

# EVALUACIÓN ENERGÉTICA DE UN SISTEMA HÍBRIDO DE GENERACIÓN ELÉCTRICA INTEGRADO POR UNA SOFC, TURBINA DE GAS Y GASIFICADOR

Zavala Carvayar, Alejandro Emilio (1), Rangel Hernández, Víctor Hugo (2)

(1) Licenciatura en ingeniería Mecatrónica, Universidad de Guanajuato | Dirección de correo electrónico: ae.zavalacarvayar@ugto.mx

(2) Departamento de Ingeniería Mecánica, División de Ingenierías, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato | Dirección de correo electrónico: vrangel@ugto.mx

## Resumen

En este trabajo se realizó la evaluación energética de un sistema híbrido de generación eléctrica integrado por una celda de combustible de óxido sólido (SOFC), una turbina de gas y un gasificador. Para ello se ha construido un simulador de operación del sistema en estado estacionario mediante el uso del software Engineering Equation Solver (EES). El simulador entrega las condiciones energéticas de cada punto del sistema con las cuales se determinan los parámetros de eficiencia energética de cada equipo. El análisis energético sirve como una medida cuantitativa de la manera en que se aprovecha la energía, pero también en que se desperdicia encontrando puntos de oportunidad dentro del sistema. Los resultados muestran que la eficiencia del sistema depende en gran parte de las condiciones de operación de este, y que un sistema híbrido puede resultar beneficioso desde un punto de vista ambiental y energético.

## Abstract

In this work the energy evaluation of a hybrid electric generation system composed of a solid oxide fuel cell (SOFC), a gas turbine and a gasifier was carried out. For this purpose, a simulator for the operation of the system under steady state condition has been built using the Engineering Equation Solver (EES) software. The simulator can provide the energy conditions of each point of the system and so calculate the energy efficiency parameters of each equipment. Energy analysis serves as a quantitative measure of the way in which energy is used, but also to find where it is wasted in order to find opportunity points within the system. The results show that the efficiency of the system depends largely on the operating conditions of the system, and that a hybrid system can be beneficial from an environmental and energy point of view.

## Palabras Clave

Eficiencia; SYNGAS; Biomasa.

## INTRODUCCIÓN

### Celdas de Combustible de Óxido Sólido

Una celda de combustible de óxido sólido (SOFC), es un dispositivo electroquímico que es capaz de convertir la energía química de un combustible en electricidad y calor. Sin las limitaciones que presenta el ciclo de Carnot, las celdas de combustible de óxido sólido son capaces de llegar a eficiencias energéticas más altas que los métodos tradicionales de generación de energía como lo son los motores de combustión interna, debido a que no se requiere de etapas intermedias que son capaces de reducir el rendimiento de un motor de combustión interna (compresión, ignición, etc.) [1].

### Gasificador

Los gasificadores son dispositivos relativamente simples. El funcionamiento, el método en el que se alimenta de biomasa, la limpieza del gas de síntesis (SYNGAS). Sin embargo, no existe una forma en la cual siempre se garantice su correcto funcionamiento, ya que esto varía dependiendo de varios factores, como lo son las variaciones que presenta el combustible.

La gasificación de un sólido es un proceso que engloba la descomposición térmica de la materia orgánica y la acción de un gas que reacciona principalmente con el residuo carbonoso resultante de la descomposición térmica. Así pues, se puede utilizar la biomasa para ser convertida en un combustible gaseoso, mediante un proceso de oxidación parcial. El proceso de gasificación consta de tres etapas básicas: el secado, la pirólisis y la gasificación. [2]

### Turbina de gas

Una turbina de gas es un motor térmico rotativo de flujo continuo que se caracteriza por:

- Baja relación peso-potencia.
- Velocidad de giro elevada.

Son capaces de usarse como generadores de energía eléctrica como, por ejemplo:

- Para cubrir las puntas de demanda, gracias a que cuentan con una velocidad de puesta en marcha menor a la de una turbina de vapor.
- Funciones de cogeneración en las que existe un proceso de elevada necesidad de energía calórica, de modo que el caudal de gases de escape, una vez aprovechados por la turbina, son utilizados para producción de vapor, o secado en procesos industriales. [3]

### Justificación

La industria energética a nivel mundial como la conocemos está próxima a una crisis, debido a la dependencia de los combustibles fósiles y su inevitable agotamiento, además de los problemas ambientales y sanitarios que traen consigo el uso de este tipo de tecnologías debido a los productos residuales que se forman luego de hacer uso de ellos como lo son el monóxido de carbono (CO), bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), entre otros. Actualmente algunos países buscan soluciones para resolver dicha problemática, al tiempo que buscan mantener su posición económica. Sin embargo, existe un mercado latente el cual será vital en el futuro: la generación de energía que provenga de métodos alternativos al combustible fósil.

