

## Análisis de reflujo de flama en combustores tangenciales de flujo giratorio

### *Flashback Analysis in Tangential Swirl Burners*

Valera-Medina A.

*CIATEQAC,*

*Centro de Tecnología Avanzada*

*Departamento de Turbomaquinaria, Querétaro*

*E-mail: agustin.valera@ciateq.mx*

Syred N.

*School of Engineering, United Kingdom*

*Cardiff University*

*E-mail: syredn@cf.ac.uk*

Abdulsada M.

*School of Engineering, United Kingdom*

*Cardiff University*

*E-mail: abdulsadam@cf.ac.uk*

Información del artículo: recibido: agosto de 2010, aceptado: noviembre de 2010

#### Resumen

La combustión ligera premezclada se utiliza ampliamente en los procesos de combustión debido a los beneficios que brinda en términos de buena estabilidad de flama y límites de extinción, aunado a la baja emisión de NOx. Sin embargo, el uso de nuevos combustibles y de flujos complejos han incrementado la preocupación por el reflujo de flama, especialmente para el uso de gas sintético (syngas) y mezclas altamente hidrogenadas. Por ello, en este artículo se describe un método práctico y numérico para el estudio del fenómeno a modo de reducir los efectos del reflujo de flama en un combustor piloto de tipo tangencial de flujo giratorio de 100 kW. Se usa gas natural para establecer la línea base de resultados y los efectos del cambio de diferentes parámetros. El fenómeno de reflujo de flama se estudia por medio de fotografía de rápida adquisición. El uso de un inyector central de combustible demuestra beneficios sustanciales en términos de resistencia al reflujo, eliminando estructuras coherentes que puedan aparecer en los canales de flujo. El gradiente de velocidad crítico de capa límite se utiliza para la caracterización, tanto con la fórmula original de Lewis y von Elbe como a través del análisis utilizando CFD e investigación de las condiciones de capa límite al frente de la flama.

#### Descriptores

- flujos giratorios
- estructuras coherentes largas
- reflujo de flama

## Abstract

Premixed lean combustion is widely used in Combustion Processes due to the benefits of good flame stability and blowoff limits coupled with low NO<sub>x</sub> emissions. However, the use of novel fuels and complex flows have increased the concern about flashback, especially for the use of syngas and highly hydrogen enriched blends. Thus, this paper describes a combined practical and numerical approach to study the phenomenon in order to reduce the effect of flashback in a pilot scale 100 kW tangential swirl burner. Natural gas is used to establish the baseline results and effects of different parameters changes. The flashback phenomenon is studied with the use of high speed photography. The use of a central fuel injector demonstrates substantial benefits in terms of flashback resistance, eliminating coherent structures that may appear in the flow channels. The critical boundary velocity gradient is used for characterization, both via the original Lewis and von Elbe formula and via analysis using CFD and investigation of boundary layer conditions in the flame front.

## Keywords

- swirling flows
- large coherent structures
- flashback

## Introducción

El uso de combustibles alternativos y sintéticos aumenta la preocupación de la industria de sufrir daños estructurales por fenómenos relacionados con las inestabilidades de combustión. Un problema recurrente en los sistemas de combustión con combustible premezclado y de alto nivel de hidrógeno es que la flama refluye hacia las cámaras de inyección y premezclado. Este reflujo ocurre cuando la velocidad del gas es menor que la velocidad de la flama, la cual se propaga aguas arriba, llegando a causar graves daños estructurales (figura 1).

El reflujo de flama está definido como el punto donde la flama físicamente se propaga aguas arriba de la región donde debería estar anclada a través de los pasa-

jes de flujo. Esto sucede por varias causas (Subramanya *et al.*, 2007; Thornton *et al.*, 2007; Lefebvre, 1999):

- a) Propagación de flama turbulenta
- b) Propagación a través de la capa límite
- c) Por causa de inestabilidades de combustión
- d) Propagación de estructuras coherentes.

El reflujo de flama estudiado en este artículo se vincula con estructuras coherentes y con propagación a través de la capa límite. El mecanismo puede también comprender la aparición de reacciones heterogéneas u homogéneas, como las observadas por Lieuwen *et al.* (2008), quien argumentó que para evitar el fenómeno la velocidad axial debe estar sustancialmente por arriba de la velocidad turbulenta de flama  $S_t$ . Esta velocidad es dependiente de la composición del combustible, lo cual hace inciertos los efectos al cambiar el anterior. Los altos niveles de turbulencia observados en los flujos giratorios son de gran detrimento para la resistencia al reflujo, lo cual se incrementa aún más por los combustibles con alto contenido de hidrógeno. Consideraciones similares se aplican a gradientes críticos de velocidad en la velocidad de flama laminar. Lo cual está aunado a pulsaciones que inducen el fenómeno, causando cambios periódicos del flujo y la estructura de la flama.

La combustión ligera tiende a reducir la velocidad de flama, lo cual aumenta el límite al reflujo. Sin embargo, otros factores asociados al ciclo como las altas temperaturas, presiones, niveles de turbulencia y reacciones de preignición debidas a los tiempos de residencia a altas temperaturas, pueden causar un incremento en las tendencias a la propagación de la flama aguas arriba.

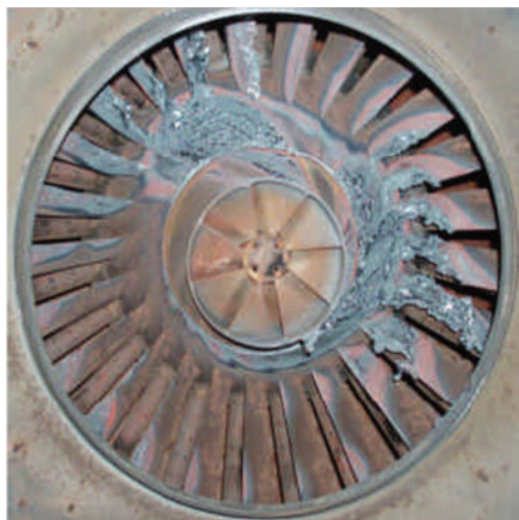


Figura. 1. Daño típico por reflujo de flama (Valera *et al.*, 2010)

Las condiciones fuera de diseño pueden también producir oscilaciones asociadas con las inestabilidades que promueven el reflujo y el levantamiento de flama (Dhanuka *et al.*, 2008). Un modo de bajas frecuencias, conocido como inestabilidades del combustor, es ocasionado por el reflujo de flama a través de la zona de recirculación. Estas inestabilidades se alimentan por oscilaciones periódicas de reflujo a través de los reactivos que llenan las zonas de recirculación externas, un fenómeno similar al observado en combustores tipo dump.

