

Revisión de la combustión con aire enriquecido con oxígeno como estrategia para incrementar la eficiencia energética¹

Revision of Combustion with oxygen-enriched air as a strategy to increase energy efficiency²

Revisão da combustão com ar enriquecido com oxigênio como uma estratégia para incrementar a eficiência energética³

Karen Paola Cacua-Madero⁴

Bernardo Argemiro Herrera-Múnera⁵

SICI: 0123-2126(201307)17:2<463:RCAEOE>2.0.TX;2-J

¹ Fecha de recepción: 12 de octubre de 2012. Fecha de aceptación: 4 de junio de 2013. Este artículo se deriva de un proyecto de investigación denominado "Sistemas de trigeneración para operaciones de secado y producción de frío en zonas agrícolas no interconectadas", código: P12207, desarrollado por el grupo de investigación Materiales Avanzados y Energía. Instituto Tecnológico Metropolitano de Medellín, Colombia.

² Received: October 12, 2012. Accepted: June 4, 2013. This article is derived from a research project called "Trigeneration systems for drying operations and cold production in agricultural areas that are not interconnected", code: P12207. Developed by the research group of Advanced Materials and Energy. Instituto Tecnológico Metropolitano de Medellín, Colombia.

³ Data de recebimento: 12 de outubro de 2012. Data de aceitação: 4 de junho de 2013. Este artigo é derivado de um projeto de pesquisa intitulado "Sistemas de trigeração para operações de secado e produção de frio em zonas agrícolas não interconectadas", código: P12207. Desenvolvido pelo grupo de pesquisa Materiais Avançados e Energia. Instituto Tecnológico Metropolitano de Medellín, Colômbia.

⁴ Ingeniera química de la Universidad Industrial de Santander. Magíster en Ingeniería de la Universidad de Antioquia. Docente investigador del Instituto Tecnológico Metropolitano, Medellín, Colombia. Correo electrónico: karencacua@itm.edu.co.

⁵ Ingeniero químico de la Universidad Nacional, sede Medellín. Magíster en Ingeniería, de la Universidad de Antioquia. Docente investigador del Instituto Tecnológico Metropolitano, Medellín, Colombia. Correo electrónico: bernardoherrera@itm.edu.co.

Resumen

Entre las alternativas disponibles para incrementar la eficiencia energética en procesos de combustión se encuentra la combustión con aire enriquecido con oxígeno, la cual consiste en aumentar la concentración de oxígeno en el aire atmosférico hasta llegar a niveles de hasta el 100%. En el presente estudio se realiza una revisión de la fenomenología del proceso de combustión con aire enriquecido, haciendo énfasis en aspectos termodinámicos, químicos y cinéticos. Así mismo, se presentan los métodos de obtención de aire enriquecido con oxígeno más aplicados hasta el momento, como la adsorción por presiones oscilantes en tamices moleculares y destilación criogénica, y los que se encuentran en estado de desarrollo, como las membranas de separación. Finalmente, se revisan las aplicaciones más comunes de la combustión con aire enriquecido, como procesos industriales de alta temperatura, captura y secuestro de CO₂, y motores de combustión interna, al igual que los avances en investigación respecto a este tema en Colombia.

Palabras clave

Combustión con aire enriquecido, eficiencia energética, alta temperatura, membranas.

Abstract

Among the available alternatives for increasing the energy efficiency in combustion processes there is the combustion with oxygen-enriched air, which consists in increasing the concentration of oxygen in the atmospheric air to reach levels of up to 100%. This study is a review of the phenomenology of the combustion process with enriched air, with emphasis on thermodynamic aspects, chemical and kinetic. Likewise, we present the methods for obtaining the oxygen enriched air more applied so far, such as the oscillating pressure adsorption in molecular sieves and cryogenic distillation, and those that are in a state of development, such as the separation membranes. Finally, we review the most common applications of combustion with enriched air, such as high-temperature industrial processes, CO₂ capture and sequestration, and internal combustion engines, as well as research advances on this issue in Colombia.

Keywords

Combustion with enriched air, energy efficiency, high temperature membranes.

Resumo

Entre as alternativas disponíveis para incrementar a eficiência energética dos processos de combustão encontra-se a combustão com ar enriquecido com oxigênio, que consiste em aumentar a concentração de oxigênio no ar atmosférico até alcançar níveis de até 100%. No presente estudo realiza-se uma revisão da fenomenologia do processo de combustão com ar enriquecido, fazendo ênfase em aspectos termodinâmicos, químicos e cinéticos. Mesmo assim, apresentam-se os métodos de obtenção de ar enriquecido com oxigênio mais aplicados até hoje, como a adsorção por pressões oscilantes em crivos moleculares e destilação criogênica, e os que encontram-se em estado de desenvolvimento, tais como membranas de separação. Finalmente, se revem as aplicações mais comuns da combustão com ar enriquecido, tais como processos industriais de alta temperatura, captura e sequestro de CO₂, e motores de combustão interna, ao igual que os avanços em pesquisa no que diz respeito deste tema na Colômbia.

Palavras-chave

Combustão com ar enriquecido, eficiência energética, alta temperatura, membranas.

1. Introducción

El aire enriquecido con oxígeno es una de las técnicas más prometedoras para incrementar la eficiencia de los procesos de combustión y de transferencia de calor (Zhou *et al.*, 2011). Entre las ventajas de utilizar aire enriquecido con oxígeno se encuentran los ahorros de combustible de hasta el 15%, las reducciones en las emisiones de CO₂ de hasta el 25% y los incrementos en la eficiencia energética de hasta el 20%, como resultado de reducciones en la temperatura de ignición, aceleramiento de la combustión, incrementos en la temperatura de combustión, mejor transferencia de calor y menores pérdidas de energía en los gases de combustión (Li y Fan, 2012). Esta técnica es aplicable a escala industrial en un amplio rango de operaciones, que incluye hornos, calderas, estufas, motores de combustión interna y plantas de generación de energía eléctrica (Baukal, 1998; Lin, 2011).

Existen experiencias en las que se han obtenido notables beneficios energéticos con la técnica de enriquecimiento de aire con oxígeno para procesos de combustión, por ejemplo en Japón, donde se han alcanzado ahorros energéticos de hasta el 26,7% usando aire con el 23% de oxígeno en hornos de cúpula; o en Estados Unidos, donde se ha utilizado el 23-24% de oxígeno en el aire para hornos de fundición, obteniendo ahorros de combustible de hasta el 26,7% (Li y Wang, 2003). En China, la planta de acero de Wuhan ha logrado ahorros de hasta 420.000 toneladas de carbón al año con esta técnica de combustión (Yang y Deng *et al.*, 2011).

