

Simulación Numérica del Efecto de un Mecanismo de Estratificación de Aire en un Quemador de Alta Velocidad

Numerical Simulation of Air Staged Mechanism Effect in a High Velocity Burner

Bernardo A. Herrera-Múnera¹
Elizabeth C. Rodríguez-Acevedo²
Karen P. Cagua-Madero³
Carlos A. Mora-Maya⁴
Edison H. Cardona-Gutierrez⁵

-
- 1 Facultad de Ingeniería, Instituto Tecnológico Metropolitano, Medellín-Colombia
bernardoherrera@itm.edu.co
 - 2 Facultad de Ingeniería, Instituto Tecnológico Metropolitano, Medellín-Colombia
elizabethrodriguez@itm.edu.co
 - 3 Facultad de Ingeniería, Instituto Tecnológico Metropolitano, Medellín-Colombia
karencagua@itm.edu.co
 - 4 Semillero de Investigación en Ciencias Térmicas, Facultad de Ingeniería, Instituto Tecnológico Metropolitano, Medellín-Colombia
carlosmora69917@correo.itm.edu.co
 - 5 Semillero de Investigación en Ciencias Térmicas, Facultad de Ingeniería, Instituto Tecnológico Metropolitano, Medellín-Colombia

Resumen

En este trabajo se analizó por medio de simulación numérica el efecto de la estratificación de aire en un quemador de alta velocidad con el fin de determinar su efecto sobre la distribución de temperatura, la estabilidad de llama y la formación de especies químicas contaminantes como CO y NOx. Las simulaciones se realizaron utilizando el software comercial ANSYS FLUENT para predecir el comportamiento del sistema con y sin uso del mecanismo de suministro de aire por etapas. En cada simulación se empleó el modelo Eddy Dissipation para la combustión, mientras que los modelos $k - \epsilon$ Realizable y Ordenadas Discretas fueron usados para la simulación del flujo turbulento y la radiación, respectivamente. Los resultados muestran que el uso de un mecanismo para estratificar el aire favorece la estabilización de llama, la iniciación de las reacciones de combustión y el mecanismo de mezclado. La formación de CO presentó diferencias en la zona de reacción y las emisiones de NOx no fueron significativamente influenciadas por el mecanismo de estratificación de aire.

Palabras clave

Combustión por etapas; NOx; dinámica de fluidos computacional; quemador alta velocidad.

Abstract

In this work, staged air combustion in a high speed burner was analyzed by mean of numerical simulation in order to determine its effects on temperature distribution and pollutant chemical species formation such as CO and NOx. The simulations were achieved using the commercial software ANSYS FLUENT as a design tool to predict the behavior of the thermal system and to establish operation conditions with or without staged air. Eddy Dissipation model was used for combustion simulation, while $k - \epsilon$ Realizable and Discrete Ordinates models were utilized for turbulence and radiation simulation, respectively. Results show that staged air mechanism allows better flame stabilization, combustion reactions initiation and fuel-air mixing. The CO formation was different in reaction zone and NOx emissions were not significantly influenced by the staged air.

Keywords

Staged combustion; NOx; computational fluids dynamics; high velocity burner.

1. INTRODUCCIÓN

Un quemador de alta velocidad es un dispositivo empleado en industrias donde es necesario el calentamiento rápido de grandes cantidades de material. Este tipo de quemador genera gases de combustión a altas velocidades, generando alta turbulencia y buena recirculación en el hogar de los hornos donde se utilizan (Castells, 2005; Copete et al., 2008).

Las emisiones de óxidos de nitrógeno en los sistemas de combustión han constituido una de las principales ramas de investigación en los procesos de alta temperatura, debido a que estos contaminantes pueden formar lluvia ácida y humos fotoquímicos (Choi & Kim, 2009). Una de las técnicas implementadas para controlar las emisiones de NO_x en los quemadores de alta velocidad es la combustión por etapas (Copete, 2008; Herrera et al., 2009), la cual consiste en introducir el aire requerido para la combustión por zonas, una zona primaria rica en combustible, donde se utiliza cerca del 80% del aire teórico y una zona secundaria en donde se utiliza aire adicional con el fin de que el combustible se quemé completamente (Ighodalo, 2011; Providakis et al., 2013).

