

ANÁLISIS DE LA VELOCIDAD DE LA MEZCLA A TRAVÉS DE UN QUEMADOR DE FLAMA PARCIALMENTE PREMEZCLADA: MODELACIÓN, SIMULACIÓN Y VALIDACIÓN

ANALYSIS OF THE SPEED OF THE MIXTURE THROUGH A PARTIALLY PREMIXED FLAME BURNER: MODELING, SIMULATION AND VALIDATION

Melissa K. Zapatero Gutiérrez

Tecnológico Nacional de México en Celaya
melissa_zapatero@icloud.com

Eleazar Álvarez Chávez

Mabe TyP
eleazar.alvarez@mabe.com.mx

Luis Ballesteros Martínez

Mabe TyP
luis.ballesteros@mabe.com.mx

José Martín Medina Flores

Tecnológico Nacional de México en Celaya
martin.medina@itcelaya.edu.mx

Resumen

El estudio de la velocidad de la mezcla es parte fundamental del diseño de quemadores para evitar problemas de combustión. El objetivo de la investigación fue predecir la velocidad de la mezcla, mediante la modelación, para contribuir a la mejora de la seguridad y el desempeño de los nuevos quemadores. Se desarrolló el modelo teórico, la simulación de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) y la validación de la velocidad de la mezcla metano-oxígeno a través del quemador. El modelo teórico es unidimensional. La simulación se realizó en un *software* comercial. La medición experimental que se presenta es la Velocimetría de Imágenes de Partículas (PIV). Se obtuvo la correlación entre el modelo teórico y la simulación CFD de 0.99; los resultados experimentales y la simulación mostraron

una diferencia promedio de 0.3 m/s en relación con la velocidad del aire primario y secundario, y la salida de mezcla.

Palabra(s) Clave: Dinámica de Fluidos Computacional, modelación teórica, parcialmente premezclado, Velocimetría de Imágenes de Partículas.

Abstract

The study of the mixture velocity is a fundamental part for burners design to avoid combustion problems. The goal of the research was to predict the mixture velocity through modeling, to contribute to safety and performance improvement of new burners. The theoretical model, the simulation of Computational Fluid Dynamics (CFD) and the validation of the methane-oxygen mixture velocity through the burner were developed. The theoretical model is one-dimensional. The simulation was done using commercial software. The experimental measurement presented is the Velocimetry of Particle Images (PIV). The correlation between the theoretical model and the CFD simulation of 0.99 was obtained; the experimental results and the simulation showed an average difference of 0.3 m/s in relation to the primary and secondary air velocity, and the mixing output.

Keywords: *Computational Fluid Dynamics, partially premixed, Particle Image Velocimetry, theoretical modeling.*

1. Introducción

Actualmente, los quemadores para electrodomésticos evolucionan junto con el producto mismo. El diseño de un quemador no sólo debe cumplir con la función de mezclado del combustible con el oxidante para la combustión, también deben cumplir con los estándares de calidad y seguridad específicos de cada marca, así como también, normas internacionales de seguridad y desempeño. Por ello, el objetivo de la investigación reportada era lograr predecir la velocidad de la mezcla, mediante la modelación, para contribuir a la mejora de la seguridad y el desempeño de los nuevos quemadores desde su diseño.

El tema de la mejora de los quemadores, tanto en seguridad como en desempeño, es de vital importancia industrial ya que da competitividad a los productos de las

diferentes marcas y su producción tiene impactos relevantes en sus costos de producción.

Para este artículo se analizó el quemador de una secadora de ropa a gas, las cuales obedecen la norma ANSI Z21.5.1, desarrollada por la CSA (Asociación Canadiense de Estándares), los criterios de desempeño como los definidos por el Informe del consumidor de USA., y las tasas de eficiencia energética establecidas por el Departamento de Energía de USA.

Parr [1973], proporciona una explicación detallada del funcionamiento de los quemadores y sus características. Se observa que los quemadores parcialmente premezclados generalmente se utilizan con fines de estabilidad y seguridad, ya que ayudan a evitar que la llama regrese o se levante, así como a la coloración amarilla; los cuales son los principales problemas de una mala combustión [Giauque, Selle, Poinot, 2005], todos ellos relacionados con la mecánica de la mezcla.

