

Diseño y construcción de una cámara de combustión para una microturbina de gas

Design and construction of a combustion chamber for a gas microturbine

Jorge Mario Trejos Valencia, Hader Adolfo Vargas Arboleda, Juan Esteban Tibaquirá Giraldo¹

Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia

jorgem@utp.edu.co

hadvar@utp.edu.co

juantiba@utp.edu.co

Resumen— Las microturbinas son dispositivos que encuentran aplicaciones no sólo en la generación de electricidad, sino también en usos menos comunes como la generación de calor, aerodelismo, unidades de potencia pico, aviación, plantas motrices y automóviles. Uno de los elementos que hace parte de la microturbina es la cámara de combustión. En el presente trabajo se resume el diseño y construcción de una cámara de combustión para una microturbina de gas. Además se busca desarrollar una base teórica para el diseño y construcción de este tipo de dispositivos.

Palabras clave— Cámara de combustión, combustión, generación de potencia, microturbina.

Abstract— *Microturbines are devices that have applications in generating electricity, heat generation, model airplanes, peak power units, aviation, engine plants and automobiles. One element that is part of the microturbine is the combustion chamber. This work summarizes the design and construction of a combustion chamber for a gas microturbine. Additionally we seek to develop a theoretical basis for the design and construction of such devices.*

Key Word— Combustion chamber, combustion, power generation, microturbine.

I. INTRODUCCIÓN

La producción de energía eléctrica requiere del uso de un sistema de generación que contenga los elementos necesarios para su adecuado funcionamiento y así asegurar la prestación de un servicio con alta confiabilidad. Motivo por el cual se hace necesario contar con una cámara de combustión que asegure el buen desempeño del proceso de generación de potencia.

En el campo de investigación de las cámaras de combustión para microturbinas de gas, se tiene referencia

sobre un proyecto de estudio de desempeño de este tipo de dispositivos, el cual fue realizado por investigadores brasileros [2]. Este proyecto consistió básicamente en la prueba de desempeño de los parámetros fundamentales de operación de cámaras de combustión en unidades turbocompresoras.

Lo que se busca entonces, es diseñar y construir una cámara de combustión instalada en un banco de pruebas para el futuro montaje de una microturbina. La metodología empleada es conocer las necesidades del sistema para proceder a la etapa de diseño, posteriormente llevar a cabo su construcción y finalmente, hacer un montaje para su operación. Además, este proyecto representa un beneficio en cuanto al aporte académico que se hace al Laboratorio de Térmicas de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Tecnológica de Pereira [1].

El esquema temático que se desarrolla en el presente trabajo inicia con un marco teórico en donde se hace una descripción de los conceptos fundamentales de la combustión; seguidamente se procede a hacer un análisis teórico en donde se determinan los parámetros de diseño y se realiza un análisis termodinámico y de transferencia de calor. Luego se hace el diseño de la cámara de combustión y del banco de pruebas, además se seleccionan los distintos componentes de los sistemas de inyección de combustible y de ignición que entran a operar en la cámara de combustión. Finalmente se procede a la construcción y montaje de los sistemas mencionados.

En principio, la cámara de combustión operará sólo con ACPM (Diesel) como combustible de trabajo, que es el combustible con el cual se hacen los cálculos en la etapa de diseño. A pesar de esto, la cámara como tal, podrá operar con otros combustibles en una etapa posterior, tales como biodiesel y gas natural, por ejemplo. Esto dependerá de los alcances y necesidades que se pretenda satisfacer en un futuro.

1. Ph.D. Profesor Titular Facultad de Ingeniería Mecánica Universidad Tecnológica de Pereira

$$\dot{m} = \dot{V} * \rho \quad \rightarrow \quad \dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho} \quad (2)$$

II. CONTENIDO

2.1. Análisis teórico

2.1.1 Determinación de los parámetros de diseño de la cámara de combustión

Comercialmente existen varios tipos de microturbinas, que operan en rangos de potencia de 30 kW hasta 200 kW con eficiencias que varían entre 10 y 30%.

