**Observaciones**

Agradecemos de antemano la revisión realizada a nuestro artículo y la oportunidad que nos brindaron para mejorarlo. Sus observaciones y sugerencias fueron de gran ayuda.

A continuación damos respuesta a cada una de las observaciones realizadas por ustedes.

**Observación 1:** El título no refleja que se trata de una revisión de estado del arte.

**Respuesta:** El título “Combustión con aire enriquecido con oxígeno: una técnica para incrementar la eficiencia energética” fue cambiado en su versión en español e inglés por “Revisión de la combustión con aire enriquecido como estrategia para incrementar la eficiencia energética” y “A review of oxygen-enriched combustion as a strategy for increasing the energy efficiency.

**Observación 2:** Se debe mejorar el resumen ya que no establece los alcances del artículo ni la visión específica que eligieron los autores para presentar los resultados de la revisión.

**Respuesta:**

El resumen fue actualizado a una nueva versión como sigue:

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 incluso de 100%. En el presente estudio se realiza una revisión del estado de la técnica 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 tales como 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 tales como procesos industriales de alta temperatura, captura y secuestro de CO2 y motores de combustión interna, al igual que los avances en investigación en respecto a este tema en Colombia.

**Abstract**

Air enriched with oxygen combustion has been one of the alternatives to increase energetic efficiency in combustion process. This technology consists in increasing the oxygen concentration in the air even up to 100%. In this work, a review of the phenomenology of combustion process with air enriched and focus has been done in thermodynamic, chemical and kinetic aspects. Also, the most used air separation techniques to obtain air enriched with oxygen such as cryogenic distillation and pressure swing adsorption, and developing techniques as separation membranes. Finally, the most common applications of air enriched with oxygen combustion are mentioned such as high temperature industrial, capture of CO2 and internal combustion engines, as well as advances in research with regard to this topic in Colombia.

**Observación 3:** Existen errores tipográficos. La tabla 1 no fue presentada, la numeración de secciones no está adecuada y las referencias parecen estar organizadas en un formato de diferente tamaño. Falta mayor referencia y profundidad en el análisis de las investigaciones en Colombia sobre el tema. Adicionalmente, si bien se muestra una revisión en diferentes aspectos de la temática, es documento es limitado en análisis.

**Respuesta:**

**-**Se realizó una revisión del texto y se corrigieron los errores tipográficos existentes.

-Se anexó la tabla 1 referente a las investigaciones realizadas en Colombia.

**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 oxicombustión en lecho fluidizado. | * Universidad Nacional de Colombia
* Argos S.A
 | Grupo de Termodinámica Avanzada y Energías Alternativas TAYEA, |
| Mecanismos para la formación de NOx en sistemas de Oxicombustión. | * 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  | * 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. | * Universidad de Antioquia
* Colciencias
 | GASURE |
| Características de la combustión con aire enriquecido con oxígeno y perspectivas de aplicación en PYME con procesos de alta temperatura. | * Universidad de Antioquia
* EPM
 | González et al, 2009 |
| Efecto del CO2 en la velocidad de combustión de semicoques de carbón en aplicaciones de oxi-combustión. | * Universidad Nacional de Colombia
 | Molina & Shaddix, 2007 |

 **Fuente: presentación propia de los autores.**

-Se corrigió la numeración de las secciones.

-Se revisó el formato de las referencias bibliográficas y se estableció un mismo formato.

-Con respecto a las referencias de las investigaciones en Colombia, es necesario aclarar que algunos de estos trabajos se encuentran en desarrollo y no hay publicación oficial de los resultados.

-Con respecto a la profundidad en el análisis de las investigaciones en Colombia, en el párrafo 2 de la sección “Combustión con aire enriquecido en Colombia” se agregó lo siguiente para adicionar profundidad del análisis:

Estas investigaciones han mostrado que es posible incrementar la eficiencia térmica en los motores de combustión interna siempre y cuando se logren desarrollar métodos económicos y eficientes para producir el oxígeno para el enriquecimiento (Cacua 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 (Gonzáles et al, 2009; Sánchez, 2010), 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.

-Adicionalmente se profundizó en el análisis de la fenomenología del proceso de combustión con aire enriquecido con oxígeno.

**Observación 4.** Si bien las referencias son numerosas, hay muchas que tienen más de diez años. Revisar las sugerencias en el documento.

Se decidió dejar referencias clásicas como la del libro Oxygen Enhanced Combustion de Charles Baukal como uno de los pioneros en el análisis de la aplicación de la combustión de aire enriquecido con oxígeno.

La mayor parte de las investigaciones con respecto a la utilización de aire enriquecido con oxígeno en motores de combustión interna se encontraron en los años 90, sin embargo se trató de actualizarlas contrastándolas con referencias más actualizadas.

**Observación 5.** Se debe mejorar nomenclatura y revisar la escritura de fórmulas químicas.

**Respuesta:** Se revisó la nomenclatura y los números de las formulas químicas se colocaron como subíndices.

**Observación 6:** Aspectos tan importantes como la química de las reacciones que suceden en la combustión, la termodinámica de las mismas y la cinética del proceso, que los autores mencionan como trascendentales en la explicación del fenómeno, no fueron ilustrados y ejemplificados.

