

ANÁLISIS NUMÉRICO DE LA COMBUSTIÓN EN UN QUEMADOR ATMOSFERICO TIPO CORONA DE APLICACIÓN DOMESTICA

Numerical analysis of the combustion in an atmospheric crown-burner for domestic applications

RESUMEN

El siguiente trabajo analiza numéricamente el proceso de combustión, en un quemador tipo corona de operación atmosférica, usando un código comercial CFD (*Computational Fluid Dynamics*). El combustible utilizado es metano. Es analizada una configuración geométrica de quemador, caracterizando la respuesta fluido-dinámica que genera, utilizando un mecanismo cinético global. Se analizan aspectos del modelo de turbulencia empleado, y concentraciones de especies químicas. Es usado el modelo *Eddy Dissipation Concept* (EDC) para la interacción cinética-turbulencia.

PALABRAS CLAVES: Combustión, Dinámica de Fluidos Computacional - CFD, Mecanismo Cinético Global, Quemadores

ABSTRACT

This work shows the numerical overview point of a combustion process occurring in a crown-burner type in atmospheric operation, using a CFD commercial code. The fuel used is methane. Was analyzed one geometrical configuration of burner, characterizing the fluid-dynamic response of this geometry using a global kinetic model. Turbulence parameters and species were analyzed. Was used the Eddy Dissipation Concept – EDC model to the kinetic-turbulence interaction. Several important factors in the combustion, for example, recirculation zones near to flame are analyzed.

KEYWORDS: *Combustion, Computational Fluid Dynamics - CFD, Global Kinetic Mechanism, Burners*

1. INTRODUCCIÓN

En un proceso térmico en el cual la transferencia de calor depende de la energía liberada durante la combustión, el quemador juega un papel importante. Un quemador puede definirse como una máquina térmica, en la mayoría de los casos sin partes móviles, en la cual se realiza parte de la transformación de la energía química, contenida en los enlaces moleculares del combustible, en energía térmica. Por definición, la eficiencia de un proceso de combustión depende de diversos factores, entre varios; del nivel térmico y de turbulencia, de la estequiometría, y de la homogeneidad espacial de la mezcla reactiva [1]

En el caso de los quemadores atmosféricos tipo corona, son diversos los parámetros que pueden ser analizados para su optimización. Por ejemplo, existe una altura crítica, medida a partir del quemador, en la cual se debe posicionar el recipiente donde van los alimentos para ser cocidos, este parámetro depende de la potencia del quemador y varía según la geometría de quemador. Es común encontrar quemadores tipo corona en los cuales el soporte metálico que separa la “olla” del quemador no garantiza que el proceso de combustión acontezca de forma eficiente. En muchos casos la separación entre la

LEONEL R. CANCINO

Ingeniero Mecánico, M.Sc.
Estudiante Doctorado en Ciencias
Térmicas
Universidade Federal de Santa
Catarina
leonel@labcet.ufsc.br

ÁLVARO HERNÁN

RESTREPO

Ingeniero Mecánico, M.Sc.
Profesor Asistente
Universidad Tecnológica de Pereira
arestrep@utp.edu.co

AMIR A. M. OLIVEIRA JR.

Ingeniero Mecánico, Ph.D.
Profesor asociado
Universidade Federal de Santa
Catarina
amir@emc.ufsc.br

olla y el quemador es tal que, no permite una correcta aireación de la llama, impidiendo el paso de aire secundario al proceso de combustión, lo anterior genera dos efectos perjudiciales al proceso global: la llama queda en contacto directo con la superficie metálica de la olla, facilitando la producción de monóxido de carbono (CO) en función del enfriamiento brusco de la región de la llama que está en contacto con el recipiente y, menores temperaturas en la llama, disminuyendo la eficiencia de combustión. Otro de los parámetros que puede ser analizado numéricamente en este tipo de quemadores es el espaciamiento entre los pequeños agujeros en los cuales se estabilizan las llamas. En un quemador de múltiples llamas, (como lo es un quemador tipo corona), el espaciamiento define la aireación secundaria de las llamas, lo anterior es un parámetro importante, pues, depende de la cantidad de aire secundario el buen funcionamiento del quemador y por ende, un buen desarrollo del proceso de combustión en el quemador.

