

PROGRAMA:

Incremento del Grado de Madurez Tecnológico (TRL) de Sistemas Energéticos Sostenibles y Eficientes para la Transición Energética y la Reindustrialización del País

PROYECTO 105481:

Alistamiento de un sistema de combustión sin llama para aplicar en procesos de calentamiento de alta temperatura y de secado de materiales granulados no metálicos y fertilizantes, para pasar de un TRL 8 a un TRL 9

Informe Técnico:

Actualización del estado del arte sobre Combustión sin Llama

Elaborado por:

Camilo Echeverri Uribe

Juan Camilo Lezcano Benítez

Yefferson López Zuluaga

Iván Darío Bedoya Caro

Andrés Adolfo Amell Arrieta

Revisión y aprobación:

Iván Darío Bedoya Caro

Andrés A. Amell Arrieta

Tabla de contenido

1. Introducción	3
2. Tendencias fabricantes de sistemas de combustión sin llama.....	4
2.1. Componente experimental	4
2.2. Componente simulación.....	10
2.3. Recopilación de empresas.....	18
3. Estado del Arte de los Sistemas Auto-Recuperativos y Auto-Regenerativos de Calor para Sistemas de Combustión Sin Llama.....	20
3.1. Marco teórico.....	20
3.1.1. Calor de desecho	20
3.1.2. Almacenamiento de energía térmica.....	21
3.1.3. Sistemas de combustión auto-regenerativos y auto-recuperativos.....	26
3.2. Trabajos desarrollados por el grupo Gasure y Universidad de Antioquia en sistemas de recuperación de calor.	28
3.2.1. Experimental	28
3.2.2. Teórico y Numérico	33
4. Conclusiones.....	38
Referencias.....	39
5. Régimen de combustión sin llama utilizando biogás como combustible.....	44
5.1. Referencias combustión sin llama y biogás	49
6. Régimen de combustión sin llama utilizando mezclas hidrógeno/gas natural como combustible 50	
6.1. Referencias combustión sin llama y blending H ₂ /GN.....	53
7. Desarrollos recientes en combustión sin llama para procesos de alta temperatura.....	56
7.1. Referencias combustión sin llama otros procesos de alta temperatura	59

1. Introducción

Dentro del proyecto “Alistamiento de un sistema de combustión sin llama para aplicar en procesos de calentamiento de alta temperatura y de secado de materiales granulados no metálicos y fertilizantes, para pasar de un TRL 8 a un TRL 9”, se tiene como objetivo principal implementar estudios fenomenológicos, ajustes de configuración y evaluaciones experimentales en ambiente real, de un sistema de combustión sin llama aplicado a procesos de calentamiento de alta temperatura, secado de material granulados o fertilizantes. El sistema operará con gas natural como combustible, aunque se estudiará la factibilidad del uso de combustibles de bajo carbono como lo son el hidrógeno y el biogás.

En este documento se presenta un avance acerca de las tendencias clave en tecnologías de combustión sin llama, así como de tendencias en relación con uso de materiales. Lo anterior, con base en la de información secundaria de fabricantes de quemadores u hornos.

Por otra parte, se hace una revisión de la recuperación de calor de desecho en los sistemas térmicos, siendo éste un aspecto importante para ayudar a aumentar la eficiencia de dichos sistemas, lo cual contribuye a la reducción del consumo de combustible permitiendo por esta vía tener una reducción de las emisiones de CO₂, las cuales en los últimos años han sido objeto preocupación debido a que estas emisiones están asociadas con el fenómeno ambiental llamado “efecto invernadero” que está causando el cambio climático del planeta.

El calor de desecho es la energía que está asociada con los flujos de aire, gases de combustión y líquidos que salen de un sistema industrial e ingresan al ambiente. Aunque hay una razón ambiental por la cual es relevante intentar recuperar parte del calor de desecho, un incentivo muy importante es el económico, ya que todo el calor que se recupere sustituye parte de la energía que debe comprarse ya sea en forma de combustible o en otra forma diferente.

Finalmente, se hace una revisión actualizada del estado del arte sobre la tecnología de combustión sin llama con un enfoque en el uso de los combustibles hidrógeno y biogás, además de sus aplicaciones en procesos de alta temperatura. Con esto se busca un mejor acercamiento a la fenomenología implícita que se debe tener en cuenta a la hora de realizar ajustes a procesos de calentamiento cuando se requiere una operación con combustibles de bajo carbono, comenzando desde su estudio teórico, pasando por el uso de herramientas computacionales hasta sus aplicaciones en condiciones de ambiente real o de laboratorio.

2. Tendencias fabricantes de sistemas de combustión sin llama

2.1. Componente experimental

Con respecto al desarrollo de tecnologías de quemadores autorecuperativos y autoregenerativos, la empresa italiana Tenova SpA [1, 2] ha desarrollado la tecnología SmartBurner la cual usa un concepto llamado Hydrogen Ready que consiste en que los quemadores que desarrollan tienen la capacidad de funcionar con porcentajes de hidrógeno que van de 0% a 100%. Dentro de los quemadores desarrollados se encuentran las siguientes familias

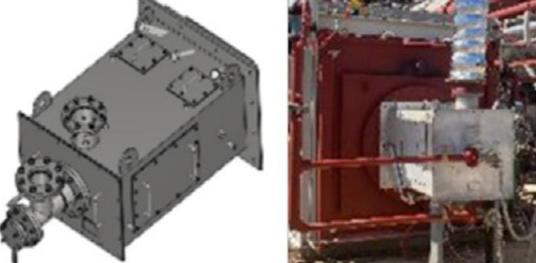
<p>TRKSX – quemador flameless auto-recuperativo para tratamientos térmicos.</p> 	<p>TRGX – quemador flameless regenerativo para hornos de recalentamiento.</p> 
<p>TSX – Quemador flameless lateral para hornos de recalentamiento.</p> 	<p>THSQ – quemador lateral de aire precalentado para hornos de recocido.</p> 

Figura 1. Familias de quemadores “Hydrogen Ready” desarrolladas por Tenova. Adaptado de [1]

Es importante notar que usan un concepto de eficiencia del quemador que viene dada por la Ecuación 1, la cual viene en términos de la masa de gases recirculados (wgr – wasted gas recirculated). Esta definición no es usual para definir la eficiencia de los quemadores.

$\eta_b = 1 - \frac{\dot{m}_{wgr} h_{wgr}}{\dot{m}_f LCV}$	<p>Ecuación 1</p>
--	-------------------

La familia de quemadores auto-recuperativos TRKSX fueron implementados en una empresa de la industria del acero (TenarisDalmine en la planta ubicada Bérghamo, Italia), donde se implementaron 34 de estos quemadores para un horno de tratamiento de barras de acero de 12 m de longitud.

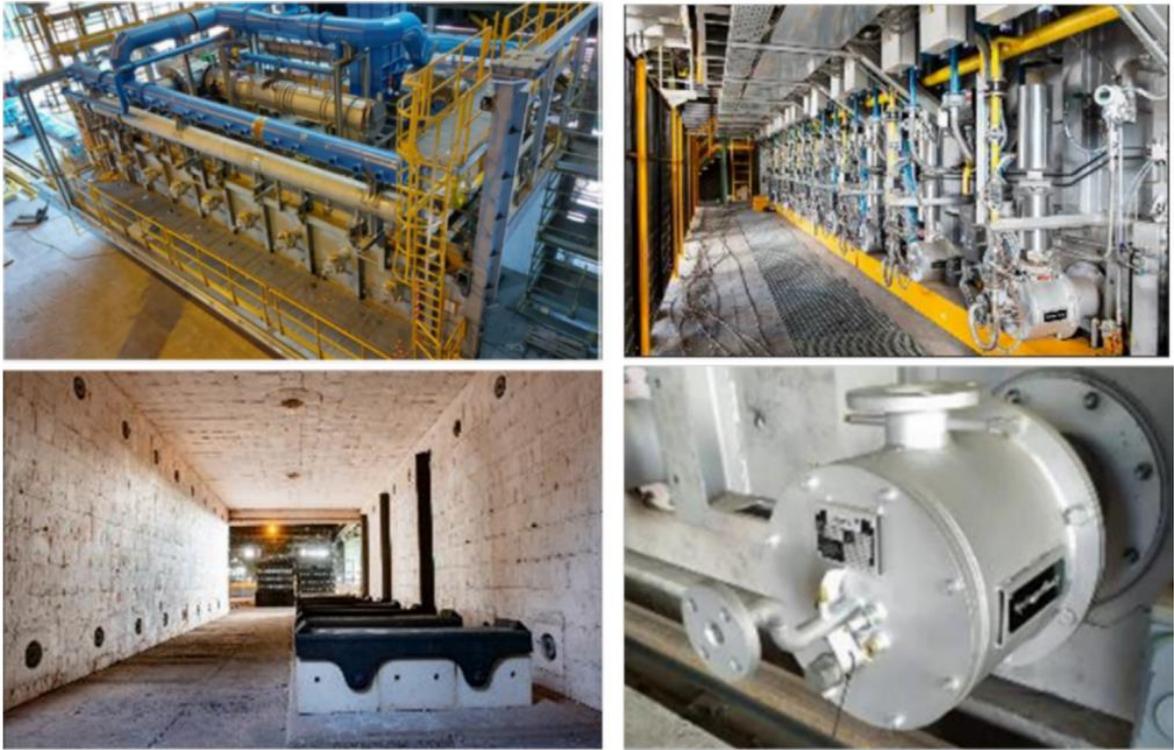


Figura 2. Horno equipado con 34 quemadores TRKSX en la empresa Tenaris. Tomado de [1].

Tenova en sus quemadores hace uso de una infraestructura llamada SmartBurner la cual tiene una unidad llama AlphaEdge IIoT la cual colecta datos desde sensores de baja frecuencia (flujo volumétrico, presión, temperatura) y además post-procesa datos de alta frecuencia (vibraciones y señales ópticas). Estos datos en tiempo real se colectan por otro módulo llamado TenovaEdge y se almacenan en la nube de Tenova como se muestra en la Figura 3.

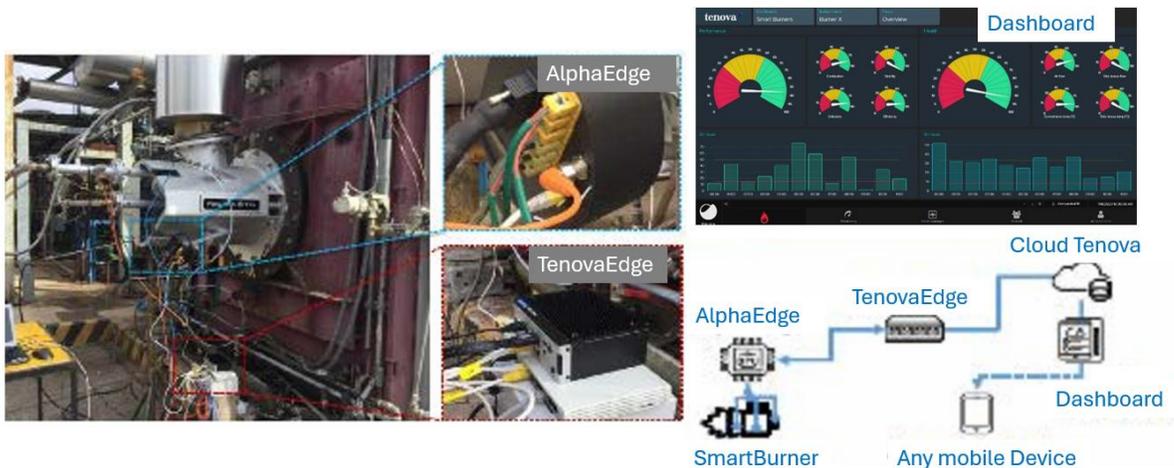


Figura 3. Infraestructura de Tenova SmartBurner en un quemador TSX en un horno de prueba. Adaptado de [2]

En la Figura 4, Figura 5, y Figura 6 se muestran las emisiones de NO_x de los quemadores TSX, THSQ, y TRKSX respectivamente. Las emisiones se presentan en función del porcentaje de

Prohibida la reproducción total o parcial de este documento sin la autorización de las entidades que tienen derecho de propiedad intelectual sobre el documento.

hidrógeno, donde se muestra que hay una tendencia al incremento de NO_x al aumentar el porcentaje de hidrógeno cuando se opera en modo llama, pero cuando se opera en modo combustión sin llama, estas emisiones permanecen casi estables al aumentar el porcentaje de hidrógeno y por lo general hay una reducción de mínimo un 60% en estas emisiones.

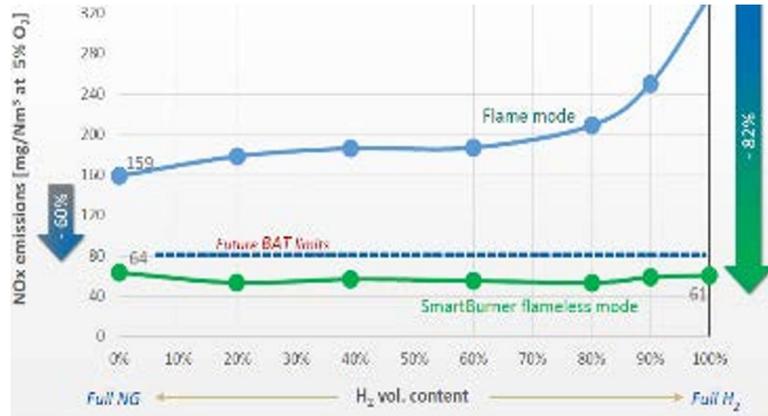


Figura 4. Emisiones de NO_x en función del porcentaje de hidrógeno para el quemador TSX operando en modo llama y en modo sin llama. Tomado de [2]

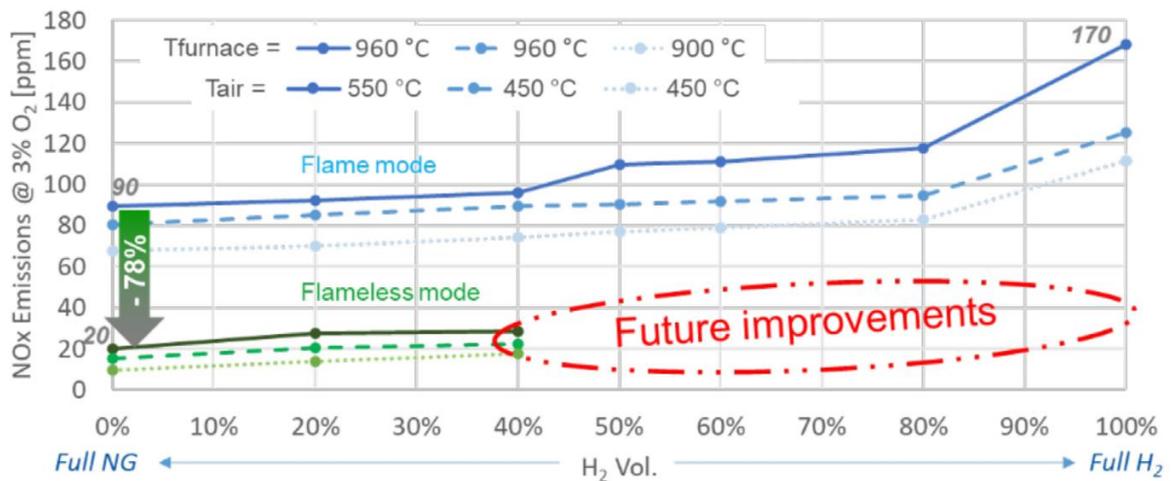


Figura 5. Emisiones de NO_x en función del porcentaje de hidrógeno para el quemador THSQ operando en modo llama y en modo sin llama. Tomado de [1].

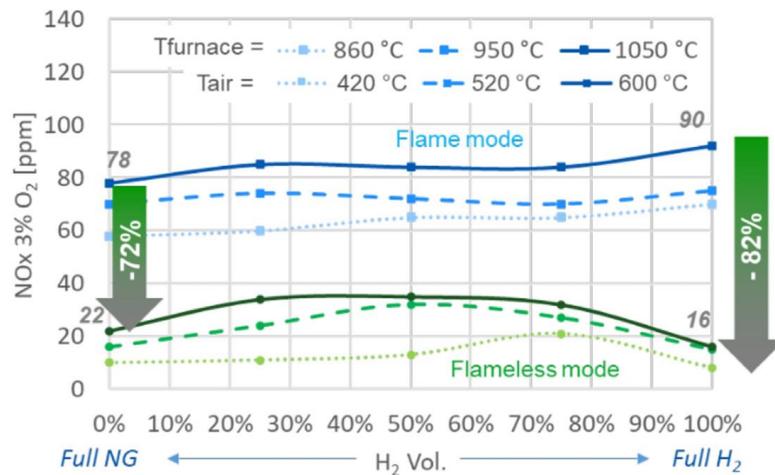


Figura 6. Emisiones de NOx en función del porcentaje de hidrógeno para el quemador TRKSX operando en modo llama y en modo sin llama. Tomado de [1]

Es importante mencionar que las pruebas de los quemadores las realizan en unas instalaciones de una institución llama “Centro Combustione Ambiente” [3] la cual es una compañía italiana que asiste en el desarrollo de productos y tecnología para el sector energético.

Por otro lado, Tenova hace parte de una asociación de cooperación que desarrolló un proyecto llamado *Burner 4.0* [4, 5] el cual se llevó a cabo durante los años 2019-2023, aunque la información al desarrollo y resultados de dicho proyecto no es fácilmente accesible. Este proyecto tiene por objeto combinar tecnologías de la industria 4.0 y aplicarlas a diferentes áreas, tales como optimización de procesos y mantenimiento predictivo para mejorar los sistemas de combustión conduciendo a un concepto de quemador disruptivo para la industria de acero, empelando Internet of Things (IoT), sensores inteligentes, analítica *Big Data* entre otros. Esta asociación está compuesta, entre otros un productor de tecnologías de combustión (Tenova), una universidad (el Politecnico di Milano), 3 productores de acero (ArcelorMittal, Dalmine SpA, Silcotub) y 4 países representados (Italia, España, Grecia y Rumania).

Uno de los frentes muy importantes del proyecto *Burner 4.0* es la manufactura aditiva, donde por medio de simulaciones CFD generan geometrías optimizadas para sistemas de intercambio de calor que se vuelven viables en su fabricación por medio de esta técnica. Los materiales que han usado para fabricar los intercambiadores son AISI310S y IN625

Tabla 1. Propiedades del acero AISI310S y la aleación IN625 [6, 7]

Propiedades	AISI310S	IN625 (Inconel 625)
Densidad (kg/m ³)	8000	8440
Módulo de elasticidad (GPa)	200	208
Calor específico (J/kg K)	500	410
Conductividad térmica (W/m K)	14.2	9.8
Punto de fusión (°C)	1400	1290

En la Figura 7 se muestra un ejemplo de la geometría de un recuperador cuya forma se produjo través de simulaciones CFD optimizando la transferencia de calor conjugada y la caída de presión. Después de tener la geometría, su fabricación es posible gracias a la técnica de fabricación aditiva.

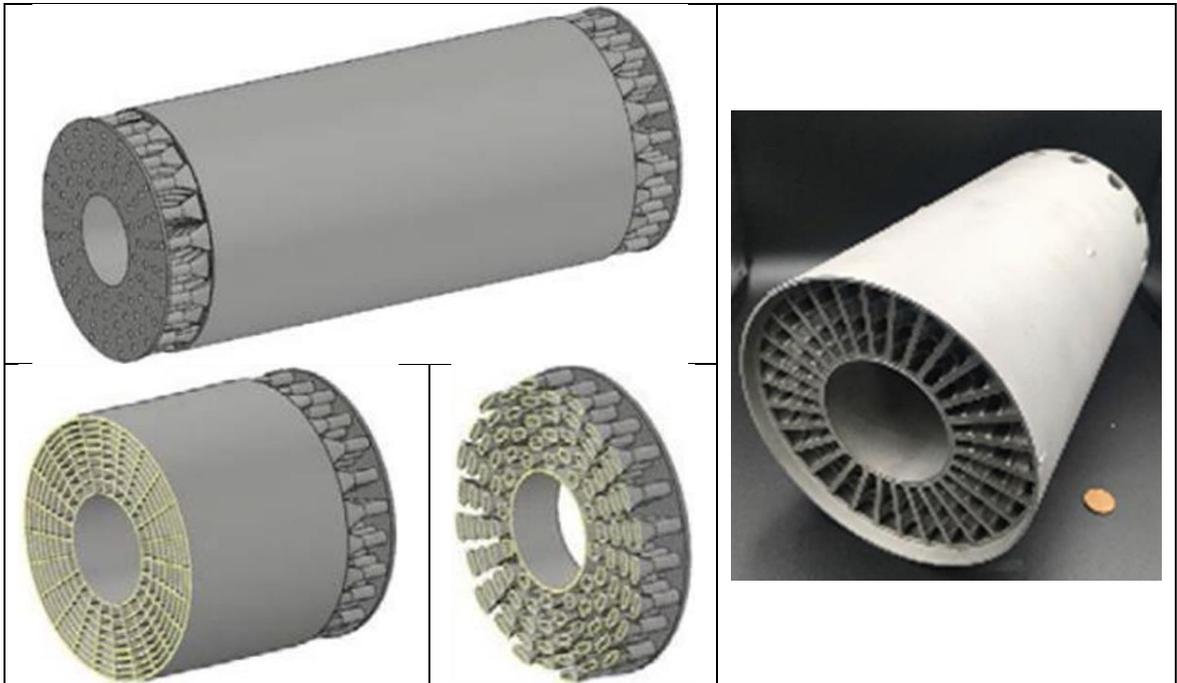


Figura 7. Ejemplo de recuperador producir por medio de manufactura aditiva en el marco del proyecto Burner 4.0 [4].

Tenova ha implementado sus quemadores desarrollados en diferentes países, en la Tabla 2 se muestran algunos ejemplos de lugares donde esta compañía ha empleado sus quemadores regenerativos y auto-regenerativos con regeneradores de bolas y tipo honeycomb.

Tabla 2. Resultados operativos de quemadores regenerativos TRGX y auto-regenerativos instalados. HC, Regenerador tipo honeycomb. B, regenerador tipo bolas. SR-HC auto-regenerador tipo honeycomb. Adaptado de [8]

Customer	Country	Year	Furnace type	Fuel	Burners	Regen.	CO2 saved
Customer F	India	2019	WBF 30t/h	NG	#20 TRG12	HC	N.A.
Customer E	Germany	2016	WBF 360 t/h	NG	#14 TRGX22 #6 TRGX18 #8 TRGX 16	B	> 25.000 tons
Customer D	TX (USA)	2014	RHF 170 t/h	NG	#38 TRGX16 #8 TRGX14 #8 TRGX12 #8 TRGX10	B	> 30.000 tons
Customer C	PA (USA)	2012	#4 Car Bottom Furnaces	NG	#32 TRG12	HC	> 25.000 tons
Customer B	Italy	2010	RHF 220 t/h	NG	#35 TRGX16 #20 TRGX14	B	> 60.000 tons
Customer A	CA (USA)	2009	WBF 270t/h	NG	#16 TRGX20 #16 TRGX14	B	> 90.000 tons
Customer C	TX (USA)	2013	Heat-treatment Line	NG	#80 TRGS2 #60 TRGS4 #60 TRGS6	SR-HC	> 11.000 tons
Customer B	Mexico	2013	Heat-treatment Line	NG	#22 TRGS2 #40 TRGS4 #40 TRGS6 #20 TRGS8	SR-HC	> 8.500 tons
Customer A	Mexico	2013	Heat-treatment Line	NG	#20 TRGS2 #40 TRGS4 #20 TRGS6	SR-HC	> 5.000 tons

Por otro lado, Fan et al [9] han desarrollado un tipo de quemador recuperativo el cual han aplicado a un sistema de tubo radiante sin combustión sin llama, pero el concepto en sí mismo podría ser empleado para otro tipo de horno con la tecnología de combustión sin llama. En la Figura 8 se muestra la configuración del sistema, el cual consiste en un quemador y aparte de este hay un intercambiador de calor donde los gases de combustión ceden parte de su energía al aire de combustión, antes de que este último llegue al quemador, de tal forma que hay un aumento de la eficiencia térmica del sistema, pero además, el aire antes de abandonar el recuperador genera un jet que puede arrastrar parte de los productos de combustión, de tal forma que se puede obtener una combustión diluida por medio de una especie de recirculación externa.

