

Análisis de un horno en operación con combustible mezcla Gas Natural - Hidrógeno por medio de simulación CFD para la empresa AC Ingeniería Virtual

Mariana Valentina Pérez Rondón y Julián David Ruiz Supelano

Trabajo de Grado para optar el título de Ingeniero Químico

Modalidad practica empresarial

Director

Giovanni Morales Medina

Doctor en Ingeniería Química

Tutor

Helver Crispiniano Álvarez Castro

Doctor en Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2024

Dedicatoria

A Dios, por su amor inagotable que está siempre a mi favor y me guio en cada paso del camino.

A mis papis en el cielo, Edgar Pérez y Tatiana Rondón, quienes me dejaron los valores que hoy me definen y que sé que han estado conmigo, apoyándome y guiándome siempre, siendo una fuente de fortaleza y amor.

A mi familia Ardila Pérez, especialmente a Gabriel Ardila, quienes no solo estuvieron a mi lado en cada paso, sino que me brindaron su consejo, ánimo y celebraron cada uno de mis logros como propios. Todos ellos fueron parte esencial de este logro.

A mi fiel compañero, mi perrito Ron, que con su presencia alegró mis días y me recordó el valor de la compañía sincera en este proceso.

Finalmente, a Julián Ruiz, por ser un compañero de tesis excepcional y un gran mejor amigo, y a todos mis amigos de la carrera, quienes siempre estuvieron allí para sacarme una sonrisa.

MARIANA VALENTINA PÉREZ RONDÓN

Dedicatoria

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas aquellas personas que hicieron posible la realización de este proyecto de grado.

En primer lugar a mi familia, por su su apoyo constante y todas sus palabras de aliento en los momentos más difíciles. A mis padres y a mi hermano por ser un pilar, siempre creyendo en mí y enseñándome el valor de la responsabilidad y el esfuerzo.

A Lizeth, Daniela y Vanessa por su apoyo incondicional desde el colegio y por todos los momentos especiales que me dieron por todo el transcurso universitario.

A mis compañeros y amigos de la universidad, Mariana, Juan pablo, Simón, Daniela, Sofia quienes fueron una gran fuente de apoyo emocional y académico. Compartimos largas horas de estudio, dudas y aprendizajes que hicieron de esta experiencia algo inolvidable.

Finalmente, a todas aquellas personas que, de una u otra forma, contribuyeron al éxito de este proyecto. A mis profesores, por su enseñanza y por los conocimientos impartidos durante toda mi formación.

Este logro es el resultado del esfuerzo conjunto de todas estas personas, a quienes estaré eternamente agradecido.

JULIAN DAVID RUIZ SUPELANO

Tabla de contenido

Introducción	10
1. Objetivos	12
2.1 Objetivos General	12
2.2 Objetivos específicos	12
2. Descripción de la empresa	13
3. Marco Teórico	14
3.1. Generalidades de hornos industriales	14
4.3. Modelado en CFD	17
4.3.1. Ecuaciones de transporte del modelo de viscosidad k- ϵ estándar	18
4.3.2. Modelo de viscosidad turbulenta	19
4.3.3. Ecuación de energía	19
4.4. Método de volúmenes finitos	19
4.5. Modelo de viscosidad k- ϵ estándar:	20
4. Descripción metodológica	21
4.3. Fase I	21
4.3.3. Pre – procesamiento	22
4.3.3.1. Parámetros del sistema	23
4.4. Fase II	26
4.4.3. Solución	26
4.4.4. Post – procesamiento	26
4.5. Fase III	27
5. Resultados y Análisis de resultados	28
5.3. Estimación de los rendimientos	28
5.3.3. Simulación del Gas natural	29
5.3.3.1. Convergencia	29
5.3.3.2. Temperatura	29
5.3.3.3. Velocidad.	30
5.3.3.4. Concentración de CO.	31
5.3.3.5. Concentración de CO ₂	31

5.3.4. Simulación del Gas natural - Hidrógeno.....	32
5.3.4.1. Convergencia.....	32
5.3.4.2. Temperatura.....	33
5.3.4.3. Velocidad.	34
5.3.4.4. Concentración de CO.	34
5.3.4.5. Concentración de CO ₂	35
5.4. Comparación de resultados	36
5.4.3. Temperatura.....	36
5.4.4. Velocidad.....	37
5.4.5. Emisiones de CO.....	38
5.4.6. Emisiones de CO ₂	38
6. Conclusiones	39
7. Recomendaciones.....	40
Referencias.....	41

Lista de tablas

Tabla 1. Características de la malla.....	22
Tabla 2. Parametros de la mezcla Gas natural - Aire	23
Tabla 3. Parametros de la mezcla Gas Natural-hidrogeno-Aire.....	24
Tabla 4. Composición volumetrica de la mezcla	25

Lista de figuras

Figura 1. Vista en alzado de un horno de combustión directa.	14
Figura 2. Diagrama de flujo para la metodología	21
Figura 3. Geometría del hogar del horno	22
Figura 4. Superficies representativas	28
Figura 5. Iteraciones de la simulación	29
Figura 6. Perfil de temperatura del GN en los planos XZ y XY.....	30
Figura 7. Perfil de velocidad del GN en los planos XZ y XY	30
Figura 8. Emisiones de CO del GN en los planos XZ y XY	31
Figura 9. Emisiones de CO ₂ del GN en los planos XZ y XY	32
Figura 10. Iteraciones de la simulación	33
Figura 11. Perfil de temperatura del GN-H en los planos XZ y XY.....	33
Figura 12. Perfil de velocidad del GN-H en los planos XZ y XY	34
Figura 13. Emisiones de CO del GN-H en los planos XZ y XY	35
Figura 14. Emisiones de CO ₂ del GN-H en los planos XZ y XY.....	35
Figura 15. Perfiles de temperatura del GN	36
Figura 16. Perfiles de velocidad del GN.....	37

Resumen

Título: Análisis de un horno en operación con combustible mezcla Gas Natural- Hidrógeno por medio de simulación CFD para la empresa AC Ingeniería Virtual*

Autor: Mariana Valentina Pérez Rondón, Julián David Ruiz Supelano**

Palabras clave: Horno industrial, Simulación CFD, Gas natural, Hidrógeno, Eficiencia energética, Descarbonización, Índice de Wobbe, Transición energética, ANSYS Fluent, Industria 4.0.

Descripción:

Este artículo investiga la viabilidad de la incorporación de hidrógeno al gas natural como una alternativa de transición energética en hornos industriales. Utilizando el software ANSYS para simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD), se analiza una combustión de mezcla de hidrógeno y gas natural, determinada a través del índice de Wobbe.; y comparada posteriormente a la operación con gas natural. La investigación se centra en evaluar el impacto de esta mezcla en la eficiencia de combustión y en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Los resultados obtenidos demuestran que la adición de hidrógeno mejora la eficiencia energética. Este estudio proporciona una base sólida para la implementación de soluciones energéticas sostenibles en la industria, alineándose con los objetivos de descarbonización y sostenibilidad.

*Proyecto de grado. Modalidad Practica Empresarial.

**Facultad de ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director Ingeniero Químico Giovanni Morales Medina. Tutor Ingeniero Químico Helver Crispiniano Álvarez Castro.

Abstract

Title: Analysis of an operating furnace using a Natural Gas-Hydrogen blend through CFD simulation for the company AC Ingeniería Virtual*

Author: Mariana Valentina Pérez Rondón, Julián David Ruiz Supelano**

Keywords: Industrial furnace, CFD simulation, Natural gas, Hydrogen, Energy efficiency, Decarbonization, Wobbe index, energy transition, ANSYS Fluent, Industry 4.0.

Description:

This article investigates the feasibility of incorporating hydrogen into natural gas as an energy transition alternative in industrial furnaces. Using ANSYS software for computational fluid dynamics (CFD) simulations, the combustion of a hydrogen and natural gas mixture is analyzed, which determined by the Wobbe index, and subsequently compared to operation with natural gas alone. The research focuses on evaluating the impact of this mixture on combustion efficiency and the reduction of greenhouse gas emissions. The results demonstrate that the addition of hydrogen enhances energy efficiency. This study provides a solid foundation for implementing sustainable energy solutions in the industry, aligning with decarbonization and sustainability goals.

*Degree project. Business Practice Modality.

**Physicochemical Engineering School. School of Chemical Engineering. Director Chemical Engineer Giovanni Morales Medina. Tutor Chemical Engineer Helver Crispiniano Álvarez Castro.

Introducción

El mundo se encuentra en un proceso de descarbonización bajo el cual se requiere dejar de depender de los combustibles fósiles, esto con el fin de disminuir la contaminación ambiental, y las emisiones de gases efecto invernadero. Particularmente, en Colombia en el año 2022 se lanzó la Hoja de Ruta del Hidrógeno con el propósito de motivar la producción de este combustible limpio en el país (Ministerio de Minas y Energía, 2021). Esto se debe a que el hidrógeno en su combustión únicamente genera agua y su poder calorífico (LHV) es elevado (120 MJ/kg) comparado con el gas natural (52 MJ/kg), (COM, 2020). Considerando lo anterior, el uso de mezclas combustible hidrógeno-gas natural puede resultar en una mayor eficiencia debido a un mayor LHV, comparado con el uso de gas natural. Lo anterior puede ser verificado por medio de la aplicación de programas de fluido dinámica computacional (CFD), los cuales se basan en las ecuaciones de Navier-Stokes para la predicción del movimiento de los fluidos. Entre estos programas se encuentra ANSYS, que en su interfaz Fluent facilita el proceso de simulación, desde el preprocesamiento hasta el post-procesamiento.