Este trabajo muestra el procedimiento seguido para la simulación numérica del proceso de combustión usando una herramienta CFD ampliamente conocida a nivel mundial (FLUENT), con el propósito de analizar la respuesta fluido-dinámica y térmica que genera la

geometría del quemador analizado. En el proceso de análisis es hecha una caracterización, la cual puede servir como parámetros de diseño y comparación para otras geometrías de quemadores. Es usado el modelo de turbulencia k- ϵ , y el modelo EDC para abordar la interacción Cinética Química-Turbulencia.

2. QUEMADORES TIPO CORONA

Un quemador atmosférico tipo corona se compone principalmente de un inyector de gas, el cual en función de la presión de la línea de combustible y de la configuración del agujero de salida, induce el combustible y aire primario en un venturi, seguido de un tubo circular en el cual la mezcla reactiva es distribuida en forma de corona, la mezcla sale a través de pequeños agujeros en los cuales las llamas son estabilizadas. El proceso de inducción de aire primario acontece en función de una acción combinada de efectos difusivos y advectivos ejercidos por el combustible que sale del inyector, a presión, en el aire entorno al él. Estos efectos fluido-dinámicos dependen de las condiciones de presión, densidad del combustible, geometría del inyector y de la geometría del venturi. La estrangulación del fluido a su paso por el venturi genera una caída de presión axial, induciendo aire al interior del quemador, un segundo efecto de la estrangulación en la garganta del venturi es el de homogenizar espacialmente la estequiometría de la mezcla reactiva, en función de los valores de velocidad y turbulencia alcanzados. Después de la garganta del venturi, el fluido comienza a recuperar presión estática debido a la expansión del área de flujo, hasta un valor superior al de la presión atmosférica en un punto localizado antes de los pequeños agujeros, lo anterior permite salida de mezcla reactiva por los agujeros en los cuales se forman las llamas. La Figura 1 muestra un quemador tipo corona, para aplicación domestica.



Figura 1 Geometría básica de un quemador tipo corona

3. HERRAMIENTA COMPUTACIONAL E HIPÓTESIS DE SOLUCIÓN

Una simulación numérica puede ofrecer información que, en la mayoría de los casos, es de difícil obtención por métodos experimentales, también es una herramienta que permite mejorar el diseño de las diferentes formas geométricas envueltas en un determinado problema, sin necesidad de elevar los costos para la obtención de un producto final, en función de una serie de testes experimentales, en otras palabras es una herramienta de

optimización. Actualmente varios códigos computacionales para simulaciones CFD están disponibles en el mercado mundial para estos propósitos, [5], [6] y [7]. La mayoría de estos programas tienen incluido en sus librerías, diferentes modelos para abordar varias situaciones fenomenológicas, subrutinas para modelos de turbulencia, combustión, entre otras.

La turbulencia, desde el punto de vista de combustión, es importante. En el interior del quemador el patrón de flujo puede alcanzar niveles de turbulencia bajos, mientras que este patrón de flujo en las llamas tiende a ser laminar. En los pequeños orificios de salida se desarrolla el proceso de combustión, y la configuración geométrica de estos agujeros tiene un papel importante en el proceso.[1].

Los quemadores tipo corona, en la mayoría de los casos se ubican en la cámara de combustión de hornos de aplicación domestica; el proceso de combustión se desarrolla y fuertes gradientes de velocidad, densidad y temperatura caracterizan el proceso. El fluido es de carácter laminar en las llamas, no en tanto, el proceso en sí, genera perturbaciones en el cual se el quemador,

En este trabajo, es analizado numéricamente el proceso de combustión en sí, se asume que el flujo llega a los agujeros de salida con una composición estequiométrica y uniforme espacialmente, con velocidad de salida de los orificios de 0,8 m/s que permite una llama laminar estable para mezclas metano-aire en condiciones estequiométricas [3], [4]. Es resuelto el proceso de combustión en estado estable y no es incluida la radiación

4. DOMINIO COMPUTACIONAL

Son aprovechadas las dos condiciones de simetría que pueden ser implementadas numéricamente para la solución del problema, las dimensiones fueron tomadas procurando no extrapolar las dimensiones normales de una cámara de combustión en un horno de aplicación domestica. La Figura 2 muestra el dominio de solución y los tipos de condiciones de contorno utilizadas.