Para los cálculos se asumieron los siguientes valores:

$$\begin{aligned} \dot{W}_{NETO} &= 30 \text{ kW} \\ \eta_p &= 25\% \end{aligned}$$

Se eligió el ACPM (diesel) como combustible de trabajo, porque es fácil de conseguir, no demanda precalentamiento, es un combustible que aún es usado en la industria, no requiere cuidados o instalaciones especiales en el almacenamiento y comparándolo con los combustibles gaseosos, las fugas o los descuidos en la operación del equipo no representan un riesgo elevado.

Para determinar la masa de combustible necesaria para operar la microturbina con los parámetros anteriores se utiliza la siguiente relación termodinámica, la cual es la relación entre la potencia neta que entrega la microturbina y el calor adicionado al proceso de combustión:

$$\eta_p = \frac{\dot{W}_{NETO}}{\dot{m}_{COMB} * LHV} \quad \rightarrow \quad \dot{m}_{COMB} = \frac{\dot{W}_{NETO}}{\eta_p * LHV} \quad (1)$$

Donde:

\dot{W}_{NETO} : Potencia neta en kW

\dot{m}_{COMB} : Flujo másico de combustible en kg/s

LHV : Poder calorífico inferior del combustible en kJ/kg

Para ACPM $LHV = 45000 \text{ kJ/kg}$ [8] [11].

Reemplazando estos valores en la ecuación (1), se tiene:

$$\dot{m}_{comb} = \frac{30 \text{ kJ/s}}{0.25 * 45000 \text{ kJ/kg}} \quad \rightarrow \quad \dot{m}_{comb} = 0.00267 \text{ kg/s}$$

De esta forma, el caudal de combustible puede ser hallado con la densidad. Para obtener el caudal de combustible en m^3/h se aplica la siguiente ecuación:

Donde:

\dot{m} : Flujo másico de combustible en kg/s

\dot{V} : Caudal de combustible en m^3/s

ρ : Densidad del combustible en kg/m^3

Para ACPM $\rho = 850 \text{ kg/m}^3$ [11]

$$\dot{V} = \frac{0.00267 \text{ kg/s}}{850 \text{ kg/m}^3}$$

$$\dot{V} = 3.141 * 10^{-6} \text{ m}^3 / \text{s} = 0.0113 \text{ m}^3 / \text{h}$$

Las unidades utilizadas para el caudal de combustible en la microturbina serán galones por hora. Entonces:

$$1 \text{ m}^3 = 264.2 \text{ gal} \quad \rightarrow \quad \dot{V} = 2.98 \text{ gph}$$

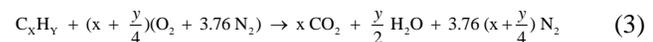
Para bombas normalizadas el caudal de combustible es

$$\dot{V} = 3 \text{ gph}.$$

2.1.2 Estudio termodinámico

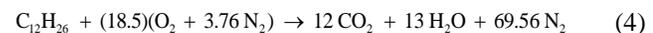
Con los parámetros de diseño obtenidos en la sección anterior se procede a realizar el estudio termodinámico para el quemado de 3 gph de ACPM. Todo estudio de combustión debe empezarse con el balance de ecuaciones químicas del propio combustible, el cual constituye la base de los demás cálculos y partes del trabajo [7].

La combustión teórica para un combustible hidrocarburo C_xH_y en una base de aire seco es [3]:



El balance de la ecuación química, es realizado por el principio de conservación de la masa. El término que acompaña las 4.76 moles de aire ($x + y/4$), es llamado coeficiente estequiométrico para el aire (a_{est}).

Para el caso particular del dodecano $C_{12}H_{26}$ (Diesel o ACPM):



Aquí: $a_{est} = (12 + 26/4) = 18.5$

De la ecuación 2.4 se puede observar que cada mol de combustible ACPM debe ser acompañado con 18.5 moles de oxígeno. O para el caso de aire seco, por cada mol de combustible ACPM inyectado en la cámara de combustión, se

deben suministrar 88.06 moles de aire para la combustión estequiométrica.