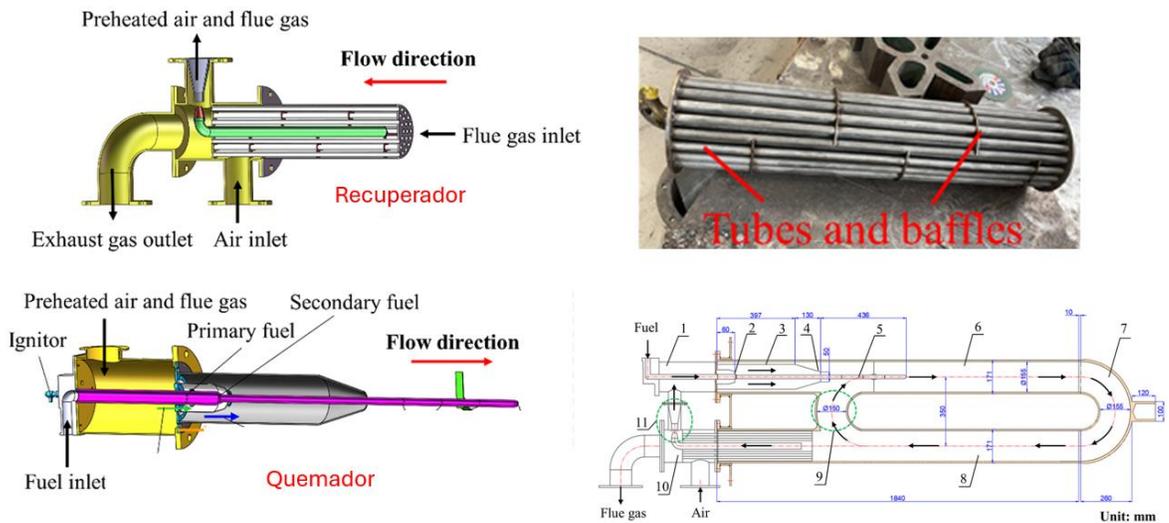


Figura 8. Sistema de quemador recuperativo que funciona en 2 partes separadas, una que corresponde al quemador y otra que corresponde al recuperador.

2.2. Componente simulación

En el campo de la simulación numérica en el proyecto Burner 4.0 [5] han desarrollado una configuración de quemador auto-recuperativo, donde por medio de simulaciones CFD paramétricas probaron muchas configuraciones geométricas, en la Figura 9 se muestra un ejemplo de algunas de las geometrías simuladas y la geometría óptima finalmente obtenida. Debido a la complejidad de esta geometría, se hace uso de la manufactura aditiva para su construcción como se mostró en la Figura 7.

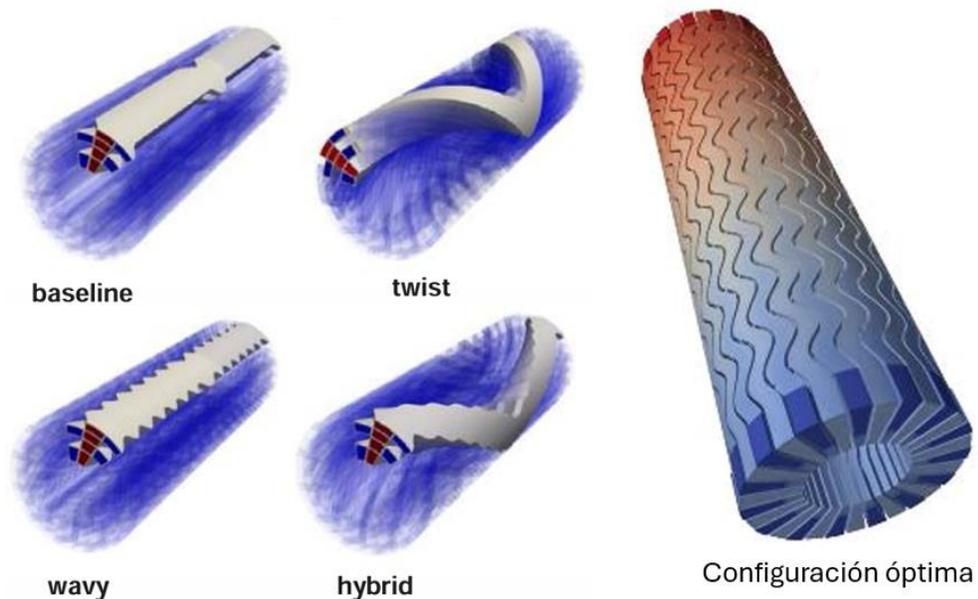


Figura 9. Algunas de las configuraciones de recuperador probadas y la configuración óptima obtenida. Adaptado de [4].

Otro trabajo interesante es el desarrollado por Dinising et al [10] en la Universidad RWTH Aachen, quienes modelaron por medio del software Fluent una sección de recuperador del quemador Rekumat® M250 desarrollado por la empresa alemana WS [11], pionera en la tecnología de combustión sin llama. En este trabajo se usan mallados poligonales de hasta más de 10 millones de celdas para realizar el análisis numérico del recuperador, para lo cual emplean el modelo k-ε realizable para la turbulencia con funciones de pared mejoradas. Usan el modelo de Ordenadas discretas para modelar la radiación en conjunto con el modelo WSGGM para modelar la absorptividad de los gases. Además, usan el modelo GRI-Mech 3.0 para modelar el transporte de las especies químicas, aunque es importante mencionar que las simulaciones que hacen no involucran reacciones químicas. Después a partir de múltiples simulaciones variando la temperatura de entrada de los gases al recuperador y los flujos obtienen un modelo simplificado con el cual realizan simulaciones simplificadas 3D (con muchas menos celdas) donde por medio de términos fuente y medios porosos modelan la transferencia de calor y la caída de presión sin tener que hacer el mallado completo con aletas, el cual requiere gran cantidad de celdas.

En la Figura 10 se muestra una imagen del quemador Rekumat M250 junto con el CAD del modelo detallado del recuperador y el CAD del modelo simplificado del recuperador.

Es importante notar que Dinising et al mencionan que el quemador Rekumat es un quemador que está en el estado del arte de los quemadores auto-recuperativos.

Con respecto al material del recuperador, está hecho de acero resistente al calor 1.4857, el cual tiene una temperatura de uso máxima de 1150°C.



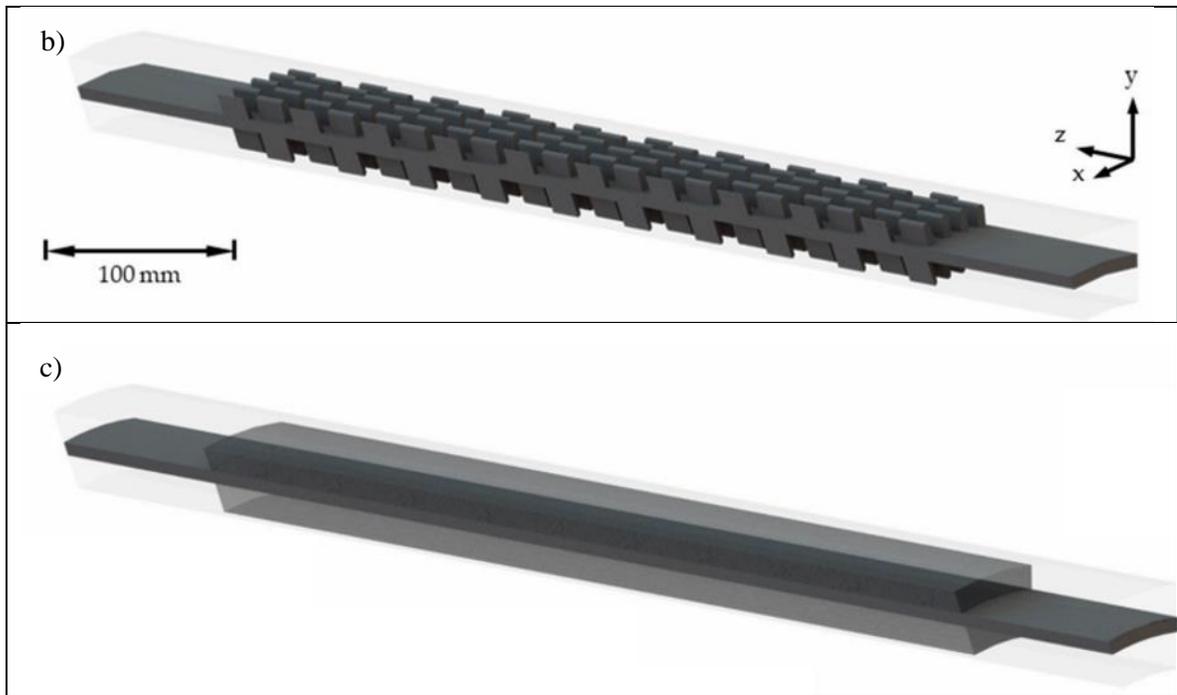


Figura 10. a) quemador Rekumat M250, b) modelo CAD de 20° del recuperador del quemador, y c) modelo simplificado sin aletas. Tomado de [10]

Como se mencionó anteriormente, algunos fabricantes utilizan software CFD para el desarrollo de sus tecnologías, algunos de ellos usan el software del ANSYS-Fluent, el cual es el software que el grupo GASURE ha utilizado a lo largo de los años para el diseño de los equipos de combustión y calentamiento de combustión avanzada y bajas emisiones. Dentro de las investigaciones realizadas por el grupo GASURE en los últimos 4 años en las que se realizaron estudios tanto numéricos como experimentales en sistemas de combustión sin llama se encuentran:

Cano et al. [12] realizaron investigaciones en un horno de combustión sin llama usando como combustible mezclas gas natural / hidrógeno en el rango 0-45% H₂ sin presentar ningún tipo de inestabilidad y sin utilizar precalentamiento del aire de combustión.

Lopez et al. [13] estudiaron el efecto de la inyección del vapor de agua a un horno de combustión sin llama mostrando que este es estable siempre que la relación másica de agua entrante y masa de combustible esté por debajo de 2,5, pero al enriquecer el aire con oxígeno incrementa la cantidad de agua que puede inyectarse al horno de combustión sin llama a un valor de 5,0.

Se desarrolló un proyecto de oxicomustión sin llama que por cuestiones de confidencialidad no se puede presentar información, pero sí se puede indicar que se logró obtener el régimen sin problemas de estabilidad de régimen y los materiales seleccionados soportaron las temperaturas logradas del orden de los 1400 °C.

En otra investigación se realizaron pruebas experimentales para llevar a cabo un proceso de calcinación de la caliza para la obtención de cal a través de la reacción $\text{CaCO}_3 \xrightarrow{\Delta} \text{CaO} + \text{CO}_2$ $\Delta H = 178 \text{ kJ/mol}$ en donde entre los resultados más destacados se tiene que el sistema de combustión sin llama es completamente funcional para llevar a cabo el proceso de

calcinación si se opera con el tiempo adecuado para que se lleve a cabo la reacción y, por otro lado, se realizaron pruebas usando como comburente aire normal y oxígeno puro en régimen de combustión sin llama para llevar a cabo el proceso de calcinación en el horno de combustión sin llama encontrando que al usar aire normal se tiene una conversión 5.6 veces menor en comparación con el oxígeno puro.

Con base en los estudios anteriores, se observa que el grupo GASURE está en el estado del arte en lo que a combustión sin llama se refiere, dado que fabricantes como la empresa TENOVA han implementado herramientas CFD para el diseño de sus quemadores y analizado el uso de mezclas gas natural / hidrógeno; en la Figura 11 se presenta un resultado de las simulaciones numéricas CFD en donde se presenta el perfil de temperatura del quemador con gas natural, hidrógeno y mezclas gas natural/hidrógeno. Si bien se presentan resultados con hidrógeno puro, en la ficha técnica del quemador recuperativo no se indica que opera con hidrógeno puro como combustible.

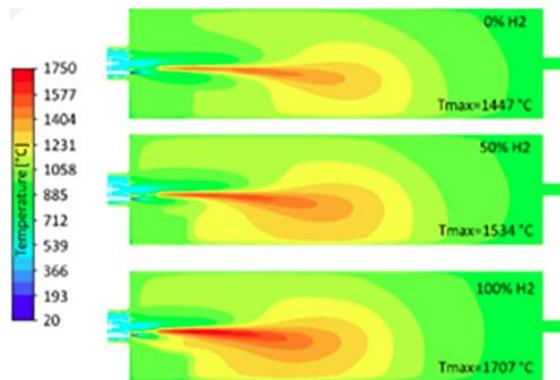


Figura 11. Simulación CDF del quemador TRKSX Self-Recuperative Flameless. Tomada de [14]

Asimismo, la empresa TENOVA utiliza el CFD con el fin de identificar lo que estos llaman la región de temperatura caliente y con ello diseñar el volumen de la cámara de combustión. En la Figura 12 se presenta un resultado de dichos análisis realizados por CFD para el quemador regenerativo

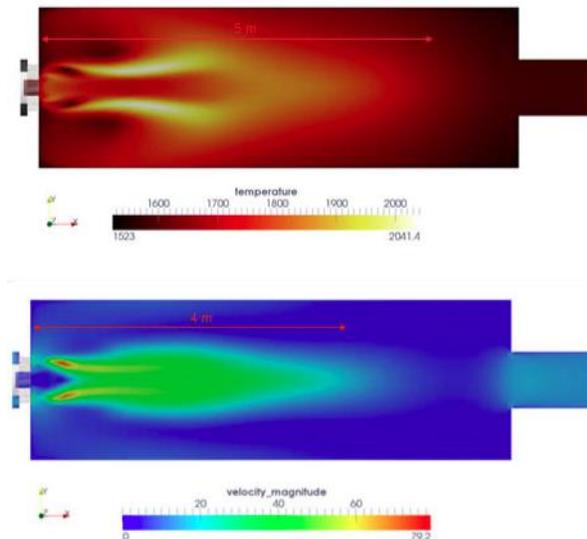


Figura 12. Simulación CDF del quemador TRGX Self-Regenerative Flameless. Tomada de [15]

Prohibida la reproducción total o parcial de este documento sin la autorización de las entidades que tienen derecho de propiedad intelectual sobre el documento.

Flox es otro de los fabricantes, al igual que TENOVA, que ofrece quemadores recuperativos y regenerativos que operan bajo el régimen de la combustión sin llama. Es importante mencionar que estos dos fabricantes utilizan sensores UV o de ionización cuando los quemadores se encuentran en modo llama; para el caso de la combustión sin llama se deben usar termopares ya que ninguno de los sensores anteriores permite establecer si hay reacción de liberación de calor o no.

Algo que se identifica en los quemadores comerciales de combustión sin llama con recuperación de calor, es que el recuperador y la cámara es que el cuerpo del recuperador puede fabricarse en carburo de silicio o acero inoxidable, de acuerdo con la temperatura a la cual va a operar el quemador, más aún cuando algunos de ellos están diseñados para operar con mezclas gas natural / hidrógeno.

En relación con investigaciones se encontró que Schwarz et al [16] estudiaron el desempeño de un sistema de combustión sin llama de escala semi-industrial de 100-140 kW con contenidos de hidrógeno desde 0% hasta 100%, en régimen de oxicomustión y usando como carga 6 lanzas de agua; los resultados mostraron que al cambiar el contenido de hidrógeno la distribución de temperatura fue muy similar para todas las mezclas evaluadas, además, cuando se operó con hidrógeno puro la temperatura cayó 126 K. Otro dato interesante que se menciona en este estudio es que la velocidad de salida de la boquilla de combustible aumenta en un factor de 3,47 para el hidrógeno puro en comparación con el gas natural. Por último, se menciona que el hidrógeno se puede utilizar sin problemas como sustituto del gas natural en procesos industriales de alta temperatura y cuando se utilizan quemadores de multi-oxicombustibles de alto impulso adecuadamente diseñados, se puede implementar un enriquecimiento de hidrógeno de hasta el 100% sin tener que hacer adaptaciones elaboradas a un horno de oxicomustión.

Lopez-Ruiz et a. [17] realizaron un estudio CFD de la combustión sin llama en un horno de recalentamiento industrial de 2.5 MW utilizando como combustible diferentes mezclas GN/H₂ con el software OpenFOAM. Los contenidos de hidrógeno en el gas natural fueron: 0%, 23%, 50% y 75%. La simulación consistió en resolver un modelo tridimensional en estado estable a través de las ecuaciones RANS con un total de 1.849.806 elementos, una media de no ortogonalidad de 3,4 y un factor de asimetría máximo de 2,07. Se usó el modelo NE-EDC para el acople de la química con la turbulencia. Los resultados mostraron que a pesar del incremento del contenido del hidrógeno en el gas natural, las emisiones de NO_x permanecieron relativamente bajas y, en general, de manera cualitativa se observó que se mantuvieron las características de la combustión sin llama.

Estudios CFD para optimización de sistemas de combustión y calentamiento

En el estado del arte se han realizado investigaciones CFD incluso con utilizando el software Fluent para analizar la mejor posición de quemadores dentro de una cámara de combustión de un horno a alta temperatura. Algunos de los estudios identificados son con llamas de quemadores convencionales, pero se logró identificar un autor que realiza investigaciones con quemadores que permiten la obtención de la combustión sin llama y con base al cual se están realizando los ajustes para replicar dicha simulación.

A continuación, se presentan brevemente los hallazgos más importantes en relación con estudios de análisis de diferentes configuraciones de quemadores en un horno:

El grupo GASURE ha realizado este tipo de estudios, en donde García y Amell [18] evaluaron numéricamente con simulaciones CFD en Ansys-Fluent un horno de recalentamiento de vigas

caminantes con el fin de instalar quemadores auto-recuperativos para el calentamiento de ballestas y combustión convencional. En primer lugar, se llevaron a cabo una simulación del proceso con quemadores convencionales con el fin de validar los modelos de combustión, turbulencia, etc., y posteriormente, realizar simulaciones numéricas de 3 configuraciones o condiciones para determinar la mejor de ubicación de quemadores auto-recuperativos en el horno. En la Figura 13 se presentan los contornos de temperatura obtenidos en estas simulaciones. Los resultados obtenidos de las simulaciones permitieron determinar que la mejor configuración corresponde a S3 con una eficiencia útil de 49.4%, respecto a 32.7% de la línea base (quemadores convencionales).

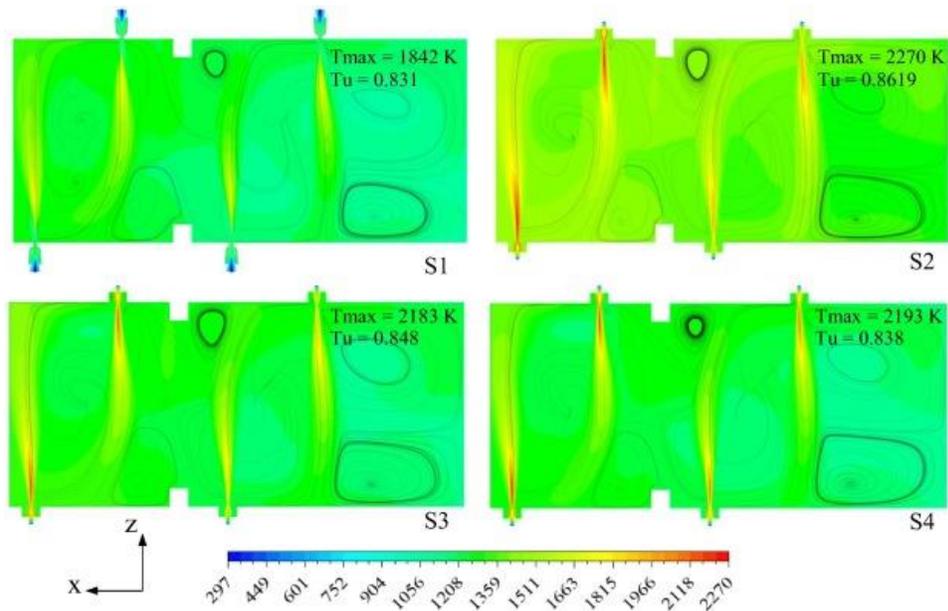


Figura 13. Contornos de temperatura de las simulaciones en horno de recalentamiento. Tomada de [18]

En un estudio realizado por Yan et al. [19] se analizó como en un horno para la sinterización de una función de plomo-zinc se afectaba la fluidodinámica y la temperatura al modificar el ángulo del quemador, la distancia entre estos, y optimizando parámetros del quemador como el área del flujo del aire en los quemadores y el arreglo de los mismos (cantidad de quemadores a un lado y al otro). Todo lo anterior, por medio de simulaciones CFD con el software Ansys 18. La cámara de combustión tiene una longitud de 2460 mm, un ancho de 2400 mm y una altura de 920 mm. Hay un espacio entre el carro en el medio de la cámara de combustión y la pared del horno. Para considerar la influencia de las fugas de aire en el horno, se define un puerto de fuga de aire en el proceso de simulación, y la altura del puerto de fuga de aire es de 20 mm. El carro se mueve de oeste a este, y se esparce una capa de material de sobre el carro con un espesor de 40 mm. Los resultados mostraron que aumentar el ángulo de inclinación de los quemadores mejora la temperatura promedio y uniformidad, aunque un ángulo excesivamente grande puede empeorar la uniformidad. Reducir la distancia entre quemadores mejora la uniformidad, pero disminuye la temperatura promedio, mientras que ajustar el área de flujo de aire de los quemadores principales mejora la distribución de la temperatura. Finalmente, con respecto al arreglo se encontró que 7+7 fue la de mejor rendimiento. En la Figura 14 se presenta el dominio computacional de la simulación, mientras que en la Figura 15 se presentan los vectores de velocidad para el análisis de la inclinación de los quemadores.

