad de corriente requiere mayor cantidad de flujo de aire para proporcionar más oxígeno, además la eficiencia decrece resultando en más energía química sin convertir la cual es transformada en calor, por ende se requiere aumentar el flujo de aire para refrigerar la pila y mantenerla a temperatura estable, por esto es necesario aumentar el flujo de aire al aumentar  $I_c$ . La operación a baja densidades produce mayor eficiencia pero produce menos potencia lo que se traduciría en mayores costos de capital (más celdas) para producir el mismo nivel de potencia.

El incremento de la potencia puede ser realizado por un incremento en la corriente y/o en el voltaje, cuando  $U_f$  es tomado constante, un incremento en la densidad de corriente desde 170 hasta 230 mA/cm<sup>2</sup> puede incrementar la potencia de salida a pesar del decrecimiento del voltaje y de la eficiencia de la pila, el incremento de la densidad de corriente se puede llevar a cabo incrementando el flujo de aire y combustible a la entrada; si la densidad de corriente se desea constante un

aumento del voltaje aumentará la potencia entregada, esto puede ser realizado por un decrecimiento en el factor de utilización de combustible,  $U_f$ .

Este método tiene capacidad limitada ajustando la potencia de salida porque el incremento de voltaje es limitado como se ve en la figura 9, si el voltaje y la eficiencia de la pila son constantes un incremento en la potencia de salida puede ser efectuado por un aumento en la densidad de corriente y una disminución en  $U_f$ , como resultado los flujos de aire y combustible de entrada deben aumentar para producir mayor potencia, en resumen una variación del flujo de entrada de aire y combustible, y el porcentaje de utilización de combustible es el principal método para ajustar la potencia deseada.

### 3.3 EFECTO DE LA PRESIÓN DE OPERACIÓN

Cuando la presión oscila entre 1 y 5 atm en una pila funcionando con gas rico en hidrógeno a una temperatura de  $1000^{\circ}\text{C}$ , se observa que un aumento de presión en un mismo factor de utilización de combustible lleva asociado un incremento de voltaje, siendo este aumento mayor para el salto de 1 a 3 atm que de 3 a 5 atm, como se aprecia en la figura 10.

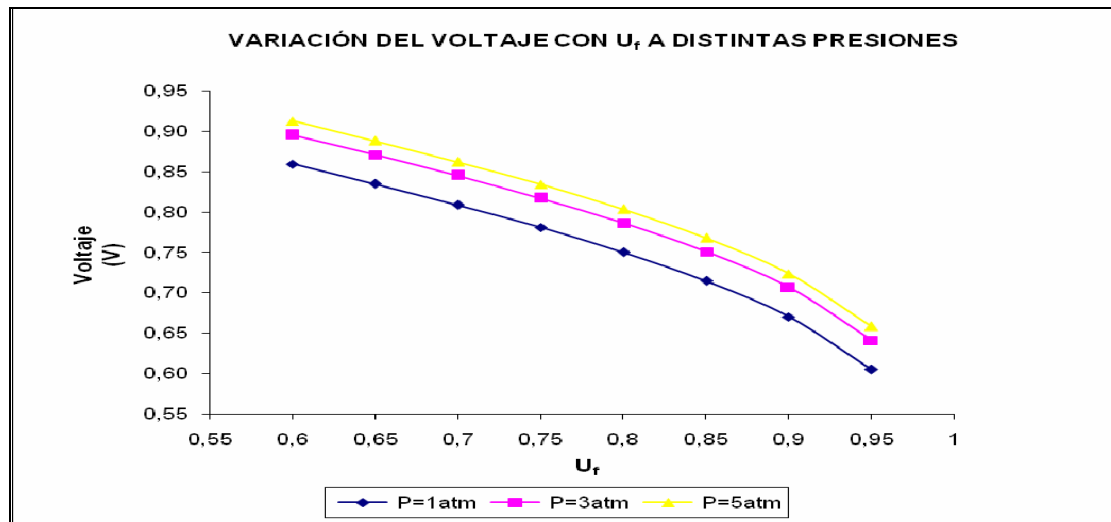


Figura 10. Variación del voltaje con  $U_f$  a distintas presiones ( $T=1000^{\circ}\text{C}$ ).

Cuando aumenta la presión lo hace también el voltaje, si se mantiene la densidad de corriente constante la potencia generada por la pila aumentará con un incremento en el valor de la presión.

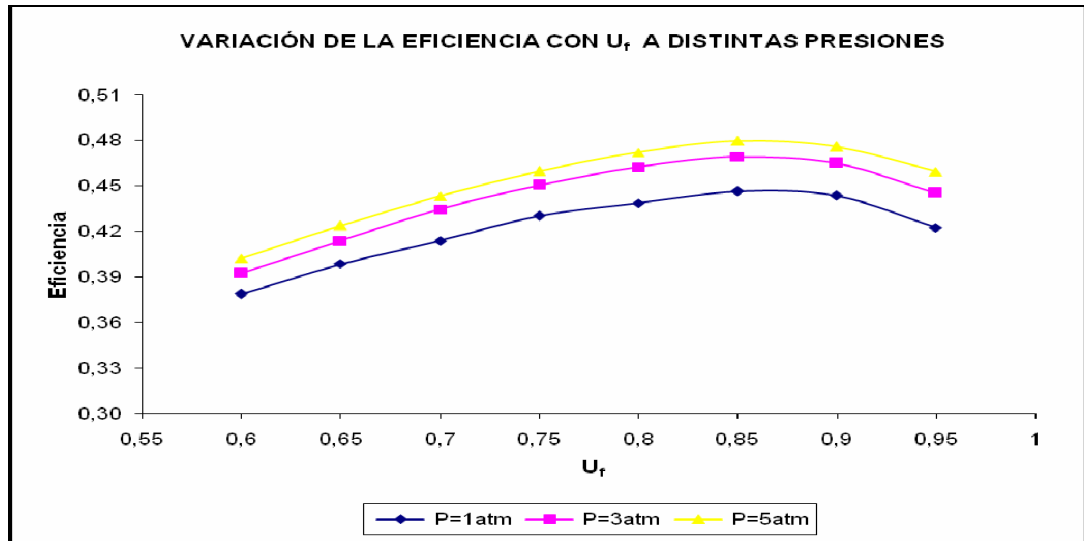


Figura 11. Variación de la eficiencia con  $U_f$  a distintas presiones ( $T=1000^{\circ}\text{C}$ )

La figura 11 muestra que para el mismo consumo de combustible el valor de la eficiencia es más alto, debido a que el aumento de presión hace que el voltaje crezca siendo mayor la potencia generada.

