

Simulación Numérica y Validación Experimental de una Cámara de Combustión de Flama no Premezclada con Cuerpo Romo en la Inyección de Combustible

Numerical simulation and experimental validation of a non-premixed combustion chamber with bluff body at the fuel injection inlet

María Elena Tejeda del Cueto^{a,1}, Arantxa Montserrat González Aguilar^{b,2}, José Hernández Hernández^{a,3},
 Richard Alan Gómez José^{b,4}, Lorena del C. Santos Cortes^{b,5}, Marco Osvaldo Viguera Zúñiga^{a,6}

Universidad Veracruzana

Calzada Ruiz Cortines 455, Col. Costa Verde, Boca del Río, Ver. C.P. 94294

Teléfono (229)-7752000 ext. 25127 Fax. ext. 25128

^aFacultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias Navales

^bFacultad de Ingeniería de la Construcción y el Hábitat

¹etejeda@uv.mx, ²arantxa.glez@hotmail.com, ³josehernandez02@uv.mx

⁴richardgomez1092@gmail.com, ⁵losantos@uv.mx, ⁶mviguera@uv.mx

Abstract

This study focuses on the numerical model of combustion in a diffuse flame combustion chamber (non-premixed) implementing a new form of bluff body (half sphere). The methodology focused on generating a recirculation zone in the primary zone of the combustion chamber by varying the equivalence ratio. The numerical model of the chamber was made using a commercial software (ANSYS- Fluent) of computational fluid dynamics (CFD) and validated with temperature data measured in laboratory tests; the results of the numerical model have similar behavior to those obtained experimentally. Results obtained in the post processing of the validated numerical model are also shown, which demonstrate that at low equivalence ratio the recirculation area generated by the bluff body increases, but when the equivalence ratio increases, the recirculation area decreases..

Resumen

El presente trabajo se enfoca en el modelo numérico de la combustión en una cámara de combustión de flama difusa (no premezclada) implementando una nueva forma de cuerpo romo (media esfera). La metodología se centró en generar una zona de recirculación en la zona primaria de la cámara de combustión variando la relación de equivalencia. El modelo numérico de la cámara se realizó utilizando un software comercial (ANSYS- Fluent) de dinámica computacional de fluidos (CFD) y se validó con datos de temperaturas medidos en pruebas de laboratorio; los resultados del modelo numérico tienen comportamiento similar a los obtenidos experimentalmente. También se muestran resultados obtenidos en el postproceso del modelo numérico validado, los cuales demuestran que a bajas relaciones de equivalencia la zona de recirculación generada por el cuerpo romo se amplía, pero al aumentar la relación de equivalencia ésta se atenúa.

Keywords:

bluff body, gas turbine, recirculation, non-premixed flame, CFD simulation

Nomenclatura

C_{1e} primera constante del modelo de turbulencia

C_{2e} segunda constante del modelo de turbulencia

D coeficiente de difusión molecular

e energía

f fracción de mezcla

F_i fuerzas externas del cuerpo

g_i gravedad

G_k generación de energía cinética debido a gradientes de velocidades medias

h_n entalpía específica de las especies

J_n difusividad de las especies

k_{eff} conductividad efectiva

P presión

R constante universal de los gases

R_n razón de producción de especies

Palabras clave:

cuerpos de obstrucción, turbina de gas, recirculación, flama no premezclada, simulación en CFD

S_n término fuente de energía

T temperatura

u velocidad

Y_m contribución de la dilatación fluctuante en la turbulencia compresible a la tasa global de disipación

Y_n fracción de masa de especie química

V volumen

χ disipación escalar

Z_i fracción másica para el elemento i

Simbología griega

ρ densidad

μ viscosidad

τ_{ij} tensor de esfuerzos

ε tasa de disipación

μ_t viscosidad turbulenta

σ_e número turbulento de Prandtl para ε
 σ_k número turbulento de Prandtl para k

Introducción

Una flama estable es aquella que está anclada a una ubicación deseada, es resistente al retroceso, despegue y apagado. De acuerdo con Shanbhogue et al. [1], las flamas que tienen altas velocidades en las corrientes de los reactantes sólo pueden ser estabilizadas sobre un cierto rango de condiciones de cualquier dispositivo de combustión práctico. Para evitar el despegue en una flama, ésta debe ubicarse cerca del quemador y generar un reencendido continuo de los productos frescos, evitando siempre alcanzar el límite de extinción. Kariuki et al. [2] mencionan que la extinción ocurre cuando el tiempo disponible de la reacción química es menor que el tiempo necesario para generar el calor suficiente para elevar la temperatura de la mezcla fresca hasta su punto de ignición.

La estabilidad en una flama se logra creando una zona de recirculación que Longwell et al. [3] definen como una zona de flujo no suave y continuo, donde se forman y destruyen vórtices continuamente; por lo que se considera que es una zona de intenso mezclado y cualquier pequeña masa de gas que ingrese se quema rápidamente en comparación con el tiempo promedio que permanece en la zona.

Existen formas de generar una zona de recirculación tales como: implementación de estabilizadores, utilizar cuerpos de obstrucción denominados “cuerpos romos”, emplear placas perforadas o implementar inyección de aire tangencial que provoque giro en la corriente de aire. Tejeda del Cueto et al. [4] estudiaron la optimización de aire para el comportamiento de combustión y la estabilidad de la flama de un quemador instalado en una cámara de combustión de gas LP, en donde innovaron con un arreglo de placas perforadas tándem mediante simulación numérica y pruebas experimentales. Los resultados obtenidos demostraron que el arreglo de placas perforadas favoreció la estabilidad de la flama, la simetría y centralización de ésta al interior de la cámara.

Caetano y Da Silva [5] definen el cuerpo romo como un flujo alrededor de un obstáculo que está completamente sumergido en el flujo; est exhibe dos puntos de estancamiento: corriente arriba y corriente abajo del cuerpo. De acuerdo con Longwell et al. [3], la forma del cuerpo romo debe ser obtusa para crear una onda de remolinos y vórtices en la corriente abajo del objeto. Ahmed y Ashwani [6] mencionan que el cuerpo romo como método de estabilización es ampliamente utilizado para estabilizar flamas en flujos de alta velocidad de diferentes aplicaciones de combustión industrial, por razones de seguridad y porque proporcionan excelentes características de mezclado turbulento. Penner y Williams [7] afirman que las tres principales características de un cuerpo romo que lo determinan aplicable para aplicaciones de ingeniería son: la razón de dispersión de la flama, el arrastre del cuerpo obstructor y la región de estabilidad de la flama. Para estabilizar la flama con un cuerpo romo se utiliza la zona de recirculación que se forma corriente abajo de éste, ésta tiene un volumen definido y en ella se da lugar a una reacción química homogénea en estado estable, Yang et al. [8] mencionan que esta zona contribuye a mantener el proceso de mezclado, el cual incrementa la estabilidad de

la flama y reduce las emisiones contaminantes. Además, el tamaño de la zona de recirculación depende del tamaño del estabilizador, por lo tanto, el rango de estabilidad disminuye a medida que el tiempo de residencia disminuya debido a una mayor velocidad o a un menor tamaño del estabilizador.