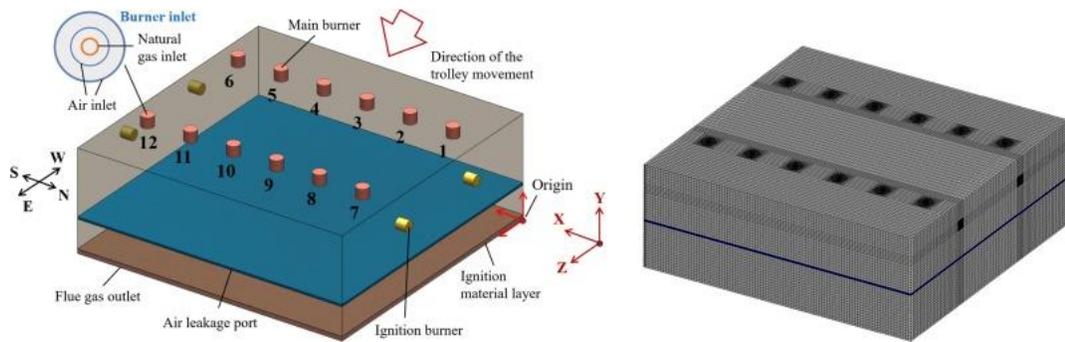


Figura 14. Dominio computacional para la simulación de un horno de sinterización. Tomada de [19]

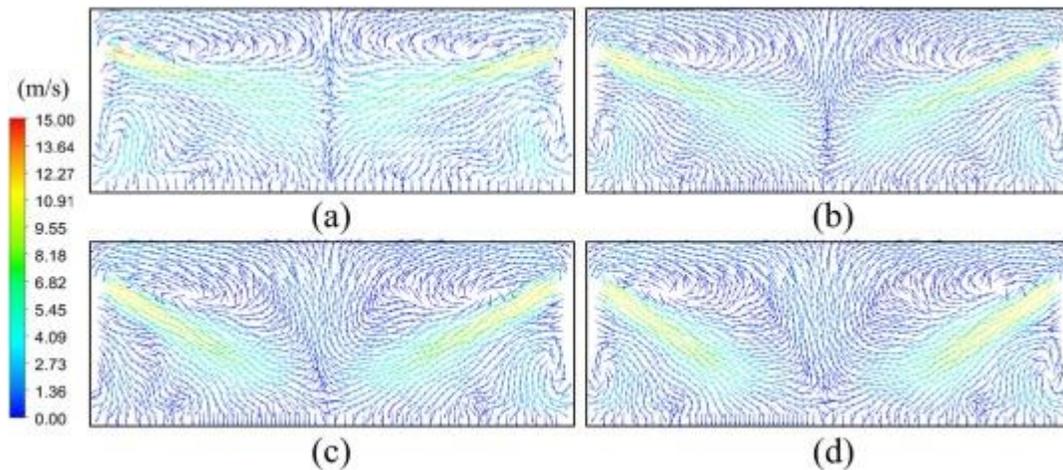


Figura 15. Vectores de velocidad en el horno de sinterización par diferentes ángulos de quemadores. Tomada de [19]

Otro estudio donde se estudian diferentes configuraciones de ubicación de quemadores es el de Danon et al. [20] en el que se estudiaron 5 configuraciones de posición de quemadores regenerativos y en régimen de combustión sin llama, en donde la carga es un ducto conformado por tubos concéntricos a través del cual fluye aire. En la Figura 16 se presentan algunas imágenes del dominio computacional y dimensiones del horno analizado. El combustible utilizado en las simulaciones es un ajuste al gas natural (DNG, por sus siglas en inglés) ya que éste contiene hidrocarburos pesados, por lo que para simplificarlo se buscó que ambos tengan el mismo poder calorífico. De acuerdo con los resultados la mejor opción fue la configuración C3, ya que fue la condición por medio de la cual se obtuvo la mayor uniformidad de temperatura. Los autores adicionalmente concluyen que las simulaciones numéricas permiten una mayor comprensión de los efectos que tienen las diferentes ubicaciones en el horno.

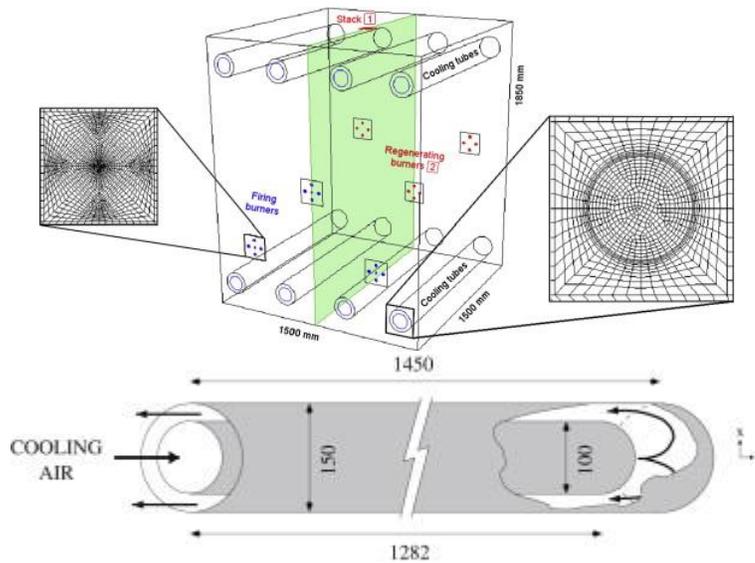


Figura 16. Mallado y dimensiones del horno de combustión sin llama. Tomadas de [20]

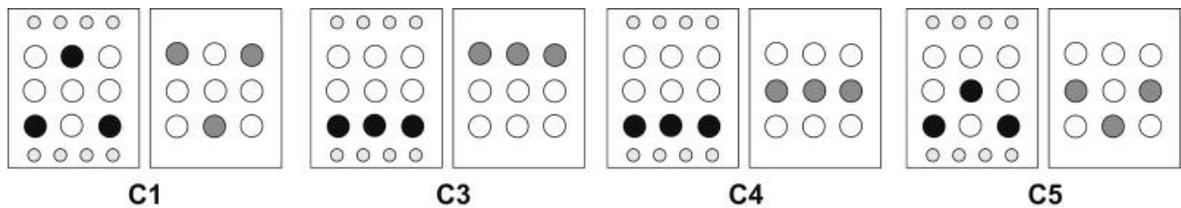


Figura 17. Configuraciones evaluadas. Tomadas de [20]

Con base a las referencias identificadas anteriormente y por el grado de detalle que se menciona en los artículos, se está realizando la réplica de la simulación del estudio de Danon et al. [20]. En la Tabla 3 se presenta una comparación de los parámetros utilizados en la simulación base y la réplica.

Tabla 3. Comparación de parámetros entre la simulación base y la réplica

Descripción	Simulación	Réplica
Dimensiones del horno [mm]	1500 × 1500 × 1850 (Largo × Ancho × Alto)	1500 × 1500 × 1850 (Largo × Ancho × Alto)
Potencia térmica [kW]	300	300
Factor de aireación [λ]	1.25	1.25
Composición del combustible	CH ₄ : 75.98 %m O ₂ : 0.02 %m N ₂ : 21.87 %m CO ₂ : 2.13 %m	CH ₄ : 75.98 %m O ₂ : 0.02 %m N ₂ : 21.87 %m CO ₂ : 2.13 %m
Software de mallado	Gambit	Ansys-Fluent Meshing
Estado	Estacionario	Estacionario
Número de celdas / Dimensión	1 millón de celdas hexaédricas / 3D	1 millón de celdas poli hexaédricas / 3D
Aspect ratio	No se menciona	0.5
Calidad ortogonal	No se menciona	16.7
Skewness	No se menciona	0.47

Prohibida la reproducción total o parcial de este documento sin la autorización de las entidades que tienen derecho de propiedad intelectual sobre el documento.

Descripción	Simulación	Réplica
Software CFD	Fluent 6.3.26	ANSYS-Fluent 22 R2
Modelo de turbulencia	RANS: k-ε Realizable	RANS: k-ε Realizable
Modelo de interacción turbulencia-química	EDC	EDC
Mecanismo cinético	Smooke (16 especies, 46 reacciones)	DMR19 (19 especies, 84 reacciones)
Modelo de radiación	Ordenadas discretas	Ordenadas discretas
Modelo de radiación para los gases	Suma ponderada de gases grises	Suma ponderada de gases grises

En la Figura 16 se presenta la información que se da del dominio computacional de la simulación que se desea replicar, mientras que en la Figura 18 se presentan algunas imágenes del mallado con los cuales se realiza la simulación de la réplica.

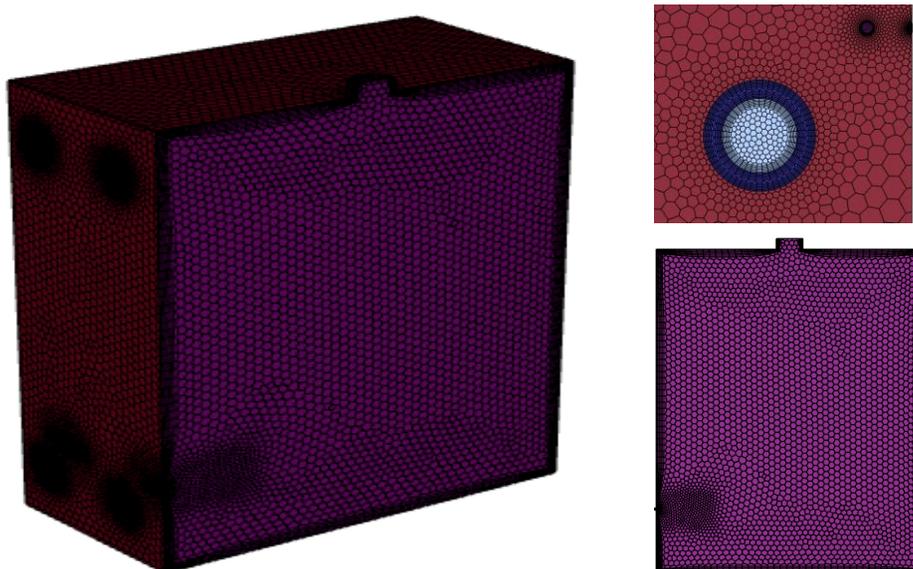


Figura 18. Dominio computacional para las simulaciones de la réplica

Actualmente, se está terminando la preparación de la simulación réplica en donde se están ingresando las condiciones de frontera y modelos de acuerdo con la información disponible en el estudio de Danon [20].

2.3. Recopilación de empresas

En la Tabla 4 se presentan algunas referencias de quemadores que han sido identificadas acompañadas de algunas especificaciones técnicas. Se observa que existen fabricantes que utilizan quemadores de combustión sin llama con recuperación de calor tanto recuperativa como regenerativa, mientras que otros han aplicado la oxicomustión sin llama o las mezclas de combustibles gaseosos con hidrógeno con el fin de disminuir las emisiones de CO₂.

Tabla 4. Quemadores de combustión sin llama y sus fabricantes

Fabricante	Tipo de quemador	Modelo	Potencia	Combustible	Ref.
HAUCK MANUFACTURING CO.	Modo llama Modo sin llama	WHI Wall Hugger Invisiflame 	580 a 1,760 kW	Cualquier gas combustible industrial limpio	[21]
TENOVA	Regenerativo - Flameless	TRGX 	1700 a 4800 kW @PCI	<ul style="list-style-type: none"> Gas natural Biogas GLP COG (Coke Oven Gas) Mezclas de los anteriores con hidrógeno 	[15]
TENOVA	Recuperativo - Flameless	TRKSX 	40 a 350 kW @PCI	<ul style="list-style-type: none"> Gas natural GLP COG (Coke Oven Gas) Mezclas de los anteriores con hidrógeno 	[14]
LINDE	Oxicombustión sin llama	OXYGON® 400 	400 kW con O ₂	Gas natural	[22]
YETEN Combustion	Modo llama Sin llama	Mildflame Flameless - Low NOx Burners 	550 - 5000 kW	Gas natural	[23]
Danieli	Recuperativo - Flameless	TFB-REK-80-FL200- FLAME / FLAMELESS	60 a 350 kW	Gas natural	[24]

Fabricante	Tipo de quemador	Modelo	Potencia	Combustible	Ref.
Flox	Recuperativo - <i>Flameless Oxidation</i>	REKUMAT 	20 a 350 kW	Gas natural, hidrógeno, propano, butano y otros gases libres de polvo y no agresivos	[25]
Flox	Regenerativo - <i>Flameless Oxidation</i>	REGEMAT 	~ 200 kW	Gas natural, hidrógeno, propano, butano y otros gases libres de polvo y no agresivos	[26]

3. Estado del Arte de los Sistemas Auto-Recuperativos y Auto-Regenerativos de Calor para Sistemas de Combustión Sin Llama

3.1. Marco teórico

El calor de desecho es la energía que está asociada con los flujos de aire, gases de combustión y líquidos que salen de un sistema industrial e ingresan al ambiente. Aunque hay una razón ambiental por la cual es relevante intentar recuperar parte del calor de desecho, un incentivo muy importante es el económico, ya que todo el calor que se recupere sustituye parte de la energía que debe comprarse ya sea en forma de combustible o en otra forma diferente.

3.1.1. Calor de desecho

La cantidad de calor de desecho se expresa en términos de la entalpía del flujo que se está emitiendo como se muestra en la Ecuación 2. Debe notarse que se están omitiendo los términos debido a la energía cinética y energía potencia, ya que por lo general son despreciables.

$$\dot{H} = \dot{m}h \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde: \dot{H} , Entalpía total del flujo [kW]; \dot{m} , flujo másico [kg s^{-1}]; y h , entalpía específica [kJ kg^{-1}].

Sin embargo, el potencial para tener una recuperación de calor que sea económicamente viable no depende tanto de la cantidad, sino de la calidad, donde esta última está relacionada con la temperatura que tenga el flujo que se está emitiendo. Entre más alta la temperatura de flujo, más disponibilidad tiene dicho flujo para hacer recuperación de calor.

En general, se suele categorizar el calor de desecho por rango de temperatura, tal que se tiene un rango de calidad alta, calidad media y calidad baja, los cuales se muestran a continuación [27].

Calidad alta $600^{\circ}\text{C} \leq T \leq 1650^{\circ}\text{C}$

Calidad Media $200^{\circ}\text{C} \leq T < 600^{\circ}\text{C}$

Calidad baja $27^{\circ}\text{C} \leq T < 200^{\circ}\text{C}$

El calor de desecho de alta calidad es el más útil y es el que cuesta menos por unidad a transferir, en comparación al calor de desecho de baja calidad, el cual ordinariamente no es práctico recuperar a un costo razonable.

3.1.2. Almacenamiento de energía térmica

Materiales para regeneración de calor

En una revisión realizada por Tawalbeh et al. [28] se presentan diferentes tipos de materiales para el almacenamiento de energía térmica, las cuales pueden ser de tres tipos: almacenamiento de calor sensible, almacenamiento de calor latente y almacenamiento de calor por sorción. En este documento solo se presentarán las propiedades de materiales para el almacenamiento de calor de calor sensible, ya que es de especial interés en el proyecto la recuperación de la energía que poseen los gases de combustión a través de la regeneración o recuperación de calor. No obstante, se presenta una breve definición de cada uno de los tipos de almacenamiento de energía térmica

- 1) Almacenamiento de calor sensible: en estos sistemas se almacena energía térmica en un medio que no cambia de fase cuando se le añade calor. La cantidad de energía almacenada depende principalmente de propiedades del material como su capacidad calorífica específica, densidad de energía, conductividad térmica, entre otros. Los sistemas de almacenamiento de calor sensible pueden utilizarse tanto para el almacenamiento a corto como a largo plazo de calor térmico; por lo tanto, la energía puede ser liberada según la necesidad.
- 2) Almacenamiento de calor latente: es un método de almacenamiento de energía térmica en el cual la energía se almacena o libera durante un cambio de fase en un material de cambio de fase (PCM). La cantidad de energía almacenada depende del calor latente de fusión o de vaporización, dependiendo de si el cambio de fase es entre sólido y líquido o líquido y vapor. Este método ofrece beneficios como operación casi isotérmica, pérdidas térmicas mínimas y la capacidad de almacenar grandes cantidades de energía debido a los altos valores de calor latente de fusión o vaporización.
- 3) Almacenamiento por sorción: estos sistemas operan a temperaturas inferiores a 200°C y pueden implicar procesos físicos o químicos, conocidos como fisisorción y quimisorción, respectivamente. Se distinguen dos tipos de procesos de sorción: absorción, en la cual las partículas se difunden en un sorbente líquido durante un cambio de fase, y adsorción, donde el sorbato experimenta un cambio de fase en la superficie de un sorbente sólido. El calor se almacena durante la desorción (un proceso endotérmico) y se libera durante la adsorción/absorción (exotérmico). Aunque estos sistemas tienen una alta capacidad de almacenamiento de calor, son complejos debido a las dos fases presentes, y los sorbentes tienden a deteriorarse con el tiempo debido a cambios en su estructura química y mecánica.

En la Tabla 5 se presenta un listado de materiales que se pueden utilizar para el almacenamiento de calor sensible. Dentro del listado de materiales se encuentran las bolas de óxido de aluminio y los ladrillos refractarios, dentro del cual se pudiera clasificar la cordierita, que son materiales que han sido usados en algunos sistemas de combustión y calentamiento del grupo GASURE. No obstante, no se hace referencia al carburo de silicio (SiC) el cual tiene excelentes propiedades térmicas como su conductividad térmica y también posee buena resistencia a la expansión térmica, propiedad muy importante en materiales que sean utilizados para sistemas regenerativos de calor.

Tabla 5. Propiedades de los materiales utilizados para el almacenamiento de energía térmica. Adaptada de [28]

Material de almacenamiento	Calor específico (J/kg.K)	Conductividad térmica (W/m.K)	Densidad (kg/m ³)
Basalto en vidrio	1274	1.6	2660
Mineral de hematita	618	0.31	2171
Mineral de hierro sinterizado	920	2.5	1605
Bolas de óxido de aluminio	1180	30	2240
Roca triturada	1060	2.5	1581
Acero fundido	600	40	7800
Cenizas de fondo de residuos municipales incinerados (30% arcilla)	1180	1	1600
Dolerita	1599	2.643	3000
Roca de gneis (61.9% en peso SiO ₂)	900	2.93	2732.4
Piedra de guijarros	900	0.85	1350
Cemento	1550	0.29	1506
Roca de cuarcita	860	0.29	2650
Pellets de fosfato	770	0.236	2380
Guijarros de piedra suave (fácilmente rompibles)	1200	1.05	2539
Guijarros de piedra de sílice	2450	1.4	2753
Polvo de residuos de demolición	1457	0.1	2855
Escoria de cobre	1415	2.173	3700
Grafito	1424	88.578	2250
Material activado alcalino (compuesto por 50% en peso de ceniza volante y 50% en peso de escoria negra)	700	–	1950
Sal de subproducto de una fábrica de potasa	738	0.33	1384
NaCl	850	7	2160
Ladrillos refractarios de sílice	1000	1.5	1820

Material de almacenamiento	Calor específico (J/kg.K)	Conductividad térmica (W/m.K)	Densidad (kg/m ³)
Concreto	920	2.37	2250
Rocas ígneas	600 – 1200	1.2 – 3	2300 - 3200
Rocas metamórficas	600 – 1500	1.5 – 3.2	2200 – 3300
Rocas sedimentarias	650 - 1500	1.7 - 7	1500 - 2800
Caliza	683 – 908	2-3	2300 - 2800
Polvo de residuos de demolición	1457	1.2	2855
Li ₄ (OH) ₃ Br sólido	1680	0.47	–
Hierro fundido	837	29.3	7900
Cobre	837	0.56	2400
Espuma cerámica	800	20.7	2327

Durante la búsqueda de materiales para sistemas de recuperación de calor regenerativo se identificó la empresa *TYK Europe*, quienes fabrican *honeycombs* y bolas cerámicas en carburo de silicio (SiC) [29]. Si bien es sabido que el carburo de silicio es un material que permite ser usado en sistemas de combustión a altas temperaturas, no se había identificado una empresa que fabricara *honeycombs* con este tipo de material y con la porosidad y especificaciones técnicas que se requieren para utilizarse en los sistemas de combustión y calentamiento diseñados por el grupo GASURE.

En la Tabla 6 se presenta una comparación entre las propiedades de las bolas cerámicas fabricadas en alúmina y las de carburo de silicio. Las ventajas de fabricar las bolas en carburo de silicio es que tienen mayor conductividad térmica y resistencia al choque térmico, tienen una vida útil 2 veces mayor en comparación con la alúmina y cordierita, por lo cual se requiere menor mantenimiento y por las propiedades térmicas del SiC se pueden alcanzar mayores ahorros energéticos.

Tabla 6. Propiedades de bolas cerámicas para regeneración de calor. Adaptada de [29]

Propiedad	Unidad	Alúmina97	TYK SiC
Porosidad	%	10	30
Expansión térmica	x 10 ⁻⁶ /°C	7.8	4.5
Calor específico	J/g.k	0.8	0.7
Conductividad térmica	W/m.K	15	70

En relación con los *honeycombs*, en la Tabla 7 se presenta una comparación de los *honeycombs* fabricados en alúmina, cordierita y carburo de silicio. Al igual que con las bolas cerámicas, los *honeycombs* de SiC tienen mayor conductividad térmica y resistencia al choque térmico, pero la vida útil se aumenta a 10 veces más en comparación con los materiales convencionales. Finalmente, con los *honeycombs*, se aumenta la eficiencia del proceso.

Tabla 7. Propiedades de *honeycombs* para regeneración de calor. Adaptada de [29]

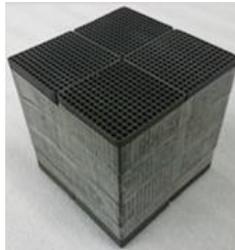
Propiedad	Unidad	Alúmina97	Cordierita	TYK SiC
Expansión térmica (dirección del flujo)	x 10 ⁻⁶ /°C	7.8	0.7	4.5
Calor específico	J/g.k	0.8	0.8	0.7

Propiedad	Unidad	Alúmina97	Cordierita	TYK SiC
Conductividad térmica	W/m.K	2.5	0.5	70
Resistencia a la compresión (dirección del flujo)	MPa	40	10	250

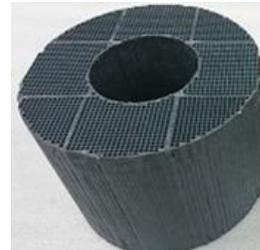
En la Figura 19 se presentan algunas imágenes de referencia de las bolas y honeycombs fabricados en carburo de silicio.



Bolas de
carburo de
silicio



Honeycomb
rectangular de
carburo de
silicio



Honeycomb
cilíndrico de
carburo de
silicio

Figura 19. Diferentes tipos de regeneradores fabricados en carburo de silicio. Adaptada de [29]

La cantidad de calor almacenado en un material sólido viene dada por la Ecuación 3, donde es necesario conocer una función que relacione el poder calorífico del material de almacenamiento y la temperatura de dicho material, esto para poder resolver la integral. En términos prácticos es más común el uso de la Ecuación 4, cuya expresión se obtiene al suponer que el calor específico permanece constante con la temperatura. Con el fin de reducir el error que se genera al usar esta suposición, el calor específico debería ser el valor promedio para las dos temperaturas extremas. Por otro lado, si el rango de temperaturas T_1 y T_2 no es muy grande (del orden de unos 300°C), el error cometido es pequeño, o también si la variación del calor específico con la temperatura tiene un comportamiento lineal, el error en el cálculo del calor almacenado es despreciable.

De estas ecuaciones se observa que si se quiere usar un material para almacenamiento de calor es deseable que este tenga una alta densidad y un alto calor específico.

$$Q = \int_{T_1}^{T_2} mCdT = \int_{T_1}^{T_2} \rho VCdT \quad \text{Ecuación 3}$$

$$Q = \rho VC(T_2 - T_1) \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde: m , masa del material usado para el almacenamiento del calor de desecho [kg]; C , calor específico del material usado para el almacenamiento [$\text{kJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$]; T_1 y T_2 , temperatura inicial y temperatura final del material de almacenamiento respectivamente [$^\circ\text{C}$]; ρ , densidad del material de almacenamiento [kg m^{-3}]; y V , volumen del material de almacenamiento [m^3].

Adicionalmente, también es importante la velocidad a la cual el calor puede ser absorbido o liberado por el material de almacenamiento, lo cual se define por medio de la Ecuación 5. De esta ecuación se deriva que, también es importante tener una alta conductividad térmica y una gran área superficial

por unidad de masa. Esta última propiedad está en contra de la densidad, pero es necesario buscar un punto de equilibrio [27].

$$\dot{Q} = -kA \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=0} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde: \dot{Q} , tasa de transferencia de calor [kW]; k , conductividad térmica del material de almacenamiento [$\text{W m}^{-1} \text{°C}^{-1}$]; A , área superficial del material de almacenamiento [m^2]; y $dT/dx|_{x=0}$, es el gradiente de temperatura en la superficie del material de almacenamiento.