Por lo anterior se vuelve necesario el estudio y desarrollo de tecnologías que cumplan estas características, como lo son los sistemas híbridos como el que se propone, debido a que se han desarrollado de tal manera

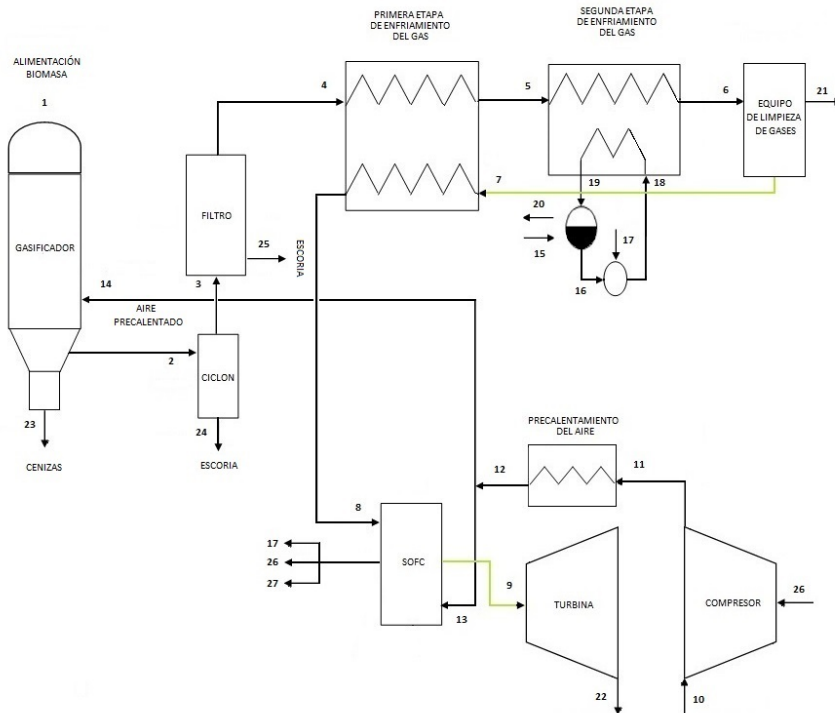
que se presentan como un método viable que contribuiría a mitigar en una manera importante la futura crisis energética.

La generación de energía eléctrica mediante la combustión/ gasificación/ pirólisis de biomasa es una de las opciones más conocidas. La biomasa no deja de ser la energía renovable más competitiva tras la eólica sin las limitaciones que otras ofrecen como la disponibilidad de acuerdo con la región o la capacidad de ajustarse a las curvas de demanda.

Las plantas de potencia híbridas basadas en la combinación de una celda de óxido sólido (SOFC) y turbinas de gas son un concepto promisorio de cara a las demandas futuras de la generación energética en términos de eficiencia, emisiones y flexibilidad. Las plantas de potencia pueden ser usadas como una estación de potencia central, como cualquier otra planta de potencia. La combinación de ambas SOFC y turbina de gas pueden ser usada en distintos arreglos. [4]. Debido a su alta eficiencia y bajas emisiones, las SOFC emergen como una alternativa para estos usos. Por lo que es importante el análisis de posibles soluciones [5]

## MATERIALES Y MÉTODOS

En primer lugar, se diseñó un modelo de sistema integrado por una SOFC, un gasificador y una turbina de gas, así como los intercambiadores de calor necesarios para cumplir con las condiciones de operación que algunos equipos requieren, dicho modelo se muestra en IMAGEN 1. Dentro de este modelo, se muestra el camino que recorren los diferentes combustibles, desde que la biomasa alimenta al gasificador, la salida del gas de síntesis del falsificador y su paso por los demás componentes del sistema, SOFC y turbina de gas, así como intercambiadores de calor.



**IMAGEN 2: Modelo esquemático del sistema SOFC-TG.**

Acto seguido se realizaron balances de energía y de masa (estudio de la primera ley de la termodinámica para un volumen de control) en cada uno de los componentes, además se utilizan eficiencias isentrópicas, las cuales (estudio de la segunda ley de la termodinámica) de esta manera se logran obtener las propiedades

termodinámicas (temperatura, presión, entalpía, entropía, etc.) del fluido de trabajo a través de cada uno de los equipos del sistema.

