

Análisis de impacto causado por estructuras coherentes en sistemas de combustión de flujo giratorio

Analysis of the Impact Caused by Coherent Structures in Swirling Flow Combustion Systems

Valera-Medina A.

*Departamento de Turbomaquinaria
CIATEQ. AC, Centro de Tecnología Avanzada, Querétaro
Correo: agustin.valera@ciateq.mx*

Griffiths A.

*Cardiff University, School of Engineering, United Kingdom
Correo: griffithsaj2@cf.ac.uk*

Syred N.

*Cardiff University, School of Engineering, United Kingdom
Correo: syredN@cardiff.ac.uk*

Información del artículo: recibido: marzo de 2010, reevaluado: enero de 2011, aceptado: marzo de 2011

Resumen

Entre las tecnologías más utilizadas en la generación de energía y propulsión de aviones para la reducción de emisiones se utilizan los flujos giratorios, los cuales han demostrado durante varias décadas su alto desempeño al facilitar el anclaje de la llama en los sistemas de combustión. Esto, aunado al uso de reactivos premezclados en las antecámaras, proporciona uno de los métodos más innovadores para la reducción de partículas de alto efecto invernadero, como son los óxidos de nitrógeno. Sin embargo, el entendimiento de estos flujos es aún precario y se requiere mayor investigación sobre el tema para poder esclarecer conceptos tan complejos como el rol que tienen las estructuras coherentes dentro del sistema de combustión. El presente artículo explica diversos fenómenos ocasionados por algunas de las estructuras coherentes observadas en este tipo de sistemas. Los resultados mostraron la existencia de complejas Zonas de Recirculación (ZR), Centros de Vórtice Precedores (CVP) y la Ruptura de Vórtice Inducido por Combustión (RVIC).

Descriptor

- estructuras coherentes
- velocimetría
- zona de recirculación

Abstract

Amongst the technologies used in the energy and propulsion generation for the reduction of emissions, the use of swirling flows has demonstrated its high performance in anchoring the flame inside of the combustion systems. This, added to the use of premixing in the pre-chambers, has created one of the most innovative methods for the reduction of highly polluting particles such as NOx. However, the lack of understanding of these flows makes it necessary to increase the research on the topic in order to clarify themes as complex as the role of the coherent structures inside of the system. This paper explains some of the phenomena produced by some of the coherent structures observed in the system. The results showed the existence of complex Recirculation Zones (RZ), Precessing Vortex Core (PVC) and Combustion Induced Vortex Breakdown (CIVB).

Keywords

- coherent structures
- velocimetry
- recirculation zone

Introducción

Entre las más prometedoras tecnologías utilizadas para reducir el impacto y la producción de óxidos de nitrógeno (NOx) se encuentran: premezclar el combustible con el aire a condiciones pobres y la combustión estabilizada por medio de flujos giratorios. Sin embargo, el premezclado no suele ser perfecto, ya que usualmente el combustible y el aire se mezclan poco antes de ingresar en la cámara de combustión, lo cual lleva a un alto grado de falta de mezclado (Sadanandan *et al.*, 2008). Esto genera un proceso muy complejo de generación de inestabilidades termoacústicas, el cual se retroalimenta durante el proceso de reacción de la combustión (Lieuwen *et al.*, 2005), (Meier *et al.*, 2007). Por otro lado, el uso de flujos giratorios ha demostrado una gran estabilidad de llama al utilizar estructuras coherentes como la Zona Central de Recirculación (ZCR) y las Zonas Exteriores de Recirculación (ZER), las cuales crean un anclaje al recircular productos que entran en contacto con el flujo cortante proveniente del difusor, lo que a la vez incrementa el tiempo de residencia de las partículas activas junto con los productos de combustión, permitiendo el uso de bajas razones de equivalencia. Esto conlleva a obtener llamas de menor temperatura, lo que reduce las reacciones de Zeldovich y con ello, las emisiones de NOx térmicos (Syred *et al.*, 1974 y 2006), (Valera *et al.*, 2008a; Brundish *et al.*, 2007). Sin embargo, hay varios huecos en el entendimiento de este tipo de llamas.

Los flujos giratorios han sido estudiados exhaustivamente para numerosas aplicaciones en combustores y quemadores (Valera *et al.*, 2008b; Claypole *et al.*, 1981; Gupta *et al.*, 1984; Froud *et al.*, 1995) con especial énfasis en las características tridimensionales de su estructura y el modo en que la llama es sostenida establemente (Syred *et al.*, 1974 y 2006; Gupta *et al.*, 1984). Se ha demostrado que el nivel de giro al estar acoplado con el modo de inyección de combustible puede inducir la

aparición de inestabilidades dinámicas indeseables (Lieuwen *et al.*, 2005; Al-Abdeli *et al.*, 2007; Candel, 2000), las cuales pueden alcanzar valores iguales a los de la resonancia natural del sistema excitando, a su vez, oscilaciones de gran amplitud que pueden dañar el equipo con el fallo parcial o total del mismo (Lieuwen *et al.*, 2005; Al-Abdeli *et al.*, 2007; Huang *et al.*, 2005; Cala *et al.*, 2006).

A modo de reconocimiento, Sadanandan *et al.* (2008), presentan la zona interna de la región de recirculación como un lugar con ausencia de altos niveles de reacción. En contraste, la zona de corte de flujo presenta una zona de intensa combustión, aunado a varias estructuras que parecen disipar energía, contribuyendo con ello a la extensión de la llama en esta zona (un tema que aun está en debate). Utilizando una técnica conocida como Análisis de Fluorescencia Inducida con Láser (PLIF por sus siglas en inglés), se han descubierto zonas de reacción donde coexisten regiones de equilibrio químico. Esto ha revelado la existencia de nuevas estructuras, las cuales contribuyen al complejo mecanismo de flujo en el sistema de combustión (Valera *et al.*, 2008b) y que por su geometría son difíciles de simular numéricamente. Estas estructuras, usualmente vórtices con forma curvada compleja, han sido observadas, incluso, a manera de dipolos que raramente se han mencionado en la literatura (Cala *et al.*, 2006).

Otro problema relacionado con las inestabilidades del sistema de combustión, es el modo de inyección del combustible (Meier *et al.*, 2007; Brundish *et al.*, 2007; Paschereit, 2008). La inyección difusa (no premezclada, directamente inyectada a la llama) con gran cantidad de movimiento (momento) ha mostrado ser menos sensible a las variaciones de presión, que aquellas inyecciones cuyo momento es menor. Estas últimas producen mayores variaciones en las razones de equivalencia, debido a la asimetría del flujo, lo que a su vez, crea bolsas de gas, representando el primer paso en el ciclo de retroalimen-

tación de oscilaciones por el criterio de Rayleigh (Lieuwen *et al.*, 2005; Meier *et al.*, 2007). Para aminorar el efecto se puede reducir la cantidad de combustible inyectado difusamente. Sin embargo, el uso de una llama difusa, por ejemplo una llama piloto no se puede evitar, ya que se ha confirmado que la estabilidad del sistema, especialmente a pobres razones de equivalencia, se mantiene a través de mayores rangos de operación con este tipo de inyección (Valera *et al.*, 2009a).

Otro problema relacionado con inestabilidades en el sistema es el que se refiere al reflujo de llama, siendo un fenómeno observado tanto en sistemas con dispositivos de inyección difusa, como en los que utilizan premezclado axial/radial en precámaras de combustión. El reflujo de llama es definido como el punto donde la llama físicamente se propaga aguas arriba de la región donde debería estar anclada, lo que ocurre a través de los pasajes de premezclado que no están diseñados para resistir altas temperaturas. Esto sucede por varias causas (Subramanya *et al.*, 2007; Thornton *et al.*, 2007; Lefebvre, 1999):

1. Propagación de llama turbulenta.
2. Propagación a través de la capa límite.
3. Por inestabilidades de combustión.
4. Propagación de estructuras coherentes.

El reflujo de llama en las cámaras de combustión limita el rango de trabajo de las mismas, así como su confiabilidad bajo condiciones de altos niveles de giro. En lo que respecta a la propagación de estructuras coherentes, se ha identificado un fenómeno conocido como Ruptura de Vórtice Inducido por Combustión (RVIC), el cual aparenta ser el mecanismo principal de reflujo. Básicamente se trata de una extensión de la Zona Central de Recirculación dentro de los pasajes de premezclado (Kroner *et al.*, 2003; Kiesewetter *et al.*, 2007). La extinción de las reacciones químicas es uno de los procesos que gobiernan el mecanismo de reflujo, así como la posición del vórtice y las razones de equivalencia ligadas a la liberación de calor. Sin embargo, poco se sabe al respecto al utilizar combustibles alternativos, retardantes de llama o nuevas geometrías de sistemas de inyección.