Hoy en día, existe un gran número de estudios documentados que utilizan la modelación, simulación CFD (Dinámica de Fluidos Computacional) y la validación PIV (Velocimetría de imágenes de partículas), para el diseño o análisis de la gran variedad de aplicaciones de quemadores, como quemadores industriales, turbinas aeroespaciales, estufas para cocinar, etc. Sin embargo, no se encontraron artículos científicos o trabajos de tesis, donde se utilizará esta metodología para el diseño de secadoras de ropa; tampoco guías y/o criterios de diseño para que los quemadores de gas puedan operar de manera segura y confiable.

Yun Tao Chan [2015], Namkhat y Jugjai [2010] y Agudelo y Salinas [2010] relizaron estudios teóricos relacionados con quemadores. Ghadamgahi et al. [2018], Enagi, Al-attab y Zainal [2017], Ruiz-Mesa y García [2015], realizaron modelos teóricos para analizar el flujo y la combustión en componentes con regímenes de premezcla. Por otro lado, Mansour et al. [2017] y Makmool et al. [2007] reportan el uso de la técnica experimental PIV para analizar el comportamiento de los componentes mencionados anteriormente.

El presente trabajo plantea que con el conocimiento de los parámetros que rigen la mecánica de la mezcla sería posible diseñar quemadores en los que se reduzcan

problemas de seguridad o desempeño. La manipulación de los modelos permitiría obtener quemadores más eficientes desde el punto de vista del diseño. En general, sería posible obtener el quemador óptimo para la aplicación.

El diseño de la investigación, que se describe en el apartado siguiente, se fundamenta, sobre todo, en la modelación teórica y la simulación numérica, más que en el ensayo y error que puede resultar muy ineficiente y costoso.

2. Metodología

Con el propósito de lograr el objetivo de la investigación se hizo el benchmarking de quemadores de marcas competidoras, se realizó la modelación teórica de la mezcla que resultó insuficiente para el análisis integral del fenómeno, por lo que se realizó la modelación de la dinámica de fluidos computacional, que utiliza el método de análisis de elemento finito, lo que arrojó información más precisa sobre la mecánica de la mezcla. Lo anterior permitió la simulación del comportamiento de la mezcla dentro del quemador y también la observación del arrastre de aire primario y secundario. Los datos obtenidos permitirán la mejora del quemador. El enfoque principal de la investigación fue lograr la mejora del quemador a partir de un diseño con base en la modelación matemática y la simulación más que un proceso empírico por ensayo y error, que puede llevar al abuso ineficiente e ilimitado de recursos.

Modelo teórico

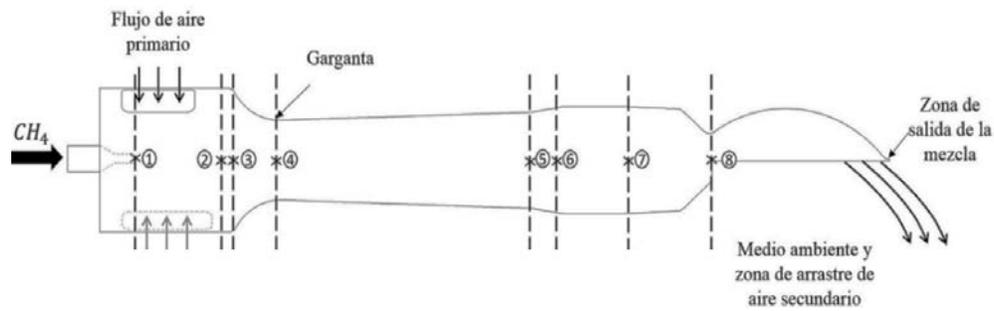
El modelo teórico del quemador, simplificado a una sola dimensión, se puede estudiar utilizando la ecuación general de la energía, ecuación 1.

$$\frac{P_1}{\rho_1 g} + z_1 + \frac{\bar{V}_1^2}{2g} + h_A - h_R - h_L = \frac{P_2}{\rho_2 g} + z_2 + \frac{\bar{V}_2^2}{2g} \quad (1)$$

El modelo se discretizó en ocho puntos situados a lo largo del eje horizontal longitudinal que atraviesa el centro de la esprea, figura 1.