La técnica de enriquecimiento de aire con oxígeno también presenta ventajas ambientales significativas, por ejemplo la captura de dióxido de carbono (Toftegaard *et al.*, 2010; Daood *et al.*, 2011; Zhou *et al.*, 2011), la reducción de emisiones de NO_x por debajo de los niveles de quemadores de bajo NO_x (Zhou y Foucher, *et al.*, 2011) y la disminución en la formación de hollín (Wang *et al.*, 2005; Skeen *et al.*, 2010). Estos efectos se deben a que el incremento en la concentración de oxígeno en el aire de combustión afecta la cinética química,

la termodinámica, la transferencia de calor, la tasa de calentamiento y la temperatura de llama (Coombe y Nieh, 2007).

Dada la importancia de dicha técnica, este artículo presenta una revisión de los avances más recientes en el estudio de la fenomenología del proceso de combustión con aire enriquecido con oxígeno, considerando los diferentes métodos de obtención del oxígeno y destacando las aplicaciones y tendencias más importantes de esta técnica a escala mundial y en Colombia. La revisión se basa en el análisis de las contribuciones de distintos autores en bases de datos internacionales arbitradas en los últimos años, así como de algunos trabajos clásicos sobre el estudio de la combustión con aire enriquecido con oxígeno.

2. Metodología

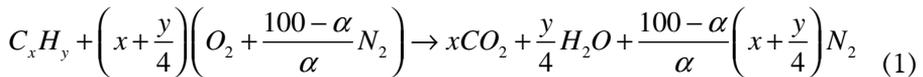
Para la realización de esta revisión se consultaron bases de datos internacionales, como Science Direct, American Chemical Society (ACS), Society of Automotive Engineers (SAE), Wiley InterScience y Scielo, utilizando los siguientes términos de búsqueda: aire enriquecido con oxígeno, separación de aire, métodos de separación de aire, combustión de alta temperatura, combustión *oxyfuel* y oxicombustión. La mayoría de artículos se seleccionaron teniendo en cuenta su actualidad en los aportes al conocimiento de la combustión con aire enriquecido y sus aplicaciones, aunque también se incluyeron publicaciones y revisiones clásicas que sentaron las bases para muchas de estas aplicaciones. En este artículo se realizó una clasificación por temáticas, cubriendo desde la fenomenología del proceso de combustión con aire enriquecido, tecnologías de separación de aire y finalmente las principales aplicaciones de esta técnica de combustión. Posterior a la revisión exhaustiva de cada publicación, se procedió a relacionar las ideas similares y contradictorias entre distintos investigadores, además de los aportes de los autores de este artículo provenientes de su experiencia en dichas temáticas, para, finalmente, ofrecer una visión crítica de los beneficios y debilidades de la aplicación de la combustión con aire enriquecido con oxígeno.

3. Características fenomenológicas de la combustión con aire enriquecido

La combustión con aire enriquecido hace referencia al uso de concentraciones de oxígeno superiores al 21% en el oxidante de un proceso de combustión. La elevada temperatura de llama que se genera en la combustión con aire enriquecido (Skeen *et al.*, 2009) es una característica que se aprovecha en aplicaciones industriales de alta temperatura, como la fusión de materiales, y reacciones de descomposición térmica y sinterización, entre las que se destacan la fusión de vidrio

y la producción de cemento, acero, metales ferrosos y aluminio, con aumentos de producción entre el 15 y 65%, y aumentos en eficiencia de combustión entre el 10 y 30% (Daood *et al.*, 2011).

El incremento en la concentración de oxígeno ocasiona cambios termodinámicos en el proceso de combustión que pueden ser explicados por medio de la ecuación 1, la cual corresponde a la combustión con aire enriquecido con oxígeno de un hidrocarburo de composición general C_xH_y :



Donde α es el porcentaje en volumen del oxígeno en el aire. A partir de la ecuación 1 puede notarse que el incremento en la concentración de oxígeno en los reactivos conlleva una disminución de nitrógeno y, por lo tanto, el calor específico de los productos de combustión disminuye, permitiendo un incremento en su temperatura adiabática; este aumento de temperatura supera el efecto de la disminución del calor específico, y el efecto neto es un incremento en la entalpía específica de los productos de combustión, con lo que se obtiene mayor calor disponible en los procesos donde es aplicado. Este efecto ha sido analizado por Cacia *et al.* (2012), mediante simulación numérica en el *software* CHEMKIN, para la combustión con aire enriquecido hasta una concentración del 35% de oxígeno, con un combustible de bajo poder calorífico como el biogás, que logra una temperatura máxima de 2.846 K. Esta, comparada con los 2.174 K de la combustión con aire atmosférico, permitiría un alto aprovechamiento energético de este combustible renovable derivado de la biomasa.

También la cinética química de la combustión se afecta al aumentar la concentración de oxígeno en el aire, ya que desde el punto de vista de la teoría cinética de gases, la sustracción de nitrógeno disminuye la energía de activación y permite una mayor cantidad de colisiones entre las moléculas de oxidante y combustible en la unidad de tiempo, aumentando de esta manera la velocidad de reacción y disminuyendo la energía necesaria para que se activen las reacciones de cadena que inician la propagación y autosostenimiento de la combustión. Adicionalmente, el incremento en la velocidad de deflagración se atribuye al aumento de radicales clave en el mecanismo de reacción, por ejemplo O, OH, CO, como consecuencia de una mayor presencia de oxígeno. Esto último se debe a que la oxidación a alta temperatura de todos los hidrocarburos es particularmente sensible a la principal reacción de ramificación: $H + O_2 \rightarrow OH + O$,

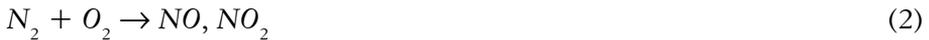
principal camino de consumo de oxígeno y de producción de radicales OH y O en un proceso de combustión (Quin *et al.*, 2000).

Además, este tipo de combustión contribuye al aumento de la eficiencia térmica y la disminución de emisiones contaminantes, dando origen a llamas con alta estabilidad, incrementando así el tiempo de residencia en las zonas de reacción y mejorando la reactividad de los combustibles gaseosos, líquidos y sólidos, que incluye biomasa residual de procesos agroindustriales (Baukal, 1998; Nimmo y Daood *et al.*, 2010). En este sentido, usando niveles de enriquecimiento relativamente bajos (entre 21 y 30% de O₂ en el aire), se puede aumentar la tasa de calentamiento hasta en un 54%, reducir el consumo de combustible en un 26% (Wu *et al.*, 2010) e incluso disminuir las dimensiones de los equipos térmicos (Krzywanski *et al.*, 2010; Duan *et al.*, 2011).

