

Influencia de las Variables de Humedad Relativa y Temperatura en el Consumo de Gas  
Combustible para un Horno de Calentamiento de Llama Directa

Nancy Alejandra Cárdenas Colina

Trabajo de Grado para optar por el título de Ingeniera Química  
Modalidad Investigación

Director

Carlos Augusto Godoy Ruiz

Especialista en Ingeniería del Gas

Codirector

Hernando Guerreo Amaya

Ph.D. en Electroquímica, Ciencia y Tecnología

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2024

### **Dedicatorias**

En profundo agradecimiento a mis queridos padres, Henry Cárdenas y Nancy Colina, por sus palabras de aliento, perseverancia y sacrificio. Gracias por inculcarme la importancia del trabajo duro y la educación. Este logro académico es un reflejo del incalculable esfuerzo que han invertido. Los amo profundamente.

A mis hermanos, les agradezco por su amor y apoyo incondicional, los cuales me han dado fuerzas para continuar. Reconozco que mis logros no habrían sido posibles sin su constante respaldo, y valoro profundamente que compartan cada triunfo como si fuera propio.

A mi compañero de vida, Jorge Luis Bello, quien ha sido mi fuente constante de apoyo y amor incondicional. Tu presencia en mi vida es un regalo invaluable, éste logro lo compartimos juntos, como un equipo.

A mi mejor amigo, Camilo Arenas, quien estuvo conmigo en los momentos de estrés y alegría durante este largo y retador camino. Gracias por ser mi punto de apoyo, mi equipo de aliento y, lo más importante, la familia que yo elegí.

A Oscar Linares, Lizeth Tautiva, Natalia González, Tatiana Jiménez, Karol Benavides, German Rodríguez, y demás personas que fueron partícipes durante todo este proceso, cada uno de ustedes ha contribuido a mi fortaleza y ánimo de una manera u otra. Sin ustedes, todo esto no habría sido posible.

### **Agradecimientos**

A Dios, por guiarme en cada paso de mi vida. Gracias por ser fuente de fortaleza y darme la fuerza para culminar este logro académico.

A mi director de trabajo de grado el Especialista en Ingeniería del Gas Carlos Augusto Godoy Ruiz, por su guía y motivación en cada etapa del proyecto, sus contribuciones y sugerencias fueron fundamentales para lograr con éxito la culminación de esta tesis de investigación.

Al codirector de este proyecto, el Ingeniero Químico Ph.D. Hernando Guerreo Amaya, por su apoyo fue un pilar importante en este trabajo de grado.

A la Escuela de Ingeniería Química por brindarnos la oportunidad de realizarnos académicamente y acogernos como nuestro segundo hogar, a cada profesor de la carrera y a los demás trabajadores que de una u otra manera nos guiaron y apoyaron en esta importante etapa de nuestras vidas.

Al Centro Nacional de Investigaciones para la Agroindustrialización de Especies Vegetales Aromáticas y Medicinas Tropicales CENIVAM, en especial a Jhonattan García, por ser guía y apoyo incondicional en la búsqueda de mis sueños.

**Contenido**

|   | <b>Pág.</b> |
|---|-------------|
| Introducción .....  | 12          |
| 1. Objetivos.....   | 14          |
| 1.1 Objetivo General.....   | 14          |
| 1.2 Objetivos Específicos.....  | 14          |
| 2. Marco Conceptual.....  | 15          |
| 2.1 Combustión.....   | 15          |
| 2.1.1 Estequiometria de la Combustión .....                             | 16          |
| 2.1.1.1 Combustión Completa. ....                                       | 16          |
| 2.1.1.2 Combustión Incompleta. ....                                     | 17          |
| 2.1.1.3 Combustión Estequiométrica. ....                                | 17          |
| 3. Estado del Arte.....   | 17          |
| 4. Metodología .....  | 19          |
| 4.1 Relación entre las Variables.....                                   | 20          |
| 4.1.1 Recopilación de Datos Históricos.....                             | 20          |
| 4.1.2 Verificación de la Relación Cualitativa entre las Variables ..... | 20          |
| 4.2 Simulación del Proceso.....   | 22          |
| 4.2.1 Desarrollo del Modelo del Cálculo Teórico.....                    | 22          |

|   |    |
|---|----|
| INFLUENCIA DE LAS VARIABLES AMBIENTALES EN EL CONSUMO DE GAS  | 5  |
| 4.2.2 Determinación del Software de Simulación .....  | 22 |
| 4.2.3 Desarrollo del Modelo de Simulación .....   | 22 |
| 4.3 Análisis de Resultados .....  | 23 |
| 4.3.1 Definición de los Datos Base de Entrada.....  | 23 |
| 4.3.2 Análisis de los Resultados .....  | 23 |
| 4.3.3 Comparación de Resultados.....  | 23 |
| 5. Resultados .....   | 23 |
| 5.1 Verificación de la Relación Cualitativa entre las Variables de Temperatura, Humedad del Aire con Respecto al Consumo de Gas Combustible. .... | 23 |
| 5.2 Simulación del Proceso de Combustión en el Horno de Calentamiento de Llama Directa....  | 27 |
| 5.2.1 Modelo de Cálculo Teórico .....   | 27 |
| 5.2.1.1 Balance de Masa. ....   | 27 |
| 5.2.1.2 Balance de Calor. ....  | 31 |
| 5.2.2 Selección del Software de Simulación.....   | 33 |
| 5.2.3 Modelo de Simulación .....  | 34 |
| 5.3 Análisis de Resultados .....  | 35 |
| 5.3.1 Definición Datos de Entrada.....  | 35 |
| 5.3.2 Análisis Gráfico .....  | 36 |
| 6. Conclusiones .....   | 41 |
| 7. Recomendaciones .....  | 42 |

|  |    |
|--|----|
| INFLUENCIA DE LAS VARIABLES AMBIENTALES EN EL CONSUMO DE GAS | 6  |
| 7.1 Análisis de Eficiencia del Horno y Calidad del Aire..... | 42 |
| 7.2 Registro de Temperaturas .....                           | 42 |
| 7.3 Consideración de Software Alternativo .....              | 42 |
| Referencias Bibliográficas .....                             | 43 |
| Apéndices.....   | 46 |

**Lista de Tablas**

|  | <b>Pág.</b> |
|--|-------------|
| <b>Tabla 1.</b> <i>Resultados del Muestreo de Gases</i> .....  | 28          |
| <b>Tabla 2.</b> <i>Composición del gas natural</i> .....   | 29          |
| <b>Tabla 3.</b> <i>Flujos máxicos totales de H<sub>2</sub>O y CO<sub>2</sub> generados en la combustión de gas natural</i> ..... | 30          |
| <b>Tabla 4.</b> <i>Flujo de calor liberado</i> .....   | 32          |
| <b>Tabla 5.</b> <i>Análisis comparativo entre los softwares de simulación comúnmente utilizados.</i> .....                       | 34          |
| <b>Tabla 6.</b> <i>Comparativo entre resultados del software de simulación y el balance teórico</i> .....                        | 39          |
| <b>Tabla 7.</b> <i>Variación temperatura del aire y gas natural</i> .....  | 40          |

**Lista de Figuras**

|  | <b>Pág.</b> |
|--|-------------|
| <b>Figura 1.</b> <i>Diagrama de flujo de la metodología empleada</i> .....                             | 19          |
| <b>Figura 2.</b> <i>Optimización de datos, regresión polinómica y manejo de valores atípicos</i> ..... | 21          |
| <b>Figura 3.</b> <i>Humedad relativa y temperatura del aire vs caudal de gas noviembre 2022</i> .....  | 24          |
| <b>Figura 4.</b> <i>Humedad relativa y temperatura del aire vs caudal de gas febrero 2023</i> .....    | 24          |
| <b>Figura 5.</b> <i>Humedad relativa y temperatura del aire vs caudal de gas marzo 2023</i> .....      | 25          |
| <b>Figura 6.</b> <i>Humedad relativa y temperatura del aire vs caudal de gas mayo 2023</i> .....       | 25          |
| <b>Figura 7.</b> <i>Diagrama de entrada y salida para el proceso de combustión completa</i> .....      | 32          |
| <b>Figura 8.</b> <i>Diagrama de simulación del proceso de combustión</i> .....                         | 35          |
| <b>Figura 9.</b> <i>Condiciones de entrada y salida del proceso</i> .....                              | 36          |
| <b>Figura 10.</b> <i>Temperatura vs Calor liberado, mes de diciembre 2022</i> .....                    | 37          |
| <b>Figura 11.</b> <i>Humedad relativa vs Calor liberado, mes de diciembre 2022</i> .....               | 37          |
| <b>Figura 12.</b> <i>Caudal de gas vs Calor liberado, mes de diciembre 2022</i> .....                  | 38          |

**Lista de Apéndices**

|   | <b>Pág.</b> |
|---|-------------|
| Apéndice A. <i>Recopilación de datos históricos de humedad relativa y temperatura ambiente ....</i>                                 | 46          |
| Apéndice B. <i>Relación entre la temperatura, la humedad y el consumo de gas natural .....</i>                                      | 65          |
| Apéndice C. <i>Datos de composición correspondiente al gas combustible .....</i>  | 67          |
| Apéndice D. <i>Flujo del calor disponible en el proceso de combustión .....</i>   | 68          |
| Apéndice E. <i>Revisión bibliográfica para la elección del software de simulación. ....</i>   | 70          |
| Apéndice F. <i>Paso a paso del procedimiento para la construcción y desarrollo de la simulación del proceso de combustión .....</i> | 73          |

## Resumen

**Título:** Influencia de las variables de humedad relativa y temperatura en el consumo de gas combustible para un horno de calentamiento de llama directa<sup>1\*</sup>

**Autor(a):** Nancy Alejandra Cárdenas Colina<sup>2\*\*</sup>

**Palabras clave:** Proceso de combustión, temperatura, humedad relativa, consumo de gas combustible, horno de calentamiento de llama directa.

### Descripción:

En numerosos sistemas de conversión de energía, la combustión actúa como la principal fuente de energía y representa la mayor parte de los costos de producción. La eficiencia global de las instalaciones que utilizan la combustión como fuente primaria depende en gran medida a la eficiencia de este proceso. Un proceso de combustión eficiente optimiza la conversión de la energía química del combustible en energía térmica, mientras que minimiza el impacto ambiental negativo asociado con la contaminación.

Este estudio analiza cómo la temperatura y humedad relativa del aire afectan el consumo de gas combustible en un horno de calentamiento de llama directa. La metodología empleada incluyó tres enfoques clave. Primero, se realizó una recopilación de datos históricos para identificar tendencias y validar la relación entre las variables estudiadas. Segundo, se llevó a cabo un análisis detallado del consumo de gas mediante un balance manual que consideró las condiciones operativas y ambientales específicas de la planta, proporcionando una visión inicial del proceso y sus variables. Posteriormente, se realizó una evaluación cualitativa de los softwares de simulación comúnmente utilizados para seleccionar uno de ellos, siendo el Aspen HYSYS el más apto para nuestro caso de estudio, el cual se utilizó para simular el sistema de calentamiento bajo diversas condiciones ambientales, permitiendo la comparación de los resultados teóricos con los obtenidos de manera manual.

Los hallazgos principales revelaron que las variables ambientales ejercen un impacto significativo en el consumo de gas del horno. Específicamente, se observó que la temperatura ambiente y la humedad relativa influyen tanto directa como inversamente proporcional en el consumo de gas combustible.

---

<sup>1\*</sup> Trabajo de Grado

<sup>2\*\*</sup> Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Carlos Augusto Godoy Ruiz, Especialista en Ingeniería del Gas. Codirector: Hernando Guerreño Amaya, Ph.D. en Electroquímica, Ciencia y Tecnología

**Abstract**

**Title:** Influence of Relative Humidity and Temperature Variables on Fuel Gas Consumption for a Direct Flame Heating Furnace

**Author:** Nancy Alejandra Cárdenas Colina<sup>3\*\*</sup>

**Key Words:** Combustion process, temperature, relative humidity, fuel gas consumption, direct flame heating furnace.

**Description:**

In many energy conversion systems, combustion acts as the primary source of energy and accounts for most of the production costs. The overall efficiency of facilities using combustion as the primary source depends largely on the efficiency of this process. An efficient combustion process optimizes the conversion of the fuel's chemical energy into thermal energy, while minimizing the negative environmental impact associated with pollution.

This study analyzes how air temperature and relative humidity affect fuel gas consumption in a direct-flame heating furnace. The methodology employed included three key approaches. First, a historical data collection was performed to identify trends and validate the relationship between the variables studied. Second, a detailed analysis of gas consumption was carried out by means of a manual balance that considered the specific operating and environmental conditions of the plant, providing an initial view of the process and its variables. Subsequently, a qualitative evaluation of commonly used simulation software was performed to select one of them, being Aspen HYSYS the most suitable for our case study, which was used to simulate the heating system under various environmental conditions, allowing the comparison of the theoretical results with those obtained manually.

The main findings revealed that environmental variables exert a significant impact on furnace gas consumption. Specifically, ambient temperature and relative humidity were found to influence both directly and inversely proportional to the fuel gas consumption.

---

<sup>3\*\*</sup> Faculty of Physical-Chemical Engineering. School of Chemical Engineering. Director: Carlos Augusto Godoy Ruiz, Specialist in Gas Engineering. Co-director: Hernando Guerreño Amaya, Ph.D. in Electrochemistry, Science and Technology

## Introducción

La combustión de combustibles fósiles se emplea en una amplia variedad de aplicaciones para la generación de energía térmica. En el ámbito residencial, se utilizan principalmente gas natural y gas propano para la cocción de alimentos y el calentamiento de agua. En el sector industrial, se utilizan combustibles en estado sólido, líquido o gaseoso para la generación de vapor, el cual se emplea en diversos procesos productivos, tanto para la generación de potencia como para la producción de calor (Pikoñ, 2003).

Dado el papel fundamental que la combustión desempeña en la sociedad, resulta útil que el talento humano encargado de diseñar, operar y mantener los diversos sistemas que se tienen en los procesos industriales tenga una noción sobre los fenómenos y las principales variables que afectan este proceso (OM Cala, 2013). En consecuencia, comprender a profundidad el proceso de combustión del gas natural como fuente de energía, particularmente en relación con la reacción que se lleva a cabo en los quemadores de gas, se convierte en una herramienta esencial para optimizar su uso y diseño, considerando aspectos ambientales, técnicos, legales y económicos. (Serrano, 2005)

En los equipos de procesamiento de gas donde se transmite energía en forma de calor por combustión, el combustible habitualmente utilizado es el gas natural, aunque en ocasiones se emplea etano, propano o aceites ligeros. Estos equipos se dividen en dos categorías: calentadores de fuego directo, donde los gases de combustión ocupan la mayor parte del espacio del calentador y calientan la corriente del proceso que fluye a través de tuberías dispuestas frente a paredes refractarias, siendo estos los más comunes; y calentadores pirotubulares, en los que los gases de combustión se encuentran confinados en un tubo pirotubular rodeado por un líquido que llena la carcasa del calentador (s. 8, "Heat transfer", pp. 1-40).

En el municipio de Sabana de Torres se sitúa una planta de tratamiento de gas natural derivada de la actividad petrolera en la cuenca del Magdalena Medio (Rocha Lizarazo, 2021); en dicha planta se encuentra instalado un horno de calentamiento de fuego directo cilíndrico vertical, que fue adquirido en el año 2021 como reemplazo a un horno tipo cabina, el cual se encontraba en operación desde la década de los sesenta. Este horno cuenta con sus correspondientes secciones de radiación y convección. Sin embargo, desde su puesta en marcha, se han presentado variaciones en el consumo de gas combustible para una misma carga y requerimiento energético en el fluido de proceso. Estas variaciones podrían relacionarse con cambios en la temperatura y la humedad del aire.

Con base en lo anterior, se propone desarrollar un estudio técnico que permita responder a la pregunta: ¿Cómo afectan las variables de temperatura y humedad del aire en el consumo de gas combustible en un horno de calentamiento de llama directa?

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo General**

Determinar la influencia de la temperatura y humedad del aire en el consumo de gas combustible para un horno de calentamiento de llama directa, ubicado en una planta de gas en el Magdalena Medio.

### **1.2 Objetivos Específicos**

Establecer la relación entre los resultados de investigaciones previas y los datos de campo respecto a la influencia de la humedad relativa y la temperatura ambiente en el consumo de gas combustible.

Desarrollar un modelo de simulación del proceso de combustión en un horno de calentamiento de llama directa haciendo uso de software especializado.

Analizar cuantitativamente el efecto en los cambios de las variables de temperatura y humedad del aire en el consumo de gas combustible para un horno de calentamiento de llama directa.

## 2. Marco Conceptual

### 2.1 Combustión

La combustión es un conjunto de reacciones de oxidación con desprendimiento de calor, que se producen entre dos elementos: el COMBUSTIBLE, que puede ser un sólido (carbón, madera, etc.), un líquido (gasóleo, fuel-oil, etc.) o un gas (natural, propano, etc.) y el COMBURENTE, oxígeno. La combustión se distingue de otros procesos de oxidación lenta, por ser un proceso de oxidación rápida y con presencia de llama; a su vez también se diferencia de otros procesos de oxidación muy rápida (detonaciones, deflagraciones y explosiones) por obtenerse el mantenimiento de una llama estable (García San José, 2001).

Para que la combustión tenga lugar han de coexistir tres factores: combustible, comburente y energía de activación. Estos tres factores se representan en el denominado triángulo de combustión, en el cual si falta alguno de los vértices la combustión no puede llevarse a cabo.

El comburente universal es el oxígeno, por lo que en la práctica se utiliza el aire como comburente, ya que está compuesto, prácticamente, por 21% oxígeno ( $O_2$ ) y 79% nitrógeno ( $N_2$ ); únicamente en casos especiales se utilizan atmósferas enriquecidas en oxígeno e incluso oxígeno puro (por ejemplo, en soldadura). La energía de activación es el elemento desencadenante de la reacción de combustión; en los quemadores habitualmente suele obtenerse mediante una chispa eléctrica entre dos electrodos, en las calderas individuales de gas se obtiene por llama piloto, tren de chispas, entre otros (García San José, 2001).

La mayoría de los combustibles, al margen de que sean sólidos, líquidos o gaseosos, están compuestos, básicamente, por carbono (C) e hidrógeno (H); además de estos componentes principales tienen otros como azufre (S), agua ( $H_2O$ ), cenizas, entre otros.

En primer lugar, se analiza la combustión desde el punto de vista de sus componentes fundamentales (C, H); posteriormente se comentará la influencia de los restantes elementos. Las reacciones de combustión son:



En la práctica los combustibles pueden definirse de la forma  $C_xH_y$ , dando lugar a las siguientes reacciones:



### ***2.1.1 Estequiometría de la Combustión***

La estequiometría de la combustión se ocupa de las relaciones másicas y volumétricas entre reactivos y productos. Los aspectos a determinar son principalmente: aire necesario para la combustión y productos de la combustión y su composición (García San José, 2001).

Para predecir estas cantidades es preciso referirse a un proceso ideal que dependa de unos pocos parámetros, básicamente la naturaleza del combustible. Para definir este proceso ideal se consideran los tipos de combustión que pueden darse:

#### **2.1.1.1 Combustión Completa.**

Una combustión es completa cuando se logra oxidar todo el combustible y se libera toda la energía («III. QUÍMICA DE LA COMBUSTIÓN», s.f.). Es decir, son aquellas reacciones en las que se oxida (consume) totalmente el material combustible y se producen otros compuestos oxigenados, como el dióxido de carbono ( $CO_2$ ) o dióxido de azufre ( $SO_2$ ), según sea el caso, y agua ( $H_2O$ ) (Ondarse Álvarez, 2024).

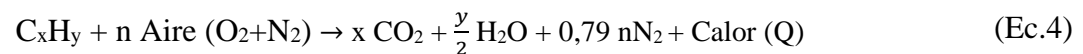
### 2.1.1.2 Combustión Incompleta.

Los componentes del combustible no se oxidan totalmente por lo que aparecen los denominados inquemados, los más importantes son CO y H<sub>2</sub>; otros posibles inquemados son carbono, restos de combustible, entre otros (García San José, 2001).

### 2.1.1.3 Combustión Estequiométrica.

Es la combustión completa realizada con la cantidad estricta de oxígeno; es decir, el aire empleado en la combustión es el mínimo necesario para contener la cantidad de oxígeno correspondiente a la oxidación completa de todos los componentes del combustible.

La expresión de esta combustión es:



## 3. Estado del Arte

Los procesos que involucran la transferencia de energía térmica mediante la ignición de combustibles sólidos, líquidos o gaseosos pueden tener múltiples impactos en términos ambientales, técnicos y económicos; en particular, cuando se abordan los que se encuentran en estado gaseoso, debido a que se cuenta con una amplia variedad de compuestos que pueden ser utilizados en estos procesos, variando según su origen y disponibilidad (OM Cala, 2015).

Desde principios del siglo XX, se han llevado a cabo investigaciones que analizan cómo las variaciones en el suministro de combustible al quemador pueden afectar la eficiencia del proceso de combustión. Estos estudios han buscado la creación de índices de rendimiento destinados a diferenciar los distintos tipos de gas combustible probados en diversos equipos de combustión (Serrano, 2005).

