

Características de la combustión con aire enriquecido con oxígeno y perspectivas de aplicación en PYME con procesos de alta temperatura

The characteristics of oxygen-enriched combustion and perspectives regarding its application in SMEs having high-temperature processes

Juan Carlos González Palencia¹, Andrés Adolfo Amell Arrieta² y Francisco Javier Cadavid Sierra³

RESUMEN

Las pequeñas y medianas empresas (PYME) con procesos de alta temperatura, como la fundición y los tratamientos térmicos, son de gran importancia social y económica en los países en vía de desarrollo, siendo necesario aumentar su competitividad para garantizar su permanencia en el mercado. Dado que estas empresas son intensivas en el consumo de energía térmica, su competitividad se ve afectada por la obsolescencia y baja eficiencia de los sistemas de combustión, por lo que es necesaria la investigación y divulgación de nuevas tecnologías. Teniendo esto en mente, se presenta una revisión del estado del arte de la combustión con aire enriquecido con oxígeno (OEC), resaltando sus ventajas ambientales y productivas. Con el objetivo de mostrar su potencial se presenta un caso de aplicación a la fusión de latón en un horno autorregenerativo para el que se obtienen reducciones de consumo de combustible, tiempo de proceso y emisiones contaminantes de CO₂ total equivalente del 28, 43 y 34% respectivamente y un incremento del 30% en la eficiencia al aumentar el contenido de O₂ en el comburente de 21 a 35%. Sin embargo, el incremento del costo asociado al suministro de O₂ representa un obstáculo para la penetración de esta tecnología.

Palabras clave: combustión con aire enriquecido con oxígeno, PYME, uso racional de la energía, países en vía de desarrollo.

ABSTRACT

Small and medium-sized enterprises (SMEs) having high temperature processes, such as heat treating and melting, are socially and economically important for developing countries. Consequently, their competitiveness must thus be increased to guarantee their permanence in the market. As these companies are thermal energy intensive, their competitiveness is affected by obsolescence and the low efficiency of older combustion devices, thereby making research necessary and being open to and aware of new technologies. With this aim in mind, a review of the state of the art regarding oxygen-enhanced combustion (OEC) is presented, highlighting its productivity and environmental benefits. A brass melting process in a self-regenerative furnace is shown to account for its potential, in which 28%, 43% and 34% reductions in fuel consumption, process time and CO₂ emissions were obtained, respectively, and a 30% increase in efficiency, by increasing the oxygen content in the oxidiser from 21% to 35%. However, increased O₂ supply cost constitutes an obstacle to applying this technique in SMEs.

Keywords: oxygen-enhanced combustion, SME, rational energy use, developing countries.

Recibido: noviembre 25 de 2008

Aceptado: octubre 15 de 2009

Introducción

En la combustión tradicionalmente se ha empleado aire normal (21% O₂ y 79% N₂) como oxidante, siendo el N₂ un consumidor de energía y el responsable de los NO_x contaminantes indeseados (Boushaki *et al.*, 2007). Al disminuir el N₂ presente en la reacción se reducen las pérdidas de calor sensible, siendo este uno de los métodos más eficientes para el ahorro de energía en combustión (Blasiak *et al.*, 2004; Krishnamurthy *et al.*, 2004). La combustión

con estas características se conoce como combustión con aire enriquecido con oxígeno (OEC) (Baukal, 1998; Lambert *et al.*, 1997).

El aumento del O₂ en el comburente mejora las condiciones para la iniciación, sostenimiento y propagación de la llama (Bisio *et al.*, 2001), y su oxidación (Rena *et al.*, 2003), así como la productividad en los procesos (Krishnamurthy *et al.*, 2009; Cheng *et al.*, 2006). Así pues, la OEC es una alternativa para aumentar la competitividad de las PYME del país con procesos a alta temperatura, que se caracterizan por el uso de equipos de combustión con ba-

¹ Ingeniero mecánico, Universidad Nacional de Colombia, Medellín. M.Sc., en Ingeniería énfasis Energética, Universidad de Antioquia, Colombia. Investigador, grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía - GASURE, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Colombia. jcgonzalezp@udea.edu.co.

² Ingeniero mecánico, Universidad de Antioquia, Colombia. Magíster, en Economía Energética, Universidad Nacional de Colombia, Medellín. Docente Investigador y coordinador, Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía - GASURE, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Colombia. Consejero Nacional del Programa de Investigación en Energía y Minería de Colciencias. anamell@udea.edu.co.