A continuación, se muestran las ecuaciones deducidas a partir de la ecuación 1, para obtener la velocidad en el punto n (puntos identificados con números en la

figura 1), donde es la presión manométrica, la densidad, la velocidad, en este trabajo hace referencia únicamente a las pérdidas por fricción, las pérdidas menores se integran a las ecuaciones por medio de la variable que es el coeficiente de resistencia específico para la sección de análisis. Coeficientes que se obtienen de los diagramas de Moody [Mott, 2006].



Fuente: Elaboración propia.

Figura 1 Esquema del modelo unidimensional del quemador.

A partir de la ecuación 3 y hasta la 7, se considera que la presión en los puntos evaluados es la misma. Es por eso que los términos de presión se omiten a partir de la ecuación mencionada, ya que al hacer la suposición de que tienen el mismo valor, la diferencia entre ambos es igual a cero. Cabe resaltar que lo mencionado en estas líneas es una idealización realizada con el fin de obtener un valor cuantitativo para comparar y validar con los valores obtenidos en la simulación CFD, los cuales se muestran más adelante:

- Cuando $n = 1$ y 2 :

$$\bar{V}_n = \sqrt{2 \left(\frac{P_{n-1}}{\rho_{n-1}} - \frac{P_n}{\rho_n} \right) + \bar{V}_{n-1}^2 - h_{L_{(n-1) \rightarrow n}}(2g)} \quad (2)$$

- Cuando $n = 3$ y 4 :

$$\bar{V}_n = \sqrt{\frac{\bar{V}_{n-1}^2 - h_{L_{(n-1) \rightarrow n}}(2g)}{(1+k)}} \quad (3)$$

- Cuando $n = 5$:

$$\bar{V}_n = \sqrt{\frac{h_{L_{(n-1) \rightarrow n}}(2g)}{\frac{A_n^2}{A_{n-1}^2} (1-k) - 1}} \quad (4)$$

- Cuando $n = 6$ y 7 :

$$\bar{V}_n = \frac{A_{n-1}\bar{V}_{n-1} + A_n\sqrt{V_{n-1}^2(1-k) - h_{L_{(n-1) \rightarrow n}}(2g)}}{2A_n} \quad (5)$$

- Cuando $n = 7$:

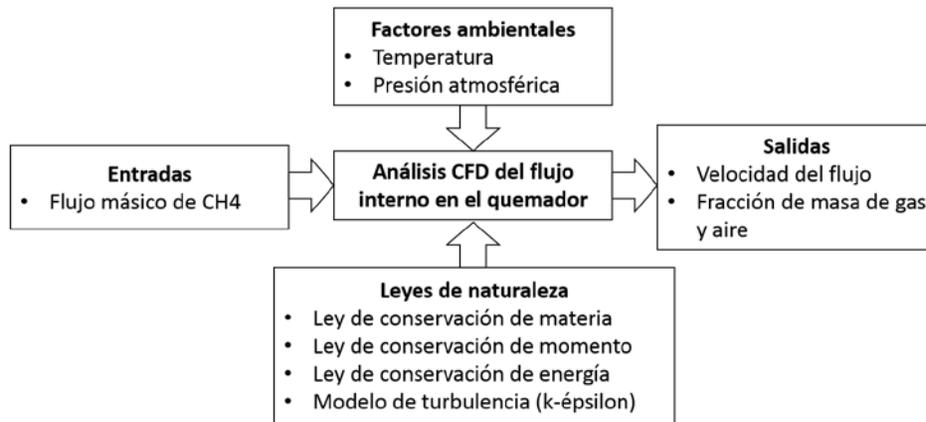
$$\bar{V}_n = \frac{A_{n-1}\bar{V}_{n-1} + A_n\sqrt{\bar{V}_{n-1}^2 - h_{L_{(n-1) \rightarrow n}}(2g)}}{2A_n} \quad (6)$$