Por estas y otras razones es que se requiere un mejor entendimiento sobre la compleja interacción entre las estructuras coherentes de estos sistemas y las inestabilidades en las que actúan. Este artículo está orientado al análisis de las estructuras coherentes dentro de los sistemas de flujos giratorios, y cómo estos interactúan entre sí. Se presentan una serie de resultados bajo condiciones isotérmicas y de combustión, así como me-

canismos de reducción de impacto para el incremento de la resistencia a reflujo de llama.

Diseño experimental

Para el experimento se utilizó un combustor de tipo tangencial, el cual es un modelo de un combustor de 2MW de potencia. Para el ingreso de aire se utilizaron dos entradas con área tangencial variable, lo que se realizó usando insertos de diferentes diámetros, lo que a su vez, permitió un cambio en el número de Giro Geométrico (S_g). Este valor está directamente relacionado con el número de Giro (S), que es función del momento angular y axial del flujo, así como del diámetro de salida del combustor. S_g se define como,

$$S_g = \frac{\pi * r_e * r_i}{A_e}$$

Donde r_e , r_i y A_e son el radio de salida, el radio efectivo a la mitad de la tubería de entrada y el área de entrada, respectivamente. La geometría del sistema se documenta en (Valera *et al.*, 2009b). El sistema fue alimentado por medio de un turbosoplador, proveyendo aire a través de dos mangueras flexibles con rotámetros independientes para el control del flujo. El rango de flujo tuvo una variación entre 5,700 y 61,000 Re (basado en el diámetro de salida, D). La nomenclatura utilizada para referenciar el modo de inyección del aire es por medio de las siglas CA-X-Y, donde CA evoca la Condición de entrada de Aire, "X" el inserto utilizado del lado derecho y "Y" el inserto utilizado del lado izquierdo.

Se usaron 3 tipos de insertos a la entrada, 0%, 25% y 50%, siendo 0% el caso en que no se utilizó inserto en la tubería de entrada. Para ejemplificar, CA-25-25 se referirá al caso en que se bloquearon ambas entradas con un inserto de 25% del área total de las tuberías. La figura 1 muestra el combustor tangencial, mientras la figura 2 muestra un esquema de la posición de cada componente.

Cuando se hizo el análisis utilizando combustible, el sistema fue alimentado por medio de 2 diferentes modos de inyección:

- a) Modo difuso a través del eje central del combustor, alimentando gas directamente a la llama, sin premezclar, desde la base del combustor y
- b) Modo premezclado con entrada del combustible a través de uno o ambos conductos de entrada, localizando la inyección de combustible aguas arriba de los insertos de bloqueo.

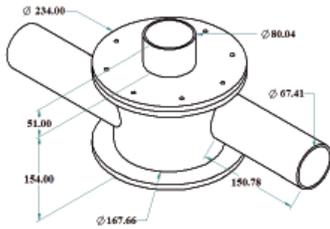


Figura 1. Geometría del combustor utilizado

Para la inyección de combustible, la nomenclatura a usarse será X-Y l/min, donde "X" representa la inyección difusa y "Y" la premezclada. El combustible utilizado fue gas natural británico. Se analizaron 3 modos de inyección difusa (figura 3).

- Inyector angosto, con un diámetro de 10 mm de boquilla, posicionado a 10 mm aguas arriba de la salida del combustor.
- Inyector ancho, con un diámetro de 23.4 mm de boquilla, posicionado a 47.5 mm aguas arriba de la salida del combustor.
- Inyector perforado, con 8 agujeros distribuidos alrededor del inyector, posicionado a 4.5 mm de la salida del combustor.

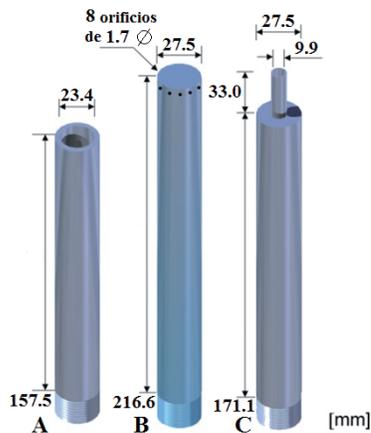


Figura 3. Inyectores utilizados: a) inyector ancho b) inyector perforado, c) inyector angosto

A modo de analizar el impacto del reflujo de llama, diferentes constricciones de tobera fueron utilizadas a la salida del combustor. Un caso considerado en el análisis es el que no tiene restricción, dos casos con restricción cuadrada con un diámetro interno de 0.8D y 0.9D, y finalmente uno angular y con salida de diámetro D (figura 4).

Para confinar el sistema se usaron diversas geometrías, las cuales se muestran en la figura 5. El primer confinamiento es de tipo cuadrado con área transversal

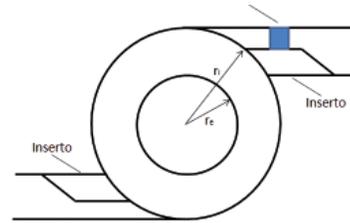


Figura 2. Esquema de la posición de componentes

de $2.00 \times 2.00 D^2$ (figura 5-A). La longitud total de los confinamientos fue de $2.50 D$, aún cuando sólo se midió hasta $1.67 D$. El segundo caso utilizó una salida piramidal de longitud $1.00 D$ y área transversal de $1.00 \times 1.00 D^2$ (figura 5-B). Finalmente, para el caso cuadrado se empleó una salida súbita con un orificio de $0.50 D$ (figura 5-C).

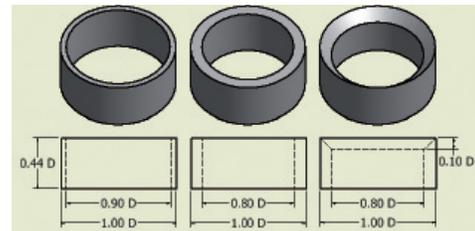


Figura 4. Constricciones de salida usadas

Varios confinamientos cilíndricos también fueron usados. El primero fue abierto con un diámetro de salida de $2.00 D$ (figura 5-D), seguido por uno cónico (figura 5-E) y uno de salida súbita con orificio de $0.5 D$ (figura 5-F), a modo de poder comparar los resultados entre las geometrías cuadradas y cilíndricas.

Para inicializar el sistema de medición se utilizaron señales eléctricas. El modo de adquisición de las señales varió con los experimentos realizados. Para el caso isotérmico se usó Anemometría de Hilo Caliente para grabar el paso de una región de alto momento ligada al Centro de Vórtice Precursor (CVP), señal que fue redireccionada a un transformador de Fourier que permitió el análisis de la señal y determinación de las armónicas del vórtice. El equipo usado fue un DISA 55M10 estándar con hilos calientes 55016 de DANTEC. La probeta fue colocada a $1.00D$ de la salida del combustor en una dirección ortogonal a la dirección tangencial del sistema. Un acondicionador de señal DISA 55D26 fue usado junto con un filtro de baja frecuencia para obtener valores por debajo de 125 Hz. Se usó también un osciloscopio Tektronic DS2024B de cuatro canales y velocidad de adquisición de 2Gmuestras/s.

La fluctuación de presiones bajo condiciones de combustión fue medida utilizando un micrófono EM-1 Yoga Electret, con una frecuencia de respuesta entre 20

Hz y 16 kHz, con una sensibilidad de 64 ± 3 dB. Se posicionó a 30 mm aguas arriba del orificio de salida del combustor. El uso de estos micrófonos para reconocimiento acústico del sistema ha sido bien documentado y avalado por trabajo de otros investigadores (Pascheireit *et al.*, 2008)

Visualización

La señal obtenida tanto por el sistema isotérmico como por el de combustión fue redireccionada a un sistema generador de pulso BNC 500, cuya señal TTL era enviada a un sistema de Velocimetría de Partículas (PIV por sus siglas en inglés) DANTEC. Este sistema consiste en un láser Litron tipo Nd:YAG de 532 nm a 5 Hz y una cámara Hi Sense MKII modelo C8484-52-05CP con 1.3 Megapíxeles de resolución a 8 bits. Con efecto de aumentar la resolución, una lente de 60 mm Nikon fue usada con una profundidad de campo de 1.5 mm. El sistema de medición se inicializó a 90% de los picos de voltaje más elevados después de 5 minutos de permitir al sistema correr libremente.

Se reconoce que este parámetro es arbitrario, pero su consistencia permitió obtener resultados repetibles, lo que a su vez, ayudó a realizar comparaciones cuantitativas entre todos los casos. El sistema se muestra en la figura 6.