#### 4. MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA HIBRIDO (PILA DE COMBUSTIBLE, INTERCAMBIADOR DE CALOR, COMBUSTOR, TURBINA DE GAS Y COMPRESOR)

La integración de la pila de combustible con una turbina de gas se simuló en HYSYS® tomando como parámetros de operación una temperatura de 1000°C, porcentaje de utilización de combustible  $U_f$  de 0.85, y presión de 5 atmósferas.

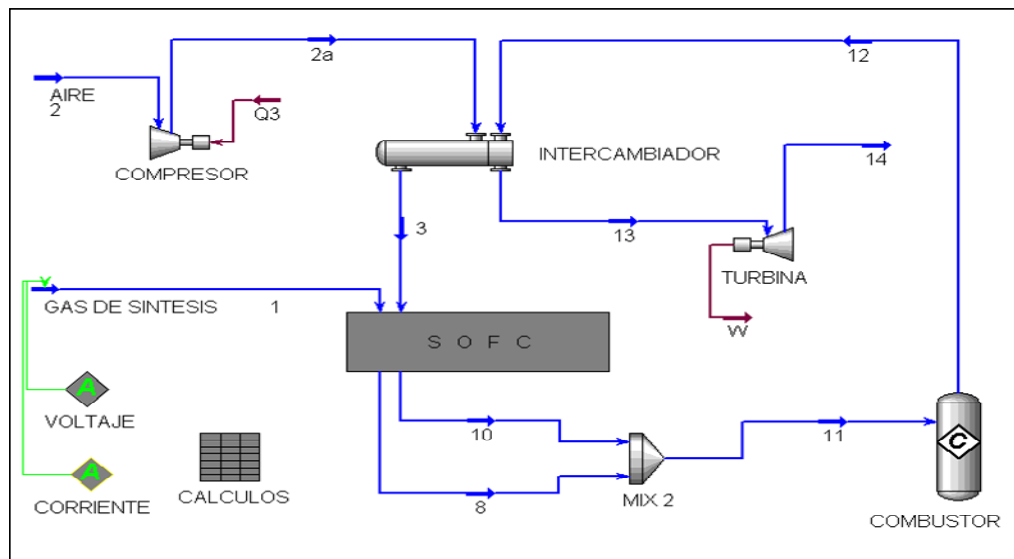


Figura 12. Diagrama del modelo del sistema pila de combustible-turbina de gas usando HYSYS®

El aire de entrada (2) ingresa a un compresor donde se comprime hasta 5 atmósferas (2a), luego ingresa al intercambiador de calor donde es precalentado y continúa su paso hacia el cátodo de la pila de combustible, el gas de síntesis que es el combustible del proceso (1) entra al ánodo de la pila. El proceso al interior de la pila de combustible (SOFC) es el descrito en la sección 2.1.

La corriente (13) luego de su salida del intercambiador es llevada a una turbina donde sufre una expansión hasta presión atmosférica. El trabajo  $W_{turbina}$  realizado se determina:

$$W_{turbina} = W - Q3 \quad (\text{Ec.4.1})$$

Donde  $W$  es el trabajo de expansión realizado por la turbina y  $Q_3$  es el trabajo necesitado por el compresor para llevar el aire hasta la presión de trabajo.

La eficiencia LHV global del sistema se determina:

$$\eta_{sistema} = \frac{Potencia_{sistema}}{n_{combustible-fresco} * LHV_{combustible}} = \frac{W_{pila} + W_{turbina}}{n_{combustible-fresco} * LHV_{combustible}} \quad (Ec.4.2)$$

Donde  $W_{pila}$  es la potencia suministrada por la pila y es igual a:

$$W_{pila} = I * Vc \quad (Ec.4.3)$$

Los resultados del modelamiento para el sistema híbrido presentado en la figura 12 se listan en la tabla 5.

Corriente	Temperatura °C	Presión Atm.	Flujo Molar Kmol/h	Composición del gas (%mol)						
				H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
1	700	1	4.316	35.8	42.3	9.6	10.5	0.3	-	1.5
2	130	5	40.49	-	-	-	-	-	21	79
2 <sup>a</sup>	404.4	5	40.49	-	-	-	-	-	21	79
3	783.2	5	40.49	-	-	-	-	-	21	79
8	1000	5	4.435	4.19	7.39	43.41	41.45	-	-	3.57
10	1000	5	38.94	-	-	-	-	-	18.1	81.9
11	1000	5	43.38	0.43	0.76	4.44	4.24	-	16.25	73.89
12	1089	5	43.12	-	-	5.22	4.69	-	15.75	74.33
13	763	5	43.12	-	-	5.22	4.69	-	15.75	74.33
14	475.6	1	43.12	-	-	5.22	4.69	-	15.75	74.33

Tabla 5. Resultados de la simulación para el sistema pila de combustible-turbina de gas

Partiendo de los resultados obtenidos para el sistema híbrido, y bajo las condiciones de operación determinadas anteriormente, se compara el rendimiento del sistema híbrido con el sistema de la pila de combustible para establecer que

tan eficiente es la integración de la turbina de gas en la generación de energía eléctrica para el sistema planteado.

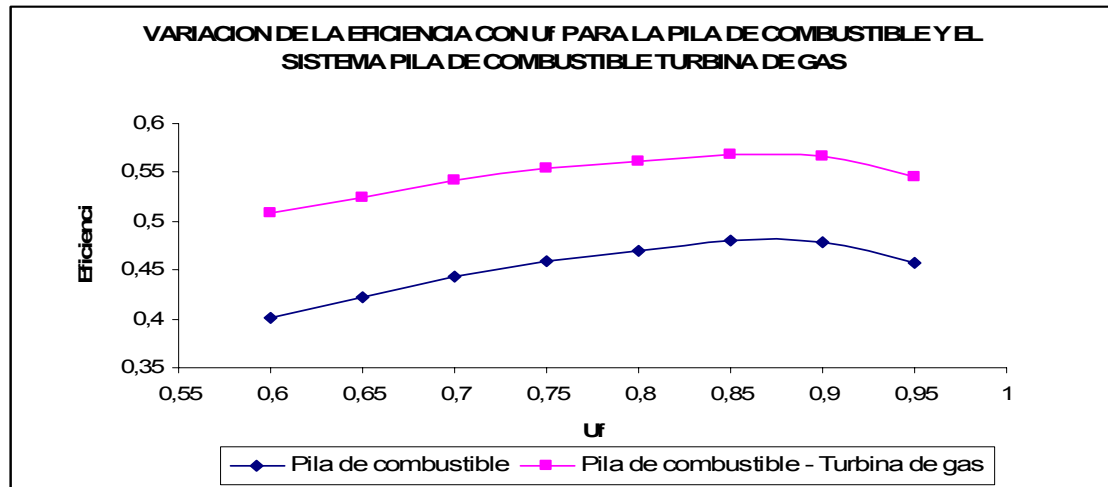


Figura 13. Variación de la eficiencia para la pila de combustible y el sistema pila de combustible-turbina de gas