Resultados de investigaciones realizadas en el año 2005 han demostrado que el exceso de aire y la temperatura de los productos de combustión son factores determinantes en términos de impactos ambientales y eficiencia energética en los procesos térmicos basados en la combustión de combustibles gaseosos, como el gas natural (OM Cala, 2013). La tasa de calor aprovechable, la eficiencia de combustión y las emisiones contaminantes, son evaluadas en función del nivel de exceso de aire y la temperatura de los gases (Amell, Gil, & Maya, 1998), (Marquez, 1989).

Según el artículo : “Influencia del aire húmedo en la combustión del metano” (Carranza, 2014), se permitió demostrar que la humedad relativa y la temperatura del aire pueden llegar a tener un efecto considerable en las propiedades de los gases de combustión del metano, efecto que depende de la aplicación y que es importante evaluar en el caso de algunos procesos que han venido incrementando su popularidad y aplicación como los sistemas de captura de CO<sub>2</sub> y los procesos de recuperación del agua de los gases de combustión para ser reutilizada en el proceso.

Mejorar la eficiencia de la mezcla de aire y combustible en un quemador puede reducir el exceso de oxígeno del 6% al 2%, lo que tiene un impacto significativo en la eficiencia energética de la combustión. Sin embargo, este aumento en la eficiencia conlleva un incremento en la temperatura de la llama del quemador y, por ende, en la temperatura de la cámara de combustión (Engineers, 2019). Estos hallazgos resaltan la importancia de equilibrar la eficiencia energética con los aspectos térmicos y ambientales en la optimización de los procesos de combustión en la industria.

Según el estudio realizado por la empresa estadounidense “Clever Brooks” indica que la combustión en calderas requiere un exceso de aire para que el combustible se queme de manera completa y eficiente. Si no se agrega suficiente aire, se producirán emisiones adicionales de gases de escape, como monóxido de carbono, hollín y humo. La generación de este tipo de emisiones,

tienen el potencial de impactar la salud de las personas alrededor como también el medio ambiente. Desde el punto de vista de la seguridad, el exceso de aire también es importante para evitar la formación de llamas inestables y otros peligros. Por otra parte, un exceso de aire también puede reducir la eficiencia de la combustión y aumentar el consumo de combustible.

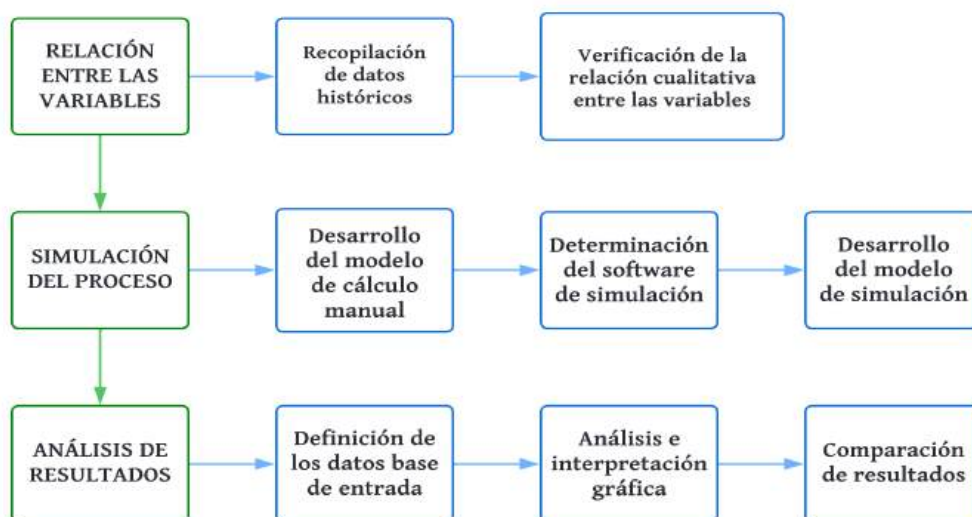
El exceso de aire en los hornos afecta significativamente su eficiencia, lo cual nos indica que es un parámetro importante por controlar. Por tanto, un exceso de aire mayor al estimado provoca una pérdida de calor en los gases de combustión, ya que el porcentaje de aire es la cantidad por encima del requisito estequiométrico para una combustión completa. Por ejemplo, un 15% de exceso de aire equivale a un 3% de oxígeno al encender gas natural (CleverBrooks, s.f.). Esto reduce la temperatura de la llama, lo que afecta negativamente a la transferencia de calor. El aire adicional sale del sistema a la temperatura de los gases de escape.

#### 4. Metodología

A continuación, se presenta el diagrama de flujo que ilustra la metodología empleada.

**Figura 1.**

*Diagrama de flujo de la metodología empleada*



## **4.1 Relación entre las Variables**

### ***4.1.1 Recopilación de Datos Históricos***

Los datos históricos de humedad relativa y temperatura ambiente asociados al aire utilizado en el proceso de combustión, correspondientes al período comprendido entre noviembre de 2022 y junio de 2023, fueron obtenidos de la base de datos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Estos datos meteorológicos corresponden a la estación meteorológica ubicada en el sitio de estudio. Por otro lado, los registros del caudal de gas consumido por el horno de calentamiento de llama directa fueron proporcionados por la planta de tratamiento de gas natural PG-PSC. Cabe destacar que estos datos corresponden al gas natural suministrado al quemador del horno.

El apéndice A, incluye la información mencionada anteriormente, la cual fue fundamental para visualizar la relación entre las variables del área de estudio.

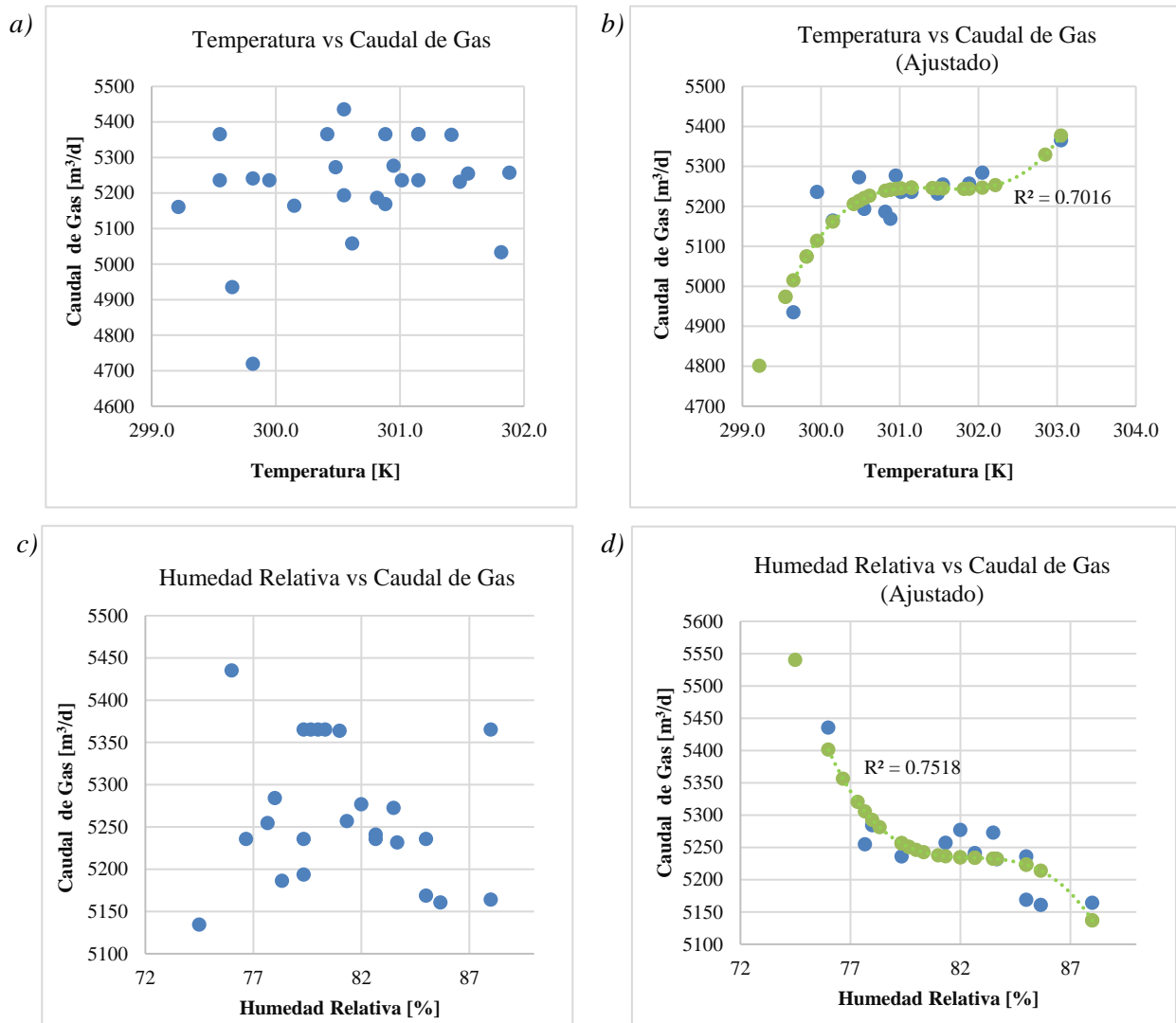
### ***4.1.2 Verificación de la Relación Cualitativa entre las Variables***

Una vez recopilada la base de datos, se relacionaron las variables de temperatura y humedad relativa con el caudal de consumo del gas combustible. Estos datos se organizaron por fechas y en orden ascendente según la variable específica de estudio.

Para mejorar la calidad de los datos y reducir la dispersión, así como para abordar la presencia de datos atípicos, se emplearon varios métodos estadísticos en el análisis. Estos métodos incluyeron el uso de la desviación estándar para identificar y manejar datos fuera de lo común, la sustitución por el promedio para tratar valores faltantes, la agrupación de datos para simplificar conjuntos de datos complejos y la interpolación polinómica, la cual busca encontrar un polinomio que pase por un conjunto dado de puntos, ya sea obtenidos por muestreo o a partir de experimentos, como se ilustra en la Figura 2.

**Figura 2.**

*Optimización de datos, regresión polinómica y manejo de valores atípicos*



*Nota.* Las ilustraciones presentan los ajustes de: a) Temperatura vs caudal de gas, b). Temperatura vs caudal de gas ajustado, c) Humedad relativa vs caudal de gas y d) Humedad relativa vs caudal de gas ajustado, correspondientes al mes de noviembre de 2022, tras la eliminación de valores atípicos y ajuste polinómico.

Este procedimiento se realizó para cada uno de los meses correspondientes al caso de estudio.

## **4.2 Simulación del Proceso**

### ***4.2.1 Desarrollo del Modelo del Cálculo Teórico***

Se desarrolló un modelo de cálculo teórico en Microsoft Excel que integra los balances de masa y energía del sistema, con el propósito de reconocer la ruta de cálculo de ingeniería, estableciendo las entradas y salidas necesarias para estimar los valores teóricos de las variables involucradas en el proceso de combustión.

### ***4.2.2 Determinación del Software de Simulación***

Se evaluó y seleccionó el software de simulación más adecuado para el proceso de combustión, considerando su disponibilidad, factibilidad de acceso y pertinencia técnica. Se realizó un análisis detallado de cuatro programas de simulación: DWSIM, COCO, Aspen HYSYS y ProMax. Estos softwares fueron identificados en la literatura y cuentan con un historial positivo en términos de validación y precisión en la simulación de procesos químicos. Por esta razón, se realizó una búsqueda bibliográfica en la que fueron implementados estos softwares para simular procesos de combustión relacionados con el gas natural.

### ***4.2.3 Desarrollo del Modelo de Simulación***

Se desarrolló un modelo de simulación del proceso de combustión utilizando Aspen HYSYS v14.0. El análisis se centró en calcular el calor liberado bajo diversas condiciones de temperatura, humedad relativa y consumo de gas. Para ello, se emplearon datos recopilados durante la fase de recolección y paquetes termodinámicos específicos del software.

### **4.3 Análisis de Resultados**

#### ***4.3.1 Definición de los Datos Base de Entrada***

Se definieron datos base que funcionarán como entrada tanto en el software de simulación como en la hoja de cálculo, con el propósito de iniciar la generación de cambios y facilitar la visualización de las variaciones en las variables del caso de estudio.

#### ***4.3.2 Análisis de los Resultados***

Se realizó un análisis e interpretación de la información proporcionada por los datos recopilados en los gráficos, con el objetivo de identificar las correlaciones y tendencias entre las variables en el caso de estudio.

#### ***4.3.3 Comparación de Resultados***

Se llevó a cabo una comparación entre los resultados obtenidos en el software de simulación y los cálculos manuales realizados.

## **5. Resultados**

### **5.1 Verificación de la Relación Cualitativa entre las Variables de Temperatura, Humedad del Aire con Respecto al Consumo de Gas Combustible.**

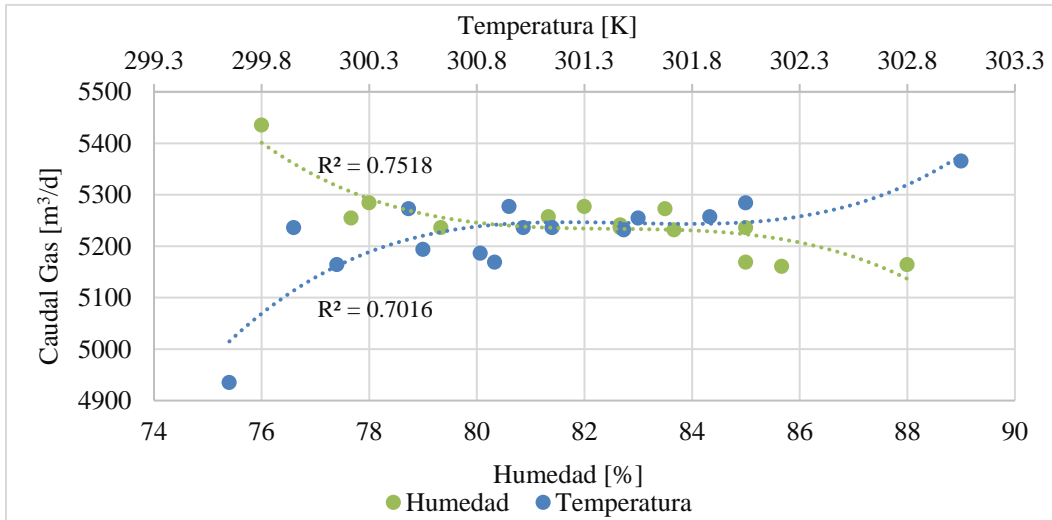
Para realizar la verificación de la relación cualitativa entre las variables de interés, se llevó a cabo la agrupación de los datos para simplificar el modelo, detectar posibles datos atípicos y luego aplicar la interpolación polinómica. Este enfoque permitió determinar una función que predijera el comportamiento de los datos mediante una curva, la cual puede ser de grado 2 o 3.

El procedimiento descrito se aplicó a cada uno de los meses de estudio para determinar las funciones que se ajustaran al comportamiento de los datos. Se analizaron las curvas resultantes,

encontrando un patrón repetitivo en la relación entre la temperatura y el caudal de gas, de igual manera para relación a humedad relativa y el caudal de gas, como se muestra a continuación:

**Figura 3.**

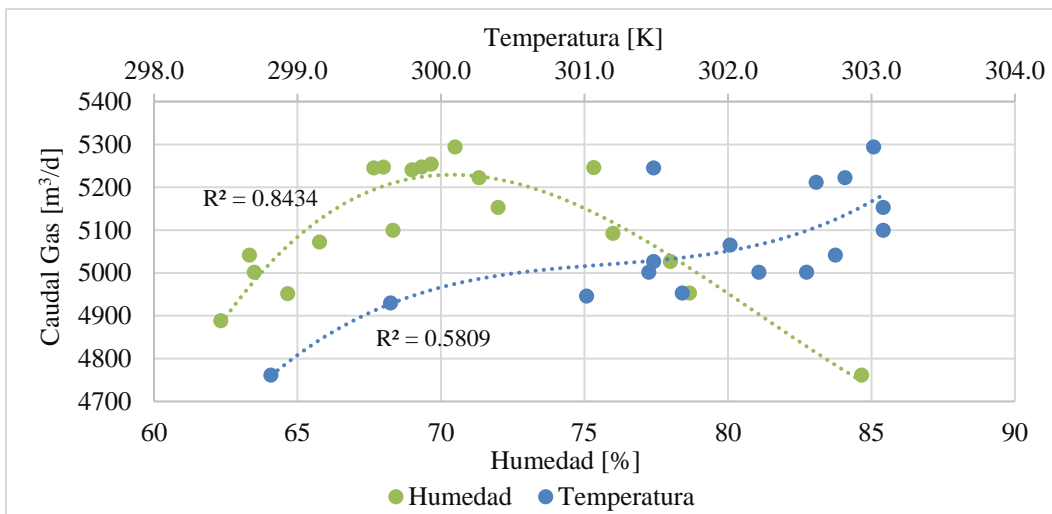
*Humedad relativa y temperatura del aire vs caudal de gas noviembre 2022*



*Nota.* La ilustración muestra la relación entre la temperatura, la humedad relativa y el consumo de gas combustible para el mes de noviembre.

**Figura 4.**

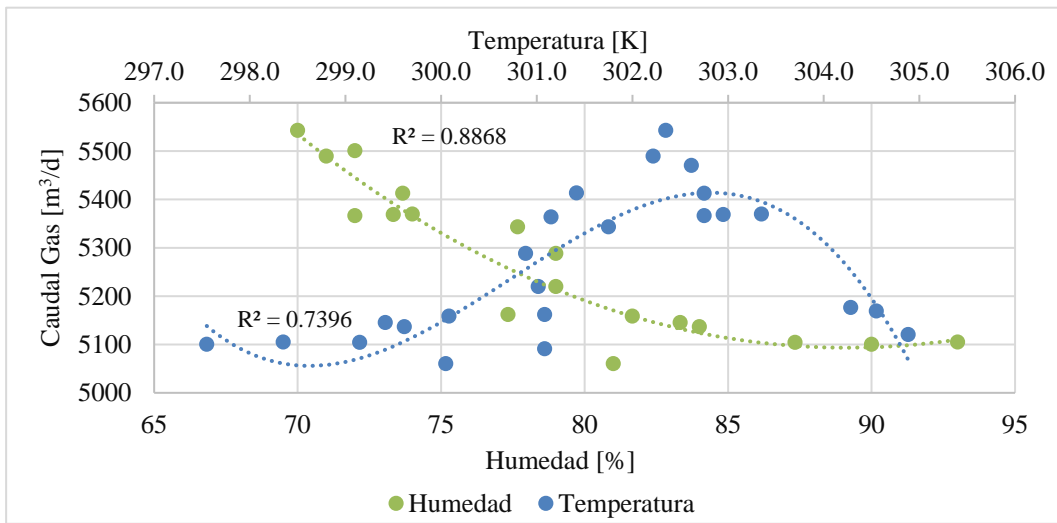
*Humedad relativa y temperatura del aire vs caudal de gas febrero 2023*



*Nota.* La ilustración muestra la relación entre la temperatura, la humedad relativa y el consumo de gas combustible para el mes de febrero.

**Figura 5.**

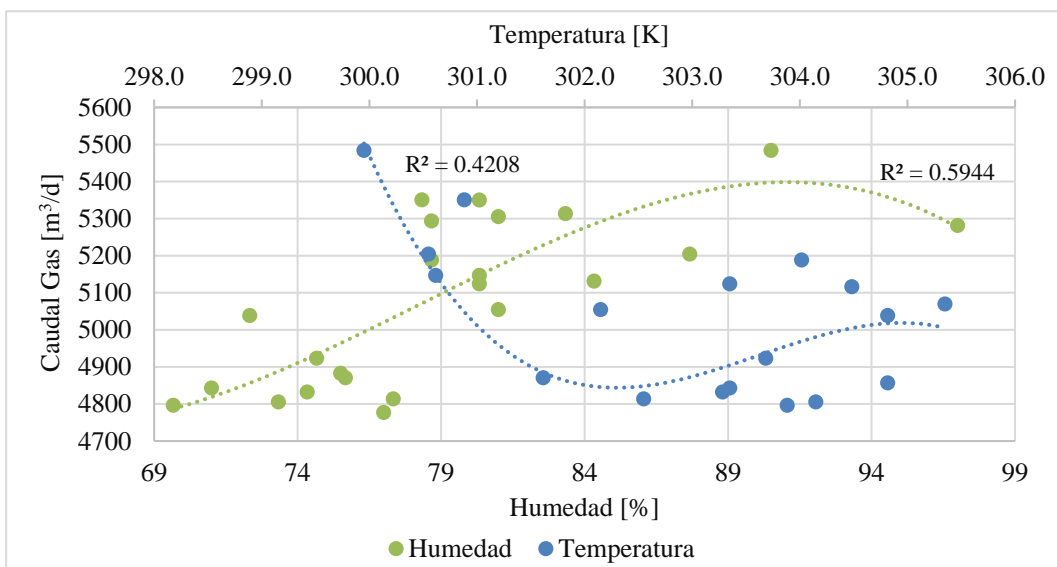
*Humedad relativa y temperatura del aire vs caudal de gas marzo 2023*



*Nota.* La ilustración muestra la relación entre la temperatura, la humedad relativa y el consumo de gas combustible para el mes de marzo.