Por otro lado, el material de almacenamiento también debe tener otras propiedades que son importantes como, por ejemplo: un bajo costo, una alta temperatura de fusión y resistencia a las fracturas por ciclos térmicos [27].

En la Tabla 8 se muestran algunas propiedades de interés para el almacenamiento de energía térmica para materiales refractarios comunes, la cual está adaptada de la referencia [27]. Cabe mencionar que de esta lista de materiales no todos son realmente usados para almacenamiento de energía térmica debido a que el precio de algunos de estos materiales es muy elevado (como el óxido de berilio con un precio de 4776 USD/kg [30]) lo cual hace que no sea factible su uso a nivel industrial. De esta lista de materiales destacan la alúmina, la espinela, y el óxido de zirconio por su densidad y calor específico, mientras que en cuanto a conductividad destacan la espinela, el carburo de silicio, el grafito, el óxido de calcio, y el óxido de berilio, aunque ya se mencionó previamente que este último tiene un costo demasiado elevado.

Tabla 8. Propiedades de materiales refractarios usados para almacenamiento de energía térmica. Adaptado de [27]

Nombre	Fórmula	Densidad (kg/m ³)	Calor específico (kJ/kg °C)	Conductividad térmica (W/m °C)	Temperatura máxima de uso (°C)	Punto de fusión (°C)
Alúmina	Al ₂ O ₃	3685	1004	3.5	1816	2038
Óxido de berilio	BeO	3044	1004	70.0 [31]	2204	2538
Óxido de calcio	CaO	3204	753	7.8	2316	2593
Grafito	C	1922	1506	12.1	2204	3593
Cromo	40% Cr ₂ O ₃	3204	837	1.7	1760	2093
Corindón	90% Al ₂ O ₃	3204	920	2.6	1760	2044 [32]
Forsterita	2MgO SiO ₂	2563	962	2.1	1649	1816
Óxido de magnesio	MgO	2804	1046	3.5	1927	2760
Mulita	3Al ₂ O ₃ SiO ₂	2563	962	2.1	1649	1843
Sílice	SiO ₂	1762	1004	1.7	1538	1704
Carburo de silicio	SiC	2723	962	13.8	1649	2204
Espinela	MgO Al ₂ O ₃	3524	962	8.7	1816	-
Óxido de titanio	TiO ₂	4165	711	3.8	1649	1816
Zircón	ZrO ₂ SiO ₂	3524	628	2.2	1927	2482
Óxido de zirconio	ZrO ₂	5767	544	2.2	2427	2649
Cordierita	2MgO-2Al ₂ O ₃ -5SiO ₂	2300 [33]	900 [33]	2.5 [33]	1350 [34]	1460 [34]

La respuesta de un sistema de almacenamiento de calor de desecho es dada de forma aproximada por la Ecuación 6 (Referenciado en [27])

$$\frac{Q}{A} = \frac{\Delta T_{l,m}/(\theta' + \theta'')}{1/h''\theta'' + 1/h'\theta' + \frac{1}{2.5C_s\rho_s} + R_B/k(\theta' + \theta'')} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

$\Delta T_{l,m}$ – La temperatura media logarítmica basada en la temperatura uniforme de cada una de las entradas.

C_s – Calor específico de la matriz de almacenamiento.

ρ_s – Densidad del material almacenamiento.

k – Conductividad térmica del material de almacenamiento

R_B – Volumen por unidad de área superficial del material de almacenamiento.

h - Coeficiente convectivo de transferencia de calor.

θ – Tiempo de ciclaje en horas.

Los términos con prima y con doble prima se refieren a los lados flujos caliente y frío respectivamente.

Esta ecuación es aplicable principalmente a sistemas regenerativos de gran tamaño como los de los hornos de fusión de vidrio, donde los tiempos de ciclaje son del orden de horas. En los casos donde el cuarto término del denominador es grande (lo cual ocurre para tiempo de ciclaje cortos o con materiales de baja conductividad térmica) esta ecuación pierde validez y el error al usar dicha ecuación son grandes.

3.1.3. Sistemas de combustión auto-regenerativos y auto-recuperativos.

Los sistemas de combustión auto-regenerativos y auto-recuperativos tienen la cualidad de recuperar calor de desecho de los gases de combustión para precalentar el aire de combustión, pero la diferencia radica en que la recuperación de calor sucede en el propio quemador, donde para los quemadores auto-regenerativos se implementa al interior del propio quemador una zona con material destinado al almacenamiento de energía térmica y se requiere normalmente un par de quemadores que funcionan de forma alternada para poder almacenar energía térmica en el material de almacenamiento y luego usando dicha energía para precalentar el aire de combustión en el ciclo siguiente. Por otro lado, los quemadores auto-recuperativos tienen en su interior un intercambiador de calor lo cual permite precalentar de forma continua el aire de combustión succionando gases calientes a través del propio quemador. En Figura 20 se muestra de forma esquemática el diseño típico de los sistemas auto-regenerativos y auto-recuperativos.

Vale la pena mencionar, que hay algunos diseños de quemadores auto-regenerativos donde en lugar de 2 quemadores se usa un solo quemador, como por ejemplo el desarrollado para combustión sin llama por el grupo Gasure [35].

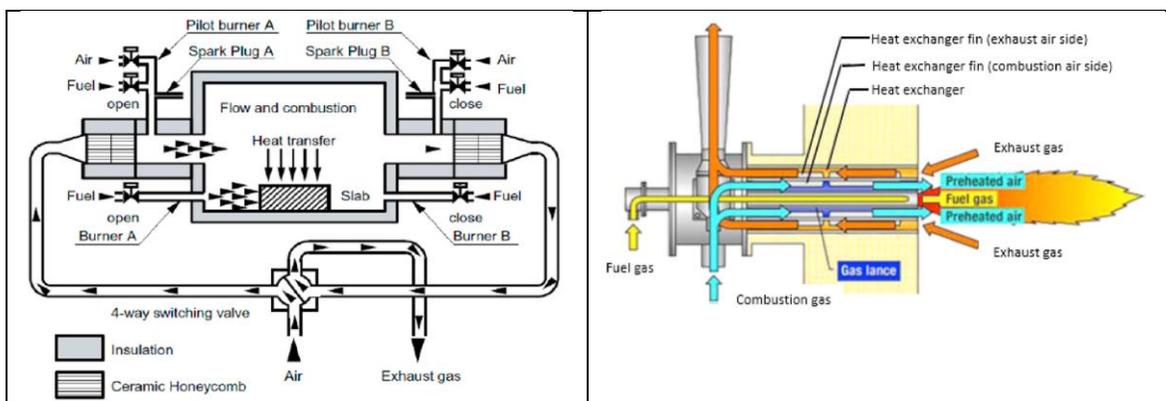


Figura 20. Esquema de sistema de combustión auto-regenerativo (izquierda). Esquema de combustión auto-recuperativo (derecha). Tomado de [36]

Tabla 9. Comparación de los sistemas recuperativos y regenerativos. Adaptado de [36]

Tecnología de recuperación	Ventajas	Desventajas
Recuperadores cerámicos	Se usa para aplicaciones de alta temperatura en el rango de 982°C a 1538°C para los lados frío y caliente respectivamente.	No adecuado para aplicaciones que tengan gases sucios.
Quemadores recuperativos	Más compactos y simples en su diseño y construcción en comparación a los sistemas aislados. Facilidad de repotenciación.	Menor área de transferencia de calor que los sistemas aislados.
Regeneradores	Usados para aplicaciones con un rango de temperatura entre 982°C y 1538°C para los lados frío y caliente respectivamente.	Tienen un gran tamaño, lo cual presupone un gran costo de capital en comparación a los recuperadores.
Quemadores regenerativos	Más compactos y simples en su diseño en comparación al regenerados aislado. Facilidad de repotenciación.	Tiene menos masa que el regenerador aislado por lo cual su capacidad de recuperación de calor de desecho es menor.

Si bien los sistemas de recuperación de calor de desecho en general conducen a un aumento de eficiencia térmica, estos también tienen el inconveniente de que cuando se emplean en sistemas de combustión convencional se presenta un considerable incremento de las emisiones de NO_x, razón por la tecnología de combustión sin llama es un excelente complemento de las tecnologías de recuperación de calor de desecho, ya que además de tener el incremento de la eficiencia, con la combustión sin llama las emisiones contaminante se mantienen en valores muy inferiores a los obtenidos con las tecnologías convencionales [2].

Con respecto a los materiales usados para los quemadores auto-regenerativos o regenerativos son comunes los cerámicos con forma tipo honeycomb y los lechos empacados con bolas cerámicas.



Figura 21. Material cerámico tipo honeycomb (izquierda). Material tipo bola cerámica (derecha)

3.2. Trabajos desarrollados por el grupo Gasure y Universidad de Antioquia en sistemas de recuperación de calor.

A continuación, se presentan los trabajos desarrollados por el grupo Gasure, los cuales se dividen en experimentales y en numéricos, aunque la mayor parte de los trabajos desarrollados han involucrado ambos tipos de desarrollo, donde se hace uso de la simulación numérica para mejorar los diseños experimentales. Los trabajos que se muestran a continuación no solo involucran desarrollos con la tecnología de combustión sin llama, sino también con tecnologías más convencionales, ya que la parte de recuperación de calor es prácticamente igual en ambos tipos de tecnologías.

3.2.1. Experimental

En el año 2003 Henao y Amell [37] realizan el análisis de un prototipo de sistema de lecho regenerativo operando en un tubo radiante en U con dos quemadores, aunque no dan información del tipo de regenerador usado, ni el material del mismo, parece ser tipo esferas en lecho empacado y evalúan 2 tamaños diferentes de esferas para potencias térmicas que van desde 5.97 kW hasta 9.94 kW. Con el cambio del tamaño de las esferas varían el área superficial de transferencia de calor (manteniendo el mismo volumen del lecho), lo que les permite evaluar cómo se modifica la temperatura del aire bajo estas condiciones en ciclos de 40, 60 y 120 s, alcanzando diferencias de temperatura de hasta 340°C.

En el año 2006 Amell et al [38] desarrollaron y evaluaron un sistema de combustión autoregenerativo radiante de una potencia térmica de 28 kW, alcanzando temperaturas de precalentamiento del aire de 700°C. El sistema consiste nuevamente de 2 quemadores que funcionan de forma cíclica y el material regenerativo consisten en un lecho empacado con 8.5 kg de esferas cerámicas de 12.7 mm de diámetro. Dicho material fue importado de China. En la Figura 22 se muestra un esquema de uno de los quemadores autoregenerativos, que como se puede apreciar tienen el lecho empacado justo detrás de la cámara de combustión, el material de aislamiento es refractario Concrax 1700. El tiempo de ciclaje de los quemadores es de 30 s. En cuanto a la metodología empleada para el diseño del prototipo no se da mucho detalle al respecto.

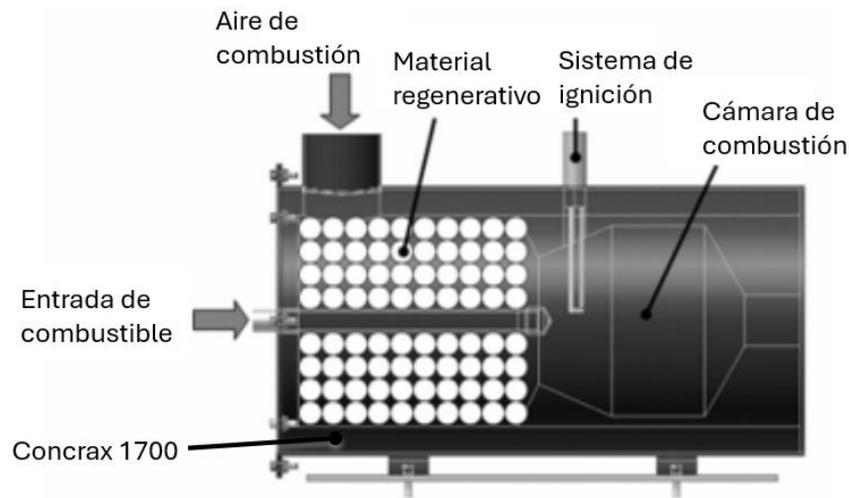


Figura 22. Cámara de combustión autoregenerativa, adaptado de [38].

En el año 2007 el grupo Gasure desarrolló el proyecto “Desarrollo y evaluación de un horno de combustión sin llamas de alta eficiencia térmica” [35] el cual fue financiado por Colciencias. En el marco dicho proyecto se desarrolló el trabajo de investigación de maestría de Herrera [39] y de Sepúlveda [40], en el trabajo de Herrera se describe el diseño y evaluación experimental de la cámara de combustión donde la dinámica de fluidos computacional fue fundamental para realizar el diseño de la misma. Por otro lado, el trabajo de Sepúlveda se concentra en el desarrollo del quemador autoregenerativo, donde en la Figura 23 se muestra de forma esquemática una vista frontal del quemador, el cual consiste en una boquilla central a través de la cual se descarga gas natural de forma axial en la cámara de combustión, y alrededor se tienen 4 boquillas. Estas boquillas funcionan en pares donde mientras 2 descargan aire las otras dos succionan gases calientes que se usan para calentar una matriz cerámica de cordierita tipo Honeycomb de 400 celdas por pulgada cuadrada (cpsi). Después de un tiempo de 30 segundos se cicla el funcionamiento del quemador por medio de una válvula de 4 vías, donde el aire ingresa a través del otro par de boquillas siendo este calentado por medio de la energía térmica almacenada en la matriz cerámica. De esta forma el proceso se invierte cada 30 segundos, precalentando aire de combustión. En el trabajo de Herrera [39] las simulaciones numéricas del horno se realizaron en estado estable, y no se tuvo en cuenta el efecto transitorio del regenerador, de tal forma que se usó una temperatura de entrada del aire constante igual a 600°C. En la Figura 24 se muestran los contornos de temperatura y la comparación de los resultados numéricos y experimentales a lo largo de una línea axial que sale del centro del quemador, donde se muestra que hay una muy buena predicción de la temperatura especialmente en la zona más alejada del quemador.

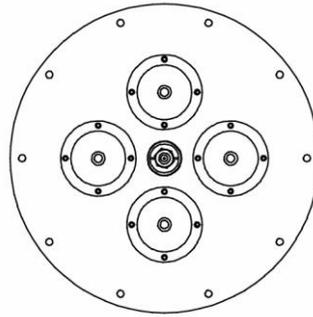


Figura 23. Configuración geométrica del quemador de combustión sin llama auto-regenerativo. Tomado de [40].

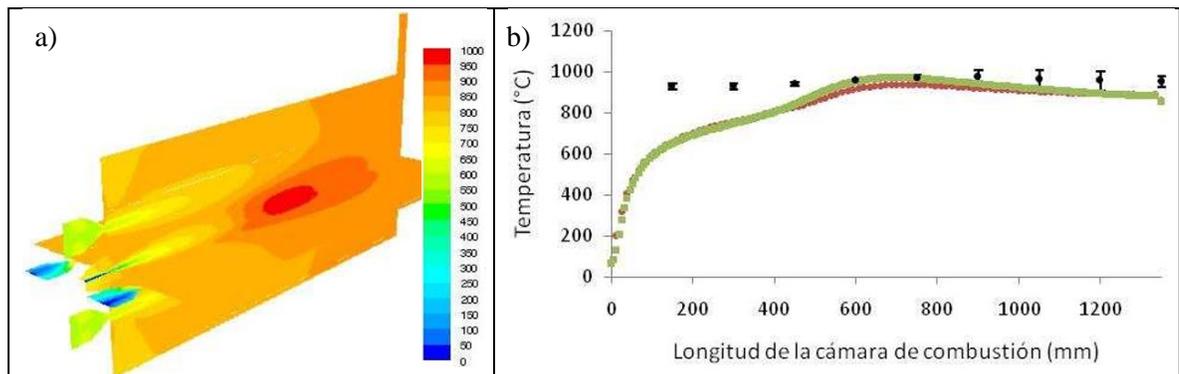


Figura 24. a) Contorno de temperatura (°C) y b) comparación de resultados numéricos con experimentales de la temperatura. Adaptado de [39].

González [41] en el marco del proyecto “Desarrollo, evaluación y demostración de un horno de crisol auto-regenerativo para procesos de alta temperatura en Pymes” [42] desarrolló un quemador auto-regenerativo con inyección de comburente por etapas que opera con aire enriquecido con O_2 al 35% para potencias entre 60 y 120 kW. El material usado para la regeneración son honeycombs de cordierita. El desempeño del quemador auto-regenerativo fue evaluado de manera numérica y experimental. En la Figura 25 se muestra una foto de la llama al interior de la cámara de combustión sin el crisol, y el mismo quemador descargando al aire libre, donde se puede apreciar que este está compuesto en realidad por dos quemadores que funcionan de forma alternada con tiempos de ciclaje entre 30 s y 60 s, esto con el fin de que el sistema auto-regenerativo pueda funcionar correctamente aumentando la eficiencia del sistema.

En la Figura 26 se muestran datos de la evolución de la temperatura en el lado caliente del regenerador, donde se aprecia que para aire normal la temperatura tiene una oscilación en un rango aproximado de $200^{\circ}C$, mientras que para 35% O_2 en el comburente el rango de oscilación es de aproximadamente $150^{\circ}C$.



Figura 25. Imagen de cómo se forma la llama al interior de la cámara de combustión sin el crisol (izquierda). Quemador operando descargando a la atmósfera (derecha). Adaptado de [41].

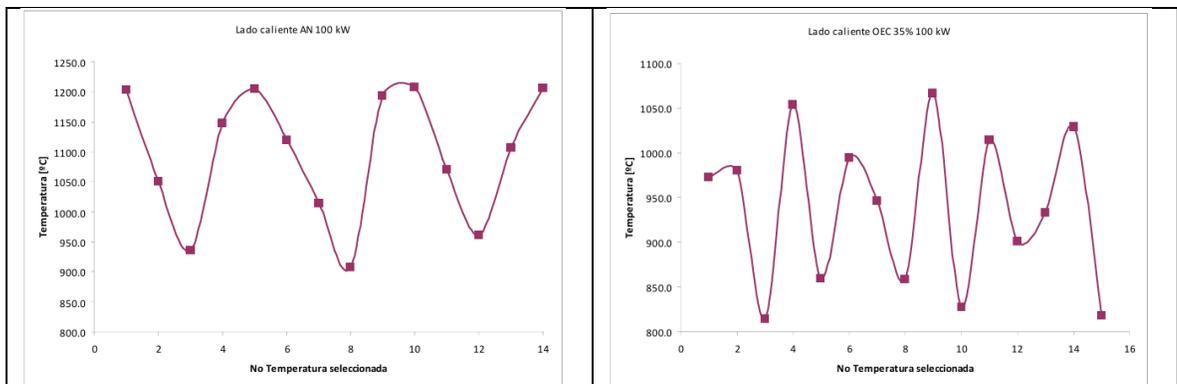


Figura 26. Evolución de la temperatura después del regenerador para una potencia de 100 kW, con aire normal (izquierda) y con 35% O₂ en el comburente (derecha). Adaptado de [41].

De forma similar, Sánchez [43] realizó la evaluación experimental y numérica del mismo horno descrito en [39], pero realizando enriquecimiento de oxígeno de aire hasta 35%. El sistema regenerativo del quemador no fue modificado para hacer el enriquecimiento con oxígeno y las simulaciones numéricas igualmente se realizaron en estado estable manteniendo una temperatura de entrada del comburente de 600°C. Sánchez hizo el análisis del comportamiento dinámico del regenerador para 4 ciclos de operación del mismo (Figura 27) donde muestra que la temperatura del aire en la salida del regenerador oscila entre 500°C y 700°C, aunque la resolución del muestreo hecho es de alrededor 10 s, lo cual es muy poco teniendo en cuenta que el tiempo de ciclaje está entre 30 s y 60 s. Adicionalmente, la temperatura fue corregida para tener en cuenta el comportamiento dinámico del regenerador por medio de la Ecuación 7.

$$T_{\text{corregida}} = \tau \frac{dT_{\text{leída}}}{dt} + T_{\text{leída}} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde los tiempos de respuesta τ usados para hacer la corrección de temperatura se muestran en la Tabla 10

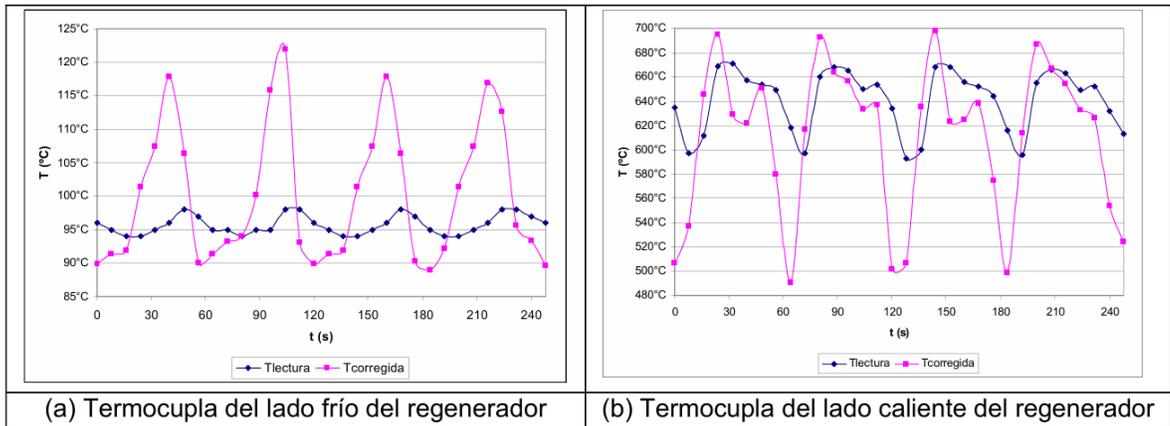


Figura 27. Evolución de las temperaturas del lado frío y del lado caliente del regenerador para una concentración de oxígeno en el comburente de 25%. Tomado de [43]

Tabla 10. Constantes de tiempo para las termocupas en el lado caliente y lado frío del regenerador. Tomado de [43]

Termocupla	Constante de tiempo τ (s)	
	Calentamiento	Enfriamiento
Lado frío	100	29
Lado caliente	6	29

En el año 2022 López et al [44] realizaron el análisis número y experimental del horno de combustión sin llama del grupo Gasure previamente mostrado en [39], pero con el objetivo de analizar el efecto de la inyección de agua líquida al interior de la cámara de combustión. En este trabajo se tomaron datos de especies químicas cada segundo, lo cual permite ver el comportamiento fluctuante ocasionado por el ciclaje del sistema auto-regenerativo (Figura 28).

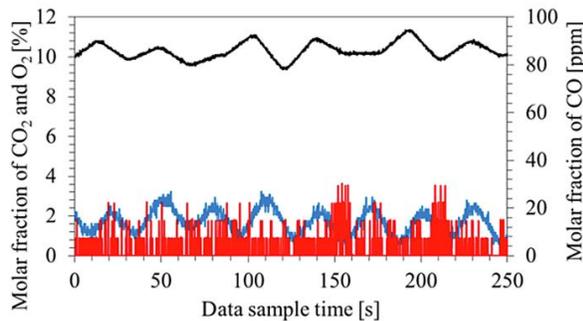


Figura 28. Evolución de las especies con auto-regeneración en función del tiempo para el caso sin inyección de agua. Tomado de [44]

Restrepo [45] usando el mismo horno de crisol desarrollado en [42] realizó el análisis numérico y experimental de dicho horno operando con mezclas de gas-natural e hidrógeno, donde el sistema auto-regenerativo lo emplearon con un tiempo de ciclaje de 30 s, obteniendo eficiencias térmicas cercanas al 75%.