Para los casos isotérmicos las partículas para seguimiento se inyectaron por medio de un nebulizador de agua, mientras que durante la combustión se usó óxido de aluminio Al_2O_3 , por medio de un sistema Vénturi posicionado a 2 metros aguas arriba de las entradas de aire del combustor.

Se visualizaron los planos axial y tangencial. Para los planos axiales el sistema era girado 11.25° para la obtención de todo el campo en tres dimensiones. En lo referente al plano tangencial, el muestreo se llevó a cabo cada $0.0407 D$. De los planos resultantes obtenidos bajo un proceso de promediación de 150 imágenes por plano se aisló la región de velocidad negativa (entre -3.0 y 0.0 m/s) para los planos axiales y la de baja velocidad (entre 0.0 y 0.3 m/s) para los planos tangenciales, regiones que luego fueron apiladas a través de un programa de Matlab para reconstruir las estructuras en tres dimensiones. La metodología se muestra en la figura 7.

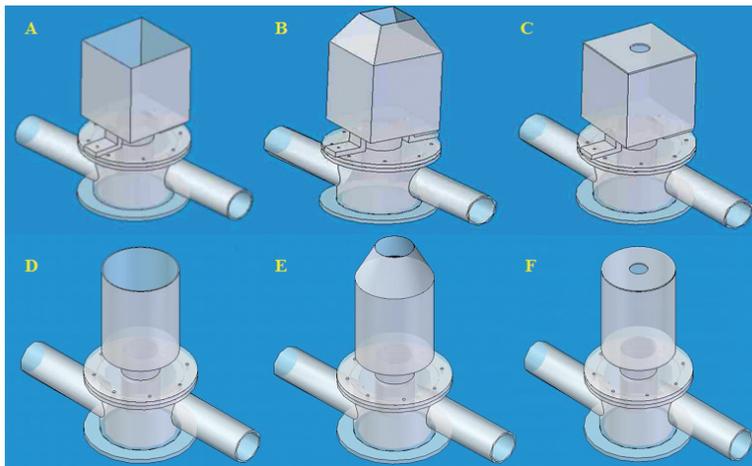


Figura 5. Geometrías usadas para el confinamiento del sistema

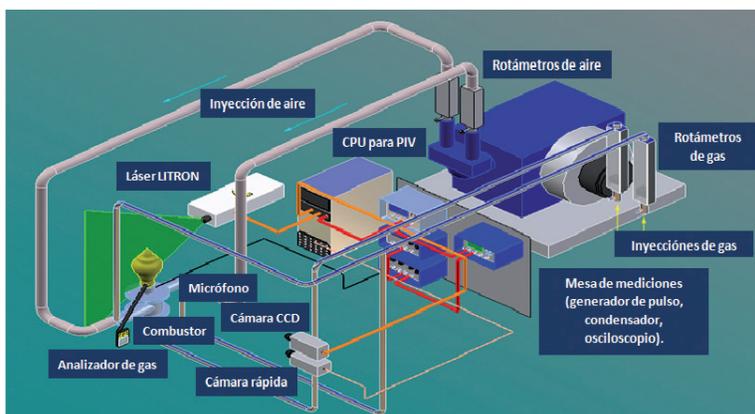


Figura 6. Sistema completo

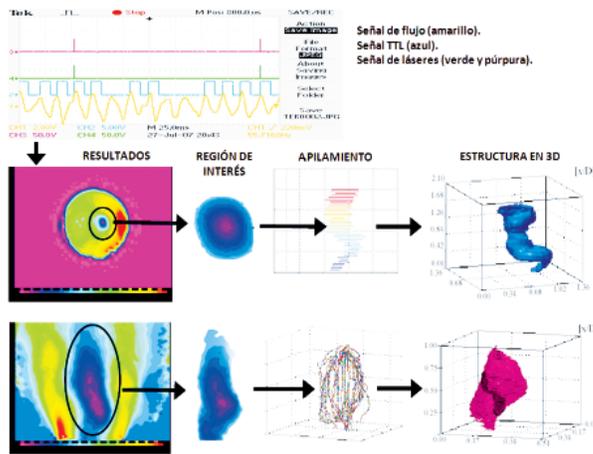


Figura 7. Metodología para la obtención de estructuras en el plano axial y tangencial, respectivamente

Otras estructuras se visualizaron durante la combustión por medio de una cámara de rápida exposición Fastcam modelo APX RS, operando a 4,000 fotos/s. Se usó una lente Nikon 1:2.8. Las imágenes fueron analizadas con el software PFV. Para el reconocimiento del plano tangencial se utilizó un espejo de acero inoxidable localizado a 0.5 m de la salida del combustor, rotándolo a 45.00° para la captura de imágenes en dicho plano, al mismo tiempo de hacer tomas en el eje axial del sistema.

Resultados y discusiones

Análisis de señal

La relación que existe entre las inestabilidades del sistema y el número de Reynolds mostró una independencia a altos Re, como varios autores han corroborado en estos sistemas de combustión (Syred *et al.*, 2006; Valera *et al.*, 2009b).

Además, al hacer un análisis de la precesión del sistema por medio del Anemómetro, se observó que las armónicas se mantenían en 55 Hz y sus múltiplos, tal y como se ha observado qué sucede con el CVP (Syred *et al.*, 2006). Esto aseguró la obtención de datos del fenómeno de interés.

Análisis isotérmico

El análisis axial reveló la existencia de una región de velocidad negativa que concuerda con la descripción de la Región Central de Recirculación mencionada por otros autores (Syred *et al.*, 2006; Claypole *et al.*, 1981; Gupta *et al.*, 1984; Froud, *et al.*, 1995). La figura 8 muestra una de estas zonas de recirculación obtenidas para un sistema sin confinamiento.

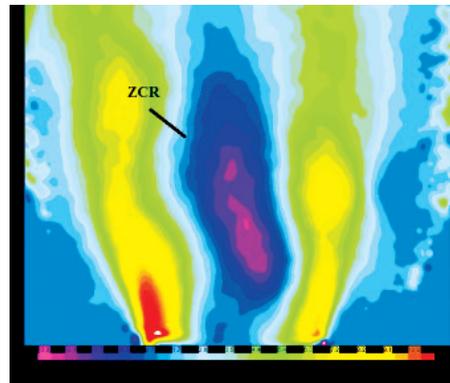


Figura 8. Plano a 45.00°. Zona central de recirculación. Escala en m/s

El análisis también se realizó en el plano tangencial, en el cual se observó con gran claridad la existencia del Centro de Vórtice Precursor, especificado por la región de baja velocidad adyacente a la región de Alto Momento que realiza el accionamiento del sistema láser (figura 9).

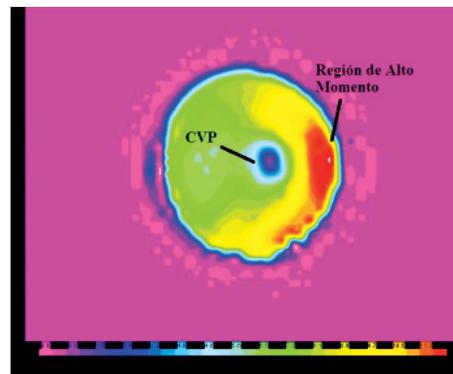


Figura 9. Plano a 0.00 D de la salida del combustor. Escala en m/s

Al realizar la tridimensionalización de las estructuras (figura 7) se obtuvieron 2 estructuras coherentes que actúan muy estrechamente la una con la otra (figura 10), con una compleja interacción. Como puede observarse, la zona inferior de la ZCR es muy estrecha mientras que el CVP presenta la mayor coherencia en la zona baja del campo de estudio, junto a la salida del combustor.

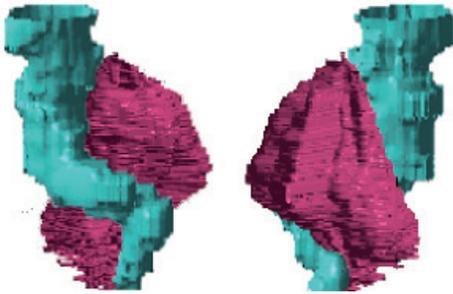


Figura 10. Flujo total. CVP y ZCR unidas

Sin embargo, conforme se alejan de la salida del combustor, la ZCR aumenta su fuerza expandiéndose en contra del flujo y del CVP. Finalmente, la ZCR se contrae mientras el CVP comienza a expandirse y a desaparecer. Esto se considera un fenómeno causado por la interacción que existe entre ambos cuerpos. Al crearse el CVP a causa del giro del flujo y el apilamiento de vórtices más pequeños, la ZCR se ve suprimida por el momento de la primera estructura.