- Cuando $n = 8$:

$$\bar{V}_n = \frac{A_n\sqrt{\bar{V}_{n-1}^2 - h_{L_{(n-1) \rightarrow n}}(2g)} + (A_{n-1}\bar{V}_{n-1})\sqrt{1+k}}{2A_n\sqrt{1+k}} \quad (7)$$

Simulación

Las características generales del modelo para el análisis CFD del flujo interno en el quemador se exponen en la figura 2.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2 Características generales del modelo.

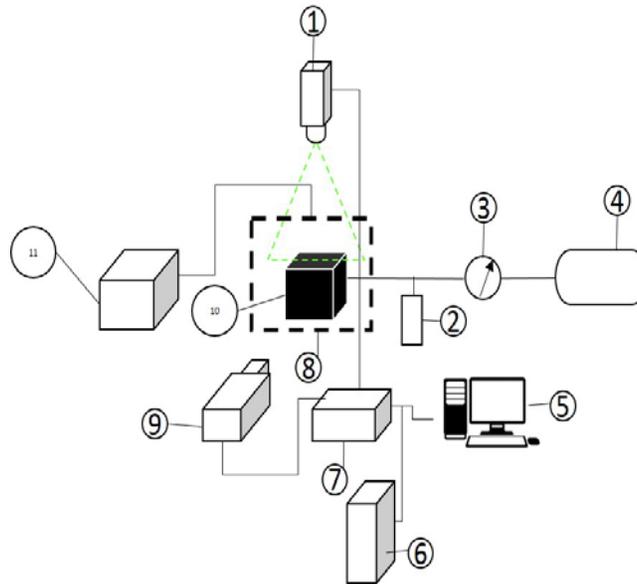
Para la simulación se supusieron superficies sin fricción, aire seco, propiedades ideales del metano y oxígeno a temperatura ambiente y constante, y que no existen perturbaciones del medio ambiente.

Utilizando un software de mallado comercial, se mallaron las superficies internas del quemador y la esprea, rodeados por un volumen de aire seco. Los elementos

utilizados para el mallado, fueron lineales, con cuatro nodos, ninguno intermedio. Sus grados de libertad son velocidades, presión y temperatura.

Validación

La figura 3 y tabla 1 muestran un diagrama esquemático con los dispositivos empleados para la realización de las pruebas PIV. Se utilizó CH₄, a 1741.88 Pa, y como medida de seguridad se realizaron pruebas en frío.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3 Diagrama esquemático de los elementos del equipo PIV.

Tabla 1 Elementos del equipo PIV.

1	Láser	7	Sincronizador
2	Manómetro digital	8	Volumen de control
3	Válvula reguladora de presión	9	Cámara
4	Toma fija de gas	10	Quemador
5	PC	11	Máquina de humo
6	Generador de energía		

Las características del láser utilizado son, tipo Nano L200-15 LITRON, con energía de 200 mJ. Emisión de luz verde a 532 nm, con un pulso de 3.5 ns. El diámetro de salida fue de 5 mm, la longitud de coherencia fue de 1 mm y la frecuencia de 15 Hz. El sincronizador tenía una frecuencia máxima de 100 kHz y un tiempo

mínimo de 20 ns. La cámara era del tipo PCO PixelFly USB de 13.5 Hz, con una resolución de 1392x10740 pix. El tiempo de exposición mínimo fue de 1 μ s, con una sensibilidad máxima de 12 bits. Utiliza un sensor CMOS de 8.8 x 6.6 mm, 6.45x6.45 μ m. Se utilizó una máquina de humo con una pulverización líquida comercial a base de agua. El tamaño de las partículas de humo fue de 0.1 μ m. El equipo fue calibrado para tener un tiempo entre pulsos de 300 μ s, una región de interés de 232 mm y una distancia de la cámara al plano de 457 mm.

Las imágenes se adquirieron durante 50.0 s y procesadas computacionalmente.

