

Advances and trends in industrial combustion to improve efficiency in hot rolling processes: A Systematic Review

Quispe-Laguna Angel Rapahel¹; Flores-Idrugo Eddier Albino¹
¹, Universidad Tecnológica del Perú, c20340@utp.edu.pe; c28965@utp.edu.pe

Abstract

This study performs a systematic review of the literature on technologies based on the use of pure oxygen in the combustion process in hot rolling reheating furnaces with a focus on improving combustion efficiency and productivity. The search for information was carried out in the Scopus database, where 18 articles were identified and selected using the PRISMA and PICO methods.

Subsequently, a bibliometric analysis was performed to obtain a deeper insight into the research carried out on oxygen enrichment and oxycombustion as technologies in heating processes. Tools such as VOSviewer were used to visualize the cooperation between researchers from different countries in the related scientific production and Bibliometrix to graphically represent the countries with the highest scientific production.

The study investigates the 3 methods of using oxygen in the combustion process, which are oxygen enrichment in the combustion air pipe, oxygen lances and oxycombustion, which requires special burners for its use. The different methods are compared and the benefits, advantages and disadvantages of using these technologies are analyzed, as well as some results of efficiencies achieved by experimental research and simulators. Finally, the importance of controlling process variables in furnaces to achieve success in improving combustion efficiency and productivity when using these technologies is explored.

Keywords-- Thermal energy Efficiency, combustion, Oxygen Enrichment, Combustion Efficiency, reheating furnace.

Avances y tendencias de la combustión industrial para mejorar la eficiencia en procesos de laminación en caliente: Una Revisión Sistemática

Quispe-Laguna Angel Rapahel¹; Flores-Idrugo Eddier Albino¹
¹, Universidad Tecnológica del Perú, c20340@utp.edu.pe; c28965@utp.edu.pe

Resumen— Este estudio realiza una revisión sistemática de la literatura sobre las tecnologías basadas en el uso del oxígeno puro en el proceso de combustión en los hornos de recalentamiento para laminación en caliente teniendo como foco la mejora de la eficiencia de combustión y la productividad. La búsqueda de información se llevó a cabo en la base de datos Scopus, donde se identificaron y seleccionaron 18 artículos utilizando el método PRISMA y PICO. Posteriormente, se realizó un análisis bibliométrico para obtener una visión más profunda sobre las investigaciones realizadas en el enriquecimiento de oxígeno y la oxicomustión como tecnologías en los procesos de calentamiento. Se emplearon herramientas como VOSviewer para visualizar la cooperación entre investigadores diferentes países en la producción científica relacionada y Bibliometrix para representar gráficamente los países con mayor producción científica.

El estudio investiga los 3 métodos de uso del oxígeno en el proceso de combustión que es el enriquecimiento de oxígeno en la tubería de aire de combustión, lanzas de oxígeno y la oxicomustión que requiere quemadores especiales para su uso. Se comparan los diferentes métodos y se analizan los beneficios, ventajas y desventajas en el uso de estas tecnologías y algunos resultados de eficiencias alcanzadas por investigaciones experimentales y simuladores. Finalmente, se exploran la importancia del control de las variables de los procesos en los hornos para alcanzar el éxito en la mejora de la eficiencia de combustión y productividad al usar estas tecnologías.

Palabras claves—Eficiencia energética térmica, Combustión, Enriquecimiento de oxígeno, Eficiencia de Combustión, Horno de recalentamiento.

I. INTRODUCCIÓN

Los procesos industriales que requieren energía térmica actualmente se realizan mediante la combustión, un proceso que consiste en la quema de un combustible fósil utilizando aire como comburente, el cual está compuesto aproximadamente por un 21 % de O₂ y un 79 % de N₂ por volumen. La laminación del acero, uno de los procesos industriales que exige altas temperaturas, se lleva a cabo mediante esta combustión industrial, en la que reaccionan el hidrocarburo y el aire. De los componentes del aire, es el O₂ el único que participa activamente en la reacción de combustión para extraer la energía del combustible, mientras que el N₂ actúa como gas inerte, que se calienta y transporta parte de la energía de la combustión hacia la chimenea junto con los demás gases calientes, lo que reduce la eficiencia de la transferencia de calor y de la combustión [1].

Existen diversas tecnologías para mejorar la eficiencia de la combustión y reducir el consumo de energía, siendo una de las más destacadas el enriquecimiento del aire de combustión con oxígeno. Este proceso consiste en aumentar el contenido de oxígeno en el aire atmosférico hasta un 30%, conocido como enriquecimiento medio de oxígeno (MOE), o incluso hasta un 100%, lo que se denomina oxicomustión (OF). Estas tecnologías han demostrado ser eficaces, logrando ahorros de combustible de hasta un 15%, reducciones de gases de efecto invernadero como el CO₂ en un 25% y mejoras en la eficiencia energética de hasta un 20%. Asimismo, con el objetivo de reducir el consumo de energía y mitigar los impactos ambientales, se están llevando a cabo estudios teóricos en diversos sectores industriales. En el sector siderúrgico, investigadores han realizado simulaciones en hornos de recalentamiento tipo empujador para evaluar diferentes niveles de enriquecimiento de oxígeno, obteniendo resultados prometedores en la reducción del consumo de combustible, especialmente cuando se utiliza gas natural. Se lograron reducciones de hasta un 19,7% con enriquecimiento medio de oxígeno (MOE) y hasta un 26,8% con oxicomustión (OF). Además, las simulaciones mostraron una disminución significativa en las emisiones de gases de combustión a través de la chimenea. Las emisiones contaminantes de óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO), compuestos volátiles (COV) y material particulado (PM_{2.5} y PM₁₀) se redujeron entre un 14,8% y un 17,3% en MOE, y entre un 20,3% y un 23,7% en OF [2], [3].