La relación aire-combustible (AC) es una cantidad utilizada en el análisis de procesos de combustión para cuantificar las cantidades de combustible y aire. Suele expresarse en una base de masa y se define como la proporción entre la masa de aire y la masa de combustible en un proceso de combustión [2]:

$$AC = \frac{m_{aire}}{m_{comb}} \quad (5)$$

$$AC = \frac{m_{aire}}{m_{comb}} = \frac{4.76 * a_{est}}{1} \frac{M_{aire}}{M_{comb}}$$

$$AC_{teórica} = \frac{4.76 * 18.5 * 28.97}{170} = 15.0065 \frac{kg_{aire}}{kg_{comb}}$$

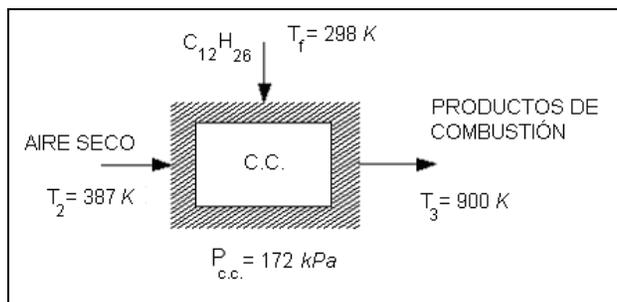


Fig. 1. Esquema termodinámico de la cámara de combustión

Para determinar teóricamente la composición de los productos y la temperatura de llama adiabática en el proceso de combustión se usó el programa computacional STANJAN® [9], el cual determina las condiciones de equilibrio de la reacción química. Con base en los resultados obtenidos se establecen condiciones de tipo ambiental y energético.

El dodecano (C₁₂H₂₆) es un compuesto que no está incluido en la librería del programa STANJAN®, por lo que fue necesario crearlo para entrar a realizar los cálculos.

Debido a las limitantes metalúrgicas de los materiales con los que se construyen las cámaras de combustión, se optó por escoger una temperatura de llama adiabática de 900 K, que corresponde a una relación A/C de 79 y un exceso de aire de 426.7 %.

Para terminar el estudio termodinámico, es necesario realizar el análisis de generación de entropía en el sistema. Para esto, se desprecia la transferencia de calor hacia los alrededores y se asume una temperatura de salida de los gases de 626.85 °C (900 K), lo cual correspondería a la temperatura de llama adiabática cuya relación A/C es de

79. El esquema termodinámico de la cámara de combustión se muestra en la figura 1.

2.1.3 Cálculo de las dimensiones de la cámara de combustión

En las microturbinas de gas de uso industrial, el tamaño de la cámara de combustión no es un factor preponderante en el diseño, a diferencia de las cámaras de combustión utilizadas en aerodelismo o aplicaciones aeronáuticas. Las dimensiones principales de una cámara de combustión se eligen, fundamentalmente, tomando como base datos experimentales de cámaras similares ya existentes [10].

Una vez construido un primer prototipo se ensaya y se introducen las modificaciones necesarias para conseguir un comportamiento óptimo [10]. Este comportamiento viene definido por su rendimiento, pérdida de presión, límites de estabilidad de la combustión, perfil de temperaturas del flujo a la salida de la cámara, etc.

Aunque la forma y disposición de las cámaras de combustión son bastante flexibles, se puede establecer una normativa basada en datos experimentales, que sirva de ayuda para el diseño del volumen, sección transversal, longitud, tamaño y disposición de los orificios del tubo de llama.

El volumen de la cámara de combustión depende de la intensidad de la combustión, de forma que definidos los valores de este parámetro, se puede hacer una primera aproximación del volumen de la misma [10].

2.1.4 Estudio de transferencia de calor

En el diseño de la cámara de combustión, después de tenerse las dimensiones, es necesario escoger adecuadamente los materiales con los que se construirá. La selección de los materiales debe tener en cuenta diversos factores, como son la temperatura máxima de trabajo, las condiciones de operación, la minimización del calor desperdiciado por las paredes de la cámara, y la viabilidad económica.