3.2.2. Teórico y Numérico

A continuación, se realiza un análisis de los trabajos teóricos y numéricos enfocados en sistemas de recuperación de calor o regeneración de calor enmarcados principalmente en el grupo de investigación Gasure de la Universidad de Antioquia.

De los primeros trabajos sobre este tema se encuentra el de Mejía et al [46, 47], quienes en el año 2001 y 2002, a partir del análisis de transferencia de calor transitoria para un regenerador térmico de lecho empacado, bajo un modelo de resistencia interna despreciable (esto soportado en que calculan un número de Biot menor a 0.2), dicen que la temperatura promedio del regenerador en función del tiempo es dada por la Ecuación 8, la cual es bastante simple, pero además también encuentran que la distribución de temperatura en el tiempo y a lo largo del regenerador se puede calcular por medio de la Ecuación 9, pero esta tiene la dificultad de que requiere hallar experimentalmente las funciones $f(x)$ y $g(x)$ las cuales tienen forma exponencial.

$$\frac{T(t) - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}} = e\left[-\frac{h}{\rho_e c_e D_e} t\right] \quad \text{Ecuación 8}$$

$$T(x, t) = A + [f(x) - A]e^{-g(x)t} \quad \text{Ecuación 9}$$

Por otro lado, Nieto et al [48] realizan la simulación numérica CFD de un regenerador simplificado para un modelo de 10 esferas de aluminio (ver Figura 29), creando un mallado con 274,625 elementos tetraédricos sin que haya contacto esfera-esfera ni esfera-pared, para evitar elementos de muy mala calidad que dificultan la convergencia del cálculo numérico. Usan propiedades constantes para los materiales y el objetivo de dicha simulación es encontrar el tiempo que tardan las esferas en alcanzar la temperatura de equilibrio. En cuanto a modelos usan k-ε estándar para la turbulencia. Al parecer consideran que el modelo usado es demasiado simple, ya que no realizan conclusiones con respecto a los resultados obtenidos, pero calculan un coeficiente convectivo promedio de 48.14 W/m, y un tiempo requerido para alcanzar el equilibrio cercano a 1000s.

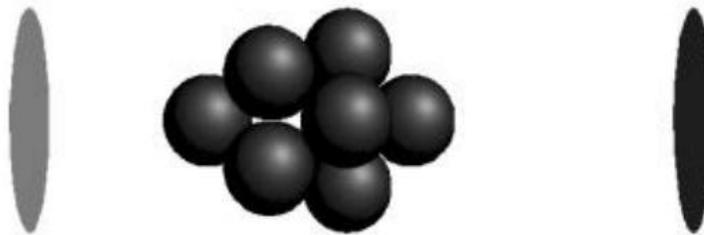


Figura 29. Modelo de regenerador de 10 esferas. [48]

Adicionalmente, Motato et al [49] en el año 2007 refinaron el análisis desarrollado previamente por Mejía et al, obtenido que la temperatura del regenerador en la posición y el tiempo está dada por la Ecuación 10, y dan los valores de las constante de la ecuación para lechos empacados con esferas de 3/8" y 1/2", además para cilindros también de 3/8" y 1/2". Dicha ecuación se obtuvo por medio de análisis de transferencia de calor bajo la suposición de equilibrio térmico entre el flujo y el lecho poroso, además se despreciaron efectos de turbulencia y radiación y luego se hizo un ajuste con datos experimentales para obtener las constantes del modelo.

$$T(x, t) = T_{\infty} + (T_0 - T_{\infty})e^{m_2 x} + [T_i - [T_{\infty} + (T_0 - T_{\infty})e^{m_2 x}]]e^{\left[\frac{h_{fs}}{\rho_s c_s D_p} t\right]} \quad \text{Ecuación 10}$$

En el año 2008, Copete et al [50] realizaron la simulación numérica en Fluent de un quemador autoregenerativo con la misma configuración del quemador mostrado en la Figura 22, pero para una potencia térmica de 60 kW y en estado estable fijando la temperatura de entrada del aire en 785°C. En cuanto a los modelos usan k-ε estándar para la turbulencia, P1 para la radiación y *mixture fraction* para la combustión. Analizan una configuración de descarga axial y radial del combustible, encontrando que esta última configuración alcanza mayor eficiencia de la combustión. Es interesante notar que no consideran la transitoriedad de este tipo de sistemas, el cual funciona en ciclos y el aire entra a una temperatura alta al inicio del ciclo, pero su temperatura va disminuyendo a medida que el regenerador cede su energía.

Por otro lado, Sepulveda et al [51] realizaron el análisis CFD de una celda de un regenerador tipo honeycomb de 400 celdas por pulgada cuadrada (cps) y de cordierita. El análisis lo realizaron a través del software Fluent, en una geometría tridimensional con un mallado de hasta 750,000 elementos (Figura 30). La simulación fue transitoria, con flujo laminar y no se consideró la radiación en base a que en la literatura [52] habían encontrado que en este tipo de dispositivo la transferencia de calor por radiación solo representa entre un 5 y un 7%. Usan un tiempo de ciclaje de 30s, tiempo después del cual manualmente intercambian las condiciones de frontera, de tal forma que por donde entraban gases calientes (a 625°C), entra aire a 86°C. Este proceso de ciclaje manual lo repitieron cada que la simulación completó 30s, completando un total de 24 minutos de simulación.

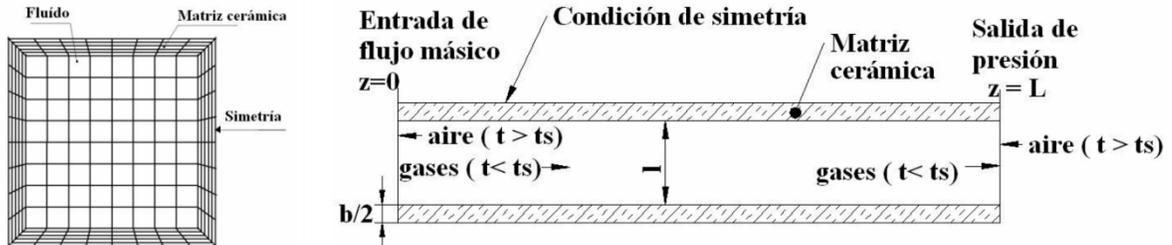


Figura 30. Mallado de una celda de honeycomb incluyendo parte de la matriz cerámica (izquierda). Dominio de una sola celda de honeycomb simulado en fluent (derecha). Adaptado de [51].

En la Figura 31 se muestra la evolución de la temperatura de salida del aire después del honeycomb así como la temperatura de salida de los gases en función del número de ciclos, donde se observa que el aire en general presenta un diferencia de aproximadamente 10°C con respecto a la matriz cerámica, mientras que para los gases la diferencia de temperatura es casi imperceptible, por lo que esto puede sustentar suposiciones de equilibrio térmico entre los gases y la matriz cerámica para hacer análisis teórico de este tipo de sistemas. Adicionalmente, se observa que cuando se alcanza el estado estable, la temperatura de salida del aire es de aproximadamente 477°C (750 K), y esto sucede alrededor del ciclo 20 de entrada del aire, es decir, al regenerador le toma alrededor de 20 minutos en alcanzar una operación estable. Finalmente, concluyen que en comparación con datos experimentales se tiene una diferencia de 1.9%. Por otro lado, este trabajo no reportó la caída de presión obtenida en la simulación, lo cual es una información valiosa para este tipo de sistemas.

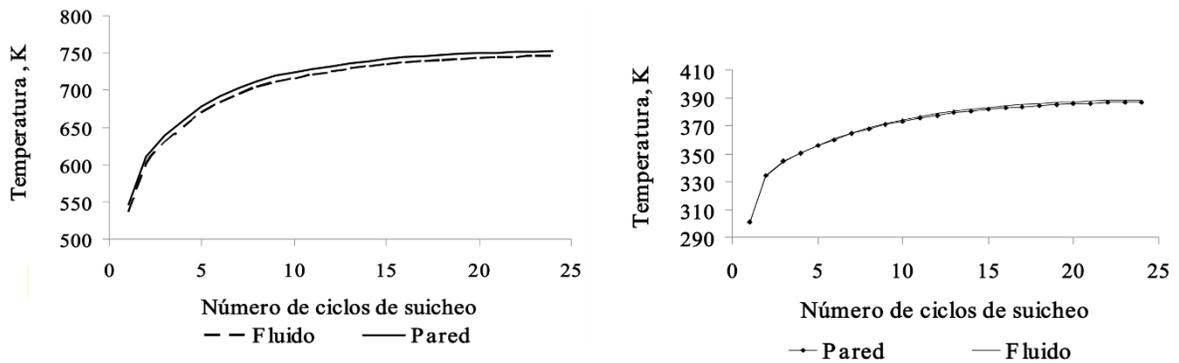


Figura 31. a. Temperatura de salida del aire en función de los ciclos. b. Temperatura de salida de los gases en función de los ciclos. Adaptado de [51]

En el año 2010 Cadavid et al [53] realizaron la simulación tridimensional de un horno autoregenerativo de 120 kW térmicos por medio del software Fluent. El modelo consistió en 660,000 celdas y para modelar el efecto de la turbulencia sobre el flujo medio usaron el modelo $k-\epsilon$ RNG, mientras que para la interacción química-turbulencia emplearon dos modelos diferentes, el Finite Rate/Eddy Dissipation (FR/ED) y el otro modelo fue usado fue el *mixture-fraction*. Para la radiación emplearon el modelo de ordnadas discretas y la absortividad de los gases se modelo con el modelo de suma ponderada de gases grises (WSGGM). Es importante mencionar que en la simulación se omitieron los regeneradores tipo honeycomb y además la simulación se realizó en estado estable con una temperatura de entrada del aire de 600°C y una temperatura de la pared del crisol constante de 750°C. Encuentran que el modelo *mixture-fraction* predice muy mal la cantidad de emisiones de CO, mientras que el modelo FR/ED da una predicción que está dentro del rango medido experimentalmente.

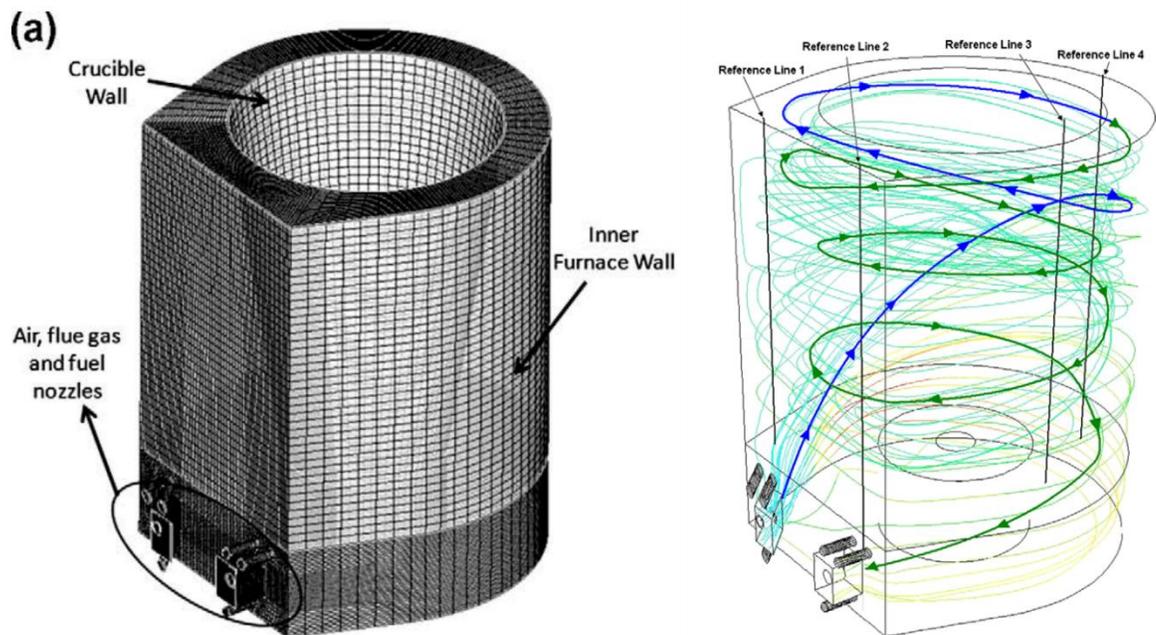


Figura 32. Mallado y líneas del flujo de la simulación del horno de crisol. Tomado de [53]

Prohibida la reproducción total o parcial de este documento sin la autorización de las entidades que tienen derecho de propiedad intelectual sobre el documento.

García y Amell [54] (año 2018) y García et al [55] (año 2019) realizaron la simulación numérica de un horno industrial para recalentamiento de metales, el cual equipa cuatro quemadores auto-recuperativos Eclipse ThermJetSelf. La simulación se realizó por medio del software Ansys Fluent en estado estable con los modelos $k-\epsilon$ realizable para la turbulencia, *Steady Diffusion Flamelet Model (SFM)* para la combustión, esto en conjunto con el mecanismo químico detallado de la universidad de San Diego [56]. Para modelar la radiación usaron el modelo de ordenadas discretas, y para la absorptividad de los gases usaron el modelo WSGGM.

Para los quemadores auto-recuperativos no se simuló la transferencia de calor que ocurre en estos en detalle, sino que a partir de datos del fabricante del quemador se obtuvo la Ecuación 11 que relaciona la temperatura a la que se calienta el aire (T_{air}), en función de la temperatura a que los gases calientes entran al quemador (T_{flue}) y el flujo másico de aire (m_{air}). Además, en esta ecuación se tienen las constantes $T_{ref} = 298.15 K$, $a = 0.06055$, $b = 6.35145$, y $c = 1.36562$. Esta ecuación se implementó en las simulaciones numéricas a través de una Función Definida por el Usuario (UDF).

$$T_{air} = T_{ref} + ae^{-bm_{air}}(T_{flue} - T_{ref})^c \quad \text{Ecuación 11}$$

En la Figura 33 se muestra de forma esquemática el quemador auto-recuperativo usado en las simulaciones y el mallado del mismo quemador, el cual tiene varias entradas de aire.

En cuanto a los resultados obtenidos, muestran un buen ajuste de la temperatura a lo largo del centro del material a calentar en comparación con datos experimentales.

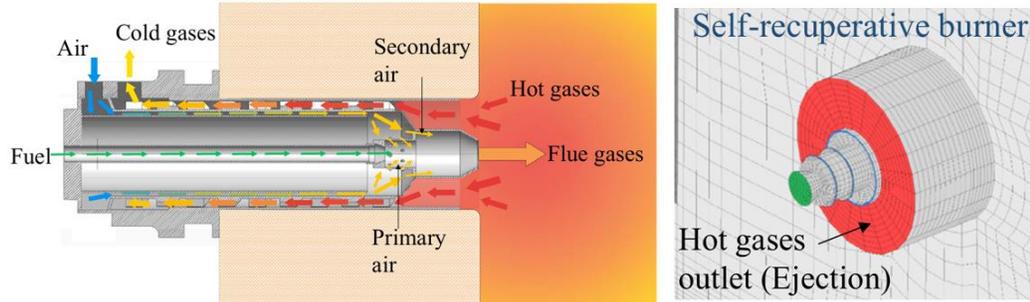


Figura 33. Esquema del quemador autorecuperativo usado en las simulaciones numéricas. Adaptado de [57]

En el año 2019 Yepes y Amell [58] y Yepes et al [59] realizaron la simulación de uno de los hornos de combustión sin llama del grupo Gasure [39], el cual tiene un quemador autoregenerativo, en estos trabajos comparan los modelos de turbulencia $k-\epsilon$ estándar y $k-\epsilon$ realizable. Las simulaciones se realizaron en estado estable y con respecto al regenerador se usó una temperatura de entrada del aire constante con un valor que no es mencionado en los documentos, pero que se obtuvo de datos experimentales del horno, aunque no se considera en absoluto el carácter transitorio de la temperatura. A pesar de las simplificaciones que tiene el modelo, muestran que los resultados numéricos se ajustan bien a los datos experimentales especialmente en la zona del horno más alejada del quemador.

En el año 2020 López et al [60] realizaron la simulación de un horno 2D axisimétrico implementando un quemador auto-recuperativo cuya geometría está basada en el quemador de Eclipse usado en [54]. Para la simulación usaron un mallado de 73,074 celdas rectangulares. Las entradas del quemador

autorecuperativo se simplificaron de agujeros a anillos con la misma área de entrada, esto para mantener la misma velocidad del flujo en la simulación 2D axisimétrica. En cuanto al modelo usaron $k-\epsilon$ realizable para la turbulencia, EDC para la combustión, OD para la radiación con WSGGM para la absorptividad de los gases. El intercambiador está hecho de carburo de silicio. Según los resultados de las simulaciones el recuperador precalienta el aire desde 120°C hasta 520°C y la efectividad del intercambiador se calculó en 0.34. Es importante mencionar que al ser esta una geometría 2D hay una gran diferencia entre el área superficial del intercambiador del quemador real y este quemador simulador, ya que en la simulación en lugar de aletas se tienen es anillos, por lo que el área superficial es menor que al área superficial real del quemador.

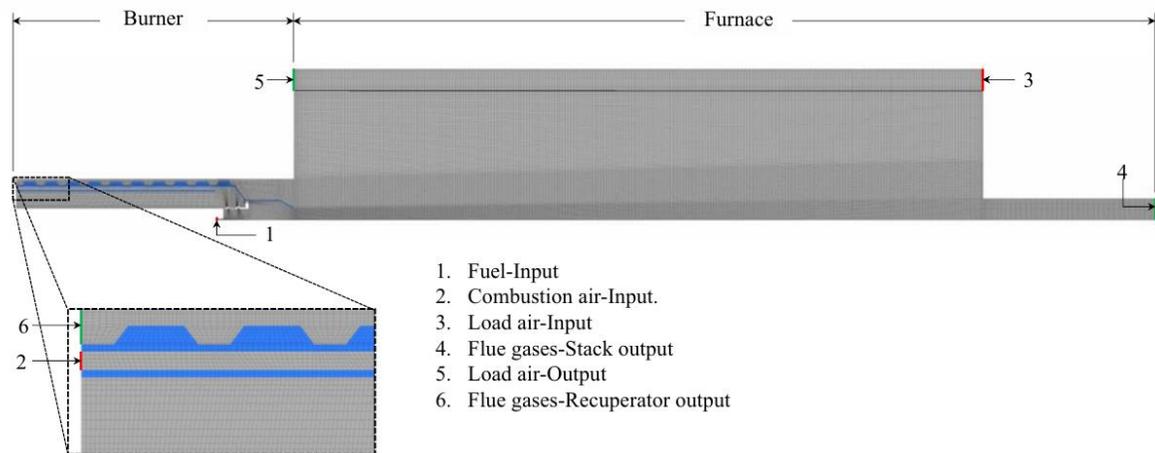


Figura 34. Mallado 2D del horno simulado con el quemador auto-recuperativo. Tomado [60].

En el año 2020 García et al [61] realizaron la simulación numérica de un tubo radiante que cuenta con un recuperador de calor el cual consiste en una matriz de carburo de silicio con 105 perforaciones de 6.35 mm de diámetro. El propósito de la simulación es comparar los modelos de combustión EDC y SDF. En cuanto a los modelos empleados usan $k-\epsilon$ estándar para la turbulencia, OD para la radiación y WSGGM para la absorptividad de los gases. El recuperador no se simuló, sino que la temperatura del aire se calculó con la Ecuación 11, pero con $T_{ref} = 323 K$, $a = 0.3037$, $b = 13.5586$, y $c = 1.0805$ cuyos valores se obtuvieron a partir del análisis experimental del intercambiador.

En el año 2022 López et al [44] realizaron la simulación numérica del horno de combustión sin llama descrito en [39] donde evaluaron el efecto de la adición de agua, aunque realizaron también la evaluación experimental del horno funcionando en modo auto-regenerativo, para la simulación numérica solo se tuvo este efecto usando una temperatura de entrada del aire correspondiente a los datos obtenidos experimentalmente, pero realizando la simulación en estado estable, por lo que el efecto transitorio no fue considerado.

De forma similar Yepes et al [62] realizan la simulación numérica del mismo horno de combustión sin llama descrito en [39] pero usando syngas como combustible, donde aunque el horno es regenerativo, los regeneradores en realidad no se tienen en cuenta en la simulación de tal forma que solo se usa una temperatura constante para el aire de entrada.

Restrepo [45] realizó la simulación numérica de uno de los regeneradores del horno de crisol desarrollado en [42]. La simulación se realizó con el software Fluent en 2d en modo transitorio

empleando el modelo de medio poroso con transferencia de calor en no equilibrio. Además, por medio de un código en Scheme se automatizó el intercambio de las condiciones de frontera para emular el proceso de ciclaje de los regeneradores cada 30 s. En la Figura 35 se muestra el resultado de la evolución de la temperatura para 4 ciclos. Algo que cabe mencionar, es que el código en Scheme desarrollado por Restrepo es susceptible de mejora ya que para cada ciclo toca adicionar nuevo código (repetido), de tal forma que, si se desean realizar muchos ciclos de simulación, este proceso se vuelve engorroso, además si se modifica el tiempo de ciclaje de 30 s a otro tiempo diferente es necesario realizar múltiples cambios en el código lo cual puede conducir a errores humanos.

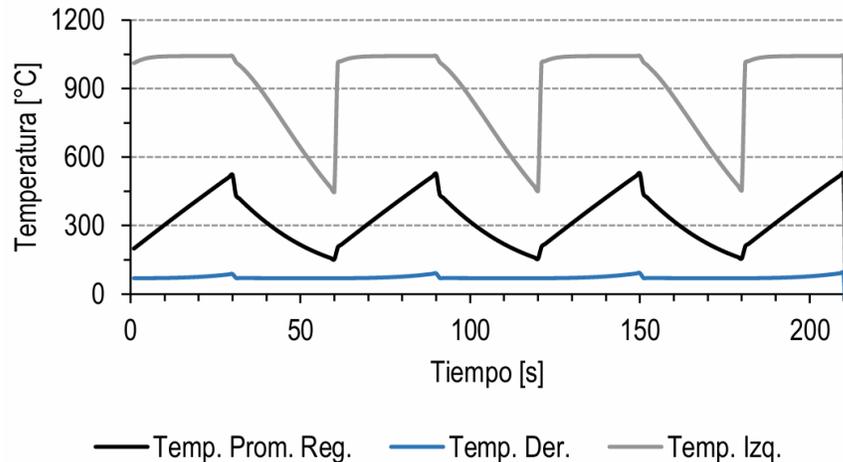


Figura 35. Perfil de temperatura numérico del regenerador, los productos de combustión y el aire. Tomado de [45]

4. Conclusiones

El estado del arte de la recuperación de calor regenerativa y recuperativa muestra que los recuperadores metálicos con aletas aún son usados a nivel industrial, aunque con el surgimiento de la manufactura aditiva también hay una incursión en la optimización de las superficies de intercambio de calor por medio del uso de herramientas CFD para este tipo de recuperadores.

Adicionalmente el uso de quemadores regenerativos y auto-recuperativos son bastante usados para mejorar la eficiencia térmica de los sistemas de combustión, donde las matrices cerámicas tipo honeycomb y de lecho de bolas aún son muy usadas.