En este trabajo se presenta inicialmente la metodología de simulación donde se explican los modelos utilizados, las condiciones de frontera y el método de solución, posteriormente se presentan los resultados donde se comparó el funcionamiento de dos quemadores de alta velocidad, uno con combustión por etapas y otro convencional, con el fin de determinar el comportamiento de la temperatura y las especies formadas durante el proceso de combustión.

2. METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN

2.1 Descripción de la Geometría del Quemador de Alta Velocidad

Se reprodujo la geometría del quemador de alta velocidad PIROTEC BURNER PJ4, el cual es presentado en la Fig. 1a. El quemador posee un sistema de suministro de aire por etapas que

se regula por medio de una copa perforada que estratifica la entrada de aire hacia la zona de combustión (Fig. 1b). Con el propósito de analizar la influencia del mecanismo de combustión por etapas, se realizó una segunda geometría para la simulación sin la inclusión de la copa perforada. La potencia térmica del quemador es 117 kW con inyección de gas a una presión de 100 mbar, los gases de combustión salen a través de una tobera convergente que acelera el flujo. El aire se suministra a través de un ventilador centrífugo. Con un factor de aireación de 1,1.



Fig. 1. Quemador de alta velocidad PIROTEC BURNER PJ4. a) Estructura del quemador. b) Sistema de suministro de aire por etapas

2.2 Simulación Numérica

Todos los códigos de software de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés), están basados en las ecuaciones de continuidad, conservación de cantidad de movimiento y la ecuación de la energía. Adicionalmente si existen reacciones químicas, se debe resolver una ecuación de balance de masa para cada especie. Para este sistema turbulento y reactivo se emplearon las ecuaciones de conservación de la forma promediada de Favre que involucra los efectos debido al cambio de densidad (Patankar, 1980; Versteeg & Malalasekera, 1995).

2.2.1 Modelo de combustión

Para la combustión e interacción entre química y turbulencia se usó el modelo Eddy Dissipation propuesto por Magnussen & Hjertager (1976), donde la tasa neta de producción de una especie debido a una reacción está dada por el menor valor arrojado entre

dos expresiones, cada una de las cuales considera que la reacción química está gobernada por el tiempo de mezclado en los torbellinos más grandes, de tal manera que la combustión procede en cualquier lugar donde haya mezclado turbulento. Para este modelo se usó el mecanismo de combustión del gas natural de dos pasos propuesto por Westbrook & Dryer (1981).

2.2.2 Modelo de turbulencia

Se seleccionó el modelo $k-\varepsilon$ realizable con las constantes por defecto ($C_{1\varepsilon} = 1,44$, $C_2 = 1,9$, $\sigma_k = 1,0$, $\sigma_\varepsilon = 1,2$ y $C_\mu = 0,09$) propuesto por Shi et al (1995) debido a que ofrece una mejor predicción de la tasa de esparcimiento generada por chorros redondos. Este modelo se basa en la solución de las ecuaciones de transporte para la energía cinética turbulenta k y la tasa de disipación viscosa ε , adicionalmente emplea una fórmula para la viscosidad de Eddy y plantea una ecuación para ε basada en la ecuación dinámica de fluctuación de vórtices.

2.2.3 Modelo de radiación

El modelo Ordenadas Discretas (Raithby & Chui, 1990; Chui & Raithby, 1993) se seleccionó para la transferencia de calor por radiación desde las paredes, este modelo resuelve la ecuación de transferencia radiante para un número finito de ángulos sólidos discretizados y convierte dicha ecuación en ecuaciones de transporte para la intensidad de radiación, de tal manera que habrá tantas ecuaciones de transporte como direcciones de ángulo sólido que se hayan discretizado. Debido a la influencia del vapor de agua y el CO_2 sobre los patrones de radiación, se hizo necesaria la incorporación del modelo de suma ponderada de gases Grises (Smith et al, 1982; Coppalle & Vervisch, 1983; Denison & Webb, 1993).