La tecnología de enriquecimiento del aire de combustión se emplea en diversos sectores, procesos térmicos y tipos de combustibles. En un estudio realizado se desarrolló un modelo en una caldera de 350 MW utilizando aire enriquecido y carbón pulverizado como combustible. Los resultados demostraron que la temperatura en la cámara de combustión aumentaba a medida que se incrementaba el nivel de oxígeno, lo que también contribuyó a reducir la cantidad de gases de combustión y a mejorar la transferencia de calor por radiación. Aunque los resultados son prometedores, el estudio señala que el sistema de combustión del proceso se mantuvo a un nivel de enriquecimiento de oxígeno del 30%, similar al que se lograría con aire atmosférico [4]. Aunque en la industria los combustibles más utilizados son el petróleo residual y el gas natural debido a su bajo costo, también se han realizado estudios sobre la combustión con aire enriquecido, utilizando

como combustible el diésel y el biodiésel, con el objetivo de mejorar la eficiencia de combustión y reducir las emisiones contaminantes. En simulaciones numéricas, Wang W. señala que el enriquecimiento de oxígeno tiene un impacto más significativo que la combustión con aire atmosférico, observándose una reducción en el grosor de la llama al enriquecer el aire para la combustión del diésel y biodiésel. De manera similar a otros estudios, se evidenció que, en atmósferas ricas en oxígeno, tanto para el diésel como para el biodiésel, se incrementan la temperatura de la llama, la tasa de liberación de calor de la combustión y la velocidad de propagación de la llama [5].

Diversos estudios han demostrado los beneficios del enriquecimiento del aire de combustión en procesos térmicos, aunque esta tecnología se utiliza principalmente en el sector siderúrgico, en los altos hornos para la fusión del mineral de hierro, usando coque y carbón pulverizado, y no en procesos de calentamiento. El proceso de laminación en caliente, que consume grandes cantidades de energía térmica debido al funcionamiento de los hornos de recalentamiento que operan con gas natural, es responsable de las principales emisiones de gases de efecto invernadero, especialmente CO₂. El sector siderúrgico busca reducir tanto el consumo de energía térmica derivada de la quema de combustibles como las emisiones de CO₂ y otros contaminantes, con el fin de lograr una producción más sostenible y eficiente. Incrementar la concentración de oxígeno en el aire de combustión atmosférico mejora la eficiencia de la combustión, al reducir el N₂ y aumentar la temperatura de la llama durante el calentamiento de las palanquillas y planchones de acero en los hornos. También el nivel de oxígeno superior al atmosférico no solo eleva la temperatura de la llama, sino que también mejora la transferencia de calor por radiación en el calentamiento de las planchas de acero en los hornos de recalentamiento [6].

El enriquecimiento medio de oxígeno (MOE) ha generado interés en el sector energético debido a su mayor eficiencia térmica y su bajo costo de instalación en comparación con la combustión con oxígeno puro (OF). Esto se debe a que el costo de producción de oxígeno puro es elevado, además de los ajustes necesarios en los quemadores, la estructura del horno y el riesgo de daño en el refractario por el aumento de la temperatura de la llama. Aunque el enriquecimiento medio de oxígeno es una opción económicamente viable, aún no ha sido estudiado a fondo. Otras investigaciones realizadas por [7], mediante pruebas con quemadores convencionales para trabajar con sistemas de aire enriquecido con oxígeno mostraron resultados positivos para niveles bajos de enriquecimiento (inferiores al 28%). Sin embargo, para niveles de enriquecimiento superiores, es necesario realizar adaptaciones en el sistema de combustión [8].

A pesar de los resultados positivos, aún no existen estudios detallados sobre el enriquecimiento de oxígeno y su aplicación en el sector siderúrgico que respalden completamente esta tecnología. En Brasil, hay debates sobre el uso de esta técnica

para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, particularmente el CO₂. En este sentido, se realizó una simulación en hornos de recalentamiento que calientan el acero a temperaturas de entre 1150°C y 1200°C, logrando una distribución uniforme del calor en las palanquillas de acero. Esto permite mantener la combustión a niveles de liberación de energía similares a los de la combustión con aire, reduciendo así el consumo de combustible y las emisiones de CO₂, mientras se trabaja con niveles habituales de exceso de aire (5%) y gas natural como combustible. Esta reducción de consumo y emisiones es viable siempre y cuando se aproveche el calor de los gases de combustión antes de que salgan por la chimenea, para precalentar el aire de combustión a temperaturas de hasta 400°C [9], [10], [11].