La figura 13 muestra claramente que la integración de la turbina de gas al sistema de la pila de combustible aumenta la eficiencia en la producción de energía eléctrica en cerca de 10%. El punto donde se presentan mayores eficiencias para ambos casos es cuando el porcentaje de utilización de combustible es 0.85 con valores máximos de 48% para la pila de combustible y de 56.8% para el sistema integrado. De análisis anteriores se muestra que en este punto se utiliza la menor cantidad de combustible fresco.

En el **Anexo E** se desarrolla el modelamiento y simulación para un sistema capaz de producir 12MW de energía eléctrica lo cual indica que el sistema puede ser escalado para generaciones de energía eléctrica más altas.

## 5. CONCLUSIONES

- ❖ El estudio realizado muestra que la integración de una turbina de gas al sistema de la pila de combustible de óxido sólido usando como combustible un gas rico en hidrógeno producido por gasificación de carbón logra una eficiencia máxima del 56.8% (LHV), aumentando en cerca del 10% la eficiencia del sistema de la pila de combustible operando sola, y que este sistema híbrido logra eficiencias más altas que los sistemas de generación de energía tradicionales a partir de carbón.
- ❖ El sistema híbrido propuesto para la generación de energía eléctrica pila de combustible – turbina de gas alimentado con gas rico en hidrógeno producido por gasificación de carbón puede ser una alternativa muy interesante para el futuro desarrollo energético del país.
- ❖ La composición de la corriente de gases a la salida de la pila de combustible muestra que los únicos productos emitidos son agua y dióxido de carbono, el cual está presente en una alta concentración brindando la posibilidad de capturarlo para evitar liberarlo a la atmósfera, lo que muestra que la tecnología es amigable con el medio ambiente.
- ❖ El sistema planteado logra producir 150 kW de energía eléctrica, la pila de combustible genera 115 kW que representa un aporte del 77% y la turbina de gas genera 35 kW contribuyendo con el 23% restante en la generación eléctrica del sistema.
- ❖ El modelo desarrollado permite fácilmente un escalamiento a niveles más altos de generación de energía eléctrica.

- ❖ El estudio de sensibilidad mostró que un incremento en la presión de operación manteniendo la temperatura constante y un mismo flujo de combustible fresco representa un cambio positivo en la eficiencia de la pila de combustible.
- ❖ Los resultados de la simulación muestran que las condiciones de operación que alcanzan la mayor eficiencia del modelo de pila de combustible estudiado se presentan trabajando a una temperatura de 1000°C, presión de 5 atm y un factor de utilización  $U_f$  de 0.85.
- ❖ Un incremento exagerado en la densidad de corriente en la pila hace que las pérdidas por concentración tengan mayor efecto en el decrecimiento del voltaje que el mismo factor de utilización de combustible  $U_f$ ; siendo este el principal método para ajustar la potencia deseada.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- [1].L. Magistri, R. Bozzo, P. Costamagna, A. Massardo; Simplified Versus Detailed Solid Oxide Fuel Cell Reactor Models and Influence on the simulation of the Design Point Performance of Hybrid System; Journal Engineering for Gas Turbine and Power, July 2004, vol 26, 516-523. )
- [2].P. Costamagna, L. Magisti, A. Massardo; Design and part-load performance of a hybrid system based on a solid oxide fuel cell reactor and micro gas turbine; Journal of Power Sources 96 (2001) 352-368.
- [3].S. Kimijima, N. Kasagi; Performance Evaluation of Gas Turbine-Fuel Cell Hybrid Micro Generation System; GT-2002-30111, Proceedings of ASME TURBO EXPO 2002, June 2002, Amsterdam, The Netherlands.
- [4].L. Magistri, R. Bozzo, P. Costamagna, A. Massardo; Simplified Versus Detailed Solid Oxide Fuel Cell Reactor Models and Influence on the simulation of the Design Point Performance of Hybrid System; Journal Engineering for Gas Turbine and Power, July 2004, vol 26, 516-523.
- [5].A.F. Massardo, F. Lubelli; Internal Reforming Solid Oxide Fuel Cell-Gas Turbine Combined Cycles (IRSOFC-GT). Part a Cell Model and Cycle Thermodynamic Analysis; Journal of Engineering for Gas Turbine and Power, January 2000, vol 122 , 27-35
- [6].L. Magistri, R. Bozzo, P. Costamagna, A. Massardo; Simplified Versus Detailed Solid Oxide Fuel Cell Reactor Models and Influence on the simulation of the Design Point Performance of Hybrid System; Journal Engineering for Gas Turbine and Power, July 2004, vol 26, 516-523.
- [7].P. Costamagna, L. Magisti, A. Massardo; Design and part-load performance of a hybrid system based on a solid oxide fuel cell reactor and micro gas turbine; Journal of Power Sources 96 (2001) 352-368.
- [8].S. H. Chan, H. K. Ko, Y. Tian ; Multi-level modelingof SOFC-gas turbine system ; International Journal of Hydrogen Energy 28, (2003) 889-900.