2.2.4 Mecanismos de formación de NO_x

En este trabajo se utilizaron los dos mecanismos principales de formación de NO_x en la combustión de metano con aire: un mecanismo súbito y un mecanismo térmico. La formación de NO térmico es determinada por un conjunto de tres reacciones químicas altamente dependientes de la temperatura, conocido como el mecanismo extendido de Zeldovich (Miller & Bowman, 1989):



El mecanismo de NO_x súbito (Fenimore, 1971) es un mecanismo que resulta de la reacción de hidrocarburos con moléculas de nitrógeno, aunque su contribución a la formación del NO total es pequeña si el proceso se lleva a cabo a alta temperatura.

2.2.5 Método de solución

El software ANSYS FLUENT utiliza el método de volúmenes finitos para convertir las ecuaciones diferenciales del modelo en ecuaciones algebraicas (Veersteg y Malalasakera, 1995). El sistema de ecuaciones se resolvió usando el método segregado; la linealización de las ecuaciones algebraicas se realizó por medio de un esquema implícito en el que para una variable dada, el valor desconocido de dicha variable en cada malla se calcula usando una relación que incluye valores conocidos y desconocidos en las mallas vecinas. El dominio computacional para la simulación CFD incluye un quemador de alta velocidad de llama de difusión, una cámara de combustión, una tobera convergente para la aceleración de los gases de combustión y un espacio hexahédrico que representa la atmósfera en la que se descargan los gases, como puede apreciarse en la Fig. 2.

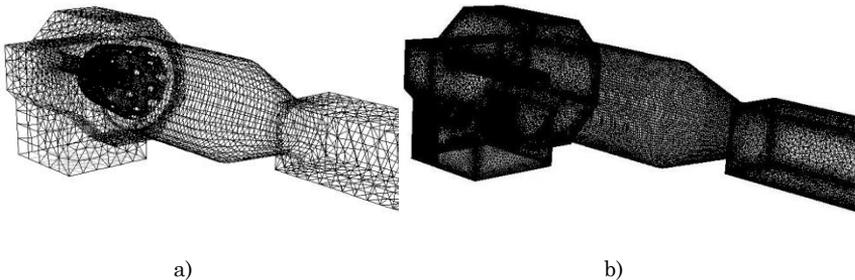


Fig. 2. Dominio computacional a) con suministro de aire por etapas, b) sin suministro de aire por etapas

El mallado interno del quemador con aire por etapas cuenta con 3.290.843 celdas tetraédricas, una oblicuidad máxima de 0,89 y una relación de aspecto máxima de 12. Para el quemador sin aire por etapas, el total de celdas fue de 3.456.789 con una oblicuidad máxima de 0,91 y una relación de aspecto máxima de 15.

2.2.6 Condiciones de simulación

En la Tabla 1 se presentan las condiciones de frontera para cada una de las simulaciones realizadas.

Tabla 1. Condiciones de frontera para las simulaciones con y sin suministro de aire por etapas

Propiedad	Valor
Potencia (kW)	117
Flujo de gas natural (kg/s)	0,0023
Flujo de aire enriquecido (kg/s)	0,044
Factor de aireación	1,1
Temperatura del aire (K)	323
Temperatura del gas natural (K)	300

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los perfiles de temperatura y principales especies químicas producidas en la combustión fueron comparados sobre el plano longitudinal medio del quemador. En la Fig. 3 se presentan los contornos de temperatura, donde se puede observar que la temperatura máxima que puede alcanzarse es similar en ambos modos de combustión pero con una clara diferencia en la iniciación de las reacciones de combustión. Mientras que en la combustión sin aire por etapas, la zona de alta temperatura se inicia aguas abajo de la cámara de combustión, en la combustión con etapas se observa la formación de una zona de alta temperatura dentro del dispositivo de estratificación de aire, favorecida por la recirculación de gases de combustión que se mezcla con el aire frío y el combustible.