Los cuerpos romos pueden tener diferentes formas geométricas: cilindros, placas, tulipán, esfera, V-gutter, cubo, disco, triangular, etc. La geometría del cuerpo romo está relacionada con la estabilidad de flama por lo que se han realizado diversas investigaciones para estudiar su influencia en quemadores. Esquivia et al. [9] probaron dos diferentes formas de cuerpo romo: el primero con forma de disco y el segundo con forma de tulipán. Los resultados considerando el criterio de la zona de estela, indican que la flama de mejor estabilidad se logró con el cuerpo romo de forma tulipán, donde se inducía al flujo vórtices contra rotativos produciendo una recirculación del aire de inyección. Cuatro años más tarde, Esquivia y Escudí [10] presentaron un análisis de estabilidad de flama agregando el mismo cuerpo romo de forma tulipán para un quemador de flama premezclada; encontrando que la estabilidad de la flama también depende de la relación de velocidades de inyección del aire y del combustible.

Swetaprovo y Cetegen [11] realizaron un estudio experimental en flamas cónicas con cuerpo romo en forma de disco para determinar la relación de equivalencia en la que la flama es estable y no se apaga. Como resultado concluyeron que el aumento del flujo de combustible fuera de la zona de recirculación cambia la estructura de la flama, pero no influye en su estabilidad.

Por otro lado, estudios realizados por Tuttle et al. [12] en un conducto cerrado utilizando un cuerpo romo en forma triangular bidimensional, concluyeron en los resultados obtenidos que la flama es asimétrica y este comportamiento altera la estela. Ahmed y Ashwani [6] probaron 3 diferentes geometrías de cuerpo romo: cono 90, cono 120 y disco; cada uno de ellos en 4 diferentes diámetros y relación de bloqueo (la relación del área del cuerpo romo con respecto al área total del quemador). Colocaron los cuerpos romos en un quemador de flama difusiva con inyección de aire anular e inyección de combustible central, para el estudio utilizaron dos técnicas: medidas experimentales utilizando visualización y técnica de sonda Langmuir en conjunto con simulación en CFD. En sus resultados obtuvieron que al aumentar la relación de bloqueo del cuerpo romo se incrementa la estabilidad de la flama en el quemador. La forma de disco fue la que tuvo el mejor comportamiento respecto a las otras geometrías, ya que presentó la mayor temperatura de flama en la zona de recirculación. Concluyeron argumentando que la forma del cuerpo romo y la relación de bloqueo son los dos factores más importantes en la estabilidad de una flama.

Tong et al. [13], realizaron estudios en un quemador de flama premezclada, el cual tenía un canal anular junto con un cuerpo romo en forma cónica de 45 grados colocado en su centro. La inyección de mezcla aire y combustible era anular y central. En sus resultados concluyeron que la inyección central de aire o de combustible hace que la flama premezclada anular se estabilice por un cuerpo romo llegan a ser más inestable y fácil de apagarse.

La ubicación del cuerpo romo en el quemador también es importante para la estabilización de la flama, Tong et al. [14] investigaron en forma experimental y numérica el efecto de la posición del cuerpo romo en un quemador de flama difusiva. El quemador tenía un canal anular con un cuerpo romo en forma de disco ubicado en el centro. El aire se alimentaba en el conducto anular y el combustible (metano) en la tubería central. El cuerpo romo se ubicó en dos posiciones: 1) en la salida del quemador y 2) 10 mm arriba de la salida del quemador. En sus resultados concluyeron que el segundo caso era mejor para ampliar el rango de estabilidad de la flama, ya que formaba una zona de recirculación en forma de burbuja en la región interior, en la región exterior y la superficie adyacente a la pared del cuerpo romo, los cuales fomentaban una buena combustión.

Por otro lado, el cuerpo romo se utiliza para estabilizar la flama en un combustor de turbina de gas, estudios realizados por Devaraj et al. [15] incluyeron dos tipos de cuerpo romo: uno en forma de placa circular y otro en forma de sólido cilíndrico. El combustor tenía inyección de combustible central e inyección de aire anular, el cuerpo romo se colocó cerca de la entrada del combustor cilíndrico. En sus resultados concluyeron que la temperatura de combustión obtenida con el sólido cilíndrico era aproximadamente el doble que la obtenida con la placa circular, pero la caída de presión era significativamente mayor. Dos años más tarde, Sarath et al. [16] compararon en un micro combustor de metano dos casos: combustor con cuerpo romo en forma de cono y combustor sin cuerpo romo. Concluyeron su estudio resaltando la importancia de implementar un cuerpo romo y analizar el punto de su ubicación, ya que ubicarlo delante de la inyección de aire genera dos vórtices fijos que condujeron a un mejor proceso de mezclado y a una efectiva combustión, reduciendo los inquemados en la salida de la cámara de combustión.

Este estudio se enfoca en analizar la estabilidad de una flama en una cámara de combustión de gas LP utilizando por primera vez un cuerpo romo en forma de media esfera en la inyección de combustible, con esta investigación se espera obtener una zona de recirculación de mayor amplitud que aumente el tiempo de residencia de la mezcla aire-combustible, mejore el proceso de quemado y ubique a la zona de altas temperaturas en el centro de la cámara de combustión. El modelo numérico de la combustión se realizó utilizando CFD y se validó con datos de pruebas experimentales.

Desarrollo

Aparato experimental

La cámara de combustión se muestra en la figura 1 y tiene tres zonas que cumplen con diferentes funciones:

- Zona primaria:** esta tiene la función de anclar y estabilizar la flama; es donde se espera que se genere la recirculación. Para esta zona se emplea una placa perforada de 10 orificios con diámetro de 1.2 cm, en donde ingresa el 18% del aire inyectado.
- Zona intermedia:** su función es disminuir la temperatura de los gases permitiendo la combustión del CO o de cualquier otro hidrocarburo inquemado; esta zona cuenta con 5 orificios de inyección de aire perforados en el diámetro del tubo de flama a $L=18$ cm medidos desde el inicio de la cámara, los orificios tienen 0.476 cm de diámetro; esta zona inyecta el 42% del total de aire.
- Zona de dilución:** esta zona admite el aire remanente (40%) después de la combustión, enfría la pared y aporta una salida de flujo; esta zona tiene 5 orificios de 0.952 cm de diámetro perforados en el tubo de flama a $L=24$ cm medido desde el inicio de la cámara.