Esto último se debe a que en la combustión con aire enriquecido se presentan cambios en los mecanismos de transferencia de calor hacia la carga debido al incremento de la temperatura de la llama y la concentración de moléculas, como CO₂, H₂O, CO, SO₂, las cuales aumentan la emisividad de los gases y la transferencia de calor por radiación (Toftegaard, Brix y Jensen, 2010). Dicho aumento también está asociado con la tendencia a la formación de hollín debido a la alta temperatura, que incrementa tanto la luminosidad como la radiación de la llama (Bandeira *et al.*, 2011), aunque la mayor concentración de oxígeno favorece la oxidación del hollín formado (Wang *et al.*, 2005). Al mismo tiempo, la transferencia de calor por convección disminuye debido a la reducción en el volumen de los gases de combustión (Wang *et al.*, 2005), dando origen a una distribución no uniforme de la temperatura cuando los niveles de enriquecimiento son altos (Wu *et al.*, 2010). Estos dos fenómenos deben considerarse cuidadosamente para las reconversiones de hornos y calderas, ya que pueden disminuir la eficiencia térmica, por la modificación de la relación de áreas de convección y radiación (Tan, Corragio y Santos, 2005).

La combustión con aire enriquecido tiene distintos efectos sobre la producción de NO_x, dependiendo del nivel de enriquecimiento y los mecanismos para llevarlo a cabo. En principio, la baja concentración de N₂ en el comburente reduce la formación de NO_x mediante el mecanismo térmico (Croiset y Thambimuthu, 2001). Sin embargo, algunos reportes han mostrado que las emisiones de NO_x se incrementaron entre un 40% (Nimmo *et al.*, 2010) y hasta 4,4 veces (Wu *et al.*, 2010), debido al aumento significativo de la temperatura de llama, sobre todo cuando los niveles de enriquecimiento son bajos (Yap *et al.*, 1998); pero si el enriquecimiento es mayor al 40%, las emisiones de NO_x disminuyen, a pesar del

aumento de temperatura (Nimmo *et al.*, 2010). Este comportamiento se debe a que los NO_x formados por el mecanismo térmico presentan un aumento exponencial al aumentar la temperatura por encima de los 1.400 K. Por lo tanto, bajos niveles de enriquecimiento favorecen la formación de NO_x , debido al aumento de la temperatura. Sin embargo, cuando los niveles de enriquecimiento son mayores, la formación de NO_x decrece, porque la disminución de nitrógeno hace que esté menos disponible para completar la siguiente reacción química (Baukal, 1998):



Por otra parte, si el oxígeno para el enriquecimiento se introduce por etapas, se puede lograr la reducción en la formación de NO_x entre un 30 y 70% (Daood *et al.*, 2011).

4. Métodos de separación de aire

La tecnología de producción de oxígeno es un aspecto clave en la utilización de aire enriquecido en los procesos de combustión, pues su costo, el cual depende de su consumo energético, influye en la eficiencia energética global y la viabilidad económica de los procesos, haciendo que la investigación en este tipo de tecnologías haya estado direccionada hacia la obtención de tecnologías más eficientes energéticamente, optimizando los procesos de separación individualmente (Kansha, Kishimoto y Nakagawa, 2011; Rizk, Nemer y Clodic, 2012) y combinando las diferentes tecnologías de separación de aire (Burdyny y Struchtrup, 2010; Akinlabi, Gerogiorgis y Georgiadis, 2007).

Una de las principales limitaciones para aplicar la técnica de enriquecimiento de aire con oxígeno en los procesos de combustión ha sido el costo de producción del oxígeno a partir del aire atmosférico (Qiu y Hayden, 2009; Li y Fan, 2012). Las tecnologías actuales para separación de aire incluyen la destilación criogénica, la adsorción a temperatura ambiente y la separación por membranas; sin embargo, la elección de la tecnología apropiada depende de la escala de producción y la concentración final de oxígeno requerido (Kansha, Kishimoto y Nakagawa, 2011).

La destilación criogénica permite obtener purezas de oxígeno mayores al 99% O_2 y es la tecnología utilizada a gran escala (> 100 ton/día), debido a que las otras tecnologías no son competitivas en estas magnitudes de producción de oxígeno (Tranier, Dubettier y Darde, 2011). El funcionamiento de esta tecnología está basado en la diferencia en el punto de ebullición de los gases que componen el

aire, y sus requerimientos energéticos son altos debido principalmente a las altas presiones para la separación del aire (Rizk, Nemer y Clodic, 2012). Los principales usuarios de esta tecnología son las industrias químicas, de acero y de petróleo (Zhu y Legg *et al.*, 2011). Se estima que para la producción de miles de toneladas de oxígeno utilizado en los procesos de oxicomustión el consumo energético está entre 220 y 245 kWh/ton de O₂, mientras que para la producción de entre 500 y 1.000 toneladas, el trabajo requerido está entre 340 y 280 kWh/ton de O₂ (Burdyny y Struchtrup, 2010).

Debido a estos altos costos, se han propuesto alternativas al proceso convencional, entre las que se encuentran la autorrecuperación de calor, que permite disminuciones energéticas de más del 36% (Kansha y Kishimoto *et al.*, 2011) y el uso de compresores con mayor eficiencia, y procesos de multitorre, que reducen los consumos energéticos hasta 140 kWh/ton de O₂ (Tranier y Dubettier *et al.*, 2011).

Por su parte, la adsorción a temperatura ambiente requiere adsorbentes naturales y sintéticos, entre los que se encuentran las zeolitas, que adsorben nitrógeno y dejan pasar el oxígeno, permitiendo obtener purezas de O₂ hasta el 95%; es utilizada a mediana y gran escalas (20-100 ton/día) (Mofarahi y Towfighi *et al.*, 2009), con unos costos de producción de entre USD 40-60/ton de O₂ (Lin, 2011). Esta tecnología puede ser de *adsorción por presiones oscilantes* o por *temperaturas oscilantes* (PSA o TSA, por sus siglas en inglés), según las condiciones de trabajo, por diferencial de presión o por diferencial de temperatura. Para mejorar los porcentajes de separación se han realizado combinaciones de esta tecnología con la tecnología de membranas poliméricas, y se han logrado incrementos en la concentración de oxígeno de hasta el 98% (Akinlabi y Gerogiorgis *et al.*, 2007; Staiger, Vaughn *et al.*, 2011).

En el caso de las membranas de separación se tienen dos categorías: las membranas poliméricas y las de intercambio iónico. En las membranas poliméricas se hace pasar aire a través de una membrana permeable utilizando un diferencial de presión, donde el oxígeno es permeado a través de la membrana y el nitrógeno pasa a través de esta, teniendo al final del proceso dos corrientes, una rica en oxígeno y otra rica en nitrógeno (Burdyny y Struchtrup, 2010); ello permite obtener concentraciones de hasta el 60% de oxígeno en el aire. Este tipo de membranas son competitivas en términos de costo y consumo energético frente a otras tecnologías cuando se requiere enriquecimiento de aire con oxígeno a bajas concentraciones (Meriläinen y Seppälä *et al.*, 2012). Por su parte, las membranas de intercambio iónico son una tecnología relativamente nueva,

que permite purezas de hasta el 100% de O₂, debido a que poseen una selectividad teórica al oxígeno infinita (Liang y Jiang *et al.*, 2010) y son utilizadas a gran escala a temperaturas entre 800 y 900 °C; sin embargo, aún siguen siendo objeto de estudio, principalmente para la producción de oxígeno a gran escala en aplicaciones de conversión de hidrocarburos gaseosos y sólidos a hidrocarburos líquidos, así como en procesos de oxidación en general (Inge Dahl y Fontaine *et al.*, 2011).