Un efecto mayor es el que causa el giro del flujo. Para ello, se ha determinado un parámetro conocido como Número de Giro (Swirl), el cual es la relación del flujo axial de momento de giro y el flujo axial de momento axial multiplicado por el radio de salida. Para flujos isotérmicos, la relación puede reducirse al Número de Giro Geométrico (Syred, 2006),  $S_g$ ,

$$S_g = \frac{\pi \cdot r_e \cdot r_i}{A_e} \quad (1)$$

El uso de combustión altera este número por el cambio en flujo de momento axial (Plee *et al.*, 1978; Kroner *et al.*, 2003). Por ello se utiliza  $S^*$  en condiciones de combustión,

$$S^* = S_g \frac{\rho_{\text{combustión}}}{\rho_{\text{isotérmica}}} \quad (2)$$

A pesar de que esta aproximación tiene sus limitantes, puede llegar a explicar las anomalías en el comportamiento de los quemadores de giro. En este artículo se presentan los resultados utilizando el valor geométrico, debido a que las densidades del sistema fueron tan variadas que el valor isotérmico resulta más representativo. Sin embargo, es claro que la combustión puede alterar la aparición de la Zona Central de Recirculación (ZCR), una estructura estabilizadora de la flama que se genera por el giro y diferencias de presiones internas del campo de estudio. Se ha observado que a mayores temperaturas, cercanas a un  $\phi \sim 1$ , las estructuras de recirculación quedan considerablemente suprimidas (Valera *et al.*, 2010). De esta forma, el cambio en las condiciones de equivalencia alteran tamaño, fuerza y posición del ZCR, así como la aparición de estructuras que se propagan en los conductos de flujo, como sucede con la Ruptura de Vórtice Inducido por Combustión

(RVIC), la cual se ha identificado como una estructura que da inicio a la propagación de flama.

Este artículo analiza el reflujo de flama a través de conductos en un quemador tangencial de 100 kW de potencia alimentado por gas natural. La experimentación se acompañó con un estudio de simulación numérica usando FLUENT. Se usaron diferentes modos de inyección. La visualización experimental del fenómeno se realizó por medio de Fotografía de Alta Velocidad (FAV), permitiendo definir las flamas y su comportamiento fuera y dentro del combustor.

## Diseño experimental

Los experimentos se llevaron a cabo en un combustor de 100 kW, el cual es una versión reducida de un combustor de flujo giratorio de 2 MW de potencia (figura 2). Se usaron dos entradas tangenciales junto con unos insertos de bloqueo de aire, cuya área era 25% del área total de las entradas de flujo. Para la salida se utilizó una construcción angular, presentando un  $S_g$  de 0.88.

El sistema fue alimentado por medio de un turbosoplador a través de mangueras flexibles y dos bancos de rotámetros para el flujo de aire y la inyección de gas natural, respectivamente. Se usaron 2 espejos de acero inoxidable en la parte inferior y superior del combustor para permitir la visualización del fenómeno en varios planos. Un plato de cuarzo reemplazó el fondo del combustor de modo que se pudiera ver el fenómeno de reflujo que sucede dentro de las cámaras de giro.

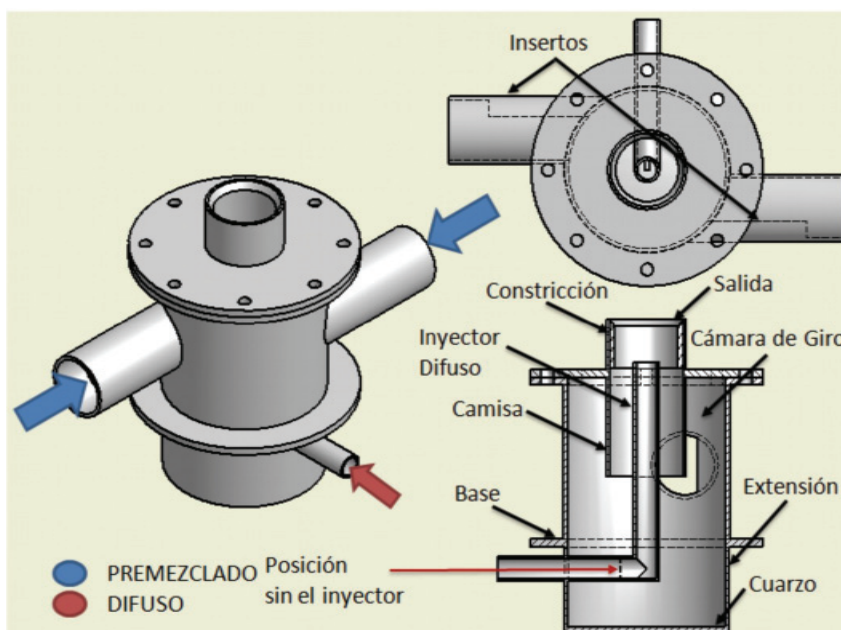


Figura 2. Combustor de flujo giratorio

Se utilizaron dos modos diferentes de inyección de combustible; un modo de inyección difusa a través de un inyector central y un modo premezclado con el ingreso de la mezcla a través de una o ambas entradas tangenciales previamente a los insertos. El radio de equivalencia promedio,  $\phi$ , se reporta junto con el modo de inyección con la nomenclatura [X-Y] l/min, donde "X" representa la inyección difusa y "Y" la premezclada.