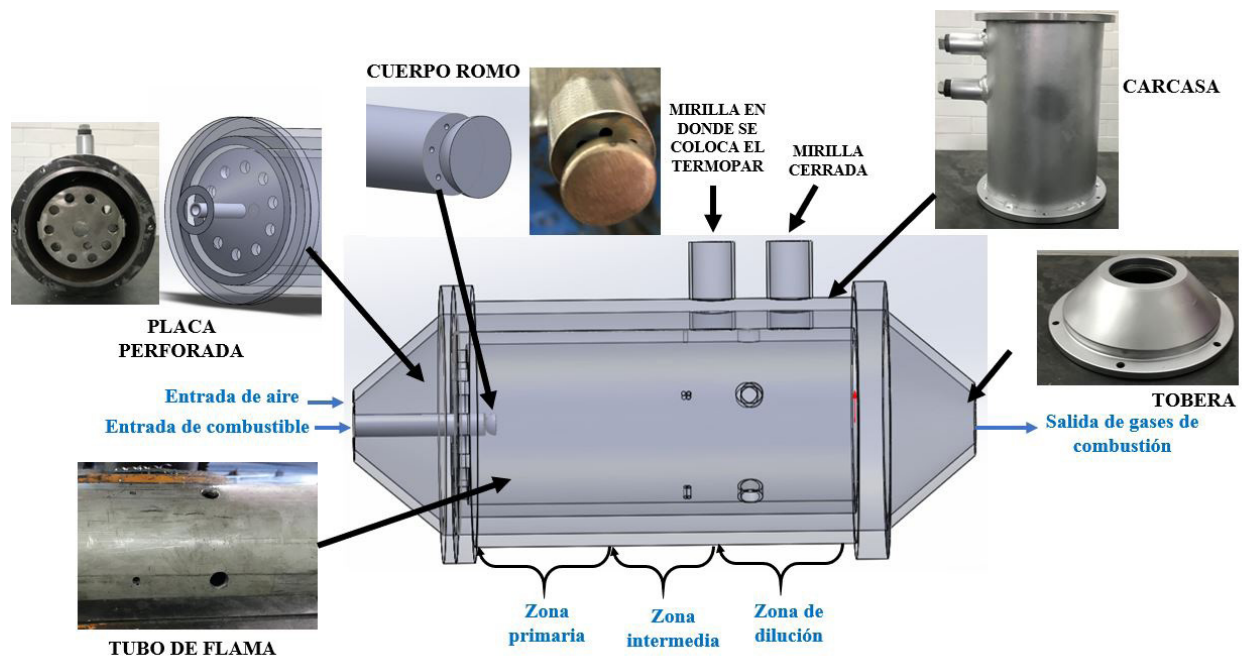


Figura 1. Esquema de la configuración experimental de la cámara de combustión, utilizando SolidWorks.

El inyector de combustible es de 1.4 cm de diámetro exterior, tiene 6 orificios ubicados en el área de la sección transversal para la inyección axial; el cuerpo romo en forma de media esfera se ubicó al centro de los orificios de inyección de combustible, el diámetro del cuerpo romo es 1.27 cm y la altura de 0.6 cm. El combustible utilizado fue gas LP.

La entrada de flujo de aire a la cámara de combustión se realiza a través de un difusor de 14 cm de ancho y 5.6 cm de largo; a la salida del difusor, el flujo de aire se divide en dos secciones: una parte se direcciona a la zona primaria utilizando la placa de orificios ubicada en $L=5.6$ cm medidos desde el inicio de la cámara, y la otra parte del flujo se direcciona hacia un conducto anular para ser inyectado en las zonas intermedia y de dilución de la cámara de combustión. El conducto anular se encuentra ubicado entre el tubo de flama de 10.2 cm de diámetro y 25.2 cm de longitud y la carcasa de 15.24 cm de diámetro y 26 cm de longitud.

La salida de los gases de combustión se realiza a través de una tobera con diámetro inicial del tubo de flama y 5.6 cm de longitud.

El flujo másico de combustible se controla utilizando un medidor de caudal másico Omega con una precisión de 1% y una presión máxima de gas de 1723.68 kPa. El flujo másico de aire se midió utilizando un tubo de Pitot y un manómetro, este se mantuvo constante en 158.33 kg/hr; mientras que el flujo de combustible se varió, iniciando con una relación de equivalencia de 0.1401 para el límite de flamabilidad pobre, en el cual la flama que se obtenía era estable. Todos los experimentos fueron realizados con confinamiento de flama debido a las condiciones de la cámara de combustión y bajo las condiciones atmosféricas con la temperatura constante 573.15 ± 3 K.

Para medir la temperatura de los gases de combustión se utilizó un termopar de tipo R (Platino-Rodio 13%) con una longitud de 30 cm, este termopar cuenta con una barra aisladora de cerámica y con una cubierta de cerámica; este se coloca en las mirillas de la cámara de combustión y cuenta con bordes de conexión a un medidor digital de temperatura.

El termopar se colocó en la mirilla 1 a una distancia axial de 21.5 cm de longitud medido a partir de la entrada al difusor como se muestra en la figura 2; el termopar se encuentra ubicado en $r=0$.

El rango de temperatura de operación del termopar es de 0-1723.15 K, el error en la temperatura medida es ± 1.5 K $\pm 0.25\%$. El tiempo en el que puede someterse al rango de temperaturas dado anteriormente puede ser hasta de 24 horas.

Termografía

Una cámara termográfica infrarroja (Fluke) fue utilizada para visualizar la distribución de temperaturas en la salida de la cámara de combustión. La cámara termográfica tiene una resolución espacial de 320x240.

Para mantener las condiciones de equilibrio termodinámico, la flama se mantuvo estable durante 5 minutos.

La figura 3 muestra la imagen termográfica de la sección transversal de la cámara de combustión, se observa que la máxima temperatura alcanzada es 555.45 K; además, se visualiza que existen puntos fríos debido a la entrada de aire a través de los orificios de la placa perforada.