5. Aplicaciones de la combustión con aire enriquecido con oxígeno

Desde 1990 se identificaron como candidatos para la aplicación de la técnica de combustión con aire enriquecido los procesos de alta temperatura (> 1400 K), con bajas eficiencias térmicas, altas emisiones contaminantes y limitaciones en los gases de combustión (Wright y Copeland, 1990). A escala mundial, las aplicaciones de la técnica de aire enriquecido con oxígeno se han ampliado a través de los años y abarcan aplicaciones tan diversas como calderas (Krzywanski *et al.*, 2010; Duan *et al.*, 2011), incineración de residuos (Chin *et al.*, 2008, Melo *et al.*, 1998), motores de combustión interna (Zhou *et al.*, 2011b; Cagua *et al.*, 2012), combustión de biomasa (Yu *et al.*, 2010; Nimmo *et al.*, 2010), generación eléctrica (Buhre *et al.*, 2005), hornos (recalentamiento, fusión, caliza, cúpula, entre otros) y utilización de gases de bajo poder calorífico (Yang y Deng *et al.*, 2011). A continuación se muestran algunas de las aplicaciones más importantes.

5.1. Procesos industriales de alta temperatura

La utilización de procesos de combustión con aire enriquecido con oxígeno en los procesos industriales de alta temperatura se ha extendido a sectores como la producción de acero, vidrio y cemento (Daood *et al.*, 2011), fusión de metales (Skeen *et al.*, 2009) y calderas supercríticas (Jankes y Stanojević *et al.*, 2003; Horbaniuc y Marin *et al.*, 2004).

Por ejemplo, en hornos de laminación de acero se ha logrado una reducción de hasta $5,9 \times 10^6$ m³ de gas natural al año usando niveles de enriquecimiento hasta el 60% (Karimi y Saidi, 2010), mientras que en hornos de gas natural la aplicación de aire enriquecido con oxígeno hasta 30% de O₂ con membranas poliméricas permite ahorros de combustible hasta del 18%, con temperaturas de horno de 1644 K y de hasta el 32% con temperaturas de 1.922 K (Lin, 2011).

También, algunos procesos de calentamiento infrarrojo, como el secado y acabado de papel, secado de textiles, curado de pinturas y procesamiento de polímeros, usan combustión con aire enriquecido por medio de quemadores

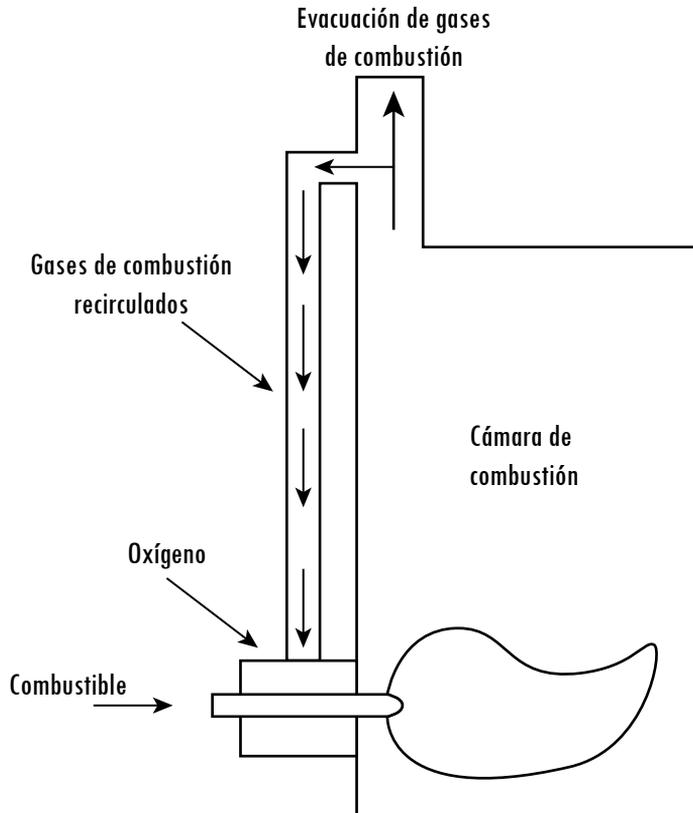
porosos, en los que un enriquecimiento de hasta el 28% de O₂ en el aire puede generar un ahorro de 22 a 28% de gas natural (Qiu y Hayden, 2009). Por otra parte, en la industria del cemento, que consume entre el 12 y el 15% de la energía total de la industria (Madloul *et al.*, 2011), el alto índice de emisiones de CO₂ ha convertido la combustión con aire enriquecido en una alternativa efectiva para mitigar este efecto, donde esta técnica combinada con recuperación de calor, reducción en la ventilación y aprovechamiento de la transferencia de calor por radiación puede aumentar la eficiencia térmica por encima del 70% (Zeman, 2009) y favorecer el uso de combustibles alternativos en esta industria (Schneider *et al.*, 2011).

5.2. Captura y secuestro de CO₂

En la actualidad, existen tres tipos de tecnologías para separación y secuestro de CO₂: absorción química, separación por membranas y adsorción a alta presión, las cuales tienen un costo promedio de separación entre 19 y 78 US\$ por tonelada de CO₂ (Schneider *et al.*, 2011; Yang *et al.*, 2011). En el caso de las membranas selectivas, si se acoplan con la combustión con aire enriquecido puede llegar a reducir el consumo energético de separación en un 35%, con porcentajes de enriquecimiento de aire con oxígeno entre el 40 y 60% (Favre y Bounaceur *et al.*, 2009). Estos costos pueden reducirse aún más si se disminuye la cantidad de nitrógeno en los productos de combustión, o en otras palabras, se aumenta la concentración de CO₂ en estos (Daood *et al.*, 2011). Bajo estas condiciones de alta concentración, el costo energético promedio para captura y secuestro de CO₂ oscila alrededor de 110-170 kWh/ton de CO₂ recuperado (Dechamps y Pilavachi, 2004).

La combustión oxicomcombustible es una técnica que ha sido explorada en los últimos años para reducir costos en la separación de CO₂ (Khare *et al.*, 2008; Toftegaard *et al.*, 2010; Duan *et al.*, 2011; Stadler *et al.*, 2011). En este tipo de combustión, el oxígeno es mezclado directamente con gases de combustión recirculados en lugar de aire atmosférico, como se muestra en la figura 1. Con la combustión oxicomcombustible se pueden alcanzar concentraciones de CO₂ hasta el 95% en los productos y bajas emisiones de otras especies contaminantes, sin aumentar significativamente las temperaturas del proceso, aun cuando la concentración de oxígeno en el comburente alcanza el 32% y la recirculación de gases de combustión es del 70% (Buhre *et al.*, 2005). Además, en la combustión oxicomcombustible existe una redistribución de la radiación que da origen a llamas más cortas (Ditaranto *et al.*, 2011) y una desaceleración de la velocidad de llama por cuenta de la recirculación de vapor de agua (Mazas *et al.*, 2011).