³ Ingeniero mecánico, Universidad de Antioquia, Colombia. Magíster, en Transferencia de Calor, Universidad de Poitiers, Francia. Ph.D., en Mecánica y Energética, Universidad de Valenciennes et du Hainaut - Cambresis, Francia. Docente Investigador, grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía - GASURE, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Colombia. fcadavid@udea.edu.co.

jas eficiencias térmicas, condiciones críticas de salud ocupacional y poca capacidad adquisitiva (Amell *et al.*, 2007); que repercuten en la calidad de los productos y procesos, los costos de operación, la eficiencia energética, las emisiones contaminantes y las condiciones laborales. Por esta razón las características de la OEC son estudiadas y presentadas a continuación, con el propósito de divulgar esta tecnología en el país y dar señales sobre la pertinencia de realizar desarrollos tecnológicos en el tema que sean adaptable a la escala económica de las PYME.

Inicialmente se presentan las características fenomenológicas de la OEC, resaltando el efecto del O₂; luego se define la solución más adecuada para proveer el O₂ de acuerdo con las restricciones de las PYME colombianas y se presentan las ventajas de la OEC con el caso particular de la fusión de latón; y finalmente se presentan las conclusiones.

Características principales de la OEC

La OEC surgió debido a los requerimientos de altas temperaturas de procesos que tradicionalmente empleaban grandes bancos recuperadores de calor; y se consolidó gracias a la disminución de los costos asociados a la producción de O₂ (Baukal, 2003; Chen y Axelbaum, 2005; North American Mfg Co., 1997), que la hicieran económicamente viable en procesos de alta temperatura (Sunderland *et al.*, 2003), como la fusión de vidrio (Boushaki *et al.*, 2007; Bennet *et al.*, 2008), de acero (Kim *et al.*, 2007) y de aluminio (Nieckele *et al.*, 2004), donde se obtuvieron aumentos significativos en la productividad con bajos costos de inversión, convirtiéndolos en potenciales aplicaciones de la OEC (Fabiani *et al.*, 1996).

La OEC se clasifica de acuerdo al contenido de O₂ en el comburente en: enriquecimiento de bajo, medio y alto nivel (Baukal, 1998). El enriquecimiento de bajo nivel (O₂ entre 23 y 30%) se emplea para mejorar el rendimiento en los procesos, pues la mayoría de los quemadores operan bien hasta 28% de enriquecimiento sin modificaciones, con mejoras significativas en la productividad (Baukal, 2000; Lambert *et al.*, 1997). El enriquecimiento de medio nivel (O₂ entre 30 y 90%) y de alto nivel (O₂ mayor que 90%) son estrategias más complejas, ya que requieren la implementación de equipos especializados debido a los cambios de las características de la combustión, que conllevan altos costos de los equipos y del suministro de O₂ (Baukal, 2003). Cuando el contenido de O₂ en el comburente es mayor que 98% se tiene oxicomustión, caracterizada por mayores temperaturas de proceso con producción casi nula de NO_x.

Para caracterizar la OEC se emplean los siguientes parámetros: el factor de enriquecimiento (ψ), definido como el cociente entre la relación aire/combustible (A/F) con aire normal y con aire enriquecido (Coombe y Nieh, 2007); la estequiometría (S), que relaciona la cantidad de O₂ y de combustible que reaccionan; y la fracción molar en el oxidante (Ω), que relaciona las moles de O₂ en el comburente y las moles totales de este (Baukal, 1998), además del nivel de enriquecimiento (% E), que expresa la variación del contenido de O₂ en el comburente con respecto al nivel de referencia.

$$\psi = \frac{(A/F)_{\text{aire normal}}}{(A/F)_{\text{aire enriquecido}}} = 4,76\Omega \quad (1)$$

$$S = \frac{\text{Flujo volumétrico de O}_2 \text{ en el comburente}}{\text{Flujo volumétrico de combustible}} \quad (2)$$

$$\Omega = \frac{\text{Flujo volumétrico de O}_2 \text{ en el comburente}}{\text{Flujo volumétrico total de comburente}} \quad (3)$$