El grupo Gasure ha hecho importantes aportes en la modelación teórica, en la simulación CFD y en el desarrollo experimental especialmente en los sistemas de recuperación de calor de desecho auto-regenerativa con matrices tipo honeycomb y lechos empacados de bolas. Aunque aún le falta incursionar en el desarrollo de la optimización del diseño de los recuperadores por medio del CFD paramétrico en conjunto con la manufactura aditiva, lo cual podría ser una apuesta interesante para futuros desarrollos y proyectos del grupo.

Hoy en día existen empresas a nivel internacional que fabrican sistemas de combustión sin llama, apoyados del uso del CFD e incluso, algunos de ellos, ofrecen sistemas que pueden operar con hidrógeno puro sin problemas de estabilidad del régimen.

Referencias

- [1] D. Astesiano, M. Bissoli, A. Della Rocca, E. Malfa, and C. Wuppermann, “Flexible hydrogen heating technologies, with low environmental impact,” *Materiaux et Techniques*, vol. 111, no. 2, pp. 1–12, 2023, doi: 10.1051/mattech/2023018.
- [2] D. Astesiano, M. Bissoli, A. Della Rocca, and E. Malfa, “Tenova SmartBurners : full hydrogen flexibility to reduce furnaces CO2 Tenova SmartBurners : full hydrogen flexibility to reduce furnaces CO 2 footprint,” no. April, 2022.
- [3] “Centro Combustione Ambiente - CCA.” <https://www.cca.srl/en/company/about-us/> (accessed May 20, 2024).
- [4] A. Dellarocca and E. Malfa, “RFCS Project ‘Burner 4.0.’” 2023.
- [5] “Burner 4.0.” <https://burner40.nicepage.io/Home.html> (accessed May 20, 2024).
- [6] MatWeb - Material Property Data, “AISI 310S.” <https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=9d42d23b1d2e4afc8912f32f1d1e63b6&ckck=1> (accessed May 20, 2024).
- [7] MatWeb - Material Property Data, “Inconel Alloy 625.” <https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=4a194f59f35a427dbc5009f043349cb5> (accessed May 20, 2024).
- [8] M. Roveda and D. Astesiano, “Tenova TRGX regenerative and TRGSX self-regenerative flameless burners are the reliable technology for an immediate CO2 footprint reduction through improved combustion efficiency.,” *Furnaces International*, no. December, pp. 2–4, 2021.
- [9] H. Fan *et al.*, “Experimental study of operating parameters on the performance of a novel U-type radiant tube with dual flue gas self-circulation structures,” *Appl Therm Eng*, vol. 207, no. January, p. 118206, 2022, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2022.118206.
- [10] N. Dinsing, N. Schmitz, C. Schubert, and H. Pfeifer, “Development of an efficient modelling approach for fin-type heat-exchangers in self-recuperative burners,” *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 21, 2021, doi: 10.3390/en14216873.
- [11] WS, “Quemador Flox Rekumat M: hechos y cifras.” <https://flox.com/es/recumat-m/> (accessed May 20, 2024).
- [12] F. E. Cano Ardila, J. E. Obando Arbeláez, and A. A. Amell Arrieta, “Emissions and dynamic stability of the flameless combustion regime using hydrogen blends with natural gas,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 1, pp. 1246–1258, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2020.09.236.
- [13] Y. López, J. Obando, C. Echeverri-Urbe, and A. A. Amell, “Experimental and numerical study of the effect of water injection into the reaction zone of a flameless combustion furnace,” *Appl Therm Eng*, vol. 213, p. 118634, Aug. 2022, doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2022.118634.

- [14] TENOVA, “TRKSX Self-Recuperative Flameless Burners | Tenova.” <https://tenova.com/technologies/trksx-self-recuperative-flameless-burners> (accessed Mar. 01, 2024).
- [15] TENOVA, “TRGX Flameless Regenerative Burners | Tenova.” <https://tenova.com/technologies/trgx-flameless-regenerative-burners> (accessed Mar. 01, 2024).
- [16] S. Schwarz, G. Daurer, C. Gaber, M. Demuth, R. Prieler, and C. Hochenauer, “Experimental investigation of the combustion characteristics in oxy-fuel combustion of hydrogen-enriched natural gas on a semi-industrial scale,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 49, pp. 323–337, Jan. 2024, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2023.07.268.
- [17] G. Lopez-Ruiz, J. M. Blanco, A. Peña, N. Romero-Anton, and Z. Azkorra-Larrinaga, “CFD study of flameless combustion in a real industrial reheating furnace considering different H₂/NG blends as fuel,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 49, pp. 1362–1374, Jan. 2024, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2023.11.149.
- [18] A. M. García and A. A. Amell, “A numerical analysis of the effect of heat recovery burners on the heat transfer and billet heating characteristics in a walking-beam type reheating furnace,” *Int J Heat Mass Transf*, vol. 127, pp. 1208–1222, Dec. 2018, doi: 10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2018.07.121.
- [19] H. Yan *et al.*, “CFD-based burner parameter optimization of a sintering ignition furnace,” *Appl Therm Eng*, vol. 241, p. 122430, Mar. 2024, doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2024.122430.
- [20] B. Danon, E. S. Cho, W. De Jong, and D. J. E. M. Roekaerts, “Numerical investigation of burner positioning effects in a multi-burner flameless combustion furnace,” *Appl Therm Eng*, vol. 31, no. 17–18, pp. 3885–3896, Dec. 2011, doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2011.07.036.
- [21] Honeywell International Inc. and Hauck, “Docuthek | WHI – Wall hugger Invisiflame low NO_x flat flame gas burner.” <https://docuthek.kromschroeder.com/index.php?lang=en&folder=401028> (accessed Mar. 01, 2024).
- [22] Linde, “→ Datasheet - OXYGON® 400”, Accessed: Mar. 01, 2024. [Online]. Available: www.linde-gas.com
- [23] YETEN Combustion, “Mildflame Flameless - Low NO_x Burners.” <https://yetencombustion.com/products/mildflame-flameless-low-nox-burners> (accessed Mar. 04, 2024).
- [24] “DCC | high speed burners,” *Danieli Centro Combustion*. <https://www.danielicentrocombustion.it/sito/burners-direct-self-recuperative.html> (accessed Mar. 04, 2024).
- [25] WS Thermal Process Technology Inc., “Rekumat®.” <https://flox.com/en/recumat/> (accessed Mar. 04, 2024).

- [26] WS Thermal Process Technology Inc., “REGEMAT®.” <https://flox.com/en/regemat/> (accessed Mar. 04, 2024).
- [27] W. C. Turner and S. Doty, *Energy Management Handbook*, 6th Editio. Fairmont Press, 2007.
- [28] M. Tawalbeh, H. A. Khan, A. Al-Othman, F. Almomani, and S. Ajith, “A comprehensive review on the recent advances in materials for thermal energy storage applications,” *International Journal of Thermofluids*, vol. 18, p. 100326, May 2023, doi: 10.1016/J.IJFT.2023.100326.
- [29] TYK New Technologies, “New Technologies and Advanced Material - Regenerative Burner Systems,” 2020. <https://www.tyk-europe.de/advanced.html> (accessed Apr. 08, 2024).
- [30] M. Supplies, “MSE PRO Beryllium Oxide (BeO) Powder.” <https://www.msesupplies.com/products/mse-pro-beryllium-oxide-beo-powder-99-95?variant=39259020263482> (accessed May 03, 2024).
- [31] National Institute of Standards and Technology (NIST) - Commerce Department, “Thermal Conductivity of Selected Materials,” 1965.
- [32] V. Ya. Chekhovskoi and V. A. Petrov, “Melting point of corundum,” *Measurement Techniques*, vol. 6, no. 9, pp. 751–753, 1963, doi: 10.1007/BF01419351.
- [33] MatWeb - Material Property Data, “Cordierite, 2MgO-2Al₂O₃-5SiO₂.” <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=c3cef4d2b4e449d5b3fd90461eca30b6&ckck=1> (accessed May 02, 2024).
- [34] P. Pilate and F. Delobel, “Low Thermal Expansion Ceramic and Glass-Ceramic Materials,” in *Encyclopedia of Materials: Technical Ceramics and Glasses*, M. Pomeroy, Ed., Oxford: Elsevier, 2021, pp. 47–58. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818542-1.00048-5>.
- [35] A. A. Amell, “Desarrollo y evaluación de un horno de combustión sin llama de alta eficiencia térmica,” 2009.
- [36] C. Ononogbo *et al.*, “Opportunities of waste heat recovery from various sources: Review of technologies and implementation,” *Heliyon*, vol. 9, no. 2, p. e13590, 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e13590.
- [37] D. A. Henao and A. A. Amell, “Comportamiento de un lecho regenerativo aplicado en un sistema regenerativo radiante,” *Energética*, vol. 29. pp. 55–62, 2003.
- [38] A. Amell, H. Copete, and F. Cadavid, “Desarrollo y evaluación de un sistema de combustión autoregenerativo y radiante para procesos de alta temperatura en PYMES,” *Dyna (Medellin)*, vol. 74, no. 151, pp. 61–69, 2007.
- [39] B. A. Herrera, “Desarrollo y evaluación de una cámara de combustión sin llama,” Universidad de Antioquia, 2009.
- [40] C. Sepulveda, “Desarrollo y evaluación de un quemador autoregenerativo de 20 kW para combustión sin llama de gas natural,” Universidad de Antioquia, 2009.

- [41] J. C. González, “Desarrollo de un sistema de combustión auto-regenerativo con aire enriquecido con oxígeno,” Universidad de Antioquia, 2009.
- [42] A. A. Amell and et al, “Desarrollo, evaluación y demostración de un horno de crisol auto-regenerativo para procesos de alta temperatura en Pymes,” 2008.
- [43] M. Sanchez, “Evaluación numérica y experimental de un quemador de combustión sin llama autoregenerativo usando aire enriquecido con oxígeno,” Universidad de Antioquia, 2010.
- [44] Y. López, J. Obando, C. Echeverri-Urbe, and A. A. Amell, “Experimental and numerical study of the effect of water injection into the reaction zone of a flameless combustion furnace,” *Appl Therm Eng*, vol. 213, no. December 2021, 2022, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2022.118634.
- [45] A. R. Román, “Estudio numérico y experimental del efecto de la co-combustión del gas natural y el hidrógeno en un quemador autorregenerativo para un horno de crisol Trabajo de investigación para optar al título de Magíster en Ingeniería,” Universidad de Antioquia, 2023.
- [46] R. Alvarez Mejía, P. Forero Rivero, and H. D. Mejía, “Aproximacion a La Función De Distribución De Temperatura De Un Regenerador Térmico De Lecho Empacado.” 2001.
- [47] R. Alvarez Mejía, P. Forero Rivero, and H. D. Mejía, “Aproximación a las funciones de distribución de temperatura de un regenerador térmico de lecho empacado,” *Revista Facultad de Ingeniería*, 2002.
- [48] C. N. Lodoño, R. M. Alvarez, and J. R. A. Santamaria, “Dinámica De Fluidos Computacional Aplicada Al Estudio De Regeneradores Térmicos,” *Año*, vol. 71, no. January, pp. 81–93, 2004.
- [49] J. H. Motato, H. F. Arias, and F. J. Cadavid, “Metodología para el cálculo de la distribución de temperatura transitoria en un regenerador térmico de lecho poroso empacado Characterization of the temperature distribution in a packed bed thermal regenerator,” pp. 66–83, 2007.
- [50] H. Copete, A. Amell, and F. Cadavid, “Simulación numérica de una cámara de combustión de alta velocidad con dos configuraciones de inyección de combustible,” *DYNA (Colombia)*, vol. 75, no. 156, pp. 109–120, 2008.
- [51] C. Sepúlveda, A. Amell, and F. Cadavid, “Desarrollo de una metodología para el diseño y la caracterización de regeneradores térmicos tipo honeycomb,” *DYNA (Colombia)*, vol. 77, no. 164, pp. 200–208, 2010.
- [52] N. Rafidi and W. Blasiak, “Thermal performance analysis on a two composite material honeycomb heat regenerators used for HiTAC burners,” *Appl Therm Eng*, vol. 25, no. 17, pp. 2966–2982, 2005, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2005.03.004>.
- [53] F. Cadavid, B. Herrera, and A. Amell, “Numerical simulation of the flow streams behavior in a self-regenerative crucible furnace,” *Appl Therm Eng*, vol. 30, no. 8–9, pp. 826–832, 2010, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2009.12.011.
- [54] A. M. García and A. A. Amell, “A numerical analysis of the effect of heat recovery burners on the heat transfer and billet heating characteristics in a walking-beam type reheating

Prohibida la reproducción total o parcial de este documento sin la autorización de las entidades que tienen derecho de propiedad intelectual sobre el documento.

- furnace,” *Int J Heat Mass Transf*, vol. 127, pp. 1208–1222, 2018, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.07.121.
- [55] A. M. García, A. F. Colorado, J. E. Obando, C. E. Arrieta, and A. A. Amell, “Effect of the burner position on an austenitizing process in a walking-beam type reheating furnace,” *Appl Therm Eng*, vol. 153, no. February, pp. 633–645, 2019, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.02.116.
- [56] “‘Chemical-Kinetic Mechanisms for Combustion Applications’, San Diego Mechanism web page, Mechanical and Aerospace Engineering (Combustion Research), University of California at San Diego (https://web.eng.ucsd.edu/mae/groups/combustion/mechanism.html).”
- [57] A. M. García and A. A. Amell, “A numerical analysis of the effect of heat recovery burners on the heat transfer and billet heating characteristics in a walking-beam type reheating furnace,” *Int J Heat Mass Transf*, vol. 127, pp. 1208–1222, 2018, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.07.121.
- [58] H. A. Yepes and A. A. Amell, “Effect of turbulence model on flameless combustion simulation of a regenerative furnace,” *J Phys Conf Ser*, vol. 1257, no. 1, 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1257/1/012016.
- [59] H. A. Yepes-Tumay, C. E. Arrieta-Gonzales, and A. A. Amell-Arrieta, “Rendimiento energético de un horno equipado con quemadores regenerativos bajo el régimen de combustión sin llama,” *Revista UIS Ingenierías*, vol. 18, no. 3, pp. 39–46, 2019, doi: 10.18273/revuin.v18n3-2019004.
- [60] Y. Lopez, A. M. García, and A. A. Amell, “A numerical analysis of the effect of atmospheric pressure on the performance of a heating system with a self-recuperative burner,” *J Therm Sci Eng Appl*, vol. 12, no. 3, pp. 1–13, 2020, doi: 10.1115/1.4045021.
- [61] A. M. García, M. A. Rendon, and A. A. Amell, “Combustion model evaluation in a CFD simulation of a radiant-tube burner,” *Fuel*, vol. 276, no. April, p. 118013, 2020, doi: 10.1016/j.fuel.2020.118013.
- [62] H. A. Yepes *et al.*, “Regenerative furnace simulation under flameless combustion regime with natural gas and syngas Simulación de un horno regenerativo bajo el régimen de combustión sin llama usando gas de síntesis y gas natural,” vol. 24, no. 1, 2022, doi: 10.25100/iyc.24i1.11022.

5. Régimen de combustión sin llama utilizando biogás como combustible

El biogás es un gas compuesto principalmente por metano y dióxido de carbono a partir de la descomposición anaerobia (en ausencia de oxígeno) de residuos orgánicos de industria como la de los alimentos, la agrícola y la ganadera. Es considerado como un combustible renovable dado su origen a partir de la materia orgánica, aunque presenta algunos retos para hacerlo competitivo frente a otros combustibles de origen fósil, debido a su bajo poder calorífico. Sin embargo, hoy en día el biogás se visualiza como un vector importante para la obtención de dióxido de carbono (CO_2) de origen biogénico, lo cual ayudaría en la cadena de producción de combustibles sintéticos como el metano sintético, para el cual se requiere hidrógeno (H_2) de bajas emisiones (hoy en día obtenido principalmente de la electrolisis del agua a partir de fuentes de energía renovables) y CO_2 .

Gran parte del biogás está compuesto por gases inertes como se muestra en la Tabla 11, lo cual hace que para su combustión de manera convencional se presenten problemas de estabilidad, además de la que la presencia de vapor de agua y de ácido sulfhídrico que promueven la corrosión en hornos y calderas que operan con llama convencional, siendo la combustión sin llama una posible solución a los problemas mencionados [1].

Tabla 11. Composición del biogás [1]

Componente	Fórmula química	Porcentaje en volumen [%]
Metano	CH_4	55 – 65
Dióxido de carbono	CO_2	35 – 45
Nitrógeno	N_2	0 – 3
Oxígeno	O_2	0 – 2
Ácido sulfhídrico	H_2S	0 – 1
Hidrógeno	H_2	0 – 1
Amoniaco	NH_3	0 – 1

La velocidad de llama (S_L y S_T) juega un papel importante en el diseño de un sistema de combustión convencional. La velocidad de combustible y de aire suministrado por el quemador debe ser equiparable a la velocidad de llama para evitar que se apague por un desprendimiento de la llama [2]. En comparación con el gas natural, la velocidad de llama del biogás disminuye debido a una menor concentración de CH_4 en el biogás. Por lo tanto, en la combustión convencional de biogás, las tasas de flujo de aire y combustible inyectado al quemador deben disminuirse para evitar que la llama se apague. Otro parámetro importante en el desempeño de los sistemas de combustión es la temperatura de llama. El diseño de refractarios, aislamiento y otros equipos de recuperación de calor de los sistemas de combustión depende de la temperatura de llama del combustible, ya que las tasas de transferencia de calor del sistema de combustión y la temperatura de la llama del combustible tienen una relación directa [2]. En condiciones de combustión tradicional, la temperatura de llama del biogás es más baja que la del gas natural debido a la presencia de componentes no combustibles como CO_2 [2].

El biogás tiene un buen potencial de ir sustituyendo parte de los usos que actualmente tiene el gas natural. Algunos de los retos actuales para la aplicación del biogás se centran en el elevado costo de los procesos de eliminación de CO_2 , que buscan aumentar la concentración de CH_4 por encima del 90 %, para lograr lo que se conoce como biometano, y, por otro lado, los bajos poderes caloríficos de

este combustible que hacen que su combustión de manera estable y eficiente sea difícil. Sin embargo, al utilizar la tecnología de combustión sin llama, los problemas mencionados del biogás se mitigan, ya que dentro de las bondades que ofrece dicho régimen de combustión se encuentra la flexibilidad para el uso de combustibles y comburentes de diferente composición química. Además, la eliminación de CO₂ del biogás ya no sería necesaria debido a la estabilidad que ofrece la combustión sin llama para quemar el biogás aún en presencia de altas concentraciones de CO₂, lo cual resulta incluso útil para la obtención del régimen, dado que el CO₂ ayuda a la dilución del oxidante en los productos de combustión que recirculan dentro de la cámara de combustión [3].

El Poder Calorífico Inferior (PCI) del CH₄ se encuentra en el orden de 33,300 kJ/m³st, mientras que el PCI del biogás puede variar entre 13,720 y 27,440 kJ/m³st dependiendo de la cantidad de CO₂ presente. Algunas propiedades físicas y químicas del CO₂ y el CH₄ para tener en cuenta se presentan en la Tabla 12 [3].

Tabla 12. propiedad físicas y químicas del CO₂ y el CH₄. [3]

Propiedad	CO ₂	CH ₄
Gravedad específica [-]	1.52	0.554
Volumen específico [m ³ /kg]	0.55	1.51
Calos específico @ 101 kPa [J/kg.K]	858	2261
Cp / Cv	1.303	1.307

En la Figura 36 se presenta un comparativo entre el desempeño de un sistema de combustión sin llama a escala de laboratorio cuando opera con gas natural (izquierda) y biogás (derecha). La figura muestra el perfil de temperatura (Gráfico A) en función del factor de recirculación de gases (K_v), al igual que el perfil de emisiones de NO_x y CO (Gráfico B), también en función del factor K_v (recordar que K_v es la relación entre la masa de gases recirculados al interior de la cámara de combustión sobre la masa de gases que entran a la cámara). En ambas figuras se marcan dos zonas a y b, las cuales corresponden a zonas de transición. La zona a, se da cuando se pasa de modo llama a modo sin llama; mientras que la zona b representa el momento en que se desestabiliza la combustión sin llama debido a una excesiva recirculación de gases, que en la literatura se le da el nombre de combustión sin llama incompleta y que se evidencia cuando pese a que visualmente se observa el régimen, se presentan altas emisiones de especies sin quemar como el monóxido de carbono (CO) [4].

Con respecto a las temperaturas, las cuales fueron registradas en la parte superior e inferior del horno, se observa que cuando se alcanzan la zona a, en donde se da la transición a modo sin llama, para ambos combustibles las temperaturas promedio se estabilizan y son constantes para los diferentes valores de K_v donde el régimen de combustión sin llama es estable. Una vez se supera la zona b, las temperaturas, aunque siguen siendo constantes y uniformes dentro del horno, toman una tendencia a reducir a medida que aumenta el factor de recirculación. Ahora bien, se nota que para el caso de las emisiones de NO_x y CO una reducción considerable cuando se pasa de modo llama a modos sin llama (zona a). Mientras se la transición entre régimen se observa que, con la operación del biogás, aumenta considerablemente las emisiones de CO, aunque están se reducen casi a cero cuando ya se estabiliza el régimen de combustión sin llama. Cuando se llega a valores de K_v altos (zona b) las emisiones de NO_x no se ven afectadas, pero las emisiones de CO aumentan considerablemente, siendo más altos los valores para la operación con gas natural.

En conclusión, cuando se opera con gas natural, los puntos de recirculación Kv óptimos se encuentran entre 4.5 y 10, mientras que cuando se opera con biogás, se debe reducir el factor de recirculación a valores entre 4 y 7.3 [4].

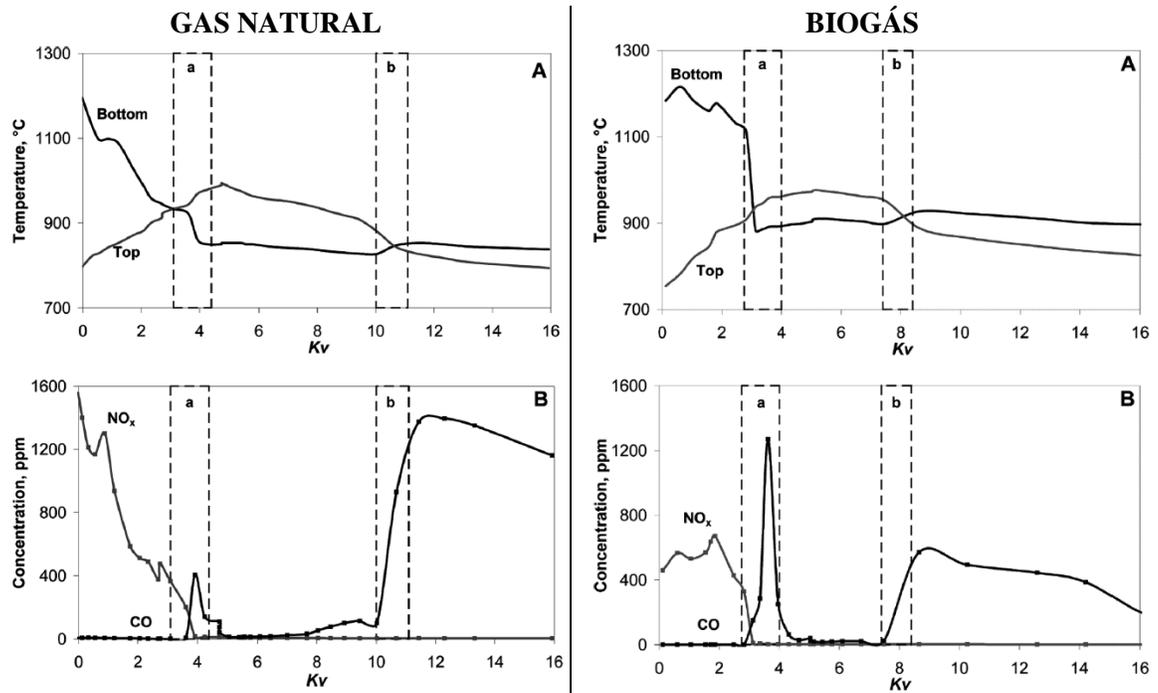


Figura 36. Evolución de la temperatura y de especies durante la operación con gas natural y biogás [4].