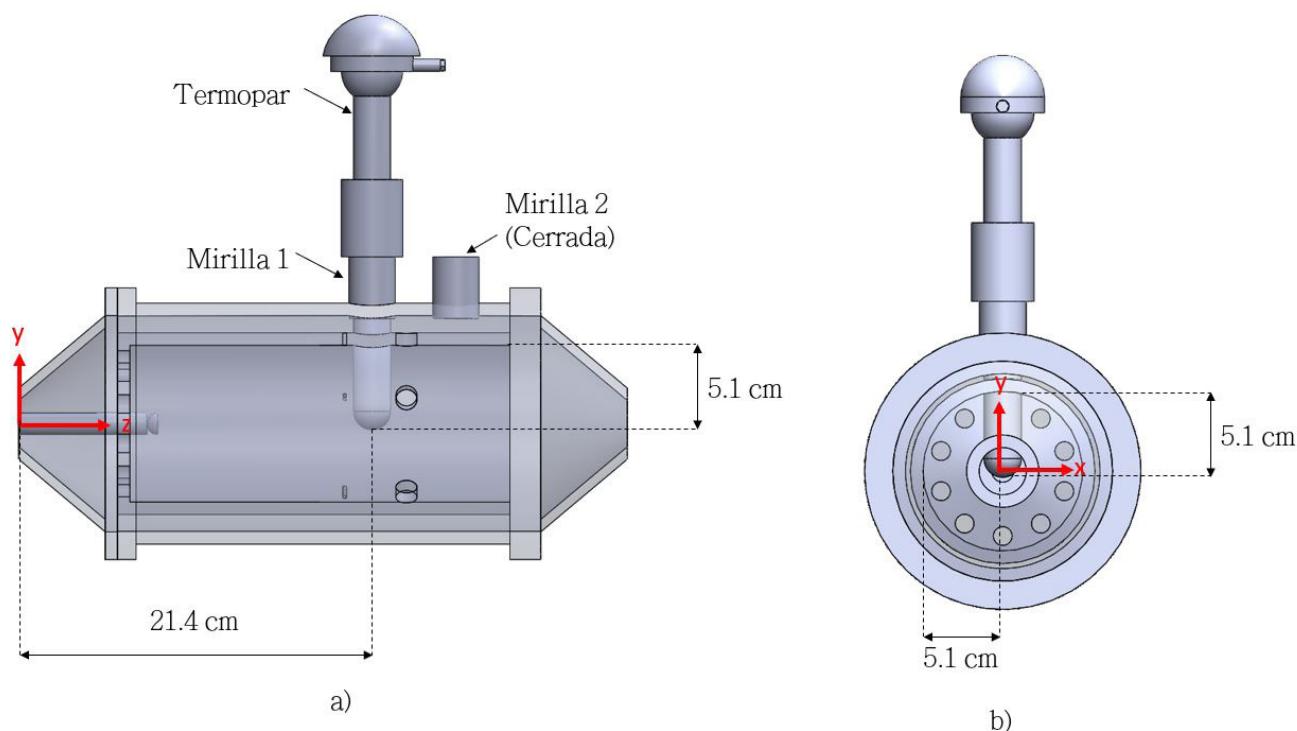


Figura 2. Vistas del prototipo de cámara de combustión, utilizando SolidWorks: a) Vista longitudinal, plano (y, z); b) Vista transversal, plano (x, y).

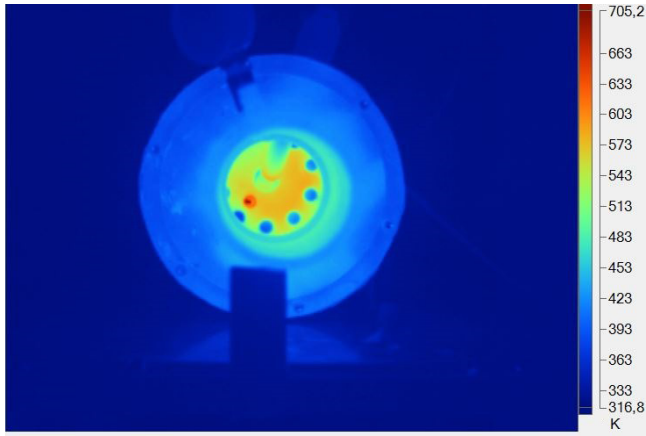


Figura 3. Imagen termográfica de la cámara de combustión.

Ecuaciones de conservación

De acuerdo a Claramunt et al. [17], la dinámica de fluidos y los fenómenos de transferencia de calor y masa en sistemas de combustión están gobernados por la ecuación de los gases ideales, continuidad, momentum, energía y la ecuación de transporte de especies, representadas en las ecuaciones 1 a la 5 respectivamente, éstas son descritas por Veynante y Vervisch [18].

$$PV = mRT \quad \text{Ecuación 1}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad \text{Ecuación 2}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \quad \text{Ecuación 3}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} = [u_i (\rho e + \rho)] = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_i} - \sum_k u_j (\tau_{ij})_{eff} \right] \quad \text{Ecuación 4}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i Y_n) = -\frac{\partial J_{n,i}}{\partial x_i} + R_n \quad \text{Ecuación 5}$$

Modelo de turbulencia

De acuerdo con Branley y Jones [19], es esencial entender el comportamiento del flujo turbulento para diseñar dispositivos de ingeniería tales como turbinas de gas, hornos y motores de combustión interna.

El modelo de primer orden k-ε, introducido por Launder y Spalding [20] es el modelo de turbulencia más utilizado, especialmente para aplicaciones industriales, y se ha implementado dentro de códigos CFD comerciales, es numéricamente robusto, económico en tiempo de proceso y se ha probado para un amplio rango de flujos turbulentos. Frassoldani et al. [21] concluyeron en su investigación que utilizando el modelo k-ε estándar se obtiene una buena aproximación con los resultados experimentales, especialmente para valores medios escalares de temperatura y velocidad. De igual ma-

nera, Alfaro Ayala et al. [22] afirman que el modelo k-ε tiene una gran aplicación en flujos de ingeniería prácticos debido a su razonable aproximación para un amplio rango de flujos turbulentos.

Para el modelo k-ε se utilizan dos ecuaciones una que representa a la energía cinética turbulenta (ecuación 6) y otra para la tasa de disipación (ecuación 7):

$$\frac{\partial}{\partial X_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial K}{\partial X_i} \right] G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M = \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho k u_j) \quad \text{Ecuación 6}$$

$$\frac{\partial}{\partial X_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial X_i} \right] \frac{\varepsilon}{K} (C_{1\varepsilon} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \varepsilon u_j)$$

Ecuación 7

Modelo de química

Fracción de Mezcla

Las flamas de difusión constituyen una clase específicas de problemas de combustión donde el combustible y el oxidante no son mezclados antes de entrar a la cámara de combustión. De acuerdo con Claramunt et al. [17], para las flamas de difusión, el mezclado dentro de la zona de reacción debe ser lo suficientemente rápido para que la combustión se realice; debido a esto, se debe describir apropiadamente el proceso de mezclado utilizando un escalar conservado no reactivo denominado fracción de mezcla (Z). La fracción de mezcla representa el nivel de mezclado del aire y el combustible y cambia por la convección y la difusión, pero no reacciona. Se utiliza para representar flujos turbulentos donde la convección supera a la difusión molecular. La ecuación de fracción de mezcla en promedio Favre (ecuación 8) es:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \bar{f}) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_i} \frac{\partial \bar{f}}{\partial x_i} \right] \quad \text{Ecuación 8}$$

Modelo Laminar Flamelet

Modelar la interacción entre el campo de flujo y la ecuación de transporte de especies para cada reacción presente en el mecanismo de cinética química es un proceso complicado, debido al excesivo tiempo computacional empleado. Liew y Bray [23] observaron que, en el caso de la combustión turbulenta, el modelo laminar flamelet desarrollado por Peters [24] tiene la ventaja de incorporar la química detallada fácilmente en los cálculos de la flama, Fureby [25] afirma que este reduce el tiempo computacional empleado en la simulación numérica. De acuerdo con Karatas y Gülder [26], el modelo laminar flamelet es uno de los más ampliamente utilizados para modelar flamas difusivas turbulentas.