$$\% E = (\Omega - 0,21) \times 100\% \quad (4)$$

El aumento del contenido de O₂ en el comburente disminuye los flujos volumétricos de gases en la combustión (Krishnamurthy *et al.*, 2009; Bennet *et al.*, 2008; Kim *et al.*, 2007), generando aumentos significativos en la eficiencia de combustión (Coombe y Nieh, 2007; Bisio *et al.*, 2001; Blasiak *et al.*, 2004; Boushaki *et al.*, 2007; Lambert *et al.*, 1997; Kim *et al.*, 2007), al punto de obtener reducciones del consumo de combustible hasta del 50% al sustituir la combustión tradicional por oxicomustión (Vesterberg *et al.*, 2006). De igual forma, genera el incremento de la temperatura adiabática de llama (Baukal y Gebhart, 1998; Vega *et al.*, 2007; Beaulieu *et al.*, 2008; Bennet *et al.*, 2008; Rafidi *et al.*, 2005), el perfil de temperatura, el calor disponible (Lambert *et al.*, 1997), el flux de calor (Gupta *et al.*, 1999), la modularidad de los equipos (Krishnamurthy *et al.*, 2009) y las eficiencias de primera y segunda ley de la termodinámica (Rafidi, 2005). Aunque en hornos con un quemador la uniformidad se ve afectada (Grandmaison *et al.*, 2003), esta mejora al instalar más quemadores.

También se han reportado incrementos del gradiente de velocidad y de la velocidad de combustión conforme aumenta el nivel de enriquecimiento (North American Mfg Co., 1997; Vega *et al.*, 2007), pasando de 0,3 m/s cuando se emplea aire normal a 3,3 m/s al emplear O₂ puro (Baukal, 1998), incrementando también las tasas de liberación de energía y la densidad de potencia, mientras que se reduce el volumen de la llama.

El aumento de la temperatura de llama y de las emisividades de los gases mejoran la transferencia de calor (Lambert *et al.*, 1997). La componente de radiación se hace mayor debido al incremento de la temperatura y las concentraciones de CO₂ y H₂O (Baukal y Gebhart, 1997). La componente de convección aumenta debido al incremento de la temperatura adiabática de llama y de la velocidad de combustión (Remie *et al.*, 2006).

Las condiciones para la combustión se favorecen debido a la reducción de la energía y la temperatura mínimas de ignición (Lambert *et al.*, 1997). La energía mínima de ignición para el CH₄ pasa de 0,45 a 0,01 mJ y la temperatura mínima de ignición de 980 a 829 K cuando se aumenta el contenido de O₂ en el comburente de 21 a 100% (Baukal, 1998). Además, el intervalo de inflamabilidad aumenta (Vega *et al.*, 2007; Cheng *et al.*, 2006). En el caso del CH₄, el límite superior de inflamabilidad (LSI) incrementa linealmente con la concentración de O₂ en el comburente, pasando de 14 a 59 al cambiar el comburente de aire normal a O₂ puro, mientras que el límite inferior de inflamabilidad (LII) se mantiene constante (Baukal, 1998). De igual forma, la llama se vuelve más fuerte y resistente a la extinción debido a una mayor tasa de disipación escalar y a una menor temperatura de extinción (Du y Axelbaum, 1996), siendo la tasa de deformación requerida para extinguir una llama CH₄ - O₂ más del doble de la requerida para extinguir una llama CH₄ - aire (Chen y Axelbaum, 2005).

El enriquecimiento con O₂ también afecta la estructura de la llama. Reducciones en la longitud han sido reportadas al aumentar el nivel de enriquecimiento (Vega *et al.*, 2007; Beaulieu *et al.*, 2008; Bennet *et al.*, 2008); mientras que menores concentraciones de O₂ incrementan la fluctuación (sólo para descargas a alta velocidad), la longitud de la llama y la distancia de *liftoff* (Lille *et al.*, 2000). También se ha reportado la disminución de los vientos iónicos y con ellos la distorsión de la forma de llama en presencia de un campo eléctrico (Vega *et al.*, 2007).

La incidencia del incremento del contenido de O_2 en los productos ha sido estudiada por varios autores (Baukal, 1998; Grandmaison *et al.*, 2003; Khare *et al.*, 2007); encontrando que el CO pasa de una concentración en el equilibrio de 0% con aire normal a 15% con O_2 puro, mientras que la concentración en el equilibrio de CO_2 aumenta hasta valores cercanos a 10%; para el agua, la concentración en equilibrio se duplica, pasando de 20 a 40%, en tanto que el N_2 decrece de 70 a 0% (Baukal, 1998).