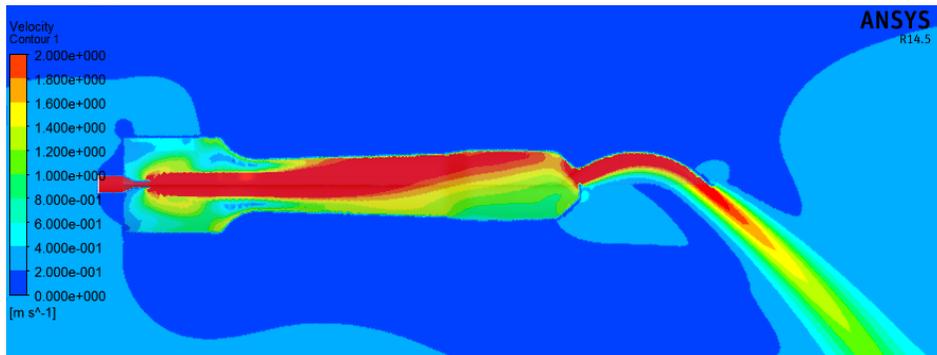
3. Resultados

Los resultados obtenidos a partir del modelo teórico se muestran en la tabla 2.

Tabla 2 Aproximación de las velocidades de la mezcla con el modelo teórico

Punto	1	2	3	4	5	6	7	8
\bar{V} (m/s)	43.41	10.43	10.17	9.55	2.31	1.67	1.63	3.22

Los contornos de velocidades en el plano medio de la simulación CFD se presentan en la figura 4. La correlación de los datos obtenidos en ambos modelos, se presentará en la siguiente sección del trabajo.



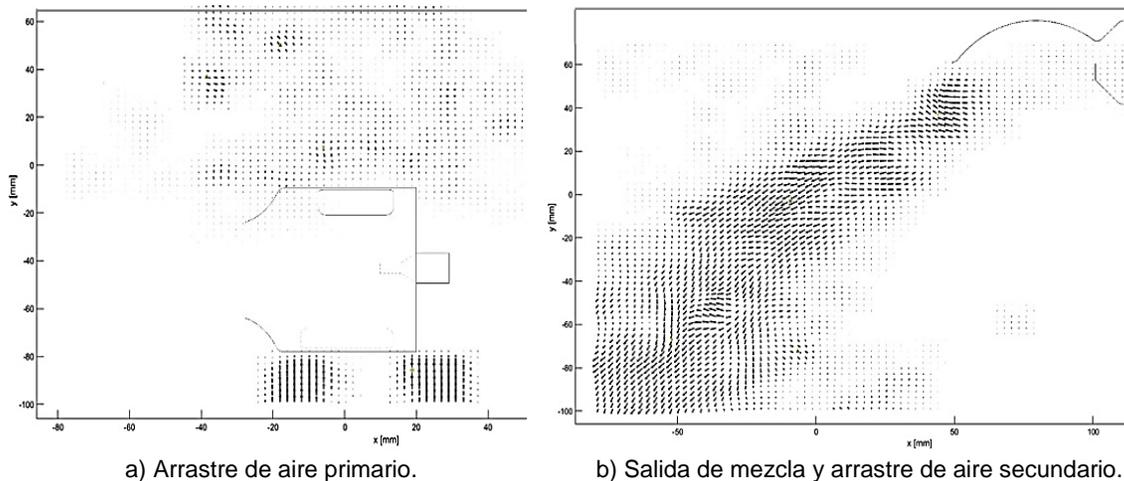
Fuente: Elaboración propia.

Figura 4 Contornos de velocidades obtenidos mediante la simulación CFD.

Además, se obtuvo el valor máximo, el mínimo y el promedio de veinte puntos situados a lo largo de rectas situadas en la región media de arrastre de aire primario y secundario, y salida de la mezcla.

Para validar la simulación se utilizaron seis pares de imágenes, de cada una de las dos pruebas realizadas para obtener un promedio de los campos de velocidades. Así los promedios de los campos de velocidad graficados con Matlab®, se pueden observar en la figura 5.