El inyector difuso utilizado se extendía hacia la salida del combustor a 47.5 mm de la boquilla del mismo, teniendo un diámetro exterior de 35 mm e interior de 23.4 mm. La camisa del combustor está diseñada para reducir el reflujo de flama al incrementar la velocidad entre el fondo del combustor y el final del tubo interior. La extensión se hizo para alejar al cristal de cuarzo de la zona de reacción. La flama fue aislada del exterior utilizando un confinamiento cilíndrico que se colocó sobre la tapa del combustor.

Los radios de equivalencia investigados van desde condiciones muy pobres a 0.600, hasta condiciones muy ricas cercanas a 2.000. Una gran variación de flujos de aire y gas fueron también visualizados a modo de observar la progresión del fenómeno.

Una cámara de rápida exposición FastCam modelo APx RS de 250 000 fotos/s fue utilizada para la visualización junto con una lente Nikon 1:2.8. La cámara se programó a 4 000 fotos/s para evitar problemas de resolución e incrementar el campo visual. Esta velocidad fue suficiente, ya que la frecuencia esperada del fenómeno y de las estructuras coherentes conocidas en el sistema se encuentra en un rango entre 100-200 Hz (Syred, 2006; Plee *et al.*, 1978; Kroner *et al.*, 2003; Valera *et al.*, 2010 y 2009).

### Simulación numérica

Se utilizó CFD con promediación temporal en 3D para poder comprender la complejidad del flujo y su comportamiento dentro del sistema, de modo que pudieran obtenerse varios detalles del mecanismo de propagación de flama, así como la derivación de gradientes de velocidad cuando el fenómeno toma lugar.

El modelo de turbulencia utilizado fue el modelo estándar  $\kappa$ - $\omega$  basado en el modelo de Wilcox (Zimont *et al.*, 1998), el cual incorpora modificaciones para los efectos de bajos números de Re, compresibilidad y cortantes. Sus predicciones están muy cercanas a las mediciones de propagación de ondas, mezclado y chorros tridimensionales. Se trata de un modelo empírico basado en las ecuaciones de transporte para energía cinética de turbulencia y disipación específica. Las ecuaciones pueden ser definidas como,

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\kappa) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\kappa u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( G_k Y_k + S_k \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega Y_\omega + S_\omega \quad (4)$$

### Modelo de combustión

La propagación del frente de flama a reactivos no quemados se modeló resolviendo una ecuación de transporte para la variable promedio del progreso de la reacción  $c$ . La velocidad turbulenta de flama se determina utilizando un modelo de frente de flama corrugado. El modelo supone equilibrio en la turbulencia a pequeña escala dentro de la flama laminar, lo cual resulta en una expresión para la velocidad de flama turbulenta que se encuentra expresada únicamente en términos de parámetros de turbulencia de escalas mayores (Zimont *et al.*, 1998). Por lo tanto,

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c) + \nabla \cdot (\rho \bar{u} c) = \nabla \cdot \left( \frac{\mu_t}{Sc_t} \nabla c \right) + \rho S_c \quad (5)$$

La variable de progreso de la reacción se define como la suma normalizada de las especies producto,

$$c = \sum_{i=1}^n Y_i / \sum_{i=1}^n Y_{i,eq} \quad (6)$$

Basado en la definición,  $c = 0$  es donde la mezcla aún no se ha quemado y  $c = 1$  es donde la mezcla ya está quemada. El valor de  $c$  se define como una condición de frontera en todas las entradas de fluido, el cual usualmente se especifica como 0 (sin quemar) o 1 (quemado). El promedio de la velocidad de reacción de la ecuación (3) es modelado como,

$$\rho S_c = \rho_u U_t |\nabla c| \quad (7)$$

La velocidad de flama turbulenta se obtiene utilizando un modelo de frente de flama corrugado,

$$S_t = A(u')^{3/4} U_t^{1/2} \alpha^{-1/4} \ell_t^{1/4} = A u' \left( \frac{\tau_t}{\tau_c} \right)^{1/4} \quad (8)$$

De donde la escala turbulenta se obtiene de,

$$\ell_t = C_D \frac{(u')^3}{\epsilon} \quad (9)$$

Los valores utilizados fueron 0.52 para A y 0.37 para  $C_D$ , de acuerdo a lo recomendado por Zimont *et al.* (1998) y Wilcox (1998), los cuales son adecuados para la mayoría de los casos de flamas premezcladas.



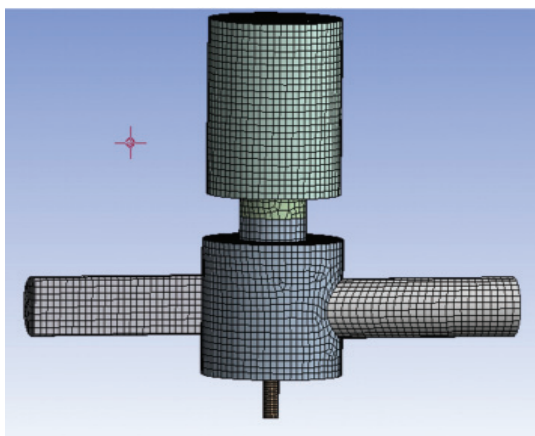


Figura 3. Combustor de giro tangencial, modelo en CFD

Como en el experimento se usaron dos métodos de inyección. La simulación se elaboró usando el software FLUENT. Un análisis tridimensional se implementó para la obtención de datos (figura 3).

Este análisis se basó en caracterizar el flujo justo aguas arriba del frente de flama para determinar las condiciones generales de reflujo en términos del gradiente de velocidad crítico de capa límite. Esto se debe a que en esta región los flujos son esencialmente isotérmicos, sin estructuras coherentes. Además, las mediciones son tan difíciles en esta área que la reconstrucción requería uso de métodos numéricos apoyados por un software de dinámica de fluidos. Se requirió un malla muy fino con un espaciamiento de 1 mm para resolver la capa límite del flujo.