- [9]. Fuel Cell Handbook. 7<sup>th</sup> ed. EG&G Services Parsons, Inc. Science Applications International Corporation.
- [10]. ZHANG, Wei. Simulation of Solid Oxide Fuel Cell-Based Power Generation Processes with CO<sub>2</sub> Capture. Department of Chemical Engineering, University of Waterloo.
- [11]. SANCHEZ, David. Aportación al Análisis de Pilas de Combustible de Oxido Sólido (SOFC) para Integración en Sistemas Híbridos Pila de Combustible-Turbina de Gas. Universidad de Sevilla. 2005.
- [12]. CARO, William; RUEDA, Julio. Modelamiento y Simulación de un Gasificador de Carbón para la Obtención de Hidrógeno. Tesis de grado, Universidad Industrial de Santander. 2007

## 7. ANEXOS

### ANEXO A. BASES TERMODINAMICAS

La eficiencia de la pila de combustible, a diferencia de los motores de combustión, no se limita por el *Ciclo de Carnot*, ya que no se rige por un ciclo termodinámico al convertir la energía química en energía eléctrica directamente.

Bajo condiciones ideales la eficiencia se define como:

$$\eta = \frac{\text{Energía Útil}}{\Delta H} \quad (\text{Ec. 1})$$

Puesto que en régimen estacionario estos sistemas funcionan en condiciones de temperatura y presión constantes, mientras no se cambie la carga, el máximo trabajo útil que se puede obtener viene dado por el cambio en la energía libre de Gibbs, la cual se define como:

$$dG = dH - d(T \cdot S) \quad (\text{Ec. 2})$$

Siguiendo la primera ley de la termodinámica:

$$dH = \delta Q - \delta W_{\text{elect}} \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde los términos de energía potencial y cinética se omiten por insignificantes y el trabajo es el trabajo eléctrico, y teniendo en cuenta las siguientes hipótesis:

- La temperatura y la presión en el proceso son constantes.

$$vdp = 0 \quad SdT = 0 \quad (\text{Ec. 4})$$

- El calor aportado al proceso, bajo condiciones de reversibilidad esta dado por:

$$\delta Q = TdS \quad (\text{Ec. 5})$$

Se tiene que:

$$dG = dH - TdS = -\delta W_{\text{elect}} \quad (\text{Ec. 6})$$

Este trabajo ( $W_{\text{elect}}$ ) hace referencia al trabajo generado en el transporte de las cargas eléctricas desde el ánodo hasta el cátodo.

$$\delta W_{\text{elect}} = n_e \cdot e \cdot (V_c - V_a) \quad (\text{Ec. 7})$$

Calculando la carga de un mol de electrones (constante de Faraday), multiplicando e por el número de Avogadro N ( $F = e \cdot N$ ), y estableciendo E como la fuerza electromotriz de la pila ( $V_c - V_a$ ) se obtiene:

$$dG = -n_e \cdot F \cdot E \quad (\text{Ec. 8})$$

donde  $n_e$  hace referencia al número de electrones involucrados en la reacción.

De esta manera la eficiencia termodinámica ideal del proceso se define como:

$$\eta = \frac{W_{\text{elect}}}{\Delta H} = \frac{\Delta G}{\Delta H} = 1 - \frac{T\Delta S}{\Delta H} \quad (\text{E. 9})$$

Las pérdidas ejercidas por el sobrepotencial del electrodo y por la resistencia del electrolito, se pueden estimar por una eficiencia denominada *eficiencia electroquímica*, la cual compara la caída en la tensión de operación de la pila respecto al potencial teórico o de Nernst:

$$\eta = \frac{V_{\text{celda}}}{E} \quad (\text{Ec. 10})$$

$$\text{Con } E = E_0 + \frac{RT}{2F} \times \ln \left( \frac{\prod f_{\text{reactivos}}}{\prod f_{\text{productos}}} \right) \quad (\text{Ec. 11})$$

Donde  $E_0$  es el potencial estándar,  $R$  la constante de los gases,  $T$  la temperatura absoluta y  $F$  la constante de Faraday.

Además de estas eficiencias, podemos hablar de un rendimiento total, en el cual se contemplan estos dos tipos de efectos y se añade el del combustible empleado.

$$\eta = \frac{W}{m_{\text{fuel}} \cdot \text{LHV}_{\text{fuel}}} = \frac{i \cdot V}{m_{\text{fuel}} \cdot \text{LHV}_{\text{fuel}}} \quad (\text{Ec. 12})$$

## ANEXO B. TIPOS DE PILAS DE COMBUSTIBLE Y SUS PRINCIPALES CARACTERISTICAS

Tipo	Electrolito	Temperatura	Combustible	Aplicaciones	Ventajas	Desventajas	Eficiencia Eléctrica
Poliméricas (PEM)	Polímero sólido de ácido sulfúrico fluorado	80°C	H <sub>2</sub>	Transporte Equipos portátiles Electricidad	Baja temperatura. Arranque rápido. Electrolito sólido (reduce corrosión, fugas, etc.)	Altas cantidades de catalizadores caros (Pt) y H <sub>2</sub> puro.	40-50%
Alcalinas (AFC)	KOH (ac)	90-100 °C	H <sub>2</sub>	Militares Espaciales	Mejores prestaciones de corriente debido a su rápida reacción catódica.	Requiere eliminar el CO <sub>2</sub> del aire y del combustible.	55-65%
Ácido Fosfórico (PAFC)	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	200 °C	Gas natural o metano reformado	Energía estacionaria	Eficiencia de hasta un 85% (con cogeneración de calor y electricidad). Posibilidad de usar H <sub>2</sub> impuro como combustible.	Catalizador de Pt. Corriente y potencia bajas. Peso y tamaño elevados.	37-42%
Carbonatos Fundidos (MCFC)	Carbonatos Li, Na, K	600-1000 °C	H <sub>2</sub>	Electricidad	Metales no nobles como catalizadores. Conversión interna. Flexibilidad en el uso de combustibles.	Las altas temperaturas aumentan la corrosión y ruptura de componentes	50-60%
Óxido Sólido (SOFC)	(Zr,Y)O <sub>2</sub>	800-1000 °C	H <sub>2</sub>	Electricidad Sistemas híbridos de pila de combustible y máquina térmica	Mayor eficiencia. Catalizadores mas baratos. Flexibilidad en el uso de combustible. El electrolito sólido reduce corrosión, fugas, etc.	Las altas temperaturas facilitan la ruptura de componentes (sellos...)	45-55%

## ANEXO C. EFECTO DEL CO<sub>2</sub> EN EL AMBIENTE Y MECANISMOS DE CAPTURA

El dióxido de carbono es un gas efecto invernadero que contribuye al cambio climático, el cual ha sido motivo de preocupación en varios espacios de discusión internacionales por sus repercusiones negativas en todo el planeta. Entre ellas se cuentan el aumento del nivel de los océanos, los eventos climáticos extremos, la escasez de agua, la alteración de la producción de alimentos, la afectación de la vida silvestre y los ecosistemas, el daño a la infraestructura y a los asentamientos humanos, y la dispersión de enfermedades.