Conforme se aleja de su origen, el CVP comienza a perder fuerza, sin desaparecer, esto debido al intercambio de momento y partículas provenientes de la ZCR. Sin embargo, al llegar a su extremo final, la ZCR se ve suprimida por las condiciones del sistema, el cual no

puede mantener la recirculación a tan lejana distancia de la salida, haciendo que la ZCR se encapsule y su contacto con el CVP desaparezca, lo que a su vez ocasiona la desintegración de esta estructura aguas abajo por falta de energía que la sostenga, esto por escasa interacción con la ZCR.

Al llevar a cabo el análisis para todas las geometrías mostradas en la figura 5, los resultados arrojaron conclusiones de que la geometría del sistema es fundamental para la forma e interacción de las estructuras coherentes. Cala *et al.* (2006) argumentan la existencia de más de 2 estructuras con la aparición de una segunda Zona Central de Recirculación, lo que corroboran con análisis numéricos. Al utilizar los diferentes confinamientos (figura 5) esta nueva zona fue visualizada, lo cual se atribuye a la reducción de decaimiento de la presión por el mismo confinamiento, reduciendo la expansión del flujo, y con ello, retrasando la caída de presión en el sistema. Esta estructura ZCR2, también se ve afectada por el incremento de presión del sistema al utilizar las geometrías con salidas súbitas, lo que produce una supresión casi total de esta nueva zona de recirculación para el caso cilíndrico (figura 11).

Por otro lado, el CVP también se ve afectado por este cambio en las condiciones de presión causadas por la geometría, ya que mientras mayor es el incremento de presión y menor su decaimiento la estructura comienza a tomar una forma menos helicoidal, lo que se traduce en un vórtice que deja de precesar para el caso cilíndrico de salida súbita (figura 11). A pesar de que en el sistema se vislumbra la existencia de varios remolinos adyacentes a este vórtice y que pudieran estar aumentando el mezclado de partículas (Froud *et al.*, 1995), la caída de presión que se tiene en el sistema probablemente no valga su implementación industrial. Sin em-

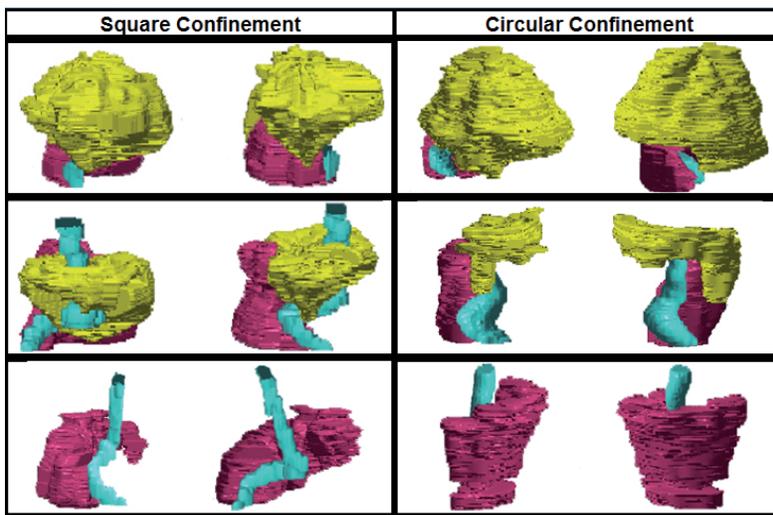


Figura 11. Resumen de estructuras bajo condiciones isotérmicas. CVP (azul), ZCR (púrpura) y ZCR2 (amarillo), CA-25-25.

bargo, se demuestra con estos resultados que tanto la ZCR como el CVP son estructuras manipulables por medio del cambio de geometría en el sistema.

Análisis con combustión. Inyectores

Cuando son utilizados combustibles líquidos, un atomizador es requerido para hacer la inyección del combustible al sistema. Usualmente éste se localiza en la parte central del combustor disparando el combustible con una forma cónica para su mejor dispersión y mezcla con el oxidante. La inyección se realiza de modo que el cono de gotas entre en contacto tanto con la ZCR como con el flujo cortante proveniente del combustor, la región que se caracteriza por presentar mayor combustión en el sistema (Sadanandan *et al.*, 2008). Por su importancia, en este tipo de sistemas se ha diseñado un experimento utilizando varios inyectores (figura 3), en donde el combustible se inyecta de manera difusa. Sin embargo, se debe tener en cuenta que al colocar estos mecanismos la llama puede fluir de regreso, causando daños por sobrecalentamiento o por cenizas que se impregnan a los inyectores por las altas temperaturas y afinidad química.

Los estudios iniciales se enfocaron en caracterizar el tipo de llama producida por cada uno de los inyectores usados. Se desarrollaron mapas característicos del sistema, similares a los desarrollados por Lafay *et al.* (2006) y por Bradley *et al.* (1998). Las figuras 12 y 13 muestran los mapas para las configuraciones CA-50-50 y CA-25-25 usando el inyector angosto (figura 3c). Los regímenes reconocidos fueron:

- Llamas muy inestables y largas, las cuales podían estar flotando. Estas llamas estaban muy cerca del

punto de reflujo de llama. No se localizó ninguna ZCR, con un CVP muy irregular e intermitente.

- Llamas largas, estables y corrugadas. Todas están unidas al combustor. Presentan ruptura de vórtice y los CVP tienden a ser irregulares e intermitentes.
- Llamas estables, cónicas y de mediana longitud, las cuales estaban claramente estabilizadas por la presencia de una ZCR. Señales de CVP muy claras, las cuales son mucho mejores para la activación del disparo del láser.

Llamas estables, aplanadas y pequeñas. Estas llamas no se extienden alrededor de la ZCR, lo cual causa una recirculación de productos más fríos. Esto ocasiona que las mismas se encuentren muy cerca del límite de extinción. Las señales de los CVP son muy fuertes, permitiendo una buena sincronización con el láser.

El tipo de llama C es el más estable y común en los combustores industriales.

Como puede verse en las figuras 12 y 13, el tipo de configuración utilizada también define el mapa de la llama, de modo que los límites entre las regiones de llama se ven alterados por las condiciones de entrada del flujo. Para el caso CA-25-25 la estabilidad en la región C es más acotada en términos de rangos de razón de masa.

Sin embargo, el caso CA-50-50 muestra variaciones más abruptas con combinaciones de 'razón de masa-razón de equivalencia' más precisas y de menor cantidad de combinaciones, lo que se atribuye al elevado nivel de giro que este sistema presenta y que rápidamente permite la estabilización de la llama, aún cuando esta estabilización esté más propensa a inestabilidades inherentes al extremo valor de S_g .

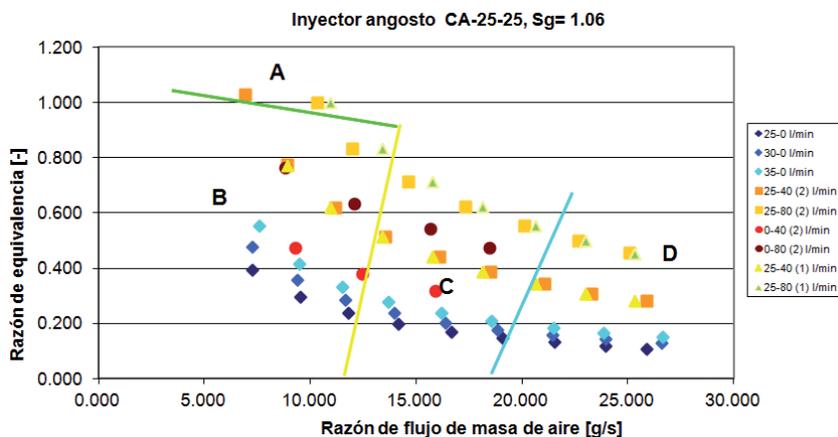


Figura 12. Razón de flujo de masa de aire contra razón de equivalencia con el inyector angosto, CA-25-25