## Resultados y discusión

### Experimental

A modo de poder observar el fenómeno que ocurre dentro del combustor, el fondo del mismo se reemplazó por un plato de cuarzo, como se mencionó previamente. Los primeros experimentos se realizaron sin el inyector difuso central. Inicialmente el sistema se operó a  $1/\text{min}$ ,  $\phi = 0.88$ . Después de estabilizar el sistema, la inyección difusa se cortó, dejando solamente la premezclada con un  $\phi = 0.54$ . Los eventos dentro del sistema se grabaron desde el fondo a través del cuarzo y usando los espejos para evitar daños al equipo. Al iniciarse el reflujo, varios vórtices aparecen en el centro de la flama junto con lo que parece ser un Centro de Vórtice Precesor (Navaert *et al.*, 2007; Sarpkaya, 1971) –obsérvese en la figura 4 la imagen a  $-0.116$  s–. Estas estructuras inicialmente se desarrollan con el reflujo y después se colapsan mientras la flama se mueve rápi-

damente de manera radial hacia las paredes de la cámara, alcanzando las entradas de combustible, el cual se enciende mientras la flama sigue moviéndose alrededor de la cámara.

Cabe mencionar que el reflujo observado para esta configuración sin inyector no es violento, produciendo una flama casi estable dentro de la cámara de giro con el sistema ahora actuando como un ciclón y con la combustión actuando dentro del mismo (Plee *et al.*, 1978; Gupta *et al.*, 1984). La flama no pudo moverse de regreso a su posición anterior en la cámara de combustión al variar el flujo de gas y aire, de modo que fue necesario apagar el sistema.

Al observar el fenómeno desde la parte superior (figura 5), la flama se mueve aguas arriba a través de la camisa con algunos flashazos dentro de la cámara antes de comenzar su movimiento radial. Las imágenes muestran estructuras coherentes en el sistema antes de que éstas desaparezcan a causa del reflujo hacia la cámara. Esta estructura es sin duda la Ruptura de Vórtice Inducida por Combustión.

Cuando el análisis se realizó con el inyector (figura 6), el reflujo de flama observado fue completamente diferente y mucho más intenso. A pesar de que los primeros experimentos no mostraron ningún reflujo a bajas relaciones de equivalencia, un incremento que llevó a  $\phi = 0.95$  permitió la visualización de la propagación del fenómeno en las cámaras de premezclado. La flama en este caso es mucho más fuerte con mayor coherencia. Mientras se propaga aguas arriba, la flama se mantiene uniforme y las estructuras coherentes desaparecen.

Al comenzar la propagación radial, ésta es mucho más rápida y ruidosa con menos evidencia de estructuras coherentes. Se reconoce que la relación de equivalencia es mucho mayor; sin embargo, esto se debe a que el sistema ha alcanzado mayor estabilidad al reflujo de flama a bajos radios de equivalencia. Es únicamente cuando se ha alcanzado un valor cercano a 1.00 que la flama tiene la energía necesaria para refluir dentro del combustor.

También se debe considerar la presión interna del sistema, la cual ha aumentado debido a la reducción del área transversal de salida de los gases debido al inyector, lo cual a su vez, incrementa  $Re$  y con ello el empuje que la mezcla de reactivos ocasiona sobre la flama. Sin embargo, el efecto de reflujo para estos casos es mucho más dañino que para un caso sin inyector. El análisis del plano superior de este caso no reveló mucho.

Como se puede observar, las imágenes muestran que no existe ninguna estructura coherente presente antes de que se produzca el reflujo; esto da la pauta de que el inyector ha suprimido a las estructuras coherentes, dejando la propagación como un fenómeno de capa

límite en la camisa del combustor. Al no permitir la propagación hacia los canales de flujo, el inyector también está impidiendo la aparición de RVIC, incrementando la resistencia al fenómeno.

Una segunda explosión toma lugar, lo cual puede ser consecuencia de que la extensión puede contener una significativa cantidad de mezcla aire-combustible.

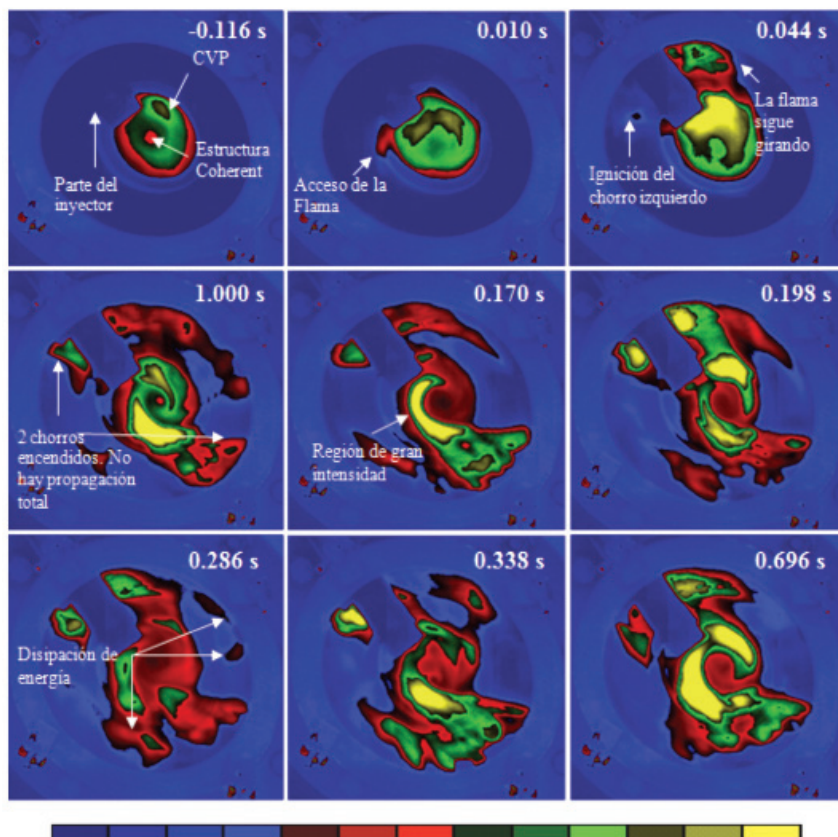


Figura 4. Reflujo de flama a 700 l/min de aire, [0-40] l/min de gas (100% premezclado,  $\phi = 0.54$ ),  $S_g=0.88$ . El tiempo 0.00 s inicia desde que la flama ingresa en la cámara de giro. La escala de intensidad va desde la intensidad más baja (azul índigo o gris más oscuro) a la más intensa (amarillo o gris más claro), UA