El hidrógeno, pese a su elevado LHV por unidad de masa, presenta una baja densidad volumétrica, lo que dificulta su almacenamiento y transporte. Esta característica, sin embargo, no impide su utilización en las metodologías de descarbonización, ya que se pueden implementar estrategias para optimizar su manejo. Una de ellas es la mezcla gradual con combustibles existentes como el gas natural, estrategia que permite aprovechar la infraestructura de transporte y almacenamiento existente. A medida que la tecnología de producción y almacenamiento de hidrógeno madure y sus costos se reduzcan (FCH, 2019), la proporción de hidrógeno en la mezcla puede incrementarse gradualmente hasta alcanzar una descarbonización completa. Los hornos industriales, que demandan un elevado LHV para elevar de manera costo eficiente la temperatura

de las sustancias, son candidatos para la operación con mezclas combustibles de hidrógeno. Al utilizar hidrógeno verde producido a partir de energías renovables, estos hornos pueden contribuir significativamente a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. La elevada temperatura de combustión del hidrógeno permite alcanzar eficiencias energéticas superiores a las del gas natural, lo que se traduce en un menor consumo de combustible y en una reducción adicional de las emisiones (Ahbil K et al, 2022). Además, al utilizar hidrógeno verde (i.e. producido a partir de energías renovables), la operación de los hornos puede contribuir significativamente a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

Tomando como referencia la Hoja de ruta del hidrógeno en Colombia en el futuro se prevé un aumento exponencial de la demanda total de hidrógeno de las cuales una de las principales fuentes de demanda será la industria. De igual forma, el H_2 se presenta como una herramienta clave para una transición energética justa, derivando en la protección de los empleos en sectores afectados por la descarbonización (Ministerio de Minas y Energía, 2021). El desarrollo del H_2 busca integrar a diferentes actores, desde entidades territoriales y comunidades hasta academia y empresas, en la construcción de un nuevo tejido industrial que potencie la competitividad del hidrógeno colombiano. por lo anterior, la empresa AC ingeniería virtual está interesada en potencializar este desarrollo, partiendo de la investigación.

Considerando lo descrito anteriormente, este documento presenta los resultados más relevantes del desarrollo de una simulación CFD de un horno industrial que funcione en operación con una mezcla de hidrógeno y gas natural como combustible para la empresa AC ingeniería virtual. La pregunta de investigación correspondió a, ¿cuál es el impacto operacional del uso de una mezcla combustible hidrógeno-gas natural en un horno industrial?

1. Objetivos

2.1 Objetivos General

Desarrollar un análisis comparativo del rendimiento de un horno a escala industrial en operación con combustible mezcla gas natural-hidrógeno por medio de simulación CFD.

2.2 Objetivos específicos

- Construir una simulación CFD para una geometría simple de horno en operación con gas natural reportada en literatura, utilizando fluido dinámico computacional.
- Estimar los rendimientos de la geometría simple de horno en operación con mezcla hidrógeno-gas natural, por medio de la simulación CFD.
- Comparar los resultados predichos por la simulación CFD para la operación del horno con combustibles gas natural y mezcla hidrógeno-gas natural.

2. Descripción de la empresa

AC Ingeniería Virtual es una empresa privada de ingeniería computacional y la Industria 4.0, fundada en 2012 en Bucaramanga. Se formó tras ganar la convocatoria 523 de Colciencias para la creación de empresas tecnológicas, con el apoyo de la Corporación Bucaramanga Emprendedora (CBE) y la colaboración del laboratorio de fluidodinámica computacional (L-CFD) de UNICAMP-Brasil. La empresa se especializa en el modelamiento, simulación y virtualización de procesos industriales, empleando técnicas avanzadas en simulación numérica, prototipado, automatización e inteligencia artificial. Ofrece servicios como diseño CAD, prototipos en 2D y 3D, simulaciones de movimiento y dinámica de fluidos, así como desarrollo de software y automatización.

AC Ingeniería Virtual conecta el conocimiento de investigación con aplicaciones prácticas para optimizar y modernizar procesos industriales. Ha recibido varios premios importantes, incluyendo el Premio a la Innovación PETROBRAS 2014, la Convocatoria INNPULSA 2016 por el software CAPITCH, la Convocatoria SENOVA 2017 por el software Ecohid, y los Desafíos INNOVATE ECOPETROL 2018 y 2021 por sus sistemas de visión artificial y el sistema WEB para registro de COVID, respectivamente. La empresa está convencida de que el futuro de la industria está ligado a la ingeniería computacional y trabaja en soluciones innovadoras integrando tecnologías emergentes como inteligencia artificial y realidad aumentada.

3. Marco Teórico

3.1. Generalidades de hornos industriales

Los hornos industriales son equipos térmicos diseñados para elevar la temperatura de sustancias a niveles específicos. La demanda energética de estos equipos es variable y depende de las características del proceso industrial, clasificándose generalmente en rangos de calentamiento moderado, alto y muy alto (Pteifer, 2017).

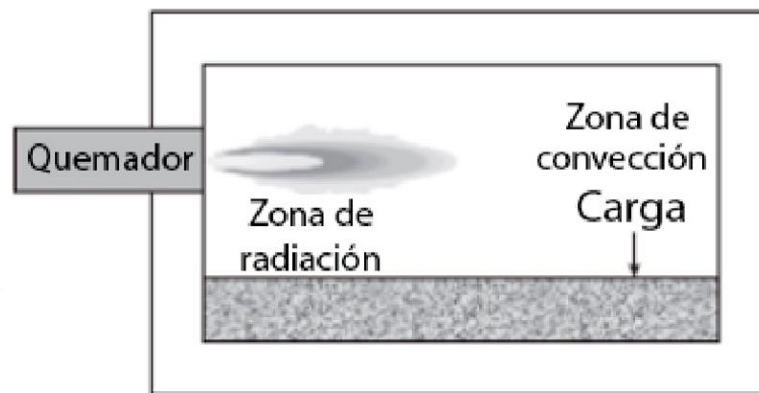
Los hornos de combustión industrial se clasifican en directos e indirectos. En los directos, los productos de la combustión interactúan directamente con la carga, simplificando los diseños ingenieriles, pero limitando el control atmosférico. En los indirectos, una barrera separa los gases de la combustión, permitiendo un control más preciso de la atmósfera, esencial para procesos que requieren atmósferas específicas (Sadegh & Worek, 2017). La transferencia de calor también difiere: en los directos predomina la radiación, mientras que en los indirectos involucra una combinación de radiación, conducción y convección. La elección entre ambos tipos depende de factores como la temperatura requerida, la atmósfera necesaria y la calidad del producto final.

Específicamente, los hornos de combustión directa se componen de varias partes esenciales que trabajan en conjunto para transferir calor. El hogar es la cámara donde se produce la combustión y se encuentra el quemador, que introduce el combustible y el comburente. El revestimiento refractario protege el interior del horno del intenso calor y mejora la eficiencia térmica. Dentro del horno, se distinguen zonas de radiación y convección, donde el calor se transfiere a los materiales. Los gases de combustión salen por una abertura, a menudo conectados a sistemas de recuperación de calor. La disposición y diseño de estas partes pueden variar según la aplicación específica. (Couper et al, 2012). La figura 1 ilustra un horno de combustión directa. En esta figura se muestra un horno industrial de combustión directa. En este tipo de horno, la llama

del quemador interactúa directamente con la carga, transfiriendo calor principalmente por radiación y convección. El quemador, al generar la llama, emite radiación térmica que incide directamente sobre la carga, calentándola. Simultáneamente, los gases calientes producto de la combustión circulan alrededor de la carga, transfiriendo calor por convección.

Figura 1.

Vista en alzado de un horno de combustión directa.



Fuente: (Sadegh & Worek, 2017)

4.2. Generalidades de la combustión

Zhang et al., (2018) analizaron las emisiones de CO y CO₂ producidas por el gas natural enriquecido con hidrógeno (GN-H) y el gas natural (GN) en diferentes sectores industriales de China entre 2000 y 2015. Utilizaron el análisis de varianza (ANOVA) para estudiar el efecto de las emisiones de carbono en el tiempo, región e industria, proponiendo tres modelos estadísticos. Los resultados mostraron que las emisiones de CO y CO₂ producidas por el HCNG son significativamente menores que las del GN, demostrando que el GN-H es una mejor opción en términos de impacto.

De acuerdo con lo anterior, al elegir un combustible para hornos, el poder calorífico se convierte en uno de los aspectos fundamentales. Este valor representa la cantidad de energía térmica liberada durante la combustión completa de un kilogramo de dicho combustible. En esencia, cuanto mayor sea el poder calorífico, más calor se genera por unidad de masa (Primagas, 2021).

Esta característica se traduce en un menor consumo de combustible para alcanzar la temperatura deseada. Esto implica ahorros económicos y una mayor eficiencia en el funcionamiento del horno.

Las emisiones de los hornos pueden contener compuestos tipo NO_x (óxidos de nitrógeno). Yan et al., (2019) evaluaron las emisiones de un quemador de horno operado con una mezcla combustible gas natural-hidrógeno. Mediante mediciones de forma experimental de parámetros tales como el tiempo de ignición, temperatura del quemador, ruido de combustión y emisiones de CO y NO_x, analizaron el comportamiento de la entrada de aire primario y la influencia de la adición de hidrógeno en las emisiones y la capacidad de captación de aire. Los resultados mostraron que la adición de hasta un 25% de hidrógeno al gas natural no tuvo un impacto significativo en las emisiones, con una disminución en las emisiones de CO. A pesar de los resultados obtenidos, faltó un referente al rendimiento del horno.