**Figura 6.**

*Humedad relativa y temperatura del aire vs caudal de gas mayo 2023*



*Nota.* La ilustración muestra la relación entre la temperatura, la humedad relativa y el consumo de gas combustible para el mes de mayo. Para un análisis detallado del comportamiento de los datos de los meses restantes, consulte el Apéndice B.

Las figuras 2,3,4 y 5 ilustran los resultados del procesamiento de datos, revelando tendencias y patrones que corroboran la relación cualitativa entre las variables de interés. El análisis estadístico, reflejado en un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) que oscila entre 66% y 89% para la mayor parte del conjunto de datos, indica un ajuste satisfactorio del modelo, considerando la variabilidad inherente de los datos.

Durante los meses de noviembre y diciembre de 2022, así como en enero, febrero y abril de 2023, se observó que la relación entre la temperatura y el consumo de gas combustible era directamente proporcional, lo que indicaba que el aumento en la temperatura correlacionaba linealmente con el incremento en el consumo de gas. Por el contrario, en los meses de mayo y junio, se registró una relación inversamente proporcional, lo que significa que a medida que aumentaba la temperatura, el consumo de gas natural disminuía. Por tanto, la diferencia en las tendencias observadas entre los meses podría estar relacionada con cambios en la necesidad de calefacción o enfriamiento en respuesta a las variaciones estacionales de temperatura.

En el mes de marzo, se detectó un comportamiento inicialmente directamente proporcional entre la temperatura y el consumo de gas, alcanzando un valor máximo. Posteriormente, la relación se invirtió y se volvió inversamente proporcional, indicando que el consumo de gas disminuyó al aumentar la temperatura.

En el análisis de la relación entre la humedad y el caudal de consumo de gas natural, se utilizó un enfoque similar al aplicado anteriormente. Se encontró que, con excepción de los meses de diciembre y mayo, la humedad y el caudal de gas natural presentaron una relación inversamente proporcional. Esto indica que, en términos generales, al incrementarse la humedad, el consumo de gas combustible tendía a reducirse.

La relación inversamente proporcional observada entre la humedad relativa y el consumo de gas natural puede deberse a una menor demanda de calor en ambientes más húmedos, lo que reduce la cantidad de gas necesario para generar la misma energía térmica. Las excepciones registradas en diciembre y mayo podrían estar vinculadas a factores estacionales o a demandas energéticas específicas que modifican este comportamiento.

De igual manera, en el mes de febrero, se observó un aumento del caudal de gas en función de la humedad relativa, con una relación directamente proporcional hasta alcanzar un valor máximo. A partir de ese punto, la relación se volvió inversamente proporcional, indicando que el consumo de gas disminuyó a medida que la humedad relativa aumentó.

## **5.2 Simulación del Proceso de Combustión en el Horno de Calentamiento de Llama Directa**

### ***5.2.1 Modelo de Cálculo Teórico***

#### **5.2.1.1 Balance de Masa.**

Se realizó un balance de masa asumiendo una combustión completa. Para ello, se consideraron varios factores clave: la información proporcionada por la empresa, la revisión de la literatura existente, y el análisis del porcentaje de monóxido de carbono (CO) medido en partes por millón (PPM). Además, se verificó la presencia de un exceso de aire en el proceso de combustión, el cual corresponde a la cantidad de aire que excede el requisito estequiométrico necesario para asegurar una combustión completa (CleverBrooks, s.f.).

Esta conclusión se fundamenta en la alta concentración de CO<sub>2</sub> y los bajos niveles de CO, lo que sugiere que la generación de monóxido de carbono es mínima en comparación con otros productos de la combustión. Esto indica una oxidación eficiente del combustible y un funcionamiento óptimo del sistema, contribuyendo a la reducción de emisiones contaminantes.

Los datos obtenidos del sistema de análisis de la planta, presentados en la Tabla 1, fueron fundamentales para tomar esta decisión, ya que proporcionan un respaldo cuantitativo que confirma la completitud del proceso.

**Tabla 1.**

*Resultados del Muestreo de Gases*

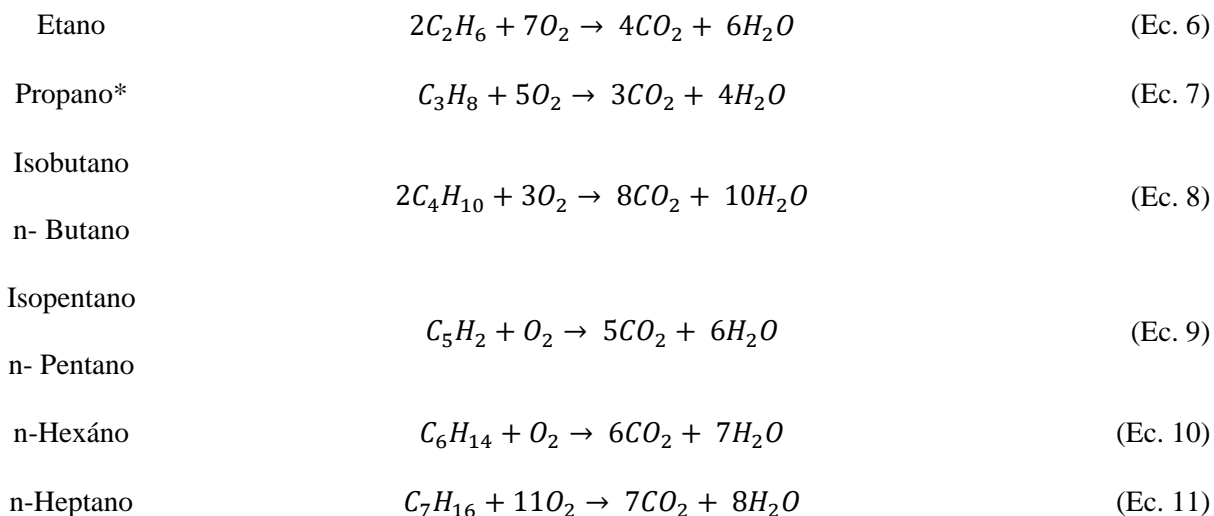
| Carga         | Fecha      | Hora     | O <sub>2</sub> | CO     | CO <sub>2</sub> | Eaire | Temp   |
|---------------|------------|----------|----------------|--------|-----------------|-------|--------|
|               | a-m-d      | (0 a 24) | %              | %      | %               | %     | K      |
| 55% Capacidad | 23/06/2023 | 12:18    | 3,70           | 0,0306 | 11,90           | 21,30 | 632,05 |
| 66% Capacidad | 23/06/2023 | 12:19    | 3,70           | 0,0244 | 11,90           | 21,40 | 647,55 |
| 66% Capacidad | 23/06/2023 | 12:20    | 4,00           | 0,0221 | 11,70           | 23,10 | 662,05 |

*Nota.* La tabla presenta los resultados del monitoreo de gases realizado en el horno de calentamiento de llama directa. Tomado de: (Induanalisis SAS, 2023)

De igual manera, se asumió una conversión completa, considerando que, en un proceso de combustión la conversión completa está asociada con la cantidad de oxígeno en exceso disponible. Mantener el nivel de oxígeno por encima del requerimiento estequiométrico garantiza que todo el combustible pueda reaccionar y oxidarse completamente (s. 8, "Heat Transfer", pp. 1-40). En este caso, el requerimiento estequiométrico de aire se mantiene entre el 21,3% y el 23,1% en exceso para una capacidad de carga del 55 y 66% de carga, asegurando que todo el combustible reaccione adecuadamente.

En este proceso se identificaron los reactivos y productos involucrados en la combustión de cada componente del gas combustible. Se determinó los reactivos limitantes y en exceso a través de la ecuación química, con el fin de analizar la tendencia en la generación de H<sub>2</sub>O y CO<sub>2</sub> en función de la variación de la humedad relativa, como se muestra continuación:





A continuación, se encuentran los datos de la composición reportada para el gas natural, suministrados por la planta de gas PG-PSC.

**Tabla 2.**

*Composición del gas natural*

| Componente         | COMPOSICIÓN | DESVEST  |
|--------------------|-------------|----------|
|                    | cmol/mol    | cmol/mol |
| Nitrógeno          | 1,376       | 0,012    |
| Metano             | 68,728      | 0,038    |
| Dióxido de Carbono | 14,528      | 0,055    |
| Etano              | 6,972       | 0,030    |
| Propano*           | 4,798       | 0,010    |
| Isobutano          | 0,938       | 0,003    |
| n-Butano*          | 1,803       | 0,006    |
| Isopentano*        | 0,432       | 0,002    |
| n-Pentano*         | 0,362       | 0,002    |
| n-Hexano*          | 0,055       | 0,001    |
| n-Heptano          | 0,008       | 0,0005   |

\*La composición reportada para este componente se encuentra fuera del alcance de acreditación.

\*\*Componente por debajo del límite de detección del método (establecido como 0,0005%mol)

*Nota.* La tabla nos proporciona información acerca de la composición de gas natural. Tomada de: Centro de desarrollo tecnológico del gas, Informe de análisis, determinación de la composición de una muestra de gas natural mediante la comparación de las áreas de respuesta de la muestra y las de cuatro materiales de referencia gaseosos, obtenidas a partir de un análisis cromatográfico, Campo Payoa Petrosantander, Sabana de Torres, Santander, 2022.

La Tabla 3, presenta los resultados obtenidos para la determinación del flujo másico total de agua y dióxido de carbono generados durante la combustión de gas natural. Estos resultados corresponden al primer día de noviembre, cuando se registró un caudal de gas de 5365,184 m<sup>3</sup>/d, una humedad relativa correspondiente al 69,00% y una temperatura de 303,05 K.

Estos parámetros constituyen la base sobre la cual se realizarán posteriores ajustes en la temperatura del aire, la humedad relativa y el consumo de gas combustible para el análisis del proceso.

**Tabla 3.**

*Flujos másicos totales de H<sub>2</sub>O y CO<sub>2</sub> generados en la combustión de gas natural*

| Componente         | Flujo Másico | H <sub>2</sub> O Producida | CO <sub>2</sub> Producido |
|--------------------|--------------|----------------------------|---------------------------|
|                    | kg/d         | kg/d                       | kg/d                      |
| Nitrógeno          | 92,325       | -                          | -                         |
| Metano             | 2422,611     | 5,443                      | 6,647                     |
| Dióxido de Carbono | 1535,524     | -                          | -                         |
| Etano              | 479,546      | 1,724                      | 2,807                     |
| Propano*           | 471,081      | 0,770                      | 1,410                     |
| Isobutano          | 126,921      | 0,394                      | 0,769                     |
| n-Butano*          | 243,964      | 0,756                      | 1,478                     |
| Isopentano*        | 14601,885    | 21,882                     | 44,534                    |
| n-Pentano*         | 12235,839    | 18,336                     | 37,318                    |

| Componente | Flujo Másico              | H <sub>2</sub> O Producida | CO <sub>2</sub> Producido |
|------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------|
|            | kg/d                      | kg/d                       | kg/d                      |
| n-Hexano*  | 1932,217                  | 2,828                      | 5,921                     |
| n-Heptano  | 293,497                   | 0,422                      | 0,902                     |
|            | <b>Flujo másico Total</b> | 52,556                     | 101,787                   |

*Nota.* La tabla presenta los flujos másicos generados durante una combustión completa, obteniendo como resultado un flujo másico total de H<sub>2</sub>O producido de 52,556 kg/d. El cálculo detallado del balance másico se encuentra en el Apéndice C.

Los valores bajos de H<sub>2</sub>O y CO<sub>2</sub> indican que, aunque la combustión fue completa, la cantidad limitada de gas combustible redujo la generación de productos. Esto se debe a que, en combustión completa, la producción de H<sub>2</sub>O y CO<sub>2</sub> es directamente proporcional al volumen de combustible disponible. Por tanto, la menor cantidad de gas consumido explica la baja formación de estos productos.

### 5.2.1.2 Balance de Calor.

Para realizar el balance de calor, se calculó el calor liberado aplicando la primera ley de la termodinámica, que establece la conservación de la energía en sistemas cerrados. Este enfoque, basado en el concepto de entalpía como función de estado, permite calcular el calor liberado sin recurrir a la Ley de Hess, realizando un balance directo entre las entalpías de los reactivos y productos. Esto garantiza un análisis energético preciso del proceso de combustión, ya que se considera la conservación de la energía interna del sistema y el calor intercambiado durante la reacción (Moran, 2010).

El cálculo se llevó a cabo siguiendo la ecuación general del balance de calor, que se presenta a continuación:

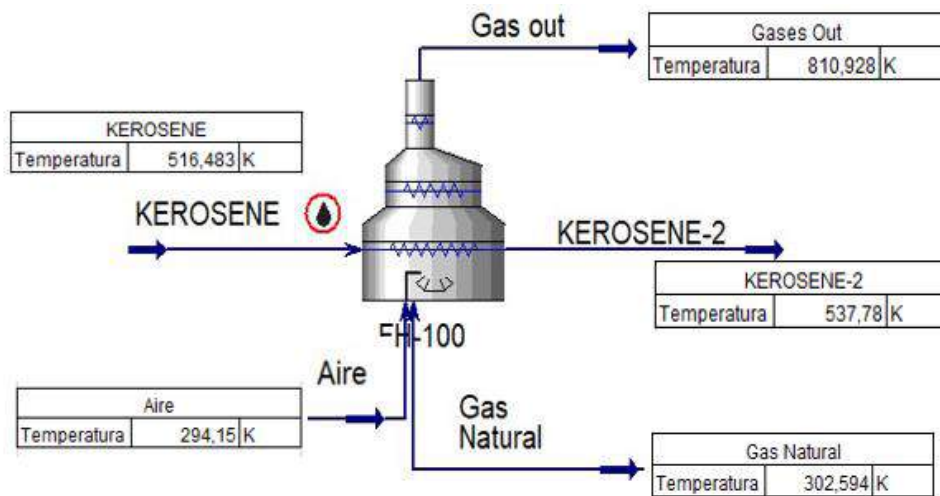
$$\sum H_R + (-\Delta H_{298}^\circ) + q = \sum H_p \quad (\text{Ec. 12})$$

Donde  $\sum H_R$  representa la sumatoria de las entalpías de los reactivos presentes en la reacción,  $(-\Delta H_{298}^\circ)$  indica la entalpía de formación de los compuestos involucrados,  $q$  es el calor generado o liberado por el sistema y  $\sum H_p$  corresponde a la sumatoria de las entalpías de los productos presentes en la reacción.

La Figura 7, ilustra las variables de entrada y salida, proporcionando una visión detallada del funcionamiento y las interacciones dentro del sistema.

**Figura 7.**

*Diagrama de entrada y salida para el proceso de combustión completa*



A continuación, se presentan los cálculos realizados para determinar el flujo de calor liberado, utilizando un caudal de gas combustible de 5365,184 m<sup>3</sup>/d, una temperatura de entrada de 303,05 K y una temperatura de salida de 537,78 K como base de cálculo.

**Tabla 4.**

*Flujo de calor liberado*

| Componente | Cp        | Cp      | m        | H <sub>R</sub> , H <sub>P</sub> | H <sub>f</sub> | q                      |
|------------|-----------|---------|----------|---------------------------------|----------------|------------------------|
|            | kJ/kmol K | kJ/kg K | kg/d     | kJ/d                            | kJ/kmol        | kJ/d                   |
| Nitrógeno  | 29,086    | 1,038   | 92,325   | 1,364*10 <sup>6</sup>           | 0,000          | -9,876*10 <sup>8</sup> |
| Metano     | 35,974    | 2,243   | 2422,611 | 4,426*10 <sup>7</sup>           | -74,850        |                        |

| Componente         | Cp        | Cp      | m         | H <sub>R</sub> , H <sub>P</sub> | H <sub>f</sub> | q    |
|--------------------|-----------|---------|-----------|---------------------------------|----------------|------|
|                    | kJ/kmol K | kJ/kg K | kg/d      | kJ/d                            | kJ/kmol        | kJ/d |
| Dióxido de Carbono | 37,378    | 0,849   | 1535,524  | 2,915*10 <sup>7</sup>           | -393,520       |      |
| Etano              | 53,556    | 1,781   | 479,546   | 1,304*10 <sup>7</sup>           | -84,680        |      |
| Propano*           | 74,776    | 1,693   | 471,081   | 1,789*10 <sup>7</sup>           | -103,850       |      |
| Isobutano          | 98,413    | 1,693   | 126,921   | 6,344*10 <sup>6</sup>           | -134,200       |      |
| n-Butano*          | 100,674   | 1,732   | 243,964   | 1,247*10 <sup>7</sup>           | -126,150       |      |
| Isopentano*        | 0,000032  | 2,300   | 14601,885 | 2,364*10 <sup>2</sup>           | -153,700       |      |
| n-Pentano*         | 125,000   | 1,732   | 12235,839 | 7,768*10 <sup>8</sup>           | -146,800       |      |
| n-Hexano*          | 149,576   | 1,736   | 1932,217  | 1,468*10 <sup>8</sup>           | -167,200       |      |
| n-Heptano          | 0,243     | 0,002   | 293,497   | 3,622*10 <sup>4</sup>           | -187,800       |      |
| H <sub>2</sub> O   | 33,692    | 1,870   | 52,556    | 8,993*10 <sup>5</sup>           | 226,730        |      |

*Nota.* La tabla presenta la cantidad de energía liberada en el proceso de combustión, el cual se fue de  $-9,876 \cdot 10^8$  kJ/d. El cálculo detallado del balance energético se encuentra en el Apéndice D.

### 5.2.2 Selección del Software de Simulación

Para la selección del software de simulación se identificaron artículos en la literatura que analizan los programas de simulación DWSIM, COCO, Aspen HYSYS y ProMax en relación con el proceso de gas combustible. Estos artículos, se encuentran detallados el Apéndice E.

Posteriormente, se realizó un análisis comparativo de los modelos de proceso para seleccionar el software de simulación más adecuado. Este análisis incluyó la evaluación de aspectos clave como la accesibilidad del programa (licencias y costos), la revisión bibliográfica, y la facilidad de uso (interfaz y curva de aprendizaje). Tras considerar estos factores, se determinó que el programa que mejor cumplía con los requisitos fue Aspen HYSYS. Los detalles de esta evaluación se presentan a continuación.

**Tabla 5.**

*Análisis comparativo entre los softwares de simulación comúnmente utilizados.*

| Modelo de Proceso                         | Software de Simulación |             |         |                |
|---|------------------------|-------------|---------|----------------|
|   | DWSIM                  | Aspen HYSYS | ProMax® | COCO Simulator |
| Accesibilidad                             | Alta                   | Baja        | Media   | Alta           |
| Complejidad                               | Media                  | Media       | Alta    | Baja           |
| Facilidad de uso                          | Baja                   | Alta        | Baja    | Media          |
| Pertinencia en los procesos de combustión | Alta                   | Alta        | Alta    | Media          |
| Costo y licenciamiento                    | Bajo                   | Alto        | Alto    | Bajo           |
| Información técnica disponible            | Alta                   | Alta        | Media   | Baja           |
| Integración con IA                        | Baja                   | Alta        | Alta    | Baja           |

*Nota.* La tabla proporciona un resumen de la evaluación general de diversos softwares de simulación.

Se ha determinado que el software de simulación Aspen HYSYS se ajusta de manera óptima a las condiciones evaluadas, por lo que ha sido seleccionado para llevar a cabo la simulación.

### **5.2.3 Modelo de Simulación**

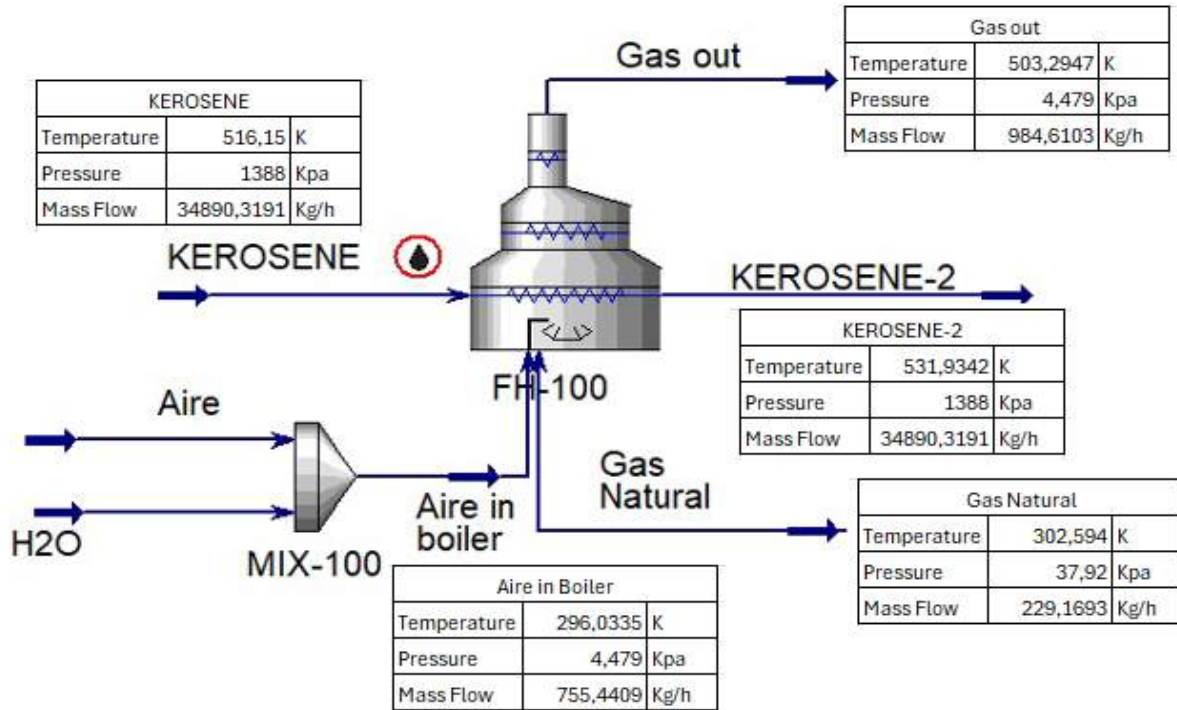
Para el desarrollo del modelo de simulación del proceso de combustión del gas natural, se utilizó el software Aspen HYSYS. Este software facilitó la implementación y análisis detallado del proceso, ajustándose a las condiciones y parámetros establecidos. El procedimiento completo para la simulación del proceso está descrito en el Apéndice F.