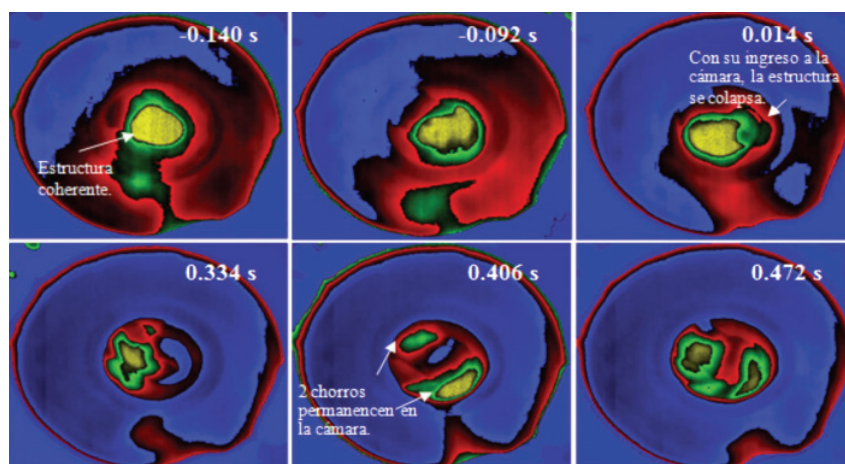


Figura 5. Vista superior, condiciones iguales a figura 4. Escala de intensidad igual a la de figura 4

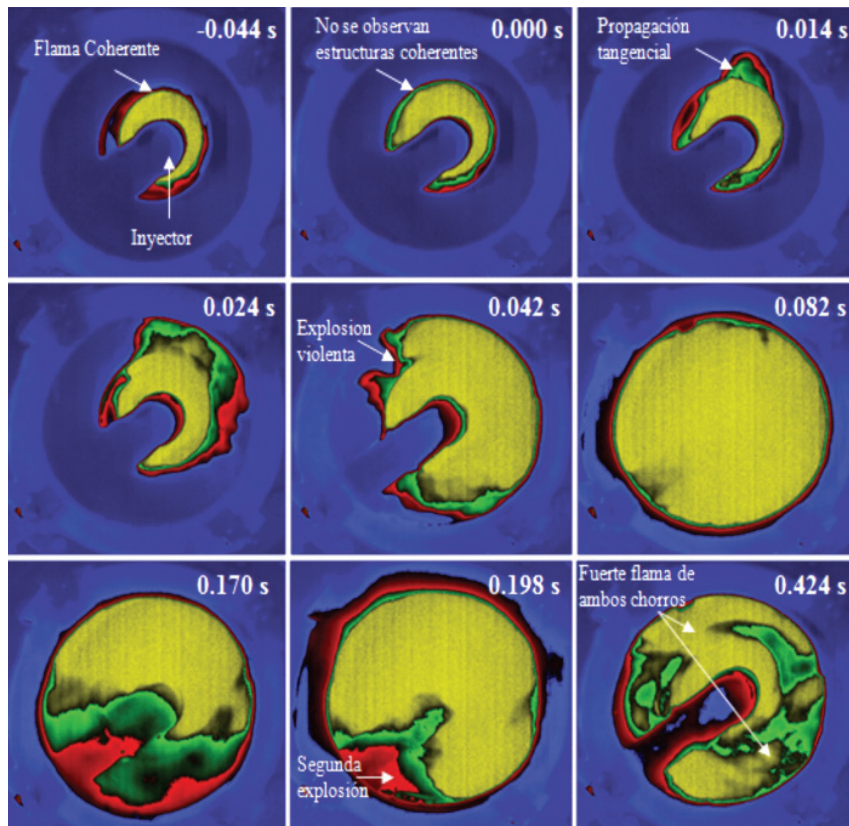


Figura 6. Vista inferior con inyector difuso. Flujo de aire de 600 l/min, [0-60] l/min de gas ( $\phi = 0.95$ ),  $S_g = 0.88$

### Análisis CFD de reflujo de flama

El análisis de este fenómeno ha tenido gran relevancia desde antes de que el gas natural se convirtiera en el combustible preferido para la generación de energía. Esto se debe al gran uso del gas sintético en el siglo XIX, el cual poseía más de 20% de hidrógeno que causaba reflujo en los quemadores de la época (Lewis *et al.*, 1987; Grummer *et al.*, 1953). Lewis y von Elbe, en su muy conocida derivación del gradiente de velocidad crítico de capa límite para flujos laminares en tubos circulares, mostraron que,

$$G_F = 4V / \pi r_s^3 \quad (10)$$

Algunos resultados de éste y otros artículos (Valera *et al.*, 2010; Lewis *et al.*, 1987; Shelil *et al.*, 2010) se muestran usando esta definición en la figura 7. Esta figura compara varios reflujo de flama, entre los que destaca el de un tubo de 13 mm, en contraposición al utilizado en este artículo (76 mm) y al usado por Shelil *et al.* (2010) de 28 mm.

Con el inyector el sistema se benefició, ya que el reflujo ocurre a menores valores de  $G_F$  a relaciones de

equivalencia de 0.7 a 0.9, lo cual se cree, es debido a una capa límite mucho más delgada, que aumenta los gradientes de velocidad real. Sin el inyector los valores de  $G_F$  son siempre mayores y reflejan el detrimento en la resistencia al reflujo. Los resultados de Shelil *et al.* (2010) muestran cómo el efecto de un mayor número de giros,  $S^*$  y largos ZCR extendidos hacia el inyector pueden reducir considerablemente la resistencia al fenómeno.

El uso de CFD en el análisis de la aerodinámica de combustión se implementó para determinar el comportamiento del sistema en condiciones justo antes de la propagación de flama. Las figuras 8 y 9 muestran los resultados. Este análisis corresponde a los casos con y sin inyector con flujos de aire de 700 l/min. La figura 8a muestra el sistema sin el inyector y a través de distribución de temperaturas se esquematiza la localización de la flama. Los resultados fueron validados experimentalmente.