La presente investigación presenta casos concretos de los escasos estudios sobre el enriquecimiento de oxígeno en el aire de combustión en el sector siderúrgico, específicamente para la laminación en caliente, así como algunas aplicaciones en otros sectores con alto consumo de energía térmica. El objetivo es facilitar la adopción de esta tecnología en industrias de gran demanda energética. Adicionalmente, se analiza cómo esta tecnología puede implementarse sin modificaciones en los sistemas de combustión en ciertos niveles de enriquecimiento y en qué casos sería necesario realizar ajustes sustanciales. El enriquecimiento del aire de combustión ofrece a las empresas la posibilidad de reducir costos energéticos, disminuir emisiones contaminantes y volverse más competitivas y sostenibles. Esta innovación contribuye al desarrollo industrial responsable, promoviendo la competitividad y la sostenibilidad. Por ello, es fundamental fomentar su uso y ampliar los estudios en esta línea de investigación.

II. METODOLOGÍA

2.2 Estrategia de búsqueda

Este artículo se basa en una revisión sistemática de la literatura sobre análisis cuantitativos, centrada en artículos y revisiones en el área de ingeniería y energía, ofreciendo una perspectiva de las nuevas tecnologías y métodos de combustión para mejorar la eficiencia en los procesos de recalentamiento de acero.

La búsqueda sistemática se realizó en la base de datos Scopus, seleccionada por su alta cobertura, calidad y validez de información. Para guiar esta revisión, se empleó la estrategia PICO, formulada de la siguiente manera: ¿Qué porcentaje de enriquecimiento del aire de combustión con oxígeno mejora la eficiencia en los procesos de calentamiento en comparación con el uso de aire atmosférico y oxígeno puro?

Cada componente de la estrategia PICO fue desglosado y se presenta detalladamente en la Tabla 1.

TABLA I
COMPONENTES PICO

Componentes	Pregunta	Palabras Clave
-------------	----------	----------------

P	Problema	¿Cuál es el problema de interés? Poca eficiencia en procesos de combustión en los hornos de recalentamiento	Thermal energy Efficiency, Combustion optimization, combustion, Steel overheating, furnace
I	Intervención	¿Qué tipo de intervención o solución se eligió para el problema descrito? De qué manera el enriquecimiento del aire mejora la combustión en los hornos de recalentamiento.	Oxygen Enrichment, combustion, Oxyfuel, Oxycombustion, Oxygen Enrichment, Enrichment
C	Comparación	¿Con qué tipo de intervención se compararía la anterior? Aire de combustión y oxígeno puro	Air combustion, Oxygen
O	Resultados	¿Qué se espera que mejore o se cumpla? Mejora de la eficiencia en procesos de calentamiento.	Combustion Efficiency, High efficiency, Heating Efficiency, reheating furnace

Para optimizar la búsqueda en la base de datos Scopus, se identificaron palabras clave que permitieron construir una ecuación de búsqueda más precisa, facilitando la selección de artículos relevantes para la revisión sistemática (Tabla 2).

TABLA II
PALABRAS CLAVE INTERRELACIONADAS CON EL OPERADOR BOOLEANO OR

P	Problema	"Thermal energy Efficiency" OR "Combustion optimization" OR "combustion for heating" OR "Steel overheating" OR "furnace"
I	Intervención	"Enrichment Air" OR "Oxygen combustion" OR "oxyfuel" OR "Oxycombustion" OR "Oxygen Enrichment" OR "Enriched air"
C	Comparación	"Air combustion" or Air
O	Resultados	"Combustion Efficiency" OR "High efficiency" OR "Heating Efficiency" OR "reheating furnace"

Estructura PICO

Las palabras clave de los componentes PICO se relacionaron con el operador booleano AND, obteniendo la siguiente ecuación de búsqueda:

(TITLE-ABS-KEY ("thermal energy efficiency" OR "combustion optimization" OR "combustion for heating" OR "steel overheating" OR "furnace") AND TITLE-ABS-KEY ("enrichment air" OR "oxygen enrichment" OR "enriched air") AND TITLE-ABS-KEY ("combustion efficiency" OR "high efficiency" OR "heating efficiency" OR "reheating furnace"))

La ecuación de búsqueda fue aplicada en la base de datos Scopus obteniendo 52 documentos como resultados de búsqueda.

Se aplicaron los siguientes criterios de elegibilidad.

Criterios de inclusión y exclusión

TABLA III
INCLUSIÓN Y EXCLUSIÓN

Criterios de Inclusión:	Criterios de Exclusión:
CI1: Estudios que investigan el uso de enriquecimiento de oxígeno para mejorar eficiencia energética.	CE1: Publicaciones que no correspondan a artículos originales de revistas científicas revisadas por pares y revisiones sistemáticas.
CI2: Estudios que incluyen pruebas experimentales o investigaciones teóricas relacionadas al enriquecimiento del aire de combustión	CE2: Publicaciones en idiomas diferentes al inglés y español.
CI3: Estudios que informan resultados cuantitativos sobre la eficiencia de la combustión con enriquecimiento de oxígeno	CE3: Publicaciones relacionados a temas diferentes a Ingeniería Química, Energía y medio ambiente.
CI4: Estudios que informan resultados cuantitativos sobre la eficiencia de la combustión con enriquecimiento de oxígeno en hornos de recalentamiento.	CE4: Publicaciones no relacionados al sector industrial.
CI5: Estudios deben poseer al menos una de las palabras claves en su búsqueda: Combustión, Enriquecimiento de oxígeno, hornos de recalentamiento	CE5: Publicaciones mayores a 15 años.

