

Alineamiento de flama usando placas perforadas Tándem en una cámara de combustión de Gas LP

^{1a}Tejeda del Cueto María Elena, ^{1b}Vigueras Zúñiga Marco Osvaldo, ^{1c}Welsh Rodríguez Carlos Manuel
^{1d}Marin Urias Luis Felipe, ^{1e}Herrera May Agustín Leonardo, ^{2f}Ordoñez Romero Cesar Leobardo

¹Universidad Veracruzana, Facultad de Ingeniería
 455 Ruiz Cortinez, Col. Costa Verde, Boca del Río, Ver. 94294
 Teléfono (229)-7752000 ext. 25127 Fax. ext. 25126

^aetejeda@uv.mx, ^bmvigueras@uv.mx, ^ccwelsh@uv.mx, ^dleherrera@uv.mx, ^eluismarin@uv.mx

²Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Física
 Ciudad Universitaria, Instituto de Física, Col. CU, México D.F., C.P. 04510
 Teléfono (229)-7752000 ext. 25127 Fax. ext. 25126

^fcloro@fisica.unam.mx

Resumen

Este estudio presenta la optimización de inyección de aire para el comportamiento de combustión y estabilidad de la flama en un quemador instalado en una cámara de combustión de gas LP innovando un arreglo de placas perforadas tándem. Los resultados comparan parámetros de velocidad, simetría y temperatura de un arreglo con una sola placa perforada y un arreglo con dos placas perforadas tándem. El diseño óptimo del arreglo tándem se obtuvo en base a resultados de análisis de simulación numérica utilizando el software comercial ANSYS-Fluent. El resultado logrado en el proceso de optimizar el arreglo de placas tándem demuestra numéricamente que se genera una recirculación de flujo de aire adecuada para el proceso de combustión. Para verificar estas mejoras se fabricaron e instalaron las placas tándem en el quemador de la cámara de combustión. Las pruebas experimentales comparan el comportamiento de las flamas de ambos arreglos y con valores de temperatura registradas por el pirómetro de succión se obtuvo el perfil de flama de cada una. El arreglo de placas perforadas tándem presenta una flama de mejor estabilidad, simetría y centralización de flama al interior de la cámara que la placa sencilla; mantiene el valor de la temperatura máxima de flama y reduce en un 14.6 % el consumo de combustible. Los datos de emisiones de NO_x se reportan en términos de ppm para los dos arreglos estudiados.

Abstract

This paper presents the optimization of air injection for combustion behavior and stability of the flame in a burner installed in a combustion chamber of gas LP by an innovation of install tandem perforated plates. The result compares parameters of field velocity, flame symmetry and field temperature for a single perforated plate and for tandem perforated plates. The optimal design of the tandem arrangement is obtained based on results of numerical simulation analysis using the commercial software ANSYS-Fluent. The numerical simulation result achieved in optimization process of the design shows that the perforated tandem plates produce a good air flow recirculation for the combustion process. To verify this improvement, the tandem perforated plates were manufactured and installed in the burner of the combustion chamber. The experimental tests compare the flame behavior in both arrangements based on the flame temperature values recorded by the suction pyrometer. The tandem perforated plates produces a better stability, symmetry and centralization of the flame; the maximum flame temperature remains for both arrangements. The tandem perforated plates requires 14.6% less fuel than the single plate. The NO_x emissions are expressed in ppm units for both cases.

Palabras clave:

Combustión, gas LP, simulación numérica, CFD, pirómetro de succión, NO_x

Keywords:

Combustion, gas LP, numerical simulation, CFD, suction pyrometer, NO_x .

Nomenclatura

G_k	generación de energía cinética turbulenta debido a los gradientes de velocidades medias.
Y_M	contribución de la dilatación fluctuante en la turbulencia compresible a la tasa global de disipación.
$C_{1\varepsilon}$	primera constante del modelo de turbulencia
$C_{2\varepsilon}$	segunda constante del modelo de turbulencia
g_j	gravedad
h_n	entalpía específica de las especies
k_{eff}	conductividad efectiva
T	temperatura
u	velocidad

Símbolos griegos

ε	velocidad de disipación
μ_t	viscosidad turbulenta
μ	viscosidad
ρ	densidad
σ_k	número turbulento de Prandtl para k
σ_ε	número turbulento de Prandtl para ε
τ_{ij}	tensor de esfuerzos
ϕ	relación de equivalencia

Introducción

Actualmente, el impacto que han tenido los estudios de fluidos con modelos matemáticos computacionales ha logrado un alto índice de confiabilidad en sus resultados. La simulación numérica complementa el enfoque experimental tradicional y proporciona una valiosa ayuda para el diseño de dispositivos de combustión para una operación eficiente. Estos análisis son realizados antes de manufacturar prototipos, permitiendo llevar a cabo modificaciones en los diseños para optimizarlos sin la necesidad de invertir en gastos de fabricación.

Distintas aplicaciones industriales hacen uso de dispositivos que requieren del fenómeno de combustión y en su mayoría se requiere combustibles fósiles para su operación. Sin embargo actualmente se centra la atención en el uso de energía eficiente, que implica disminuir el consumo de combustible y emisiones contaminantes. La importancia dada a la implementación de mejoras en el proceso de combustión en cámaras de combustión ha originado realizar estudios para mejorar los parámetros de estabilidad de flama. Los resultados han logrado reducir el consumo de combustible, mejorar la temperatura máxima de operación y reducir emisiones contaminantes.

La creación de una zona de recirculación inducida mediante medios mecánicos o aerodinámicos es una estrategia de diseño en flujos turbulentos utilizada para estabilizar la flama (Steven, 2013). Los regímenes de estabilización de la flama que son ampliamente utilizados incluyen tres tipos. El primero es el empleo de un cuerpo de obstrucción de flujo conocido como “bluff-body” para crear una turbulencia inducida; otro segundo tipo es el inducir un giro al flujo o una combinación de ambos para una buena mezcla en los reactantes; y un tercer tipo es la optimización de inyección de aire.

El análisis de la estabilidad de la flama agregando un bluff-body (Esquiva, 2001), se realizó estudiando la estabilización de flamas no premezcladas agregando dos diferentes bluff-body, 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 logra con el bluff-body de forma tulipán, donde se inducía al flujo vórtices contrarrotativos produciendo una recirculación del aire de inyección. Cuatro años más tarde (Esquiva, 2005) presentó un análisis de estabilidad de flama agregando el mismo bluff-body 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.

Más tarde se realizó otro estudio para analizar la estabilidad de la flama (Fan, 2014) utilizando una configuración del bluff-body en forma de canaleta V para flamas premezcladas de queroseno y aire. Los resultados muestran que la relación que existe entre el tamaño de la canaleta V y la velocidad de entrada del aire determina la estabilidad de la flama y la localización de la base de ésta.