Vincent et al., (2020) llevaron a cabo un estudio sobre el impacto de agregar hidrógeno al gas natural en un quemador de horno de habitación. Observaron que la adición de hasta un 15% de hidrógeno al gas natural no afectaba significativamente el tiempo de ignición, pero que cantidades mayores podían provocar fallos de ignición y soplos de llama. Este estudio se llevó a cabo de forma experimental utilizando una estación de mezcla especialmente construida para combinar el gas natural y el hidrógeno en diferentes porcentajes. Además, encontraron que el

hidrógeno tenía un impacto mínimo en las emisiones de NO_x y que las propiedades de la llama y la temperatura del quemador variaban con las mezclas de combustible.

Arroyo et al., (2023) desarrolló la modelización y validación mediante dinámica de fluidos computacional (CFD) de la combustión de una mezcla de gas de alto horno y gas natural en un horno industrial experimental. Considerando un horno de pruebas ubicado en la planta de ArcelorMittal Asturias (España), con dimensiones específicas y capacidad de alcanzar altas temperaturas, los investigadores llevaron a cabo análisis teóricos comparados con resultados experimentales obtenidos en condiciones de trabajo similares. Según los resultados, la simulación CFD permitió analizar en detalle el comportamiento de la llama y la operación del horno. Los resultados indicaron que la llama era recta y que la temperatura dentro del horno aumentaba con la adición de gas natural. Esta tendencia fue corroborada por los datos experimentales, lo que valida la precisión del modelo. Con el modelo CFD validado, los autores efectuaron análisis de la operación del horno en diversas condiciones de trabajo.

En concordancia con lo anteriormente mencionado, cuando se habla de eficiencia energética se refiere a la capacidad del proceso de combustión para realizar el trabajo útil usando la menor cantidad de energía posible, esta se puede calcular en términos de calor generado en comparación con la energía total consumida, así como también teniendo en cuenta el impacto ambiental, es decir emisiones de gases efecto invernadero, otro aspecto en el cual se puede ver la eficiencia energética es en la estabilidad de la llama.

4.3. Modelado en CFD

Para llevar a cabo simulaciones, es esencial utilizar una herramienta de simulación con la cual se ingresan los parámetros del problema y se evalúan los resultados. Este proceso de simulación en ingeniería se divide en tres etapas fundamentales: en el pre-procesamiento, se define

la geometría, se crea la malla y se establecen las condiciones de contorno; en la solución, se resuelven las ecuaciones que describen el modelo utilizando la herramienta seleccionada; y en el post-procesamiento, se interpretan los resultados mediante gráficos, perfiles y otros métodos de visualización (Huerto B, 2013).

Las ecuaciones que son resueltas durante una simulación CFD corresponden a:

4.3.1. Ecuaciones de transporte del modelo de viscosidad k - ϵ estándar

La energía cinética turbulenta (k) representa la cantidad de energía en el flujo debido a la turbulencia.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u \cdot \nabla k = \nabla \cdot \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \epsilon \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde k se refiere a la energía cinética turbulenta, u al vector de velocidad del fluido, ν y ν_t a la viscosidad cinemática molecular, y a la viscosidad turbulenta, respectivamente. σ_k es el coeficiente de difusión para k y P_k es el término de producción de k , que representa la generación de energía turbulenta. ϵ , por último, es la tasa de disipación de k , que representa la conversión de energía cinética turbulenta en calor.

La tasa de disipación (ϵ) describe cómo se disipa la energía cinética turbulenta en calor debido a la viscosidad del fluido. La ecuación para ϵ es:

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + u \cdot \nabla \epsilon = \nabla \cdot \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \nabla \epsilon \right] + \frac{C_{\epsilon 1} \epsilon}{k} P_k - C_{\epsilon 2} \epsilon \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde ϵ es la tasa de disipación de la energía cinética turbulenta, σ_k el coeficiente de difusión para ϵ y $C_{\epsilon 1}$, $C_{\epsilon 2}$ son constantes empíricas que ajustan la tasa de disipación en función de la producción de k y la disipación misma.

4.3.2. Modelo de viscosidad turbulenta

Se define de la siguiente forma:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde ρ es la densidad del fluido, k la energía cinética turbulenta, ε la tasa de disipación, y C_μ se define por:

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_S \frac{kU^*}{\varepsilon}} \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde:

$$A_0 = 4.404, A_S = \sqrt{6} \cos \phi \quad (\text{Ec. 6})$$

$$\phi = \frac{1}{3} \cos^{-1}(\sqrt{6} W), W = \frac{S_{ij}S_{jk}S_{ki}}{\xi^3} \quad (\text{Ec. 7})$$

4.3.3. Ecuación de energía

La ecuación de energía según el modelo de turbulencia usado es:

$$\frac{\partial}{\partial t} \sum_{k=1}^n (\alpha_k \rho_k E_k) + \nabla \cdot \sum_{k=1}^n (\alpha_k \vec{v}_k (\rho_k E_k + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + S_E \quad (\text{Ec. 8})$$

Siendo k_{eff} la conductividad térmica efectiva y el término de la parte derecha de la ecuación representa la transferencia de energía por conducción, y S_E abarca demás fuentes de calor volumétricas.

4.4. Método de volúmenes finitos

El método de volúmenes finitos (FVM) permite solucionar de manera numérica el sistema de ecuaciones que resultan durante una simulación CFD (Ansys Inc, 2013). Una de las características distintivas de este método es su capacidad para conservar de manera precisa las leyes fundamentales de conservación de masa, momentum y energía, que son presentadas en la

sección anterior. Esto se logra mediante la formulación de estas ecuaciones en términos discretos considerando los límites en cada uno de los volúmenes finitos que conforman el sistema. Los pasos seguidos en la aplicación de este método son, en general (Ansys Inc, 2013):

1. Discretización del Dominio: Dividir el dominio de estudio en volúmenes de control discretos.
2. Formulación de Ecuaciones: Establecer las ecuaciones integrales de conservación para cada uno de estos volúmenes de control.
3. Aproximación Numérica: Evaluar numéricamente las integrales involucradas.
4. Interpolación de Variables: Estimar los valores de las variables en las interfaces entre volúmenes y las derivadas, utilizando la información disponible en los nodos.
5. Resolución del Sistema: Ensamblar y resolver el sistema algebraico resultante para obtener una solución aproximada del problema.

Las ecuaciones discretizadas son resueltas de manera simultánea considerando las condiciones de contorno, mediante una combinación de métodos directos (como descomposición LU y Cholesky) e iterativos (Gauss-Seidel, Conjugado Gradiente, multirrejilla) (Ansys Inc, 2013).

4.5. Modelo de viscosidad k- ϵ estándar:

El modelo k- ϵ (k-epsilon) es una de aproximaciones más utilizadas en la dinámica de fluidos computacional (CFD) para la simulación de flujos turbulentos (Ansys Inc, 2013). Su nombre proviene de las dos ecuaciones diferenciales parciales que resuelve: una para la energía cinética turbulenta (k) y otra para la tasa de disipación de esta energía (ϵ). Con esto,

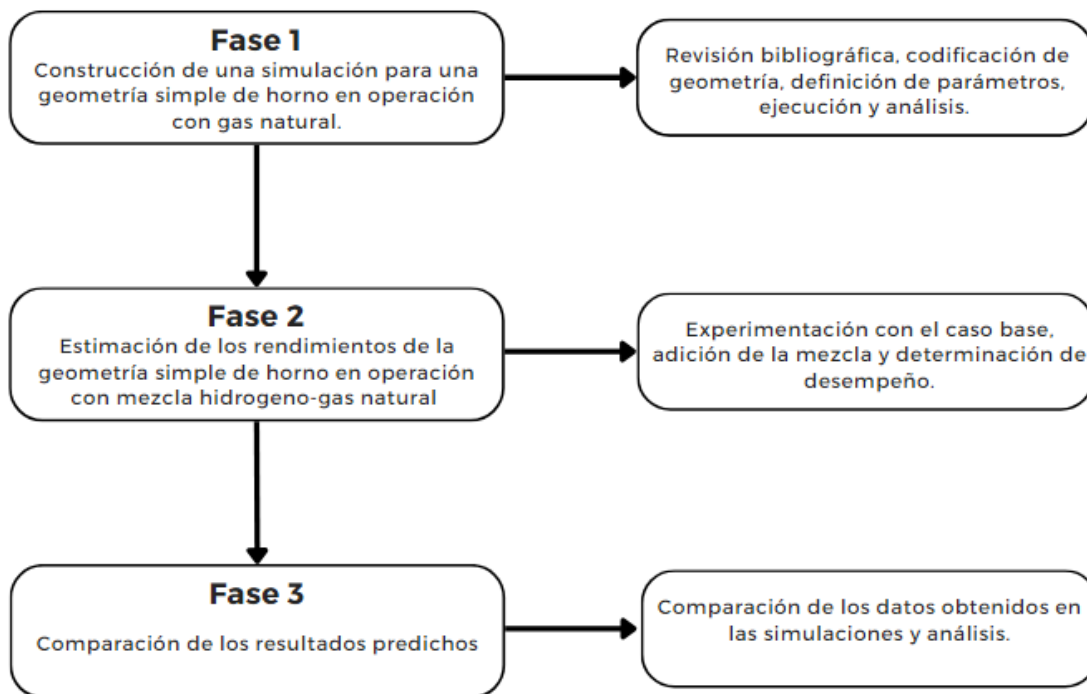
el modelo k- ϵ estándar busca modelar la turbulencia en flujos de fluido mediante la resolución de dos ecuaciones adicionales que describen la evolución de la energía cinética turbulenta y su disipación en el tiempo (Ansys Inc, 2013).