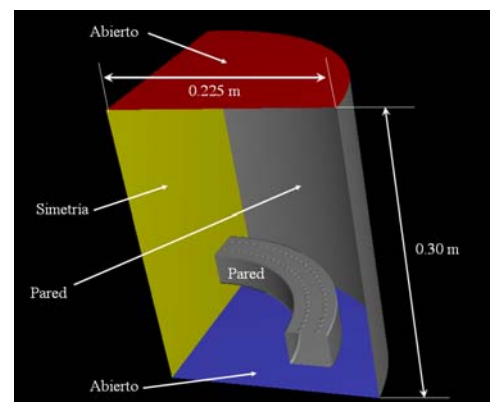


Figura 2 Dominio de solución y condiciones de contorno para la simulación del quemador tipo corona

Fue generada malla tetraédrica para la simulación, la malla es compuesta por 1'202,126 volúmenes de control, la Figura 3 muestra un detalle de la malla en la región de la llama.

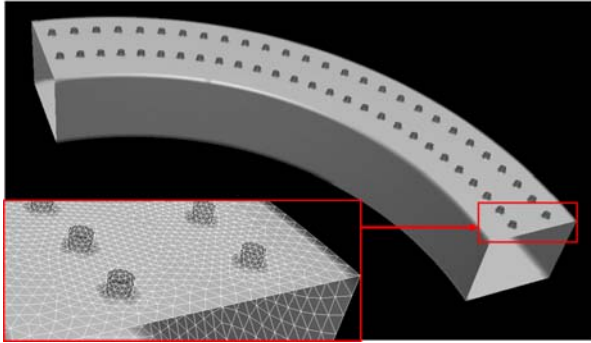


Figura 3 Detalle de la malla computacional en la región de la llama.

5. MÉTODO DE SOLUCIÓN Y ECUACIONES DE CONSERVACIÓN

El programa FLUENT utiliza la metodología de volúmenes finitos, la cual aplica las ecuaciones de conservación en un espacio tridimensional discreto. Este espacio es llamado de volumen de control. La metodología consiste en integrar y resolver el conjunto de ecuaciones de conservación de masa, cantidad de movimiento en las tres direcciones, propiedades turbulentas, especies químicas y energía, en cada volumen de control del dominio computacional de forma acoplada. El procedimiento de deducción de las ecuaciones discretizadas y métodos de solución puede ser encontrado, entre varios, en la referencia [8].

En este caso, el proceso de combustión se asume turbulento, y las ecuaciones tradicionales de Navier-Stokes reciben un tratamiento especial, es introducido el concepto de propiedad media, el cual contempla los conceptos de propiedad instantánea y de fluctuación. Por ejemplo, la velocidad instantánea en una dirección, u_i , es tratada como la suma de una velocidad media, \tilde{u}_i , y la fluctuación entorno de esa media, u_i'' , numéricamente hablando:

$$u_i = \tilde{u}_i + u_i'' \tag{1}$$

Introduciendo la expresión (1) en las ecuaciones de Navier-Stokes, y haciendo una “media” temporal término a término, son obtenidas las Ecuaciones Medias de Conservación para flujo de fluidos con reacción química:

Conservación de masa:

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \tilde{u}_i) = 0 \tag{2}$$

Por tratarse de un estudio global, no se definen las variables involucradas; lo anterior dado que no se tiene una distancia específica entre el quemador y el recipiente. Este caso de estudio se deja para trabajos posteriores.

Conservación de cantidad de movimiento en las tres direcciones:

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j) + \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\tau}_{ij} - \bar{\rho} \tilde{u}_i u_j'') \tag{3}$$

Conservación de energía:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{h}_s}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{h}_s) &= \bar{\omega}_r + \frac{D\bar{p}}{Dt} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_i} - \bar{\rho} \tilde{u}_i h_s'' \right) \\ + \tau_{ij} \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho \sum_{k=1}^N V_{k,i} Y_k h_{s,k} \right) & \tag{4} \\ \frac{D\bar{p}}{Dt} = \frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + u_i \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} = \frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \tilde{u}_i \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + u_i'' \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} \end{aligned}$$

Conservación de especies químicas:

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{Y}_k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{Y}_k) = - \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{V}_{k,i} Y_k - \bar{\rho} \tilde{u}_i Y_k'') + \bar{\omega}_k \tag{5}$$