Aunque se ha demostrado que la utilización de bluff-body sirve para estabilizar la flama no garantiza que no se presente una extinción de ésta, por lo que estudios recientes (Swetaprovo, 2010) han investigado este problema y las condiciones que lo originan han presentado el análisis de la estabilidad de flama agregando un bluff-body en forma de disco a un quemador de flama premezclada. El resultado concluye que aunque existiera el bluff-body la presencia de una premezcla pobre en combustible origina la extinción de la flama y este punto se caracterizaba por una rápida reducción en las emisiones de CH. Dos años más tarde (Swetaprovo, 2012) estudiaron el comportamiento de la extinción de una flama premezclada turbulenta estabilizada por un bluff-body en forma de disco, sus resultados concluyeron que la presencia de la mezcla pobre que produce la extinción de la flama se lograba predecir visualmente con el cambio de forma de la flama pasando de una forma cónica a una tubular.

Por otro lado, se ha demostrado que inducir un giro en la entrada de aire también estabiliza la flama. Se han realizado estudios para analizar el retroceso en flamas premezcladas de combustibles con alto porcentaje de hidrógeno (Valera, 2011), estos concluyeron que cuando el aire se inyecta tangencialmente al quemador se induce un giro resultando en la disminución de emisiones de NO_x y evita el retroceso de la flama. Siguiendo en esta misma línea de investigación, pero utilizando un combustible formado por una mezcla de metano, nitrógeno y combustibles de bajo poder calorífico (Ahmed, 2011) demostraron que al utilizar un sistema de inducción de giro en la inyección tangencial del aire se obtenían bajas emisiones de NO_x y CO. En otro estudio posterior (Ahmed, 2011), reportaron que adicionando una inyección de combustible controlada se lograba una combustión limpia. Este último análisis fue realizado para la combustión en una turbina de gas utilizando combustible líquido, el reporte indica que se logró disipar las zonas puntuales de altas temperatura “hot points” que propician la formación de NO_x . En este caso la combustión se mantuvo distribuida en un rango de 3 ppm NO_x y la técnica puede utilizarse para flamas premezcladas y no premezcladas.

Para la optimización de la inyección de aire se han realizado diversos estudios, por ejemplo se ha caracterizado la flama de un quemador utilizando diferentes configuraciones de una placa de inyección de aire perforada (Dong, 2011). En este caso se probaron diferentes diámetros, distribución y distancia de los orificios de la placa y ésta fue colocada en la inyección de aire. Los resultados indican que en todos los casos se obtenía una flama azul (quemado completo), excepto cuando se tenía el caso con las perforaciones de mayor diámetro que generaba una mezcla rica en combustible produciendo una región post-flama amarilla (quemado incompleto). La placa con las perforaciones de menor diámetro fue la de mejor flama producida alcanzando la mayor temperatura y mejor estabilidad.

En esta investigación se presenta el análisis de estabilidad de flama no premezclada para un quemador de gas LP de flujo

vertical con una inyección de aire axial y una inyección de combustible radial. Debido a la disposición del equipo experimental no es posible utilizar un bluff-body en el inyector de combustible, sin embargo se estudiará la creación de una zona de recirculación inducida mediante un giro creado por la inyección de aire tangencial y el proceso de optimización en el ducto de la inyección de aire con placas perforadas tándem.

Desarrollo

Para realizar la optimización de la inyección de aire utilizando placas perforadas tándem el trabajo se dividió en dos etapas. La primera etapa caracteriza las condiciones originales de la cámara de combustión de gas LP con un quemador de una sola placa perforada colocada en el tubo de la inyección de aire. Las pruebas experimentales de la primera etapa caracterizan las condiciones de operación y definen las condiciones de frontera necesarias para la creación del modelo numérico computacional. En la segunda etapa se presenta el diseño aerodinámico de las placas perforadas tándem en base a resultados numéricos computacionales. La última parte incluye una serie de pruebas experimentales para comprobar si existen mejoras en el proceso de combustión al instalar las placas perforadas tándem en esta cámara de combustión de gas LP.

Etapa-1 Configuración original

Las pruebas experimentales se realizaron en una cámara de combustión de gas LP de 50 KW (ver figura 1). La cámara esta compuesta por un horno de geometría cilíndrica vertical fabricado de acero inoxidable 304 constituido por dos cilindros concéntricos, el cilindro externo tiene un diámetro de 650 mm de y el cilindro interior tiene un diámetro de 550 mm de interior. La longitud del horno es de 1000 mm con una salida del horno conectada a un cono de diámetro de 210 mm. Las bridas que unen al horno con el cono de salida están fabricadas con acero al carbón. El enfriamiento de la cámara incluye un sistema de refrigeración por agua localizado en tres diferentes zonas: entrada de la cámara, cuerpo de la cámara y cono de salida con un flujo de agua de enfriamiento de 10 l/min en cada una de las zonas durante su operación.

El quemador se encuentra instalado en la tapa inferior del cuerpo de la cámara de combustión con una capacidad nominal de 300,000 Btu/hr y una entrada de aire tangencial de 90 mm de diámetro. El sistema de inyección de aire es alimentado por un ventilador de frecuencia variable que proporciona el flujo necesario para la combustión. El flujo de gas se controla mediante 2 reguladores de baja presión (0.5 Kg/cm²) conectados a válvulas de aguja y monitoreado por 2 medidores de flujo volumétrico de gas. La inyección del aire dentro de la cámara de combustión es de forma axial mediante una placa perforada colocada en el tubo de inyección de aire que termina en la salida del quemador. La placa perforada esta fabricada en acero de 3 mm de espesor y 77 mm de diámetro y los 33 agujeros de 9/64 plg de diámetro se encuentra espaciados asimétricamente incluyendo un agujero

de 1/4 plg (ver figura 2). El quemador opera usando gas LP con una composición química en volumen de 82.03% propano y 17.97 % butano, resultando un flujo volumétrico de 4.5588 kg/h y un flujo de aire inyectado de 119.52 kg/h, dando una relación de equivalencia de $\phi = 0.5755$. Para visualizar la flama se coloco una cámara de adquisición de imágenes en la mirilla 5 (ver figura 1).

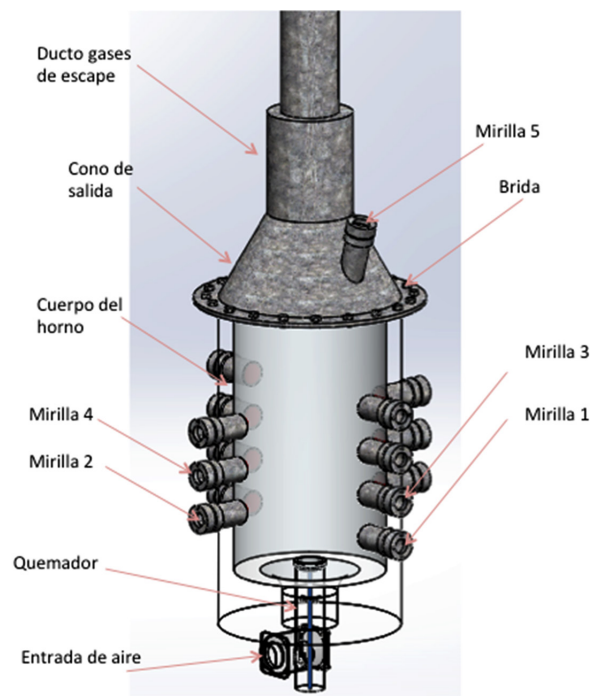


Figura 1. Diagrama de la cámara de combustión de gas LP de tiro vertical.