El calor cedido por las paredes de la cámara de combustión, debe reducirse a su mínimo para aumentar el rendimiento de la cámara de combustión, esto se evidencia teniendo en cuenta que este calor se desperdicia casi en su totalidad, pues su aplicación es mantener el recinto a una elevada temperatura para obtener combustión en forma rápida y confiable [7].

La temperatura máxima de trabajo se relaciona intrínsecamente con la temperatura de llama adiabática, debido a que es la temperatura más alta que se puede alcanzar dentro de la cámara, entonces, se debe diseñar con ésta.

En el diseño y estudio de cámaras de combustión es imposible presentar un análisis matemático sin recurrir a simplificaciones [6]. Por esta razón se usa el método más sencillo, que consiste en considerar la cámara como un recinto que contiene una

mezcla homogénea, de propiedades uniformes. Para esta simplificación, no son necesarias informaciones sobre fluidos y la velocidad de formación de la mezcla. Se asume la cámara isotérmica, y la formación de la mezcla instantánea. Conociendo la temperatura de la reacción se puede conocer la relación de transmisión de calor [6].

El modelado de la transferencia de calor desde la llama hasta los alrededores de la cámara de combustión, implica las tres formas de transferencia de calor existentes: radiación, convección y conducción [4], este modelo se esquematiza en la figura 2.

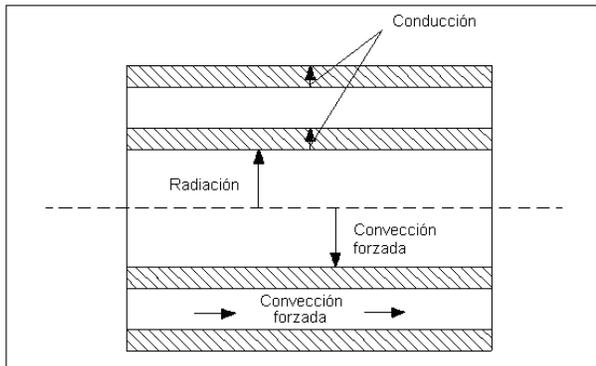


Fig. 2. Esquema de transferencia de calor en la cámara de combustión

2.2. Diseño de la cámara de combustión

El diseño de una cámara de combustión y la selección de los dispositivos que la componen dependen de las condiciones de operación, tales como presión, temperatura, forma en que se mezclan aire y combustible. También depende de las exigencias y características de funcionamiento de la turbina.

La combustión tiene que ser estable, para permitir las fuertes variaciones de la relación aire-combustible que para los ciclos regenerativos está entre 60/1 y 120/1 y para los no regenerativos entre 100/1 y 200/1. La velocidad del fluido oscila, en la mayor parte de los casos, entre 30 y 60 m/s.

La masa de aire teóricamente necesaria para la combustión de 1 kg de combustible se determina a partir de las reacciones estequiométricas de la combustión; para los combustibles líquidos utilizados normalmente en las turbinas de gas, la relación aire-combustible estequiométrica está entre 14,7 y 15, pudiéndose tomar 14,9 como valor medio.

La cantidad de aire real suministrada al combustible es mayor que la teórica, definiéndose un coeficiente de exceso de aire a , como la relación entre la cantidad real de aire y la

teórica, por cada kg de combustible. En la figura 3 se muestra un esquema de la cámara de combustión.