**Respuesta:**

En la sección de “Características fenomenológicas de la combustión con aire enriquecido” se agregaron los siguientes párrafos:

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 CxHy:

$C\_{x}H\_{y}+\left(x+\frac{y}{4}\right)\left(O\_{2}+\frac{100-α}{α}N\_{2}\right)\rightarrow xCO\_{2}+\frac{y}{4}H\_{2}O+\frac{100-α}{α}\left(x+\frac{y}{4}\right)N\_{2}$ Ec.1

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, obteniéndose mayor calor disponible en los procesos donde es aplicado. Este efecto ha sido analizado por Cacua et al (2011) mediante simulación numérica en el software CHEMKIN para la combustión con aire enriquecido hasta una concentración de 35% de oxígeno con un combustible de bajo poder calorífico como el biogás, logrando una temperatura máxima de 2846 K, que comparada con los 2174 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 tales como O, OH, CO cómo 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+O2🡪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)

**Observación 7:** Los autores no mencionan reportes de la bibliografía en los cuales se hagan cálculos teóricos basados en la termodinámica y la cinética que predigan la eficiencia energética, temperatura y producción de compuestos químicos, lo cual convertiría a este documento en un manuscrito mucho más valioso y completo

**Respuesta:**

Esta observación es similar a la observación 6 y consideramos que con las inclusiones derivadas de ésta última queda subsanado el requerimiento de la observación 7.

**Observación 8:** Si bien la revista somete a corrección de estilo todos los artículos, se recomienda una revisión general del texto en cuanto a redacción y ortografía.

**Respuesta:** Se realizó la revisión general del texto en cuanto a redacción y ortografía y se realizaron las respectivas correcciones.

**Observación 9.** Corregir redacción: “en respecto” debe cambiarse por “con respecto”.

**Respuesta:** Se cambió “en respecto” por “con respecto”.

**Observación 10.** Corregir la numeración de los subtítulos.

**Respuesta:** La numeración de los subtítulos fue corregida.

**Observación 11.** Corregir redacción en “del estado de la técnica de la fenomenología”.

**Respuesta:** Se cambió la frase “del estado de la técnica de la fenomenología” por “de la fenomenología…” en el resumen en español y en inglés.

**Observación 12.** En español no deben usarse puntos como decimales sino comas.

**Respuesta:** Se cambió el punto por una coma para separar decimales.

**Observación 13.** “23% de aire enriquecido” ¿significa: Aire con un contenido de 23 % de O2?. Este error gramatical confunde y es recurrente en todo el texto, surge probablemente de una mala traducción del inglés al español.

**Respuesta:** Se cambió “23% de aire enriquecido” por “aire con 23% de oxígeno”. Adicionalmente se cambió “aire enriquecido” por “aire enriquecido con oxígeno” en algunos apartes del texto con el fin de evitar confusiones al lector.

**Observación 14:** Los autores aseguran 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”. De acuerdo con la revisión se considera que estos aspectos deben ser presentados en detalle y discutidos con ejemplos específicos en esta revisión.

**Respuesta:**

El análisis de la termodinámica, la cinética química y la temperatura de llama se amplió con base en la corrección de la Observación 3. En cuanto a los aspectos de transferencia de calor y tasa de calentamiento, estos se mencionaron en los párrafos 2 y 3 de la sección “Características fenomenológicas de la combustión con aire enriquecido”, en los que se menciona un ejemplo del aumento en la tasa de calentamiento y se explican los fundamentos de los cambios en los mecanismos de transferencia de calor.

**Observación 15:** Corregir redacción en “Esto último en la combustión con aire enriquecido se presenta un cambio en los mecanismos”.

**Respuesta:** Se cambió la frase“Esto último en la combustión con aire enriquecido se presenta un cambio en los mecanismos” por “Esto último es debido a que en la combustión con aire enriquecido se presentan cambios en los mecanismos”

**Observación 16:** Corregir redacción: “por el mecanismo térmico” por “mediante el mecanismo térmico”.

**Respuesta:** Se realizó el cambio sugerido.

**Observación 17:** Corregir errores mínimos relacionados con espacios entre las palabras.

**Respuesta:** Se separaron las palabras que estaban unidas debido a errores tipográficos.

**Observación 18**. El texto en términos generales, carece de puntuación entre palabras (utilización de comas, puntos seguidos), lo que causa que la lectura del manuscrito sea muy pesada e inentendible en algunos aspectos.

**Observación 19.** Corregir redacción: “han realizado variaciones combinan”.

**Respuesta:** Se cambió “han realizado variaciones combinan” por “han realizado variaciones que combinan”.

**Observación 20.** La siguiente frase debe corregirse: “Las membranas poliméricas hacen pasar aire a través de una membrana permeable”.