En las ecuaciones (3), (4) y (5) aparecen como consecuencia del promedio de las ecuaciones, términos que contienen medias de productos de fluctuaciones en las parcelas difusivas, $\bar{\rho} \tilde{u}_i u_j''$, $\bar{\rho} \tilde{u}_i h_s''$ y $\bar{\rho} \tilde{u}_i Y_j''$. Estos términos requieren un tratamiento especial para el cierre de las ecuaciones (solución numérica). Los términos $-\bar{\rho} \tilde{u}_i u_j''$ son llamados “tensiones de Reynolds. Wilcox (1994) presenta la deducción de una ecuación para las tensiones de Reynolds, partiendo de las seis componentes de las tensiones de Reynolds (inicialmente desconocidas) y mostrando las dificultades relacionadas a un tratamiento riguroso de estos términos. Un detalle en el último término de la ecuación (4), muestra la media temporal de la velocidad de reacción de la especie química. Se observa que en general, la media de la velocidad de reacción no es igual a la velocidad de reacción calculada con valores medios de temperatura y fracciones de masa, pues las fluctuaciones pueden ser expresivas cuando son comparadas con los valores medios. El modelo de combustión debe tratar este término con rigor, el cual representa un acoplamiento importante entre turbulencia y velocidad de reacción.

6. MODELO DE TURBULENCIA

El flujo turbulento se caracteriza por un movimiento complejo de remolinos, que produce fluctuaciones en las componentes de velocidad, presión, temperatura y si el flujo es compresible, también en la densidad. El carácter de “incompresible” esta asociado al número de Mach del

fluido, para $M < 0.1$, el fluido puede recibir una modelación de carácter incompresible [9]. En este caso, los efectos de compresibilidad son despreciables, y la variación de la densidad del gas con la presión puede ser ignorada. En simulaciones de combustión a presión atmosférica, la variación de la densidad se da por parte de la temperatura y no por la presión.

Son varios los modelos disponibles en la literatura para abordar la turbulencia en simulaciones numéricas, entre varios, [10], [11], [12] y en simulaciones de fluidos turbulentos con reacción química las referencias [12], [13] y [14] son de gran utilidad. Fue utilizado el modelo de turbulencia $k-\varepsilon$. Este modelo pertenece al grupo de modelos de turbulencia a dos ecuaciones, en los cuales, dos ecuaciones diferenciales son utilizadas para calcular el transporte de dos propiedades turbulentas, de manera similar al cálculo de transporte de energía o cantidad de movimiento lineal en el fluido. Estas dos ecuaciones diferenciales son adicionadas al grupo de ecuaciones de conservación descrito en la sección 5, y resueltas de forma acoplada. A seguir una descripción breve del modelo utilizado en este trabajo.

Modelo $k-\varepsilon$.

La energía cinética turbulenta k , y la disipación de energía cinética turbulenta, ε , son tratadas como propiedades del fluido y son determinadas en función de dos ecuaciones diferenciales:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b \quad (6)$$

$$- \rho \varepsilon - Y_M + S_k$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \quad (7)$$

$$+ C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon$$

La viscosidad turbulenta μ_T es definida como:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (8)$$

Las ecuaciones (6) y (7) son escritas en notación indicial [11] y las constantes $c_{\varepsilon 1}$, $c_{\varepsilon 2}$ y c_μ son obtenidas de condiciones experimentales, usualmente los valores de estas constantes son: $c_{\varepsilon 1} = 1,44$, $c_{\varepsilon 2} = 1,92$ y $c_\mu = 0,09$. Los términos G_k y G_b representan la generación de energía cinética turbulenta debido a gradientes medios de velocidad y efecto empuje, respectivamente. El término Y_M representa la contribución de efectos de dilatación fluctuante en turbulencia con efectos de compresibilidad, para la velocidad total de disipación. Los términos S_k y S_ε son opciones de funciones definidas por el usuario en el programa FLUENT

7. MODELO DE COMBUSTIÓN

Simular un proceso de combustión demanda la inclusión de un mecanismo cinético que represente razonablemente el proceso que se quiere abordar numéricamente, por su vez, los mecanismos cinéticos se dividen en dos grandes grupos; Mecanismos Globales y Mecanismos Detallados.