La figura 9a, con el inyector, muestra como existen dos frentes de flama anulares, uno en el labio del combustor y el otro extendiéndose a través de la camisa por el inyector.



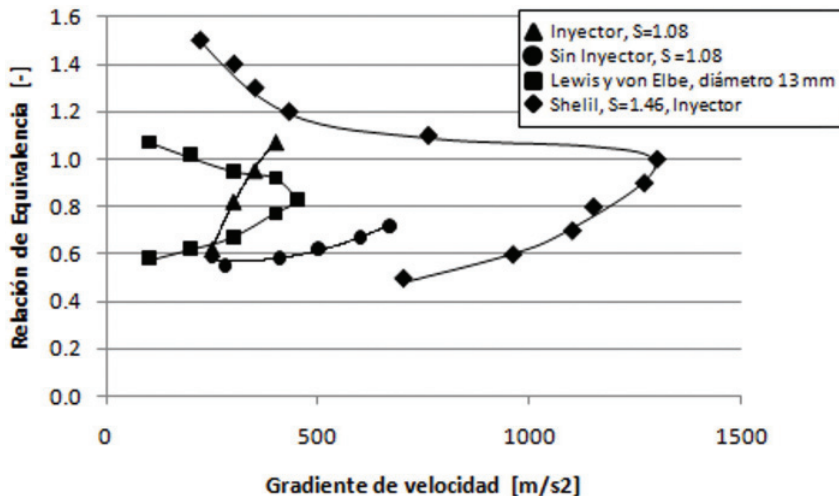


Figura 7. Variación de GF durante el reflujo con diferentes relaciones de equivalencia en diferentes estudios

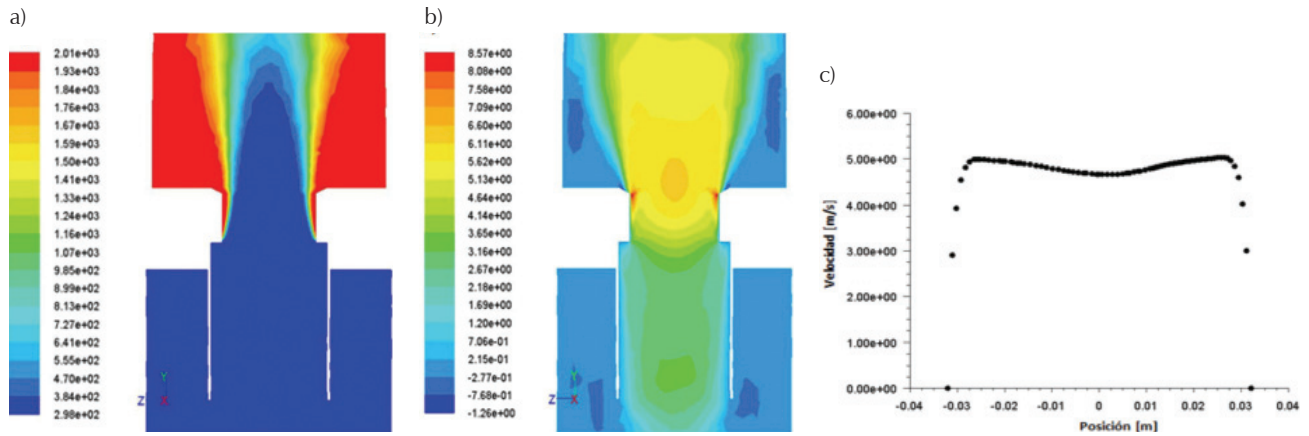


Figura 8. Predicción de CFD para el combustor sin inyector, a) distribución de temperatura, b) distribución de velocidad axial, c) distribución de velocidad a la salida del combustor. Flujo de aire de 700 l/min, [0-67] l/min de combustible,  $\phi = 0.9$ , justo antes de la propagación  $S_g = 0.88$

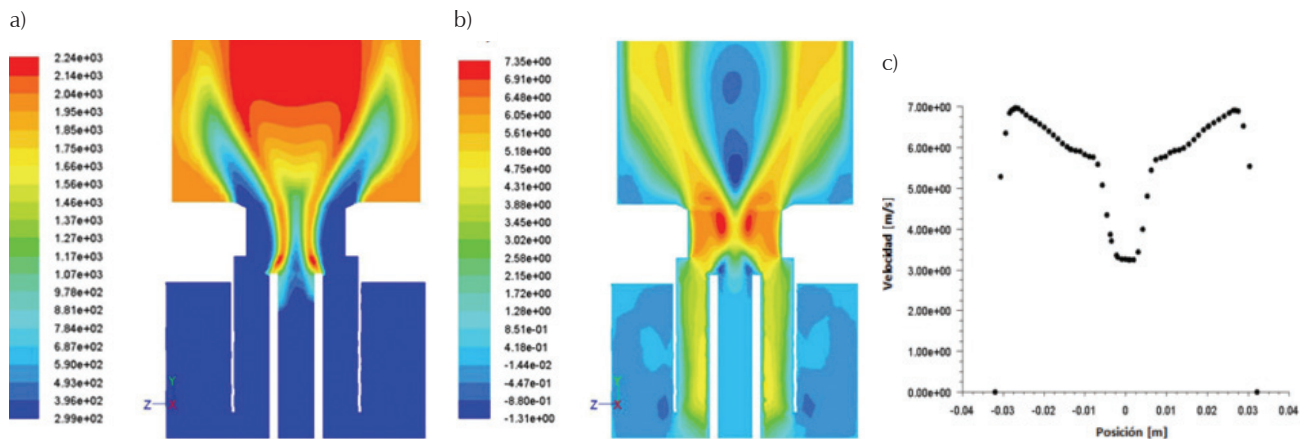


Figura 9. Predicción de CFD para el combustor con inyector, a) distribución de temperatura, b) distribución de velocidad axial, c) distribución de velocidad a la salida del combustor; flujo de aire de 700 l/min, [25-40] l/min de combustible,  $\phi = 0.9$ ,  $S_g = 0.88$



La distribución de velocidad axial sin el inyector (figura 8a), muestra que no existe ninguna ZCR antes de la propagación, lo cual ya había sido validado previamente (Valera, 2009). Se observa como la flama se extiende a través de la camisa por medio de una muy delgada capa límite anular (figura 8b). La figura 8c muestra el perfil de velocidades totales a la salida del combustor; de estos datos se puede obtener el valor de  $g_r$ , el cual es de  $2,900 \text{ s}^{-1}$  en la zona anexa a la pared.