La Figura 8, presenta el diagrama final de la simulación del proceso, proporcionando una proyección precisa que permite evaluar el impacto de la temperatura, la humedad relativa y el

consumo de gas combustible en la cantidad total de calor liberado durante el periodo de tiempo especificado en el caso de estudio.

**Figura 8.**

*Diagrama de simulación del proceso de combustión*



*Nota.* La ilustración muestra el diagrama del proceso de combustión completa. Tomado de la herramienta Aspen HYSYS.

**5.3 Análisis de Resultados**

**5.3.1 Definición Datos de Entrada**

Se definieron los datos base que funcionarán como entrada tanto en el software de simulación como en la hoja de cálculo, con el objetivo de iniciar la generación de cambios y facilitar la visualización de las variaciones en las variables del caso de estudio, como se muestra a continuación:

**Figura 9.***Condiciones de entrada y salida del proceso*

| Worksheet   | Name                        | KEROSENE    | Aire in boiler | Gas Natural | KEROSENE-2  | Gas out     |
|-------------|-----------------------------|-------------|----------------|-------------|-------------|-------------|
| Conditions  | Vapour                      | 0.0000      | 1.0000         | 1.0000      | 0.0515      | 1.0000      |
| Properties  | Temperature [C]             | 243.3333    | 22.8835        | 29.4444     | 258.7842    | 230.1447    |
| Composition | Pressure [kPa]              | 1388        | 4.479          | 37.92       | 1388        | 4.479       |
| PF Specs    | Molar Flow [kgmole/h]       | 174.5355    | 26.2305        | 9.4546      | 174.5355    | 39.2962     |
|             | Mass Flow [kg/h]            | 34890.3191  | 755.4409       | 229.1693    | 34890.3191  | 984.6103    |
|             | LiqVol Flow [m3/h]          | 39.6550     | 0.8730         | 0.5568      | 39.6550     | 1.3974      |
|             | Molar Enthalpy [kJ/kgmole]  | -3.370e+005 | -1182          | -1.242e+005 | -3.277e+005 | -7.172e+004 |
|             | Molar Entropy [kJ/kgmole-C] | 433.8       | 177.8          | 197.5       | 451.4       | 213.6       |
|             | Heat Flow [kJ/h]            | -5.8815e+07 | -3.1015e+04    | -1.1747e+06 | -5.7202e+07 | -2.8181e+06 |

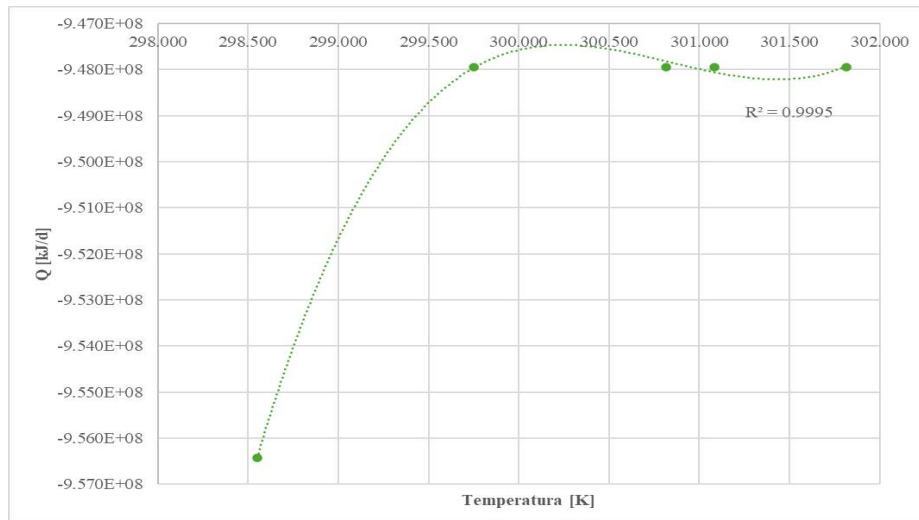
*Nota:* La ilustración muestra los parámetros de entrada y salida del proceso para un horno de calentamiento de llama directa. Tomado de la herramienta Aspen HYSYS.

### 5.3.2 Análisis Gráfico

Para el análisis gráfico, se generaron tres representaciones que ilustran el comportamiento del caudal de gas, la temperatura del aire y la humedad relativa en función del calor liberado durante el proceso de combustión. Además, se efectuó un ajuste de los datos mediante la identificación de valores atípicos, determinando los límites máximos y mínimos, y excluyendo los puntos que se encontraban fuera de este rango debido a la alta variabilidad observada en los datos. Estas representaciones se fundamentan en los resultados obtenidos del balance de masa y energía durante el intervalo temporal establecido, tal como se detalla a continuación:

**Figura 10.**

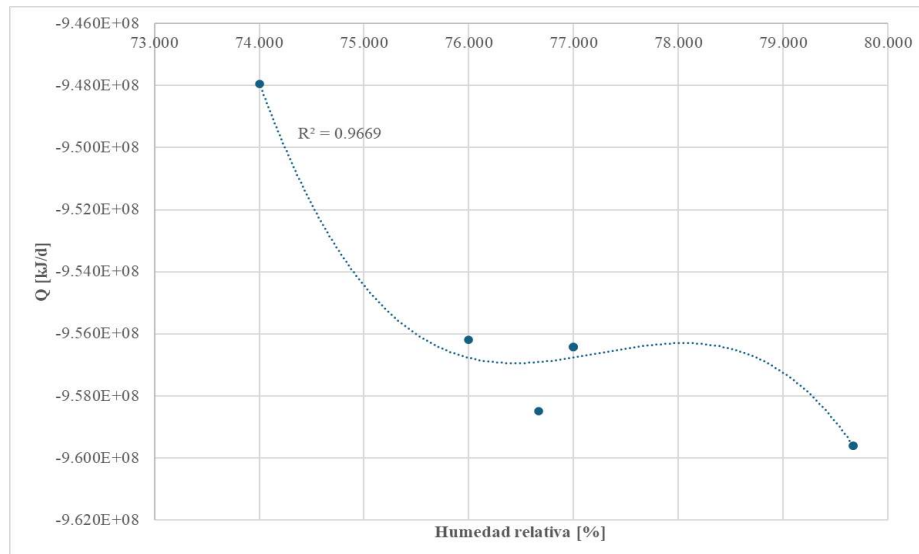
*Temperatura vs Calor liberado, mes de diciembre 2022*



*Nota.* La ilustración muestra la relación entre la temperatura del aire y el calor liberado por la reacción para el mes de diciembre 2022.

**Figura 11.**

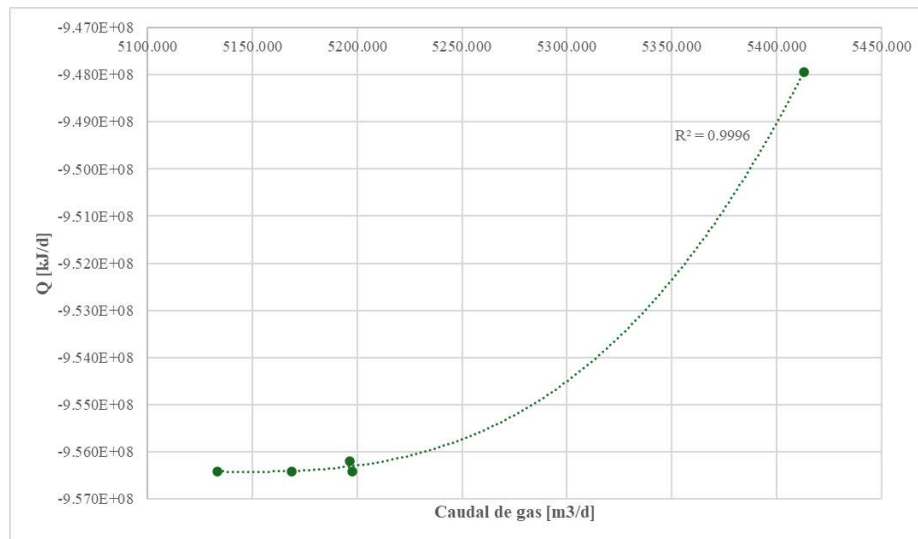
*Humedad relativa vs Calor liberado, mes de diciembre 2022*



*Nota.* La ilustración muestra la relación entre la humedad relativa y el calor liberado por la reacción para el mes de diciembre 2022.

**Figura 12.**

*Caudal de gas vs Calor liberado, mes de diciembre 2022*



*Nota:* La ilustración muestra la relación entre la humedad relativa y el calor liberado por la reacción para el mes de diciembre.

El aumento en la temperatura del aire debería generar un mayor calor liberado, dado que aporta más energía al proceso de combustión. En la gráfica 10 se observa una correlación positiva entre ambas variables. A medida que la temperatura del aire aumenta, el calor liberado también lo hace, lo que concuerda con el comportamiento esperado según los principios termodinámicos.

Asimismo, el incremento en la humedad del aire introduce una carga térmica adicional al proceso de combustión, ya que parte del calor generado se destina a calentar y evaporar el agua presente en el aire. Este comportamiento es coherente con los datos obtenidos en la gráfica 11, donde se observa que, a mayor humedad, el calor liberado disminuye.

Por último, el consumo de gas está directamente relacionado con el calor liberado, conforme a la ley de conservación de la energía. Un mayor flujo de combustible resulta en una mayor liberación de calor durante la combustión. La gráfica 12 presenta una correlación positiva evidente entre estas dos variables, demostrando que el incremento en el caudal de gas produce un

aumento proporcional en el calor liberado, en concordancia con los principios termodinámicos del proceso.

La Tabla 6, presenta una comparación entre los datos generados por la simulación y los valores correspondientes del balance de energía teórico, facilitando el análisis de la correlación entre ambos conjuntos de datos.

**Tabla 6.**

*Comparativo entre resultados del software de simulación y el balance teórico*

| Mes       | Año  | Temperatura<br>[K] | Caudal Gas<br>[m <sup>3</sup> /d] | Humedad Relativa<br>[%] | Software de             | Balance teórico         |
|-----------|------|--------------------|-----------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
|           |      |                    |                                   |                         | simulación              | Q Horno                 |
|           |      |                    |                                   |                         | Q Horno                 | Q Horno                 |
|           |      |                    |                                   |                         | [kJ/d]                  | [kJ/d]                  |
| Noviembre | 2022 | 300,417            | 5365,184                          | 80,333                  | -6,2170*10 <sup>7</sup> | -9,8727*10 <sup>8</sup> |
| Diciembre | 2022 | 298,550            | 5197,520                          | 77,000                  | -6,2786*10 <sup>7</sup> | -9,5642*10 <sup>8</sup> |
| Enero     | 2023 | 300,950            | 5127,465                          | 80,667                  | -6,0790*10 <sup>7</sup> | -9,4353*10 <sup>8</sup> |
| Febrero   | 2023 | 302,883            | 5001,002                          | 69,333                  | -6,5570*10 <sup>7</sup> | -9,2025*10 <sup>8</sup> |
| Marzo     | 2023 | 301,083            | 5161,813                          | 77,333                  | -6,2407*10 <sup>7</sup> | -9,4985*10 <sup>8</sup> |
| Abril     | 2023 | 303,083            | 5478,565                          | 78,000                  | -6,4925*10 <sup>7</sup> | -1,0081*10 <sup>9</sup> |
| Mayo      | 2023 | 303,883            | 5293,344                          | 78,667                  | -6,2448*10 <sup>7</sup> | -9,7405*10 <sup>8</sup> |
| Junio     | 2023 | 304,217            | 5157,452                          | 78,667                  | -6,1740*10 <sup>7</sup> | -9,4904*10 <sup>8</sup> |

*Nota:* La tabla muestra la comparación de resultados con respecto al flujo de calor liberado por la reacción entre el software de simulación y el balance teórico elaborado.

La discrepancia entre los valores de calor liberado en el balance teórico y la simulación sugiere que el modelo de simulación, como Aspen HYSYS, incorpora factores adicionales o utiliza bases de datos distintos a los utilizados en los cálculos teóricos. Dado que los cálculos teóricos no se basaron en una referencia específica como la que proporciona Aspen HYSYS, esta diferencia podría ser atribuida a las variaciones en los datos y parámetros de entrada. Esto sugiere la

necesidad de revisar y ajustar los parámetros del modelo para mejorar la alineación de los resultados.

Posteriormente, se realizó una variación en la temperatura del aire y del gas natural, asumiendo que ambas son iguales, y se evaluó el comportamiento del flujo de calor liberado. Los resultados de esta evaluación se presentan a continuación:

**Tabla 7.**

*Variación temperatura del aire y gas natural*

| Mes       | Año  | Temperatura<br>[K] | Caudal Gas<br>(m <sup>3</sup> /d) | Humedad Relativa<br>[%] | Taire ≠ Tgas             | Taire = Tgas            |
|-----------|------|--------------------|-----------------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|
|           |      |                    |                                   |                         | Q Horno<br>[kJ/d]        | Q Horno<br>[kJ/d]       |
| Noviembre | 2022 | 300,417            | 5365,184                          | 80,333                  | -6,2170*10 <sup>7</sup>  | -6,2191*10 <sup>7</sup> |
| Diciembre | 2022 | 298,550            | 5197,520                          | 77,000                  | -6,2786*10 <sup>7</sup>  | -6,2825*10 <sup>7</sup> |
| Enero     | 2023 | 300,950            | 5127,465                          | 80,667                  | -6,0790*10 <sup>7</sup>  | -6,0804*10 <sup>7</sup> |
| Febrero   | 2023 | 302,883            | 5001,002                          | 69,333                  | -6,5570*10 <sup>7</sup>  | -6,5568*10 <sup>7</sup> |
| Marzo     | 2023 | 301,083            | 5161,813                          | 77,333                  | -6,2407E*10 <sup>7</sup> | -6,2422*10 <sup>7</sup> |
| Abril     | 2023 | 303,083            | 5478,565                          | 78,000                  | -6,4925*10 <sup>7</sup>  | -6,4918*10 <sup>7</sup> |
| Mayo      | 2023 | 303,883            | 5293,344                          | 78,667                  | -6,2448*10 <sup>7</sup>  | -6,2436*10 <sup>7</sup> |
| Junio     | 2023 | 304,217            | 5157,452                          | 78,667                  | -6,1740*10 <sup>7</sup>  | -6,1726*10 <sup>7</sup> |

*Nota:* La tabla muestra la comparación de resultados, igualando la temperatura de aire y la temperatura del gas natural con respecto al flujo de calor liberado.

Se puede observar que la variación entre los dos flujos de calor es relativamente baja, dado que las diferencias de temperatura entre ellos no son significativas y no presentan una variación considerable. Esto sugiere que el comportamiento del flujo de calor se mantiene consistente a pesar de los cambios en la temperatura, indicando una estabilidad en el sistema.

## 6. Conclusiones

Debido a la alta variabilidad presente en los datos recopilados, se realizaron ajustes estadísticos para reducir la dispersión y mejorar la precisión de los resultados. Sin embargo, no se pudo establecer una relación clara entre la temperatura del aire, la humedad relativa, el caudal de gas y el calor liberado. Esta falta de correlación directa se debe en parte a la incertidumbre generada por el control semiautomático del proceso, en el que el operador ajusta manualmente el caudal de gas según la demanda operativa. Este factor introduce variabilidad adicional que dificulta la identificación de una relación precisa entre las variables y el comportamiento térmico del sistema.

Según la teoría, la temperatura del aire y la humedad relativa tienen una relación directa e inversa con el caudal de gas, respectivamente. Un aumento en la temperatura del aire mejora la eficiencia de la combustión, lo que podría reducir el caudal de gas necesario para mantener la misma cantidad de calor liberado. Por otro lado, un incremento en la humedad relativa aumenta la carga térmica del proceso, ya que el vapor de agua en el aire debe ser evaporado, lo que eleva el consumo de gas. Sin embargo, esta relación no se cumple de manera consistente para todos los meses analizados, debido a la variación estacional presente, que genera fluctuaciones en las condiciones operativas y atmosféricas.

El uso del modelo de simulación, junto con la aplicación de métodos para la mejora de datos, facilitó una mejor comprensión de la relación entre la humedad relativa, la temperatura del aire y el consumo de gas combustible. Sin embargo, debido a la alta variabilidad en los datos, no fue posible predecir de manera consistente el comportamiento del sistema bajo las condiciones estudiadas. En consecuencia, se resalta la importancia de considerar las variaciones de temperatura y humedad en el control del consumo de gas en el proceso de combustión de hornos de llama

directa, lo cual podría contribuir a mejorar la eficiencia energética y reducir los costos operativos en la industria.

## **7. Recomendaciones**

### **7.1 Análisis de Eficiencia del Horno y Calidad del Aire**

Se recomienda realizar un análisis detallado de la relación entre la eficiencia del horno y los parámetros de calidad del aire. Este estudio permitirá determinar el comportamiento operativo del horno e identificar posibles factores que afectan su desempeño.

### **7.2 Registro de Temperaturas**

Es fundamental mantener registros detallados de las temperaturas de entrada y salida del horno. Estos datos permitirán identificar patrones y correlaciones que pueden ser utilizados para ajustar y mejorar la operación del horno, logrando una mayor eficiencia y reducción en el consumo de combustible.

### **7.3 Consideración de Software Alternativo**

Se sugiere utilizar un software especializado en equipos de transferencia de calor, como el horno en este caso, en lugar del programa Aspen HYSYS, que presenta ciertas limitaciones para este tipo de equipos. La elección de un programa más adecuado mejorará la precisión y efectividad del análisis realizado.

### Referencias Bibliográficas

- Engineers. (2019). *Effect of Combustion Air Preheat on a Fired Heater*. Elsevier Inc.
- Amell, A., Gil, E., & Maya, R. D. (1998). *Herramientas para el uso eficiente del gas: diagramas de eficiencia térmica, Medellín, Antioquia*. Obtenido de Revista Facultad de Ingeniería: <https://revistas.udea.edu.co/index.php/ingenieria/article/view/325761>
- Cala, O. M., Meriño, L., Kafarov, V., & Saavedra, J. (19 de Noviembre de 2013). *Evaluación de modelos de combustión para la determinación de la eficiencia en hornos de refinería*. Bucaramanga, Colombia.
- Carranza-Sánchez, Yamid Alberto, Romero-Piedrahita, Carlos Alberto, Flórez-Serrano Elkin Gregorio. (2014). *Influencia del aire húmedo en la combustión del metano*. Obtenido en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84933912002>
- Chaudhari, R., & Tailor, H. (2022). *Oxy fuel combustion replacing N2 with CO2 for enhancing thermal efficiency of ceramic industries furnace*.
- CleaverBrooks. (s.f.). "The impact of excess air on efficiency".
- García San José, R. (2001). *Combustión y combustibles*.
- Induanalisis SAS. (2023). *Monitoreo de emisiones de gases de combustión en el horno de calentamiento de varsol marca exotherm del campo Payoa*.
- III. QUÍMICA DE LA COMBUSTIÓN. (s.f.). Recuperado 20 de mayo de 2024, de <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/4324/Capitulo3.pdf>
- Kozlov, A. Chudnovsky, Y. Khinkisl, M. Yuan, H., & Zak, M. (2014). *Advanced green petroleum coke calcination in an electrothermal fluidized bed reactor*. TMS (The Minerals, Metals & Materials Society).
- Marquez, M. (1989). *Combustión y quemadores*. Barcelona.

- Moliner, C., Marchelli, F., Bosio, B., & Arato, E. (2018). *Simulation of the gasification of agricultural residues using COCO Simulator*. Genova, Italia.
- Moran, M. J., & Shapiro, H. N. (2010). *Principles of Engineering Thermodynamics* (7th ed.). John Wiley & Sons.
- Normas ASTM. (2002). *ASTM D86, Método de ensayo estándar para destilación de productos de petróleo a presión atmosférica*.
- OM Cala, L. (2013). *Efecto de la composición del gas de refinería sobre las características del proceso de combustión*. Medellín, Antioquia.
- Ondarse Álvarez, Dianelys (2024). *Combustion*. Enciclopedia Concepto. Recuperado el 25 de septiembre de 2024. Obtenido de: <https://concepto.de/combustion/>
- Peña Murillo, S., & López Diaz, G. (2020). *Comparación de los costos de producción y grado de contaminación por emisiones en el sector industrial del ecuador usando como combustible gas natural mediante la simulación de procesos*. Guayaquil - Ecuador: Universidad de Guayaquil, Facultad de Ingeniería Química.
- Pikoñ, K. (2003). *Environmental impact of combustion*. Applied Energy, vol. 75, pp. 213-220.
- Rocha Lizarazo, C. (2021). *Estudio conceptual a los hornos de llama directa instalados en una planta de gas ubicada en sabana de torres*. Bucaramanga, Santander.
- s. 8, "Heat transfer", pp. 1-40. (s.f.).
- Serrano, J. C. (2005). *Análisis teórico de la combustión en quemadores de gas natural*. Pamplona, Norte de Santander.
- Tianci, L., Congning, Y., Puttipong, T., Teerawat, S., & Paitoon, T. (2022). *Studies on advanced configurations of post-combustion CO2 capture process applied to cement plant flue gases*.