El aumento de la concentración de CO_2 en los productos facilita su captura (Sunderland *et al.*, 2003; Khare *et al.*, 2007; Cheng *et al.*, 2006), convirtiendo la OEC en una estrategia promisoriosa para la reducción de las emisiones de CO_2 (Gou *et al.*, 2006). Ésta se ha puesto en práctica en ciclos de combustión interna con O_2 puro para generación de energía, como el ciclo Graz y el ciclo semi-cerrado de oxicomustión combinado, cuyas eficiencias netas son cercanas al 50% (Sanz *et al.*, 2008; Sanz *et al.*, 2005).

En quemadores tradicionales los NO_x se comportan parabólicamente frente al contenido de O_2 debido al efecto de dos factores: la concentración de O_2 y la temperatura de llama (Ishii *et al.*, 2000). El aumento de la concentración de O_2 en el comburente causa la reducción del N_2 en la reacción, que genera la disminución de NO_x en el proceso; mientras que el aumento de la temperatura adiabática de llama favorece las condiciones para la formación de los NO_x (Bennet *et al.*, 2008). Para el CH_4 el máximo se encuentra cuando el contenido de O_2 en el comburente es 66% y el mínimo cuando el comburente es 100% O_2 (Baukal, 1998).

En quemadores con bajos NO_x , se obtienen reducciones de los NO_x implementando OEC con alta recirculación (Krishnamurthy *et al.*, 2004; Cremer *et al.*, 2003; Kim *et al.*, 2007). Experimentalmente se han obtenido emisiones de NO_x inferiores a 12 mg/MJ, prácticamente constantes para valores de Ω menores de 60%, que descienden en el rango superior de enriquecimiento (Grandmaison *et al.*, 2003; Poirier *et al.*, 2004). Además, la intensa radiación de la llama también contribuye a la reducción de los NO_x (Atreya, 2007).

Selección de la estrategia de enriquecimiento

El enriquecimiento del aire es uno de los principales elementos que se deben considerar para hacer viable la OEC. Las siguientes son las opciones con las que se cuenta para tal fin: mezclado de aire normal con O_2 , producción de O_2 por VSA o destilación e implementación de tecnologías de producción alternativas como membranas y separación magnética.

El mezclado de aire normal con O_2 es usado para contenidos de O_2 en el comburente entre 23 y 35%. Consiste en comprar O_2 con un nivel bajo de pureza (alrededor de 98%) y mezclarlo con aire normal. La principal ventaja es que requiere una inversión inicial baja, del orden de cientos de dólares, mientras que el costo de operación está asociado al O_2 , que para octubre de 2008 se encontraba alrededor de US \$7/m³. La principal dificultad de esta estrategia es la disponibilidad de O_2 , no siendo una alternativa viable en zonas apartadas.

La generación de O_2 usando VSA consiste en emplear ciclos *swing* de adsorción por vacío (VSA) para separar el O_2 del aire, siendo la zeolita A el material más adecuado para el lecho de adsorción (Niwa *et al.*, 1991). La inversión es del orden de miles de dólares y el usuario debe asumir los costos de operación, ganando en cambio autosuficiencia. Sin embargo, la barrera económica, característica de las PYME (Amell, *et al.*, 2007; Nagesha y Balachandra,

2006; Önüt y Soner, 2007; Shi *et al.*, 2008), dificulta la inversión en esta tecnología.

La generación de O_2 por destilación consiste en enfriar el aire para separarlo en sus componentes principales (Ar , N_2 y O_2) mediante destilación. La inversión oscila entre miles y millones de dólares de acuerdo con la capacidad y el usuario debe asumir los costos de operación. Esta estrategia no es conveniente en las PYME locales, pues los niveles de consumo de O_2 son muy bajos para justificar la construcción de un sistema de este tipo.

El enriquecimiento por membranas emplea el principio de disolución-difusión para separar el O_2 del aire. Sus principales ventajas son compactibilidad (Etouney *et al.*, 1998), modularidad (Lambert *et al.*, 1997) y el poco ruido y vibración generado (Coombe y Nieh, 2007), lo cual las hace propicias para aplicaciones de OEC en el tratamiento de aguas residuales (Tajuddin *et al.*, 2002), *insitu* (Bisio *et al.*, 2001) y *on board* en motores de combustión interna para automoción (Store y Poola, 1998) y submarinos (Clark y Rowan, 1996). Generalmente son fabricadas en polímeros y recientemente en materiales cerámicos (Ciacchi *et al.*, 2002). Sus costos de inversión son del orden de miles de dólares. El enriquecimiento por fuerzas magnéticas es otra tecnología alternativa, pero ésta se encuentra aún en etapa de desarrollo (Asako y Suzuki, 2007).