El modelo laminar flamelet es un modelo de desbalance que utiliza la fracción de la mezcla para considerar las reacciones químicas en el flujo turbulento. Para cuantificar la cercanía con el balance el modelo utiliza la disipación escalar (ecuación 9) que, de acuerdo con Peters [27] representa el estiramiento de la flama.

$$x = 2D|\nabla f|^2 \quad \text{Ecuación 9}$$

Las propiedades como temperatura, fracciones másicas y la densidad son estandarizadas en términos de dos variables: la fracción de la mezcla y la disipación escalar. El promedio de las variables mencionadas en un flujo turbulento se determina utilizando la función de densidad de probabilidad.

El mecanismo de cinética química utilizado en el modelo laminar flamelet de la presente investigación fue desarrollado por la Universidad de San Diego [28], este mecanismo cuenta con 58 especies (dentro de las cuales están presentes las especies contaminantes CO y CO₂) y 270 reacciones.

Geometrías y condiciones de frontera

La cámara de combustión es simétrica, por lo que sólo se utilizó la mitad del volumen de control para la simulación en 3D, como se muestra en la figura 4. El número de nodos fue de 789219 con elementos tipo tetraedro. La malla que se generó en el presente estudio indica una asimetría estadística de 0.65, la cual resulta ser una malla con calidad buena.

Las condiciones utilizadas para las simulaciones se muestran en la Tabla 1, estas se tomaron de las pruebas experimentales realizadas en el Laboratorio de Aerodinámica de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias Navales de la Universidad Veracruzana. El flujo másico de aire se mantuvo constante a 158.33 kg/hr con una presión manométrica de 5171.07 Pa y una temperatura de 301.5 K; el flujo de combustible tomó 5 valores diferentes, que se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Condiciones de frontera para la simulación de la cámara de combustión.

Caso	Combustible		
	Flujo másico (kg/hr)	Presión (Pa)	Temperatura (K)
I	1.31418328	5171.07	300
II	1.69748673	5171.07	300
III	2.1060	5171.07	300
IV	2.560968	6205.28	300
V	2.9358	6205.28	300

Resultados

Zona de Recirculación

El plano longitudinal de las líneas de flujo que generan recirculación se presenta en la figura 5 y se ubica a una distancia $x=0.002$ m medido a partir de $r=0$. Se visualiza que el flujo de combustible contribuye a la formación de recirculación o zonas de baja velocidad corriente abajo del cuerpo romo, también se observa que al aumentar el flujo de combustible la zona de recirculación desaparece, hasta que en el caso V se vuelve nula. La colocación del termopar en la zona intermedia no influye en la generación de la zona de recirculación para ninguno de los cinco casos estudiados. En lo que respecta a la interacción de la aerodinámica con la flama, la zona de recirculación generada por la implementación del cuerpo romo ayudará a que se incremente el tiempo de residencia del combustible y mejore el proceso de quemado, la temperatura en las zonas de menor velocidad incrementarán y viceversa, en zonas de mayor velocidad disminuirán

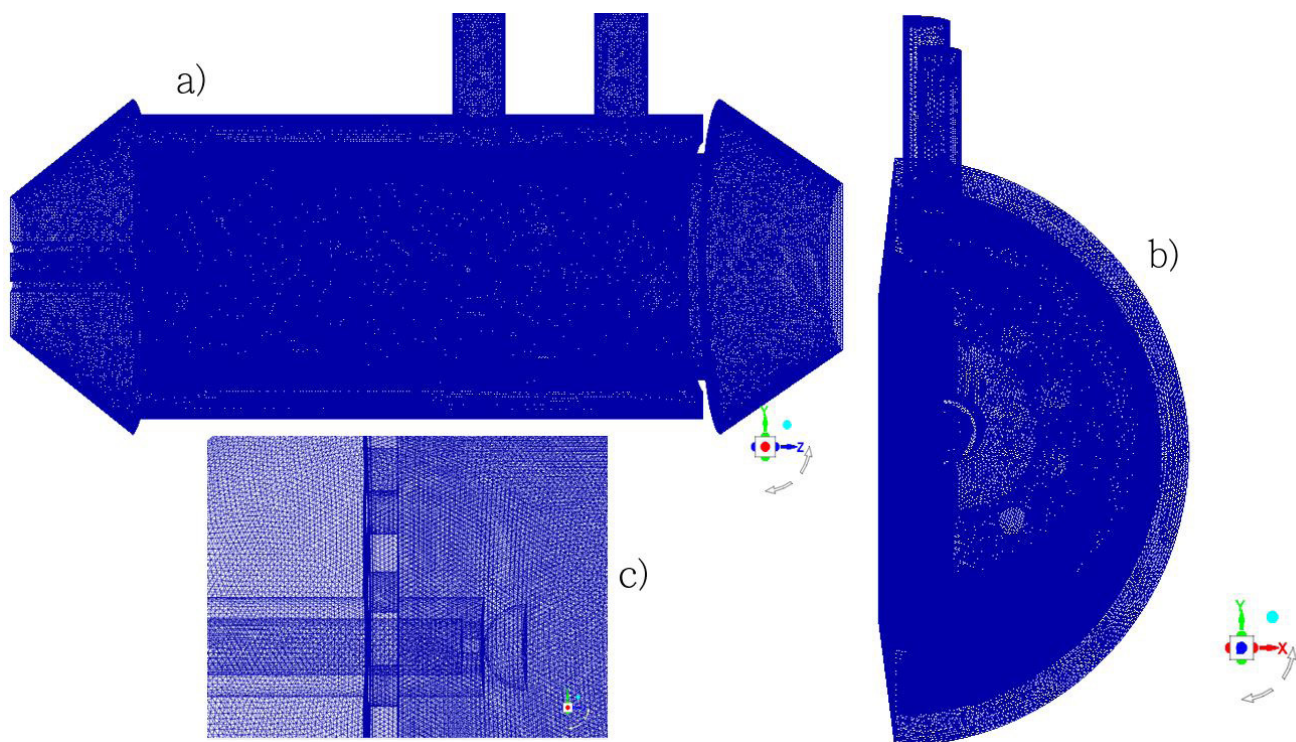


Figura 4. Mallado de la cámara de combustión: a) Vista longitudinal, plano (y, z); b) Vista transversal, plano (x, y); c) Mallado de cuerpo romo, plano (y, z)