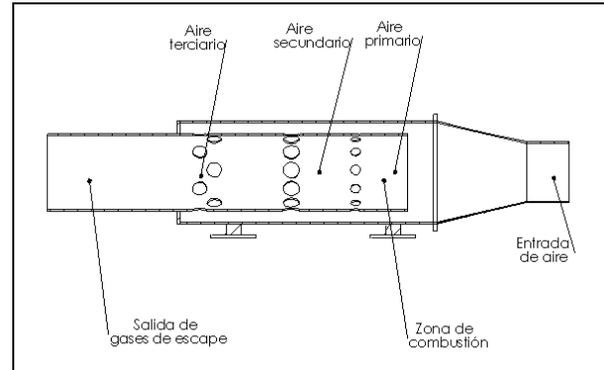


Fig. 3. Esquema de la cámara de combustión

2.2.1 Diseño de las carcassas

Para el estudio de transferencia de calor, fue necesario hacer un dimensionamiento del tubo de llama y la carcasa exterior. Este dimensionamiento se basó en criterios de estudios realizados por investigadores en el área [2]; para el tipo de cámara que se seleccionó (cámara tubular), todas las dimensiones se basaron fundamentalmente en dos criterios:

- El flujo de masa de aire, el cual se determinó en la fase del estudio termodinámico.
- El hecho de que la cámara cuenta con un dispositivo remolinador del flujo de aire (swirling). Dicho dispositivo se muestra en la figura 4.



Fig. 4. Estabilizador con álabes a 60°

2.2.2 Diseño del ducto de alimentación de aire (difusor)

Un difusor tiene la función de reducir la velocidad de flujo de descarga del compresor. Una variable a controlar es el ángulo de divergencia 2θ . Las dimensiones necesarias para hacer una descripción de la geometría del difusor son convenientemente

definidas por medio de la razón de área RA [2]. En la figura 5 se esquematizan las dimensiones para el diseño del difusor.

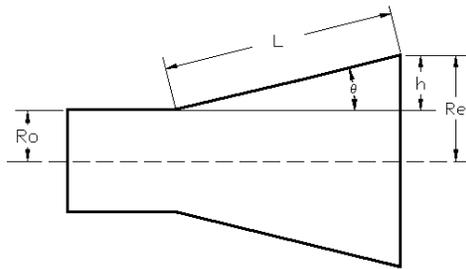


Fig. 5. Dimensiones del difusor

La razón de área para un difusor de tipo cónico es definida por [4] como:

$$RA = 1 + \frac{2 * L}{R_0} * \text{sen}\theta + \left(\frac{L}{R_0} * \text{sen}\theta \right)^2 \quad (6)$$

Donde:

R_0 : radio de entrada del difusor

L : distancia de expansión

Para disminuir la pérdida de carga y establecer patrones de velocidad que favorezcan la combustión, se escoge un ángulo de divergencia de 26° y una razón de área de 3,1 conforme a los trabajos realizados previamente por [4]. Debido a que el radio exterior de la carcasa exterior de la cámara de combustión ya fue calculado previamente ($R_e = 4,78 \text{ cm}$), entonces podemos calcular el radio de entrada del difusor R_0 .

De la ecuación 6 y la geometría de la figura 2, se deduce una nueva expresión para la razón área:

$$RA = 1 + \frac{2 * (R_e - R_0)}{R_0} + \left(\frac{R_e - R_0}{R_0} \right)^2 \quad (7)$$

Resolviendo para R_0 , se obtiene un valor de 2.71 cm .

Para calcular las dimensiones restantes, se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$h = R_e - R_0 \quad (8)$$

$$L = \frac{h}{\text{sen}\theta} \quad (9)$$

Con los valores que ya son conocidos y reemplazándolos en las anteriores ecuaciones, se encuentra que:

$$h = 2.07 \text{ cm}$$

$$L = 9.20 \text{ cm}$$

2.2.3 Diseño del sistema de inyección de combustible

Se puede afirmar que una sustancia líquida no experimenta combustión, de modo que se debe evaporar antes de entrar en la zona de combustión como tal. El sistema de inyección es el encargado de llevar el combustible a la cámara de combustión y suministrar la seguridad en el manejo y transporte del combustible, además, suministrar por algún método esta vaporización [5].

La bomba a elegir debe ser en lo posible una bomba de desplazamiento positivo, rotatoria, de engranajes internos con partición o media luna. Además debe manejar 3 gph de ACPM y tener una presión en la descarga de 120 psig aproximadamente.