4. Descripción metodológica

Con el fin de realizar una simulación adecuada, se estructuró una metodología de tres fases, representada en la figura 1.

Figura 2.

Diagrama de flujo para la metodología



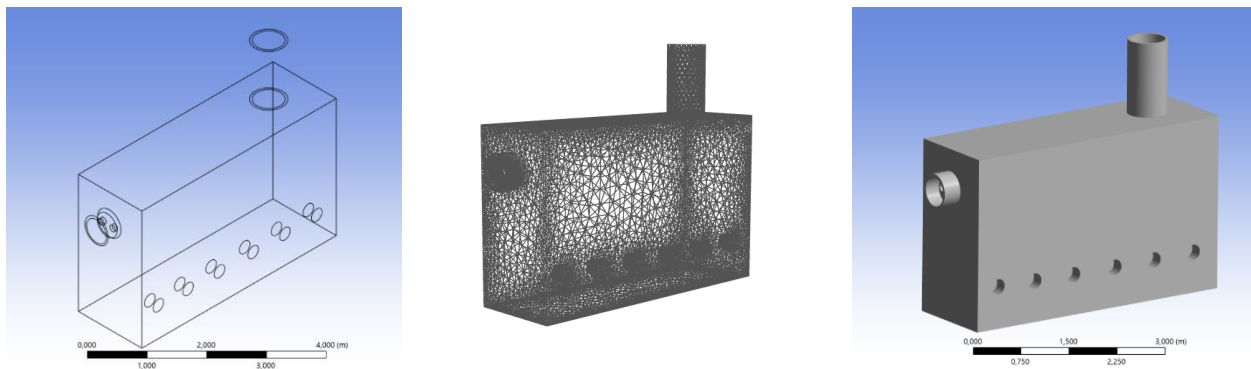
4.3. Fase I

Actividad 1. La geometría trabajada con los parámetros óptimos que se utilizaron en el software ANSYS Fluent y las dimensiones geométricas del horno se establecieron siguiendo las especificaciones detalladas en el estudio de Arroyo et al. (2023) en el que se basan en un horno de

pruebas industriales que tiene unas dimensiones de 4,6 m x 1,5 m x 2,8 m. Empleando el módulo de diseño CAD integrado en ANSYS Fluent 2024 R2, se procedió a la generación de la geometría tridimensional del hogar del horno, la cual sirvió como base para las posteriores simulaciones numéricas.

Figura 3.

Geometría del hogar del horno



4.3.3. *Pre – procesamiento*

Actividad 2. A fin de garantizar la precisión de los resultados numéricos, se optó por generar una malla computacional en ANSYS Fluent con un tamaño de elemento de 1.5 cm. La tabla 1 presenta el tamaño de elemento anteriormente mencionando con la cantidad de nodos generados y números de elementos generados.

Tabla 1.

Características de la malla

Características de la malla	Valor
Tamaño de elemento	0.015
Nodos	28266
# Elementos	289705

4.3.3.1. *Parámetros del sistema*

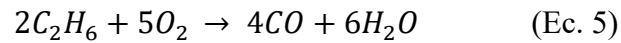
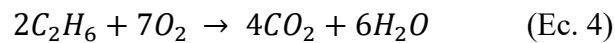
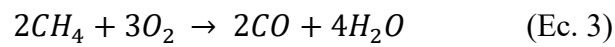
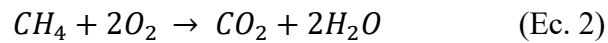
Actividad 3. Con el fin de evaluar el impacto de las propiedades del fluido en el comportamiento del sistema, se realizaron simulaciones variando únicamente la composición del fluido, manteniendo constantes el resto de las condiciones operativas. de operación fueron establecidos según literatura Arroyo et al. (2023) y se detallan en la Tabla 3. El fluido considerado correspondió a mezcla gas natural – aire; el gas natural fue considerado como mezcla metano 92%v y etano 8%v. El caudal de aire al horno fue ajustado para obtener las condiciones de exceso de aire de 5.2% (Arroyo et al., 2023).

Tabla 2.

Parámetros de la mezcla Gas natural - Aire

Parámetros	Descripción
Tipo de fluido	Gas natural- Aire
Modelo de energía	Si
Modelo de viscosidad	Standard k- ϵ
Modelo de interacción turbulencia	Eddy-Dissipation
Velocidad de entrada del GN	1.4 m/s
Velocidad de entrada del aire	100 m/s
Temperatura de referencia del aire	449°C
Temperatura de referencia de la mezcla	23°C
Presión de referencia	1 atm
Tipo de elemento de malla	Tetraedro
Método de resolución de ecuaciones	Método de volúmenes finitos

El modelo incluye 5 reacciones químicas presentadas en el anexo A, en el caso de las Ec. (2-3) referenciadas de Pérez, J. A. V. (2015) y las Ec. (4-5) referenciadas de Villaflor, G at al. (2008) que se encuentran regidas por el modelo eddy dissipation definidas en la simulación para el caso de Gas natural – Aire son las siguientes:



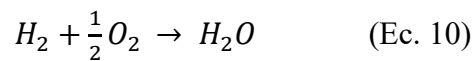
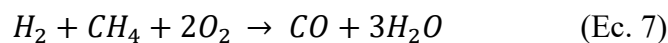
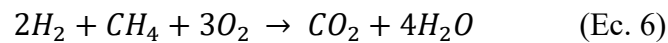
Con el objetivo de validar los resultados obtenidos, la simulación fue replicada con la mezcla de gas natural – hidrógeno – aire. Manteniendo constantes el resto de los parámetros operativos especificados en la Tabla 2. Las composiciones detalladas de ambas mezclas (con y sin hidrógeno) se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3.
Parametros de la mezcla Gas Natural-hidrogeno-Aire

Parámetros	Descripción
Tipo de fluido	Gas natural-Hidrógeno-Aire
Modelo de energía	Si
Modelo de viscosidad	Standard k- ε
Modelo de interacción turbulencia	Eddy-Dissipation
Velocidad de entrada del GN	1.4 m/s

Velocidad de entrada del aire	100 m/s
Temperatura de referencia del aire	449°C
Temperatura de referencia de la mezcla	23°C
Presión de referencia	1 atm
Tipo de elemento de malla	Tetraedro
Método de resolución de ecuaciones	Método de volúmenes finitos

En este modelo se presentan reacciones químicas (6-10) que presentan variaciones directas de las reacciones base previamente descritas (2-5) a las cuales únicamente se les ha incorporado hidrogeno como reactante adicional presentadas en el anexo B, estas se encuentran definidas por el modelo de eddy dissipation, para la simulación en el caso de la mezcla Gas natural – Hidrógeno - Aire son las siguientes:



En la tabla 4 se presenta las composiciones de los flujos de combustible que ingresan al horno para cada caso respectivo. El caudal de aire al horno fue se ajustado para obtener las condiciones de exceso de aire de 5.2% (Arroyo et al., 2023).

Tabla 4.*Composición volumétrica de la mezcla*

	GN	Mezcla GN-H
CH ₄	92%	80,96%
C ₂ H ₆	8%	7,04%
H ₂	-	12%

Las condiciones de contorno definidas en el modelo numérico incluyeron:

La definición de paredes como adiabáticas (flujo nulo de calor) y condiciones de entrada del fluido (Tablas 3 y 4).

4.4. Fase II

4.4.3. *Solución*

Actividad 4. Se llevó a cabo un conjunto de simulaciones numéricas, considerando como criterio de convergencia un valor de los residuos normalizados menor a 1×10^{-4} , en línea con las recomendaciones de Cabrales Navarro et al., (2011).

Los cálculos fueron realizados en un computador con las siguientes características: Procesador: Intel ® Core™ i5 2.30 GHz con una memoria RAM: 4 Gb y un sistema operacional de 64 bits.

4.4.4. *Post – procesamiento*

Actividad 5. ANSYS Fluent ofrece una amplia gama de herramientas de post-procesamiento que permiten visualizar y analizar de manera detallada los resultados numéricos obtenidos. Mediante la generación de gráficos de contornos, vectores de velocidad, perfiles de temperatura y concentración de especies, es posible obtener una comprensión profunda del comportamiento del flujo y de los fenómenos físicos involucrados en el proceso de combustión.

Los resultados obtenidos en las simulaciones numéricas se presentan y discuten en la siguiente sección.

4.5. Fase III

Actividad 6. Una vez concluida la fase de simulación numérica, se procedió a un análisis comparativo de los resultados obtenidos. Este análisis permitió identificar y cuantificar las variaciones en las variables de interés, tales como la temperatura, la velocidad y las concentraciones de especies químicas, que se produjeron al modificar la composición de la mezcla de combustible. De esta manera, fue posible evaluar el impacto de la adición de hidrógeno en el comportamiento del sistema y determinar si las modificaciones introducidas en la composición del combustible condujeron a una mejora en el rendimiento o a la aparición de nuevos fenómenos.