Además, fue necesario un análisis de equilibrio químico ya que el gas de síntesis es un gas compuesto de distintas proporciones de diferentes gases. Este gas se compone de  $CH_4$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $H_2O$ ,  $H_2$  y  $N_2$ .

Una vez realizado el análisis de equilibrio químico se pueden obtener las fracciones molares de cada uno de los gases que componen al gas de síntesis. De esta manera se facilita el análisis energético, ya que cada gas tiene una aportación de entalpía que varía dependiendo de su fracción molar. Una vez que se cuentan con las propiedades termodinámicas en cada punto del proceso se pueden calcular las eficiencias energéticas de cada uno de los distintos componentes

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 1 se muestran las fracciones molares de cada componente del gas de síntesis.

**Tabla 1: Fracciones Molares.**

| Componente | Fracción molar (x) [%] |
|------------|------------------------|
| $CH_4$     | 0.1287                 |
| $CO$       | 26.43                  |
| $CO_2$     | 15.97                  |
| $H_2$      | 1.659                  |
| $H_2O$     | 5.166                  |
| $N_2$      | 50.65                  |

En la Tabla 2 se muestran la potencia neta entregada por cada componente que es capaz de generar potencia. Cabe mencionar que se incluye la potencia neta desarrollada por el sistema turbina de gas y celda de combustible (SOFC-TG)

**Tabla 2: Potencia.**

| Componente | Potencia ( $\dot{W}$ ) [kW] |
|------------|-----------------------------|
| SOFC       | 4404                        |
| Turbina    | 155.8                       |
| SOFC-TG    | 3780                        |

En la Tabla 3 se anexan las eficiencias energéticas de los componentes del sistema.

**Tabla 3: Eficiencias energéticas**

| Equipo                    | Eficiencia ( $\epsilon$ ) [%] |
|---------------------------|-------------------------------|
| Intercambiador de Calor 1 | 87.1                          |
| Intercambiador de Calor 2 | 51.69                         |
| SOFC                      | 78.45                         |

|                 |              |
|-----------------|--------------|
| Turbina de Gas  | 85           |
| Compresor       | 85           |
| Sistema SOFC-TG | <b>42.61</b> |

## CONCLUSIONES

Para un ciclo operado con una mezcla de diferentes especies de gas, destinado a la producción de potencia eléctrica, se resolvió un modelo termodinámico con ayuda del software EES. De este modo fue posible realizar un estudio paramétrico de la influencia de las variables de operación sobre las distintas condiciones de rendimiento. Este tipo de análisis resulta útil a la hora de conseguir los valores que, en conjunto, garantizan el funcionamiento, factibilidad, eficiencia y aprovechamiento del sistema. Desde el punto de vista energético, se puede identificar cuales componentes son aquellos en los cuales existe la mayor pérdida de energía, lo cual se aprecia en el intercambiador de calor 2, debido a la temperatura a la que opera este intercambiador ya que a menor temperatura se requiere de un área de transferencia de calor mayor, sin embargo, esto traería consigo también un incremento en los costos de producción de dicho intercambiador.

## REFERENCIAS

- [1] K, Huang, J. B. Goodenough (2009). Introduction to solid oxide fuel cells. En K, Huang, J. B. Goodenough (2009), Solid Oxide Fuel Cell Technology (pp. 1-9), Principles, Performance and Operations, Cambridge CRC Press.
- [2] Thomas B. Reed and Agua Das (1998). Principles of Gasification. En Thomas B. Reed and Agua Das (1998), Handbook of biomass downdraft gasifier engine systems (pp 21-29).
- [3] Moran, M. J. (2006). Fundamental of engineering thermodynamics: SI version. Gas Power Systems. En Moran, M. J. (2006). Fundamental of engineering thermodynamics: SI version pp (373-444), Chichester, John Wiley & Sons, Inc.
- [4] Hohloch, M., Huber, A. & Aigner M. (2017). Analysis of an operational strategies of a SOFC/MGT hybrid power plant. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. Doi: 10.1115/1.4038605
- [5] Tarroja, B., Mueller, F., Maclay, J., Brouwer, J. (2010). Parametric Analysis of a Solid Oxide Fuel Cell Gas Turbine System Design Space. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 132 / 072301-1, Doi: 10.1115/1.4000263