En la Figura 37 se presenta el registro de temperatura a lo largo del eje central de un horno a escala de laboratorio operando con metano en modo llama convencional y con biogás en modo sin llama. Se observa que la temperatura del modo de combustión sin llama con biogás es más baja que la combustión convencional del CH_4 en cualquier posición de la cámara de combustión. Sin embargo, en la combustión convencional, la temperatura fluctúa de un punto a otro de la cámara y promoviendo la fácil formación de puntos calientes. En la combustión sin llama, la temperatura dentro del horno fue uniforme con valores aproximados de 1050 K (777 °C). Los altos contenidos de CO_2 presente en el biogás, sumado al que se presenta durante su combustión, hace que haya un aumento en la concentración de CO_2 de la corriente de gases que fluye al interior de la cámara de combustión, lo cual enfría las reacciones de combustión, disminuyendo la temperatura de la cámara incluso si se compara con la combustión sin llama de metano. Además, el CO_2 tiene efectos de enfriamiento significantes debido a su alto calor específico (C_p) en altas temperaturas y sus características de radiación que le permiten absorber más radiación de la zona de reacción [2].

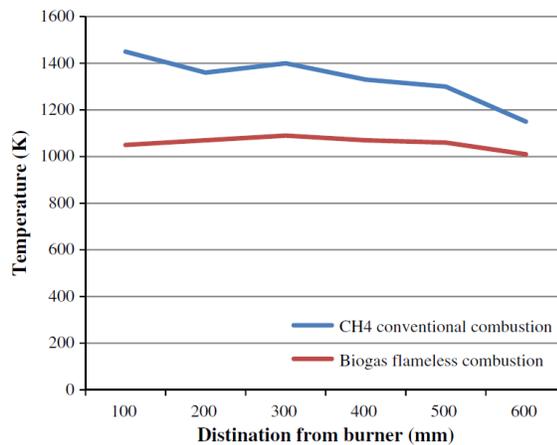


Figura 37. Perfil de temperatura a lo largo del eje central del horno [2].

La Figura 38 muestra la concentración de O_2 y CO_2 en volumen a lo largo del eje central del horno operando con biogás en régimen de combustión sin llama. La concentración de oxígeno a lo largo del horno registró valores alrededor del 7%. En cuanto a la formación de CO_2 en la combustión sin llama del biogás, se registró una concentración del 22%. Es de notar que, en la combustión del CH_4 con un exceso de aire del 20%, la formación máxima de CO_2 en los humos secos se registró en un 10.8%, mientras que, en la combustión sin llama del biogás con el mismo exceso de aire, la concentración de CO_2 en los humos se midió alrededor del 22%, debido a la cantidad adicional de CO_2 en la composición del biogás.

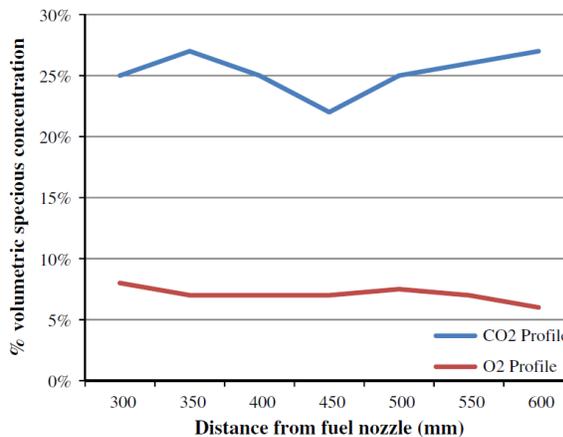


Figura 38. Concentración de O_2 y CO_2 a lo largo del eje central del horno [2].

En el estudio realizado por el grupo GASURE [5] sobre un horno de combustión sin llama operando con biogás (60 % CH_4 – 40 % CO_2) a 20 kW (PCS) se resaltan los siguientes puntos para tener en cuenta:

- Para la combustión sin llama del biogás se tuvieron temperaturas promedio 907 °C mientras que durante la operación en modo sin llama del gas natural las temperaturas fueron de 953 °C. En la Figura 39 se presenta el perfil de temperatura del horno.
- Al quemar biogás, hay un incremento en la masa de humos que corresponde a la fracción de masa de CO_2 en el biogás, lo cual aumenta la cantidad de gases en un 8.5% (fracción de masa)

Prohibida la reproducción total o parcial de este documento sin la autorización de las entidades que tienen derecho de propiedad intelectual sobre el documento.

en comparación con la cantidad total de humos producidos con gas natural. Además, el CO_2 tiene un efecto de enfriamiento superior al del N_2 debido a su mayor calor específico (C_p) a altas temperaturas ($C_{p\text{CO}_2} = C_{p\text{N}_2} = 1.28/1.20$ a 1200 K) y sus propiedades de radiación le permiten absorber más radiación de la zona de reacción. La cantidad aumentada de gases inertes que fluyen en la cámara de combustión enfría las reacciones, reduciendo la temperatura de la cámara.

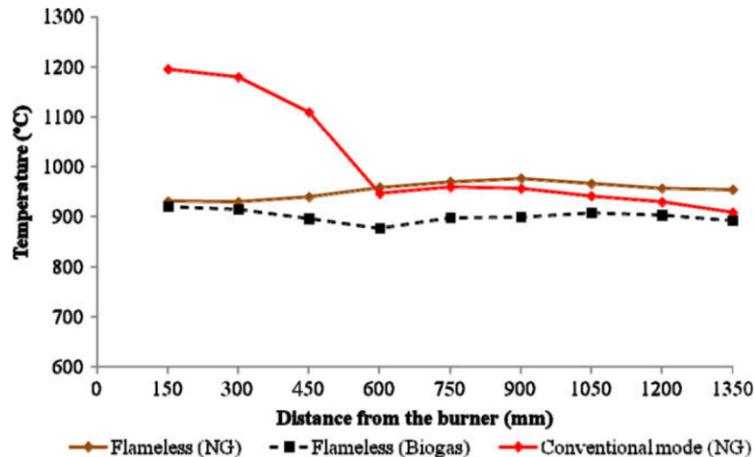


Figura 39. Perfil de temperatura a lo largo del eje central del horno.

- Al comparar el biogás con el gas natural bajo el régimen de combustión sin llama se observó que el número de Reynolds de la descarga del combustible era turbulento ($Re_{\text{NG}} = 15.37$ y $Re_{\text{biogás}} = 21,23$) mientras que la la velocidad del flujo de aire se mantuvo constante alrededor de 79 m/s ($Re_{\text{air}} = 23,41$). Aunque la viscosidad del biogás es mayor y su velocidad de inyección es menor ($V_{\text{biogás}} = 54$ m/s) en comparación con el gas natural ($V_{\text{NG}} = 81$ m/s), el número de Reynolds para el biogás sigue siendo mayor debido a su mayor densidad y al mayor caudal requerido para lograr la misma entrada térmica, por lo que la mayor uniformidad con respecto al biogás está relacionada con los patrones de mezcla mejorados que ocurren como consecuencia de la mayor turbulencia. Además, la mayor cantidad de productos de combustión que recirculan en la cámara, especialmente el CO_2 y sus propiedades mejores propiedades de radiación, conducen a una mejor distribución del calor en toda la cámara de combustión.
- Se tuvieron concentraciones de O_2 del orden del 3.7 % vol para la operación con biogás y un exceso de aire del 20 %. Bajo las condiciones anteriores y operando con gas natural la concentración de CO_2 es cercana a 11.3 % vol, mientras que con biogás fue del orden del 15 %. En la Figura 40 se presenta la evolución de las especies O_2 y CO_2 a lo largo del horno.

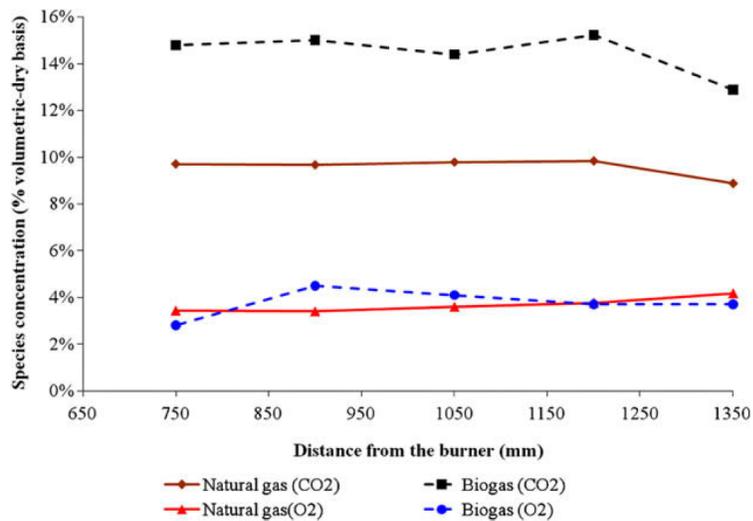


Figura 40. Perfiles de concentración de O₂ y CO₂.

5.1. Referencias combustión sin llama y biogás

[1] Hosseini, Seyed Ehsan, Mazlan A. Wahid, and Abuelnuor Abdeen Ali Abuelnuor. “Biogas Flameless Combustion: A Review.” *Applied Mechanics and Materials* 388 (August 2013): 273–79. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.388.273>.

[2] Seyed Ehsan Hosseini, Mazlan Abdul Wahid. “Biogas utilization: Experimental investigation on biogas flameless combustion in lab-scale furnace” *Energy Conversion and Management*, Volume 74, 2013, Pages 426-432, ISSN 0196-8904, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.06.026>.

[3] Sheng Chen, Chuguang Zheng. “Counterflow diffusion flame of hydrogen-enriched biogas under MILD oxy-fuel condition”. *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 36, Issue 23, 2011, Pages 15403-15413, ISSN 0360-3199, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.09.002>.

[4] Alessandro Effuggi, Davino Gelosa, Marco Derudi & Renato Rota (2008). “Mild Combustion of Methane-Derived Fuel Mixtures: Natural Gas and Biogas, *Combustion Science and Technology*”. 180:3, 481-493, DOI: 10.1080/00102200701741368.

[5] A.F. Colorado, B.A. Herrera, A.A. Amell “Performance of a Flameless combustion furnace using biogas and natural gas” *Bioresource Technology*, Volume 101, Issue 7, 2010, Pages 2443-2449, ISSN 0960-8524, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.11.003>.

6. Régimen de combustión sin llama utilizando mezclas hidrógeno/gas natural como combustible

Son diversos los trabajos que se encuentran acerca del uso de hidrogeno y su mezcla con gas natural y otros combustibles gaseosos, bajo un régimen de combustión sin llama. Existen estudios desde hace más de 15 años que demuestran que la presencia de hidrógeno en quemadores de gas natural afectan la estabilidad de las llamas, las tasas de liberación de calor y la formación de especies como los NOx debido a las características físicas que presenta el hidrógeno como los son su amplio rango de inflamabilidad, su alta velocidad de deflagración laminar, su elevada temperatura de llama adiabática entre otros. Debido a lo anterior, la combustión sin llama se ha presentado como una alternativa para una quema eficiente del gas natural en mezclas con hidrógeno (*blending*), dado que permite una combustión estable y segura, mientras reduce las emisiones de gases contaminantes como el CO y los NOx, al igual que una liberación de calor uniforme [1-4].

Todos los estudios revisados demuestran que la combustión sin llama es adecuada para mezclas de gas natural con hidrógeno, obteniendo zonas de reacción estables y bajas emisiones de NOx y CO. En general, el aumento de la velocidad de deflagración laminar a mayores porcentajes de H₂ en la mezcla de combustible se compensa con la alta dilución que se logra en la cámara de combustión bajo el régimen de combustión sin llama. Sin embargo, es de tener presente que se debe investigar cada caso específico ya que el diseño de los quemadores para la combustión sin llama varía, lo que influye en la aerodinámica del horno y en las características de la combustión, y, en consecuencia, el uso de mezclas de H₂/NG puede llevar a diferentes respuestas [5].

Una característica que se debe tener presente cuando se hacen estudios con la combustión del hidrógeno es que se debe prestar mucha atención a los mecanismos de formación de NOx más allá del mecanismo de NOx térmico que es el que normalmente se utiliza para los análisis. Para estos casos, también se deben tener en cuenta los mecanismos Prompt, NNH y N₂O intermedio, ya que estos aportan en gran proporción a la estimación real de NOx como se muestra en la Figura 41, donde se observa que las rutas típicas de estimación de NOx (térmico a través del mecanismo de Zeldovich y Prompt) aportan poco cuando se trata de mezclas con hidrógeno.

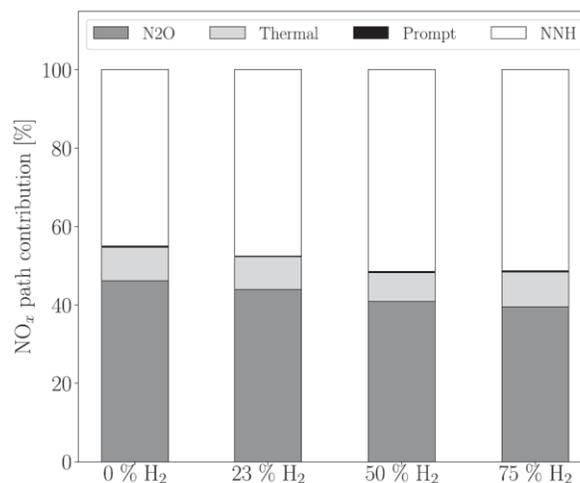


Figura 41. Contribución de las diferentes rutas de formación de NOx en la combustión de mezclas H₂/GN [5].

Prohibida la reproducción total o parcial de este documento sin la autorización de las entidades que tienen derecho de propiedad intelectual sobre el documento.

En la Figura 42 se presentan contornos de temperatura y fracción másica de OH para un sistema de combustión sin llama a diferentes mezclas H₂/ GN en volumen. En el caso de H0 (100 % gas natural), se puede observar una zona de mezclado definida al observar el contorno de temperatura en el punto donde los dos jets de descarga (combustible y aire) se encuentran, caracterizada por valores de temperatura que van de 1000 a 1400 K, pero sin formación de radicales OH en dicha región. Los contornos de temperatura muestran que en los casos de H23 (23 % H₂ – 77 % GN), H50 (50 % H₂ – 50 % GN), y H75 (75 % H₂ – 25 % GN), la zona de reacción presenta una expansión más amplia aguas abajo, lo que resulta en una zona de combustión más grande. En estos casos, la longitud de la zona de mezcla entre el aire y el combustible es menor en comparación con H0. Esto se debe principalmente al límite de inflamabilidad más alto del hidrógeno y al aumento de la velocidad del frente de llama. Esto concuerda con observaciones numéricas y experimentales de otros trabajos realizados, que han encontrado que las curvas de OH se expanden hacia la región contraria al quemador (aguas abajo) dentro de la cámara de combustión [1,2]. Esta expansión puede atribuirse a la mayor reactividad de la mezcla de combustible empleada [5].

En este caso, los resultados muestran que las curvas de temperatura y OH permanecen casi constantes a pesar del mayor contenido de hidrógeno. Las curvas de OH muestran pequeñas diferencias entre H23 y H50, con curvas de OH más cortas para este último, y diferencias casi insignificantes entre H50 y H75 [5].

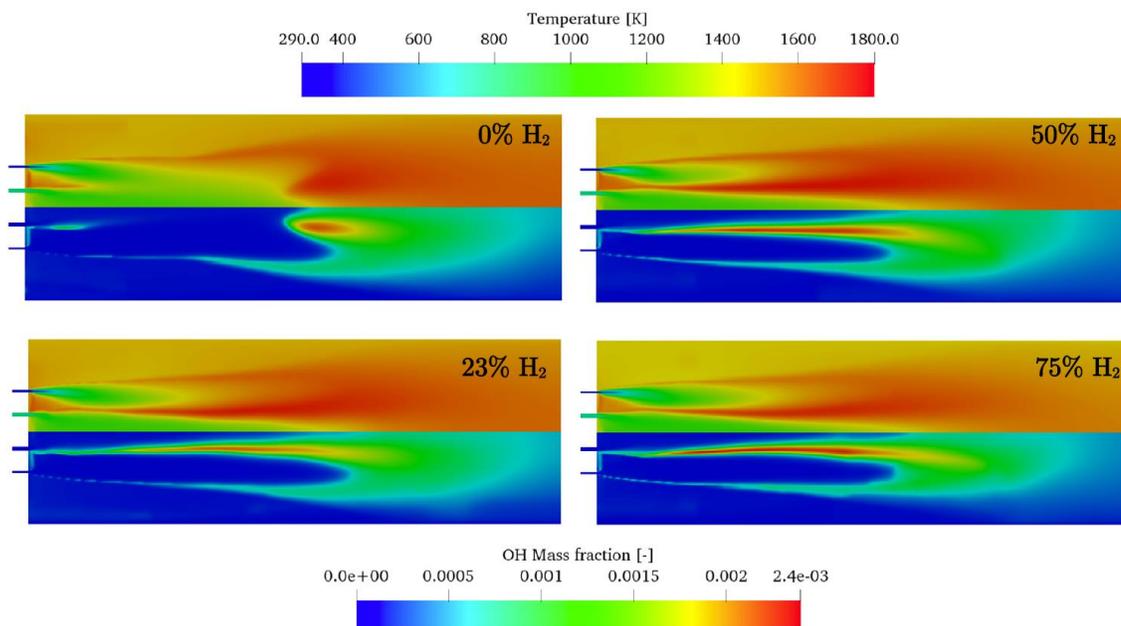


Figura 42. Contornos de temperatura y fracción másica de OH para diferentes mezclas H₂/GN [5].

La mayor parte de los estudios encontrados sobre combustión sin llama con mezclas hidrógeno y gas natural son numéricos, o experimentales a nivel de laboratorio. Dentro del grupo Gasure se realizó el trabajo de maestría titulado “Análisis teórico y experimental de la combustión de mezclas gas natural-hidrógeno bajo el régimen de combustión sin llama” y se han realizado diferentes publicaciones sobre la combustión de mezclas hidrógeno, syngas con aire y syngas-gas natural con aire, donde se ha demostrado que la adición de hidrógeno mejora la combustibilidad del gas natural. Dentro de dichos

trabajos se ha hecho una revisión amplia de los mecanismos a utilizar para simulaciones con hidrógeno y gas natural, así como los principales efectos en la combustión y estabilidad del régimen de combustión sin llama [4, 6-12].

La empresa Fives North American Combustion, Inc, realizó en el año 2022, una prueba en un horno de combustión sin llama industrial que opera con regeneración de calor, con el fin de observar el comportamiento de las emisiones de NO_x cuando el horno opera con 100 % gas natural y con 100 % hidrógeno bajo el régimen de combustión sin llama. En la Figura 43 se presenta una fotografía real del horno que se utilizó en los ensayos, destacando el uso de *stacks* de pipetas de hidrógeno para el suministro del gas al horno.



Figura 43. Horno donde realizaron el ensayo [13].

En la Figura 44 se presentan los resultados obtenidos para las emisiones de NO_x, en ppm bajo la figura izquierda y en lb/MMBtu, donde se destaca que es importante que cuando se realicen comparaciones de especies entre dos tipos de combustibles es preferible hacerlo en unidades de masa, ya que como se observa, cuando se mide con base a una unidad de volumen (ppm) las emisiones de NO_x cuando se utiliza H₂ son mayores que con el uso de gas natural, sin embargo cuando se observa desde una unidad másica (lb/MMBtu), se evidencia que son mayores las emisiones al usar solo gas natural que con hidrógeno.

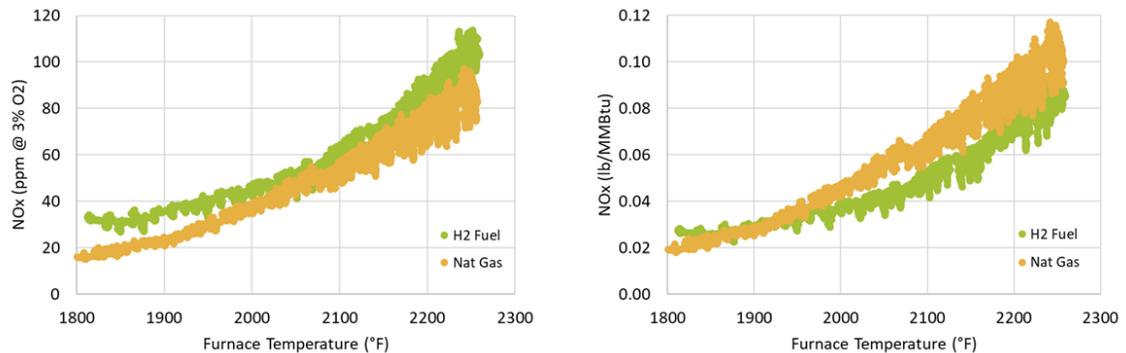


Figura 44. Emisiones de NO_x en ppm (izquierda) y en lb/MMBtu (derecha) [13].

Prohibida la reproducción total o parcial de este documento sin la autorización de las entidades que tienen derecho de propiedad intelectual sobre el documento.

La empresa Tenova por su parte, también ha presentado un quemador bajo el nombre de FlexyTech TSX que puede operar con mezclas gas natural e hidrógeno (hasta 100 % hidrógeno) bajo el régimen de combustión sin llama [14].

La empresa SMS grup tambien ha lanzado el quemador SMS ZeroFlame HY2, que al igual que el de Tenova, puede operar con gas natural y mezclas con hidrógeno, hasta con hidrógeno puro bajo el régimen de combustión sin llama [15]. Sobre este desarrollo reportan los siguientes beneficios:

- El quemador puede operar tanto con 100 % gas natural como 100 % hidrógeno, y mezclas intermedias.
- Se obtienen emisiones bajas de NO_x del orden de 40 ppm a 3 % de O₂. Esto gracias a la combustión sin llama.
- Se alcanza una emisividad de los gases un 5 % mayor comparado con un quemador de gas natural convencional.
- Reducción en las emisiones de CO₂.
- Disponible para potencias entre 500 kW y 3000 kW.

También cabe recordar el proyecto realizado por linde Inc, en un horno de tratamientos térmicos de la empresa Ovaco, en el cual se logró obtener el régimen de combustión sin llama para una operación de hidrógeno y oxígeno [16].

6.1. Referencias combustión sin llama y blending H₂/GN

[1] Ferrarotti M, De Paepe W, Parente A. Reactive structures, and NO_x emissions of methane/hydrogen mixtures in flameless combustion. *Int J Hydrogen Energy* 2021;46(68):34018–45. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.07.161>.

[2] Ayoub M, Rottier C, Carpentier S, Villermaux C, Boukhalfa A, Honoré D. An experimental study of mild flameless combustion of methane/hydrogen mixtures. *Int J Hydrogen Energy* 2012;37(8):6912–21. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.01.018>, III Iberian Symposium on Hydrogen, Fuel Cells, and Advanced Batteries, HYCELTEC-2011.

[3] Parente A, Galletti C, Tognotti L. Effect of the combustion model and kinetic mechanism on the MILD combustion in an industrial burner fed with hydrogen enriched fuels. *Int J Hydrogen Energy* 2008;33(24):7553–64. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.09.058>.