Análisis del caso

Se consideró un horno de 120 kW y factor de aireación de 1.1, condiciones típicas en PYME (González, 2009), con gas natural como combustible. Como se pretendía mantener los costos bajos, se empleó un nivel de enriquecimiento máximo de 35%, para lo cual se determinó que la estrategia de enriquecimiento más viable es el mezclado entre aire normal y O_2 .

Para las condiciones anteriores se estudió la fusión de latón usando OEC y aire precalentado. El efecto del enriquecimiento con O_2 sobre los flujos y costos de operación del sistema se presenta en la Figura 1, donde se observa que aumentos en el contenido de O_2 en el comburente disminuyen los flujos volumétricos de aire de combustión y aire normal, mientras que aumentan el flujo de O_2 y los costos de operación.

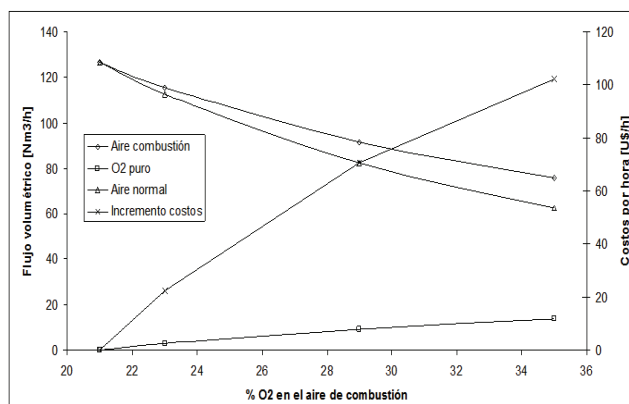


Figura 1. Efecto del enriquecimiento con O_2 sobre los flujos volumétricos y costos del proceso (González, 2009).

El horno fue evaluado experimentalmente con una carga de 250 kg de latón y operando con aire normal y aire enriquecido con O_2 al 35%, obteniendo una mejora significativa en el desempeño evidenciada por el incremento de la eficiencia térmica y la disminución de las emisiones contaminantes, del consumo de com-

bustible y el tiempo empleado para la fusión (González, 2009). Los principales parámetros de los procesos se recogen en la Tabla 1.

Tabla 1. Características de la fusión de latón con aire normal y OEC al 35% en un horno de crisol autorregenerativo. Adaptado de (González, 2009).

Proceso	Consumo gas natural [Sm ³]	Tiempo de fusión [min]*	Eficiencia útil [%]*	CO ₂ equivalente [kgCO ₂ /Ton latón]
Fusión AN	25.9	263.0	40.2	240.0
Fusión OEC 35%	18.7	150.0	52.2	159.0
Efecto OEC	Reducción 28%	Reducción 43%	Incremento 30%	Reducción 34%

* Incluye el calentamiento del horno y la fusión del material.

Como se empleó enriquecimiento hasta el 35%, las modificaciones a los sistemas de combustión no son significativas, siendo el suministro de O₂ el principal reto. Queda claro entonces, que enriquecer el aire con O₂ trae consigo beneficios significativos como la reducción del consumo de combustible, del tiempo de fusión y de las emisiones contaminantes, y el incremento de la eficiencia útil y de la temperatura máxima del proceso, que constituyen una oportunidad para aumentar la competitividad de las PYME.

Sin embargo, el costo asociado al suministro de O₂ representa la principal barrera de esta tecnología, por lo que el desarrollo de sistemas de enriquecimiento con menores costos, además de la valoración de beneficios como la mejora de las condiciones laborales y la disminución de las emisiones contaminantes pueden contribuir a hacer más atractiva esta tecnología.

Conclusiones

La OEC es una técnica de combustión donde se reduce el contenido de N₂ en el comburente, causando la disminución del flujo de gases, y consecuentemente, del tamaño de los equipos empleados, generando además el aumento de la temperatura adiabática de llama, la eficiencia térmica, el *flux* de calor, el intervalo de inflamabilidad y la velocidad de combustión; y la disminución de la energía y temperatura mínimas de ignición. La concentración de CO₂ aumenta, facilitando su captura; al paso que la concentración de NO_x presenta un comportamiento parabólico que puede ser convertido en lineal decreciente al emplear recirculación.