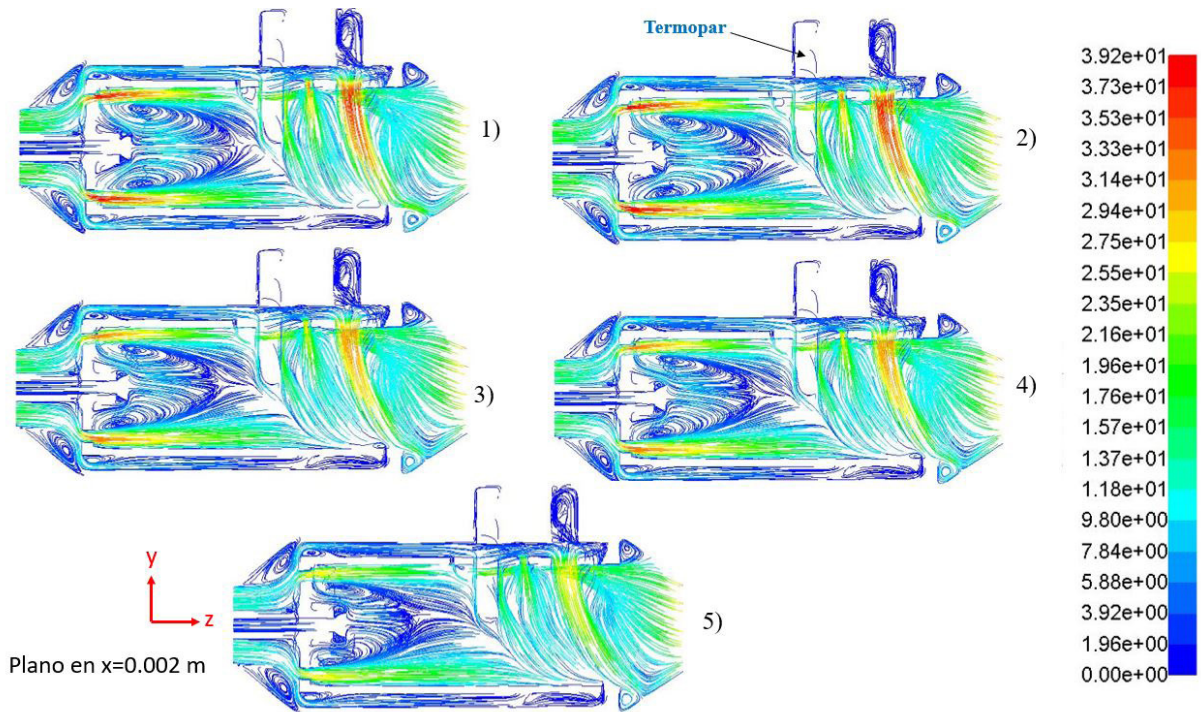


Figura 5. Perfil longitudinal de líneas de flujo en m/s: 1) caso I, 2) caso II, 3) caso III, 4) caso IV y 5) caso V.

teniendo como efecto favorable que la zona de altas temperaturas se ubique en el centro de la cámara de combustión y se aleje de las paredes.

Validación del Modelo

La figura 6 muestra la comparación de los valores de temperatura obtenidos experimental y numéricamente variando la relación de equivalencia (ϕ). Los valores experimentales de la temperatura se obtuvieron en $L=21.4$ cm (figura 2); se observa que los valores obtenidos en el modelo numérico tienen comportamiento similar al obtenido en las pruebas experimentales. La mayor diferencial de temperaturas que se obtuvo en los dos modelos fue para el caso de $\phi=0.14$, con una diferencial de temperatura de 8 grados.

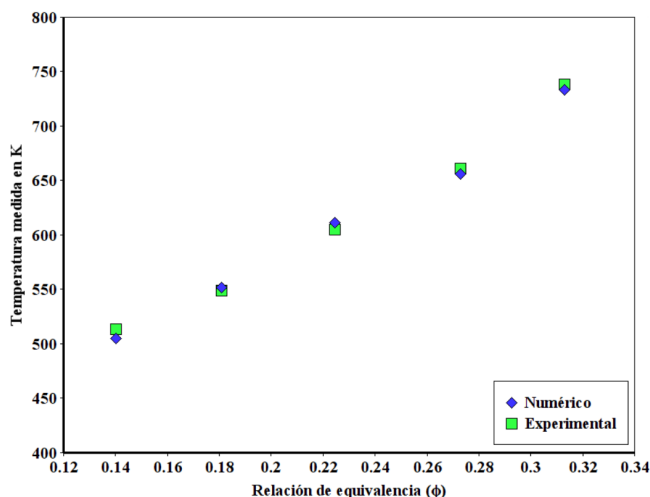


Figura 6. Comparación de los valores de temperatura en Kelvin obtenidos en el modelo experimental vs. modelo numérico variando la relación de equivalencia medidos en $L=21.4$ cm.

Postproceso

Una vez validado el modelo numérico con los datos de pruebas experimentales se realizó el postproceso para obtener los perfiles de las emisiones contaminantes de CO y CO₂.

La figura 7 muestra el perfil longitudinal de la fracción molar de CO en la cámara de combustión, en un plano longitudinal ubicado a una distancia $x=0.002$ m medido a partir de $r=0$. Se observa que la mayor formación de CO se presenta durante la inyección de combustible y se incrementa para la mayor relación de equivalencia (caso V), este incremento se debe al carbono presente en el combustible; en ninguno de los cinco casos se encontró formación de CO más allá de la zona primaria de inyección de combustible ya que la zona intermedia de acuerdo con Lefebvre y Ballal [29], cumple con su función de inyectar aire para completar la combustión del monóxido de carbono.

Por el lado de las emisiones de CO₂, en la figura 8 se muestra el perfil longitudinal de la fracción molar de CO₂ en la cámara de combustión, el plano se encuentra a una distancia $x=0.002$ m medido a partir de $r=0$. Se observa que la mayor fracción molar de CO₂ se encuentra en la zona primaria, este efecto se origina por la existencia del CO en esa zona, el cual reacciona con el O₂ del flujo de aire que se inyecta en la placa de orificios para formar CO₂. Durante su paso por la zona intermedia, la fracción molar de CO₂ se reduce debido a la disminución que se presenta del CO en esa zona; permitiendo que en la zona de dilución disminuya aún más la formación de CO₂ a la salida de la cámara de combustión.