Utilizando el inyector, la flama se mantiene en la punta del mismo junto con una ZCR. A la salida del combustor los gases producto aceleran el flujo creando una región de alta velocidad, la cual afecta la región externa del proceso, especialmente las capas límites (figura 9c). Las velocidades en esta región son del orden de  $7 \text{ m/s}$ , en contraposición a los  $5 \text{ m/s}$  sin el inyector. Como consecuencia,  $g_r$  en la zona laminar junto a la pared es  $5,200 \text{ s}^{-1}$ , razón por la cual hay un

incremento en la resistencia a la propagación. Si se examinan detenidamente los resultados de CFD se puede observar cómo la capa límite se adelgaza por la presencia del inyector, incrementado así  $G_F$ . Sin el inyector, la capa límite ocupa hasta 18% del radio total de la camisa, reduciéndose a 15% con el inyector, aún cuando el mayor efecto se produce por las mayores velocidades junto a la pared, lo que puede compararse entre las figuras 8c y 9c.

Las simulaciones de CFD se han comparado con los resultados experimentales obtenidos con y sin inyector. Desafortunadamente, la correlación entre ambos no parece completa, (figura 10), ya que en ambos casos se predice el reflujo de flama a velocidades menores. Sin embargo, tanto los resultados numéricos como experimentales sí suponen que el uso del inyector permite condiciones de mayor relación de equivalencia antes de la propagación de la flama.

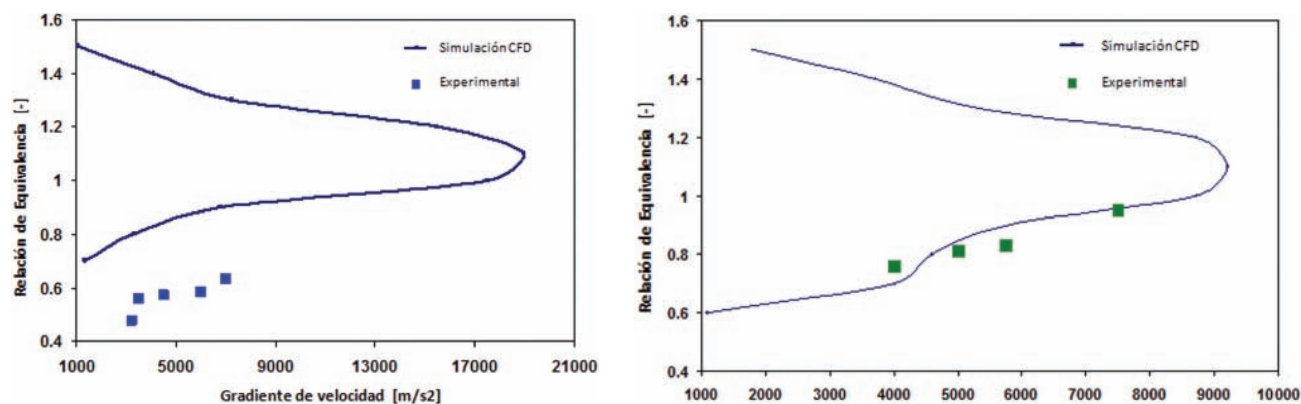


Figura 10. Validación del CFD con los resultados experimentales para a) caso sin inyector, b) caso con inyector,  $S_g=0.88$

## Conclusiones

Se observó que la ZCR desaparece antes del reflujo de flama hacia la camisa del combustor. Sin embargo, la aparición del RVIC en esta región propiciará una menor resistencia al fenómeno. Al colocar el inyector, el RVIC también se suprime, aumentando con ello la resistencia a la propagación. Por otro lado, el reflujo que permanece se compone de turbulencias y propagación por la capa límite, siendo ésta última imperante en el

proceso. Al reducirse la capa límite por medio de la colocación del inyector central se aumenta su gradiente de velocidad, lo que incrementa la resistencia a la propagación de flama a través de la capa límite, aumentando la resistencia final aún más.

A pesar de tener buenos resultados del CFD, aún la correlación deja mucho que desear, por lo que se recomienda el desarrollo de nuevos métodos de análisis numérico para la propagación de flamas en la capa límite.

## Nomenclatura

A	Constante en el modelo de combustión [-]
$A_\epsilon$	Área de entrada tangencial [m <sup>2</sup> ]
$D_\omega$	Término de difusión [m <sup>2</sup> /s]
c	Variable del progreso de la reacción [-]
FAV	Fotografía de Alta Velocidad
$G_F$	Gradiente de velocidad crítico de capa límite de Lewis y von Elbe, [1/s]
$g_F$	Gradiente de velocidad crítico de capa límite de CFD, [1/s]
$G_\kappa$	Generación de energía cinética de turbulencia, [m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> ]
$G_\omega$	Generación de disipación de energía, [m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> ]
$\ell_t$	Escala de longitud de turbulencia [m]
n	Número de productos [-]
Re	Número de Reynolds. Se toma basado en los datos isotérmicos, [-]
$r_e$	Radio de salida del combustor, [m]
$r_i$	Radio al cual los jets internos descargan, [m]
RVIC	Ruptura de Vórtice Inducido por Combustión
$S^*$	Número de Giro con combustión, [-]
$S_c$	Término fuente del progreso de la reacción [s <sup>-1</sup> ]
$Sc_t$	Número turbulento de Schmidt [-]
$S_g$	Número de Giro geométrico, [-]
$S_t$	Velocidad de flama turbulenta, [m/s].
$S_\kappa$	Término definido por usuario, [m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> ]
$S_\omega$	Término definido por usuario, [m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> ]
u	Velocidad axial, [m/s]
$u'$	Media cuadrada de la raíz de la velocidad [m/s]
UA	Unidades arbitrarias, [-]
$U_l$	Velocidad de flama laminar [m/s]
$U_t$	Velocidad de flama turbulenta [m/s]
V	Flujo volumétrico isotérmico, [m <sup>3</sup> /s]
$Y_i$	Fracción en masa de las especies producto i [-]
$Y_\kappa$	Disipación de energía cinética de turbulencia, [m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> ]
$Y_\omega$	Disipación de energía debida a turbulencia, [m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> ]
ZCR	Zona Central de Recirculación
$\alpha = \kappa/\rho c_p$	Difusividad térmica [m <sup>2</sup> /s]
$\Gamma_\kappa$	Difusividad efectiva de energía cinética de turbulencia, [kg/ms]
$\Gamma_\omega$	Difusividad efectiva de disipación de energía, [kg/ms]
$\epsilon$	Velocidad de disipación de turbulencia [m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> ]
$\kappa$	Energía cinética de turbulencia, [m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]
$\rho$	Densidad del gas, [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_u$	Densidad de la mezcla quemada [kg/m <sup>3</sup> ]
$\tau_t = \ell_t / u'$	Escala de tiempo de la turbulencia [s]
$\tau_c = \alpha / U_l^2$	Escala de tiempo química [s]
$\Phi$	Relación de equivalencia, [-]
$\omega$	Disipación de energía, [m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]