En procesos de calentamiento estas ventajas se traducen en un incremento en la temperatura máxima de proceso, la productividad y la eficiencia útil, y en la disminución de las emisiones contaminantes, el tiempo del proceso y el consumo de combustible. Estas características hacen de la OEC una alternativa interesante para aumentar la competitividad de las PYME colombianas, siendo el suministro de O₂ un elemento clave en la viabilidad económica debido al incremento en los costos de operación.

Este trabajo representa un punto de partida para explorar el potencial de la OEC en PYME de países en vía de desarrollo a partir de la ilustración de sus ventajas. A partir de los resultados encontrados es claro que se debe trabajar en el estudio de mecanismos para hacer económicamente más atractiva esta estrategia de combustión, como el desarrollo de sistemas de combustión tradicionales y la formulación de proyectos sombrija para la venta de emisiones de CO₂.

Agradecimientos

Los autores agradecen al SENA, a las Empresas Públicas de Medellín y a la Universidad de Antioquia, por el apoyo financiero del

proyecto relacionado con desarrollos tecnológicos para procesos de alta temperatura.

Nomenclatura

- A/F: Relación aire/combustible
- S: Estequiometría
- x: Número de moles de N₂
- %E: Nivel de enriquecimiento
- Ω: Fracción molar de O₂ en el oxidante
- Ψ: Número de enriquecimiento

Bibliografía

- Amell, A., Diagnóstico energético en los sectores metal-mecánico, textil, vidrio y cueros., Informe final del proyecto, GASURE, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, 2007.
- Amell, A., Estrategias para la Penetración del Gas Natural en PYMES con Procesos a Alta Temperatura en el Valle de Aburrá., Informe final del proyecto, GASURE, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, 2007.
- Asako, Y., Suzuki, Y., Oxygen separation/Enrichment From Atmospheric Air Using Magnetizing Force., Journal of Fluids Engineering, Vol. 129, 2007, pp. 438-445.
- Atreya A., Highly Preheated Combustion Air System with/without Oxygen Enrichment for Metal Processing Furnaces., Final Technical Report, USDOE, Estados Unidos, 2007.
- Baukal, Ch. E., Heat Transfer in Industrial Combustión., CRC Press (ed), Estados Unidos, 2000, 572p.
- Baukal, Ch. E., Industrial Burners Handbook., CRC Press (ed), Estados Unidos, 2003, 812p.
- Baukal, Ch. E., Oxygen-Enhanced Combustion, Air products., CRC Press (ed), Estados Unidos, 1998, 369p.
- Baukal, C., Gebhart, B., Heat transfer from oxygen-enhanced/natural gas flames impinging normal to a plane surface., Experimental Thermal and Fluid Science, No. 16, 1998, pp. 247-259.
- Baukal, C., y Gebhart, B., Oxygen enhanced/natural gas flame radiation., Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 40, No. 11, 1997, pp. 2539-2547.
- Beaulieu, P. A., Dembser, N. A., Effect of oxygen on flame heat flux in horizontal and vertical orientations., Fire Safety Journal, No. 43, 2008, pp. 410-428.
- Bennett, B. A., Cheng, Z., Pritz, R. W., Smooke, M. D., Computational and experimental study of oxygen-enhanced axisymmetric laminar methane flames., Combustion Theory and Modelling, No. 12, 2008, pp. 497-527.
- Bisio, G., Bosio, A., Rubatto, G., Thermodynamics applied to oxygen enrichment of combustion air., Energy Conversion and Management, No. 43, 2001, pp. 2589-2600.
- Blasiak, W., Narayanan, K., Yang, W., Evaluation of New Combustion Technologies for CO₂ and NO_x Reduction in Steel Industries., Air Pollution, No XII, 2004, pp. 761-771.
- Boushaki, T., Sautet, J. C., Salentey, L., Labegorre, B., The behaviour of lifted oxy-fuel flames in burners with separated jets., International Communications in Heat and Mass Transfer, No. 34, 2007, pp. 8-18.
- Chen, L., Axelbaum, R. L., Scalar disipation rate at extinction and the effects of oxygen-enriched combustion., Combustion and Flame, No. 142, 2005, pp. 62-71.