A. Proceso de selección de estudio

La investigación se realizó siguiendo los lineamientos de la Declaración PRISMA 2020, una guía que proporciona directrices sobre cómo llevar a cabo una revisión sistemática, desde la identificación de registros hasta la obtención y el procesamiento de la información proveniente de los documentos. Asimismo, establece estándares para la publicación de investigaciones [2],[3]. En los últimos 15 años, las publicaciones de revisiones sistemáticas y metaanálisis han mostrado resultados positivos para la comunidad científica, lo que ha impulsado un aumento significativo en la producción científica de revisiones sistemáticas en diversas áreas temáticas, contribuyendo a la solución de múltiples problemáticas [4],[5].

Una vez definidos los criterios de inclusión y exclusión, se llevó a cabo la búsqueda en Scopus, utilizando los filtros integrados para aplicar dichos criterios y excluir documentos en la fase inicial. Tras esta búsqueda, se seleccionaron 18 artículos

relacionados con el tema de investigación para su posterior análisis bibliométrico y de contenido, cuyos resultados se presentan en la Fig. 1.

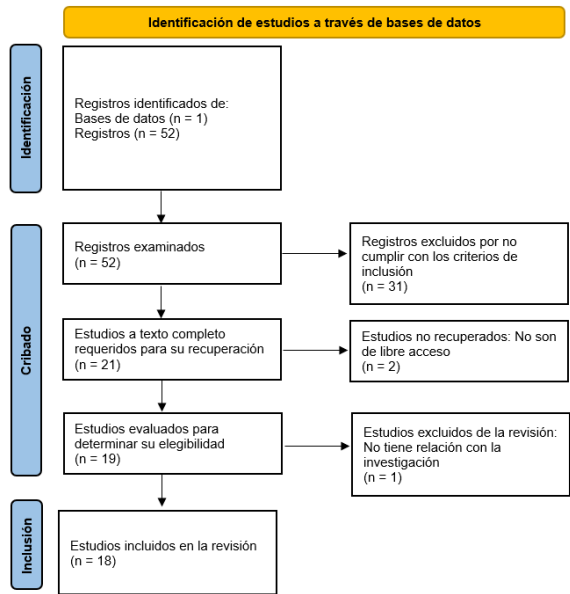


Fig. 1. Diagrama de flujo de PRISMA para la identificación de registros

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 RESULTADOS BIBLIOMÉTRICOS[1]

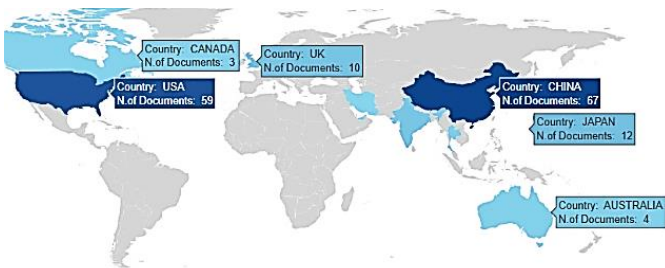


Fig. 2. Producción Científica por países

En la figura 2, se observa que países como China (67), Estados Unidos (59), Japón (12) y Reino Unido (10) lideran la producción científica relacionada con el tema de estudio. Las diferencias en la producción entre naciones como Australia (4), Canadá (3) y diversos países de Latinoamérica y Europa reflejan la influencia de factores como la inversión en investigación y desarrollo (I+D), la infraestructura científica, las colaboraciones internacionales y la estabilidad económica. Estas desigualdades generan brechas de conocimiento que restringen el acceso a innovaciones en regiones con recursos limitados. Es esencial fortalecer las políticas de ciencia abierta, el financiamiento equitativo y las redes de colaboración científica, con el objetivo de reducir dichas brechas y fomentar una producción más inclusiva que impulse el avance del conocimiento global.