El objetivo del experimento fue conocer la velocidad del aire primario que ingresa al quemador, y también la del aire arrastrado a la salida de la porta. Los valores obtenidos se muestran en la siguiente sección.



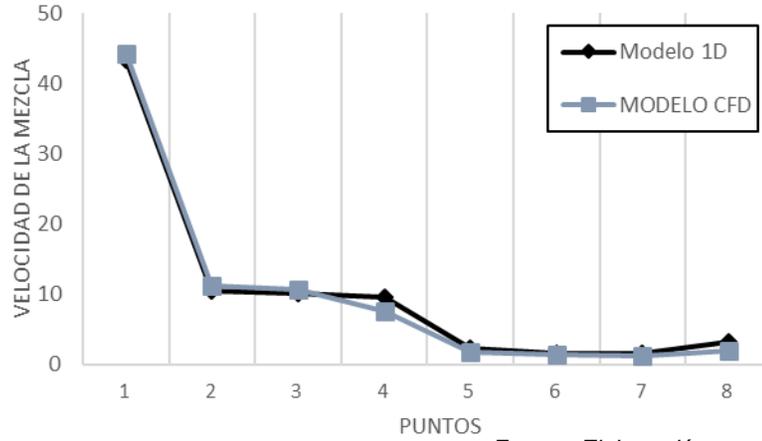
Fuente: Elaboración propia.

Figura 5 Campo de velocidades del promedio de los seis pares de imágenes.

4. Discusión

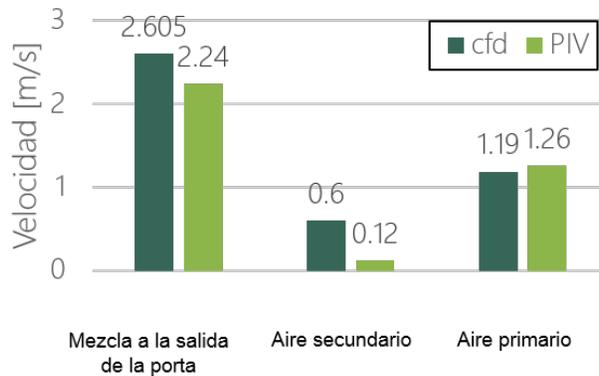
Los modelos teórico y numérico tienen un coeficiente de correlación de 0.99. Las curvas de los datos obtenidos en ambos modelos no se superponen, figura 6, esto es debido a que la condición unidimensional del modelo matemático simplifica el fenómeno. Sin embargo, la curva que representa al modelo teórico mantiene una trayectoria similar a la correspondiente al modelo numérico; por lo que, el modelo teórico se considera una herramienta rápida para conocer el valor aproximado de la velocidad de la mezcla a través del quemador y poder prevenir así fallas en la flama.

Por otra parte, en la figura 7, se puede observar un comparativo de los valores obtenidos en la simulación CFD y en la experimentación PIV, para los valores promedio.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 6 Curvas de la aproximación de velocidades.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 7 Velocidades promedio obtenidas en la simulación CFD y experimentales.

Los valores de la velocidad promedio de la mezcla a la salida de la porta y del aire primario, son las que se aproximan más, con un porcentaje de diferencia entre la simulación CFD y la experimentación de 15.07% y 5.71%, respectivamente. Sin embargo, las mediciones para el aire secundario difieren considerablemente; las suposiciones realizadas en la simulación CFD, como en la experimentación, la humedad del ambiente, los cambios de temperatura, la fricción del aire y la mezcla con los componentes, el rozamiento, así como los efectos generados por el uso del humo requerido para el desarrollo de la técnica PIV, podrían explicar esta diferencia entre los resultados de la simulación y la experimentación. La simulación presentada se encuentra en el nivel 3 (niveles 0 a 6), estipulado por la

Asociación Internacional para Modelación en Ingeniería, Comunidad de Análisis y Simulación (NAFEMS), de la clasificación para determinar la capacidad de una simulación. Esto significa que es predictiva, pero requiere pruebas físicas para la calibración del modelo. La industria automotriz y de aviación comercial, utilizan simulaciones nivel 3 a 6. En un trabajo futuro podrían realizarse las pruebas controlando los factores ambientales tratando de que sean lo más parecidos a los parámetros supuestos de la simulación.