La boquilla de inyección en el quemado de combustible líquido es tan importante como la bomba e incluso más. Esto es, porque este dispositivo es el encargado de atomizar bien el combustible para una presión y un caudal de entrada determinados. Las boquillas de atomización están disponibles en el mercado en una gama alta de configuraciones, tipos, caudales y presiones.

En la tabla 1 y en la figura 6 se muestran los accesorios y el diagrama del sistema de inyección respectivamente.

Número	Accesorio
1	Depósito de combustible
2	Línea de succión
3	Filtro de combustible
4	Bomba de combustible
5	Manómetro
6	Válvula de paso
7	Electroválvula
8	Línea de descarga
9	Boquilla de inyección

Tabla 1. Accesorios del sistema de inyección

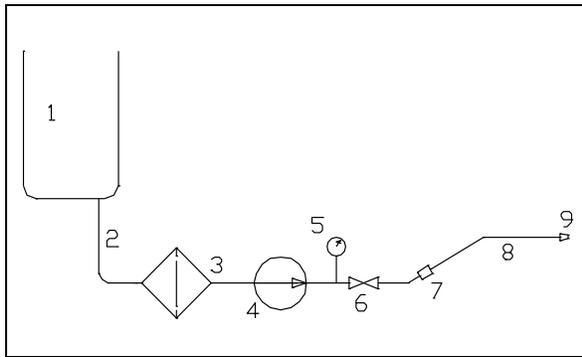


Fig. 6. Diagrama del sistema de inyección

2.2.4 Diseño del sistema de encendido de la cámara de combustión

El sistema de encendido en la cámara de combustión consta de la acometida eléctrica para el sistema, temporizador, transformador y electrodos. La acometida eléctrica y el temporizador se seleccionan según especificaciones y catálogos de proveedores o fabricantes. El transformador se elige teniendo en cuenta las distancias mínimas para el salto de arco eléctrico. Para los electrodos se tienen en cuenta las descripciones de proveedores.

2.3. Construcción y montaje de la cámara de combustión

El procedimiento a seguir para la construcción y montaje, es utilizar las fases de diseño y adaptar los resultados en un campo práctico, empezando con la obtención de los elementos, y continuando con la construcción de otros dispositivos que no se encuentren fácilmente en el mercado, o que su manufactura resulta más económica que su compra.

Con los planos hechos a partir del diseño de la cámara de combustión, se procedió a la etapa de construcción. Dicha construcción se llevó a cabo en un taller de la ciudad de Pereira. Una fotografía de la cámara de combustión se muestra en la figura 7.

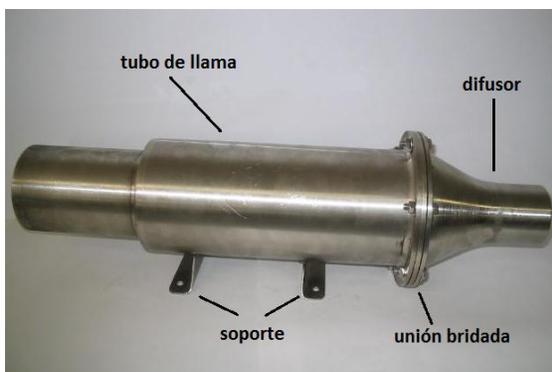


Fig. 7. Cámara de combustión

Una vez construida la estructura, se procedió al montaje de los diferentes componentes del banco de pruebas. En primera instancia se tomaron las medidas que permitieron ver la disposición de los elementos; seguidamente se presentaron dichos elementos sobre el banco y una vez conocidas sus posiciones se aseguraron a la estructura por medio de pernos.

El montaje final corresponde a la unión de todos los sistemas descritos anteriormente, operando uno a uno y verificando su correcto funcionamiento para finalmente operarlos todos de manera simultánea. En la figura 8 se muestra una fotografía del banco de pruebas terminado.