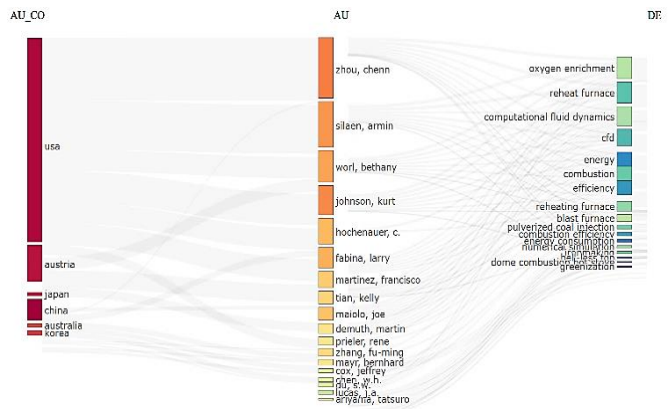


Fig. 3. Gráfico de tres campos: Países – Autores – Palabras claves

Mediante la sistematización y el análisis del contenido sobre la mejora de la eficiencia de combustión en los hornos de recalentamiento, se evidenció, a través de un gráfico de campos, la relación entre países, autores y palabras clave. Estados Unidos destaca con una frecuencia de publicaciones de 346, presentando un flujo de salida de 9 y solo siete autores principales. Le siguen Australia (n=62; flujo de salida=4) y China (n=36; flujo de salida=5). Entre los autores con mayor flujo de entrada figuran Zhou (n=11; frecuencia=103), Silaen (n=9; frecuencia=78), Worl (n=9; frecuencia=54) y Johnson (n=9; frecuencia=50). Las palabras clave más frecuentes son “Oxygen enrichment” (n=37), “Reheat furnace” (n=36), “Computational fluid dynamics” (n=33), “CFD” (n=28), “Efficiency” (n=24) y “Energy” (n=24). La evidencia refleja que la producción científica sobre eficiencia de combustión en hornos de recalentamiento está dominada por países como Estados Unidos, China y Australia, impulsados por su alto nivel de colaboración y recursos en I+D. Sin embargo, las diferencias en flujo de salida y frecuencia de autores indican desigualdades en la difusión del conocimiento. Fortalecer las redes de colaboración internacional y promover la ciencia abierta puede reducir estas brechas, asegurando un desarrollo tecnológico más equitativo y accesible a nivel global.

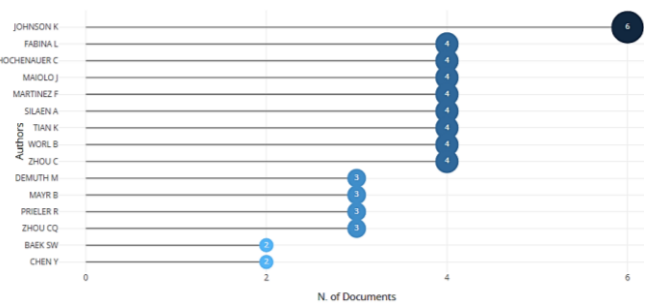


Fig. 4. Autores más relevantes sobre el tema de investigación

La figura muestra que los autores más relevantes en relación con el tema son Johnson con 6 publicaciones, y ocho autores con 4 publicaciones y cuatro autores con 4 publicaciones. Esto evidencia su destacada contribución al campo de estudio y su papel clave en la generación y difusión del conocimiento.

3.2 RESULTADOS DE CONTENIDO

III-B. Análisis de contenido

De los 52 artículos seleccionados, las subpreguntas de investigación (RQ1, RQ2 y RQ3) serán desarrolladas en los siguientes puntos.

III-B1. ¿Qué eficiencia presentan los procesos de combustión con aire en los hornos industriales?

El análisis de los 18 artículos científicos revisados revela que los procesos de fusión y calentamiento requieren altas temperaturas, las cuales se logran mediante la reacción entre un combustible y aire compuesto por un 21% de oxígeno y un 79% de nitrógeno. Mientras que el oxígeno participa activamente en la reacción química, el nitrógeno, al ser un gas inerte, se calienta y transporta energía que finalmente se pierde a través de la chimenea en forma de gases, lo que reduce la eficiencia del proceso [2]. En los hornos de recalentamiento de palanquillas de acero en laminación en caliente, simulaciones tridimensionales han demostrado que es posible alcanzar una eficiencia de hasta el 57.6% [3]. Sin embargo, en condiciones operativas reales, algunas siderúrgicas reportan rendimientos tan bajos como el 29% debido a diversas fallas operativas [4]. Entre los factores que afectan el desempeño se encuentran el descontrol de la presión interna, lo que impide una adecuada permanencia de los gases calientes, dificultando la transferencia óptima de energía. Además, no se aprovechan eficientemente los gases de salida para precalentar el aire de combustión, y la falta de un control adecuado de la relación aire/combustible genera una combustión deficiente. El desajuste en esta relación, determinado por la composición del gas, impacta negativamente en el proceso [5],[6].

Los factores que influyen en la eficiencia de la combustión en hornos industriales incluyen el tipo de quemador, el combustible utilizado y parámetros operativos clave, como la presión interna del horno y la relación aire/combustible. Basándose en estos elementos, numerosos estudios buscan optimizar el rendimiento energético. En este contexto, algunos investigadores han realizado ensayos a nivel de laboratorio, incorporando componentes adicionales al metano, principal constituyente del gas natural, como CO y H₂. Estas modificaciones alteran la mecánica de fluidos de la mezcla aire/combustible, incrementando la turbulencia y modificando la cinética de la reacción de combustión [7],[1]. Así, el estudio de la combustión y la búsqueda de su máxima eficiencia se presenta como un campo amplio y de gran relevancia. Hoy en día, es crucial implementar sistemas de control que monitoreen este proceso, dado que la combustión representa uno de los mayores consumidores de energía térmica en la fabricación de acero mediante laminación en caliente. La falta de un control adecuado conlleva un elevado consumo de combustible y una mayor emisión de gases de efecto invernadero, como CO₂ y NO_x, a través de los gases expulsados por la chimenea, lo que incrementa significativamente el impacto ambiental [2], [3], [8], [9], [10], [11].