Canada: Department of Chemical Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand.

Tianci, L., Congning, Y., Puttipong, T., Teerawat, S., Zhiwu, L., Paitoon, T., & Helei, L. (2022).

*Comparative desorption energy consumption of post-combustion CO<sub>2</sub> capture integrated with mechanical vapor recompression technology.* Obtenido de [https://scholar.google.ca/citations?view\\_op=view\\_citation&hl=en&user=BPzKBHIAAAAJ&citation\\_for\\_view=BPzKBHIAAAAJ:2osOgNQ5qMEC](https://scholar.google.ca/citations?view_op=view_citation&hl=en&user=BPzKBHIAAAAJ&citation_for_view=BPzKBHIAAAAJ:2osOgNQ5qMEC)

Twana N., H., & Saif T., M. (2023). *Simulating Combined Cycle and Gas Turbine Power Plant*

*under Design Condition using Open-Source Software DWSIM: A Comparative Study.* Iraq: Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Koya University, Koya KOY45.

Villaflor, G., Morales, G., & Velasco, J. (2008). *Variables Significativas del Proceso de*

*Combustión del Gas Natural.* Salta-Argentina: Universidad Nacional de Salta, Facultad de Ingeniería, CIUNSa, (INIQUI).

Zhiwu, H. L., Teerawat, S., Paitoon, T., Don, G., & Raphael. (2011). *Part 1: Design, modeling*

*and simulation of post-combustion CO<sub>2</sub> capture systems using reactive solvents, Carbon Management.* Obtenido de 10.4155/cmt.11.19

## Apéndices

### Apéndice A. Recopilación de datos históricos de humedad relativa y temperatura ambiente

A continuación, se presentan la recopilación de datos históricos de humedad relativa y temperatura ambiente para el periodo comprendido entre noviembre del 2022 y junio 2023 de la base de datos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Asimismo, se presenta el registro diario del caudal de gas consumido por el horno de calentamiento de llama directa, proporcionado por la planta de tratamiento de gas natural PG-PSC.

**Tabla A1.**

*Datos históricos humedad relativa y temperatura ambiente*

| <b>Día</b> | <b>Mes</b> | <b>Año</b> | <b>Temperatura Media [K]</b> | <b>Humedad Relativa [%]</b> |
|------------|------------|------------|------------------------------|-----------------------------|
| 1          | Noviembre  | 2022       | 301,550                      | 77,667                      |
| 2          | Noviembre  | 2022       | 301,483                      | 83,667                      |
| 3          | Noviembre  | 2022       | 300,883                      | 85,000                      |
| 4          | Noviembre  | 2022       | 301,417                      | 81,000                      |
| 5          | Noviembre  | 2022       | 300,550                      | 76,000                      |
| 6          | Noviembre  | 2022       | 300,950                      | 82,000                      |
| 7          | Noviembre  | 2022       | 302,050                      | 78,000                      |
| 8          | Noviembre  | 2022       | 301,883                      | 81,333                      |
| 9          | Noviembre  | 2022       | 300,483                      | 83,500                      |
| 10         | Noviembre  | 2022       | 300,550                      | 79,333                      |
| 11         | Noviembre  | 2022       | 299,817                      | 82,667                      |
| 12         | Noviembre  | 2022       | 299,550                      | 85,000                      |
| 13         | Noviembre  | 2022       | 299,950                      | 79,333                      |
| 14         | Noviembre  | 2022       | 301,150                      | 76,667                      |
| 15         | Noviembre  | 2022       | 301,017                      | 82,667                      |
| 16         | Noviembre  | 2022       | 302,850                      | 74,500                      |

| <b>Día</b> | <b>Mes</b> | <b>Año</b> | <b>Temperatura Media [K]</b> | <b>Humedad Relativa [%]</b> |
|------------|------------|------------|------------------------------|-----------------------------|
| 17         | Noviembre  | 2022       | 300,617                      | 85,000                      |
| 18         | Noviembre  | 2022       | 299,217                      | 85,667                      |
| 19         | Noviembre  | 2022       | 300,817                      | 78,333                      |
| 20         | Noviembre  | 2022       | 302,217                      | 79,667                      |
| 21         | Noviembre  | 2022       | 300,150                      | 88,000                      |
| 22         | Noviembre  | 2022       | 301,817                      | 77,333                      |
| 23         | Noviembre  | 2022       | 301,150                      | 79,667                      |
| 24         | Noviembre  | 2022       | 301,150                      | 80,000                      |
| 25         | Noviembre  | 2022       | 303,050                      | 69,000                      |
| 26         | Noviembre  | 2022       | 299,550                      | 88,000                      |
| 27         | Noviembre  | 2022       | 300,883                      | 79,333                      |
| 28         | Noviembre  | 2022       | 300,417                      | 80,333                      |
| 29         | Noviembre  | 2022       | 299,817                      | 82,000                      |
| 30         | Noviembre  | 2022       | 299,650                      | 83,500                      |
| 1          | Diciembre  | 2022       | 300,083                      | 82,667                      |
| 2          | Diciembre  | 2022       | 300,950                      | 78,667                      |
| 3          | Diciembre  | 2022       | 300,217                      | 79,667                      |
| 4          | Diciembre  | 2022       | 300,483                      | 79,667                      |
| 5          | Diciembre  | 2022       | 301,017                      | 77,000                      |
| 6          | Diciembre  | 2022       | 301,417                      | 72,333                      |
| 7          | Diciembre  | 2022       | 301,817                      | 72,667                      |
| 8          | Diciembre  | 2022       | 298,150                      | 82,500                      |
| 9          | Diciembre  | 2022       | 301,083                      | 74,000                      |
| 10         | Diciembre  | 2022       | 300,817                      | 77,333                      |
| 11         | Diciembre  | 2022       | 299,750                      | 85,500                      |
| 12         | Diciembre  | 2022       | 301,283                      | 76,000                      |
| 13         | Diciembre  | 2022       | 302,283                      | 73,333                      |

| <b>Día</b> | <b>Mes</b> | <b>Año</b> | <b>Temperatura Media [K]</b> | <b>Humedad Relativa [%]</b> |
|------------|------------|------------|------------------------------|-----------------------------|
| 14         | Diciembre  | 2022       | 301,683                      | 78,667                      |
| 15         | Diciembre  | 2022       | 302,617                      | 72,667                      |
| 16         | Diciembre  | 2022       | 302,550                      | 75,000                      |
| 17         | Diciembre  | 2022       | 299,950                      | 86,000                      |
| 18         | Diciembre  | 2022       | 297,450                      | 94,000                      |
| 19         | Diciembre  | 2022       | 300,950                      | 76,333                      |
| 20         | Diciembre  | 2022       | 301,817                      | 75,000                      |
| 21         | Diciembre  | 2022       | 302,083                      | 78,667                      |
| 22         | Diciembre  | 2022       | 302,283                      | 75,667                      |
| 23         | Diciembre  | 2022       | 302,150                      | 78,667                      |
| 24         | Diciembre  | 2022       | 296,750                      | 97,000                      |
| 25         | Diciembre  | 2022       | 300,894                      | 78,944                      |
| 26         | Diciembre  | 2022       | 300,817                      | 73,000                      |
| 27         | Diciembre  | 2022       | 301,683                      | 75,333                      |
| 28         | Diciembre  | 2022       | 301,683                      | 74,000                      |
| 29         | Diciembre  | 2022       | 300,417                      | 77,000                      |
| 30         | Diciembre  | 2022       | 301,350                      | 76,667                      |
| 31         | Diciembre  | 2022       | 298,550                      | 77,000                      |
| 1          | Enero      | 2023       | 303,050                      | 71,500                      |
| 2          | Enero      | 2023       | 300,750                      | 79,000                      |
| 3          | Enero      | 2023       | 300,350                      | 80,333                      |
| 4          | Enero      | 2023       | 301,050                      | 75,500                      |
| 5          | Enero      | 2023       | 301,017                      | 73,667                      |
| 6          | Enero      | 2023       | 301,283                      | 74,333                      |
| 7          | Enero      | 2023       | 299,450                      | 86,500                      |
| 8          | Enero      | 2023       | 300,950                      | 80,667                      |
| 9          | Enero      | 2023       | 301,083                      | 80,000                      |

| <b>Día</b> | <b>Mes</b> | <b>Año</b> | <b>Temperatura Media [K]</b> | <b>Humedad Relativa [%]</b> |
|------------|------------|------------|------------------------------|-----------------------------|
| 10         | Enero      | 2023       | 299,250                      | 84,000                      |
| 11         | Enero      | 2023       | 300,750                      | 80,000                      |
| 12         | Enero      | 2023       | 300,917                      | 79,333                      |
| 13         | Enero      | 2023       | 300,250                      | 81,500                      |
| 14         | Enero      | 2023       | 300,483                      | 82,333                      |
| 15         | Enero      | 2023       | 300,617                      | 88,333                      |
| 16         | Enero      | 2023       | 300,883                      | 79,333                      |
| 17         | Enero      | 2023       | 301,417                      | 77,333                      |
| 18         | Enero      | 2023       | 301,817                      | 76,333                      |
| 19         | Enero      | 2023       | 300,817                      | 77,000                      |
| 20         | Enero      | 2023       | 300,950                      | 77,000                      |
| 21         | Enero      | 2023       | 301,350                      | 78,000                      |
| 22         | Enero      | 2023       | 298,950                      | 87,000                      |
| 23         | Enero      | 2023       | 302,383                      | 75,667                      |
| 24         | Enero      | 2023       | 301,417                      | 80,000                      |
| 25         | Enero      | 2023       | 301,483                      | 75,667                      |
| 26         | Enero      | 2023       | 301,683                      | 72,000                      |
| 27         | Enero      | 2023       | 301,217                      | 70,333                      |
| 28         | Enero      | 2023       | 294,550                      | 93,000                      |
| 29         | Enero      | 2023       | 301,350                      | 68,667                      |
| 30         | Enero      | 2023       | 300,617                      | 72,000                      |
| 31         | Enero      | 2023       | 301,150                      | 72,333                      |
| 1          | Febrero    | 2023       | 301,483                      | 67,667                      |
| 2          | Febrero    | 2023       | 300,817                      | 69,333                      |
| 3          | Febrero    | 2023       | 299,083                      | 68,000                      |
| 4          | Febrero    | 2023       | 301,750                      | 69,000                      |
| 5          | Febrero    | 2023       | 302,017                      | 69,667                      |

| <b>Día</b> | <b>Mes</b> | <b>Año</b> | <b>Temperatura Media [K]</b> | <b>Humedad Relativa [%]</b> |
|------------|------------|------------|------------------------------|-----------------------------|
| 6          | Febrero    | 2023       | 301,883                      | 75,333                      |
| 7          | Febrero    | 2023       | 302,817                      | 71,333                      |
| 8          | Febrero    | 2023       | 303,017                      | 70,500                      |
| 9          | Febrero    | 2023       | 301,350                      | 76,000                      |
| 10         | Febrero    | 2023       | 303,083                      | 72,000                      |
| 11         | Febrero    | 2023       | 303,083                      | 68,333                      |
| 12         | Febrero    | 2023       | 302,017                      | 72,667                      |
| 13         | Febrero    | 2023       | 301,683                      | 78,667                      |
| 14         | Febrero    | 2023       | 302,883                      | 69,333                      |
| 15         | Febrero    | 2023       | 301,483                      | 78,000                      |
| 16         | Febrero    | 2023       | 301,017                      | 75,000                      |
| 17         | Febrero    | 2023       | 302,217                      | 73,667                      |
| 18         | Febrero    | 2023       | 301,450                      | 63,500                      |
| 19         | Febrero    | 2023       | 302,550                      | 61,667                      |
| 20         | Febrero    | 2023       | 302,617                      | 58,333                      |
| 21         | Febrero    | 2023       | 302,750                      | 63,333                      |
| 22         | Febrero    | 2023       | 298,817                      | 84,667                      |
| 23         | Febrero    | 2023       | 301,750                      | 67,000                      |
| 24         | Febrero    | 2023       | 302,817                      | 69,333                      |
| 25         | Febrero    | 2023       | 299,650                      | 75,000                      |
| 26         | Febrero    | 2023       | 302,750                      | 62,333                      |
| 27         | Febrero    | 2023       | 296,950                      | 64,667                      |
| 28         | Febrero    | 2023       | 307,250                      | 67,333                      |
| 1          | Marzo      | 2023       | 304,550                      | 62,000                      |
| 2          | Marzo      | 2023       | 304,283                      | 65,333                      |
| 3          | Marzo      | 2023       | 304,883                      | 65,333                      |
| 4          | Marzo      | 2023       | 300,050                      | 81,000                      |

| <b>Día</b> | <b>Mes</b> | <b>Año</b> | <b>Temperatura Media [K]</b> | <b>Humedad Relativa [%]</b> |
|------------|------------|------------|------------------------------|-----------------------------|
| 5          | Marzo      | 2023       | 302,450                      | 73,500                      |
| 6          | Marzo      | 2023       | 302,750                      | 73,667                      |
| 7          | Marzo      | 2023       | 299,883                      | 88,333                      |
| 8          | Marzo      | 2023       | 299,617                      | 84,000                      |
| 9          | Marzo      | 2023       | 298,950                      | 82,667                      |
| 10         | Marzo      | 2023       | 297,550                      | 90,000                      |
| 11         | Marzo      | 2023       | 301,083                      | 71,000                      |
| 12         | Marzo      | 2023       | 299,417                      | 83,333                      |
| 13         | Marzo      | 2023       | 300,083                      | 81,667                      |
| 14         | Marzo      | 2023       | 301,083                      | 77,333                      |
| 15         | Marzo      | 2023       | 301,017                      | 79,000                      |
| 16         | Marzo      | 2023       | 299,150                      | 87,333                      |
| 17         | Marzo      | 2023       | 300,883                      | 79,000                      |
| 18         | Marzo      | 2023       | 298,350                      | 93,000                      |
| 19         | Marzo      | 2023       | 302,950                      | 73,333                      |
| 20         | Marzo      | 2023       | 302,750                      | 72,000                      |
| 21         | Marzo      | 2023       | 302,750                      | 72,000                      |
| 22         | Marzo      | 2023       | 302,217                      | 71,000                      |
| 23         | Marzo      | 2023       | 302,617                      | 68,333                      |
| 24         | Marzo      | 2023       | 302,350                      | 70,000                      |
| 25         | Marzo      | 2023       | 300,550                      | 80,500                      |
| 26         | Marzo      | 2023       | 299,750                      | 78,000                      |
| 27         | Marzo      | 2023       | 301,417                      | 78,333                      |
| 28         | Marzo      | 2023       | 301,417                      | 78,333                      |
| 29         | Marzo      | 2023       | 301,150                      | 80,667                      |
| 30         | Marzo      | 2023       | 301,750                      | 77,667                      |
| 31         | Marzo      | 2023       | 303,350                      | 74,000                      |

| <b>Día</b> | <b>Mes</b> | <b>Año</b> | <b>Temperatura Media [K]</b> | <b>Humedad Relativa [%]</b> |
|------------|------------|------------|------------------------------|-----------------------------|
| 1          | Abril      | 2023       | 298,950                      | 73,667                      |
| 2          | Abril      | 2023       | 304,250                      | 68,000                      |
| 3          | Abril      | 2023       | 302,683                      | 75,333                      |
| 4          | Abril      | 2023       | 303,817                      | 71,333                      |
| 5          | Abril      | 2023       | 302,150                      | 74,333                      |
| 6          | Abril      | 2023       | 302,217                      | 78,333                      |
| 7          | Abril      | 2023       | 300,817                      | 80,667                      |
| 8          | Abril      | 2023       | 301,283                      | 75,667                      |
| 9          | Abril      | 2023       | 300,939                      | 79,222                      |
| 10         | Abril      | 2023       | 296,750                      | 80,000                      |
| 11         | Abril      | 2023       | 302,550                      | 78,000                      |
| 12         | Abril      | 2023       | 302,017                      | 82,667                      |
| 13         | Abril      | 2023       | 301,950                      | 83,000                      |
| 14         | Abril      | 2023       | 303,017                      | 78,333                      |
| 15         | Abril      | 2023       | 303,617                      | 72,000                      |
| 16         | Abril      | 2023       | 300,283                      | 86,000                      |
| 17         | Abril      | 2023       | 299,750                      | 85,000                      |
| 18         | Abril      | 2023       | 301,583                      | 78,000                      |
| 19         | Abril      | 2023       | 303,083                      | 78,000                      |
| 20         | Abril      | 2023       | 302,617                      | 79,333                      |
| 21         | Abril      | 2023       | 299,950                      | 84,667                      |
| 22         | Abril      | 2023       | 301,250                      | 79,000                      |
| 23         | Abril      | 2023       | 301,817                      | 74,333                      |
| 24         | Abril      | 2023       | 301,483                      | 78,000                      |
| 25         | Abril      | 2023       | 302,683                      | 78,000                      |
| 26         | Abril      | 2023       | 302,617                      | 72,000                      |
| 27         | Abril      | 2023       | 301,083                      | 81,000                      |

| <b>Día</b> | <b>Mes</b> | <b>Año</b> | <b>Temperatura Media [K]</b> | <b>Humedad Relativa [%]</b> |
|------------|------------|------------|------------------------------|-----------------------------|
| 28         | Abril      | 2023       | 302,083                      | 79,667                      |
| 29         | Abril      | 2023       | 303,350                      | 76,000                      |
| 30         | Abril      | 2023       | 300,050                      | 86,500                      |
| 1          | Mayo       | 2023       | 303,350                      | 71,000                      |
| 2          | Mayo       | 2023       | 303,283                      | 74,333                      |
| 3          | Mayo       | 2023       | 303,883                      | 69,667                      |
| 4          | Mayo       | 2023       | 304,817                      | 72,333                      |
| 5          | Mayo       | 2023       | 304,817                      | 72,333                      |
| 6          | Mayo       | 2023       | 304,483                      | 68,333                      |
| 7          | Mayo       | 2023       | 299,150                      | 75,500                      |
| 8          | Mayo       | 2023       | 303,350                      | 80,333                      |
| 9          | Mayo       | 2023       | 304,017                      | 78,667                      |
| 10         | Mayo       | 2023       | 302,017                      | 81,000                      |
| 11         | Mayo       | 2023       | 302,950                      | 80,000                      |
| 12         | Mayo       | 2023       | 297,550                      | 92,000                      |
| 13         | Mayo       | 2023       | 299,950                      | 77,000                      |
| 14         | Mayo       | 2023       | 305,350                      | 71,500                      |
| 15         | Mayo       | 2023       | 301,683                      | 83,333                      |
| 16         | Mayo       | 2023       | 301,750                      | 80,333                      |
| 17         | Mayo       | 2023       | 300,883                      | 78,333                      |
| 18         | Mayo       | 2023       | 304,150                      | 73,333                      |
| 19         | Mayo       | 2023       | 303,883                      | 78,667                      |
| 20         | Mayo       | 2023       | 301,283                      | 84,333                      |
| 21         | Mayo       | 2023       | 300,550                      | 87,667                      |
| 22         | Mayo       | 2023       | 299,950                      | 90,500                      |
| 23         | Mayo       | 2023       | 301,350                      | 85,333                      |
| 24         | Mayo       | 2023       | 299,150                      | 97,000                      |

| <b>Día</b> | <b>Mes</b> | <b>Año</b> | <b>Temperatura Media [K]</b> | <b>Humedad Relativa [%]</b> |
|------------|------------|------------|------------------------------|-----------------------------|
| 25         | Mayo       | 2023       | 300,617                      | 80,333                      |
| 26         | Mayo       | 2023       | 302,150                      | 81,000                      |
| 27         | Mayo       | 2023       | 302,550                      | 77,333                      |
| 28         | Mayo       | 2023       | 298,750                      | 82,000                      |
| 29         | Mayo       | 2023       | 301,617                      | 75,667                      |
| 30         | Mayo       | 2023       | 301,217                      | 79,000                      |
| 31         | Mayo       | 2023       | 303,683                      | 74,667                      |
| 1          | Junio      | 2023       | 298,483                      | 90,000                      |
| 2          | Junio      | 2023       | 301,950                      | 77,000                      |
| 3          | Junio      | 2023       | 304,150                      | 74,000                      |
| 4          | Junio      | 2023       | 299,750                      | 83,000                      |
| 5          | Junio      | 2023       | 302,217                      | 77,667                      |
| 6          | Junio      | 2023       | 303,350                      | 73,333                      |
| 7          | Junio      | 2023       | 300,617                      | 79,500                      |
| 8          | Junio      | 2023       | 300,217                      | 82,000                      |
| 9          | Junio      | 2023       | 302,283                      | 79,667                      |
| 10         | Junio      | 2023       | 301,417                      | 88,000                      |
| 11         | Junio      | 2023       | 302,883                      | 78,333                      |
| 12         | Junio      | 2023       | 303,350                      | 78,000                      |
| 13         | Junio      | 2023       | 299,350                      | 69,000                      |
| 14         | Junio      | 2023       | 306,250                      | 79,000                      |
| 15         | Junio      | 2023       | 302,883                      | 76,333                      |
| 16         | Junio      | 2023       | 303,283                      | 81,000                      |
| 17         | Junio      | 2023       | 302,083                      | 88,000                      |
| 18         | Junio      | 2023       | 300,150                      | 92,000                      |
| 19         | Junio      | 2023       | 303,150                      | 71,667                      |
| 20         | Junio      | 2023       | 301,750                      | 81,000                      |

| <b>Día</b> | <b>Mes</b> | <b>Año</b> | <b>Temperatura Media [K]</b> | <b>Humedad Relativa [%]</b> |
|------------|------------|------------|------------------------------|-----------------------------|
| 21         | Junio      | 2023       | 304,483                      | 70,333                      |
| 22         | Junio      | 2023       | 302,850                      | 83,000                      |
| 23         | Junio      | 2023       | 302,417                      | 77,333                      |
| 24         | Junio      | 2023       | 297,950                      | 92,000                      |
| 25         | Junio      | 2023       | 301,483                      | 84,000                      |
| 26         | Junio      | 2023       | 299,750                      | 79,333                      |
| 27         | Junio      | 2023       | 302,283                      | 78,667                      |
| 28         | Junio      | 2023       | 302,217                      | 74,333                      |
| 29         | Junio      | 2023       | 303,883                      | 74,667                      |
| 30         | Junio      | 2023       | 304,217                      | 72,000                      |

*Nota.* Los resultados presentados corresponden a la base de datos de temperatura y humedad relativa proporcionados por el IDEAM.