**Respuesta:** Se cambió la frase“Las membranas poliméricas hacen pasar aire a través de una membrana permeable” por “En las membranas poliméricas se hace pasar aire a través de una membrana permeable”.

**Observación 21.** Corregir: “de gases de bajo poder calorífico hasta plantas de (Yang y Deng et al., 2011)”.

**Respuesta:** Se eliminó “hasta plantas de”.

**Observación 22.** Corregir redacción: “La aplicación de combustión”

**Respuesta:** Se cambió“La aplicación de combustión” por “La utilización de procesos de combustión con aire enriquecido con oxígeno”.

**Observación 23.** Los conectores como: Por otra parte, En la actualidad, Sin embargo; deben separarse del texto usando una coma.

**Respuesta:** Se colocaron las comas faltantes en los conectores.

**Observación 24.** Corregir: CO2, O2, el número deberá ser un subíndice.

**Respuesta:** Se corrigió el subíndice en las fórmulas químicas.

**Observación 25.** El texto contiene el siguiente error; ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.

**Respuesta:** Se quitó el código de campo que estaba generando este error.

**Observación 26:** No se incluyó la fuente de esta información “En Colombia es común la inyección de oxígeno para los procesos de combustión con distintos niveles de enriquecimiento en empresas de cemento, vidrio, cerámicos y plantas termoeléctricas.”

**Respuesta:**

No existe una referencia en la literatura que establezca esta información. Esta afirmación se ha hecho con base en el conocimiento que los autores han tenido por realizar visitas o mantener contacto con algunas industrias representativas de los procesos mencionados. Sin embargo, con el ánimo de no generalizar y no crear manto de duda con la afirmación, ésta se cambió por la siguiente:

“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.”

**Observación 27:** En las conclusiones los autores aseguran que “Esta técnica genera cambios considerables en los fenómenos cinéticos y termodinámicos de la combustión”; no obstante, estos aspectos de vital importancia en el proceso no fueron abordados en detalle en la revisión.

**Respuesta:**

Esta omisión fue subsanada con las adiciones realizadas a partir de la Observación 6.

**Observación 28.** Los autores afirman que “…principalmente en el proceso de atenuación del efecto altura sobre estas máquinas”; este aspecto no fue abordado en el manuscrito.

**Respuesta:** Debido a que en el manuscrito no se abordó este tema en específico y que la afirmación proviene de los resultados de un proyecto de investigación se retiró esta afirmación de las conclusiones.

**Observación 29.** Para efectos de visibilidad y al ser un tema de interés realizamos la recomendación de enviarnos una versión en inglés, aconsejamos sea enviada a un profesional nativo para realizar la traducción del artículo.

**Respuesta:** Debido a limitaciones en el tiempo para la traducción oficial del artículo por parte de una persona especializada no pudimos acoger esta recomendación.

**Observaciones realizadas en el texto**

**Observación. Considero que este “en” está sobrando.**

**Respuesta:** Se quitó el en que estaba sobrando.

**Observación.** Sugerencia para precisar en el resumen lo que se realizó en el artículo y no colocar entre otras si no se habían abordado estas últimas.

**Respuesta:** El resumen fue modificado de acuerdo a esta sugerencia.

**Observación.** En la última línea del párrafo 5 de la introducción se quitó “entre otros aspectos fenomenológicos del proceso de combustión” con el fin de no generar confusión al introducir la palabra entre otros.

**Observación del último párrafo de la sección “Características fenomenológicas de la combustión con aire enriquecido”:** ¿Por qué se presenta esta curva? considero que se debería enriquecer este texto con las explicaciones que exponen en el artículo referenciado.

**Respuesta**

Aunque el artículo referenciado no profundiza en la fenomenología del comportamiento observado, se realizó la siguiente explicación basado en los planteamientos teóricos de Baukal (1998), con lo que se aumenta el análisis y fortalecimiento del texto:

“Este comportamiento se debe a que los NOx formados por el mecanismo térmico presentan un aumento exponencial al aumentar la temperatura por encima de los 1400 K (Baukal, 1998, pag 53). Por lo tanto, bajos niveles de enriquecimiento favorecen la formación de NOx debido al aumento de la temperatura. Sin embargo, cuando los niveles de enriquecimiento son mayores, la formación de NOx decrece debido a que la disminución de nitrógeno hace que esté menos disponible para completar la siguiente reacción química (Baukal, 1998, pag 55):

$$N\_{2}+O\_{2}\rightarrow NO, NO\_{2}$$

**Observación con respecto a las referencias.**

Se adicionó el número de páginas en la siguiente referencia:

BAUKAL, C. E. Oxygen-Enhanced Combustion. Oklahoma, CRC press LLC. 1998, pp. 40, 53-55.

Se complementó la siguiente referencia:

LIN, H. (2011). Novel Membranes and Processes for Oxygen Enrichment (No. DOE/EE0003462). Membrane Technology and Research, Inc., Menlo Park, CA. 2011.

Adicionalmente se revisó el formato de las referencias y se corrigieron los errores en los subíndices de las fórmulas químicas.