Figura 1. Esquema de operación de la combustión oxicomcombustible



Fuente: presentación propia de los autores.

La combustión oxicomcombustible ofrece otras ventajas, como la utilización de quemadores instalados sin necesidad de reingeniería y reducción del volumen de los hornos hasta en un 38% (Saastamoinen *et al.*, 2006), desulfuración de los gases de combustión por la alta concentración de CO_2 (Chen y Zhao *et al.*, 2007), disminución neta de emisiones de CO_2 si se hace combustión de biomasa o cocombustión de biomasa y carbón (Duan y Zhao *et al.*, 2011), y reducción de emisiones de NO_x a menos de un tercio de las emisiones presentes en la combustión con aire atmosférico (Wall, 2007). Sin embargo, la implementación de la combustión oxicomcombustible en plantas existentes exige algunas adecuaciones, como la instalación de dispositivos de producción de O_2 y equipos para la recirculación de gases, por lo que esta tecnología es más susceptible de aplicarse en plantas nuevas (Schneider *et al.*, 2011).

5.3. Motores de combustión interna

Entre los beneficios encontrados al utilizar aire enriquecido con oxígeno en motores de combustión interna se encuentran incrementos en el rendimiento, utilización de combustibles de bajo poder calorífico, disminución de emisiones de hidrocarburos sin quemar, monóxido de carbono y material particulado. Sin embargo, el incremento en las emisiones de óxidos de nitrógeno como consecuencia de las altas temperaturas obtenidas en la cámara de combustión del motor ha constituido una de las principales limitaciones para su implementación (Wu y Huang, 2007; Zhou y Cordier *et al.*, 2011b).

Los estudios con enriquecimiento de aire con oxígeno en motores de combustión interna han sido realizados en su mayoría por el Argonne National Laboratory (ANL) de los Estados Unidos, quienes por medio de sus investigaciones lograron demostrar la efectividad de esta técnica de enriquecimiento a través de membranas poliméricas en la reducción de hasta el 60% en las emisiones de material particulado, incrementos en la densidad de potencia de hasta el 20%, disminuciones en el consumo específico y en las emisiones de CO e hidrocarburos sin quemar (Poola y Sekar, 1997; Song y Zello *et al.*, 2004). Otros autores han mostrado que el enriquecimiento de aire con oxígeno en motores de encendido provocado permite disminuir las emisiones de CO e hidrocarburos, así como incrementos en la potencia efectiva para todo el rango de operación (Kajitani y Clasen *et al.*, 1993; Jiangwei y Chunling *et al.*, 2011).

A pesar de los beneficios del enriquecimiento de aire con oxígeno en motores de combustión interna, las altas emisiones de NO_x siguen siendo un problema por resolver para cumplir con los estándares ambientales internacionales. Entre las alternativas de reducción de emisiones de NO_x se encuentran la optimización de la concentración máxima utilizando fracciones menores al 24% de O_2 en el aire en motores diesel (Subramanian y Ramesh, 2001); el uso de concentraciones de oxígeno entre el 23 y 25% de O_2 en motores de encendido provocado, (Chunling y Jiangwe *et al.*, 2011); la emulsificación de combustibles con agua y concentraciones de oxígeno de hasta el 25% en el aire, con lo cual se obtienen mejoras en la eficiencia térmica (Subramanian y Ramesh, 2001); la recirculación de gases de combustión y enriquecimiento de hasta el 25% de O_2 (Hountalas y Raptotasios *et al.*, 2012); el aire enriquecido con oxígeno y nitrógeno introducido selectivamente en el ducto de admisión del motor para disminuir las emisiones de material particulado (Sekar y Poola *et al.*, 1997; Davidson, 2006); y la inyección dividida (inyección de diesel por pulsos a diferentes ángulos del cigüeñal) y recirculación

de gases con enriquecimiento de oxígeno en el aire del 23% (Nguyen y Sung *et al.*, 2011).

Recientemente, Cagua *et al.* (2012) utilizaron la técnica de enriquecimiento en un motor diesel estacionario funcionando en modo dual diesel-biogás; se encontraron incrementos en la eficiencia térmica y disminuciones en las emisiones de CO y CH₄, con porcentajes de enriquecimiento con oxígeno en el aire de hasta el 27%, ampliando el espectro de aplicación de esta técnica. Sin embargo, las principales dificultades para aplicar la técnica de enriquecimiento de aire con oxígeno son la utilización de dispositivos de separación de aire que puedan ser fácilmente incorporados en vehículos y las emisiones de NO_x; aunque existen patentes (Sekar y Poola *et al.*, 1997; Davidson, 2006) que solucionan estos inconvenientes, su aplicación no ha sido comercialmente implementada.

6. Combustión con aire enriquecido con oxígeno en Colombia

En Colombia es factible la inyección de oxígeno para los procesos de combustión con distintos niveles de enriquecimiento en industrias de alta temperatura, como el sector cemento, vidrio, cerámicos y plantas termoeléctricas. No obstante, el país todavía no cuenta con una tecnología madura a escala industrial para llevar a cabo la combustión con aire enriquecido, lo cual se debe a los siguientes factores: 1. no existe la suficiente articulación entre la academia y la industria para lograr transferir de forma exitosa los resultados de investigación existentes. 2. Muchas empresas usan oxígeno industrial criogénico, lo cual aumenta el costo del proceso. Sin embargo, hay que destacar que en los últimos años se ha venido dando una migración hacia el desarrollo de sistemas integrados con generación criogénica de O₂ *in-situ*. 3. Desconocimiento de la aplicación de membranas poliméricas para el enriquecimiento del aire. 4. Muchos de los procesos se hacen de manera ineficiente y se necesitan recambios de materiales en cortos periodos, lo cual aumenta los costos de operación.

Algunos avances se han dado desde el 2006, cuando empresas del sector cerámico adoptaron la tecnología de combustión de gas natural y oxígeno puro para hornos rotatorios, en el marco del convenio de cooperación de producción más limpia conformado por el Área Metropolitana y empresas del sur del Valle de Aburrá (Antioquia) (Vega, 2006). Además, algunos grupos de investigación del país han adelantado proyectos relacionados con la combustión con aire enriquecido en los últimos años, los cuales se resumen en la tabla 1. Estas investigaciones han mostrado que es posible utilizar aire enriquecido con oxígeno en motores duales diesel-biogás para mejorar su eficiencia térmica (Cagua *et al.*, 2012); además,

se ha mostrado que el enriquecimiento del aire con oxígeno mejora la eficiencia de operación en la combustión sin llama y en procesos de alta temperatura, como la fusión de metales no ferrosos (González *et al.*, 2009). Sin embargo, el éxito de estas aplicaciones depende del desarrollo de materiales con alta resistencia a los ataques de corrosión y fractura en alta temperatura.