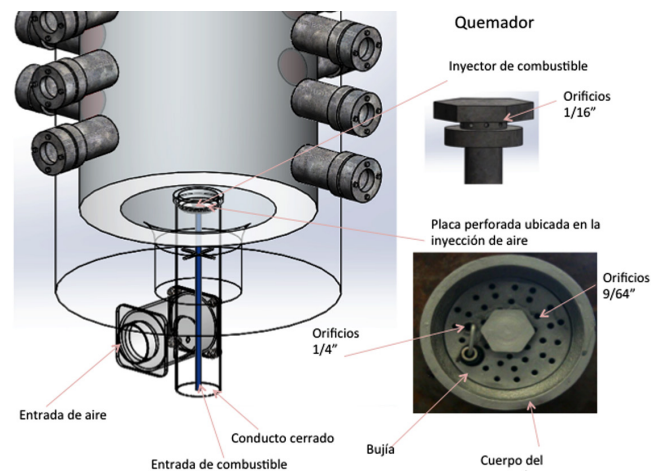


Figura 2. Vista del quemador de la cámara de combustión donde se indica la posición de la placa perforada en la inyección de aire y el inyector de combustible.

La temperatura de la flama se obtuvo de forma experimental utilizando un pirómetro de succión, el cual que permite medir directamente la temperatura real de un gas. El pirómetro de succión esta configurado por un cuerpo refrigerado por agua, con tres conexiones, dos de ellas utilizadas para la alimentación de agua y la tercera línea para la de succión de gases. En el interior del cuerpo del pirómetro se localiza la sonda de succión que contiene un termopar protegido por 3 fun-

das: 2 de Alúmina y 1 de Silimanite. Los gases de combustión son aspirados entre los tubos de cerámica interno y medio a velocidades altas. La magnitud de la velocidad de los gases aspirados es un factor importante que mantiene el valor de la temperatura del termopar en equilibrio con la temperatura de los gases de combustión. La reducción del error en los resultados obtenidos utilizando el pirómetro de succión comparado con un termopar al descubierto es alrededor del 95%; bajo esta circunstancia no es necesario efectuar corrección del error de la lectura medida con el pirómetro.

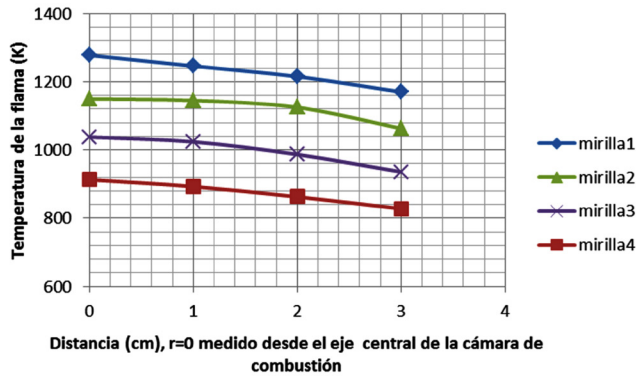


Figura 3. Perfil de temperaturas registradas en las pruebas experimentales de la cámara de combustión al utilizarse una placa perforada. Condiciones de a prueba: $P_{\text{aire}} = 1018 \text{ mbar}$, $T = 30^\circ\text{C}$, $P_{\text{gas}} = 4 \text{ oz/plg}^2$, $T_{\text{gas}} = 30^\circ\text{C}$.

Los valores de temperatura registrados con el pirómetro de succión corresponden a mediciones realizadas en las mirillas 1, 2, 3 y 4 de la cámara de combustión. La temperatura máxima alcanzada fue de 1278 K, con un gradiente de temperatura que disminuye en función que el instrumento se aleja del eje central axial de la cámara (ver figura 3).

Al lograr estabilizar la flama se analizó de forma visual la simetría de ésta utilizando la mirilla 5. Se observa que la flama se separa 100 mm respecto al eje central vertical (ver figura 4). El desalineamiento de la flama no presenta un problema para el caso de operación y tamaño de esta cámara experimental de combustión, sin embargo para la caracterización de la flama y la aplicación de la placa perforada instalada en la inyección de aire no cumple con el objeto de alinear la flama en una región aceptable (rango máximo de desviación al eje central de 30 mm como máximo). El color amarillo que presenta la flama en la punta indica la difusión de combustión debido al exceso de combustible concentrado en esta zona.

Para determinar el efecto de la placa perforada sobre la flama se generó un modelo numérico que simuló la operación en frío del quemador en el código computacional de ANSYS-Fluent (programa especializado en la dinámica computacional de fluidos, CFD por sus siglas en inglés). El modelo determinó el comportamiento de la inyección de aire dentro del quemador considerando el espacio tridimensional real bajo condiciones de estado estacionario del flujo y con doble precisión numérica. Los resultados de la simulación permiten analizar el comportamiento de la velocidad del fluido por el conducto del inyector de aire debido a la combinación de la entrada de aire tangencial y la colocación de la placa perforada.

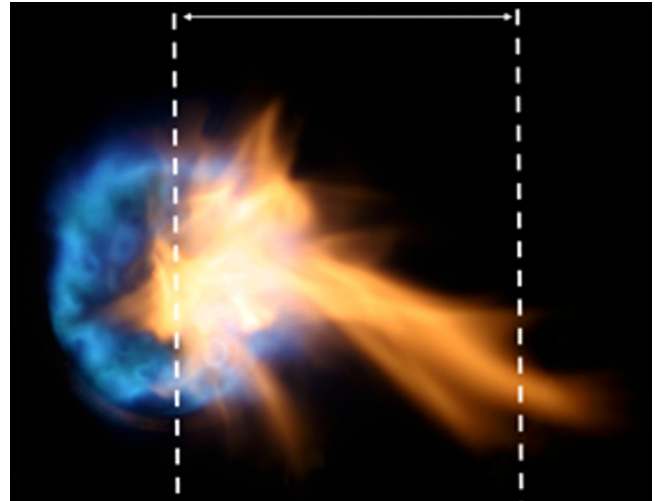


Figura 4. Fotografía de la flama donde se observa que la flama no está alineada al eje vertical central (mirilla 5).