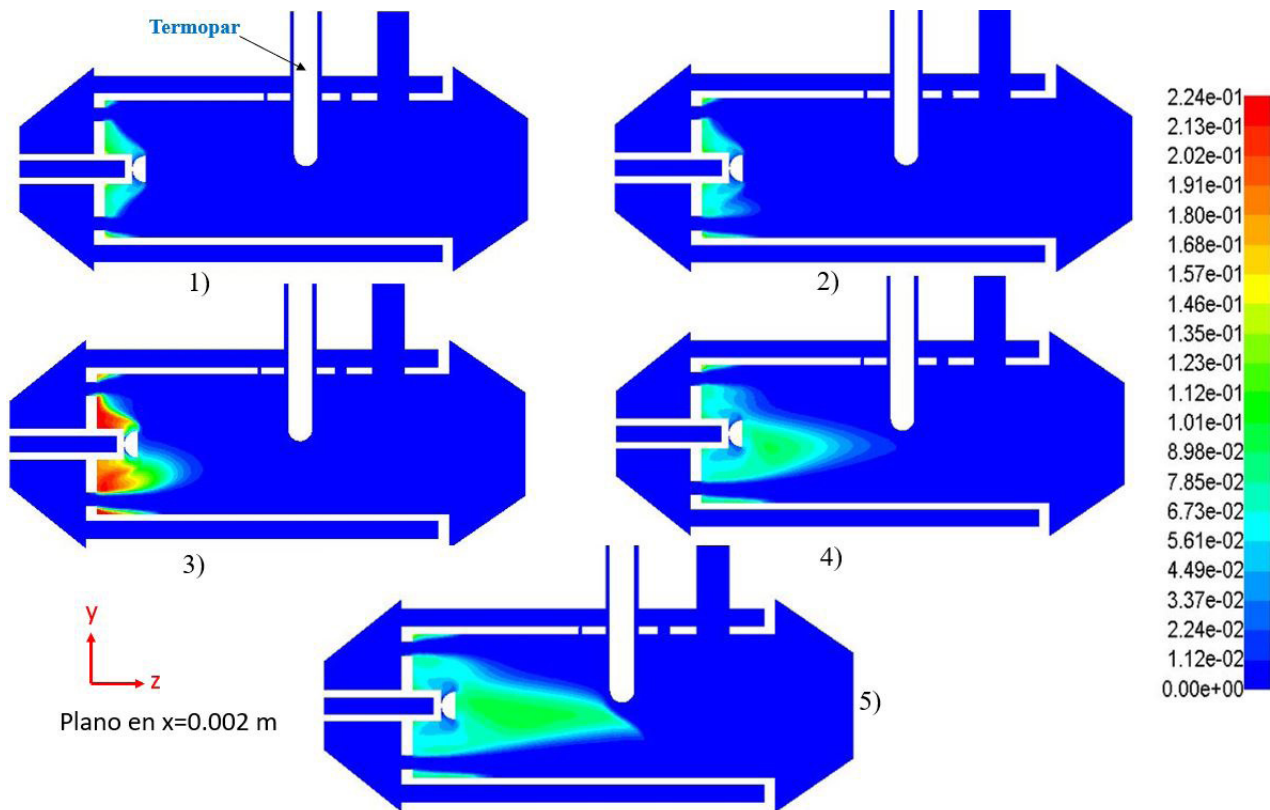


Figura 7. Perfil longitudinal de la fracción molar de CO: 1) caso I, 2) caso II, 3) caso III, 4) caso IV y 5) caso V.

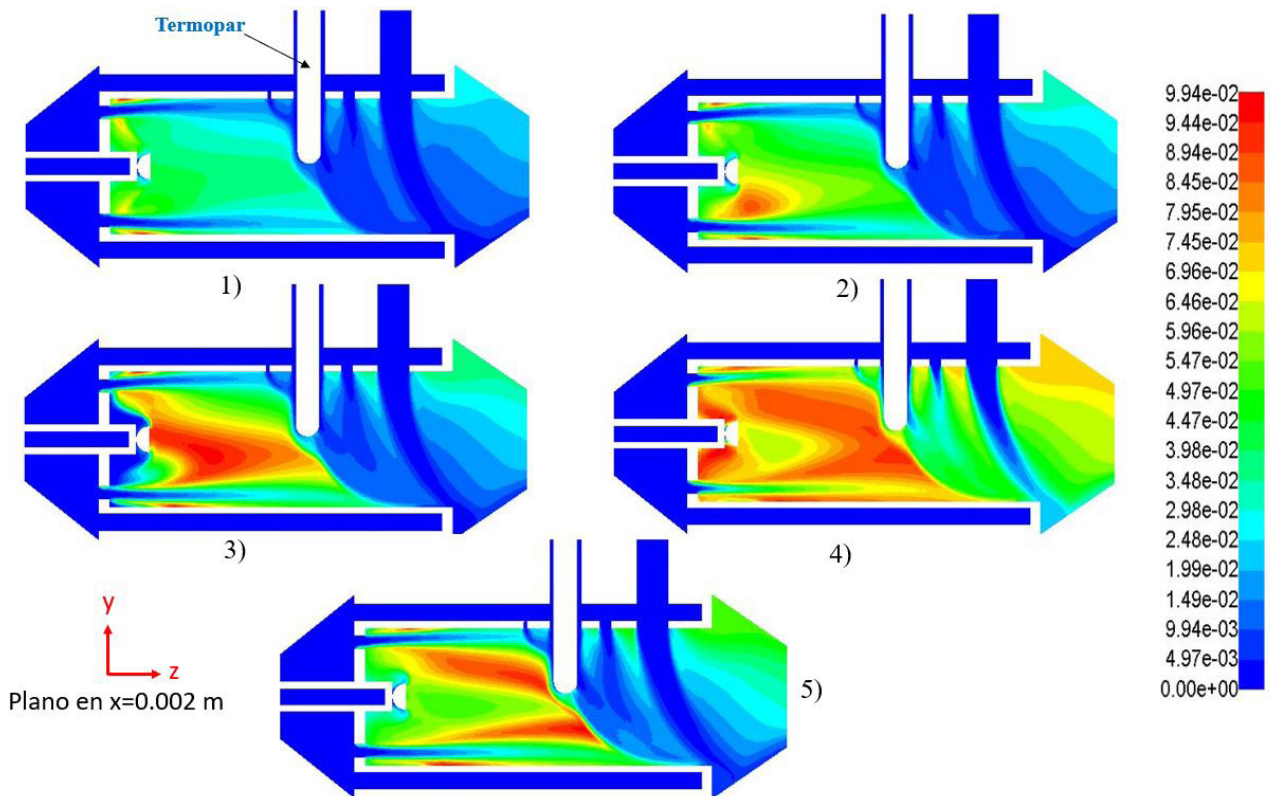


Figura 8. Perfil longitudinal de la fracción molar de CO₂: 1) caso I, 2) caso II, 3) caso III, 4) caso IV y 5) caso V.

Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos se concluye que implementar un cuerpo romo en forma de media esfera en la inyección de combustible genera una zona de recirculación de flujo de bajas velocidades que favorece el proceso de combustión y estabiliza la flama; este comportamiento se presenta a relaciones de equivalencia cercanas al límite de flamabilidad pobre, ya que al incrementar la relación de equivalencia se observa que la zona de recirculación se atenúa, presentando la tendencia de comportamiento a flujo longitudinal. Por el lado de las emisiones contaminantes, la recirculación favoreció el proceso de combustión ya que se encontraron cero emisiones de CO a partir de la zona intermedia y la formación de CO₂ tendió a disminuir a la salida de la cámara de combustión. En la imagen termográfica presentada en los resultados experimentales se observa que la zona de mayor temperatura se presenta en el centro de la cámara de combustión y tiende a disminuir conforme incrementa el radio de ésta, hasta obtener regiones de baja temperatura cerca del tubo de flama y de la carcasa de la cámara de combustión, lo que representa que no existirá calentamiento en el dispositivo de combustión. En la presente investigación se confirma que la dinámica computacional de fluidos es una herramienta poderosa ya que, los resultados obtenidos en el modelo numérico tienen comportamiento similar a los obtenidos durante las pruebas experimentales, esto permite realizar diseños de dispositivos de combustión sin la necesidad de construir prototipos antes de obtener un diseño factible.

Referencias

- [1] Shanbhogue, S. J., Husain, S., & Lieuwen, T. (2009). Lean blowoff of bluff body stabilized flames: Scaling and dynamics. *Progress in Energy and Combustion Science*, 35, 98-120.
- [2] Kariuki, J., Dawson, J. R., & Mastorakos, E. (2012). Measurements in turbulent premixed bluff body flames close to blow-off. *Combustion and Flame*, 159, 2589-2607.
- [3] Longwell, J. P., Frost, E. E., & Weiss, M. A. (1953). Flame Stability in Bluff Body Recirculation Zones. *Engineering and Process Development*.
- [4] Tejada del Cueto, M. E., Zúñiga, M. O., Rodríguez, C. M., Urías, L. F., May, A. L., & Romero, C. L. (2015). Alineamiento de flama usando placas perforadas Tándem en una cámara de combustión de gas LP. *Ingeniería Mecánica, Tecnología y Desarrollo*, 5, 293-302.
- [5] Caetano, N. R., & Silva, L. F. (2015). A comparative experimental study of turbulent non premixed flames stabilized by a bluff body burner. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 63, 20-33.
- [6] Ahmed, E. E., & Ashwani, K. G. (2011). Swirling distributed combustion for clean energy conversion in gas turbine applications. *Applied Energy*, 88, 3685-3693.
- [7] Penner, S. S., & Williams, F. (1957). Recent studies on flame stabilization of premixed turbulent gases. *Applied Mechanics Review*, 229-236.
- [8] Yang, X., He, Z., Shikuj, & Tan, H. (2017). "Combustion characteristics of bluff body turbulent swirling flames with coaxial air microjet". *Energy & Fuels*, 14306-14319.
- [9] Esquiva, D., Nguyen, H. T., & Escudie, D. (2001). Influence of a Bluff-body Shape on the Stabilization Regime of Non-Premixed Flames. *Combustion and Flame*, 127, 2167-2180.
- [10] Esquiva, D., & Escudie, D. (2005). A way of considering the influence of the Bluff-body geometry on the nonpremixed flame stabilization process. *Combustion and Flame*, 299-302.
- [11] Swetaprovo, C., & Cetegen, B. (2008). Blowoff characteristics of bluff-body stabilized conical premixed flames with upstream spatial mixture gradients and velocity oscillations. *Combustion and Flame*, 153(4), 616-633.
- [12] Tuttle, S. G., Chaudhuri, S., Kopp-Vaughan, K. M., Jensen, T. R., Cetegen, B. M., Renfro, M. W., & Cohen, J. M. (2013). Lean Blowoff Behavior of Asymmetrically-Fueled Bluff Body- Stabilized Flames. *Combustion and Flame*, 160, 1677-1692.
- [13] Tong, Y., Li, M., Thern, M., Klingmann, J., Weng, W., Chen, S., & Li, Z. (2017). Experimental Investigation on Effects of Central Air Jet on the Bluff-body Stabilized Premixed Methane air Flame. *Energy Procedia*, 107, 23-32.
- [14] Tong, Y., Liu, X., Chen, S., Li, Z., & Klingmann, J. (2018). Effects of the position of a bluff-body on the diffusion flames: A combined experimental and numerical study. *Applied Thermal Engineering*, 131, 507-521.
- [15] Devaraj, P., Rajendran, P., & Maran, P. (2014). Effects of inlet parameters on the performance of bluff body combustion. *International Journal of Innovative Reserch in Science Engineering and Technology*.
- [16] Sarath, C. G., Sreejith, M., & Reji, R. V. (2016). Flow field predictions of bluff body introduced micro combustor. *Procedia Technology*.
- [17] Claramunt, K., Cònsul, R., Carbonell, D., & Pérez Segarra, C. (2006). Analysis of the Laminar Flamelet Concept for Nonpremixed Laminar Flames. *Combustion and Flame*, 145, 845-862.
- [18] Veynante, D., & Vervisch, L. (2002). Turbulent Combustion Modeling. *Progress in Energy and Combustion Science* (28), 193-266.
- [19] Branley, N., & Jones, P. (2001). Large eddy Simulation of a Turbulent Non-Premixed Flame. *Combustion and Flame*, 1914-1934.
- [20] Launder, B., & Spalding, D. (1972). *Lectures in Mathematical Models of Turbulence*. Academic.
- [21] Frassoldati, A., Frigerio, S., Colombo, E., Inzoli, F., & Faravelli, T. (2005). Determination of NOx Emissions from Strong Swirling Confined Flames with an Integrated CFD-based Procedure. *Chemical Engineering Science*, 2851-2869.

- [22] Ayala, J. A., Muñoz, A. G., Ávila, J. M., López, M. F., Amezcua, A. C., & Gonzalez, A. M. (2011). Analysis of the flow in the Combustor-Transition Piece Considering the Variation in Fuel Composition. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 1-12.
- [23] Liew, S. K., & Bray, K. N. (1984). A Stretched Laminar Flamelet Model of Turbulent Nonpremixed Combustion. *Combustion and Flame*, 56, 199-213.
- [24] Peters, N. (1984). Laminar Diffusion Flamelet Models in Non Premixed Turbulent Combustion. *Progress in Energy and Combustion Science*, 10, 313-339.
- [25] Fureby, C. (2008). Towards the Use of Large Eddy Simulation in Engineering. *Progress in Aerospace Sciences*, 381-396.
- [26] Karatas E., A., & Gülder L., Ö. (2012). Soot Formation in High Pressure Laminar Diffusion Flames. *Progress in Energy and Combustion Science*, 38, 818-845.
- [27] Peters, N. (2009). Multiscale Combustion and Turbulence. *Proceedings of the Combustion Institute*, 32(1), 1-25.
- [28] Chemical-Kinetic Mechanisms for Combustion Applications", San Diego Mechanism web page, Mechanical and Aerospace Engineering (Combustion Research), University of California at San Diego (<http://combustion.ucsd.edu>).
- [29] Lefebvre, A. H., & Ballal, D. R. (2010). *Gas Turbine Combustion Alternative Fuels and Emissions*. Taylor and Francis Group.