5. Resultados y Análisis de resultados

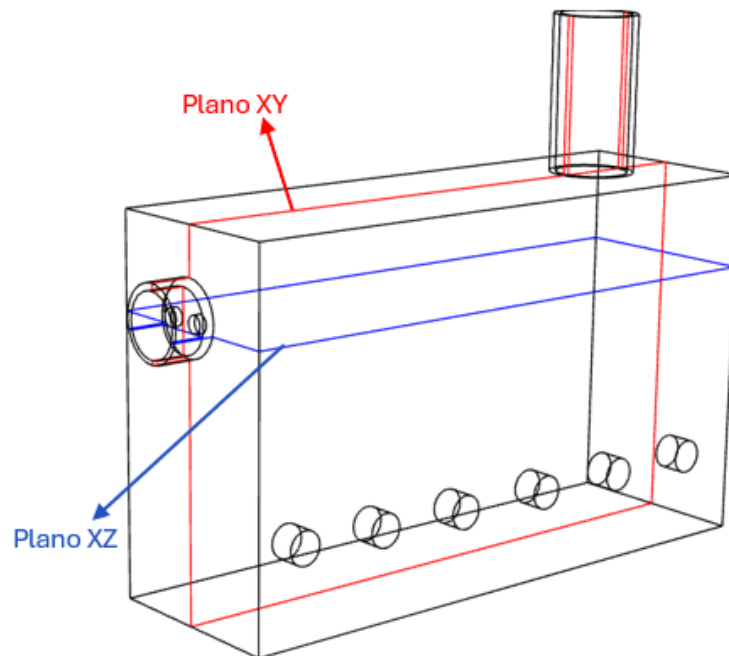
5.3. Estimación de los rendimientos

Mediante técnicas de post-procesamiento de CFD, se obtuvieron representaciones gráficas de diferentes contornos para ambas mezclas de combustible. La comparación sistemática de estos resultados permite evaluar el impacto de la adición de hidrógeno en la estructura y estabilidad de la llama, así como en su rendimiento general.

La Figura 4 ilustra las superficies representativas seleccionadas para la visualización de los campos de las variables físicas de mayor relevancia. Con el fin de facilitar la interpretación de los resultados, se optó por presentar los datos en los planos XZ e XY, correspondientes a las proyecciones horizontal y vertical del dominio de cálculo, respectivamente.

Figura 4.

Superficies representativas del horno.

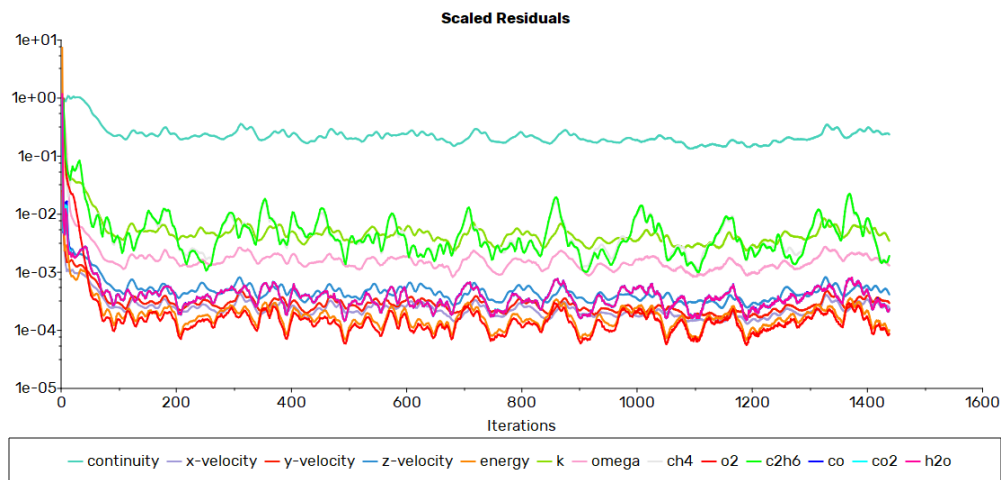


5.3.3. Simulación del Gas natural

5.3.3.1. Convergencia. La simulación de la mezcla de gas natural- Aire convergió en 1438 iteraciones, tras 3 hora 16 minutos de cálculo. La evolución de los residuales se presenta en la Figura 5 muestran que a medida que aumenta el número de iteraciones, la tasa de disminución de los residuales se reduce, alcanzando un estado de convergencia asintótica. Según esta figura las iteraciones de los residuales asociados a las componentes de velocidad (x, y, z) muestran una convergencia similar, lo que indica que el campo de velocidad se estabiliza de manera relativamente homogénea.

Figura 5.

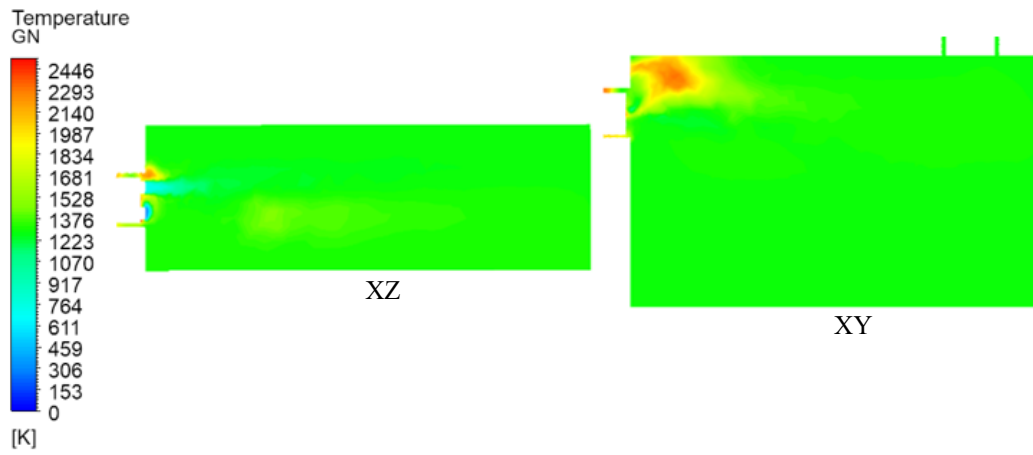
Iteraciones de la simulación



5.3.3.2. Temperatura. La colorimetría indicada en la figura 6 muestra que se alcanzan temperaturas significativas donde el pico más alto registrado es de 2446.2 K. Se observa en el contorno que la región con mayor temperatura es la cercana a la entrada de combustible, además la ausencia de zonas de baja temperatura dentro de la cámara indica una combustión relativamente completa y eficiente.

Figura 6.

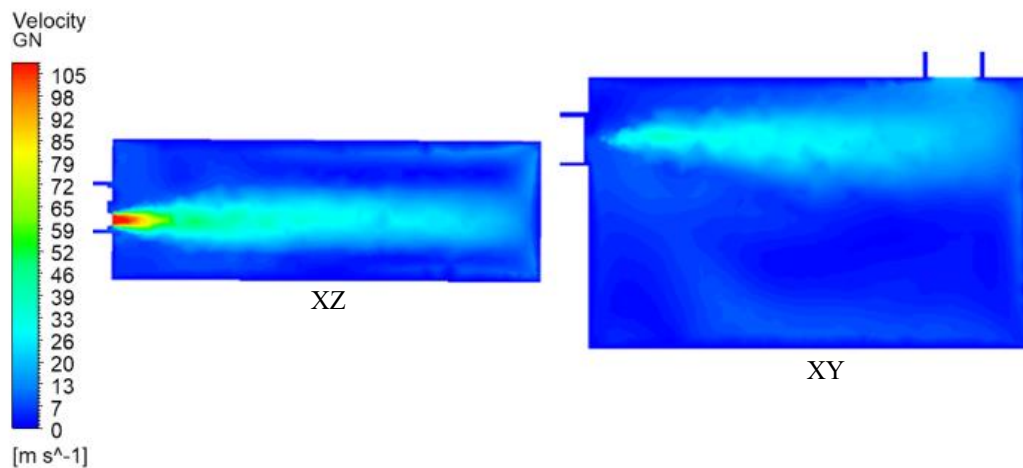
Perfil de temperatura del GN en los planos XZ y XY



5.3.3.3. Velocidad. La zona de entrada de la cámara de combustión en la figura 7 presenta una velocidad significativamente mayor que la del resto del horno, lo cual es fundamental para garantizar una mezcla adecuada de combustible. A lo largo de la cámara se alcanza una velocidad máxima de 105.5 m/s y el flujo se desacelera progresivamente, influenciada por la expansión y por la formación de una capa límite cerca de las paredes, producto de la viscosidad del fluido.

Figura 7.