Es necesario definir en los modelos numéricos computacionales las ecuaciones de estado que rigen el movimiento. En primer término el modelo estudia el comportamiento de flujos con gases compresibles por lo que la variación de la densidad del fluido a lo largo de la trayectoria es significativa. Las funciones de presión, temperatura y ecuación de energía tienen un papel importante y se deben adicionar en los cálculos numéricos. De tal forma, que para la resolución de este problema (flujo compresible) es necesario considerar las siguientes ecuaciones:

a.- Ecuación de estado de los gases ideales

$$PV = mRT \quad (1)$$

b.- Ecuación de continuidad

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

c.- Ecuación de cantidad de movimiento

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

d.- Ecuación de la energía

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

La turbulencia es un factor importante a considerar en un modelo numérico de esta naturaleza, por ello que en el código computacional se seleccionó un modelo de turbulencia de tipo k-ε estándar. Este tipo de modelo de turbulencia es frecuentemente usado para aplicaciones industriales debido a su robustez numérica y al amplio rango de flujos turbulentos que logra modelar. Para ello, se supone numéricamente que los términos del esfuerzo de Reynolds se relacionan con gradientes de velocidad promedio usando una viscosidad de turbulencia promedio. El modelo k-ε resuelve dos ecuaciones de transporte, una para la energía cinética turbulenta k y otra para la velocidad de disipación, ε:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\mu_k} \right) \frac{\partial}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon - Y_m \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \left(G_k - C_{2\varepsilon} \frac{\rho \varepsilon^2}{k} \right) \quad (6)$$

Con la finalidad de mostrar el avance progresivo de este trabajo, se muestran los primeros resultados del CFD que analizaron únicamente la geometría del interior del quemador incluyendo entrada de aire tangencial y ducto de aire (ver figura 5). Posteriormente, se generó el modelo con la placa perforada, proceso numérico que requirió para el ahorro de tiempo computacional cuatro volúmenes con diferentes densidades de mallas, resultando en un total de 891,510 elementos tetraédricos. Los criterios de convergencia del modelo para continuidad, momentum y energía cinética fue de 10-3 y para la energía de 10-6. Las condiciones de frontera del quemador se definieron de la siguiente forma: flujo de aire de 119.52 kg/h como la condición de entrada y las condiciones del laboratorio como la condición de salida, es decir presión de 101.3 kPa y temperatura de 303K (30° C).

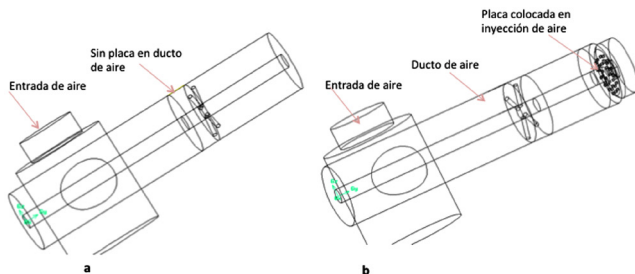


Figura 5. Configuración del arreglo original del quemador, imagen (a) quemador sin la placa perforada e imagen (b) posición de la placa perforada.

El resultado de la simulación numérica muestra una comparación de la distribución de velocidades a lo largo del plano vertical del quemador sin la placa y con la placa perforada (ver figura 6), la velocidad máxima alcanzada en el ducto de aire para los dos casos es 8.32m/s. El perfil de velocidades en el ducto de aire para la simulación del caso sin la placa presenta un comportamiento no uniforme, se detectan regiones velocidades de 1m/s a 7 m/s. En la entrada tangencial de aire en el ducto la velocidad máxima es de 8.3m/s. Se observa que en el caso del modelo sin la placa el perfil de velocidades es uniforme en el ducto de aire a partir de y=300 mm y totalmente uniforme en y=425 mm. En el caso de la placa perforada, la velocidad máxima en el ducto de aire es de 7 m/s en la entrada tangencial de aire. Este efecto permite deducir que la placa perforada origina la desaparición de regiones con velocidades bajas o altas, logrando que el flujo se desarrolle uniforme a lo largo del conducto de inyección de aire.

Al estudiar el plano transversal localizado a 467 mm por debajo de la salida de aire del inyector (ver figura 7), se detecta que el caso sin la placa la velocidad del flujo de aire es de 5.4m/s y para el caso de la placa alcanza 56 m/s. Sin embargo, el comportamiento del flujo de aire para el caso sin placa

es uniforme en la salida y caso contrario para el caso con la placa que genera una región de alta velocidad en los orificios de 9/64" con una región de alta velocidad concentrada (orificio 1/4") cerca del inyector de combustible. Se puede concluir que el resultado de este perfil de velocidades es el precursor del desalineamiento de la flama.

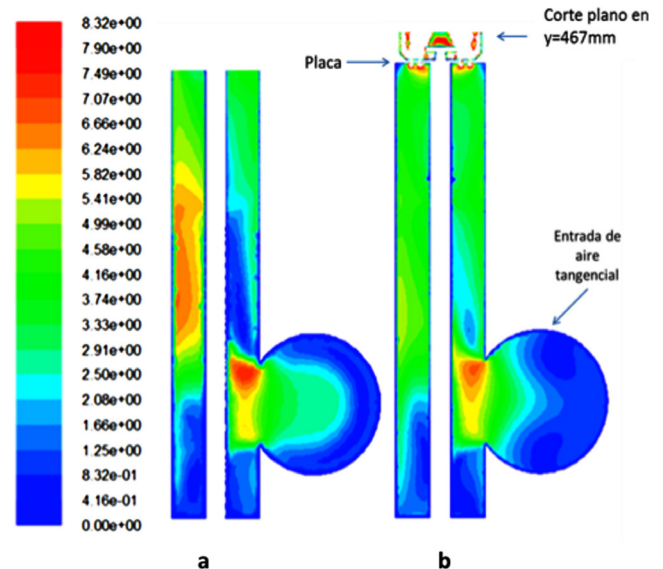


Figura 6. Perfil de velocidades en el inyector de aire del quemador en un plano longitudinal de corte. La imagen (a) representa el arreglo sin placa y la imagen (b) representa el resultado con la placa perforada.

Etapa 2 Configuración placas perforadas tándem

Con la finalidad de mostrar la optimización en la inyección de aire al utilizar placas tándem, se muestra la comparación de los resultados del CFD analizando el efecto de la inserción de una placa perforada en y=325 mm y las dos placas perforadas tándem (ver figura 8). Los resultados muestran el efecto en la velocidad que se produce el utilizar placas tándem en la inyección de aire. A diferencia del resultado del modelo anterior, este cambio en el arreglo del inyector de aire implica una geometría interna más compleja, por lo que se generó un modelo con cinco diferentes densidades de mallas (1,612,882 elementos tetraédricos) en seis volúmenes, conservando los mismos criterios que en los modelos numéricos previos (ver figura 9).

La primera placa perforada localizada en el ducto de aire tiene un diámetro de 77 mm con 84 orificios (32 orificios de 9/32 plg y 52 orificios de 3/8 plg) y la segunda placa perforada localizada en la inyección de aire (y=325 mm) tiene un diámetro de 77 mm con 53 agujeros (9 orificios de 5/32 plg, 9 orificios de 9/64 plg y 35 orificios de 1/8 plg), las dos placas tienen 3 mm de espesor (ver figura 9).