En la Fig. 4 se muestra una comparación de los perfiles de temperatura y NO_x a lo largo de un eje longitudinal que atraviesa el centro del ducto de suministro de combustible y la tobera de aceleración. Las curvas muestran una similitud del comporta-

miento térmico a largo de dicho eje y son similares a los perfiles de velocidad, aunque al final la temperatura de la combustión con aire por etapas es mayor por 171 K.

Otro aspecto importante de los perfiles de temperatura de la Fig. 4 es la ausencia de picos de alta temperatura a lo largo del quemador, y un gradiente aproximadamente constante, lo cual favorece una baja tasa de formación de NO_x . Este resultado muestra que ya sea con la estratificación del aire o sin ella, la turbulencia generada por la aceleración de los gases en la tobera permite la homogenización de la temperatura y por ende la formación de NO_x por el mecanismo térmico, el cual se favorece por la presencia de zonas puntuales a alta temperatura ricas en N_2 y O_2 . Al final, puede verse que las emisiones de NO_x del quemador con aire por etapas tiene un menor valor (27 ppm) que el quemador sin aire por etapas (38 ppm), a pesar de que la temperatura es mayor.

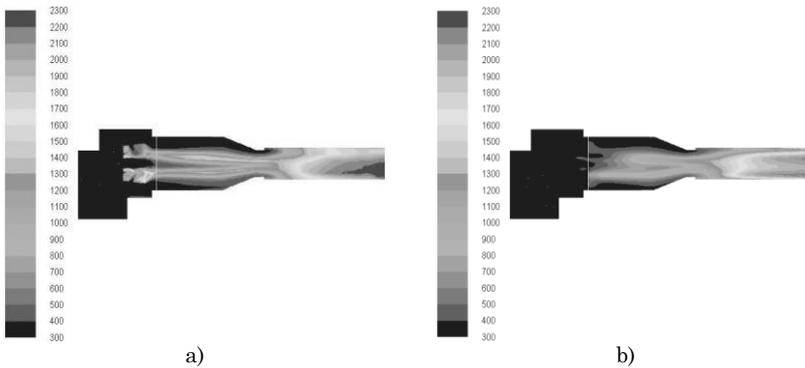


Fig. 3. Contornos de temperatura (K) en el plano longitudinal medio del quemador a) con suministro de aire por etapas, b) sin suministro de aire por etapas.

En la Fig. 5 se presentan los perfiles de especies químicas propias de la combustión como el CO_2 y el CO . La formación de CO_2 muestra una tendencia similar para ambos modos de combustión y al final de la zona de reacción la concentración de esta especie es similar. Sin embargo, la formación de CO presenta diferencias significativas en la zona de reacción, las cuales evidencian diferencias en el mecanismo de mezclado entre ambos modos de combustión. En la combustión sin estratificación de aire la formación de CO tiene un alto gradiente en la tobera de aceleración, debido a la

alta presencia de aire y al alto mezclado turbulento, el cual dirige la tasa de reacción en el modelo Eddy Dissipation seleccionado. Por el contrario, en la combustión con aire por etapas la formación de CO posee un gradiente más bajo debido principalmente a la baja presencia de O_2 en la zona de reacción que se va mezclando a lo largo de la tobera convergente. Ambos modos de combustión tienen un pico máximo de CO similar y en la misma zona de combustión, al final, la diferencia entre ambos perfiles es de aproximadamente 1000 ppm, favorable al desempeño del quemador con aire por etapas.