5. Conclusión

Las ecuaciones planteadas en el modelo teórico podrían ser utilizadas como funciones objetivo para la optimización del componente. El modelo numérico nos da la facilidad de cambiar parámetros geométricos o físicos y predecir el comportamiento de la mezcla en un tiempo corto sin necesidad de emplear recursos más costosos, como la fabricación de prototipos. Sin embargo, debe hacerse un uso racional de las simulaciones, para que los diseños generados a partir de ellas sean lo suficientemente robustos para que al ser fabricados cumplan con las especificaciones deseadas.

6. Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada a la Ing. Melissa Karina Zapatero Gutiérrez para llevar a cabo sus estudios de posgrado en la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica perteneciente al Departamento de Ingeniería Mecánica en el Tecnológico Nacional de México en Celaya. Así mismo, también se agradece a la Empresa MABE Tecnología y Proyectos por las facilidades otorgadas durante la realización del proyecto de tesis.

7. Revisores

Revisor 1

Nombre: Roberto Godínez López
Institución: Universidad de Guanajuato

Cédula Profesional: 7984997
Área de conocimiento: Ciencias de Ingeniería y Ciencias Sociales
Correo electrónico: godinez.r@ugto.mx
Teléfono: 4616103270

Revisor 2

Nombre: Dra. Martha Xolyanetzin Rodríguez Villarreal
Institución: Universidad Autónoma de Nayarit
Cédula Profesional: 8346173* y 3114018**
Área de conocimiento: Ciencias de la Educación*
Ciencias Exactas e Ingenierías**
Correo electrónico: tirayan_xolyanetzin@hotmail.com
Teléfono: 311 148 18 40

8. Bibliografía y Referencias

- [1] Parr, J. F. (1973). *Fundamentals of Gas Combustion*. Arlington, Virginia: American Gas Association.
- [2] Giauque, A., Selle, L., Poinso, T. (2005), System identification of a large-scale swirled partially premixed combustor using LES and measurement. *Journal of Turbulence*. 6(21). pp. 1—20.
- [3] YunTao, C. (2015). *Investigation of Partially Premixed Combustion Instabilities through Experimental, Theoretical, and Computational Methods*. A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy (Aerospace Engineering) in The University of Michigan.
- [4] Namkhat, A., & Jugjai, S. (2010). Primary air entrainment characteristics for a self-aspirating burner: Model and experiments. *Energy*, 35, 1701-1708. doi:10.1016/j.energy.2009.12.020
- [5] Enagi, I., Al-attab, K. A., & Zainal, Z. A. (2017). Combustion chamber design and performance for micro gas turbine application. *Fuel Processing Technology* (166), 258-268.
- [6] Ruiz-Mesa, R. A., & García, M. J. (2015). Shape Optimisation of a Gas Injector. 11th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization , 1-7.

- [7] Ghadamgahi, M., Ölund, P., Ekman, T., Andersson, N., & Jonsson, P. (2018). Numerical and Experimental study on flameless oxy-fuel combustion in a pilot- scale and a real-size industrial furnace. *Applied Thermal Engineering*.
- [8] Mansour, M. S., Elbaz, A. M., Roberts, W. L., Senosy, M. S., Zayed, M. F., Juddoo, M., & Masri, A. R. (2017). Effect of the mixing fields on the stability and structure of turbulent partially premixed flames in a concentric flow conical nozzle burner. *Combustion and Flame*, 175, 180-200.
- [9] Makmool, U., Jugjai, S., Tia, S., Vallikul, P., & Fungtammasan, B. (2007). Performance and analysis by particle image velocimetry (PIV) of cooker-top burners in Thailand. *Energy*, 32, 1986-1995.
- [10] Mott, R. L. (2006). *Mecánica de Fluidos*. México: Pearson Educación.