El resultado de la simulación numérica muestra una comparación de la distribución de velocidades a lo largo del plano vertical del quemador (ver figura 10). Para el caso de una sola placa perforada el perfil de velocidades es uniforme inmediatamente después del paso por la placa resultando con una velocidad máxima de 11.9 m/s cumpliendo el objetivo

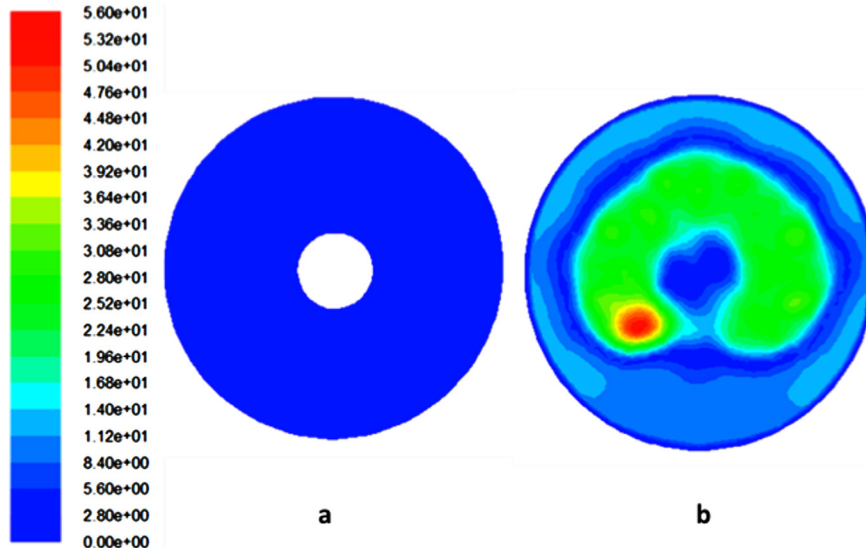


Figura 7. Perfil de velocidades en el inyector de aire del quemador en un plano de corte transversal ($y=467$ mm). La imagen (a) representa el caso sin placa y la imagen (b) representa el caso de la placa perforada.

de colocar la placa para uniformizar el flujo de aire y promover el alineamiento de la flama.

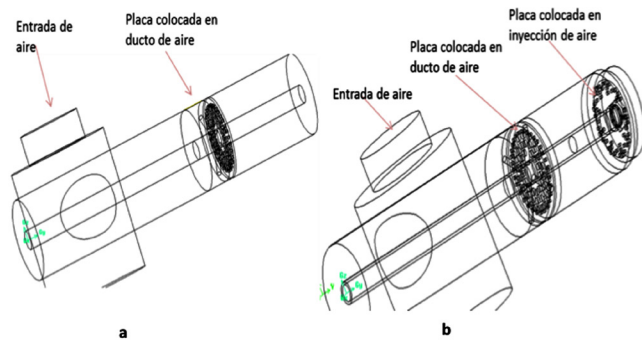


Figura 8. Imagen (a) representa el interior del quemador con la placa perforada localizada en $y=325$ mm. La imagen (b) representa la localización de las dos placas perforadas tándem, donde la primera se localiza en $y=325$ mm y la segunda en $y=467$ mm.

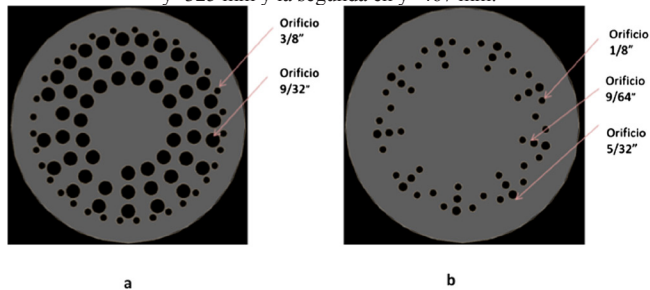


Figura 9. Imagen (a) representa la placa inferior y la imagen (b) la placa superior.

Al analizar el plano transversal localizado en la salida del inyector (ver figura 11) se observa que la máxima velocidad alcanzada en el caso de la placa perforada en el ducto de aire es de ≈ 11.5 m/s, distribuyéndose el flujo de aire con rangos de velocidad similares en la salida del quemador; en lo que concierne al flujo de aire en el caso de las dos placas perforadas tándem la velocidad máxima alcanzada es de 39 m/s y el flujo de aire se aleja del eje central del quemador ($r=0$) para posicionarse en $r=30$ mm con un perfil uniforme excep-

to en un punto en donde la velocidad es nula; el flujo de aire tiende a separarse de la pared exterior del quemador; este comportamiento beneficiará a la combustión en la cámara de combustión ya que el flujo combustible inyectado incide en el flujo de aire, interactuando como flujo cruzado. Se ha demostrado en estudios anteriores (Bain, 1985) que a mayores fluctuaciones de la velocidad se incrementa la velocidad de mezclado del aire-combustible y la energía cinética mejorando la velocidad de la reacción, y por lo tanto la eficiencia de la combustión.

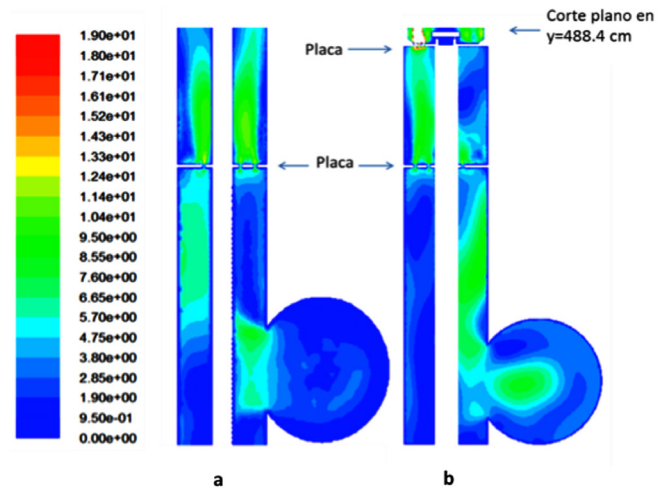


Figura 10. Perfil de velocidades en el inyector de aire del quemador. La imagen (a) corresponde al ducto de aire con placa perforada y la imagen (b) al ducto de aire con placas perforada tándem.

Analizando a través del resultado numérico computacional el efecto de la entrada de aire tangencial se deduce que la inducción de giro durante la inyección de aire es en el caso de la placa original perforada es nulo, este resultado se observa en los vectores de velocidad del plano transversal localizado en la región de la salida del quemador (ver figura 12a). Para

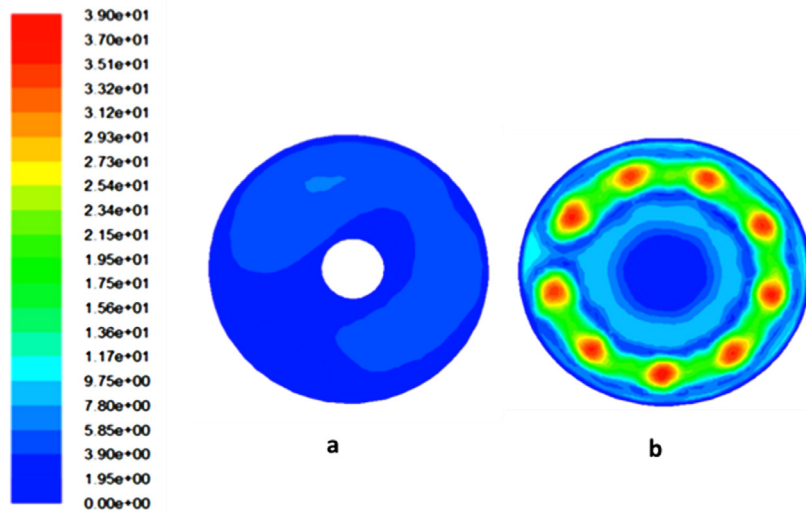


Figura 11. Perfil de velocidades en el inyector de aire del quemador en un corte transversal. La imagen (a) corresponde al plano $y=467$ mm con una sola placa perforada y la imagen (b) al plano $y=488.4$ mm con las placas perforadas tándem.

el caso de la placa perforada original del quemador tampoco es evidente el giro inducido en la salida del quemador (ver figura 12b).