TABLA IV
COMPARACIÓN DE TECNOLOGÍAS DE ENRIQUECIMIENTO DE OXÍGENO Y SU INVERSIÓN

% Enriquecimiento	Tecnología	% Ahorro Gas Natural	Emisiones NO _x	Inversión
21	Combustión convencional	0	Línea base	Línea base
25	Combustión con Enriquecimiento O ₂	8		
		15		
28	Combustión con Enriquecimiento O ₂	19.7	Incrementa el % de NO _x VS Línea base	Baja Inversión
29	Combustión con Enriquecimiento O ₂	22		
30	Combustión con Enriquecimiento O ₂	26.1		
31	Combustión con Enriquecimiento O ₂	26.8		
100	Oxy-Combustión	70	Reduce el % de NO _x VS Línea base	Alta inversión

III-B2. ¿Qué tipos de tecnologías se utilizan para mejorar la eficiencia de combustión en los hornos de recalentamiento?

De acuerdo con el análisis de los artículos científicos revisados para la presente investigación, las tecnologías más empleadas para mejorar la eficiencia de combustión en los procesos de calentamiento, refinación y fusión de minerales son el enriquecimiento del aire de combustión y la oxicomustión. Estas técnicas se implementan de diversas maneras, como mezclando oxígeno con el aire en la tubería de combustión, inyectando oxígeno directamente al interior del horno o utilizando quemadores diseñados específicamente para combustionar el combustible con oxígeno puro [2]. En este contexto, todos los estudios revisados analizan el impacto del uso de oxígeno puro en alguna de estas tres modalidades y su influencia en la eficiencia de combustión, productividad, emisiones atmosféricas, rendimiento de los hornos, velocidad de fusión y homogeneidad del calentamiento de minerales. Estos factores son esenciales para evaluar la implementación de estas tecnologías como mecanismos de eficiencia energética, con el objetivo de reducir costos operacionales de manera sostenible en diversos procesos industriales [2], [3], [5], [9], [10], [12],[18].

El uso más común de oxígeno en los procesos de combustión industrial se da en la fusión de minerales para alcanzar altas temperaturas. No obstante, debido a la creciente demanda de energía térmica en hornos de recalentamiento para la laminación en caliente del acero, se están llevando a cabo estudios mediante simuladores para aplicar tecnologías de enriquecimiento del aire de combustión con oxígeno puro. Estos estudios tienen como objetivo reducir el consumo de gas natural y evaluar la viabilidad de esta tecnología como alternativa en la industria [13]. Finalmente, un factor crucial para la implementación de estas tecnologías en hornos de

recalentamiento es garantizar la homogeneidad del calentamiento de las palanquillas de acero y la uniformidad térmica en todas las zonas del horno. Sin embargo, el enriquecimiento del aire de combustión podría reducir la transferencia de calor por convección, ya que disminuye tanto el volumen como la temperatura de los gases de salida. Para abordar este desafío, algunos científicos han desarrollado modelos matemáticos de solución iterativa para evaluar los posibles cambios en el calentamiento de las palanquillas y optimizar el proceso [3], [2].

III-B3. ¿Qué mejoras traen estas tecnologías frente a la combustión con aire?

Según la revisión de los artículos, la aplicación de tecnologías como el enriquecimiento de oxígeno y la oxicomustión genera mejoras significativas en la eficiencia de combustión, un aumento en la productividad y una reducción de las emisiones gaseosas entre un 11.1 % y 15.2 %. Esta disminución de las emisiones se debe a la reducción del nitrógeno en el aire de combustión y a su eliminación total en el caso de la oxicomustión. Como resultado, los gases de salida del proceso se ven considerablemente reducidos. Sin embargo, es importante resaltar que, al aplicar el enriquecimiento de aire, los estudios indican un aumento en la concentración de gases nitrogenados (NO_x), alcanzando hasta 20 veces más cuando el aire se enriquece con un 38 % de oxígeno. Este incremento se debe al aumento de la temperatura de la llama, lo que favorece la cinética de reacción de estos gases. Por el contrario, en la oxicomustión, el nivel de NO_x se reduce debido a la ausencia de nitrógeno en el proceso de combustión [2], [5], [8], [12]. Además, la velocidad de calentamiento se constituye como una mejora relevante al implementar estas tecnologías. Por ejemplo, un enriquecimiento del 3 %, que corresponde a un 24 % de oxígeno en el proceso de combustión, reduce el tiempo de calentamiento en un 83.3 % en comparación con el uso de aire con un 21 % de oxígeno. Este tiempo disminuye aún más conforme aumenta el porcentaje de oxígeno, alcanzando una reducción del 46.4 % cuando el enriquecimiento llega al 30 %, en comparación con el aire al 21 % [12], [13].

Otro aspecto destacado es el incremento de la transferencia de calor por radiación, ya que se genera una mayor energía radiante. Esto se debe a que el núcleo de la llama adquiere un color amarillo brillante, a diferencia de la llama con aire al 21 % de oxígeno, que presenta un núcleo azul con puntas rojas o amarillentas. A medida que el porcentaje de oxígeno se incrementa, las llamas se vuelven más estables, nítidas y brillantes, optimizando aún más el proceso de combustión [10]. En este contexto, varios estudios recomiendan controlar variables operativas como la presión interna del horno, el ratio aire/combustible, el tipo de quemador y el proceso en el que se implementará esta tecnología. De este modo, se asegura obtener los mejores resultados en términos de eficiencia de combustión, reducción de NO_x y prevención de posibles problemas operacionales, como el aumento excesivo de la temperatura de la llama, la alta velocidad de calentamiento o las variaciones en

la ignición debido a las mezclas enriquecidas de oxígeno [7], [10], [15].