### **Tabla A2.**

#### *Consumo de gas combustible diario*

| <b>Día</b> | <b>Mes</b> | <b>Año</b> | <b>Caudal Gas (m<sup>3</sup>/d)</b> |
|------------|------------|------------|-------------------------------------|
| 1          | Noviembre  | 2022       | 5254,654                            |
| 2          | Noviembre  | 2022       | 5231,557                            |
| 3          | Noviembre  | 2022       | 5168,609                            |
| 4          | Noviembre  | 2022       | 5363,797                            |
| 5          | Noviembre  | 2022       | 5435,212                            |
| 6          | Noviembre  | 2022       | 5276,779                            |
| 7          | Noviembre  | 2022       | 5284,113                            |
| 8          | Noviembre  | 2022       | 5256,901                            |
| 9          | Noviembre  | 2022       | 5272,598                            |
| 10         | Noviembre  | 2022       | 5193,584                            |
| 11         | Noviembre  | 2022       | 5241,028                            |

| <b>Día</b> | <b>Mes</b> | <b>Año</b> | <b>Caudal Gas (m<sup>3</sup>/d)</b> |
|------------|------------|------------|-------------------------------------|
| 12         | Noviembre  | 2022       | 5235,736                            |
| 13         | Noviembre  | 2022       | 5223,449                            |
| 14         | Noviembre  | 2022       | 5233,404                            |
| 15         | Noviembre  | 2022       | 5230,863                            |
| 16         | Noviembre  | 2022       | 5229,239                            |
| 17         | Noviembre  | 2022       | 5231,169                            |
| 18         | Noviembre  | 2022       | 5160,680                            |
| 19         | Noviembre  | 2022       | 5186,250                            |
| 20         | Noviembre  | 2022       | 5079,949                            |
| 21         | Noviembre  | 2022       | 5164,050                            |
| 22         | Noviembre  | 2022       | 5033,000                            |
| 23         | Noviembre  | 2022       | 5365,184                            |
| 24         | Noviembre  | 2022       | 5365,184                            |
| 25         | Noviembre  | 2022       | 5365,184                            |
| 26         | Noviembre  | 2022       | 5365,184                            |
| 27         | Noviembre  | 2022       | 5365,184                            |
| 28         | Noviembre  | 2022       | 5365,184                            |
| 29         | Noviembre  | 2022       | 5365,184                            |
| 30         | Noviembre  | 2022       | 4934,967                            |
| 1          | Diciembre  | 2022       | 4977,895                            |
| 2          | Diciembre  | 2022       | 5128,172                            |
| 3          | Diciembre  | 2022       | 5214,822                            |
| 4          | Diciembre  | 2022       | 5156,574                            |
| 5          | Diciembre  | 2022       | 5133,468                            |
| 6          | Diciembre  | 2022       | 5168,288                            |
| 7          | Diciembre  | 2022       | 5151,449                            |
| 8          | Diciembre  | 2022       | 5151,449                            |

| <b>Día</b> | <b>Mes</b> | <b>Año</b> | <b>Caudal Gas (m<sup>3</sup>/d)</b> |
|------------|------------|------------|-------------------------------------|
| 9          | Diciembre  | 2022       | 5151,449                            |
| 10         | Diciembre  | 2022       | 5151,449                            |
| 11         | Diciembre  | 2022       | 5151,449                            |
| 12         | Diciembre  | 2022       | 5196,331                            |
| 13         | Diciembre  | 2022       | 5151,449                            |
| 14         | Diciembre  | 2022       | 5366,798                            |
| 15         | Diciembre  | 2022       | 5229,405                            |
| 16         | Diciembre  | 2022       | 5425,216                            |
| 17         | Diciembre  | 2022       | 5402,902                            |
| 18         | Diciembre  | 2022       | 5442,602                            |
| 19         | Diciembre  | 2022       | 5682,927                            |
| 20         | Diciembre  | 2022       | 5509,477                            |
| 21         | Diciembre  | 2022       | 5545,002                            |
| 22         | Diciembre  | 2022       | 5579,135                            |
| 23         | Diciembre  | 2022       | 5544,538                            |
| 24         | Diciembre  | 2022       | 5556,225                            |
| 25         | Diciembre  | 2022       | 5559,966                            |
| 26         | Diciembre  | 2022       | 5553,577                            |
| 27         | Diciembre  | 2022       | 5624,311                            |
| 28         | Diciembre  | 2022       | 5412,955                            |
| 29         | Diciembre  | 2022       | 5168,920                            |
| 30         | Diciembre  | 2022       | 5208,790                            |
| 31         | Diciembre  | 2022       | 5197,520                            |
| 1          | Enero      | 2023       | 5255,230                            |
| 2          | Enero      | 2023       | 5190,130                            |
| 3          | Enero      | 2023       | 5143,039                            |
| 4          | Enero      | 2023       | 5127,465                            |

| <b>Día</b> | <b>Mes</b> | <b>Año</b> | <b>Caudal Gas (m<sup>3</sup>/d)</b> |
|------------|------------|------------|-------------------------------------|
| 5          | Enero      | 2023       | 5127,465                            |
| 6          | Enero      | 2023       | 5127,465                            |
| 7          | Enero      | 2023       | 5127,465                            |
| 8          | Enero      | 2023       | 5127,465                            |
| 9          | Enero      | 2023       | 5127,465                            |
| 10         | Enero      | 2023       | 4988,259                            |
| 11         | Enero      | 2023       | 5089,605                            |
| 12         | Enero      | 2023       | 5271,059                            |
| 13         | Enero      | 2023       | 5116,308                            |
| 14         | Enero      | 2023       | 5158,991                            |
| 15         | Enero      | 2023       | 5182,119                            |
| 16         | Enero      | 2023       | 5152,472                            |
| 17         | Enero      | 2023       | 5164,527                            |
| 18         | Enero      | 2023       | 5166,373                            |
| 19         | Enero      | 2023       | 5161,124                            |
| 20         | Enero      | 2023       | 5164,008                            |
| 21         | Enero      | 2023       | 5163,835                            |
| 22         | Enero      | 2023       | 5162,989                            |
| 23         | Enero      | 2023       | 5486,182                            |
| 24         | Enero      | 2023       | 5271,002                            |
| 25         | Enero      | 2023       | 5270,833                            |
| 26         | Enero      | 2023       | 5342,672                            |
| 27         | Enero      | 2023       | 5294,836                            |
| 28         | Enero      | 2023       | 5664,889                            |
| 29         | Enero      | 2023       | 5699,832                            |
| 30         | Enero      | 2023       | 5553,186                            |
| 31         | Enero      | 2023       | 5639,302                            |

| <b>Día</b> | <b>Mes</b> | <b>Año</b> | <b>Caudal Gas (m<sup>3</sup>/d)</b> |
|------------|------------|------------|-------------------------------------|
| 1          | Febrero    | 2023       | 5244,585                            |
| 2          | Febrero    | 2023       | 5246,869                            |
| 3          | Febrero    | 2023       | 5246,517                            |
| 4          | Febrero    | 2023       | 5240,370                            |
| 5          | Febrero    | 2023       | 5253,720                            |
| 6          | Febrero    | 2023       | 5245,461                            |
| 7          | Febrero    | 2023       | 5221,929                            |
| 8          | Febrero    | 2023       | 5293,769                            |
| 9          | Febrero    | 2023       | 5092,097                            |
| 10         | Febrero    | 2023       | 5152,440                            |
| 11         | Febrero    | 2023       | 5098,950                            |
| 12         | Febrero    | 2023       | 5064,771                            |
| 13         | Febrero    | 2023       | 4952,693                            |
| 14         | Febrero    | 2023       | 5001,002                            |
| 15         | Febrero    | 2023       | 5026,289                            |
| 16         | Febrero    | 2023       | 4945,444                            |
| 17         | Febrero    | 2023       | 5001,002                            |
| 18         | Febrero    | 2023       | 5001,002                            |
| 19         | Febrero    | 2023       | 5001,002                            |
| 20         | Febrero    | 2023       | 5210,942                            |
| 21         | Febrero    | 2023       | 5041,127                            |
| 22         | Febrero    | 2023       | 4760,989                            |
| 23         | Febrero    | 2023       | 4692,349                            |
| 24         | Febrero    | 2023       | 4956,516                            |
| 25         | Febrero    | 2023       | 4929,530                            |
| 26         | Febrero    | 2023       | 4887,819                            |
| 27         | Febrero    | 2023       | 4951,306                            |

| <b>Día</b> | <b>Mes</b> | <b>Año</b> | <b>Caudal Gas (m<sup>3</sup>/d)</b> |
|------------|------------|------------|-------------------------------------|
| 28         | Febrero    | 2023       | 5071,624                            |
| 1          | Marzo      | 2023       | 5169,119                            |
| 2          | Marzo      | 2023       | 5176,339                            |
| 3          | Marzo      | 2023       | 5120,300                            |
| 4          | Marzo      | 2023       | 5059,986                            |
| 5          | Marzo      | 2023       | 5135,903                            |
| 6          | Marzo      | 2023       | 5412,388                            |
| 7          | Marzo      | 2023       | 5361,729                            |
| 8          | Marzo      | 2023       | 5136,554                            |
| 9          | Marzo      | 2023       | 5432,606                            |
| 10         | Marzo      | 2023       | 5099,997                            |
| 11         | Marzo      | 2023       | 5090,879                            |
| 12         | Marzo      | 2023       | 5145,163                            |
| 13         | Marzo      | 2023       | 5158,302                            |
| 14         | Marzo      | 2023       | 5161,813                            |
| 15         | Marzo      | 2023       | 5219,607                            |
| 16         | Marzo      | 2023       | 5104,018                            |
| 17         | Marzo      | 2023       | 5288,049                            |
| 18         | Marzo      | 2023       | 5104,868                            |
| 19         | Marzo      | 2023       | 5368,667                            |
| 20         | Marzo      | 2023       | 5366,288                            |
| 21         | Marzo      | 2023       | 5702,692                            |
| 22         | Marzo      | 2023       | 5479,216                            |
| 23         | Marzo      | 2023       | 5516,065                            |
| 24         | Marzo      | 2023       | 5542,674                            |
| 25         | Marzo      | 2023       | 5454,807                            |
| 26         | Marzo      | 2023       | 5412,785                            |

| <b>Día</b> | <b>Mes</b> | <b>Año</b> | <b>Caudal Gas (m<sup>3</sup>/d)</b> |
|------------|------------|------------|-------------------------------------|
| 27         | Marzo      | 2023       | 5413,124                            |
| 28         | Marzo      | 2023       | 5562,949                            |
| 29         | Marzo      | 2023       | 5363,428                            |
| 30         | Marzo      | 2023       | 5342,927                            |
| 31         | Marzo      | 2023       | 5369,488                            |
| 1          | Abril      | 2023       | 5432,465                            |
| 2          | Abril      | 2023       | 5318,688                            |
| 3          | Abril      | 2023       | 5684,484                            |
| 4          | Abril      | 2023       | 5718,578                            |
| 5          | Abril      | 2023       | 5478,565                            |
| 6          | Abril      | 2023       | 5458,714                            |
| 7          | Abril      | 2023       | 5604,461                            |
| 8          | Abril      | 2023       | 5676,980                            |
| 9          | Abril      | 2023       | 5700,682                            |
| 10         | Abril      | 2023       | 5660,708                            |
| 11         | Abril      | 2023       | 5679,457                            |
| 12         | Abril      | 2023       | 5680,282                            |
| 13         | Abril      | 2023       | 5709,658                            |
| 14         | Abril      | 2023       | 5689,799                            |
| 15         | Abril      | 2023       | 5693,246                            |
| 16         | Abril      | 2023       | 5613,239                            |
| 17         | Abril      | 2023       | 5769,576                            |
| 18         | Abril      | 2023       | 5742,987                            |
| 19         | Abril      | 2023       | 5476,922                            |
| 20         | Abril      | 2023       | 5749,924                            |
| 21         | Abril      | 2023       | 5722,004                            |
| 22         | Abril      | 2023       | 5649,617                            |

| <b>Día</b> | <b>Mes</b> | <b>Año</b> | <b>Caudal Gas (m<sup>3</sup>/d)</b> |
|------------|------------|------------|-------------------------------------|
| 23         | Abril      | 2023       | 5707,182                            |
| 24         | Abril      | 2023       | 5692,934                            |
| 25         | Abril      | 2023       | 5711,215                            |
| 26         | Abril      | 2023       | 5753,492                            |
| 27         | Abril      | 2023       | 5719,214                            |
| 28         | Abril      | 2023       | 5727,974                            |
| 29         | Abril      | 2023       | 5733,560                            |
| 30         | Abril      | 2023       | 5701,333                            |
| 1          | Mayo       | 2023       | 5304,998                            |
| 2          | Mayo       | 2023       | 5349,650                            |
| 3          | Mayo       | 2023       | 5313,182                            |
| 4          | Mayo       | 2023       | 5252,162                            |
| 5          | Mayo       | 2023       | 5483,605                            |
| 6          | Mayo       | 2023       | 5203,778                            |
| 7          | Mayo       | 2023       | 5069,104                            |
| 8          | Mayo       | 2023       | 5123,613                            |
| 9          | Mayo       | 2023       | 5131,061                            |
| 10         | Mayo       | 2023       | 5188,034                            |
| 11         | Mayo       | 2023       | 5147,569                            |
| 12         | Mayo       | 2023       | 5115,741                            |
| 13         | Mayo       | 2023       | 5038,153                            |
| 14         | Mayo       | 2023       | 5281,338                            |
| 15         | Mayo       | 2023       | 5350,346                            |
| 16         | Mayo       | 2023       | 5293,344                            |
| 17         | Mayo       | 2023       | 4922,932                            |
| 18         | Mayo       | 2023       | 4781,716                            |
| 19         | Mayo       | 2023       | 4724,856                            |

| <b>Día</b> | <b>Mes</b> | <b>Año</b> | <b>Caudal Gas (m<sup>3</sup>/d)</b> |
|------------|------------|------------|-------------------------------------|
| 20         | Mayo       | 2023       | 4870,405                            |
| 21         | Mayo       | 2023       | 4805,163                            |
| 22         | Mayo       | 2023       | 4856,643                            |
| 23         | Mayo       | 2023       | 4776,676                            |
| 24         | Mayo       | 2023       | 4842,739                            |
| 25         | Mayo       | 2023       | 4831,865                            |
| 26         | Mayo       | 2023       | 4490,478                            |
| 27         | Mayo       | 2023       | 4676,038                            |
| 28         | Mayo       | 2023       | 4795,847                            |
| 29         | Mayo       | 2023       | 4813,176                            |
| 30         | Mayo       | 2023       | 4761,687                            |
| 31         | Mayo       | 2023       | 5054,011                            |
| 1          | Junio      | 2023       | 5204,175                            |
| 2          | Junio      | 2023       | 4752,012                            |
| 3          | Junio      | 2023       | 4763,197                            |
| 4          | Junio      | 2023       | 4709,084                            |
| 5          | Junio      | 2023       | 4865,562                            |
| 6          | Junio      | 2023       | 4867,601                            |
| 7          | Junio      | 2023       | 5636,516                            |
| 8          | Junio      | 2023       | 4518,172                            |
| 9          | Junio      | 2023       | 5008,676                            |
| 10         | Junio      | 2023       | 5464,123                            |
| 11         | Junio      | 2023       | 4847,751                            |
| 12         | Junio      | 2023       | 5019,493                            |
| 13         | Junio      | 2023       | 5414,427                            |
| 14         | Junio      | 2023       | 5571,840                            |
| 15         | Junio      | 2023       | 4845,939                            |

| <b>Día</b> | <b>Mes</b> | <b>Año</b> | <b>Caudal Gas (m<sup>3</sup>/d)</b> |
|------------|------------|------------|-------------------------------------|
| 16         | Junio      | 2023       | 4277,423                            |
| 17         | Junio      | 2023       | 4234,154                            |
| 18         | Junio      | 2023       | 4406,944                            |
| 19         | Junio      | 2023       | 4367,612                            |
| 20         | Junio      | 2023       | 4330,941                            |
| 21         | Junio      | 2023       | 4444,831                            |
| 22         | Junio      | 2023       | 4327,458                            |
| 23         | Junio      | 2023       | 4512,056                            |
| 24         | Junio      | 2023       | 4857,549                            |
| 25         | Junio      | 2023       | 5079,807                            |
| 26         | Junio      | 2023       | 5084,650                            |
| 27         | Junio      | 2023       | 5157,452                            |
| 28         | Junio      | 2023       | 5053,246                            |
| 29         | Junio      | 2023       | 5651,184                            |
| 30         | Junio      | 2023       | 4887,055                            |

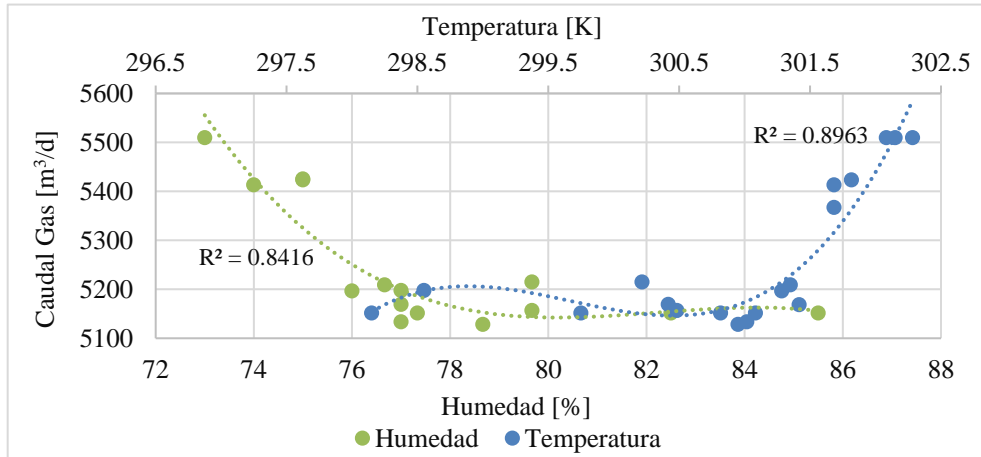
*Nota.* Los resultados presentados corresponden a la base de datos de caudal de gas combustible, información proporcionada por la empresa PG-PSC.

**Apéndice B. Relación entre la temperatura, la humedad y el consumo de gas natural**

A continuación, se muestran las gráficas la relación entre la temperatura, la humedad y el consumo de gas natural, obtenidas para los restantes seis meses estudiados.

**Figura B1.**

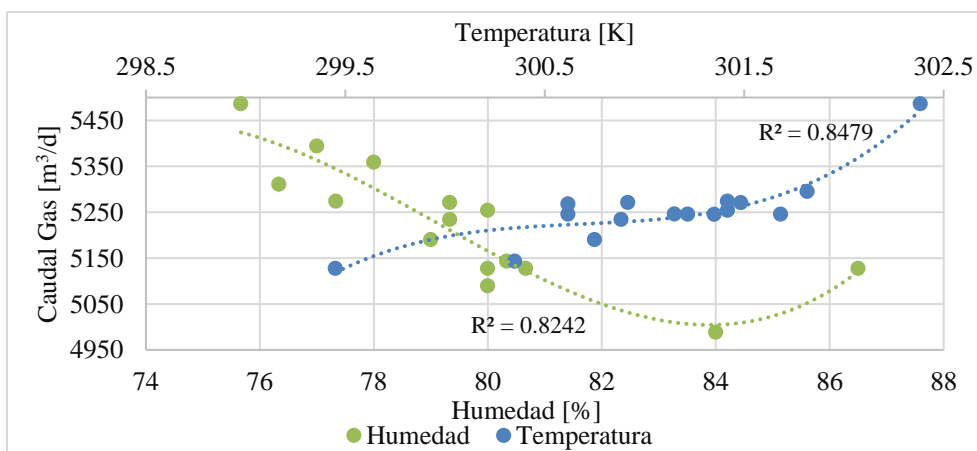
Humedad relativa y temperatura del aire vs caudal de gas diciembre 2022



*Nota.* La ilustración muestra la relación entre la temperatura, la humedad relativa y el consumo de gas combustible para el mes de diciembre.