Un mecanismo cinético global, consigue reproducir informaciones generales del proceso de combustión, mientras que un mecanismo cinético detallado consigue reproducir particularidades del proceso de combustión. Esta diferencia es función del número de especies y reacciones químicas contempladas en los dos tipos de mecanismos. Una mayor cantidad de especies químicas contempladas en un mecanismo cinético va a permitir coleccionar una mayor cantidad de información que, dependiendo del proceso en análisis, pueden ser de gran impacto. No siempre es posible, realizar una simulación en CFD usando un mecanismo cinético detallado de grandes proporciones. El problema radica en el número de especies químicas que han de tenerse en cuenta en la simulación. Por ejemplo, querer simular un proceso de combustión en CFD tridimensional, no estacionario, turbulento, en un motor a combustión interna con un mecanismo cinético detallado para el iso-octano, como el propuesto por Curran H. J. [17], es imposible con los recursos computacionales actuales. El hecho de este mecanismo contemplar 800 especies químicas, demanda la solución de 799 ecuaciones de conservación, más las ecuaciones de turbulencia, energía y cantidad de movimiento. No existe una arquitectura Procesador-Memoria RAM que soporte esta cantidad de información a cada ciclo del *solver* CFD. En función de este nivel de complejidad desde el punto de vista numérico, es común en simulaciones CFD de combustión, usar mecanismos cinéticos globales o reducidos, que sean posibles de implementar en los recursos computacionales actuales.

Son diversos los métodos, con enfoque numérico, para abordar problemas de combustión. Diferentes programas CFD [5], [6] y [77] tienen implementadas varias metodologías para abordar la solución numérica de un proceso de combustión. Estas metodologías envuelven el transporte de alguna variable y a partir de allí, surgen los diferentes modelos: a) Generalizado de velocidad finita – Transporte de especies químicas, b) Combustión no premezclada, c) Combustión premezclada, d) Combustión parcialmente premezclada, e) Composición PDF (*Probability Density Function*) entre varios.

8. RESULTADOS

A seguir son mostrados algunos resultados de distribución de temperatura en la superficie metálica del quemador. Cabe resaltar que, en esta simulación, no fue resuelta la conducción de calor en la pared del quemador en dirección normal a la pared, en otras palabras, el dominio computacional no envuelve partes sólidas, no en tanto, el FLUENT permite entrar con la opción “*Shell Conduction*” en la cual, el usuario entra con un valor de

la espesura de la pared, y el programa calcula la conducción de calor en la dirección paralela a la pared.

La Figura 4 muestra los contornos de temperatura en la superficie del quemador.

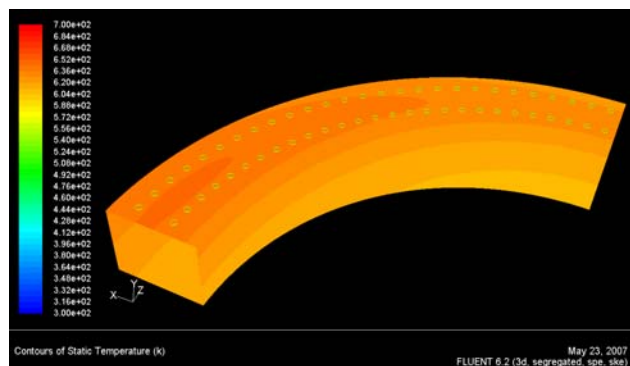


Figura 4 Distribución de temperatura superficie del quemador.

La Figura 4 muestra que la superficie del quemador llega a una temperatura entorno de 650 °C, lo anterior permite escoger un material para la fabricación del quemador, que consiga resistir ese nivel térmico sin presentar dilataciones representativas, optimizando los costos de producción.

El modelo global de combustión del sistema metano – aire implementado en el FLUENT representa cualitativa y cuantitativamente bien el proceso cinético de combustión. Este modelo, produce resultados de acorde con la “física” del proceso cinético, reproduciendo informaciones consecuente con los cálculos de equilibrio químico, en los cuales, los mayores valores de temperatura de combustión de un sistema se encuentran cuando la estequiometría de los reactivos esta entorno de la composición estequiométrica ($\Phi = 1,0$) en el proceso de combustión.

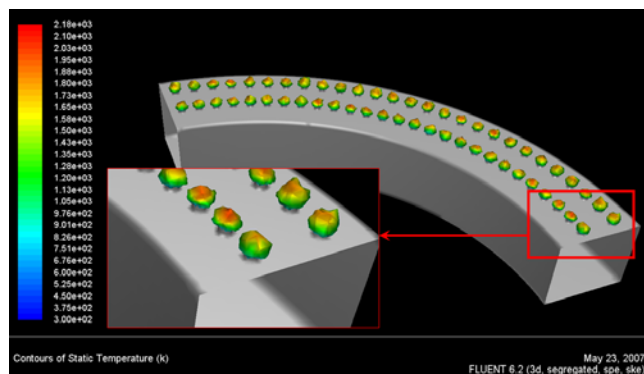


Figura 5 Posición de las llamas en el quemador tipo corona

La Figura 5 muestra la posición de las llamas en la “corona” metálica del quemador.