La captura y almacenamiento de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) es un proceso que consiste en separar dicho compuesto de fuentes industriales y energéticas, transportarlo a una localización en la que será almacenado, y aislarlo a largo plazo.

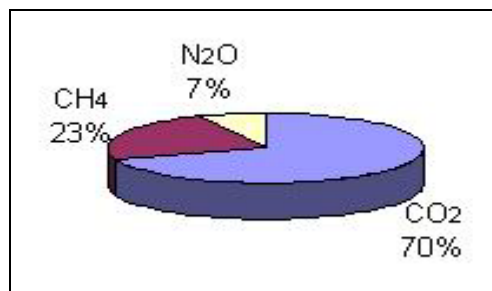


Figura 1. Contribución Porcentual de los Gases de Efecto Invernadero en el siglo XX

Fuente: McKenzie 2001.

Colombia, a pesar de ser uno de los países que no cuenta con compromisos de reducción de emisiones en el primer período de cumplimiento (2008-2012), le ha dado alta prioridad al problema del cambio climático. El país reconoce la oportunidad que el Protocolo ofrece para fortalecer los lazos de cooperación e

integración con la comunidad internacional y para contribuir al desarrollo sostenible.

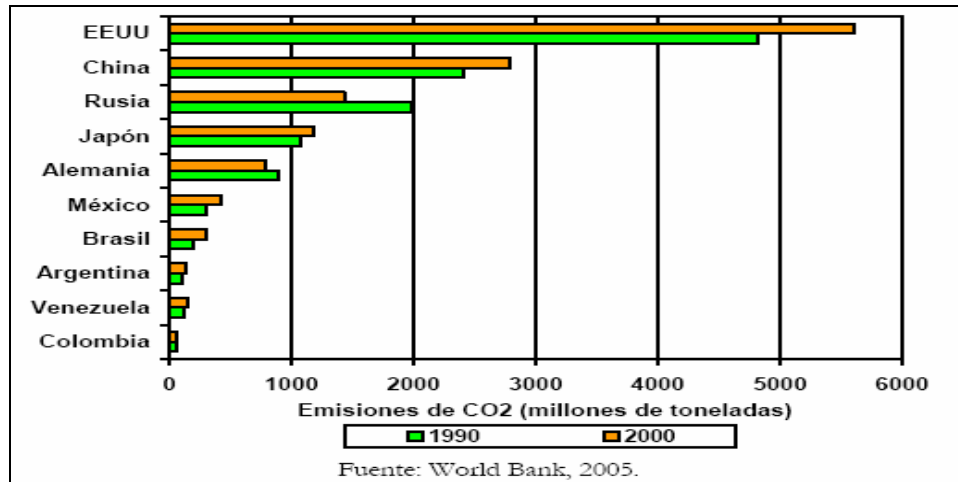


Figura 2. Participación de Colombia en el volumen mundial de emisiones de CO<sub>2</sub>

Por ello, el Gobierno Nacional ha destinado los recursos y ha ejecutado las acciones para participar activamente, con un portafolio de proyectos, en el mercado de reducción de emisiones entre los países industrializados y los países en vía de desarrollo, conocido como Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL).

Una de las estrategias para evitar el efecto invernadero se refiere a la captura de CO<sub>2</sub>, dentro de las tecnologías se encuentran:

- Post-combustión: se considera como un primer paso para la captura a gran escala del CO<sub>2</sub>. Éste se extrae del flujo de gases de escape después de la combustión. Esta tecnología se puede aplicar a las instalaciones existentes.
- Pre-combustión: por la conversión del gas natural en hidrógeno y CO<sub>2</sub> (descarbonización). El CO<sub>2</sub> se comprime para su almacenamiento y el hidrógeno se mezcla con aire para la combustión, por lo que se emite sólo nitrógeno y agua.

- Oxyfuel: el oxígeno se separa del aire y después se quema con los hidrocarburos, lo que produce unos gases de escape con alta concentración de CO<sub>2</sub>.

Algunos Mecanismos geológicos de almacenamiento son:

- Almacenamiento geológico: algunas opciones proporcionan energía adicional.
- Almacenamiento en formaciones salinas.
- Desplazamiento del metano en vetas de carbón.
- Almacenamiento en yacimientos agotados de gas o petróleo.
- Desplazamiento del petróleo.
- Almacenamiento oceánico.
- Inyección y disolución del CO<sub>2</sub> en la columna de agua (normalmente por debajo de los 1.000 m) por medio de un gasoducto o utilizando barcos.
- Deposición del CO<sub>2</sub>, por medio de gasoductos fijos o plataformas, en el fondo de los océanos a profundidades superiores a los 3.000 m, donde el CO<sub>2</sub> es más denso que el agua y se supone formaría un *lago* que podría retrasar su disolución en el medio que lo rodea.

En Colombia existen aproximadamente 100 proyectos de MDL de los cuales 11 son de reforestación, ya que cerca del 30 por ciento de los bosques de Latinoamérica se consideran responsables por la captura natural de dióxido de carbono.

## ANEXO D. EFECTOS DE LA TEMPERATURA EN LA CELDA DE COMBUSTIBLE DE ÓXIDO SÓLIDO (SOFC)

Las pilas de combustible de óxido sólido se caracterizan por trabajar a altas temperaturas, próximas a los 1000°C, propiedad más interesante ya que se genera una corriente de gases de escape de gran contenido energético susceptible de ser aprovechada por una maquina térmica.