Es relevante destacar que las mejoras observadas son más notorias cuando el combustible utilizado es un gas, ya que el combustible y el comburente se encuentran en el mismo estado, lo que facilita la reacción de combustión. Sin embargo, también es necesario evaluar el impacto en los procesos que emplean recuperadores de calor. Al reducir la temperatura y el volumen de los gases de salida, la temperatura del aire recuperado disminuye, lo que a su vez reduce la eficiencia del sistema. Este análisis es crucial para determinar el porcentaje óptimo de enriquecimiento de oxígeno que se debe aplicar en hornos de recalentamiento, los cuales comúnmente aprovechan la energía residual para precalentar el aire de combustión [2], [18].

Finalmente, las tecnologías que incorporan oxígeno en la combustión industrial para procesos de recalentamiento de palanquillas están adquiriendo una mayor relevancia debido a su alta eficacia para mitigar la escasez de energía y reducir el elevado consumo energético en el sector siderúrgico. Además, representan una solución clave para enfrentar los desafíos ambientales, cada vez más regulados por entidades gubernamentales en distintos países. Otro aspecto fundamental a considerar en la adopción de estas tecnologías es la relación costo-beneficio entre el combustible y el oxígeno, especialmente cuando el objetivo es únicamente el ahorro de combustible. No obstante, es esencial ampliar la perspectiva y evaluar el impacto en el aumento de la productividad que estas tecnologías pueden generar. Este incremento en la eficiencia y la producción puede mejorar significativamente el margen de utilidad, lo que convierte el análisis económico en un proceso más complejo que una simple comparación de precios entre el oxígeno y el combustible [2], [3].

IV-B4. ¿Qué se espera que mejore o se cumpla al implementar estas tecnologías?

Se espera que la implementación de estas tecnologías conduzca a un aumento en la eficiencia de la combustión y a una mejora en la productividad de los procesos de calentamiento, como lo confirman los artículos revisados. En este sentido, se han logrado incrementos de hasta un 19.7% en la eficiencia de combustión con un enriquecimiento del 8%, y de un 26.8% utilizando la tecnología de oxicomustión [2], [3], [5], [13].

La implementación de estas tecnologías también ofrece beneficios adicionales, como la reducción de los gases de combustión, la disminución de las emisiones atmosféricas, la mejora en la homogeneidad del calentamiento de las palanquillas y la reducción de NO_x en los procesos de oxicomustión. En contraste, en los procesos de enriquecimiento de oxígeno, se observa un incremento en los niveles de NO_x, el cual depende tanto del tipo de quemador como de las condiciones operativas del proceso. Es importante señalar que existe un umbral de dependencia en la formación de CO y hollín cuando aumentan los niveles de enriquecimiento de oxígeno. Este fenómeno ocurre cuando las concentraciones

de N₂ en la mezcla alcanzan aproximadamente el 30%, lo que genera una formación abrupta de hollín debido a cambios en la velocidad de reacción, un aumento en la temperatura y variaciones en la estequiometría local de la combustión.

V. CONCLUSIÓN

En conclusión, este estudio ha analizado la aplicación de la tecnología de enriquecimiento de oxígeno en los procesos de combustión de los hornos de recalentamiento para la laminación en caliente, con un enfoque en su impacto sobre la productividad, eficiencia de la combustión, homogeneidad en el calentamiento y las emisiones atmosféricas.

Los estudios revisados revelan que el enriquecimiento del aire varía entre un 4 % y un 9 %, lo que resulta en una concentración de oxígeno en el aire de entre el 25 % y el 30 %. En el caso de la oxicomustión, se utiliza oxígeno puro al 100 % a través de quemadores específicamente diseñados para este proceso. La mayoría de las investigaciones coinciden en que ambas tecnologías mejoran la eficiencia de combustión y reducen el consumo de combustible en comparación con los procesos convencionales que emplean aire con un 21 % de oxígeno. La oxicomustión, además, muestra mejores resultados en la reducción del consumo de gas, ya que elimina el nitrógeno en la combustión, reduciendo así la cantidad de gases de combustión emitidos.

El enriquecimiento del aire es la técnica más utilizada debido a su menor costo de inversión y bajo impacto en los equipos de combustión y hornos de recalentamiento. Por otro lado, aunque la oxicomustión ofrece beneficios superiores en términos de reducción de gas y emisiones, su adopción es más limitada debido a los mayores costos de inversión y los riesgos operacionales asociados. En la industria siderúrgica, la oxicomustión se utiliza principalmente en el calentamiento de cucharas para la recepción de acero líquido, aunque también encuentra aplicación en la fusión de vidrio y la clinkerización en la industria del cemento.

En cuanto a las mejoras ambientales, se destaca la reducción de gases de efecto invernadero, como el CO₂, y el ahorro de combustible al emplear oxígeno enriquecido. Sin embargo, esta tecnología puede incrementar las emisiones de NO_x debido a la mayor temperatura de la llama, lo que favorece la formación de estos gases. A pesar de ello, la oxicomustión contribuye a reducir las emisiones de NO_x al eliminar el nitrógeno en el proceso de combustión. Aunque existen investigaciones teóricas que abordan la reducción de gases y el aumento de la productividad, aún son necesarios estudios experimentales en el sector siderúrgico, particularmente en los hornos de recalentamiento, que son los mayores consumidores de energía térmica. Es fundamental continuar investigando el límite de enriquecimiento en estos procesos y evaluar los beneficios operacionales y el ahorro potencial, asegurando que no se generen riesgos adicionales.

AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

A la Universidad Tecnológica del Perú, por el apoyo en el pago del artículo.

REFERENCIAS

- [1] P. Skryja, I. Hudak, J. Bojanovsky, Z. Jegla, and L. Korček, "Effects of Oxygen-Enhanced Combustion Methods on Combustion Characteristics of Non Premixed Swirling Flames," *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 6, 2022, doi: 10.3390/en15062292.
- [2] K. P. Cacia Madero and B. A. Herrera Munera, "Revision de la combustión AEO," *Facultad De Ingenieria - Universidad de Bogota*, vol. 1, pp. 1–20, 2013.
- [3] Y. Khalid et al., "Oxygen enrichment combustion to reduce fossil energy consumption and emissions in hot rolling steel production," *J Clean Prod*, vol. 320, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.128714.
- [4] X. M. Wang, X. L. Wu, and W. Q. Zhou, "Analysis of oxygen enriched combustion characteristic of 350 mw utility boiler based on computational fluid dynamics," *Metalurgija*, vol. 58, no. 3–4, pp. 223–227, 2019.
- [5] W. Wang, F. Li, and H. Wang, "Numerical simulation study on the effect of different oxygen-enrichment atmospheres on diesel combustion," *Energy*, vol. 266, 2023, doi: 10.1016/j.energy.2022.126474.
- [6] S. V. Joshi, J. S. Becker, and G. C. Lytle, "EFFECTS OF OXYGEN ENRICHMENT ON THE PERFORMANCE OF AIR-FUEL BURNERS," Allentown, Pensilvania, USA, 2011.
- [7] K. K. Wu, Y. C. Chang, C. H. Chen, and Y. Da Chen, "High-efficiency combustion of natural gas with 21–30% oxygen-enriched air," *Fuel*, vol. 89, no. 9, pp. 2455–2462, 2010, doi: 10.1016/j.fuel.2010.02.002.
- [8] F. A. D. Oliveira, J. A. Carvalho, P. M. Sobrinho, and A. de Castro, "Analysis of oxy-fuel combustion as an alternative to combustion with air in metal reheating furnaces," *Energy*, vol. 78, pp. 290–297, Dec. 2014, doi: 10.1016/J.ENERGY.2014.10.010.
- [9] Y. Díaz, "Hornos de calentamiento reheat furnaces." [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/308682829>
- [10] C. G. Palencia, J. Carlos, A. Arrieta, A. Adolfo, C. Sierra, and F. Javier, "Características de la combustión con aire enriquecido con oxígeno y perspectivas de aplicación en PYME con procesos de alta temperatura," *Ingeniería E Investigación*, vol. 29, pp. 23–28, 2009, [Online]. Available: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=64319330004>
- [11] B. Alabaş, G. Tunç, M. Taştan, and İ. Yilmaz, "Experimental investigation of the oxygen enrichment in synthetic gases flames," *Fuel*, vol. 270, 2020, doi: 10.1016/j.fuel.2020.117482.
- [12] R. Prieler, B. Mayr, M. Demuth, B. Holleis, and C. Hochenauer, "Numerical analysis of the transient heating of steel billets and the combustion process under air-fired and oxygen enriched conditions," *Appl Therm Eng*, vol. 103, pp. 252–263, Jun. 2016, doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2016.04.091.
- [13] Y. Khalid et al., "Oxygen enrichment combustion to reduce fossil energy consumption and emissions in hot rolling steel production," *J Clean Prod*, vol. 320, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.128714.
- [14] B. Herrera, J. Rivas, J. Muñoz, and K. Cacia, "Effect of the combustion system on reduction of thermal specific energy consumption in an industrial high temperature process," *DYNA (Colombia)*, vol. 88, no. 217, pp. 273–281, Apr. 2021, doi: 10.15446/dyna.v88n217.93030.
- [15] C. K. Tan, J. Jenkins, J. Ward, J. Broughton, and A. Heeley, "Zone modelling of the thermal performances of a large-scale bloom reheating

furnace,” *Appl Therm Eng*, vol. 50, no. 1, pp. 1111–1118, Jan. 2013, doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2012.06.046.

- [16] S. Chakchak, A. Hidouri, A. Ghabi, A. F. Ghoniem, and T. Boushaki, “Experimental investigation on the stability of turbulent swirling methane/air-O₂ flames,” *Exp Therm Fluid Sci*, vol. 141, p. 110772, Feb. 2023, doi: 10.1016/J.EXPTHERMFLUSCI.2022.110772.
- [17] H. J. Karimi and M. H. Saidi, “Heat Transfer and Energy Analysis of a Pusher Type Reheating Furnace Using Oxygen Enhanced Air for Combustion,” *Journal of Iron and Steel Research International*, vol. 17, no. 4, pp. 12–17, Apr. 2010, doi: 10.1016/S1006-706X(10)60079-9.
- [18] R. Edland, T. Allgürén, F. Normann, and K. Andersson, “Formation of soot in oxygen-enriched turbulent propane flames at the technical scale,” *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 1, Jan. 2020, doi: 10.3390/en13010191.