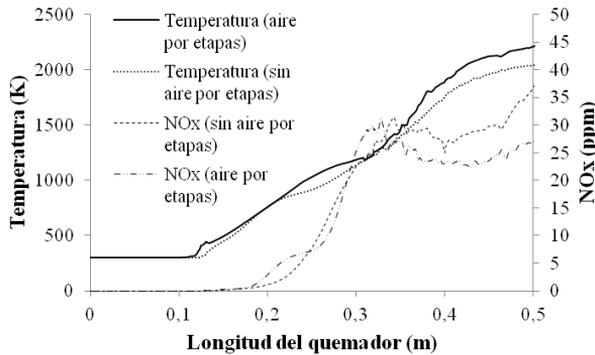


Fig. 4. Perfiles de temperatura y emisiones de NO_x en el eje longitudinal del quemador

Los resultados anteriores muestran que aún con una limitación del O_2 en la zona primaria de reacción, la combustión por etapas permite llevar a cabo un proceso de reacción adecuado y completo. Sin embargo, cabe notar que las emisiones de CO de ambos quemadores estuvieron por encima del límite tolerable para la mayoría de dispositivos de combustión (2000 ppm) debido principalmente a que la extensión de la zona de descarga de los gases de combustión no fue suficiente para completar las reacciones del mecanismo de dos pasos en el modelo Eddy Dissipation.

En la Fig. 6 se presenta una comparación de los contornos de velocidad, en los cuales se puede ver como en la combustión por etapas el mezclado de las corrientes de aire y combustible se presenta desde la cámara de combustión formando un patrón típico

del mezclado de chorros confinados, favoreciendo la estabilidad de la llama. Por su parte, la combustión sin estratificación de aire muestra un perfil de mezclado que se completa aguas debajo de la cámara de combustión dentro de la tobera, lo cual en la práctica puede dificultar la estabilización de la combustión. Este comportamiento justifica la realización de ensayos experimentales que permitan verificar el comportamiento fluidodinámico de los dos modos de combustión. Los contornos de la Fig. 6 también permiten visualizar la función de la tobera convergente, ya que en ambos casos se puede ver como los gases pasan de una velocidad cercana a 50 m/s en la entrada de la sección convergente hasta ser descargados a velocidades cercanas los 140 m/s.

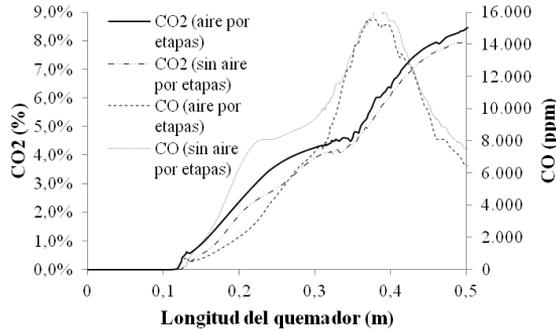


Fig. 5. Perfiles de CO₂ y CO en el eje longitudinal del quemador

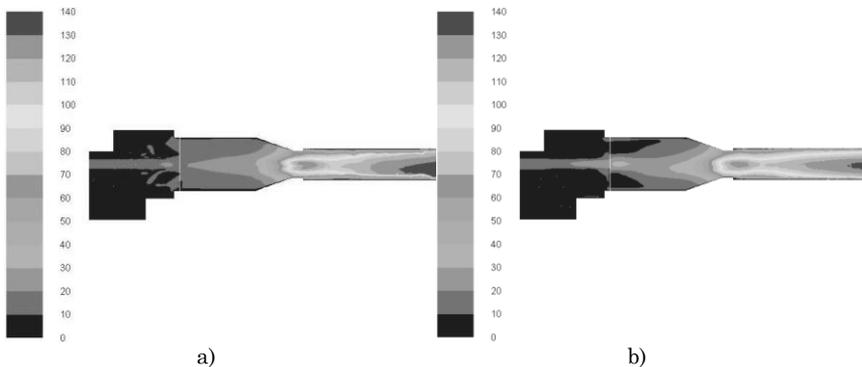


Fig. 6. Contornos de velocidad (m/s) en el plano longitudinal medio del quemador a) con suministro de aire por etapas, b) sin suministro de aire por etapas

4. CONCLUSIONES

La estratificación de aire permite estabilizar la llama y favorece la iniciación de las reacciones de combustión dentro de la cámara de combustión. Con respecto a las emisiones de NO_x , ambos modos de combustión mostraron valores muy semejantes por debajo del límite permitido por la legislación, siendo la combustión por etapas la de menor concentración de NO_x . Finalmente, la formación de CO mostró una dinámica de formación muy diferente para ambos modos de operación, ya que con el quemador sin estratificación de aire se presentó un gradiente de formación más alto en la zona de reacción.