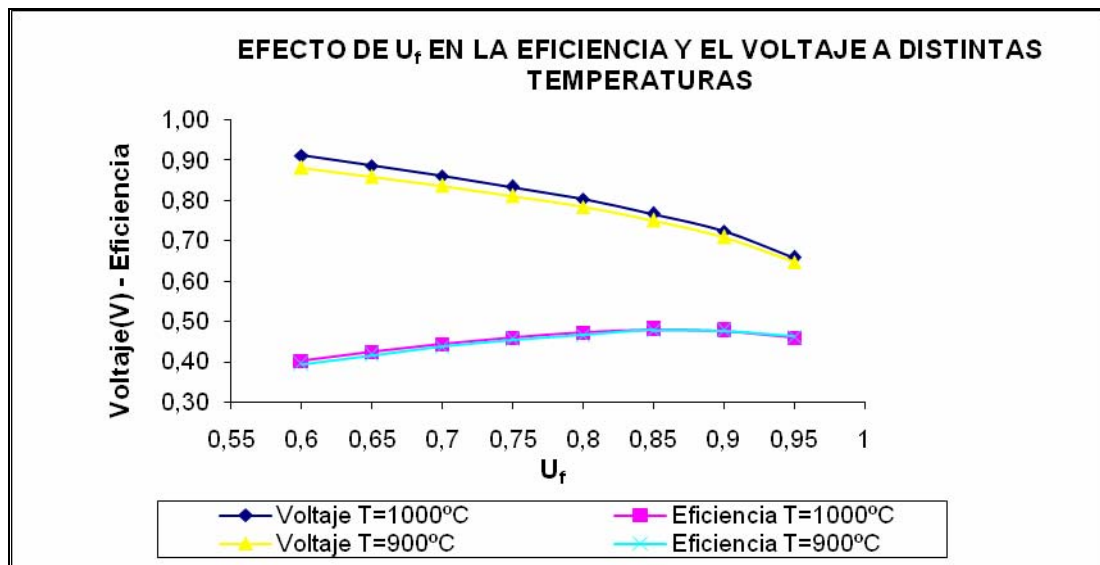


Figura 1. Efecto de  $U_f$  en la Eficiencia y el Voltaje a distintas temperaturas

Como se observa en la figura un aumento en la temperatura, hace que el voltaje de la pila crezca. A valores de voltaje cercanos a 0,75 y a bajas temperaturas, la curva se acerca a una isoterma, lo que quiere decir que el efecto de la temperatura de operación es muy bajo, cuando la temperatura aumenta a valores de voltaje más altos se hace mayor la influencia de este parámetro de operación, ya que un pequeño incremento en la tensión representara más potencia generada por la pila para una misma densidad de corriente.

De igual forma se observa que a mayor temperatura, el rendimiento de la pila aumenta, puesto que cuando incrementa la potencia a densidad constante, el rendimiento también lo hace, ya que el gasto energético del combustible es mejor.

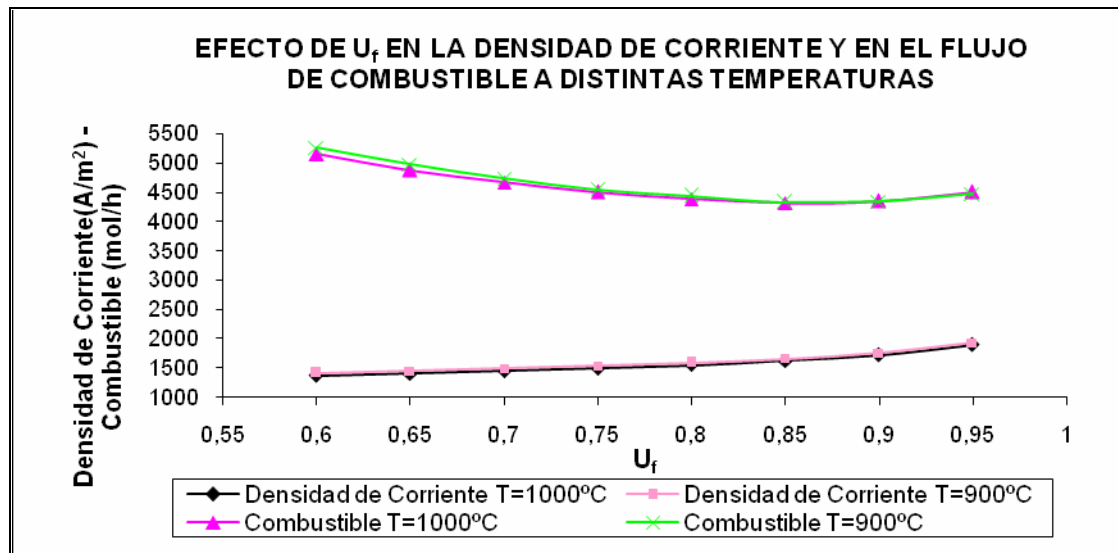


Figura 2. Efecto de  $U_f$  en la Densidad de Corriente y en el flujo de Combustible a distintas temperaturas

A medida que hay un incremento de la temperatura, la densidad de corriente disminuye y por ende el flujo de combustible requerido, generando un mejor rendimiento de la pila de combustible, para una misma generación de potencia.

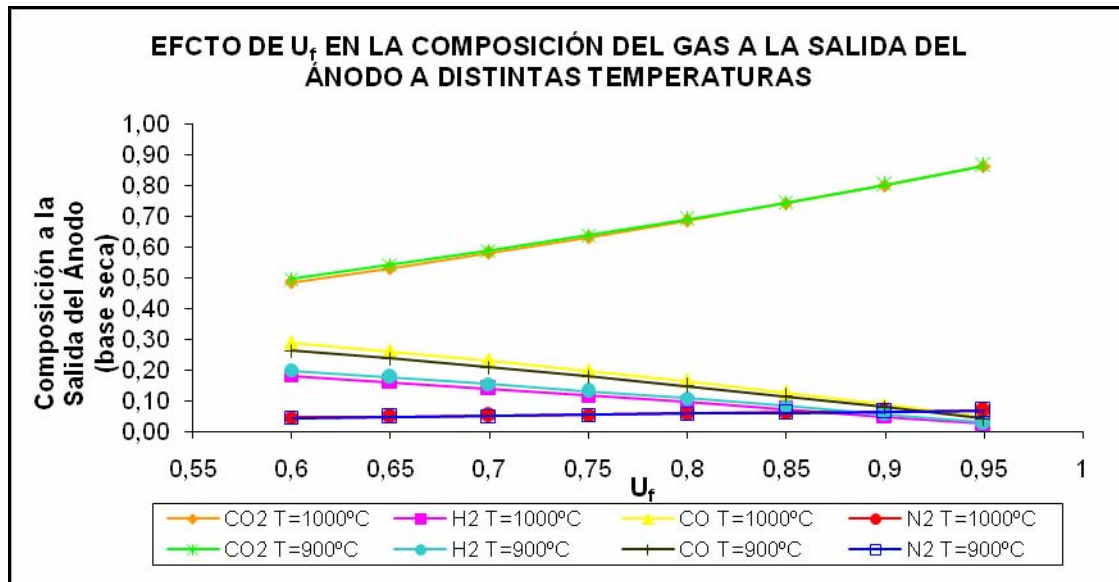


Figura 3. Efecto de  $U_f$  en la Composición del Gas a la Salida del Anodo a distintas temperaturas

A un mismo valor de  $U_f$  se puede observar que a menor temperatura la fracción de  $H_2$  y  $CO$  es mayor a la salida del ánodo, por cuanto menos combustible está siendo aprovechado, menos eficiente es la pila, ya que hay mayor cantidad de gases sin reaccionar lo que explica que la fracción de  $CO_2$  sea relativamente mayor.