La optimización del quemador con la implementación de las placas perforadas tándem los vectores de velocidad en el inyector de aire presentan una ligera tendencia de giro en la parte inferior izquierda (ver figura 12c), mientras que en el resto de dicha zona los vectores son normales al plano transversal indicando un flujo axial uniforme.

En las regiones cercanas a los orificios de menor diámetro (cerca del inyector de combustible) la zona de recirculación de flujo de aire se presenta con bajas velocidades (18 m/s)

permitiendo deducir que se presentará un buen mezclado de aire y combustible durante la combustión (ver figura 13 c).

Para la parte experimental de la segunda etapa se fabricaron las placas perforadas tándem en acero y se colocaron en el ducto de la inyección del aire dentro de la cámara de combustión con el objetivo de comprobar si efectivamente se mejoraba el alineamiento y estabilidad de la flama. Para esta segunda prueba el quemador fue colocado a la altura de la mirilla 1 para permitir visualizar el comportamiento de la base y colorimetría de la flama (ver figura 14).

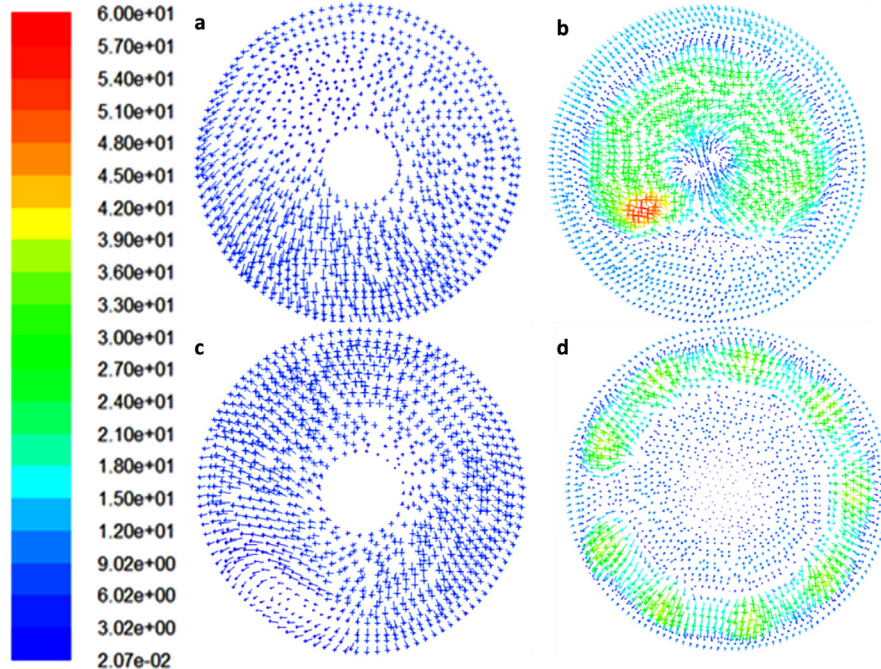


Figura 12. Vectores de velocidad en el inyector de aire del quemador en un corte transversal en los cuatro diferentes escenarios. Las imágenes superiores corresponden al arreglo del quemador original: (a) sin placa perforada ($y=467$ mm), (b) placa perforada ($y=467$ mm). La imagen inferior corresponde al arreglo del quemador con placas en tándem: (c) con placa en ducto de aire ($y=467$ mm), (d) con placas perforadas tándem ($y=488.4$ mm).

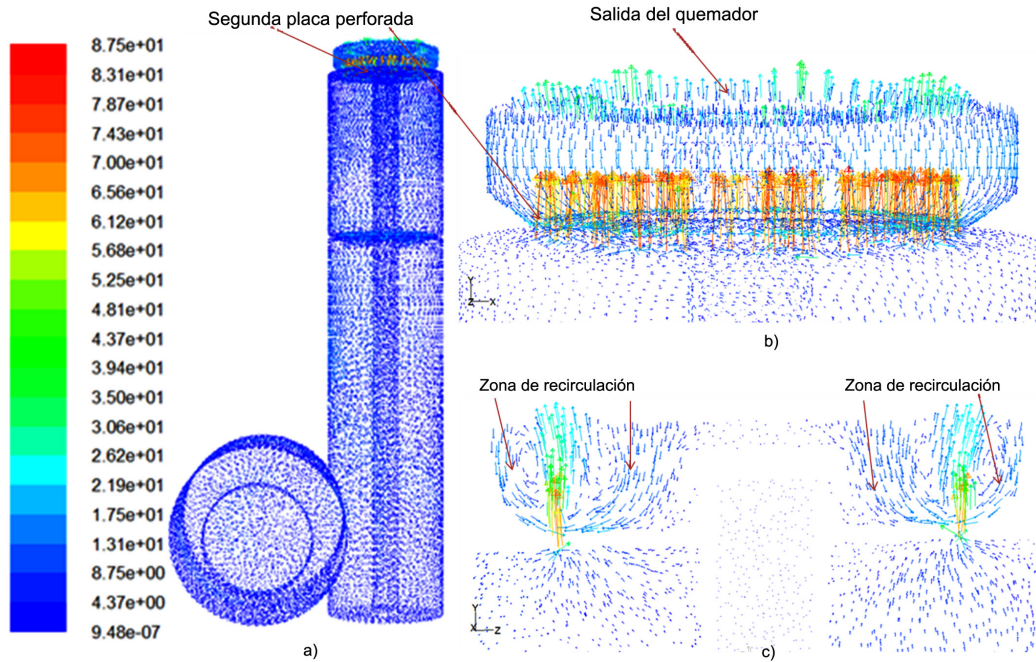


Figura 13. Comportamiento de los vectores de velocidad en el arreglo del quemador con las placas tandem. Las imágenes representan (a) vista de los vectores en el quemador completo en 3D, (b) salida de aire de inyección en el quemador en 3D y (c) zona de recirculación en un corte en el plano y-z.