Fig. 8. Banco de pruebas

2.4. Prueba de funcionamiento

Una vez ensamblado el banco de pruebas se procedió a montar un compresor centrífugo, la descarga del compresor se acopló al ducto de entrada de la cámara de combustión por medio de una manguera de caucho reforzado con nylon de 2 1/4" de diámetro y fue asegurada a dicho ducto mediante una abrazadera con mecanismo de apriete por medio de tornillo. Con este compresor junto con los diferentes sistemas el módulo funcionó correctamente, obteniéndose un resultado satisfactorio al momento de operar la cámara de combustión.

III. CONCLUSIONES

Se realizó un análisis teórico donde se determinaron los parámetros de diseño de la cámara de combustión.

Se hizo un análisis termodinámico y con ello se determinó la geometría de la cámara de combustión y posteriormente se hizo un análisis de transferencia de calor.

Se diseñó la cámara de combustión y el banco de pruebas.

Se seleccionaron los distintos componentes de los sistemas de inyección de combustible y de ignición que entran a operar en la cámara de combustión.

Se construyó y se montó la cámara de combustión además de los elementos que conforman los sistemas de inyección de combustible y de ignición que operan en la cámara de combustión.

Como resultado de lo anterior, se obtuvo un módulo de pruebas con las especificaciones técnicas que se resumen en la tabla 2.

Tipo de cámara de combustión	Tubular
Material de la cámara de combustión	Acero inoxidable 304 L
Combustible utilizado	ACPM
Consumo de combustible	3 gph
Rendimiento	98%
Pérdida de calor	1.3 %
Capacidad calórica	118.5 kW _t
Material del banco de pruebas	Acero estructural
Presión de atomización	100 psig
Máximo caudal de aire	250 cfm
Control	Lógica de contactos
Forma de encendido	Eléctrico intermitente
Aplicación	Generación de potencia

Tabla 2. Especificaciones técnicas del módulo de pruebas

REFERENCIAS

[1] Grupo de Investigación en Sistemas Térmicos y Potencia Mecánica. Diseño y construcción de un generador de potencia con una microturbina de gas a partir de un turbocompresor de un motor de combustión interna. Pereira, Colombia: UTP, proyecto de investigación aprobado por el CIE-UTP. Febrero 2003.

[2] F. Alves Dos Santos, C.A. Gurgel Veras, y M.O. Magno de Carvalho. Proyecto y estudio del desempeño de la cámara de combustión de una microturbina. Brasilia (Brasil), Universidad de Brasilia, 27 de marzo de 2004. Disponible en: http://www.enm.unb.br/Trab_Premio_jovem_Cientista_2002.pdf

[3] Y. Cengel y M. Boles. Termodinámica. Colombia: McGraw Hill, 1998.

[4] A.H. Lefebvre, *Gas Turbine Combustion*. McGraw Hill, 1983, p. 1-73. ISBN 0-07-037029-X.

[5] Andrés A. y Mauricio C. “Diseño, construcción y pruebas de un quemador experimental tipo cañón de alta presión de ACPM, para uso didáctico”. Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Mecánico. Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de Pereira. 2003.

[6] S. Giuliano. La Combustión, Teoría y aplicaciones. Madrid: Dossat, 1975.

[7] J.E. Tibaquirá. Plantas Térmicas. Pereira, Colombia: Universidad Tecnológica de Pereira; Notas de clase II semestre 2003.

[8] C.A. Orozco. Máquinas Térmicas. Pereira, Colombia: Universidad Tecnológica de Pereira; Notas de clase I semestre 2004.

[9] STANJAN chemical equilibrium solver versión 3.91 IBM-PC Stanford University 1987

[10] *Cámaras de combustión de turbinas a gas*. 5 de mayo de 2004. Disponible en: <http://personales.ya.com/universal/TermoWeb/Turbinas/Gas/PDFs/8-Turbinasgas.pdf>

[11] ECOPETROL. Empresa colombiana de petróleos. Disponible en: www.ecopetrol.com.co.

[12] R. Harman. *Gas Turbine Engineering*. Lincoln, U.K. The MacMillan Press Ltd., 1981, p. 89-105. ISBN 0-333-30476-4.