Este comportamiento explica porqué es mejor trabajar a temperaturas altas ( $1000^\circ C$ ) en este tipo de pilas cerámicas.

## ANEXO E. MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN PARA EL SISTEMA PILA DE COMBUSTIBLE (SOFC)-TURBINA DE GAS PARA LA GENERACIÓN DE 12 MW DE POTENCIA.

La tecnología de SOFC ha demostrado su potencial para producir energía a altas eficiencias, con niveles muy bajos de emisiones.

El modelamiento de este sistema se realizó de la misma forma que para la obtención de 120 kW de potencia en un sistema integrado pila de combustible-turbina de gas (capítulo 4).

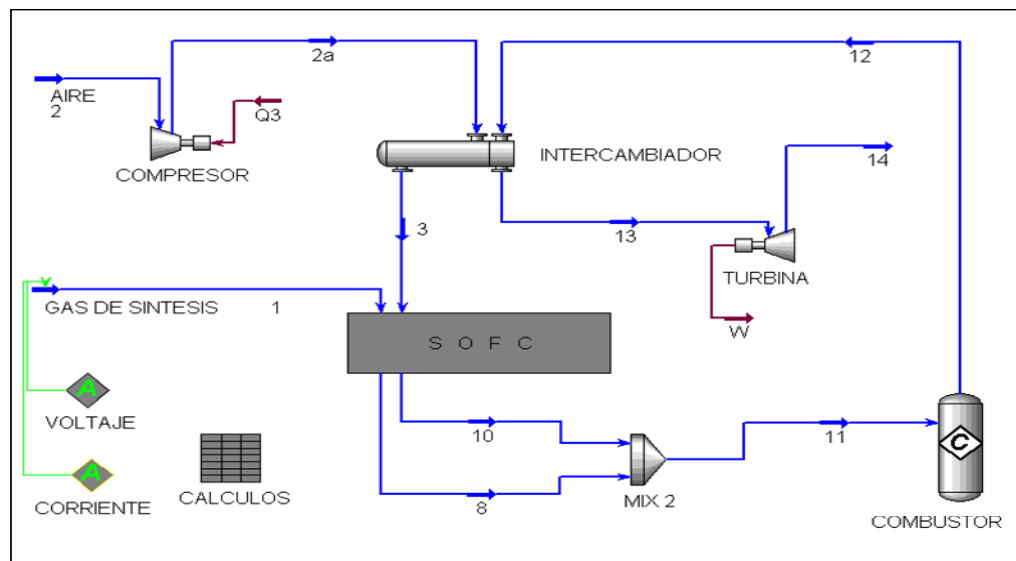


Figura 1. Modelo Sistema Presurizado Pila de Combustible SOFC-turbina de gas para la obtención de 12MW de potencia

Para simular dicho modelo en HYSYS<sup>®</sup> se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros de operación.

<b>Parámetros</b>	
Presión de operación de la pila	5 atm
Temperatura de operación de la pila	1000°C
Factor de Utilización del Combustible $U_f$	0.85
Composición del gas de entrada	CH <sub>4</sub> 0.3%, H <sub>2</sub> 35.8%, CO 42.3%, CO <sub>2</sub> 9.6%, H <sub>2</sub> O 10.5%, N <sub>2</sub> 1.5%
Temperatura de entrada del gas a la turbina	1000°C
Presión de entrada del aire al compresor	1 atm
Eficiencia Adiabática de la turbina	90%
Eficiencia Adiabática del compresor	80%

Tabla 1. Parámetros para el modelamiento del sistema presurizado pila de combustible SOFC-turbina de gas para la generación de 12MW de potencia

Los resultados del modelamiento para el sistema presentado en la figura se listan en la tabla 2 y los datos obtenidos durante la simulación para 12MW de potencia en el sistema presurizado pila de combustible (SOFC)- turbina de gas se muestran en la tabla 3.

Corriente	Temperatura °C	Presión Atm.	Flujo Molar Kmol/h	Composición del gas (%mol)						
				H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
1	700	5	360.7	35.8	42.3	9.6	10.5	0.3	0	1.5
2	100	1	3384							
2 <sup>a</sup>	356.4	5	3384	-	-	-	-	-	21	79
3	797.2	5	3384	-	-	-	-	-	21	79
4	797.2	5	588.8	-	-	-	-	-	21	79
5	797.2	5	2795	-	-	-	-	-	21	79
6	800	5	129.4	-	-	-	-	-	94	6
7	796.4	5	459.4	-	-	-	-	-	0.45	99.5
8	1000	1	370.7	4.19	7.39	43.41	41.45	-	-	3.57
9	797.1	5	3255	-	-	-	-	-	18.1	81.9
10	1000	5	3255	-	-	-	-	-	18.1	81.9
11	1000	5	3625	0.43	0.76	4.44	4.24	-	16.2	73.8
12	1089	5	3604	-	-	5.22	4.69	-	15.8	74.3
13	709.8	5	3604	-	-	5.22	4.69	-	15.8	74.3
14	418.5	1	3604	-	-	-		-		

Tabla 2. Resultados de la simulación para el sistema de 12 MW. Los valores en azul representan las corrientes dentro de la pila de combustible.

Para el cálculo de la eficiencia (LHV) del sistema pila de combustible - turbina de gas se utilizó la ecuación (Ec.4.2).

Se encontró que la eficiencia total del sistema es del 58%, donde la pila de combustible SOFC aporta el 80% y la turbina de gas el 20% restante.