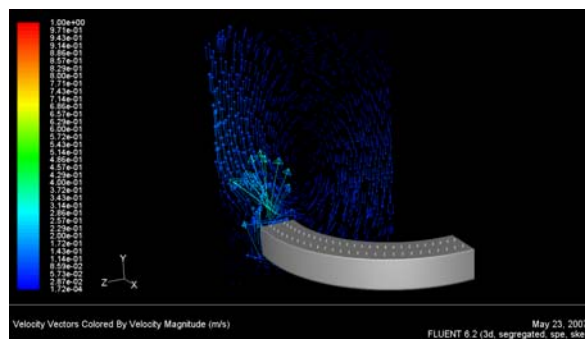


Figura 6 Vectores de velocidad en el plano de simetría del dominio computacional - Zona de recirculación

La Figura 6 indica la presencia de una zona de recirculación cerca de la llama y en la parte interna de la corona

La Figura 7 muestra los contornos de coeficiente de transferencia de calor superficial por convección en la superficie del quemador

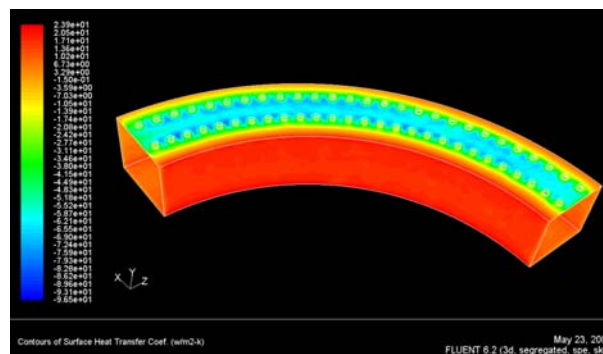


Figura 7 Coeficiente de transferencia de calor superficial por convección en la superficie del quemador.

La Figura 8 muestra el contorno de temperatura en un plano radial del quemador y la posición de las llamas en una iso-superficie de velocidad de $v = 0.48$ m/s

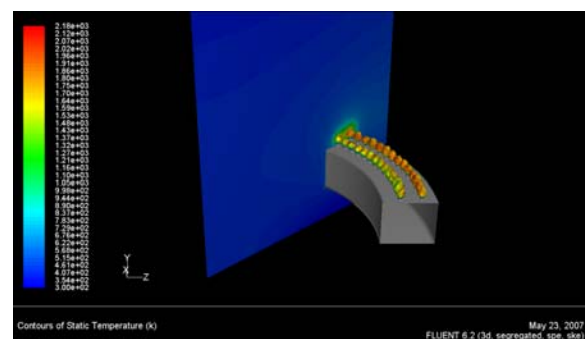


Figura 8 contorno de temperatura en un plano radial del quemador.

9. CONCLUSIONES

En el presente trabajo, fue analizado numéricamente el proceso de combustión en un quemador tipo corona, usando como combustible metano. De este trabajo se pueden hacer las siguientes conclusiones:

El modelo de turbulencia, consiguió captar zonas de recirculación en el dominio computacional. Estas zonas de recirculación son de gran importancia cuando se encuentran entorno de la llama, como su nombre lo indica, estas zonas generan un efecto de “recirculación” de productos y reactivos y pueden afectar la configuración de la llama.

Los valores de coeficiente de transferencia de calor superficial en la pared del quemador indican valores de transferencia de calor acorde con el régimen laminar del proceso en los alrededores del quemador. Los valores negativos indican la dirección del flujo de calor, en este caso, negativo indica que la superficie esta recibiendo calor, note que, esto acontece en la región próxima a la llama.