**Figura B2.**

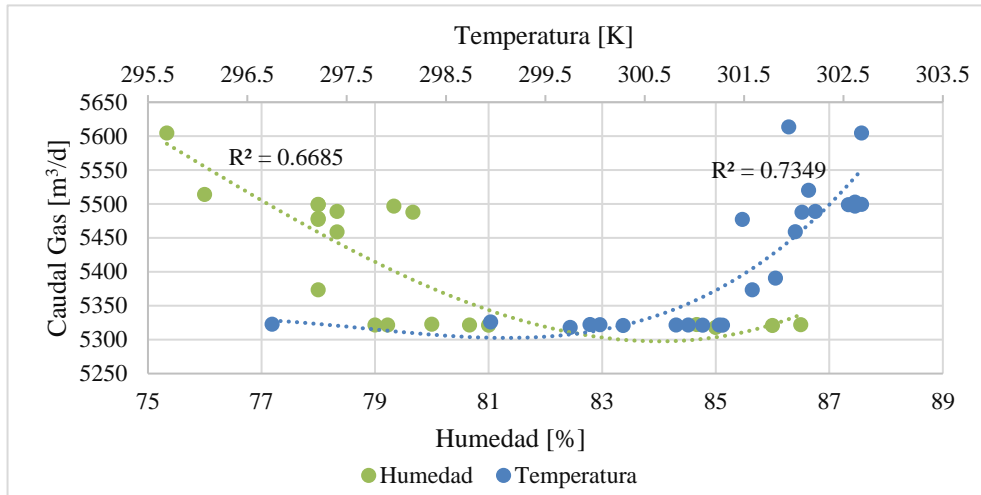
Humedad relativa y temperatura del aire vs caudal de gas enero 2023



*Nota.* La ilustración muestra la relación entre la temperatura, la humedad relativa y el consumo de gas combustible para el mes de enero.

**Figura B3.**

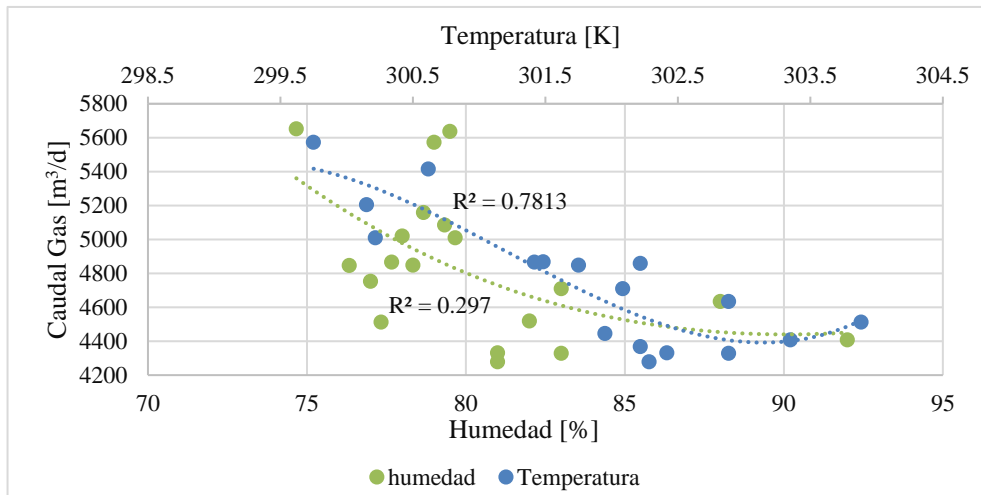
*Humedad relativa y temperatura del aire vs caudal de gas abril 2023*



*Nota.* La ilustración muestra la relación entre la temperatura, la humedad relativa y el consumo de gas combustible para el mes de abril.

**Figura B4.**

*Humedad relativa y temperatura del aire vs caudal de gas junio 2023*



*Nota.* La ilustración muestra la relación entre la temperatura, la humedad relativa y el consumo de gas combustible para el mes de junio.

**Apéndice C. Datos de composición correspondiente al gas combustible**

A continuación, se muestra los datos correspondientes al balance de masa realizado.

**Tabla C1.**

*Datos balance de masa*

| Componente            | Composición       | Caudal  | Flujo producido   |        |          |        |                  |                  |                 |                 |
|-----------------------|-------------------|---------|-------------------|--------|----------|--------|------------------|------------------|-----------------|-----------------|
|                       |                   |         | Peso              | $\rho$ | Flujo    | Flujo  | H <sub>2</sub> O | H <sub>2</sub> O | CO <sub>2</sub> | CO <sub>2</sub> |
|                       |                   |         | Molecular         |        | másico   | molar  |                  |                  |                 |                 |
| mol/mol               | m <sup>3</sup> /d | kg/kmol | kg/m <sup>3</sup> | kg/d   | kmol/d   | kmol/d | kg/d             | kmol/d           | kg/d            |                 |
| <b>Nitrógeno</b>      | 0,01              | 73,82   | 28,01             | 1,25   | 92,33    | 3,30   | -                | -                | -               |                 |
| <b>Metano</b>         | 0,69              | 3687,38 | 16,04             | 0,66   | 2422,61  | 151,04 | 302,07           | 5,44             | 151,04          | 6,65            |
| <b>CO<sub>2</sub></b> | 0,15              | 779,45  | 44,01             | 1,97   | 1535,52  | 34,89  | -                |                  | -               |                 |
| <b>Etano</b>          | 0,07              | 374,06  | 30,07             | 1,28   | 479,55   | 15,95  | 95,69            | 1,72             | 63,79           | 2,81            |
| <b>Propano*</b>       | 0,05              | 257,42  | 44,10             | 1,83   | 471,08   | 10,68  | 42,73            | 0,77             | 32,05           | 1,41            |
| <b>Isobutano</b>      | 0,01              | 50,33   | 58,12             | 2,52   | 126,92   | 2,18   | 21,84            | 0,39             | 17,47           | 0,77            |
| <b>n-Butano*</b>      | 0,02              | 96,73   | 58,12             | 2,52   | 243,96   | 4,20   | 41,98            | 0,76             | 33,58           | 1,48            |
| <b>Isopentano*</b>    | 0,00              | 23,18   | 72,15             | 630,00 | 14601,89 | 202,38 | 1214,29          | 21,88            | 1011,91         | 44,53           |
| <b>n-Pentano*</b>     | 0,00              | 19,42   | 72,15             | 630,00 | 12235,84 | 169,59 | 1017,53          | 18,34            | 847,94          | 37,32           |
| <b>n-Hexano*</b>      | 0,00              | 2,95    | 86,17             | 654,80 | 1932,22  | 22,42  | 156,96           | 2,83             | 134,54          | 5,92            |
| <b>n-Heptano</b>      | 0,00              | 0,43    | 100,21            | 683,80 | 293,50   | 2,93   | 23,43            | 0,42             | 20,50           | 0,90            |

*Nota.* Los resultados presentados reflejan el balance másico, especificando la cantidad de agua y dióxido de carbono producidos durante el período de tiempo establecido.

**Apéndice D. Flujo del calor disponible en el proceso de combustión**

A continuación, se ilustran las tablas empleadas para determinar el flujo del calor disponible en el proceso de combustión.

**Tabla D1.**

*Entalpías de formación de los componentes de gas natural a 298,15 K.*

| Componente         | $H^{\circ}_f$ |
|--------------------|---------------|
|                    | kJ/kmol       |
| Nitrógeno          | 0,000         |
| Metano             | -74,850       |
| Dióxido de Carbono | -393,520      |
| Etano              | -84,680       |
| Propano*           | -103,850      |
| Isobutano          | -134,200      |
| n-Butano*          | -126,150      |
| Isopentano*        | -153,700      |
| n-Pentano*         | -146,800      |
| n-Hexano*          | -167,200      |
| n-Heptano          | -187,800      |
| H <sub>2</sub> O   | 226,730       |
| O <sub>2</sub>     | 0,000         |

*Nota.* La tabla muestra los datos obtenidos para la entalpía de formación de cada composición de gas natural. Tomadas de Rouss Fidel. (2022). Tablas Termodinámicas

[https://issuu.com/rosmaryfidel/docs/tablas\\_termodin\\_micas#google\\_vignette](https://issuu.com/rosmaryfidel/docs/tablas_termodin_micas#google_vignette) y Libro del Web de Química del NIST.

Posteriormente, se presentan las capacidades caloríficas calculadas para cada componente del gas natural, de acuerdo con la ecuación siguiente:

$$C_p = a + bT + cT^2 + dT^{-2} \quad (\text{Ec. 17})$$

**Tabla D2.**

*Capacidades caloríficas de gases en estado de gas ideal de los compuestos del gas natural.*

| Componente                | a      | b      | c     | d     | Cp               |
|---------------------------|--------|--------|-------|-------|------------------|
|                           | -      | -      | -     | -     | <b>kJ/kmol K</b> |
| <b>Nitrógeno</b>          | 28,900 | -0,002 | 0,000 | 0,000 | 29,086           |
| <b>Metano</b>             | 19,890 | 0,050  | 0,000 | 0,000 | 35,974           |
| <b>Dióxido de Carbono</b> | 22,260 | 0,060  | 0,000 | 0,000 | 37,378           |
| <b>Etano</b>              | 6,900  | 0,173  | 0,000 | 0,000 | 53,556           |
| <b>Propano*</b>           | -4,040 | 0,305  | 0,000 | 0,000 | 74,776           |
| <b>Isobutano</b>          | -7,913 | 0,416  | 0,000 | 0,000 | 98,413           |
| <b>n-Butano*</b>          | 3,960  | 0,372  | 0,000 | 0,000 | 100,674          |
| <b>Isopentano*</b>        |        |        |       |       | 0,000032         |
| <b>n-Pentano*</b>         | 6,774  | 0,454  | 0,000 | 0,000 | 125,000          |
| <b>n-Hexano*</b>          | 6,938  | 0,552  | 0,000 | 0,000 | 149,576          |
| <b>n-Heptano</b>          |        |        |       |       | 0,243            |
| <b>H2O</b>                | 32,240 | 0,002  | 0,000 | 0,000 | 33,692           |
| <b>O2</b>                 |        |        |       |       |                  |

*Nota.* La tabla ilustra las capacidades caloríficas de gases en estado de gas ideal, para los compuestos del gas natural. Tomado de Rouss Fidel. (2022). Tablas Termodinámicas

[https://issuu.com/rosmerfyfidel/docs/tablas\\_termodin\\_micas#google\\_vignette](https://issuu.com/rosmerfyfidel/docs/tablas_termodin_micas#google_vignette)

**Apéndice E.** *Revisión bibliográfica para la elección del software de simulación.*

A continuación, se presentan las referencias revisadas para determinar el software de simulación utilizado en el caso de estudio. Estas fuentes proporcionan información sobre la aplicación de cada software en la simulación de procesos de combustión.

**Tabla E1.**

*Artículos de investigación relacionados con el proceso de combustión.*

| <b>Autor(s)</b>  | <b>Título</b>  | <b>Software</b> | <b>Referencia</b>  |
|--|--|-----------------|--|
| Cala, O. M<br>Merino, L<br>Kafarov, V<br>Saavedra, J                               | Evaluation of combustion models for determination of refinery furnaces efficiency.                 | Apen Hysys      | (Cala, Meriño, Kafarov, & Saavedra, 19 de Noviembre de 2013) |
| Cala, O. M<br>Merino, L<br>Kafarov, V<br>Saavedra, J                               | Efecto de la composición del gas de refinería sobre las características del proceso de combustión. | Aspen Hysys     | (OM Cala, 2013)  |
| Aleksandr Kozlov<br>Yaroslav Chudnovsky<br>Mark Khinkis<br>Huajun Yuan<br>Mark Zak | Advanced green petroleum coke calcination in an electrothermal fluidized bed reactor.              | Aspen Hysys     | (Kozlov, Chudnovsky, Khinkisl, Yuan, & Zak, 2014)            |

| Autor(s)   | Título   | Software               | Referencia                                 |
|--|--|------------------------|--|
| Gloria Villaflor<br>Graciela V. Morales<br>Jorge Velasco         | Variables significativas del proceso de combustión del gas natural.  | Aspen<br>Hysys         | (Villaflor, Morales, & Velasco, 2008)      |
| Twana N. Hassan<br>Saif T. Manji                                 | Simulating combined cycle and gas turbine power plant under design condition using open-source software dwsim: a comparative study.  | DWSIM                  | (Twana N. & Saif T., 2023)                 |
| Ing. Sandra Peña<br>Murillo, Msc<br>Gabriel Junior López<br>Diaz | Comparación de los costos de producción y grado de contaminación por emisiones en el sector industrial del ecuador usando como combustible gas natural mediante la simulación de procesos. | DWSIM                  | (Peña Murillo & López Diaz, 2020)          |
| Rashmi Chaudhari<br>Dr. Hiral Tailor                             | Oxy fuel combustion replacing N2 with CO2 for enhancing thermal efficiency of ceramic industries furnace.  | DWSIM                  | (Chaudhari & Tailor, 2022)                 |
| C.Moliner<br>F.Marchelli<br>B.Bosio<br>E.Arato                   | Simulation of the gasification of agricultural residues using coco simulator.  | COCO<br>SIMULATI<br>OR | (Moliner, Marchelli, Bosio, & Arato, 2018) |
| Tianci Li<br>Congning Yang                                       | Studies on advanced configurations of post-combustion CO2 capture process applied to cement plant flue gases.  | ProMáx v<br>2.0        | (Tianci, Congning, Puttipong,              |

| Autor(s)   | Título  | Software        | Referencia   |
|--|---|-----------------|--|
| Puttipong<br>Tantikhajorngosol<br>Teerawat Sema<br>Paitoon<br>Tontiwachwuthikul  |   |                 | Teerawat, &<br>Paitoon, 2022)                          |
| Tianci Li<br>Congning Yang<br>Puttipong<br>Tantikhajorngosol<br>Teerawat Sema<br>Zhiwu Liang<br>Paitoon<br>Tontiwachwuthikul | Comparative desorption energy consumption<br>of post-combustion CO <sub>2</sub> capture integrated<br>with mechanical vapor recompression<br>technology | ProMáx v<br>2.0 | (Tianci L. , y<br>otros, 2022)                         |
| Zhiwu Henry Liang<br>Teerawat<br>Sanpasertparnich,<br>Paitoon<br>Tontiwachwuthikul<br>Don Gelowitz<br>Raphael Idem           | Design, modeling and simulation of post-<br>combustion CO <sub>2</sub> capture systems using<br>reactive solvents                                       | ProMáx v<br>2.0 | (Zhiwu, Teerawat,<br>Paitoon, Don, &<br>Raphael, 2011) |

*Nota.* La tabla resume los artículos documentados en la literatura que abordan el sistema de combustión de gas combustible para los diferentes softwares de simulación.

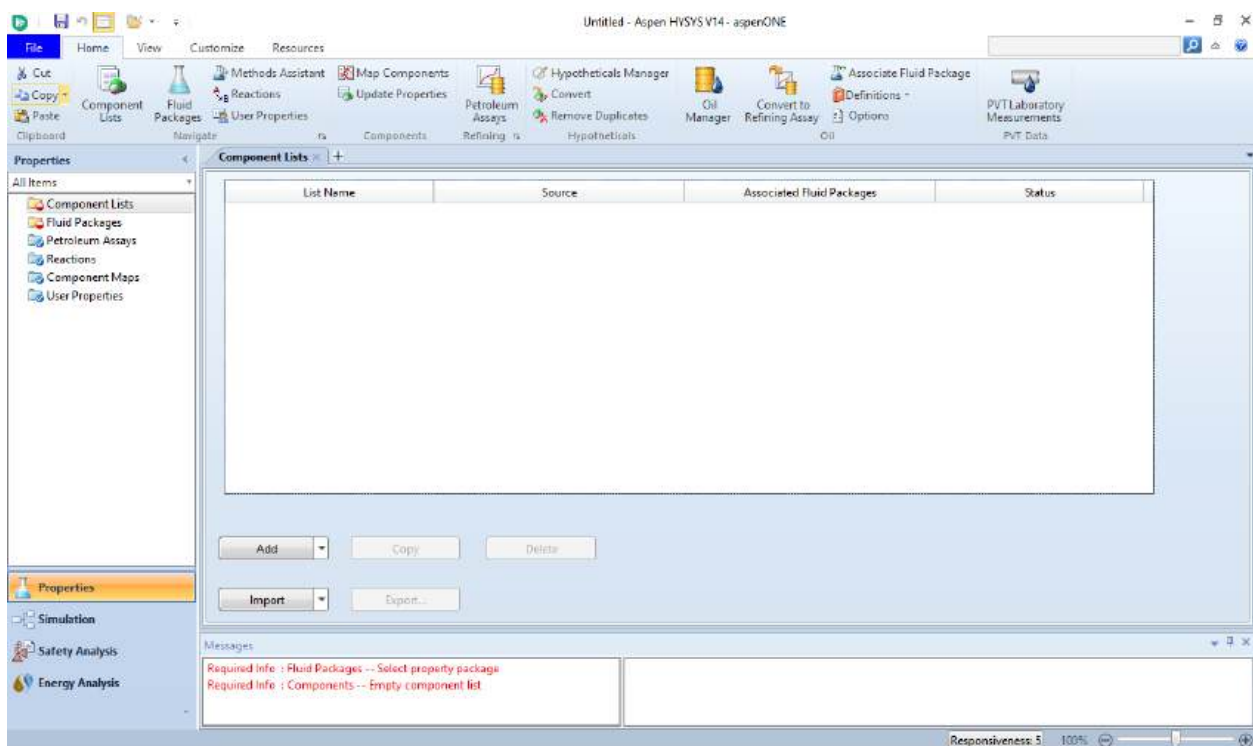
## Apéndice F. Paso a paso del procedimiento para la construcción y desarrollo de la simulación del proceso de combustión

En el presente anexo se muestra el paso a paso del procedimiento para la construcción y desarrollo de la simulación del proceso de combustión en un horno de calentamiento de llama directa:

Debe abrirse el programa para acceder a la interfaz del software:

### Figura F1.

#### Interfaz Aspen HYSYS



*Nota.* La tabla ilustra la interfaz del software Aspen HYSYS versión 14.0. Tomado de la herramienta Aspen HYSYS.

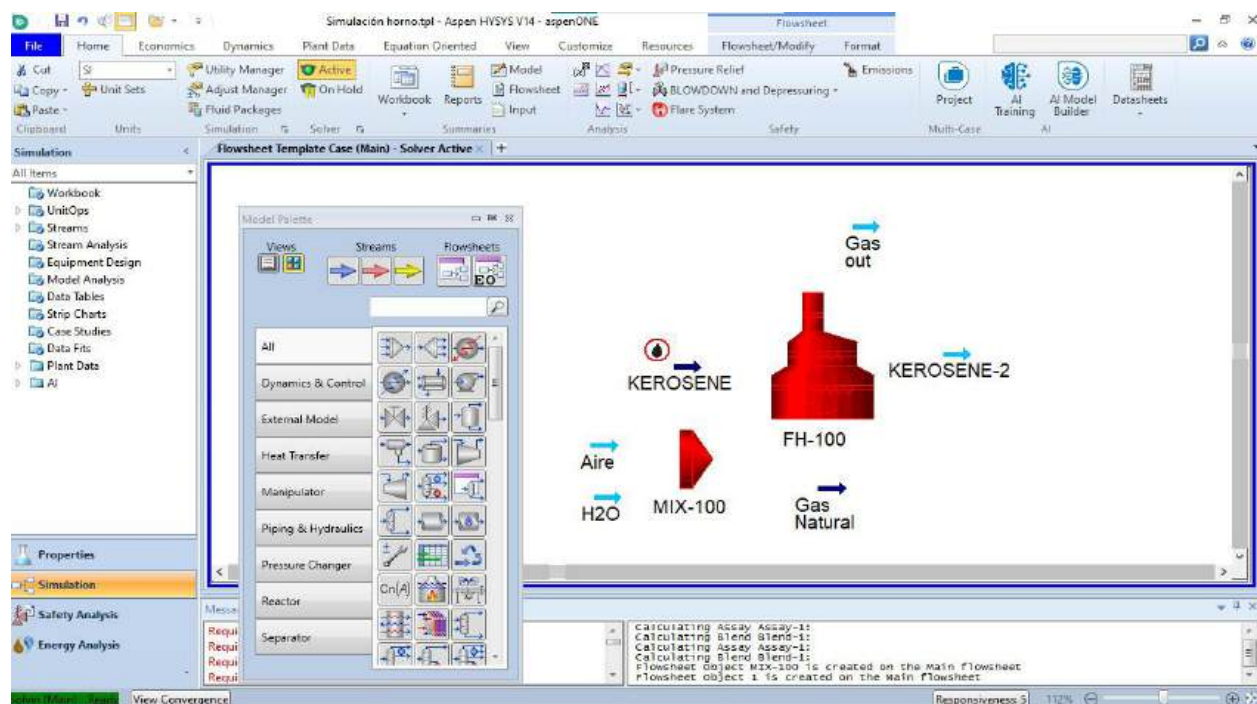
En esta sección se deben ingresar los datos del módulo "Properties". En la carpeta "Component List" se debe introducir la cromatografía de gases (ver Tabla 2), mientras que en la

carpeta “Fluid Packages” se selecciona el modelo termodinámico Peng-Robinson, el cual es el modelo más empleado en la industria química.