Tabla 1. Proyectos de investigación en Colombia relacionados con la combustión con aire enriquecido

Proyecto	Entidades participantes	Fuente
Análisis comparativo de parámetros de combustión de carbón en un proceso convencional y de oxidación en lecho fluidizado	<ul style="list-style-type: none"> Universidad Nacional de Colombia Argos S.A 	Grupo Termodinámica Avanzada y Energías Alternativas (TAYEA)
Mecanismos para la formación de NO _x en sistemas de oxidación	<ul style="list-style-type: none"> Universidad de Antioquia 	Grupo Química de Recursos Energéticos y Medio Ambiente, (Quirema)
Optimización de la operación de motores duales diesel-biogás para la generación de electricidad en el piso térmico colombiano	<ul style="list-style-type: none"> Universidad de Antioquia Colciencias 	Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Eficiente y Racional de la Energía (Gasure)
Desarrollo de un horno de combustión sin llama con enriquecimiento de aire con oxígeno	<ul style="list-style-type: none"> Universidad de Antioquia Colciencias 	Gasure
Características de la combustión con aire enriquecido con oxígeno y perspectivas de aplicación en Pymes con procesos de alta temperatura	<ul style="list-style-type: none"> Universidad de Antioquia EPM 	González <i>et al.</i> , 2009
Efecto del CO ₂ en la velocidad de combustión de semicoques de carbón en aplicaciones de oxidación	<ul style="list-style-type: none"> Universidad Nacional de Colombia 	Molina & Shaddix, 2007

Fuente: presentación propia de los autores.

Recientemente, el Grupo de Materiales Avanzados y Energía del Instituto Tecnológico Metropolitano realizó un estudio de un horno rotatorio para producción de materiales cerámicos que operaba con oxígeno criogénico al 100%. Dicho estudio permitió optimizar la operación del horno con un enriquecimiento de tan solo el 31% de O₂ en el comburente, disminuyendo significativamente los costos de producción. Estos resultados están en proceso de publicación.

7. Conclusiones

La combustión con aire enriquecido ha demostrado ser una técnica eficiente de aprovechamiento de la energía de combustibles fósiles y alternativos de bajo poder calorífico. Esta técnica genera cambios considerables en los fenómenos cinéticos y termodinámicos de la combustión, los cuales repercuten en la variación de los patrones de transferencia de calor y formación de especies químicas contaminantes.

Actualmente existen distintas tecnologías para la producción del oxígeno que se emplea en la combustión con aire enriquecido, a partir de la separación de aire; la destilación criogénica es la tecnología más madura. Sin embargo, las membranas poliméricas para separación de aire representan la mejor opción para el enriquecimiento a bajas concentraciones de O_2 a mediana y pequeña escalas, por lo que es conveniente avanzar en investigaciones de desarrollo de materiales que permitan mayor selectividad y menores costos de fabricación e implementación de esta tecnología.

La aplicación de la combustión con aire enriquecido se ha extendido principalmente a los procesos industriales de alta temperatura, en los cuales se han alcanzado altos niveles de eficiencia y aumento de la calidad en los productos. A su vez, esta técnica de combustión ha mostrado importantes mejoras en emisiones contaminantes y eficiencia térmica en los motores de combustión interna. También, se ha mostrado cómo la combinación de la combustión con aire enriquecido y la recirculación de gases de combustión (combustión oxicomcombustible) ha favorecido en los últimos años la reducción de costos en los procesos de captura y secuestro de CO_2 .

En Colombia se han dado avances importantes en la investigación y la implementación de la combustión con aire enriquecido en las industrias de alta temperatura. No obstante, se requiere avanzar en el desarrollo de materiales compatibles con alta temperatura, la integración eficiente de las membranas de separación en procesos industriales y una mayor difusión de las características y ventajas de esta técnica en el ahorro energético y la reducción de emisiones contaminantes.

Referencias

- AKINLABI, C. O.; GEROGIORGIS, D. I.; GEORGIADIS, M. C.; et al. Modelling, design and optimisation of a hybrid PSA-membrane gas separation process. *Computer Aided Chemical Engineering*. 2007, vol. 24, pp. 363-370.
- BANDEIRA SANTOS, A. Á.; TORRES, E. A. y DE PAULA PEREIRA, P. A. Experimental investigation of the natural gas confined flames using the OEC. *Energy*. 2011, vol. 36, pp. 1527-1534.

- BAUKAL, C. E. *Oxygen-Enhanced Combustion*. Oklahoma: CRC press LLC. 1998.
- BUHRE, B.J.P; ELLIOTT, L.K.; SHENG, C.D.; GUPTA, R.P; WALL, T.F. *Oxy-fuel combustion technology for coal-fired power generation*. Progress in Energy and Combustion Science. 2005, vol. 31 , issue 4, pp.283-307.
- BURDYNY, T. y STRUCHTRUP, H. Hybrid membrane/cryogenic separation of oxygen from air for use in the oxy-fuel process. *Energy*. 2010, vol. 35, núm. 5, pp. 1884-1897.
- CACUA, K.; AMELL, A. y CADAVID, F. Effects of oxygen enriched air on the operation and performance of a diesel-biogas dual fuel engine. *Biomass and Bioenergy*. 2012, vol. 45, pp. 159-167.
- CHEN, C. M.; ZHAO, C. S.; LIANG, C., et al. Calcination and sintering characteristics of limestone under O₂/CO₂ combustion atmosphere. *Fuel Process. Technol.* 2007, vol. 88, pp.171-178.
- CHIN, S.; JURNG, J.; LEE, J. H., et al. Oxygen-enriched air for co-incineration of organic sludges with municipal solid waste: A pilot plant experiment. *Waste Management*. 2008, vol. 28, núm. 12, pp. 2684-2689.
- CHUNLING, Y.; JIANGWE, C. y BINGYUAN, H. Performance Experiment of Gasoline Engine by Using Oxygen-Enriched Intake Air. *Third International Conference on Transportation Engineering (ICTE)*. 2011, pp. 3086-3091.
- COOMBE, H. S. y NIEH, S. Polymer membrane air separation performance for portable oxygen enriched combustion applications. *Energy Conversion and Management*. 2007, vol. 48, núm. 5, pp. 1499-1505.
- CROISSET, E. y THAMBIMUTHU, K. V. NO_x and SO₂ emissions from O₂/CO₂ recycle coal combustion. *Fuel*. 2001, vol. 80, núm. 14, pp. 2117-2121.
- DAOOD, S. S.; NIMMO, W.; EDGE, P, et al. Deep-staged, oxygen enriched combustion of coal. *Fuel*. 2011, .doi:10.1016/j.fuel.2011.02.007
- DAVIDSON, J. G. *Method and apparatus for membrane separation of air into nitrogen and oxygen elements for use in internal combustion engines*. Nixon, TX: United States Patent, World Air Energy Corporation, 2006.
- DECHAMPS, P. y PILAVACHI, P. A. Research and development actions to reduce CO₂ emissions within the European Union. *Oil & Gas Science and Technology*. 2004, vol. 59, pp. 323-330
- DITARANTO, M. y OPPELT, T. Radiative heat flux characteristics of methane flames in oxy-fuel atmospheres. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2011, vol. 35, pp. 1343-1350.
- DUAN, L.; ZHAO, C.; ZHOU, W., et al. O₂/CO₂ coal combustion characteristics in a 50 kW circulating fluidized bed. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 2011, vol. 5, pp. 770-776.
- FAVRE, E.; BOUNACEUR, R. y ROIZARD, D. A hybrid process combining oxygen enriched air combustion and membrane separation for post-combustion carbon dioxide capture. *Separation and Purification Technology*. 2009, vol. 68, núm. 1, pp. 30-36.