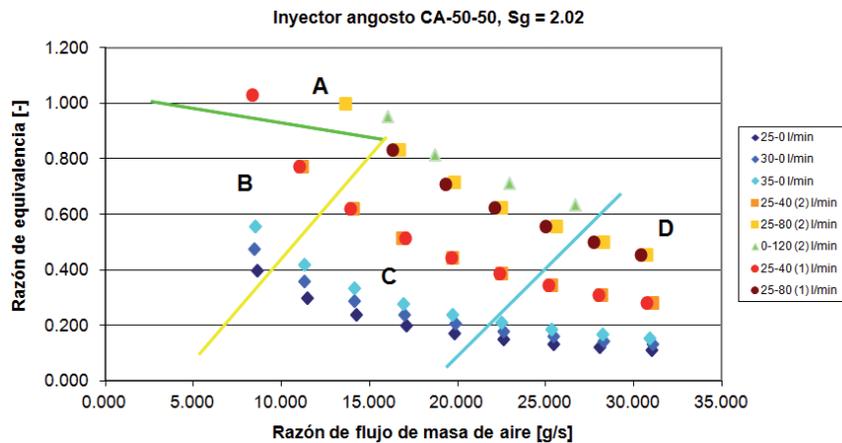


Figura 13. Razón de flujo de masa de aire contra razón de equivalencia con el inyector angosto, CA-50-50

Análisis con combustión. Fotografía rápida

Una investigación con fotografía rápida se realizó para determinar la ocurrencia del CVP y las ZCRs, así como su ubicación en los mapas de regímenes de llama (figuras 12 y 13). Para ello se utilizaron tres diferentes configuraciones, CA-50-50 con $S_g = 2.02$, CA-50-0 con $S_g = 1.16$ y CA-25-25 con $S_g = 1.08$, todas sin inyector difuso de combustible. Todos los resultados mostraron la existencia del CVP de un modo u otro. Algunas no sólo mostraron un CVP, sino que indicaron la existencia de un par de vórtices que se interconectan y giran en direcciones opuestas por algunos microsegundos, algo también observado por Syred (2006). Esto sucede a bajos números de Re , lo que pareciera ocurrir una vez que se ha producido la ruptura de vórtice, desapareciendo rápidamente por el incremento del Re de $\sim 5,000$ a $10,000$, siendo reemplazado por un solo CVP. El fenómeno en su totalidad se puede ver como un solo CVP del que surge un doble CVP que luego desaparece, con ciclos que son aproximadamente de 0.046 s. Dentro de los ma-

pas de llamas, estas llamas usualmente están en la región B de las figuras 12 y 13. Una vista típica de un CVP puede verse en la figura 14, mientras que la figura 15 denota unos CVP de doble hélice.

Análisis con combustión. Uso de PIV

Un análisis utilizando PIV se realizó utilizando todos los modos de inyección antes mencionados con el objetivo de determinar cómo el modo de inyección afecta la geometría de las estructuras coherentes (ZCR, CVP, etc.) del sistema.

Debido a la complejidad del fenómeno y a la gran diversidad de datos por obtener, únicamente se tomaron muestras de las ZCRs. La figura 16 muestra varios de los resultados obtenidos usando los 3 inyectores difusos (figura 3), así como el caso donde no se utilizó inyector para la configuración CA-50-50.

Al hacer la comparación entre experimentos se demostró que el mejor fue el que utilizaba el inyector perforado produciendo una llama mucho más consistente

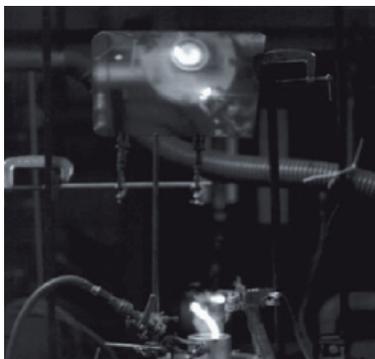


Figura 14. CVP simple. $Re \sim 5,600$ y razón de equivalencia (r.e.) de 0.78



Figura 15. Doble hélice. Estos CVP muestran 2 tipos de estructura: una donde las hélices tienen el mismo tamaño y fuerza, y otro donde la hélice menor gira alrededor de la principal, respectivamente



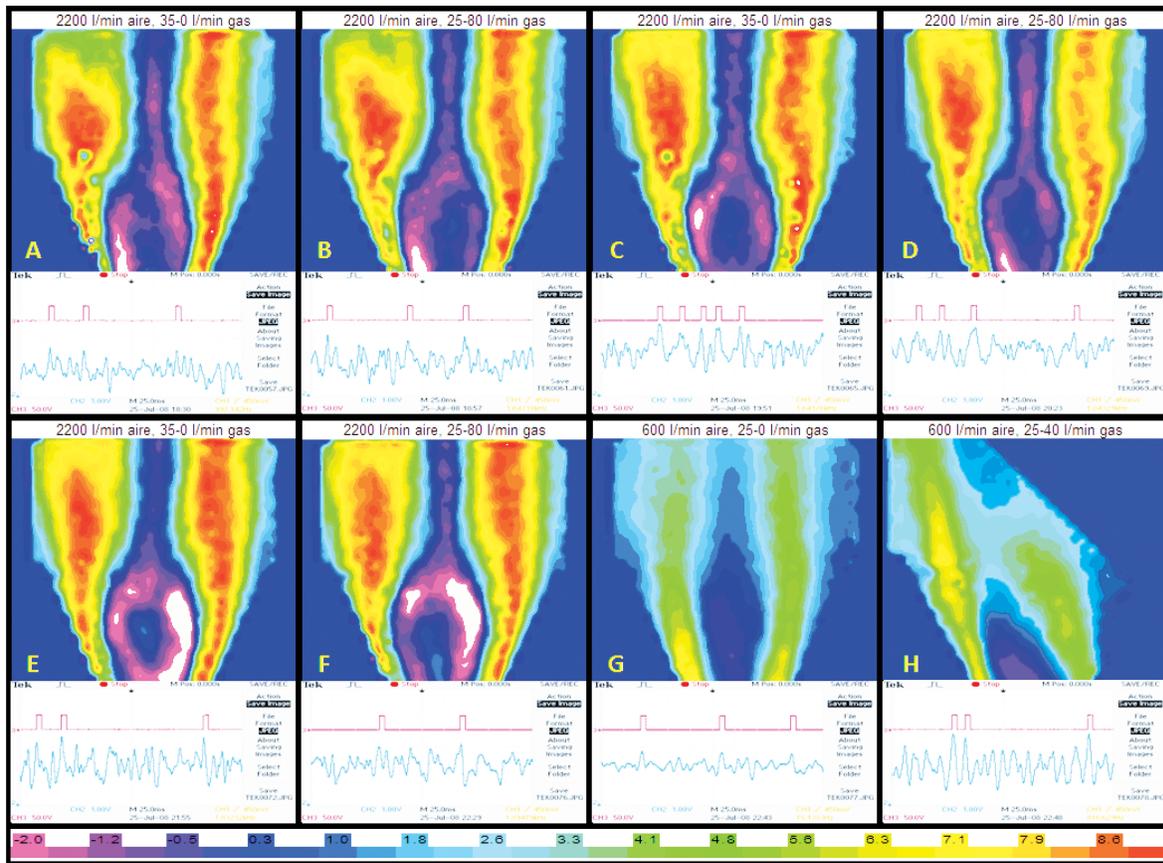


Figura 16. Resultados empleando diferentes inyectores difusos. Configuración CA-50-50: a) inyector perforado, $Re \sim 39,300$, $r.e. = 0.15$, b) inyector perforado, $Re \sim 40,500$, $r.e. = 0.45$, c) inyector ancho, $Re \sim 39,300$, $r.e. = 0.15$, d) inyector ancho, $Re \sim 40,500$, $r.e. = 0.45$, e) inyector angosto, $Re \sim 39,300$, $r.e. = 0.15$, f) inyector angosto, $Re \sim 40,500$, $r.e. = 0.45$, g) sin inyector, $Re \sim 11,000$, $r.e. = 0.40$, h) sin inyector, $Re \sim 11,700$, $r.e. = 1.03$. La barra de colores representa la velocidad en m/s

y limpia. Esto se debe a que la inyección radial del gas aumentaba el mezclado con el flujo ya premezclado, además de proveer de suficientes radicales a las zonas de recirculación.

Se observó que la inyección difusa de poco gas incrementó la estabilidad de la llama por medio de su anclaje, lo que se corroboró para todos los modos de inyección difusa. Las bolsas de gas, las cuales generan inestabilidades, eran menores con la inyección radial debido a una mejor distribución del gas inyectado.

Al comparar los casos con el inyector angosto y el ancho, este último resultó más viable para su uso industrial. Para el inyector angosto, la inercia producida por el flujo hace que la ZCR se vea afectada en su geometría (figura 17), lo cual crea más bolsas de gas que a su vez promueven las inestabilidades vía el criterio de Rayleigh, por lo que su aplicación es menos adecuada.