[4] Cano Ardila FE, Obando Arbeláez JE, Amell Arrieta AA. Emissions and dynamic stability of the flameless combustion regime using hydrogen blends with natural gas. *Int J Hydrogen Energy* 2021;46(1):1246–58. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.09.236>.

[5] G. Lopez-Ruiz, J.M. Blanco, A. Peña, N. Romero-Anton, Z. Azkorra-Larrinaga. “CFD study of flameless combustion in a real industrial reheating furnace considering different H₂/NG blends as fuel”. *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 49, Part B, 2024, Pages 1362-1374, ISSN 0360-3199, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.11.149>.

[6] A. A. Amell, H. A. Yepes, and F. J. Cadavid, “Numerical and experimental study on laminar burning velocity of syngas produced from biomass gasification in sub-atmospheric pressures,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 39, no. 16, pp. 8797–8802, 2014.

- [7] H. A. Yepes and A. A. Amell, “Laminar burning velocity with oxygen-enriched air of syngas produced from biomass gasification,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 38, no. 18, pp. 7519–7527, 2013.
- [8] J. Pareja, H. J. Burbano, A. Amell, and J. Carvajal, “Laminar burning velocities and flame stability analysis of hydrogen/air premixed flames at low pressure,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 36, no. 10, pp. 6317–6324, 2011.
- [9] C. Cardona, A. Amell, and H. Burbano, “Laminar burning velocity of natural gas/syngas-air mixture,” *Dyna*, vol. 80, no. 180, pp. 136–143, 2013.
- [10] H. J. Burbano, J. Pareja, and A. A. Amell, “Laminar burning velocities and flame stability analysis of syngas mixtures at sub-atmospheric pressures,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 36, no. 4, pp. 3243–3252, 2011.
- [11] Maya, L., Restrepo, A., & Amell Arrieta, A. A. (2021). Theoretical and numerical study of the combustion properties of premixed hydrogen/natural gas/air at a sub-atmospheric pressure of 0.849 Bar. *CT&F - Ciencia, Tecnología Y Futuro*, 11(2), 39–49. <https://doi.org/10.29047/01225383.374>
- [12] H. J. Burbano, J. Pareja, and A. A. Amell, “Laminar burning velocities and flame stability analysis of H₂/CO/air mixtures with dilution of N₂ and CO₂,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 36, no. 4, pp. 3232–3242, 2011.
- [13] Mark Hannum. Impact of hydrogen on flameless combustion NO_x. LinkedIn Article. Available online: https://www.linkedin.com/pulse/impact-hydrogen-flameless-combustion-nox-mark-hannum/?trk=organization_guest_main-feed-card_reshare_feed-article-content.
- [14] Tenova’s Flameless SmartBurner: Enabling hydrogen-based decarbonization of industrial furnaces. Available online: <https://tenova.com/newsroom/press-releases/tenovas-flameless-smartburner-enabling-hydrogen-based-decarbonization>
- [15] SMS ZeroFlame HY2: Flameless and hydrogen powered burner for carbon-free reheating furnaces. Available Online: <https://www.sms-group.com/insights/all-insights/a-burner-for-all-mix-ratios-of-natural-gas-and-hydrogen>
- [16] Embracing hydrogen FlamelessOxyfuel for CO₂-free heating. Linde inc. Available online: https://www.researchgate.net/publication/348002640_Embracing_Hydrogen_Flameless_Oxyfuel_for_CO2-free_Heating
- [17] Ruggero Amaduzzi¹, Marco Ferrarotti, Alessandro Parente. “Strategies for Hydrogen-Enriched Methane Flameless Combustion in a Quasi-Industrial Furnace” *Front. Energy Res.*, 20 January 2021. *Sec. Process and Energy Systems Engineering*. Volume 8 - 2020 | <https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.590300>
- [18] Kikuchi K, Motegi T, Hori T, Akamatsu F. Influence of nozzle design parameters on exhaust gas characteristics in practical-scale flameless hydrogen combustion. *Int J Hydrogen Energy* 2022;47(49):21287–97. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.04.230>.
- [19] Liu Z, Xiong Y, Yang N, Ren L, Liu Y, Zhang S, et al. Comparison of combustion characteristics of MILD model combustor and multi-nozzle array model combustor fueled hydrogen-methane

mixtures. Int J Hydrogen Energy 2023;48(81):31802–12.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.04.326>.

[20] Umberto Zanusso, Jimmy Fabro, Irene Luzzo and Filippo Cirilli. “Development and testing of flameless burner fed by NG/H₂ mix”. *Matériaux & Techniques*, 109 3-4 (2021) 304 Published online: 03 February 2022 DOI: 10.1051/mattech/2022004.

[21] Ferrarotti M, De Paepe W, Parente A. Reactive structures, and NO_x emissions of methane/hydrogen mixtures in flameless combustion. *Int J Hydrogen Energy* 2021;46(68):34018–45. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.07.161>.

[22] Mayrhofer M, Koller M, Seemann P, Bordbar H, Prieler R, Hochenauer C. MILD combustion of hydrogen and air – an efficient modelling approach in CFD validated by experimental data. *Int J Hydrogen Energy* 2022;47(9):6349–64. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.11.236>.

[23] Celtek MS. Flameless combustion investigation of CH₄/H₂ in the laboratory scaled furnace. *Int J Hydrogen Energy* 2020;45(60):35208–22. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.05.233>, 4th International Hydrogen Technologies Congress.

[24] Jiang X, Li P, Guo J, Hu F, Wang F, Mi J, et al. Detailed investigation of NO mechanism in non-premixed oxy-fuel jet flames with CH₄/H₂ fuel blends. *Int J Hydrogen Energy* 2018;43(17):8534–57. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.03.100>.

[25] Ayoub M, Rottier C, Carpentier S, Villermaux C, Boukhalfa A, Honoré D. An experimental study of mild flameless combustion of methane/hydrogen mixtures. *Int J Hydrogen Energy* 2012;37(8):6912–21. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.01.018>, III Iberian Symposium on Hydrogen, Fuel Cells and Advanced Batteries, HYCELTEC-2011.

[26] Galletti C, Parente A, Derudi M, Rota R, Tognotti L. Numerical and experimental analysis of NO emissions from a lab-scale burner fed with hydrogen enriched fuels and operating in MILD combustion. *Int J Hydrogen Energy* 2009; 34(19):8339–51. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.07.095>.

7. Desarrollos recientes en combustión sin llama para procesos de alta temperatura

Para los hornos térmicos utilizados en la industria, las tecnologías más recientes para mejorar la eficiencia energética incluyen el uso de quemadores auto recuperativos o auto regenerativos. Sin embargo, con el precalentamiento del aire del aire de combustión, la temperatura de las llamas aumenta lo cual promueve la formación de óxidos de nitroso, al tiempo que aumenta la fatiga térmica de los componentes internos de la cámara de combustión. Como una solución efectiva a lo anterior, hoy en día ha ido en constante crecimiento el uso de tecnologías de combustión sin llama utilizando quemadores con recuperación o regeneración de calor para procesos de alta temperatura. Con el uso de la combustión sin llama se logra que, pese al incremento de la temperatura del aire de combustión debido a la recuperación de calor, no se aumente la temperatura en la zona de reacción, donde, por el contrario, se logran beneficios como una mejor uniformidad de temperatura, reducción de emisiones, aumento de la eficiencia de combustión y mejor transferencia de calor hacia la carga con respecto a los sistemas convencionales. A continuación, se presenta un resumen de los avances más recientes que se han encontrado en cuanto a aplicaciones de la tecnología de combustión sin llama en procesos industriales de alta temperatura.

De acuerdo con Weber et al. [1], la tecnología de combustión sin llama ha sido ampliamente adoptada a nivel mundial, con aproximadamente 39,000 quemadores de combustión sin llama instalados en 7867 hornos industriales. Estas instalaciones han llevado a ahorros significativos de combustible equivalentes a 68 mil millones de litros de petróleo crudo por año y reducción en las las emisiones de CO₂ en 180 mil millones de toneladas por año. Se espera que la tecnología de combustión sin llama continúe contribuyendo a procesos de combustión más limpios y eficientes en varias aplicaciones más allá de los hornos industriales.

Los reportes más recientes resaltan los beneficios ya bien reportados sobre la combustión sin llama en sistemas de combustión y calentamiento. Es así como en el trabajo de Weber et al. [1], reportan que la distribución uniforme de temperatura es una de las características más importantes de este régimen de combustión cuando se hace precalentamiento de aire de combustión. En la Figura 45 se muestran las temperaturas al interior de una misma cámara de combustión: la de la izquierda obtenida con aire a temperatura normal con 21% de oxígeno, y la imagen derecha obtenida con aire precalentado a 1200 °C con una concentración de oxígeno del 4% en régimen de combustión sin llama. En el caso de la combustión con llama, la temperatura máxima se encuentra cerca de la salida de la boquilla del combustible. En contraste, para la combustión sin llama con aire precalentado, se observa un campo térmico mucho más uniforme en toda la cámara de combustión. Las fluctuaciones de temperatura en las llamas convencionales, se reducen significativamente cuando se pasa a un régimen de combustión sin llama evidenciado a través del valor RMS de las fluctuaciones de temperatura, que son menores a 5°C en el caso de la combustión sin llama. Lo anterior resulta a su vez en menores emisiones de ruido, teniendo que para la combustión sin llama los niveles de ruido son siete veces menores que para la combustión convencional.

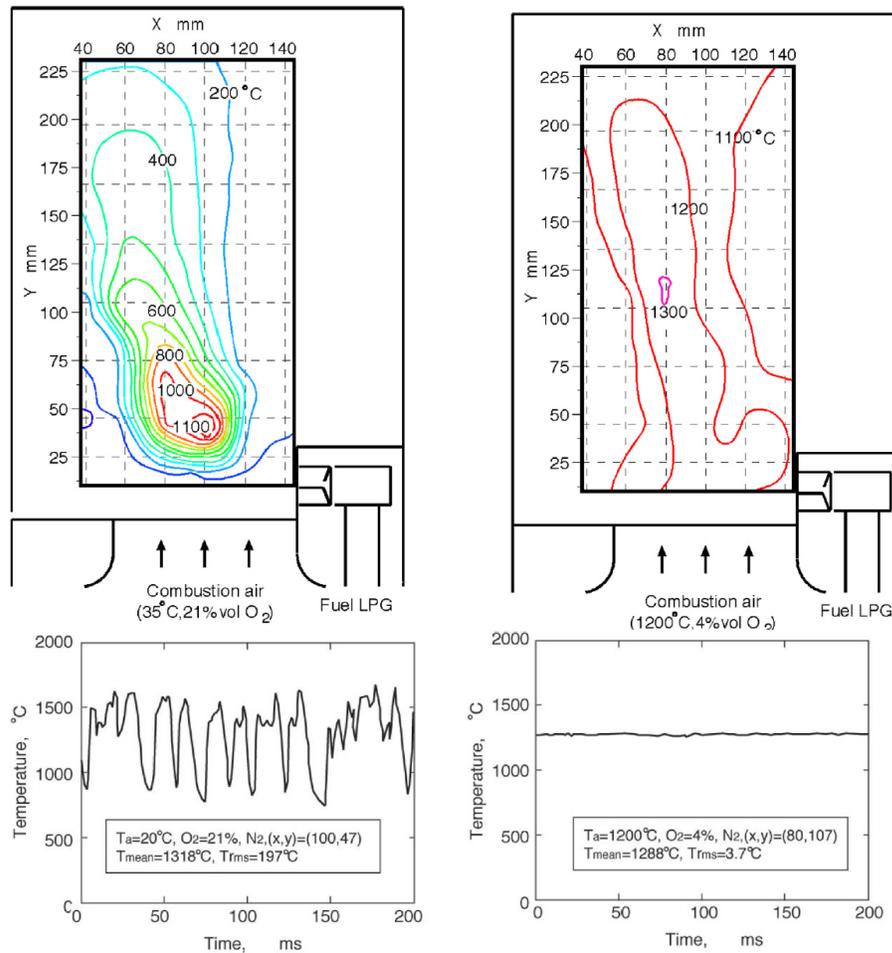


Figura 45. Distribución de temperaturas y u fluctuación en la combustión con llama (izquierda) y combustión sin llama (derecha) para el GLP [1].

La combustión sin llama ha mejorado significativamente la eficiencia energética en los hornos industriales, logrando aproximadamente un 25% de ahorro de energía al precalentar el aire de combustión utilizando el intercambio de entalpía de los gases de escape del horno. Este método aumenta la eficiencia térmica y reduce el consumo de combustible. La combustión sin llama ha sido efectiva en la reducción de la contaminación ambiental, incluyendo una reducción del 50% en emisiones como CO_2 y NO_x . Esta reducción se logra a través de una distribución térmica uniforme y bajas temperaturas de la llama, lo que minimiza la formación de contaminantes. La capacidad de la tecnología para reducir drásticamente los contaminantes y el ruido mientras mantiene una alta eficiencia subraya sus beneficios ambientales. Esto hace que la combustión sin llama sea un componente importante en los esfuerzos por aumentar la eficiencia energética en la industria y promover el uso sostenible de la energía.

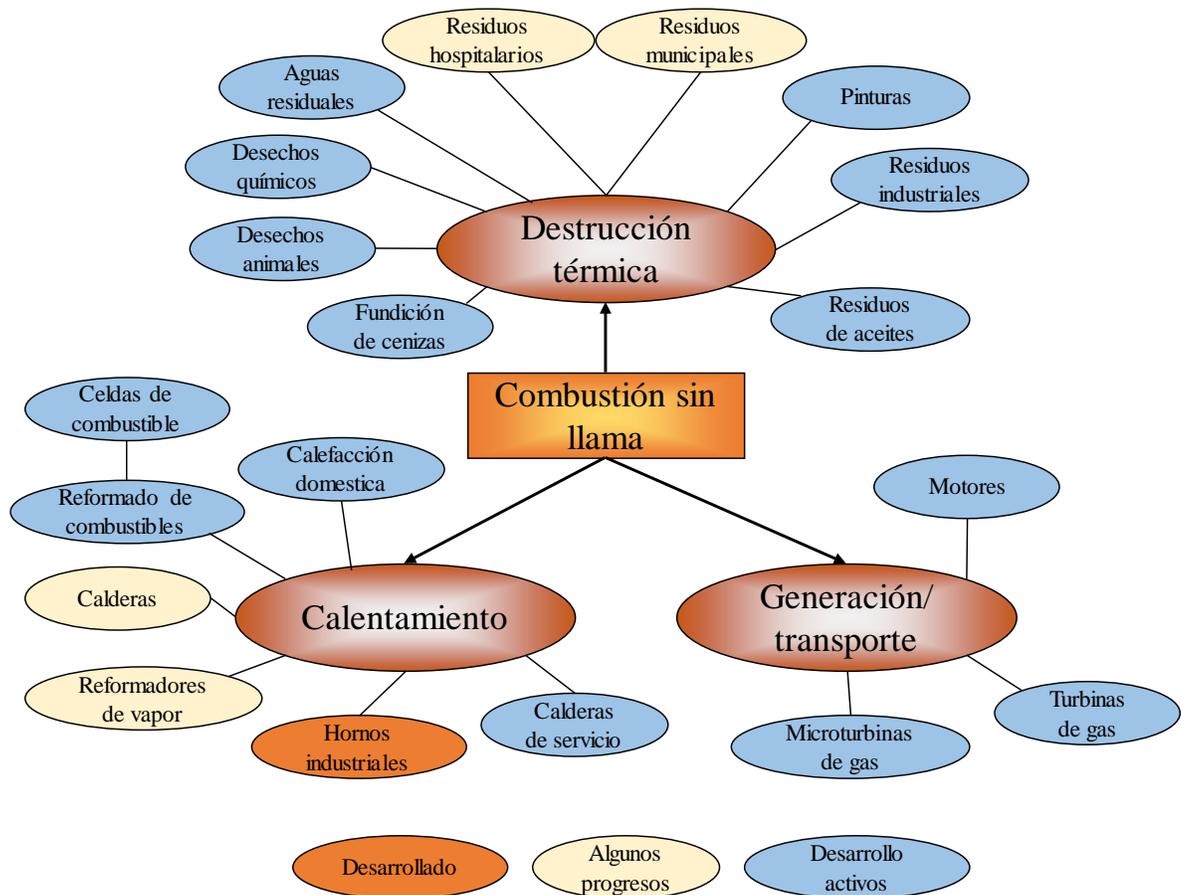


Figura 46. Tendencias actuales de aplicación de la combustión sin llama. Adaptado de [1].

Dado que la tecnología de combustión sin llama ha demostrado ofrecer un ahorro significativo de energía, bajas emisiones y equipos de tamaño compacto. Actualmente, la tecnología de combustión sin llama se utiliza en hornos de procesos de alta temperatura alrededor del mundo, especialmente en procesos que consumen mucha energía, como la industria del acero. Recientemente, esta tecnología también se ha empleado en procesos de destrucción térmica de diversos tipos de residuos sólidos y lodos, así como para la combustión en sistemas térmicos de alta intensidad de combustión (potencia térmica por unidad de volumen y de presión de operación), como en las turbinas de gas estacionarias que presentan intensidades de combustión de hasta 400 MW/m³.atm, en comparación con los hornos industriales que tienen una intensidad de combustión de solo 0.1 a 0.5 MW/m³. atm. La Figura 46 presenta un diagrama esquemático del potencial actual y futuro cercano de la tecnología de combustión sin llama.

En los sistemas de combustión a presión atmosférica para aplicaciones industriales, la intensidad de combustión es baja (~0.1 a 0.5 MW/m³.atm). Sin embargo, en la combustión de alta intensidad se requiere una intensidad térmica mucho mayor (~15–80 MW/m³.atm). La combustión sin llama en procesos de alta intensidad de combustión se está desarrollando con el propósito de aumentar la eficiencia del equipo y permitir el uso de varios tipos de combustibles, dado que esta tecnología es más flexible frente a la operación con combustibles de diferente composición química. En turbinas

de gas, el uso de la combustión sin llama ha mostrado buenos resultados para intensidades de hasta 400 MW/m³.atm. Tales intensidades son útiles para la próxima generación de turbinas de gas que operarán a muy alta intensidad para lograr una alta eficiencia y rendimiento [2–7]. Los resultados obtenidos han mostrado niveles de NO_x cercanos a la unidad en ppm (corregidos a una concentración de O₂ del 15%) y emisiones muy bajas de CO utilizando diversos tipos de combustibles gaseosos y líquidos, así como biocombustibles. La combustión sin llama también se ha utilizado en la reforma de combustibles para proporcionar gas de síntesis rico en hidrógeno con alta eficiencia. [8].

Finalmente, se pueden encontrar detalles de varias aplicaciones revisando las publicaciones de numerosos centros de investigación dentro las que se destacan las siguientes: La Universidad de Nápoles [9-11] se centró en la modelización teórica, el Instituto de Tecnología de Tokio [12-15] y el Instituto Real de Tecnología de Estocolmo [16-18] se enfocaron en la gasificación de aire a alta temperatura, mientras que la Universidad de Adelaide junto con la Universidad de Pekín [19,20] se centraron en los fundamentos, y la Universidad Jain en Bangalore [21] se enfocó en los combustibles líquidos.

7.1. Referencias combustión sin llama otros procesos de alta temperatura

- [1] R. Weber, A. K. Gupta, and S. Mochida, “High temperature air combustion (HiTAC): How it all started for applications in industrial furnaces and future prospects,” *Appl Energy*, vol. 278, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115551.
- [2] Arghode V, Gupta AK. Investigation of Forward Flow Distributed Combustion for Gas Turbine Application. *J. Applied Energy* Jan. 2011;88(1):29–40. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.04.030>.
- [3] Arghode V, Gupta AK. Investigation of Reverse Flow Distributed Combustion for Gas Turbine Application. *J. Applied Energy* 2011;88(4):1096–104. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.10.039>.
- [4] Arghode V, Gupta AK. Role of Thermal Intensity on Operational Characteristics of Ultra-Low Emission Colorless Distributed Combustion. *J. Applied Energy* November 2013;111:930–56. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.06.039>.
- [5] Khalil AE, Gupta AK. Fuel Property Effect on Distributed Combustion. *Fuel Journal* 2016;171:116–24. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.12.068>. [76] Feser JS, Bassioni G, Gupta AK. Effect of Naphthalene Addition to Ethanol in Distributed Combustion. *Appl Energy* April 2018;216:1–7. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.090>.
- [7] Scenna R, Gupta AK. The Influence of the Distributed Reaction Regime on Fuel Reforming Conditions, *ASME J. Energy Resources Technology*, Dec. 2018, Vol. 140, No. 12, 122002-1–122002-7, doi: 10.1115/1.4040404. <https://doi.org/10.1115/1.4040404>.
- [8] Ceriello G, Sorrentino G, Cavaliere A, Sabia P, de Joannon M, Ragucci R. The role of dilution level and canonical configuration in the modeling of MILD combustion systems with internal recirculation. *Fuel* March 2020;264:116840. in press.
- [9] Cavaliere A, De Joannon M. Mild combustion. *Prog. Energy Combust. Sci.* 2004; 30:329–66.

- [10] Cavaliere A, De Joannon M. Detailed Chemical Kinetics in the Reactor Design for Diluted High Temperature Combustion of Air/Paraffin Mixtures. CREST. In: 3rd International Symposium on High Temperature Air Combustion and Gasification. Yokohama, Japan. March, 2000.
- [11] Min TJ, Yoshikawa K, Murakami K. Distributed gasification and power generation from solid wastes. *Energy* 2005;30(11–12):2219–28.
- [12] Shimo N, Kawai K, Koyama Y, Yoshikawa K. Influence of Fuel Properties on High Temperature Air Combustion of Petroleum. In: International Symposium of High Temperature Air Combustion & Applications. May 2000. Hsinchu, Taiwan, pp. G2-1 – G2-9.
- [13] Shimo N, Kawai K, Koyama Y, Yoshikawa K. Low NO_x Combustion of Petroleum with Highly Preheated Air – Influence of Fuel Properties. CREST. In: 3rd International Symposium on High temperature Air Combustion and Gasification. Yokohama, Japan. March 2000, pp. B2-1 – B2-13.
- [14] Kiga T, Yoshikawa K, Sakai M, Mochida S. Characteristics of Pulverized Coal Combustion in High-Temperature Preheated Air. *AIAA J. Propul. Power* 2000;16(4):601–5.
- [15] Yang W, Ponzio A, Lucas C, Blasiak W. Performance analysis of a fixed-bed gasifier using high-temperature air. *Fuel Process Technol* 2006;87(3):235–45.
- [16] Blasiak W, Yang WH, Narayanan K, Von Scheele J. Flameless oxyfuel combustion for fuel consumption and nitrogen oxides emissions reductions and productivity increase. *J Energy Inst* 2007;80(1):3–11.
- [17] Lucas C, Szewczyk D, Blasiak W, Mochida S. High-temperature air and steam gasification of densified biofuels. *Biomass Bioenergy* 2004;27(6):563–75.
- [18] Li P, Wang F, Mi J, Dally BB, Mei Z. MILD combustion under different premixing patterns and characteristics of the reaction regime. *Energy Fuels* 2014;28(3):2211–26.
- [19] Li PF, Dally BB, Wang FF, Wang L, Liu ZH, Chen S, et al. Progress and recent trend in MILD combustion. *Science China. Technological Sciences* 2011;54(2):255–69.
- [20] Kumar S, Paul PJ, Mukunda HS. Investigations of the scaling criteria for a mild combustion burner. *Proc. Combust. Inst.* 2005;30:2613–11621.
- [21] Kumar S, Paul PJ, Mukunda HS. Studies on a new high-intensity low-emission burner. *Proc. Combust. Inst.* 2002;29:1131–7.