## Agradecimientos

Agustín Valera-Medina agradece la beca otorgada por el CONACYT para realizar sus estudios de doctorado, de los cuales se obtuvo este artículo. Mohammed Abdulsada agradece la beca otorgada por el Ministerio de Ciencia y el gobierno de Iraq para la realización de sus estudios doctorales.

## Referencias

- Dhanuka S.K., Temme J.E., Driscoll J.F., Mongia H.C. Vortex-Shedding and Mixing Layer Effects on Periodic Flashback in a Lean Premixed Prevaporized Gas Turbine Combustor. *Proceedings of the Combustion Institute*, 32(2):2901-2908, 2009.
- Grummer J., Harris M.E., Schultz H. Flame Stabilization on Burners with Short Ports or Noncircular Ports, *Proc. 4th Int. Symposium on Combustion*, Baltimore, pp. 695-701, 1953.
- Gupta A.K., Lilley D.J., Syred N. *Swirl Flows*, Abacus Press, Tunbridge Wells, Kent, 1984, UK.
- 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: 93-700, 2003.
- Lefebvre A.H. *Gas Turbine Combustion*, 2a ed., Taylor & Francis Group, New York, 1999, USA.
- Lewis B., Von-Elbe G. *Combustion, Flames and Explosions*. 3a ed., Academic press, London, 1987, UK.
- Lieuwen T., McDonnell V., Santavica D., Sattelmayer T. Burner Development and Operability issues Associated with Steady Flowing Syngas Fired Combustors. *Combustion Science and Technology*, 180(6):1169-1192, 2008.
- Nauert A., Petersson P., Linne M., Dreizler A. Experimental Analysis of Flashback in Lean Premixed Swirling Flames, Conditions Close to flashback. *Experiments in Fluids*, 43:89-100, 2007.
- Plee S.L., Mellor A.M. Review of Flashback Reported in Prevaporizing/Premixing Combustors. *Combustion and Flame*, 32:193-203, 1978.
- Sarpkaya T. On Stationary and Travelling Vortex Breakdown. *J. Fluid mechanics*, 45(3):545-559, 1971.
- Shelil N., Griffiths A., Bagdanavicius A., Syred N. Flashback Limits of Premixed H<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> Flames in a Swirl Stabilized Combustor, *ASME Turbo Expo, Glasgow, UK*, June 20, ref. GT2010-23270. 2010.
- 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., Chorpene 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. *Coherent Structures and their Effects on Processes occurring in Swirl Combustors* (PhD Thesis), Cardiff University, Wales, 2009, UK.
- Valera-Medina A., Syred N., Griffiths A. Studies of Large Coherent Structures and Their Effects on Swirl Combustion. *48th International AIAA Meeting and Exposition*, ref. AIAA-2010-1168, 2010.
- Valera-Medina A., Syred N., Griffiths A. Visualization of Isothermal Large Coherent Structures in a Swirl Burner. *Combustion and Flame*, 156(9):1723-1734, 2009.
- Valera-Medina A., Syred N., Griffiths A. Central Recirculation Zone Analysis in a Tangential Swirl Burner, artículo submitido. *Experiments in Fluids*, junio de 2010.
- Wilcox. *Turbulence Modeling for CFD*, DCW Industries, Inc., La Canada, California, 1998, USA.
- Zimont V., Polifke W., Bettelini M., Weisenstein W. An Efficient Computational Model for Premixed Turbulent Combustion at High Reynolds Number Based on a Turbulent Flame Speed Closure. *Journal of Gas Turbines Power*, 120:526-532, 1998.

### Semblanza de los autores

*Agustín Valera-Medina.* Egresado de la UNAM del programa PARA en ingeniería mecánica, 2003. Después de trabajar 2 años en la industria privada metalmecánica, obtuvo una beca CONACYT para realizar sus estudios de maestría 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 y ha publicado 2 artículos en revistas internacionales. Nivel CANDIDATO en el SNI.

*Nicholas Syred.* Egresado de la Universidad de Sheffield en 1965, obtuvo su doctorado en 1969 en fluidos de potencia, lo que le otorgó la plaza de investigador asociado en el departamento de flujos giratorios bajo la tutela de N. Chigier y John Beer. Laboró en la Universidad de Cardiff en 1974 con trabajos en flujos giratorios. A la fecha, ha participado en proyectos para BP, Air Products, UKAEA, SERC, etcétera. 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. 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.

*Mohamed Abdulsada.* Egresado de la Universidad de Irak, es especialista en termofluidos, e imparte la misma materia en su país de origen. Comenzó el doctorado en la Universidad de Cardiff en el 2007 y está por graduarse en estudios de reflujo de flama, haciendo aplicaciones y análisis con combustibles alternativos altamente hidrogenados.