Cabe mencionar que la ZCR se comportó como una burbuja, inflándose con la inyección difusa. Al tratar de

expandirse y no verse favorecida por las altas corrientes y presiones que actuaban sobre ella, la ZCR trató de buscar una salida, encontrándola a través de la parte superior del campo de flujo, lo que a su vez generó una cola de productos calientes (figura 16). Es por ello que se puede concluir que se trata de una estructura activa que se encuentra cambiando junto con el flujo, sirviendo como anclaje, pero también como un equilibrio de presiones para el sistema en sí.

Estos resultados permitieron un análisis de velocidades promedio para verificar la fuerza y grado de recirculación de las ZCR en condiciones asimétricas y simétricas con insertos de 50%. Los resultados se muestran en la tabla 1. Se puede observar que los casos con simetría presentan zonas de recirculación de mayor intensidad.

También es notorio que el uso del inyector angosto con una condición simétrica genera la mayor recirculación, un fenómeno atribuido al modo de inyección del

gas, el cual al empujar de sobremanera la zona de recirculación hace que las presiones internas aumenten, a modo de que las presiones externas generen una compensación de mayor intensidad que en los otros casos, aumentado así la intensidad de la velocidad dentro de la ZCR.

Tabla 1. Análisis de velocidad promedio

Inserto	Inyector	Velocidad [m/s]
[50-0]	Perforado	-1.2894
[50-0]	Ancho	-1.0005
[50-0]	Angosto	-1.1871
[50-50]	Perforado	-1.576
[50-50]	Ancho	-1.5234
[50-50]	Angosto	-1.6043

Análisis de reflujo de llama al inyector

Uno de los puntos observados durante los experimentos fue el reflujo de llama a altos Re , así como la falta de estabilidad por parte de la llama cuando se eliminaba el uso de inyección difusa. Por esta razón es que se analizaron diferentes geometrías con el objetivo de determinar cuál era el fenómeno de propagación causante de la inestabilidad, y con ello definir algún medio de supresión. Se utilizó el inyector ancho debido a la mayor cantidad de resultados que se podrían obtener por su menor inestabilidad.

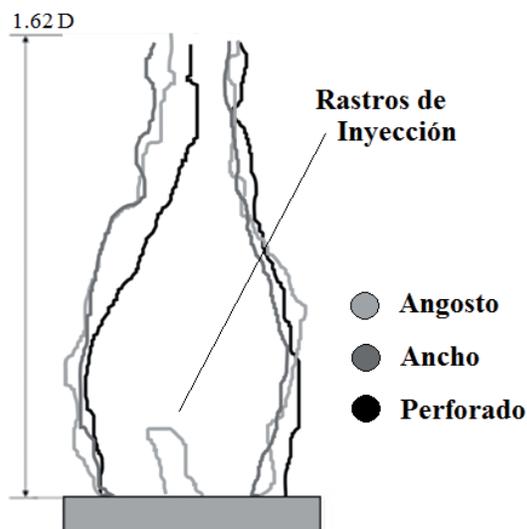


Figura 17. Comparación entre ZCRs. Se tomó como referencia el límite a 0.00 m/s. Se muestran rastros de velocidades positivas dentro de la ZCR

El uso de constricciones (figura 4), demostró ser un factor imperante en este fenómeno. La figura 18 muestra los diferentes resultados de las llamas a razones de equivalencia cercanos a 0.27 usando diferentes constricciones. Al no utilizar constricción (figura 18a), la llama alcanza el inyector creando una zona muy contaminada y de muchas emisiones. Al apagar el equipo, fue notoria la gran cantidad de ceniza acumulada en el inyector. Al cambiar a la constricción cuadrada de $0.9 D$ (figura 18b), la llama resistió mucho más el empuje generado por el flujo (el cual es causante de la recirculación). Sin embargo, todavía alcanzaba a tocar el inyector (un hecho enfatizado por el color de la llama). Al reducir aún más el diámetro de la constricción (figura 18c) la llama era empujada hacia arriba todavía más. Sin embargo, debido a la geometría de la constricción de tipo cuadrado, el flujo cortante era tan fuerte por la reducción de la salida y el aumento local de Re , que la llama se encontraba más cerca de la extinción. Finalmente, aprovechando la constricción de la salida y permitiendo la recuperación de la llama a través de un ángulo de salida (figura 18d), se alcanzó la mayor estabilidad con la supresión de contacto con el inyector. La mayor estabilidad también está ligada a que durante la recuperación parte del momento tangencial perdido por la constricción que se recupera, lo que incrementa la estabilidad de la zona de recirculación.

La coherencia y fuerza de recirculación de estos casos fue corroborada con el uso de PIV (figura 19). Resulta claro que el caso angular es el que mayor fuerza tiene en su ZCR al crear una región más compacta que está fuera de los límites de visualización especificados para el análisis (-2.00 m/s). Además, se puede ver cómo esta zona presenta un abultamiento a los lados, lo cual seguramente incrementa el contacto con los reactivos provenientes del combustor. Esto aumenta las reacciones de combustión y con ello la eficiencia del sistema para evitar la extinción de la llama.

Resulta claro que la fuerza de la Zona Central de Recirculación es la que provoca el reflujo de llama a la punta del inyector. Sin embargo, cuando ésta es empujada hacia arriba por medio de altos flujos de aire a través de constricciones más angostas, la estructura no alcanza a tocar el sistema, evitando así la formación de ceniza o el sobrecalentamiento del componente.

Análisis de reflujo al interior del combustor

Otro fenómeno fue el reflujo hacia el interior del combustor. Para su análisis se utilizó la constricción angular debido a que ésta mostró la mayor confiabilidad en términos de eliminación de reflujo a la punta del inyector.

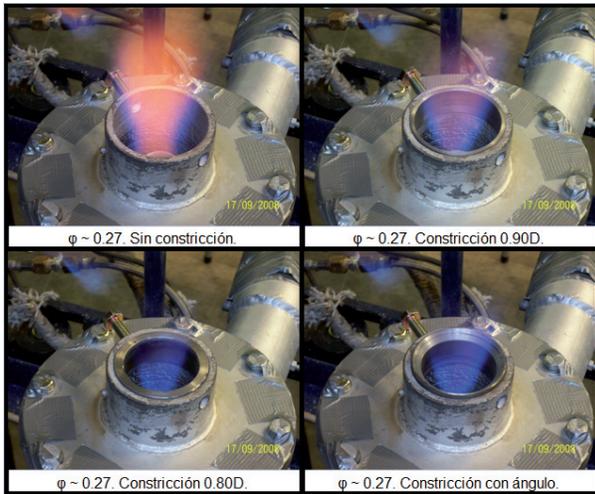


Figura 18. Llamas observadas con diferentes constricciones de salida. Razón de equivalencia 0.27

Se utilizaron diferentes razones de equivalencia y se comparó el caso sin confinamiento con el que tiene confinamiento cilíndrico abierto (figura 5d). Solo se usó inyección premezclada.

Los experimentos se comenzaron sin inyector para determinar la influencia de este elemento en el sistema y en el fenómeno de reflujo hacia el interior del combustor. Los resultados (figura 20), mostraron que la ausencia de confinamiento (figura 20a), crea un sistema mucho más resistente al reflujo de llama hacia el interior del combustor. Al compararlo con el caso de confinamiento (figura 20b) se puede observar cómo este último tiene una resistencia mucho más limitada. Esto se debe a la mayor fuerza que presenta la ZCR en el segundo caso, la cual se encuentra empujando la llama hacia dentro del combustor, un fenómeno observado en el reflujo hacia la punta del inyector. Cabe mencionar que ambos casos tienen muy poca resistencia al fenómeno de reflujo, con un rango de estabilidad muy corto