5. REFERENCIAS

- Castells, X. (2005). Tratamiento y valorización energética de residuos (p. 1255). Ediciones Díaz de Santos.
- Choi, C. R., & Kim, C. N. (2009). Numerical investigation on the flow, combustion and NO_x emission characteristics in a 500MWe tangentially fired pulverized-coal boiler. *Fuel*, 88(9), 1720–1731.
- Chui E., & Raithby G. (1993). Computation of Radiant Heat Transfer on a Non-Orthogonal Mesh Using the Finite-Volume Method. *Numerical Heat Transfer, Part B*, 23, 269–288.
- Copete, H. (2008). Combustión con exceso de entalpía. *Tecnológicas*, (21), 169–190.
- Copete, H., Amell, A., & Cadavid, F. (2008). Simulación numérica de una cámara de combustión de alta velocidad con dos configuraciones de inyección de combustible. *Dyna*, 75(156), 109–120.
- Coppalle A., & Vervisch P. (1983). The Total Emissivities of High-Temperature Flames. *Combustion and Flame*, 49, 101–108.
- Denison M., & Webb B. (1993). A Spectral Line-Based Weighted-Sum-of-Gray-Gases Model for Arbitrary RTE Solvers. *Journal of Heat Transfer*, 115, 1002–1012.
- Fenimore C. (1971). Formation of Nitric Oxide in Premixed Hydrocarbon Flames. In 13th Symposium International on Combustion. The Combustion Institute, 373.
- Herrera, B., Amell, A., & Cadavid, F. (2009). Modelos para el estudio fenomenológico de la combustión sin llama con simulación numérica. Numerical models for the phenomenological study of flameless combustion. *Ingeniería e Investigación*, 29(2), 70–76.

- Ighodalo, O. A. (2011). Current Trend in Furnace Technology in the Melting Industries (Vol. 3, pp. 540–545).
- Magnussen, B.F., & Hjertager, B.H. (1976). On mathematical modelling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion. The combustion institute, pp. 119-129.
- Miller J., & Bowman C. (1989). Mechanism and Modeling of Nitrogen Chemistry in Combustion. Progress in Energy and Combustion Science, 15, 287–338.
- Patankar, S.V. (1980). Numerical heat transfer and fluid flow. 1^a ed., USA, Taylor & Francis.
- Providakis, T., Zimmer, L., Scouflaire, P., & Ducruix, S. (2013). Characterization of the coherent structures in swirling flames stabilized in a two-staged multi-injection burner: Influence of the staging factor. Comptes Rendus Mécanique, 341(1-2), 4–14.
- Raithby G., & Chui E. (1990). A Finite-Volume Method for Predicting a Radiant Heat Transfer in Enclosures with Participating Media. Journal of Heat Transfer, 112, 415–423.
- Shih H., Liou W., Shabbir A., Yang Z., & Zhu J. (1995). A New Eddy-Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows - Model Development and Validation. Computers Fluids, 24(3), 227–238
- Smith T., Shen Z., & Friedman J. N. (1982). Evaluation of Coefficients for the Weighted Sum of Gray ases Model. Journal of Heat Transfer, 104, 602–608.
- Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (1995). An introduction to computational fluid dynamics. 1^a ed., New York, Longman Scientific & Technical.
- Westbrook C., & Dryer F. (1981). Simplified reaction mechanisms for the oxidation of hydrocarbon fuels in flames. Combustion science and technology, 27, 31-43.