- Cheng, Z., Wehrmeyer, J. A., Pitz, R. W., Experimental and numerical studies of opposed jet oxygen-enhanced methane diffusion flames., *Combustion Science and Technology*, No. 178, 2006, pp. 2145-2163.
- Ciacchi, F. T., Badwal, S. P. S., Zelizko, V., *Tubular zirconia-yttria electrolyte membrane technology for oxygen separation.*, *Solid State Ionics*, No. 152-153, 2002. pp. 763-768.
- Clark, G. A., Rowan, M. J., A Feasibility Study of Using Oxygen Enrichment for Fuel Cell Air Independent Propulsion., Department of Defence, Defence Science and Technology Organisation, 1996, Commonwealth of Australia.
- Coombe, H., Nieh, S., Polymer membrane air separation performance for portable oxygen enriched combustion applications., *Energy Conversion and Management*, No. 48, 2007, pp. 1409-1505.
- Cremer, M., Davis, K., Wang, Z., Bool, L., Thompson, D., Kobayashi, H., CFD Evaluation of Oxygen Enhanced Combustion: Impacts on NO_x Emissions, Carbon-In-Flyash and Waterwall corrosion., *Clearwater Conference*, Estados Unidos, 2003.
- Du, J., Axelbaum, R. L., The Effects Of Flame Structure On Extinction Of CH₄-O₂-N₂ Diffusion Flames, Twenty-Sixth Symposium (International) on Combustion., The Combustion Institute, 1996, pp. 1137-1142.
- Ettouney, H. M., El-Dessouky, H. T., Waar W. A., Separation characteristics of air by polysulfone hollow fiber membranes in series, *Journal of Membrane Science*, No. 148, 1998, pp. 105-117.
- Fabiani, C., Bimbi, L., Pizzichini, M., Santarosa, L., Performance of a hollow fiber membrane unit in oxygen-enriched air combustion., *Gas Sep. Purif.*, Vol. 10, No. 1, 1996, pp. 75-79.
- González, J. C., Desarrollo de un sistema de combustión auto-regenerativo con aire enriquecido con oxígeno., Tesis para optar al título de Magister en Ingeniería, Universidad de Antioquia, Facultad de Ingeniería, 2009.
- Gou, C., Cai, R., Guoqiang, Z., An advanced zero emission power cycle with integrated low temperature thermal energy., *Applied Thermal Engineering*, No 26, 2006, pp. 2228-2235.
- Grandmaison, E. W., Poirier, D. J., Boyd, E., Development Of An Oxygen-enriched Furnace System For Reduced CO₂ and NO_x Emissions For The Steel Industry., Final Report, AISI/DOE Technology Roadmap Program, Estados Unidos, 2003.
- Gupta, A. K., Bolz, S., Hasegawa, T., Effect of Air Preheat Temperature and Oxygen Concentration on Flame Structure and Emission., *Journal of Energy Resources Technology*, Vol. 121, 1999, pp. 209-216.
- Ishii, T., Zhang, C., Sugiyama, S., Effects of NO Models on the Prediction of NO Formation in a Regenerative Furnace., *Journal of Energy Resources Technology*, Vol. 122, 2000, pp. 224-228.
- Khare, S. P., Wall, T. F., Farida, A. Z., Liu, Y., Moghtaderi, B., Gupta, R. P., Factors Influencing the Ignition of Flames from Air-Fired Swirl PF Burners Retrofitted to Oxy-Fuel, *Fuel*, 2007.
- Kim, H. K., Kim, Y., Lee, S. M., Ahn, K. Y., NO reduction in 0.03-0.2 MW oxy-fuel combustor using flue gas recirculation technology., *Proceedings of the Combustion Institute*, No 31, 2007, pp. 3377-3384.
- Krishnamurthy, N., Blasiak, W., Lugnet, A., Development of High Temperature Air and Oxy-Fuel combustion technologies for minimized CO₂ and NO_x emissions in Industrial Heating., The Joint International Conference on "Sustainable Energy and Environment (SEE), Hua Hin, Thailand, 2004.
- Krishnamurthy, N., Paul, P. J., Blasiak, W., Studies on low-intensity oxy-fuel burner., *Proceedings of the Combustion Institute*, doi: 10.1016/j.proci.2008.08.011, 2009.
- Lambert, J., Sorin, M., Paris, J., Analysis of Oxygen – Enriched Combustion for Steam Methane Reforming (SMR)., *Energy*, Vol. 22, No. 8, 1997, pp. 817–825.
- Lille, S., Dobski, T., Blasiak, W., Visualization of Fuel Jet in Conditions of Highly Preheated Air Combustion., *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 16, No. 4, 2000, pp. 595-600.