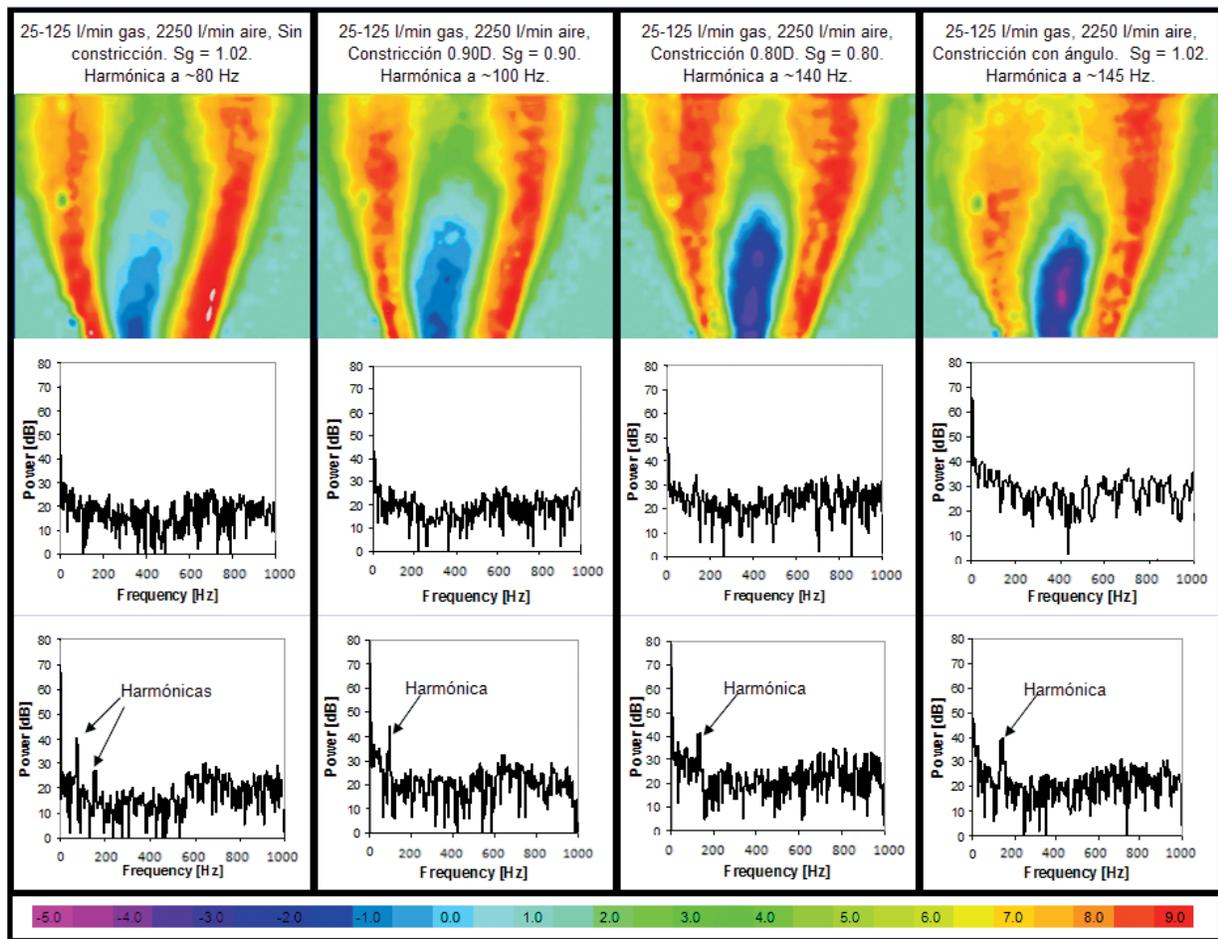


Figura 19. Casos a razones de equivalencia de 0.62 e inyecciones de 25-125 l/min. La primera fila de señales se refiere a condiciones bajo combustión, mientras la segunda son condiciones isotérmicas: a) sin confinamiento, b) constricción de 0.90D, c) constricción de 0.80D, d) constricción con ángulo. La barra de colores representa la velocidad en m/s

que requiere altas velocidades de flujo de salida para poder mantener la llama estable.

Al colocar el inyector en su lugar manteniendo apagada la inyección difusa, se observó que para ambos casos, tanto con confinamiento como sin él, el fenómeno de reflujo se redujo considerablemente. Más interesante fue el hecho de que ambos sistemas presentaron la misma tendencia a la resistencia de reflujo de llama (figura 21). Esto se puede explicar por medio del concepto de Ruptura de Vórtice Inducido por Combustión, RVIC.

De acuerdo a Kroner *et al.* (2003), la Zona de Recirculación al propagarse por los conductos del sistema (donde se convierte en RVIC) produce una mayor presión sobre la llama, la que a su vez, al no poder ser contrarrestada por el flujo proveniente del combustor (el cual se ha reducido para incrementar la razón de equivalencia) ingresa al combustor causando el reflujo y la ignición dentro del equipo. Los experimentos aquí presentados demuestran la existencia de esta estructura, y

más aún, la supresión por medio de un cuerpo central (en este caso el inyector) que está impidiendo la propagación de la estructura, dejando el reflujo de llama en función de las condiciones de capa límite del sistema, las cuales son iguales para ambos casos.

Conclusiones

Se demostró la existencia de una gran gama de estructuras que interactúan entre sí dentro de los flujos giratorios. Esencialmente:

- La Zona Central de Recirculación está ligada al Centro de Vórtice Precesor, donde el intercambio de energía entre ambos permite su coherencia en el sistema.
- La geometría del sistema influye en la forma de estas estructuras y en su interacción, haciendo que el decaimiento de presiones sea fundamental en el desarrollo o supresión de estructuras extra.

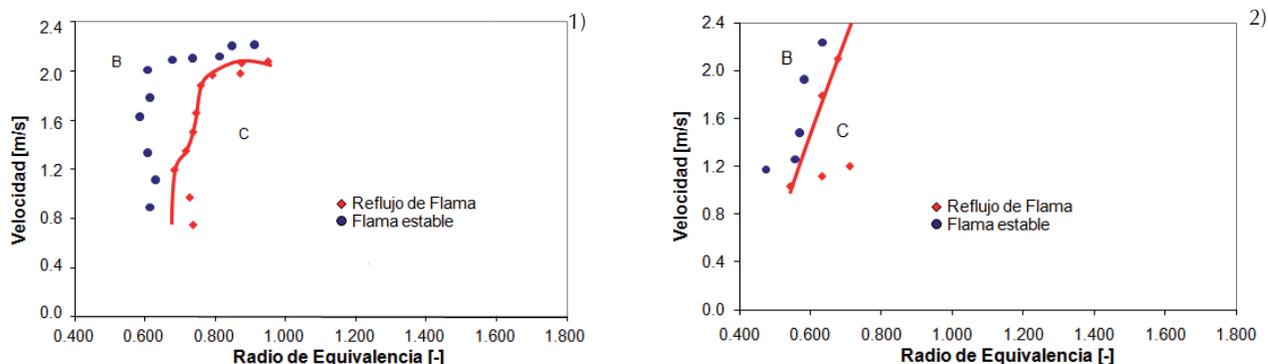


Figura 20. Comparación de casos para el reflujo de llama hacia dentro del combustor sin inyector. Constricción angular: 1) sin confinamiento, 2) con confinamiento. B) zona estable de llama, C) zona de reflujo de llama

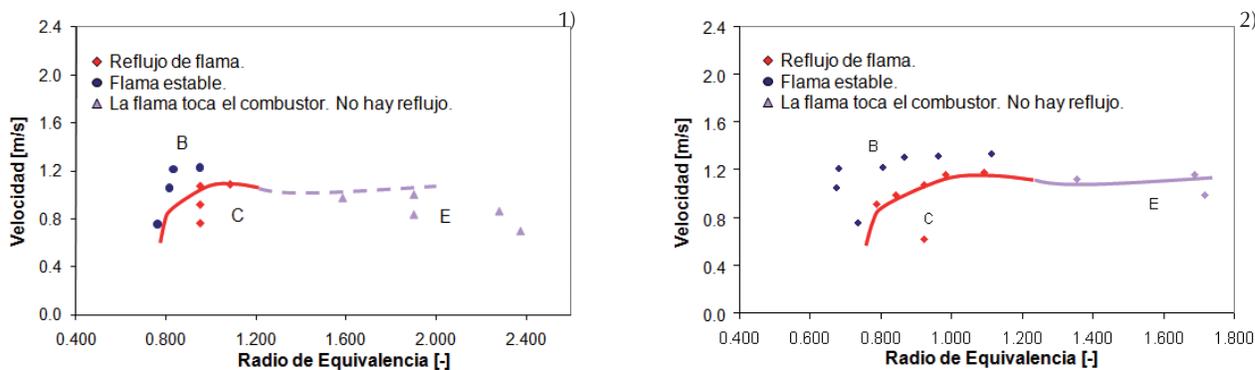


Figura 21. Comparación de casos para el reflujo de llama hacia dentro del combustor con inyector. Constricción angular: 1) sin confinamiento, 2) con confinamiento. B) zona estable de llama, C) zona de reflujo de llama, D) zona de pulsaciones, E) la llama toca el combustor, pero no hay reflujo

- Las estructuras son controlables debido a sus características. El Centro de Vórtice Precesor puede ser modificado al punto de suprimir su precesión, así como a la Zona Central de Recirculación se le puede aumentar su intensidad por medio de la generación de mayores presiones, tanto internas (por inyección difusa), como externas (por el flujo saliente/cortante).
- La ZCR además de anclar la llama también actúa como un medio de equilibrio para las presiones del sistema.
- El uso de inyección difusa es vital para la mayor estabilización del sistema. Sin embargo, el uso de inyectores que producen flujo de gran momento pueden crear inestabilidades por la creación de bolsas de combustible, así como deformaciones de la ZCR.
- El uso de constricciones a la salida del combustor puede reducir el reflujo a las puntas de los inyectores con una llama muy estable por medio de la creación de una Zona Central de Recirculación más fuerte a elevados Re , que sea empujada aguas arriba por la reducción en el diámetro de la salida del flujo cortante, permitiendo la recuperación de la llama a través de un ángulo de salida.
- El uso de inyectores al centro del arreglo evita el ingreso del Vórtice Inducido por Combustión suprimiendo esta estructura, lo cual aumenta la resistencia al reflujo de llama hacia los conductos e interior del combustor, dejando el proceso como un fenómeno de capa límite.