Una vez ingresada la información en el módulo “Properties”, se procede a acceder al “Módulo Simulation”. Al seleccionar este módulo, se desplegará la paleta de comandos correspondiente. Con esta paleta, se definirá las corrientes de flujo y se incorporarán los equipos y accesorios especificados en la propuesta.

**Figura F2.**

*Adición de equipos y corrientes de entrada y salida*



*Nota.* La ilustración muestra la interfaz que dispone de la paleta de comandos para agregar equipos y definir las corrientes de entrada y salida del proceso de combustión. Tomado de la herramienta Aspen HYSYS.

Una vez completado el modelado del proceso de combustión, como se muestra en la Figura F2, se deben ingresar los datos correspondientes a cada corriente, como lo es la composición del gas natural (consultar Tabla 2), las especificaciones del fluido de calentamiento y las demás

condiciones de entrada definidas en la base de datos (ver Apéndice A) y el balance de masa (ver Apéndice C). Un resumen de estas consideraciones se presenta en la Figura F5.

Para fijar el flujo de Kerosene a la corriente de entrada y salida del horno, se deben tener en cuenta las siguientes propiedades fisicoquímicas derivadas del petróleo:

**Tabla F1.**

*Propiedades fisicoquímicas del Kerosene*

| Propiedades/Características            | Unidades      | Método          | Especificación |        |
|--|---------------|-----------------|----------------|--------|
|  |               |                 | Mínimo         | Máximo |
| Azufre                                 | g/100 g       | ASTM D-4294     |                | 0,3    |
| Gravedad API                           | °API          | ASTM D-4052     | Reportar       |        |
| Color Saybolt                          | N/A           | ASTM D-156      | 16             |        |
| Corrosión lámina de cobre, 2 h a 100°C | Clasificación | ASTM D-130      |                | 1 (1)  |
| Destilación                            | °C            | AST D-86        |                |        |
| Temp. 10% vol. recobrado               | -             | -               |                | 205    |
| Punto final de ebullición              | -             | -               |                | 300    |
| Punto de inflamación                   | °C            | ASTM D-56       | 38             |        |
| Azufre mercaptano                      | g/100 g       | ASTM D-3227     |                | 0,03   |
| Punto de congelación                   | °C            | ASTM D-2386 (2) |                | -30    |

(1) El valor de 1 se refiere a valores 1<sup>a</sup> o 1b

(2) Método alterno ASTM D 5972.

*Nota.* La tabla nos proporciona información acerca de las propiedades fisicoquímicas del flujo Kerosene. Tomado de Ecopetrol. Queroseno. (2001).

[https://nuevoportal.ecopetrol.com.co/especiales/Catalogo\\_de\\_Productos/pdf/Ecopetrol%20Queroseno%20VSM-01.pdf](https://nuevoportal.ecopetrol.com.co/especiales/Catalogo_de_Productos/pdf/Ecopetrol%20Queroseno%20VSM-01.pdf)

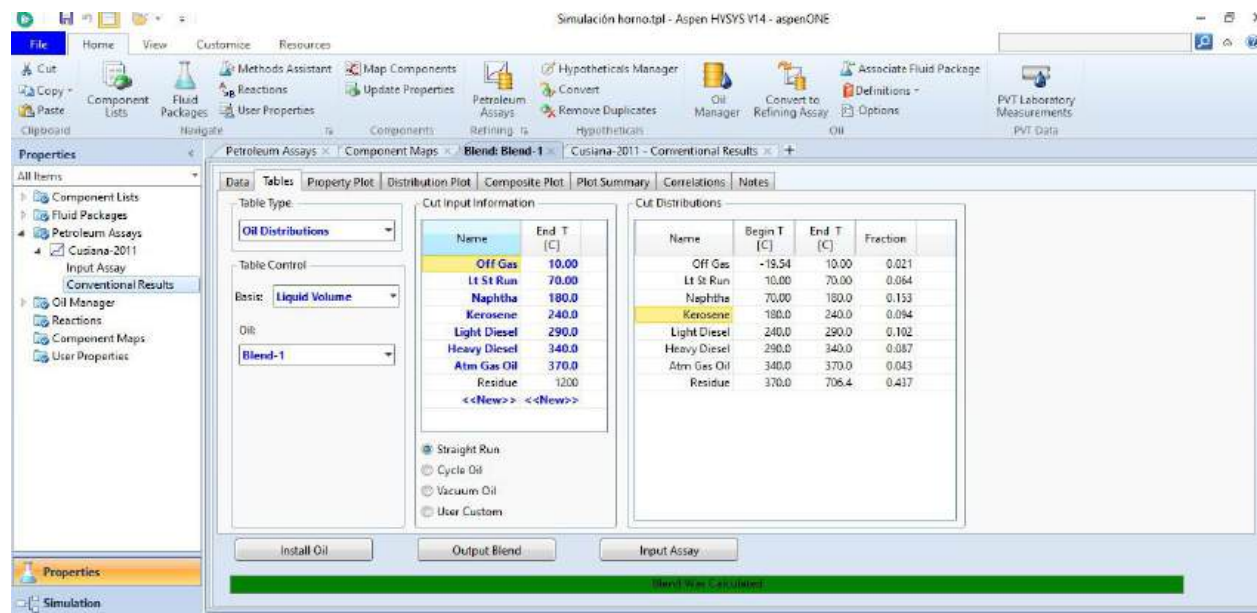
De acuerdo con la norma ASTM-D86, que especifica el método para determinar cuantitativamente los puntos característicos de los materiales (Normas ASTM, 2002), se deben

considerar los puntos de ebullición del Keroseno, que oscilan entre 110°C y 270°C, como se observa en la Figura E3. En función de estos requisitos, se selecciona el crudo Cusiana debido a su alto porcentaje de compuestos ligeros y destilados medios.

La curva de destilación TBP del crudo Cusiana muestra que, dentro del rango de temperaturas especificado, hay un mayor contenido de destilados medios. El Keroseno, que pertenece a este grupo de destilados medios, tiene una temperatura de ebullición de 240°C según el reporte de Aspen HYSYS. Este valor se encuentra dentro del rango establecido por la norma ASTM-D86, como se ilustra en la Figura F4.

### Figura F3.

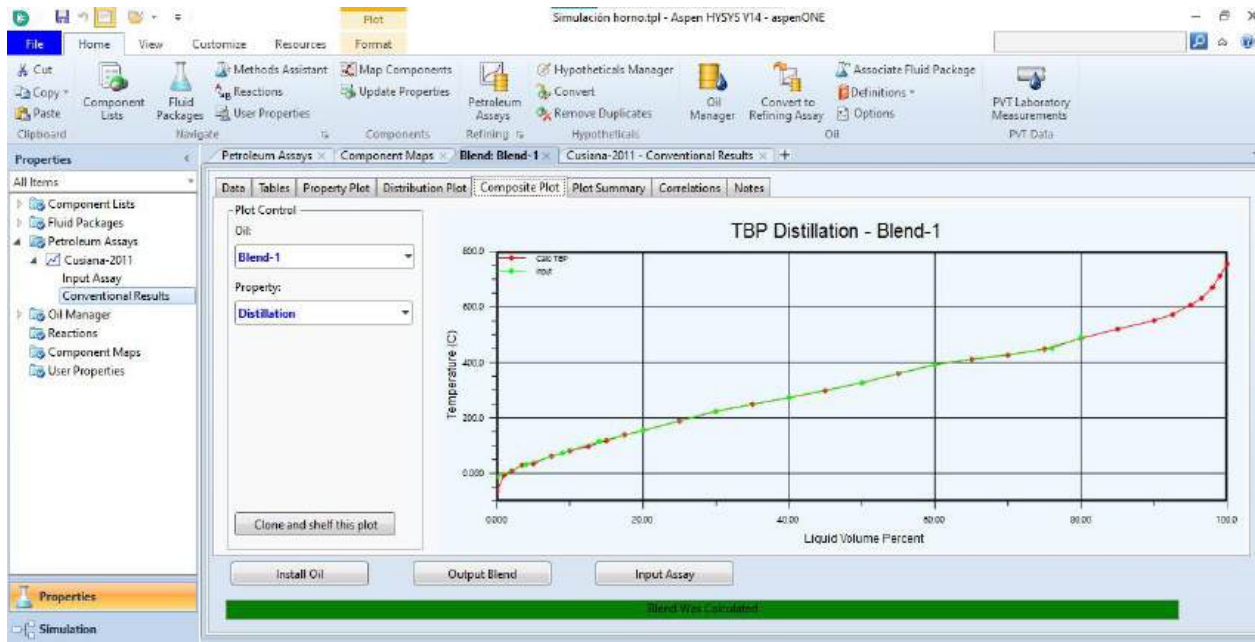
*Distribución de destilados del crudo cusiana (kerosene).*



*Nota.* La imagen muestra la distribución de destilados. Tomado de la herramienta Aspen HYSYS.

**Figura F4.**

*Curva de destilación TBP del crudo cusiana (kerosene).*



*Nota.* La imagen muestra la curva de destilación TBP. Tomado de la herramienta Aspen HYSYS.

Una vez ingresada la corriente de keroseno, se deben establecer las condiciones de operación, las cuales se detallan a continuación:

**Tabla F2.**

*Condiciones de operación del fluido de calentamiento kerosene*

| <b>Customer:</b> Petro Santander | Exotherm Job   |          |
|----------------------------------|----------------|----------|
| Number: 4527                     |                |          |
| <b>Item:</b> Kerosene Heater     | Date: Dec 2021 |          |
| Performance Data                 |                |          |
| Fluid Heated                     | Kerosene       |          |
| Heat Duty                        | 10,8           | MMBtu/h  |
| Fluid Flow                       | 76,92          | Lb/h     |
| Density                          | variable       | Lb/cf    |
| Heat Capacity                    | vaporizing     | Btu/lb F |

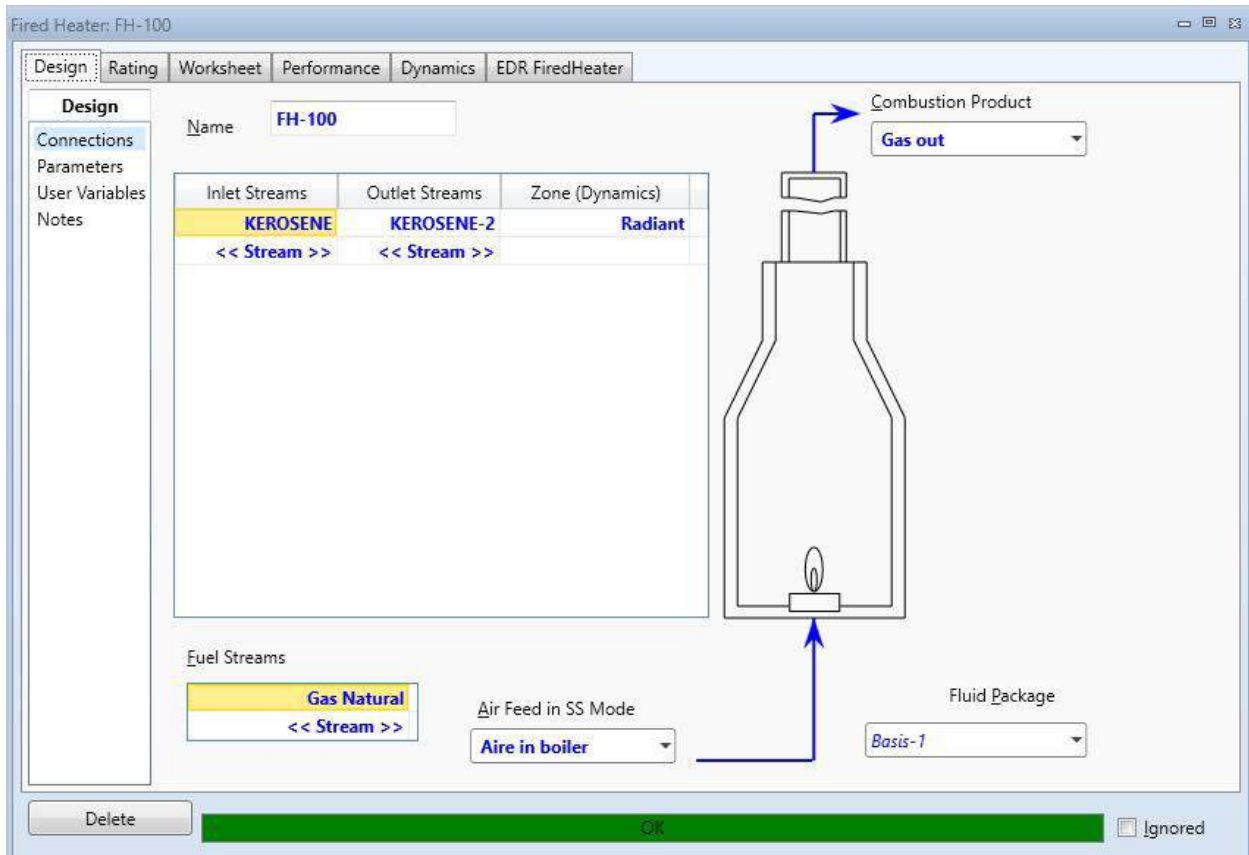
| <b>Customer:</b> Petro Santander | Exotherm Job   |            |
|----------------------------------|----------------|------------|
| Number: 4527                     |                |            |
| <b>Item:</b> Kerosene Heater     | Date: Dec 2021 |            |
| <b>Performance Data</b>          |                |            |
| Thermal Conductivity             | 0,03           | Btu/h ft F |
| Viscosity                        | 0,217          | lb/ft h    |
| Fouling Factor                   | 0,001          |            |
| Temperature In                   | 470            | F          |
| Temperature Out                  | 575            | F          |
| Desing Pressure                  | 250            | Psig       |
| Coil Desing Temperature          | 735            | F          |
| Calculated Press, Drop           | 23,5           | Psi        |
| Net Calculated Efficiency        | 86             | %          |

*Nota.* La tabla nos proporciona información acerca de las condiciones de operación del fluido de calentamiento kerosene. Tomado de UNIFLUX®/Exotherm, Installation and operation instructions for uniflux heater, Cartagena, Colombia, 2021

Luego de que definir todas las corrientes de entrada, especificar las condiciones de operación para cada corriente, se accede a las especificaciones del horno en la sección “Design”. En la subsección “Connections”, se ingresan los datos necesarios para definir las corrientes de entrada y salida del horno de calentamiento de llama directa, como se muestra en la Figura F5.

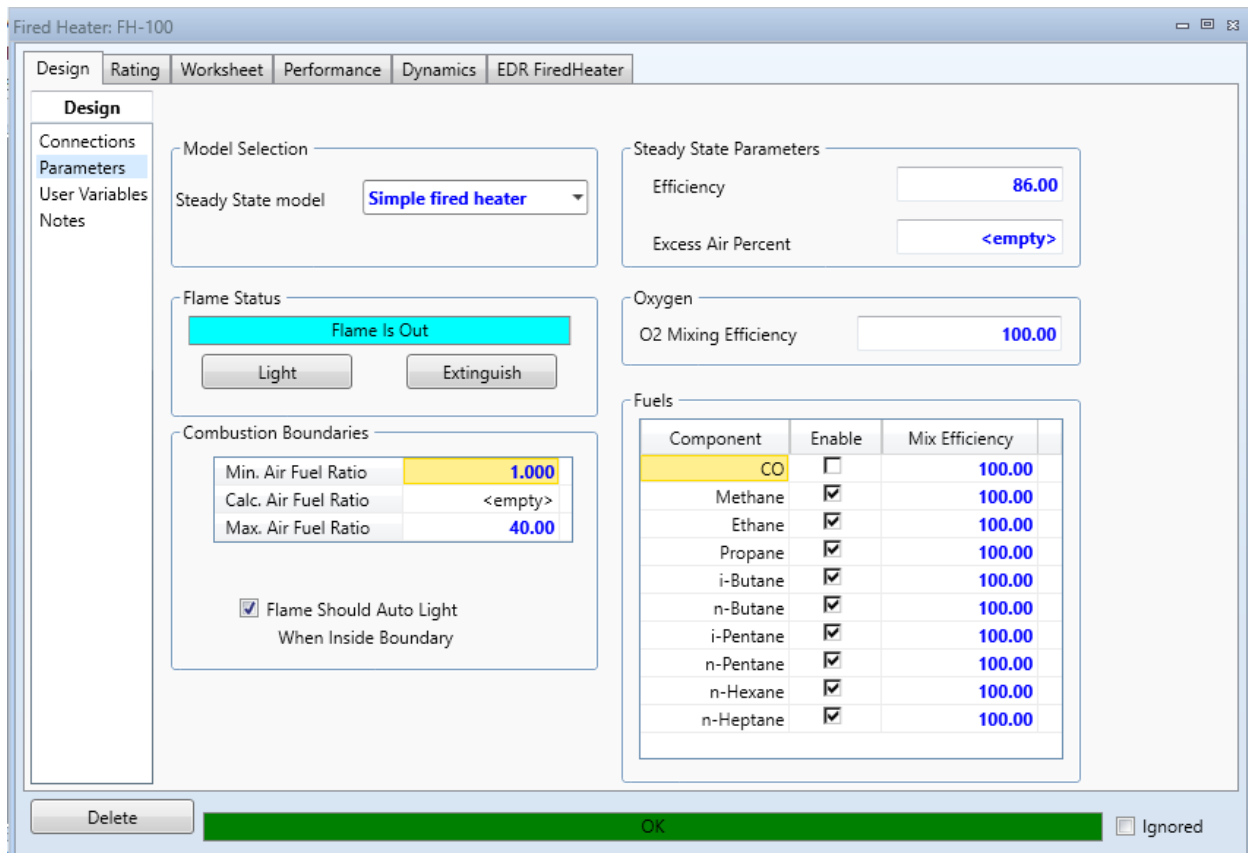
**Figura F5.**

*Diseño horno de calentamiento de llama directa*



*Nota.* La imagen muestra los datos requeridos para definir las corrientes de entrada y salida del horno de calentamiento de llama directa. Tomado de la herramienta Aspen HYSYS.

Posteriormente, se debe acceder a la pestaña “parameters” y asignar el valor de la eficiencia de diseño, que en este caso es del 86%, tal como se ilustra en la Figura F6.

**Figura F6.***Eficiencia horno de calentamiento de llama directa*

*Nota.* La imagen ilustra la eficiencia del horno de calentamiento de llama directa. Tomado de la herramienta Aspen HYSYS.

La carga de estos datos se efectúa en la sección "worksheet", que incluye varios ítems: "conditions", "properties", "composition" y "pf specs". en "conditions" se ingresan los datos correspondientes a la corriente de entrada, mientras que en "composition" se introduce la composición másica del fluido de trabajo. Al ingresar las fracciones en esta sección, el sistema se normaliza automáticamente, como se muestra en la Figura F7.

Finalmente, una vez especificadas todas las características, el software indica que la corriente está completamente definida mediante una barra verde en la parte inferior de la interfaz.

**Figura F7.**

*Módulo de simulación “woskheet”*

The screenshot shows the 'Fired Heater: FH-100' worksheet in Aspen HYSYS. The table displays various properties for six different streams: KEROSENE, Aire in boiler, Gas Natural, KEROSENE-2, and Gas out. The 'Name' row is highlighted in yellow.

| Name                        | KEROSENE    | Aire in boiler | Gas Natural | KEROSENE-2  | Gas out     |
|-----------------------------|-------------|----------------|-------------|-------------|-------------|
| Vapour                      | 0.0000      | 1.0000         | 1.0000      | 0.0515      | 1.0000      |
| Temperature [C]             | 243.3333    | 22.8835        | 29.4444     | 258.7842    | 230.1447    |
| Pressure [kPa]              | 1388        | 4.479          | 37.92       | 1388        | 4.479       |
| Molar Flow [kgmole/h]       | 174.5355    | 26.2305        | 9.4546      | 174.5355    | 39.2962     |
| Mass Flow [kg/h]            | 34890.3191  | 755.4409       | 229.1693    | 34890.3191  | 984.6103    |
| LiqVol Flow [m3/h]          | 39.6550     | 0.8730         | 0.5568      | 39.6550     | 1.3974      |
| Molar Enthalpy [kJ/kgmole]  | -3.370e+005 | -1182          | -1.242e+005 | -3.277e+005 | -7.172e+004 |
| Molar Entropy [kJ/kgmole-C] | 433.8       | 177.8          | 197.5       | 451.4       | 213.6       |
| Heat Flow [kJ/h]            | -5.8815e+07 | -3.1015e+04    | -1.1747e+06 | -5.7202e+07 | -2.8181e+06 |

*Nota.* La imagen presenta los datos obtenidos en el caso de estudio, considerando las condiciones de entrada requeridas por el software." Tomado de la herramienta Aspen HYSYS.