- Nagesha N., Balachandra, P., Barriers to energy efficiency in small industry clusters: Multi-criteria-based prioritization using the analytic hierarchy process., *Energy*, Vol. 31, 2006, pp. 1969-1983.
- Nieckele, A., Naccache, M., Gomes, M., Numerical Modeling of an Industrial Aluminum Melting Furnace., *Journal of Energy Resources Technology*, Vol. 126, 2004, pp. 72-81.
- Niwa, M., Yamazaki, K., Murakami, Y., Separation of Oxygen and Nitrogen Due to the Controlled Pore-Opening Size of Chemical Vapor Deposited Zeolite A., *Industrial and Engineering Chemical Research*, Vol. 30, No. 1, 1991, pp. 38-42.
- North American Mfg Co., North American Combustion Handbook, Volume II, Third edition, North American Mfg Co. (ed), Estados Unidos, 1997, 457p.
- Önüt, S., Soner, S., Analysis of energy use and efficiency in Turkish manufacturing sector SMEs., *Energy Conversion & Management*, Vol. 48, 2007, pp. 384-394.
- Poirier, D., Grandmaison, E. W., Lawrence, A. D., Matovic, M. D., Boyd, E., Oxygen Enriched Combustion Studies with the Low NO_x CGRI Burner, *IFRF Combustion Journal*, 2004, Article No. 200404.
- Rafidi, N., Thermodynamic aspects and heat transfer characteristics of HiTAC furnaces with regenerators., Tesis presentada al Royal Institute of Technology, para optar al título de Doctor of Philosophy, 2005.
- Rafidi, N., Blasiak, W., Jewartowski, M., Szewczyk, D., Increase of the effective energy from radiant tube equipped with regeneration system in comparison with conventional recuperative system., *IFRF Combustion Journal*, 2005, Article Number 200503.
- Remie, M. J., Cremers, M. F. G., Schreel K. R. A. M., de Goey, L. P. H., Flame jet properties of Bunsen-type flames, *Combustion and Flame*, No. 147, 2006, pp. 163-170.
- Rena, J. Y., Fanb, Y., Egolfopoulou, F. N., Tsotsis, T. T., Membrane-based reactive separations for power generation applications: oxygen lancing., *Chemical Engineering Science*, No. 58, 2003, pp. 1043 – 1052.
- Sanz, W., Jericha, H., Bauer, B., Göttlich E., Qualitative and Quantitative Comparison of Two Promising Oxy-Fuel Power Cycles for CO₂ Capture., *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 130, 2008.
- Sanz, W., Jericha, H., Moser, M., Heitmeir, F., Thermodynamic and Economic Investigation of an Improved Graz Cycle Power Plant for CO₂ Capture., *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 127, 2005, pp. 765-772.
- Shi, H., Peng, S. Z., Liu, Y., Zhong, P., Barriers to the implementation of cleaner production in Chinese SMEs: government, industry and expert stakeholders' perspectives., *Journal of Cleaner Production*, Vol. 16, 2008, pp 842–852.
- Store, K., Poola, R., Membrane-Based Air Composition Control for Light-Duty Diesel Vehicles: A Benefit and Cost Assessment, Technical memo., Center for Transportation Research, Energy

- Systems Division, Argonne National Laboratory, United States Department of Energy – USDOE –, 1998, Estados Unidos.
- Sunderland, P. B., Urban, D. L., Stocker, D. P., Chao, B. H., Axelbaum, R. L., Sooting Limits of Diffusion Flames with Oxygen-enriched Air and Diluted Fuel., Seventh International Combustion Workshop, 2003, Cleveland, Estados Unidos.
- Tajuddin, R. M., Ismail, A. F., Salim, M. R., Oxygen enriched air using membrane for palm oil wastewater treatment., Songklanakarin J. Sci. Technol., No. 24, 2002, pp. 989-998.
- Vega, E. V., Shin, S. S. y Lee, K. Y., NO emission of oxygen-enriched $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{N}_2$ premixed flames under electric field., Fuel, No 86, 2007, pp. 512-519.
- Vesterberg, P., Ritzén, O., von Schéele, J., Rigobello, G., Utilização do processo oxi-combustível em fornos de reaquecimento e recozimento para o aumento da produção e redução do consumo de combustível – tecnologia & resultados industriais., 43º Seminário de Laminação – Processos, Produtos Laminados e Revestidos, Curitiba, Brasil, 2006.