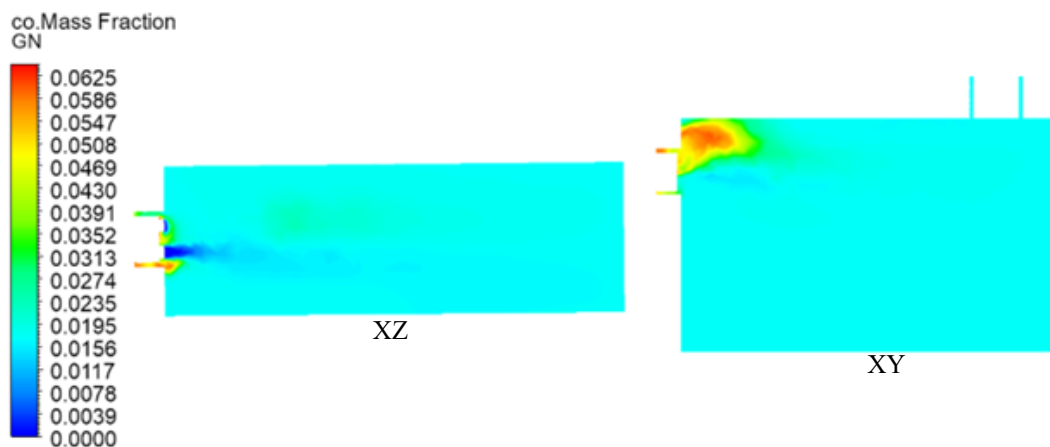
Perfil de velocidad del GN en los planos XZ y XY



5.3.3.4. Concentración de CO. La colorimetría de la figura 8 indica que existen zonas con concentraciones significativas de CO, con valores promedios entre 0.0156 y 0.0195 de fracción másica, su mayor concentración se presenta especialmente en las regiones cercanas a la entrada de combustible y en aquellas donde la mezcla de aire y combustible no es óptima alcanzando una fracción másica de 0.0625. Esta distribución heterogénea de CO es típica en procesos de combustión incompleta, lo cual indica que el exceso de aire requerido debe ser mayor a 5.2% asumido en el presente documento.

Figura 8.

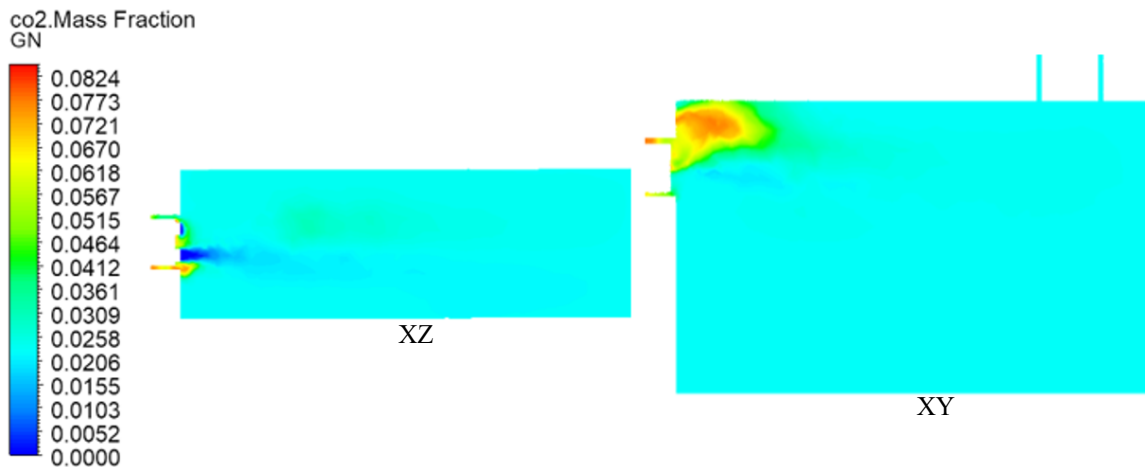
Emisiones de CO del GN en los planos XZ y XY



5.3.3.5. Concentración de CO₂. La figura 9 muestra la distribución de la fracción másica de dióxido de carbono (CO₂) dentro de la cámara de combustión. La colorimetría revela una distribución heterogénea del CO₂, con zonas de valores máximos de fracción másica 0.0824 indicando que la combustión es incompleta.

Figura 9.

Emisiones de CO₂ del GN en los planos XZ y XY

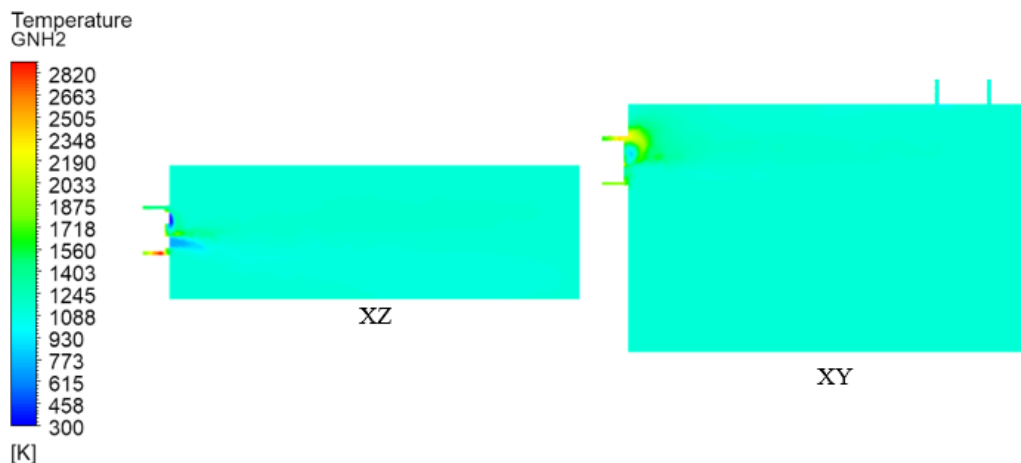


5.3.4. Simulación del Gas natural - Hidrógeno

5.3.4.1. **Convergencia.** La simulación de la mezcla de gas natural-Hidrógeno-Aire convergió en 1638 iteraciones, tras 4 hora 33 minutos de cálculo como se evidencia en la figura 10. La evolución de los residuales se presenta en la Figura 5. Se observa que a medida que avanzan las iteraciones de la simulación se aprecia una convergencia inicial rápida, seguida de una disminución más gradual hasta alcanzar un estado estacionario. La convergencia de los residuales indica que la solución numérica se está estabilizando, sugiriendo que el modelo matemático representa los fenómenos físicos de la combustión.

Figura 10.*Iteraciones de la simulación*

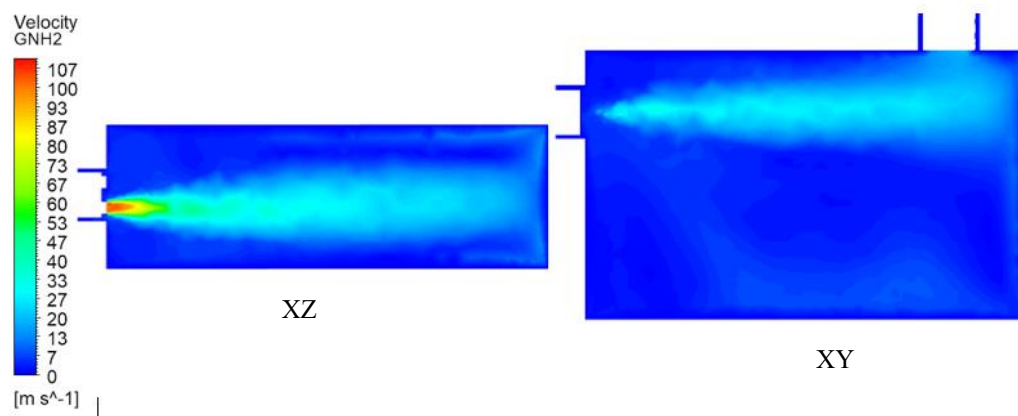
5.3.4.2. Temperatura. La figura 11 muestra un gradiente térmico significativo, con unas temperaturas máximas concentradas en las zonas más cercanas a la llama y alcanzando un pico máximo de 2820.5 K disminuyendo hacia las paredes. Asimismo, la figura muestra una temperatura promedio a lo largo del hogar del horno entre 1196.44 K y 1215.37 K. Esta homogeneidad se atribuye a la exotermicidad de las reacciones de combustión (Ec. 2 – Ec. 10) y a los mecanismos de transferencia de calor por conducción, convección y radiación.

Figura 11.*Perfil de temperatura del GN-H en los planos XZ y XY*

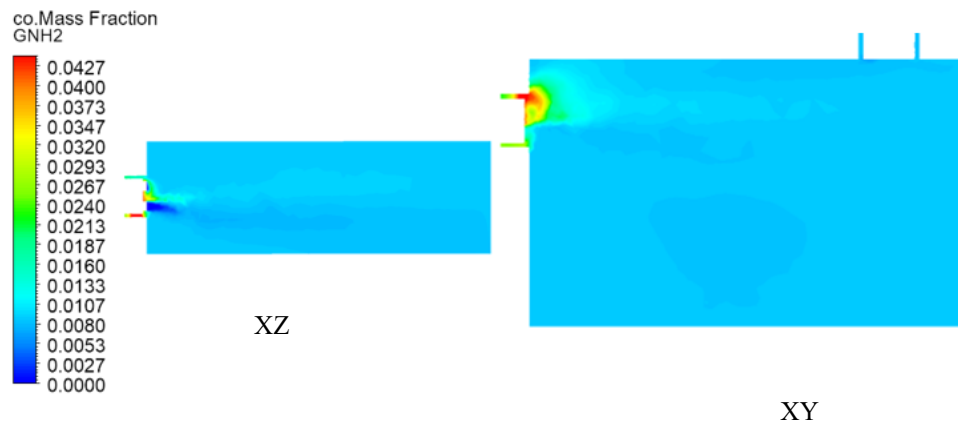
5.3.4.3. Velocidad. Se observa en la figura 12 una zona de alta velocidad en la región central presentando en su mayor punto una velocidad máxima de 107.4 m/s que se extiende desde la entrada del combustible hacia el interior de la cámara. En las zonas cercanas a las paredes de la cámara se observan velocidades más bajas, lo que indica la formación de una capa límite donde la velocidad del fluido disminuye debido a la interacción con las paredes generando patrones de flujo que son típicos en cámaras de combustión y tienen una influencia directa en la mezcla de combustible y aire, la estabilidad de la llama y la eficiencia de la combustión.