- GONZÁLEZ, J. C.; AMELL, A. A.; CADAVID, F. J. Características de la combustión con aire enriquecido con oxígeno y perspectivas de aplicación en PYME con procesos de alta temperatura. *Ingeniería e Investigación*. 2009, vol. 29, núm. 3, pp. 23-28.
- HORBANIUC, B.; MARIN, O.; DUMITRAȘCU, G., et al. Oxygen-enriched combustion in supercritical steam boilers. *Energy*. 2004, vol. 29, núm. 3, pp. 427-448.
- HOUNTALAS, D.; RAPTOTASIOS, S.; ZANNIS, T., et al. Phenomelological Modelling of Oxygen-Enriched Combustion and Pollutant Formation in Heavy-Duty Diesel Engines using Exhaust Gas Recirculation. *SAE Technical Paper*. 2012, vol. 01, pp.1725.
- INGE DAHL, P.; FONTAINE, M. L.; PETERS, T., et al. Development and testing of membrane materials and modules for high temperature air separation. *Energy Procedia*. 2011, vol. 4, pp. 1243-1251.
- JANKES, G.; STANOJEVIĆ, M.; KARAN, M., et al. The use of technical oxygen for combustion processes in industrial furnaces. *FME Transactions*. 2003, vol. 31, pp. 31-37.
- JIANGWEI, C.; CHUNLING, Y. y GUANGMING, Q. Reducing HC emissions of gasoline engine during cold-start by using a oxygen-enriched intake air system. *Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering (RSETE), International Conference*.
- KAJITANI, S.; CLASEN, E.; CAMPBELL, S., et al. T. Partial-Load and Start-up Operations of Spark-ignition Engine with Oxygen Enriched Air. *SAE Technical Paper 932802*. 1993. doi:10.4271/932802.
- KANSHA, Y.; KISHIMOTO A.; NAKAGAWA, T., et al. A novel cryogenic air separation process based on self-heat recuperation. *Separation and Purification Technology*. 2011, vol. 77, núm. 3, pp. 389-396.
- KARIMI, H. J. y SAIDI, M. H. Heat Transfer and Energy Analysis of a Pusher Type Reheating Furnace Using Oxygen Enhanced Air for Combustion. *Journal of Iron and Steel Research, International*. 2010, vol. 17, núm 4, pp. 12-17.
- KHARE, S. P.; WALL, T. F.; FARIDA, A. Z., et al. Factors influencing the ignition of flames from air-fired swirl PF burners retrofitted to oxy-fuel. *Fuel*. 2008. vol. 87, pp. 1042-1049.
- KRZYWANSKI, J.; CZAKIERT, T.; MUSKALA, W., et al. Modeling of solid fuels combustion in oxygen-enriched atmosphere in circulating fluidized bed boiler: Part 1. The mathematical model of fuel combustion in oxygen-enriched CFB environment. *Fuel Processing Technol.*, 2010, vol. 91, pp. 290-295.
- LI, H.Y. y WANG, H. 2003. Performance Compare Analyses of High Temperature Air Combustion and Oxyboosted Combustion Technology. *Industrial Heating*. 2003, vol. 5, pp. 9-12.
- LI, S. y FAN, Q. Oxygen enrichment using small-pore silicoaluminophosphate membranes. *United States patent application*. 2012, vol. 837, pp.563.
- LIANG, F.; JIANG, H.; SCHIESTEL, T., et al. High-Purity Oxygen Production from Air Using Perovskite Hollow Fiber Membranes. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2010, vol. 49, num. 19, pp. 9377-9384.

- LIN, H. *Novel Membranes and Processes for Oxygen Enrichment* (No. DOE/EE0003462). Menlo Park, CA.: Membrane Technology and Research, Inc., 2011.
- MADLOOL, N. A.; SAIDUR, R.; HOSSAIN, M. S., et al. A critical review on energy use and savings in the cement industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011, vol. 15, pp. 2042-2060.
- MAZAS, A. N.; FIORINA, B.; LACOSTE, D. A., et al. Effects of water vapor addition on the laminar burning velocity of oxygen-enriched methane flames. *Combustion and Flame*. 2011, vol. 158, núm. 12, pp. 2428-2440
- MELO, G. F.; LACAVALA, P. T. & CARVALHO JR, J. A. A case study of air enrichment in rotary kiln incineration. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 1998, vol. 25, pp. 681-692.
- MERILÄINEN, A., SEPPÄLÄ, A. & KAURANEN, P. Minimizing specific energy consumption of oxygen enrichment in polymeric hollow fiber membrane modules. *Applied Energy*. 2012, vol. 94, pp. 285-294.
- MOFARAH, M.; TOWFIGHI, J. y FATHI, L. Oxygen Separation from Air by Four-Bed Pressure Swing Adsorption. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2009, vol. 48, núm. 11, pp. 5439-5444.
- MOLINA, A., & SHADDIX, C. R. Efecto del CO_2 en la velocidad de combustión de semicoques de carbón en aplicaciones de oxi-combustión. *Energética*. 2007, vol. 38, pp. 101-106.
- NGUYEN, L. D. K.; SUNG, N. W.; LEE, S. S., et al. Effects of split injection, oxygen enriched air and heavy EGR on soot emissions in a diesel engine. *International Journal of Automotive Technology*. 2011, vol. 12, núm. 3, pp. 339-350.
- NIMMO, W.; DAOOD, S. S. y GIBBS, B. M. The effect of O_2 enrichment on NO_x formation in biomass co-fired pulverised coal combustion. *Fuel*. 2010, vol. 89, núm. 10, pp. 2945-2952.
- POOLA, R.; SEKAR, R. y COLE, R. *Variable oxygen/nitrogen enriched intake air system for internal combustion engine applications*. United States Patents. The University of Chicago ILL, 1997.
- QIU, K. y HAYDEN, A. C. S. Increasing the efficiency of radiant burners by using polymer membranes. *Applied Energy*. 2009. Vol. 86, núm. 3, pp. 349-354.
- QUIN, W.; REN, FN.; EGOLFOPOULOS, S Wu., et al. Oxygen composition modulation effects on flame propagation and NO_x formation in methane/air premixed flames. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2000, vol. 28, núm. 2, pp. 1825-1831.
- RIZK, J.; NEMER, M. y CLODIC, D. A real column design exergy optimization of a cryogenic air separation unit. *Energy*. 2012, vol. 37, núm. 1, pp. 417-429.
- SAASTAMOINEN, J.; TOURUNEN, A. y PIKKARAINEN, T. Fluidized Bed Combustion in High Concentrations of O_2 and CO_2 . *The 19th International Conference on Fluidized Bed Combustion*. Vienna: Austria. 2006.