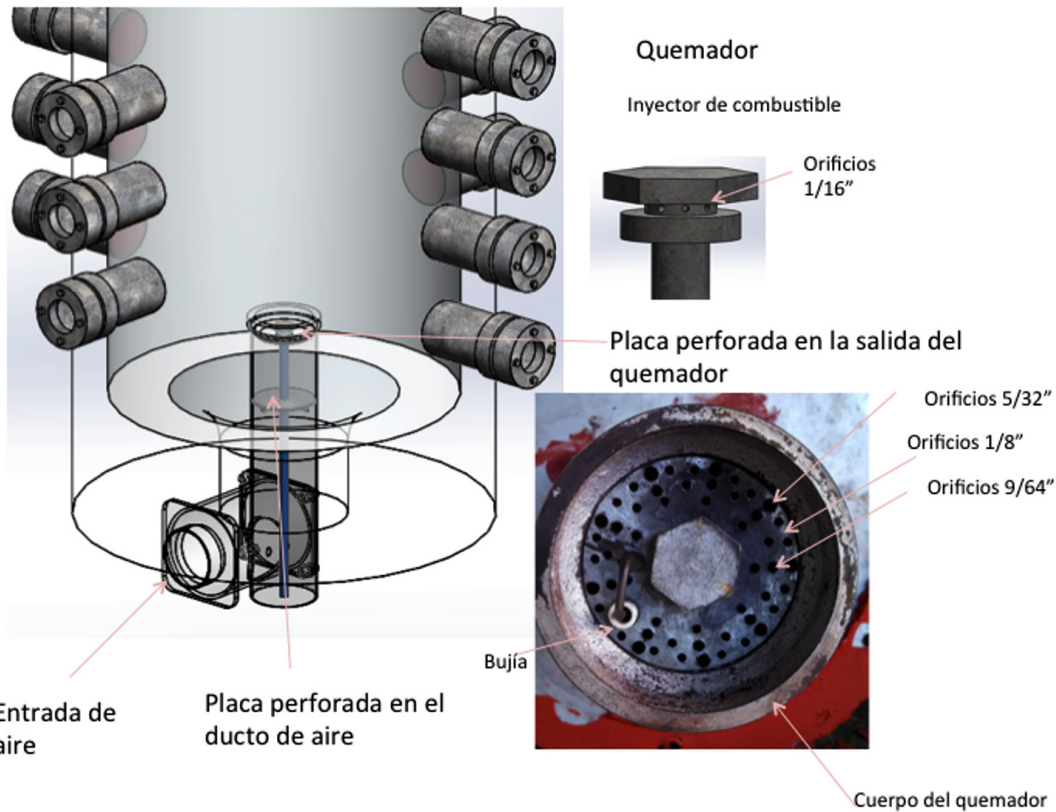


Figura 14. Diagrama de la nueva posición del quemador y fotografía de la segunda placa perforada en la salida de la inyección de aire.

Los valores de temperatura registrados con el pirómetro de succión una vez que la flama se estabilizó fueron realizados en las mismas posiciones que la primera etapa experimental, es decir mirillas 1, 2, 3 y 4. La temperatura máxima registrada en la flama para el arreglo de las placas tandem es de 1356 K y con un gradiente de temperatura simétrico que disminuye en función radial al alejarse del eje central axial de la cámara (ver figura 15). La distribución de temperaturas entre el quemador con una sola placa perforada y el quemador con las placas perforadas tandem están dentro del mismo rango de temperaturas teniendo un comportamiento similar en su distribución. Sin embargo, el consumo de combustible monitoreado con el instrumento de flujo volumétrico indica un consumo de 83.1 lt/min (35.1 kg/hr) y con un micromanómetro se calculó el flujo másico del aire (61.723 kg/h). Este valor da como resultado una $\phi=0.8559$ que corresponde a una mezcla pobre. De acuerdo a la revisión literaria una disminución en la relación aire combustible podría dar como resultado una inestabilidad en la flama presentando extinción, fenómeno que no sucedió en las pruebas, ya que el valor de la relación de equivalencia se mantuvo cerca del valor estequiométrico ($\phi=1$).

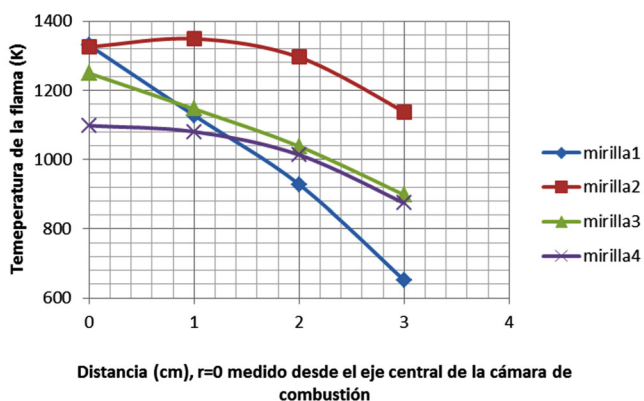


Figura 15. Perfil de temperaturas registradas en las pruebas experimentales de la cámara de combustión al utilizarse las placas perforadas tandem. Condiciones de la prueba: $P_{aire}=1018$ mbar, $T=30^{\circ}\text{C}$, $P_{gas}=4$ oz/plg², $T_{gas}=30^{\circ}\text{C}$.

El análisis de la forma y estabilidad de la flama se realizó de forma visual desde las cinco mirillas. Si la flama se encuentra alineada, en un corte longitudinal debería de verse los contornos de la flama verticales, tal como efectivamente se observó durante las pruebas en la mirilla 1 (ver figura 15). El comportamiento simétrico y la base anclada de la flama en la salida del quemador permitieron que esta no presentara en ningún momento de la prueba problemas de extinción. Por otro lado el color azul claro representa la zona de mezclado y el color azul oscuro representa la zona de reacción. La base de la flama ligeramente se despega del lado derecho de la salida del quemador debido a la región de baja velocidad como bien predijo el resultado del modelo numérico (ver figura 11). El comportamiento de los valores de la temperatura de la flama (ver figura 15) a 4 cm del eje central de la cámara de combustión es una característica de la disminución del diámetro de los orificios en la placa perforada localizada

en la salida del quemador (ver figura 9); más allá del punto de temperatura máxima los valores de temperatura decrecen más rápido para un diámetro menor de orificios (Dong, 2011).

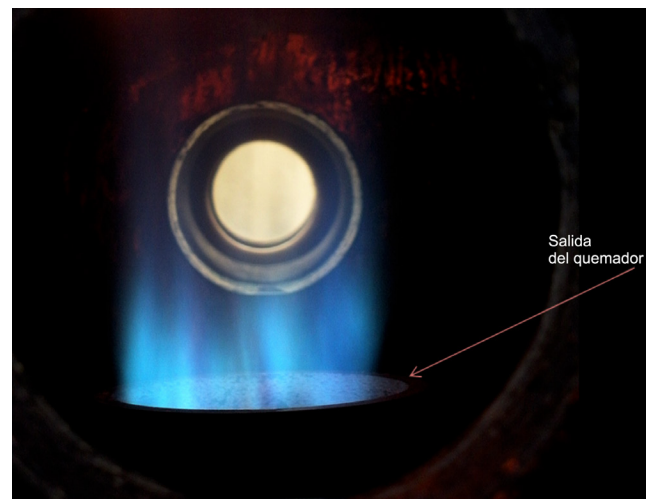


Figura 16. Fotografía de la flama adquirida desde la mirilla 1.

Durante las pruebas experimentales se monitorearon las emisiones de NO_x utilizando un medidor de emisiones contaminantes; el arreglo del quemador con placas tandem presenta una diferencia máxima de 3.35 ppm en emisiones de NO_x comparado con el caso del arreglo original (ver figura 17). La reducción en las emisiones se debe a la zona de recirculación que se genera al utilizar las placas tandem.