Agradecimientos

Valera-Medina A. agradece el apoyo del CONACYT para la realización de su doctorado en la Universidad de Cardiff, Reino Unido, donde se llevó a cabo el desarrollo de este artículo. Los autores también agradecen al Ing. José Pedro Agustín Valera Negrete por sus contribuciones a la revisión de la redacción del presente artículo.

Referencias

- Al-Abdeli Y., Masri A. Turbulent Swirling Natural Gas Flames: Stability Characteristics, Unsteady Behaviour and Vortex Breakdown. *Combust. Sci. Technology*, 179:207–225, 2007.
- Bradley D., Gaskell P., Gu X., Lawes M., Scott M. Premixed Turbulent Flame Instability and no Formation in a Lean Burn Swirl Burner. *Combustion and Flame*, 115:515–538, 1998.
- Brundish K., Miller M., Morgan L., Wheatley A. *Variable Fuel Placemnt Injector Development. Advanced Combustion and Aerothermal Technologies*, NATO Science for Peace and Security Series, Springer, 2007, pp. 425–444.
- Cala E., Fernandes C., Heitor M., Shtork S. Coherent Structures in Unsteady Swirling Jet Flow. *Experiments in Fluids*, 40:267–276, 2006.
- Candel S. Combustion Dynamics and Control: Progress and Challenges. *Proc. Combust. Inst.*, 29:1–28, 2000.
- Claypole T., Syred N. Integration of Swirl Burners with Furnaces for the Combustion of Low Calorific Value Gases. International Conference on Combustion in Engineering, I. Mech. E. *Conference Publications*, 2:139–145, 1981.
- Froud D., O'Doherty T., Syred N. Phase Averaging of the Precessing Vortex Core in a Swirl Burner Under Piloted and Premixed Combustion Conditions. *Combustion and Flame*, 100(3): 407–412, 1995.
- Gupta A.K., Lilley D.J., Syred N. *Swirl Flows*. Abacus Press, Tunbridge Wells, United Kingdom, 1984.
- Huang Y., Yang V. Effect of Swirl on Combustion Dynamics in a Lean Premixed Swirl Stabilized Combustor. *Proc. Combust. Inst.*, 30(2):1775–1782, 2005.
- Kiesewetter F., Konle M., Sattelmayer T. Analysis of Combustion Induced Vortex Breakdown Driven Flame Flashback in a Premix Burner with Cylindrical Mixing Zone. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 129:929–236, 2007.
- Kroner M., Fritz J., Sattelmayer T. Flashback Limits for Combustion Induced Vortex Breakdown in a Swirl Burner. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 125:693–700, 2003.
- Lafay Y., Taupin B., Martins G., Cabot G., Renou B., Boukhalfa A. Experimental Study of Biogas Combustion Using a Gas Turbine Configuration. *Experiments in fluids*, 43(2-3):112–128, 2006.
- Lefebvre A.H. *Gas Turbine Combustion*, 2nd Ed. Taylor & Francis Group, New York, USA, 1999.
- Lieuwen T., Yang V. *Combustion Instabilities in Gas Turbine Engines*. AIAA, Progress in Astronautics and Aeronautics, vol. 210, USA, 2005.
- Syred N., Beer J. Combustion in Swirling Flows: a Review. *Combustion and Flame*, 23:143–201, 1974.
- Meier W., Weigand P., Duan X.R., Giezendanner-Thoben R. Detailed Characterization of the Dynamics of Thermoacoustic Pulsations in a Lean Premixed Swirl Flame. *Combustion and Flame*, 150:2–26, 2007.
- Paschereit C., Gutmark E. Enhanced Stability and Reduced Emissions in an Elliptic Swirl-Stabilized Burner. *AIAA Journal*, 46(5):1063–1071, 2008.
- Sadanandan R., Stohr M., Meier W. Simultaneous OH-PLIF and PIV Measurements in a Gas Turbine Model Combustor. *Applied Physics B*, 90:609–618, 2008.
- Subramanya M., Choudhuri A. Investigation of Combustion Instability Effects on the Flame Characteristic of Fuel Blends, 5th International Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit (IECEC), ref. AIAA 2007-4796, 2007.

- Syred N. A Review of Oscillation Mechanisms and the Role of the Precessing Vortex Core (PVC) in Swirl Combustion Systems. *Progress in Energy and Combustion Systems*, 32(2):93-161, 2006.
- Thornton J., Chorpeneing T., Sidwell T., Strakey P., Huckaby E., Benson K. Flashback Detection Sensor for Hydrogen Augmented Natural Gas Combustion, Proceedings of GT2007, ASME Turbo Expo, ref. GT2007-27865, 2007.
- Valera-Medina A., Syred N., Griffiths A. Characterization of Large Coherent Structures in a Swirl Burner under Combustion Conditions. AIAA International Meeting 2009, ref. AIAA 2009-646, 2009a.
- Valera-Medina A., Syred N., Griffiths A. Visualization of Isothermal Large Coherent Structures in a Swirl Burner. *Combustion and Flame*, 156: 1723-1734, 2009b.
- Valera-Medina A., Syred N., Griffiths A. Large Coherent Structures Visualization in a Swirl Burner. Proceedings 14th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics 2008, Lisbon, Portugal, 2008a.
- Valera-Medina A., Syred N., Griffiths A. Characterization of Large Coherent Structures in a Swirl Burner. AIAA International Meeting 2008, ref. AIAA 2008-1019, 2008b.

Semblanza de los autores

Agustín Valera-Medina. Egresado de la UNAM del Programa de Alto Rendimiento Académico (PARA) de la carrera de ingeniería mecánica en el 2003. Después de trabajar 2 años en la industria privada metalmecánica, obtuvo una beca CONACYT para realizar sus estudios de maestría y doctorado en el Reino Unido en la Universidad de Cardiff con temas de inestabilidades en combustión de turbinas de gas. Actualmente se encuentra trabajando en el CIATEQ, Centro de Tecnología Avanzado de Querétaro, como líder de proyecto del grupo de turbinas de gas. Ha participado en 8 conferencias de ámbito internacional en Europa y Norteamérica, así como publicado un artículo en la revista *Combustion and Flame*, tiene cinco artículos en proceso de revisión. Nivel candidato SNI.

Nicholas Syred. Egresado de la Universidad de Sheffield, Reino Unido en 1965. Obtuvo su doctorado en 1969 en fluidos de potencia, obteniendo la plaza de investigador asociado en el Departamento de Flujos Giratorios bajo la tutela de N. Chigier y John Beer. En la Universidad de Cardiff (1974) continuó con su trabajo en flujos giratorios. A la fecha ha participado en proyectos para BP, Air Products, UKAEA, SERC, etc. En el 2002 ganó un premio de la OTAN por mejor diseño para el enfriamiento de álabes de turbinas de gas junto con el Prof. Khalatov de Ucrania y el Dr. Koslov de Rusia. Actualmente es Fellow del Instituto de Ingenieros Mecánicos de Londres, Inglaterra. Ha participado en decenas de conferencias a nivel mundial y en publicaciones de artículos, supervisión de tesis y desarrollo de cursos por más de 30 años.

Anthony Griffiths. Egresado de la Universidad de Cardiff. Es actualmente director del Centro de Investigación en Energía, Desperdicios y Ambiente de la Universidad de Cardiff. Forma parte del comité consultor en biocombustibles de la Unión Europea, participando en proyectos de gasificación, transferencia de calor, administración de desperdicios, administración de energía y biomasa. Ha sido revisor de la Academia de Ciencia de China, así como consultor de la DEFRA. Ha participado en decenas de conferencias a nivel mundial y en publicaciones de artículos, supervisión de tesis y desarrollo de cursos por más de 20 años.