- SCHNEIDER, M.; ROMER, M.; TSCHUDIN, M., et al. Sustainable cement production-present and future. *Cement and Concrete Research*. 2011, vol. 41, pp. 642-650.
- SEKAR, R. y POOLA, R. B. Argonne National Lab., IL (United States). Demonstration of Oxygen-Enriched Combustion System on a Light-Duty Vehicle to Reduce Cold-Start Emissions. *International symposium on automotive technology and automotion: in fusion of technical excellence*, Florence (Italy), 16-19 Jun. 1997, p. 11.
- SKEEN, S. A.; YABLONSKY, G. y AXELBAUM, R. L. Characteristics of non-premixed oxygen-enhanced combustion: I. The presence of appreciable oxygen at the location of maximum temperature. *Combustion and Flame*. 2009, vol. 156, pp. 2145-2152.
- SKEEN, S. A.; YABLONSKY, G.; AXELBAUM, R. L. Characteristics of non-premixed oxygen-enhanced combustion: II. Flame structure effects on soot precursor kinetics resulting in soot-free flames. *Combustion and Flame*. 2010, vol. 157, pp. 1745-1752.
- SONG, J.; ZELLO, V.; BOEHMAN, A. L., et al. Comparison of the impact of intake oxygen enrichment and fuel oxygenation on diesel combustion and emissions. *Energy & Fuels*. 2004, vol. 18, núm. 5, pp. 1282-1290.
- STADLER, H.; BEGDEL, F.; HABERMEHL, M., et al. Oxyfuel coal combustion by efficient integration of oxygen transport membranes. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 2011, vol. 5, pp. 7-15.
- STAIGER, C. L.; VAUGHN, M. R.; MILLER, K. A., et al. *Sandia National Laboratories. Hybrid Membrane-PSA system for separating oxygen from air*. United States Patent number 7,875,101. 2011.
- SUBRAMANIAN, K. A. y RAMESH, A. Experimental investigation on the use of water diesel emulsion with oxygen-enriched air in a DI Diesel Engine. *SAE Technical Paper 2001-01-0205*, 2001. doi:10.4271/2001-01-0205.
- TAN, R.; CORRAGIO, G. y SANTOS, S. Oxy-coal combustion with flue gas recycle for the power generation industry - a literature review. *Velsen Noord: The Netherlands: International Flame Research Foundation (IFRF)*. 2005.
- TOFTEGAARD, M. B.; BRIX, J.; JENSEN, P. A., et al. Oxy-fuel combustion of solid fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2010, vol. 36, núm. 5, pp. 581-625.
- TRANIER, J. P.; DUBETTIER, R.; DARDE, A., et al. Air separation, flue gas compression and purification units for oxy-coal combustion systems. *Energy Procedia*. 2011, vol. 4, pp. 966-971.
- VEGA, C. Sistema de Oxi-Combustión para hornos continuos. *Producción+Limpia*. 2006, vol. 1, núm. 1, pp. 81-86
- WALL, T. F. Combustion processes for carbon capture. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2007. vol. 31, pp. 31-47.
- WANG, L.; HAWORTH, D. C.; TURNS, S. R., et al. Interactions among soot, thermal radiation, and NOx emissions in oxygen-enriched turbulent nonpremixed flames: a

- computational fluid dynamics modeling study. *Combustion and Flame*. 2005, vol. 141, pp. 170-179.
- WRIGHT, J. y COPELAND, R. *Advanced Oxygen Separation Membranes*. Chicago, Illinois: Gas Research Institute, 1990, p. 75
- WU, K.K.; CHANG, Y.C.; CHEN, C.H., et al. High-efficiency combustion of natural gas with 21-30% oxygen-enriched air. *Fuel*. 2010, vol. 89, núm. 9, pp. 2455-2462.
- WU, Y.Y. y HUANG, D. Improving the performance of a small spark-ignition engine by using oxygen-enriched intake air. *SAE Technical Paper*. 2007, vol. 32, pp.4.
- YANG, H.; FAN, S.; LANG, X., et al. Economic comparison of three gas separation technologies for CO₂ capture from power plant flue gas. *Chinese Journal of Chemical Engineering*. 2011, vol. 19, núm. 4, pp. 615-620.
- YANG, Y.H.; DENG, N.Y. y ZHANG, S.Q. Effects of coal oxygen-enriched combustion on energy saving and environment. *Materials for Renewable Energy & Environment (ICMREE)*. International Conference on, 20-22 May 2011, pp.1552-1555.
- YAP, L. T.; POURKASHANIAN, M.; HOWARD, L., et al. Nitric-oxide emissions scaling of buoyancy-dominated oxygen-enriched and preheated methane turbulent-jet diffusion flames. *Twenty-Seventh Symposium on Combustion - The Combustion Institute*. 1998, pp. 1451-1460.
- YU, Z.; MA, X. y LIAO, Y. Mathematical modeling of combustion in a grate-fired boiler burning straw and effect of operating conditions under air- and oxygen-enriched atmospheres. *Renewable Energy*. 2010, vol. 35, pp. 895-903.
- ZEMAN, F. Oxygen combustion in cement production. *Energy Procedia*. 2009, vol. 1, núm. 1, pp. 187-194.
- ZHOU, J. X.; CORDIER, M.; MOUNAÏM-ROUSSELLE, C., et al. Experimental estimate of the laminar burning velocity of iso-octane in oxygen-enriched and CO₂-diluted air. *Combustion and Flame*. 2011, vol. 158, pp. 2375-2383.
- ZHOU, J.; FOUCHER, F.; DE PERSIS, S. & PILLIER, L. Effect of oxygen enrichment and CO₂ dilution on laminar methane flame velocities. *European Combustion Meeting, Cardiff: Royaume-Uni*. 2011.
- ZHU, Y.; LEGG, S. y LAIRD, C. D. Optimal operation of cryogenic air separation systems with demand uncertainty and contractual obligations. *Chemical Engineering Science*. 2011, vol. 66, núm. 5, pp. 953-963.