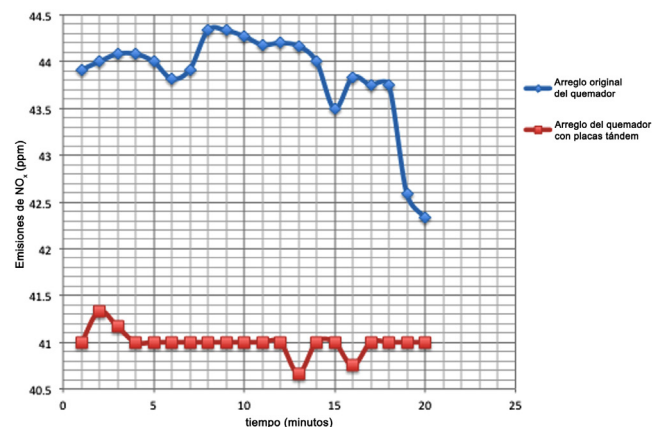


Figura 17. Comparación de curvas de emisiones de NO_x registradas durante las pruebas experimentales de la cámara de combustión. Condiciones de la prueba: $P_{aire}=1018$ mbar, $T=30^{\circ}\text{C}$, $P_{gas}=4$ oz/plg², $T_{gas}=30^{\circ}\text{C}$.

Conclusiones

La implementación de las placas perforadas tandem en esta investigación demuestra una mejora para el alineamiento, simetría y estabilidad de la flama. El resultado fue consecuencia de la optimización de la inyección de aire al utilizar placas perforadas con diseños previamente analizados en modelos numéricos computacionales, en los cuales se infería una mejora para la distribución de velocidad en el flujo de aire de inyección y genera una región de recirculación de

aire cerca de la inyección de combustible. Los resultados obtenidos en la simulación numérica indican que el valor máximo alcanzado del número de Mach es 0.27, lo cual permite asumir un campo de flujo incompresible en el aire de inyección, resultando en un ahorro de tiempo computacional. Las pruebas experimentales realizadas para evaluar la efectividad de las nuevas propuestas concluyen que efectivamente se mejora la estabilidad de la flama, además de encontrar que se logra en el diseño optimizado una reducción de combustible de 14.6% respecto a utilizar una sola placa perforada. Es importante destacar la reducción del consumo de aire en 48.35%, lo que contribuye a emitir menor cantidad de gases de escape a la atmósfera.

El instalar dos placas perforadas tándem a nivel comercial para cámaras de combustión implica incrementar costos de diseño y fabricación, sin embargo el ahorro de combustible registrado en las pruebas experimentales en este trabajo justifica esta acción. Es importante señalar que el rango de temperaturas monitoreadas en la parte experimental de ambos arreglos presentaron valores similares, por lo que no fue susceptible una mejora. Las emisiones NO_x presentan una disminución de 3.35 ppm para caso del arreglo con placas tándem comparado con el arreglo original, mostrando que la recirculación de aire contribuye a una mejora en el proceso de combustión. Sin embargo, se recomienda en futuros trabajos analizar el proceso de combustión completo con un modelo de simulación numérica para analizar si pequeñas modificaciones en la configuración geométrica del inyector de combustible podría lograr una combustión ultralimpia. Las placas perforadas tándem analizadas en este trabajo tienen como campo de aplicación todos aquellos dispositivos industriales que hacen uso del proceso de combustión como fuente de energía y que requieran generar una recirculación del flujo de aire de inyección para estabilizar la flama y mejorar el proceso de quemado.

Agradecimientos

Se agradece al Sector Hidrocarburos-Sener-Conacyt por la beca otorgada para realizar el proyecto de Investigación. Se agradece al Laboratorio de Sistemas de Combustión (IMP), por su apoyo para el desarrollo de esta investigación.

Referencias

- [1] Ahmed E.E. Khalil, Ashwani K. Gupta “*Swirling distributed combustion for Clean Energy Conversion in Gas Turbine Applications*”, Applied Energy 88, USA, 2011, págs. 3685-3693.
- [2] Ahmed E.E. Khalil, Vaibhav K. Arghode, Ashwani K. Gupta, Sang Chun Lee, “*Low Calorific Value Fuelled Distributed Combustion with Swirl for Gas Turbine Applications*”, Applied Energy 98, USA, 2012, págs. 69-78.
- [3] ANSYS-Fluent Inc. (2006), *User's guide Fluent 6.3*, ANSYS-Fluent, USA.
- [4] Bain DB, Smith CE, “*Mixing Analysis of Axially Opposed Rows of Jets Injected into Confined Crossflow*”, Journal of Propulsion Power 1995, 1985, págs.11-885.
- [4] Bain DB, Smith CE, “*Mixing Analysis of Axially Opposed Rows of Jets Injected into Confined Crossflow*”, Journal of Propulsion Power 1995, 1985, págs.11-885.
- [5] Esquivia-Dano, D. Escudié, “*A Way of Considering the Influence of the Bluff-body Geometry on the Premixed Flame Stabilization Process*”, Combustion and Flame 142, Francia, 2005, págs. 299-302.
- [6] Esquivia-Dano, H. T. Nguyen, D. Escudié, “*Influence of a Bluff-body Shape on the Stabilization Regime of Non-Premixed Flames*”, Combustion and Flame 127, Francia, págs. 2167-2180, 2001.
- [7] Fan Gong, Yong Huang, Xia Huang, “*Size Effect on the Flame Base Locations after V-gutters for Premixed Flames*”, International Journal of Heat and Mass Transfer 82, China, págs. 406-418, 2015.
- [8] L.L. Dong, C. S. Cheung, C. W. Leung, “*Combustion Optimization of a Port-array Inverse Diffusion Flame Jet*”, Energy 36, China, 2011, págs. 2834-2846.
- [9] Stefan Hjærtstam, Kias Andersson, Filip Johnsson, Bo Leckner, “*Combustion Characteristics of Lignite-fired Oxy-fuel Flames*”, Fuel 88, Sweden, 2009, págs. 2216-2224.
- [10] Steven G. Tuttle, Swetaprovo Chaudhuri, Kristin M. Kopp-Vaughan, Trevor R. Jensen, Baki M. Cetegen, Michael W. Renfro, Jeffrey M. Cohen, “*Lean Blowoff Behavior of Asymmetrically-Fueled Bluff Body-Stabilized Flames*”, Combustion and flame 160, USA, 2013, págs. 1677-1692.
- [11] Swetaprovo Chaudhuri, Stanislav Kostka, Michael W. Renfro, Baki M. Cetegen, “*Blowoff dynamics of Bluff Body Stabilized Turbulent Premixed Flames*”, Combustion and Flame 157, USA, 2010, págs. 790-802.
- [12] Valera Medina A. , Syred N., Abdulsada M., “*Análisis de Reflujo de Flama en Combustores Tangenciales de Flujo Giratorio*”, Ingeniería Investigación y Tecnología, Vol. XII, Núm. 4, FI-UNAM, México, 2011, págs.487-497.