Figura 12.

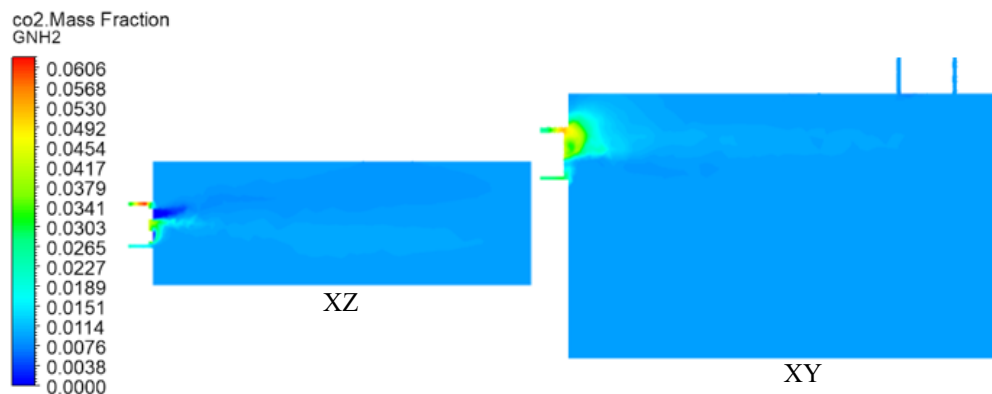
Perfil de velocidad del GN-H en los planos XZ y XY



5.3.4.4. Concentración de CO. La figura 13 muestra una distribución heterogénea de monóxido de carbono (CO) dentro de la cámara de combustión, lo que indica una combustión incompleta alcanzando zonas donde la fracción másica toma valores de 0.0427. El promedio de CO dentro del hogar del horno presenta valores entre 0.0085 y 0.0089 de fracción másica. Esta distribución desigual de CO tiene implicaciones directas en las emisiones del sistema.

Figura 13.*Emisiones de CO del GN-H en los planos XZ y XY*

5.3.4.5. Concentración de CO₂. Las áreas donde se observa la mayor concentración de CO₂ en la figura 14 coinciden con las zonas donde se espera que ocurra la mayor parte de la combustión, indicando una buena mezcla de combustible y aire en algunas regiones; las zonas en donde se observa que alcanza la mayor parte de la combustión es en la entrada del hogar del horno en donde entran en contacto los dos fluidos, sin embargo, es importante notar que la distribución no es homogénea, lo que conduce a zonas de combustión incompleta; esta heterogeneidad se puede deber a variables como la geometría de la cámara y las características del inyector de combustible, así como al efecto de oxígeno en la mezcla.

Figura 14.*Emisiones de CO₂ del GN-H en los planos XZ y XY*

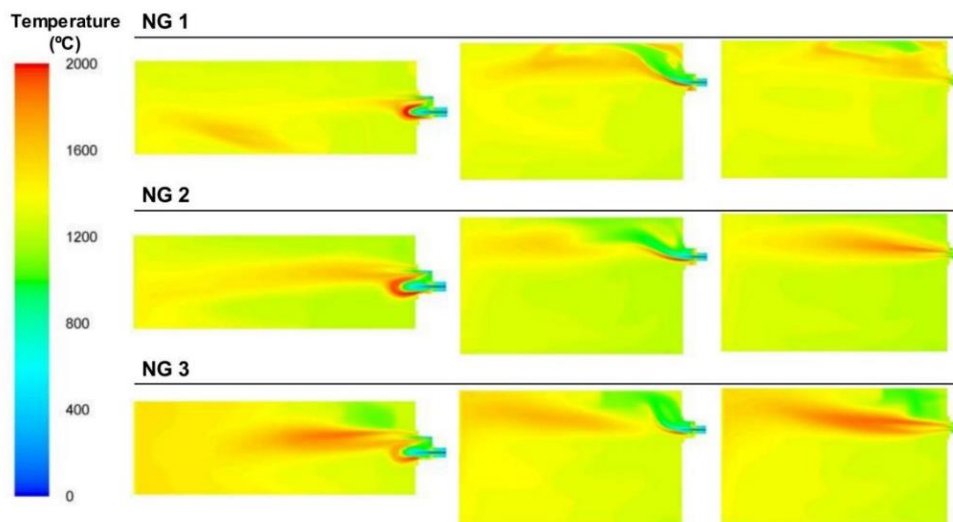
5.4. Comparación de resultados

5.4.3. Temperatura

Como primer punto de comparación, se analizaron los contornos de temperatura de gas natural de Arroyo et al. (2023) con el obtenido en la simulación (sección 5.3.3). La figura 15 muestra el perfil de temperatura reportado por Arroyo et al. (2023). Comparado con el presente documento (figura 6), el perfil de temperatura de Arroyo et al. (2023) se presenta de forma no uniforme reportando menores valores de temperatura. Estas diferencias en temperatura se deben a diferencias en el diseño del quemador, niveles de turbulencia o incluso a pequeños cambios en las condiciones de operación. No obstante, estas diferencias, es posible mencionar que la simulación obtenida en el presente documento representa la operación del horno, ya que la temperatura promedio de la figura 6 presenta los perfiles de temperatura para el gas natural obteniendo un rango promedio entre los 1388.1 K y los 1523.2 K comparables con la temperatura promedio reportadas de la figura 15 que presentan valores de 1484.15 K.

Figura 15.

Perfiles de temperatura del GN



Fuente: Arroyo et al. (2023)

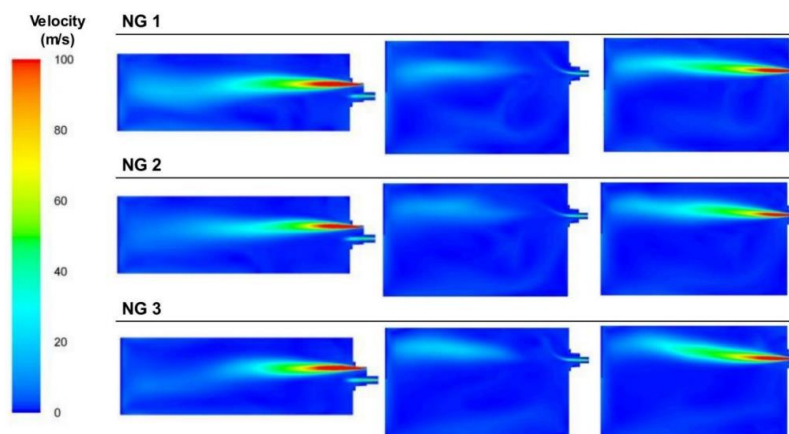
El análisis de los contornos de temperatura en la figura 6 y 11 muestra una correlación directa entre la adición de hidrógeno al combustible y un incremento en la temperatura máxima de la llama pasando de una temperatura máxima de 2446.2 K en la figura 6 a una temperatura máxima de 2820.5 K presentada en la figura 11. Esta observación es coherente con el mayor LHV del hidrógeno, lo cual se traduce en una liberación mayor de energía. De la comparación de estas figuras, se observa que la combustión de la mezcla gas natural – hidrogeno ocasiona un mayor flujo turbulento.

5.4.4. *Velocidad*

La figura 16 presenta los perfiles de velocidad reportados por Arroyo et al. (2023). Los perfiles de velocidad de las cámaras de combustión de la figura 7 y la figura 16 presentan patrones de flujo distintivos. Para el caso de la figura 16 donde se muestran tres mezclas NG1, NG2 y NG3 presentan una variación en las temperaturas de entrada del aire. Para los tres casos de Arroyo et al. (2023) y comparándola con la figura 7 se observa que se presenta un chorro principal de alta velocidad que se expande a medida que avanza por la cámara.

Figura 16.

Perfiles de velocidad del GN



Fuente: Arroyo et al. (2023)

La alta reactividad del hidrógeno y su consecuente mayor velocidad de llama, evidenciadas en la comparación de la figura 7 (donde alcanza una velocidad máxima de 105.5 m/s) con la figura 12 (donde su velocidad máxima es de 107.4 m/s) muestran que este gas es un aditivo para los procesos de combustión en la industria. La adición de hidrógeno a la mezcla de combustible no solo acelera la cinética de reacción, también aumenta la zona de combustión y eso favorece una combustión más completa, lo que se traduce en una mayor eficiencia térmica del horno y potencialmente en una reducción de las emisiones contaminantes.

5.4.5. Emisiones de CO

Realizando el análisis comparativo la figuras 8 y 13 de los contornos de concentración de CO revela diferencias en la máxima fracción másica emitida por la combustión siendo para la figura 8 una fracción másica máxima de 0.0625 y para la figura 13 una fracción másica máxima de 0.0427, lo que respalda la afirmación de que la adición de hidrógeno indica una combustión con menores emisiones.

5.4.6. Emisiones de CO₂

Haciendo la comparación de la figura 9 y 14 se evidencia concentraciones máximas de CO₂ de 0.0824 para el caso de GN y concentraciones máximas de 0.0606 para el caso de GN-H, indicando que la adición de hidrógeno al gas natural conlleva a menores emisiones GEI. Estos resultados sugieren que la adición de hidrógeno al combustible ha influido en la cinética de combustión, promoviendo una mezcla más homogénea y una oxidación más completa del carbono, lo que se traduce en un aumento de la concentración de CO₂ en los productos y una mejor eficiencia en la combustión en el hogar del horno.