La Figura 8 muestra que para una velocidad de 0.48 m/s en la fase gaseosa, las llamas son estables en el quemador, lo anterior coincide con las velocidades de llama laminar para mezclas de metano y aire en composición estequiométrica experimental, comúnmente encontrada en la literatura, [3], [4], [13]

El tiempo computacional es relativamente grande, considerando que el dominio computacional es pequeño, en este trabajo fue utilizado un computador Pentium IV Core 2 duo, de 3,4 GHz de velocidad de procesamiento y 4,0 GB de memoria RAM. En este caso, el tiempo de simulación fue de 150 horas continuo, sin contar el tiempo de post-procesamiento de datos. El residuo RSM para el criterio de convergencia fue impuesto en 10^{-4} para continuidad, 10^{-7} para energía y 10^{-4} para velocidades y parámetros de turbulencia.

Recomendaciones para trabajos futuros.

Lo ideal para la validación de un trabajo numérico, es la comparación con resultados experimentales. Sería interesante usar métodos como por ejemplo el PLIF (*Planar Laser Induced Fluorescence*) para medir campos de concentraciones y temperaturas en este tipo de quemadores y comparar con resultados numéricos.

Desde el punto de vista numérico, pueden ser testadas otras configuraciones geométricas, variando el diámetro de los agujeros de salida de mezcla reactiva y su espaciado relativo, y determinar numéricamente un quemador eficiente desde el punto de vista de combustión.

También es interesante utilizar otros modelos de combustión que, de repente, tengan una mayor sensibilidad y robustez en la previsión de temperaturas y especies químicas. También puede ser implementado un mecanismo cinético reducido para el metano, con un número bajo de especies químicas (10 o 12 por ejemplo), y un número mayor de reacciones cinéticas para describir las diferentes etapas de la reacción del sistema metano-aire.

10. AGRADECIMIENTOS

Los autores del presente estudio agradecen a: *Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica* na *Universidade Federal de Santa Catarina* – **PosMEC** –

UFSC, y al *Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico* - **CNPq** por el soporte financiero para la realización de este trabajo.

11. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Salvi, G. “La Combustión, Teoría y aplicaciones”, Ed. Dossat, S. A., 1975
- [2] Pereira, M. P. “Medição de características térmicas e estudo do mecanismo de estabilização de chama em queimadores porosos radiantes” Disertación de Maestría, Universidad Federal de Santa Catarina, 2002, en Portugués, 88 pp.
- [3] Cancino, L. R. “Análise de equilíbrio químico, cinética química da ignição térmica e propagação de chama plana laminar de misturas de hidrocarbonetos leves com ar”. Disertación de Maestría, Universidad Federal de Santa Catarina, 2004, en Portugués, 245 pp.
- [4] Ibáñez, W. A. C. “Análise e desenvolvimento de uma metodologia de projeto de queimadores atmosféricos tipo tubo perfurado” Disertación de Maestría, Universidad Federal de Santa Catarina, 2005, en Portugués, 158 pp.
- [5] FLUENT, disponible en: www.fluent.com
- [6] ANSYS-CFX, disponible en: www.ansys.com
- [7] STAR-CD, disponible en: www.cd-adapco.com
- [8] Maliska, C. R. “Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional” Segunda edição, Editora LTC
- [9] FLUENT 6.2 Documentation.
- [10] Davidson, L. “An introduction to Turbulence Models” Dep. Of Thermo and Fluid Dynamics. CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY. Göteborg, Sweden. 2003.
- [11] Freire, A. P. S., Menut, P. P. M., Su, J. “TURBULÊNCIA”. Associação Brasileira de Ciências Mecânicas, 2002.
- [12] Poissant, T., Veynante, D. “Theoretical and Numerical Combustion” Edwards, 2001.
- [13] Warnatz, J., Mass, U., Dibble, R. D. “Combustion, Physical and Chemical Fundamentals, Modeling and Simulation, experiments, Pollutant Formation. Second Edition. Springer, 1999.
- [14] Chomiak, J., Lipatnikov, A. N. “Turbulent flame speed and thickness: phenomenology, evaluation, and application in multi-dimensional simulations”. *Progress in Energy and Combustion Science* 28 (2002) 1-74.
- [15] Hopman, T. “Introduction to indicial notation”, Dep. of Physics, University of Guelph, 2002.
- [16] Wilcox, D. C. “Turbulence modeling for CFD” DCW Industries, INC. La Cañada, California. 1994.
- [17] Curran, H. J., Gaffuri, P., Pitz, W. J., Westbrook, C. K. “A comprehensive modeling study of iso-octane oxidation” *Combustion and Flame* 129:253-280 (2002)