PARAMETROS	VALOR
Voltaje de la pila, Voltios	0.76
Densidad de Corriente, A/m <sup>2</sup>	135600
Presión de operación de la pila, atm	5
Factor de utilización del combustible U <sub>f</sub>	0.85
Factor de utilización del Aire U <sub>a</sub>	0.17
Potencia entregada por la pila, MW(AC)	9.86
Potencia entregada por la turbina, MW(AC)	2.46
Potencia entregada por el sistema, MW(AC)	12.3
Eficiencia eléctrica (LHV) del sistema, %	59
Flujo de combustible fresco, kmol/h	360.7

Tabla 3. Datos obtenidos durante la simulación del sistema presurizado Pila de combustible SOFC-turbina de gas para la generación de 12 MW de potencia

Aunque los sistemas actuales todavía están en un rango de menos de 1MW de demostración, con este estudio se puede concluir que el modelo desarrollado permite fácilmente un escalamiento a niveles más altos de generación de energía eléctrica.

## ANEXO F. SISTEMA DE GENERACION DE ENERGIA ELECTRICA EN COLOMBIA

### DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE COLOMBIA

Indicadores	1999	2000	2001	2002	2003
Capacidad Instalada (MW)	11,592	12,581	13,168	13,469	13,269
Generación de Energía Eléctrica (GWh)	41,795	41,972	43,173	45,242	47,083
Demanda de Energía Eléctrica (GWh)	33,357	33,615	35,697	33,811	35,255
Pérdidas (%)	27.39	24.16	19.35	21.87	ND
Consumo de Energía per cápita (KWh/hab)	771	787	817	817	ND

Tabla 1.Principales Indicadores Sector Eléctrico

El sistema eléctrico colombiano se rige por las leyes 142 y 143 del año 1994, cuyas principales disposiciones son:

- Permite la participación de la inversión privada en la prestación del servicio.
- Promueve la libre competencia en la prestación del servicio para cada una de las actividades de generación, transmisión, distribución y comercialización.
- El Estado asume las actividades para la regulación, el control y la vigilancia.
- Se permite la libre contratación para usuarios con consumos superiores a 55,000 kwh/mes (usuarios no regulados), manteniendo tarifas reguladas para el resto de consumidores.
- Promueve la cobertura del servicio a las diferentes regiones del país y a los usuarios de menores recursos mediante subsidios a las tarifas, cubiertos en parte por contribuciones que pagan los usuarios no regulados.

La regulación ha fijado algunos límites para impedir la concentración de la propiedad y para restringir la configuración de posiciones dominantes por parte de las empresas o grupos empresariales que pueden afectar los precios de la electricidad, de la siguiente forma:

- Ningún distribuidor de energía podrá atender más del 25% del total del mercado.
- Ningún generador podrá tener más del 25% de la capacidad nominal de generación de Colombia.
- Ninguna empresa dedicada a la generación o a la distribución podrá tener una participación accionaria mayor al 25% en una empresa dedicada a una actividad diferente a la suya.

Generadores, distribuidores o comercializadores no podrán tener más del 15% de las acciones de una empresa de transmisión.

## **SISTEMA DE GENERACIÓN**

A diciembre de 2004, el sistema de generación colombiano contaba con una capacidad instalada de 13.363 MW, de los cuales el 64% eran plantas hidroeléctricas, el 28% plantas térmicas a gas, el 5% térmicas a carbón y un 3% de plantas que usan otras fuentes de energía. El 60% de la capacidad instalada es de propiedad privada y el 40% es propiedad pública.

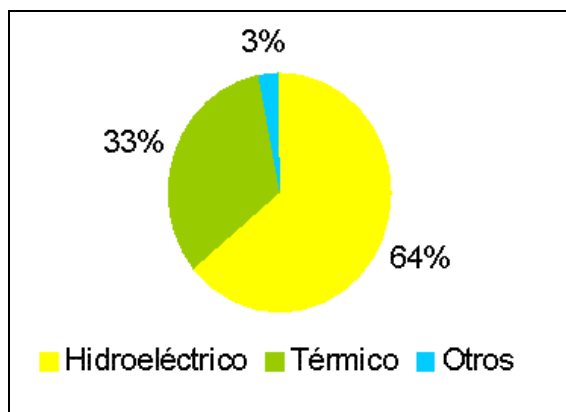


Figura 1. Generación De Energía Eléctrica en Colombia, 2004

Fuente: Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), Diciembre de 2004.

Los generadores obtienen sus ingresos por contratos bilaterales de energía, que representan el 70% de la energía vendida en el 2003 (en años anteriores llegó al 85%), por las ventas en la bolsa de energía y por un cargo por capacidad que se paga a las plantas cuando no generan y están disponibles para ser despachadas.

La volatilidad de los precios del petróleo, y la necesidad de disminuir su dependencia y un aumento progresivo de conciencia para proteger el medio ambiente, han impulsado el uso más eficiente de los energéticos y el desarrollo de fuentes no convencionales de energía. El mundo se está enfocando hacia la economía del hidrogeno. La generación de energía debe plantear algunos escenarios de mercado futuro que le permitan confirmar su direccionamiento actual y su eventual participación en los “nuevos” mercados de energía.

<b>Fuentes de energía</b>	<b>Procesos mejorados o en desarrollo</b>	<b>Aplicaciones del hidrogeno</b>
CARBÓN	- GASIFICACIÓN MEJORADA DEL CARBÓN.	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD E HIDROGENO A PARTIR DE LA GASIFICACIÓN</li> <li>■ MOTOR DE COMBUSTION INTERNA</li> <li>■ ESTACIONES DE SERVICIO</li> <li>■ MEJORA EN CELDAS COMBUSTIBLES</li> </ul>
BIOMASA	<ul style="list-style-type: none"> <li>- GASIFICACIÓN DE BIOMASA Y BASURAS</li> <li>- TRATAMIENTO DE LA BASURA (CILINDROS DE ALUMINIO ENVUELTOS EN FIBRA DE CARBÓN)</li> <li>- REFORMADOR DE FASE ACUOSA (HIERBA O MADERA)</li> <li>- CALENTAMIENTO ACELERADO DE ACEITES VEGETALES O GLUCOSA MAS AGUA</li> <li>- TRATAMIENTOS DEL ETANOL</li> </ul>	
GAS NATURAL	- REFORMADOR A "GN" CON SORBENTE REGENERATIVO	

Figura 2. Tecnologías (mejoradas o en desarrollo) para la producción de hidrogeno y aplicaciones.

Fuente: EEPPM de Medellín