Respondiendo a la pregunta de investigación, el impacto operacional del uso de una mezcla combustible hidrógeno-gas natural, en comparación con combustible gas natural, en un horno tipo llama directa corresponde a: un incremento de la eficiencia energética debido a una mayor temperatura de llama y velocidad de reacción, lo que potencia la transferencia de calor al material procesado; asimismo, reduce las emisiones de gases contaminantes de GEI. Con lo anterior, la adición de hidrógeno puede ser un aditivo eficaz para mejorar el rendimiento térmico y contribuir a una operación con mayor sostenibilidad.

6. Conclusiones

Los datos obtenidos permitieron evidenciar que la velocidad influye directamente en la mezcla de los gases, mientras que la temperatura determina la eficiencia y las emisiones. Al introducir el hidrógeno al gas natural aumento en la temperatura de combustión pasando de una temperatura máxima de 2446.2 K a una temperatura máxima de 2820.5 K y una reducción en las emisiones de CO pasando de una fracción másica máxima de 0.0625 a una fracción másica máxima de 0.0427 presentada en la mezcla de con adición de hidrogeno. Estos resultados respaldan la viabilidad del hidrógeno como aditivo para mejorar los procesos de combustión y contribuir a una matriz energética más sostenible.

Los resultados obtenidos en este estudio evidencian un impacto significativo de la adición de hidrógeno al gas natural en el rendimiento de los hornos industriales. Se observó un aumento en la eficiencia energética, atribuible a una mayor temperatura de llama y velocidad de reacción, lo cual potencia la transferencia de calor al material procesado.

La mayor velocidad de reacción del hidrógeno, evidenciada por el aumento en la temperatura máxima de la llama, es un factor determinante en la mejora del rendimiento térmico del proceso de combustión. Esta observación es consistente con los principios de la termodinámica,

donde una mayor velocidad de reacción implica una mayor liberación de energía en un tiempo más corto, lo que se traduce en una distribución de temperatura más homogénea.

7. Recomendaciones

Se propone validar experimentalmente los resultados numéricos obtenidos, profundizando en el impacto de la adición de hidrógeno en la combustión de mezclas de gas natural en diversos hornos industriales, y realizar un análisis económico detallado para evaluar la viabilidad de esta alternativa energética.

Referencias

- Ahbil, K., Sellami, F., & Azri, C. (2022). Temporal variation of surface O₃, NO_x and PM₁₀ and associated human health risk in Gabès suburban (South-Eastern Tunisia): multi-scales impact of sources and meteorology. *Environmental Forensics*, 1–19. <https://doi.org/10.1080/15275922.2022.2125111>
- ANSYS Inc. (2013). ANSYS Fluent User's Guide.
- Arroyo, J.; Pérez, L.; Cuervo-Piñera, V. (2023) CFD Modeling and Validation of Blast Furnace Gas/Natural Gas Mixture Combustion in an Experimental Industrial Furnace. <https://doi.org/10.3390/pr11020332>
- Cabrales Navarro, F., Álvarez Castro, H. C., Nunhez, J., Spogis, N., Soares, A., & Martignoni, W. (2011). COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC STUDY OF MIXING IN LARGE SCALE DIESEL STORAGE VESSELS. Disponible en: <http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/266824>
- COM. (2020). A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe. Communication from the commission to the European parliament, the council, the European economic and social committee and the committee of the regions. https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/hydrogen_strategy.pdf.
- Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG). (25 de julio de 2008). Especificaciones de calidad del gas natural en el punto de entrada del sistema nacional de transporte de gas. [https://gestornormativo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/ffad21a8c27fd8a20525785a007a7086/\\$FILE/D-062-08%20NÚMERO%20DE%20WOBBE.pdf](https://gestornormativo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/ffad21a8c27fd8a20525785a007a7086/$FILE/D-062-08%20NÚMERO%20DE%20WOBBE.pdf)

Couper, J. R., & others. (2012). *Chemical process equipment: Selection and design* (3rd ed.). Butterworth-Heinemann.

Fan, Z., Ma, T., Li, W., Wang, S., Mao, Z., & Xie, X. (2017). A comparison of hydrogen-enriched natural gas (HCNG) and compressed natural gas (CNG): Based on ANOVA models. International Journal of Hydrogen Energy, 42(50), 30029–30036. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.08.187>

FCH. (2019a). Hydrogen roadmap. Europe. A sustainable pathway for the European energy transition. Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking (FCH 2JU). Belgium. https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/Hydrogen%20Roadmap%20Europe_Report.pdf

García Posada, J. M., Amell Arrieta, A., & Burbano Martínez, H. J. (2006). Análisis comparativo de las propiedades de combustión de las mezclas metano-hidrógeno con respecto al metano. *Ingeniería & Desarrollo*, 20, 19-34. <https://doi.org/10.14483/22484728.184>

Huerto Bujaco, H. O. (2013). Estudio del flujo en un tanque agitador vertical de impulsor PTB con superficie libre mediante el programa ANSYS CFX V.14.0 [Pontificia Universidad Católica de Perú]. <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/5059>

Mayrhofer, M., Koller, M., Seemann, P., Prieler, R., & Hochenauer, C. (2021). Assessment of natural gas/hydrogen blends as an alternative fuel for industrial heat treatment furnaces. International Journal of Hydrogen Energy, 46(41), 21672–21686. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.03.228>

Ministerio de Minas y Energía. (2021). Hoja de Ruta del Hidrógeno en Colombia. <https://www.minenergia.gov.co/es/micrositios/enlace-ruta-hidrogeno/>

Pérez, J. A. V. (2015). *LA CINÉTICA DE LA COMBUSTIÓN DE METANO* [Universidad Carlos III de Madrid]. <https://e-archivo.uc3m.es/rest/api/core/bitstreams/6a6a6d63-f7d2-461b-9bb3-211f3ab4a8af/content>

Pfeifer, H. (2017). Industrial furnaces-status and research challenges. *Energy Procedia*, 120, 28-40.

Primagas. (2021, septiembre). ¿Qué es el poder calorífico?. <https://www.primagas.es/blog/que-es-poder-calorifico>

©PRTR-España. (s/f). NOx (Óxidos de nitrógeno). Ministerio de Agricultura, alimentación y medio ambiente. Recuperado el 19 de abril de 2024, de <https://prtr-es.es/NOx-oxidos-de-nitrogeno,15595,11,2007.html>

Sadegh, A. M., & Worek, W. M. (2017). *Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers*, 12th Edition. McGraw-Hill Education.

Silva, F. U. (2024). <https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/f103dd4e-1aa7-47f5-ba86-30c59428bcc4/content>. Uniandes.
<https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/f103dd4e-1aa7-47f5-ba86-30c59428bcc4/content>

Villaflor, G., Morales, G. V., & Velasco, J. W. (2008). *Variables Significativas del Proceso de Combustión del Gas Natural*. 19, 57–62. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642008000400008>

Zhao, Y., McDonell, V., & Samuelsen, S. (2019). Experimental assessment of the combustion performance of an oven burner operated on pipeline natural gas mixed with hydrogen. International Journal of Hydrogen Energy, 44(47), 26049–26062. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.08.011>

Zhao, Y., McDonell, V., & Samuelsen, S. (2020). Assessment of the combustion performance of a room furnace operating on pipeline natural gas mixed with simulated biogas or hydrogen. International Journal of Hydrogen Energy, 45(19), 11368–11379. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.02.071>

Anexos

A. Estequiometria de la reacción de gas natural-aire (imágenes de Ansys)

Species	Stoich. Coefficient	Rate Exponent	Species	Stoich. Coefficient	Rate Exponent
ch4	1	1	co2	1	1
o2	2	2	h2o	2	2

Species	Stoich. Coefficient	Rate Exponent	Species	Stoich. Coefficient	Rate Exponent
ch4	2	2	co	2	2
o2	3	3	h2o	4	4

Species	Stoich. Coefficient	Rate Exponent	Species	Stoich. Coefficient	Rate Exponent
c2h6	2	2	co2	4	4
o2	7	7	h2o	6	6

Species	Stoich. Coefficient	Rate Exponent	Species	Stoich. Coefficient	Rate Exponent
c2h6	2	2	co	4	4
o2	5	5	h2o	6	6

B. Estequiometria de la reacción de gas natural-hidrogeno-aire (Imágenes de Ansys)

Species	Stoich. Coefficient	Rate Exponent	Species	Stoich. Coefficient	Rate Exponent
h2	2	2	co2	1	1
ch4	1	1	h2o	4	4
o2	3	3			

Species	Stoich. Coefficient	Rate Exponent	Species	Stoich. Coefficient	Rate Exponent
h2	1	1	co	1	1
ch4	1	1	h2o	3	3
o2	2	2			

Species	Stoich. Coefficient	Rate Exponent	Species	Stoich. Coefficient	Rate Exponent
h2	1	1	co2	2	2
c2h6	1	1	h2o	4	4
o2	4	4			

Species	Stoich. Coefficient	Rate Exponent	Species	Stoich. Coefficient	Rate Exponent
h2	1	1	co	2	2
c2h6	1	1	h2o	4	4
o2	3	3			

Species	Stoich. Coefficient	Rate Exponent	Species	Stoich. Coefficient	Rate Exponent
h2	1	2	h2o	1	2
o2	0.5	1			