

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

**Propuesta para la mejora de la eficiencia térmica de una Marmita a gas natural para calcinado de minerales no metálicos**

Juan Steven Chaverra Restrepo

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:  
Especialista en Gestión de Sistemas Energéticos Industriales

Asesor  
Daniel Sanín Villa

Instituto Tecnológico Metropolitano - ITM  
Facultad de Ingenierías  
Departamento Antioquia  
Medellín, Colombia  
2023

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## RESUMEN

---

Este estudio presenta un análisis detallado sobre la evaluación de la eficiencia térmica en una marmita industrial, utilizada para el calcinado de minerales no metálicos, como parte del proceso de elaboración de materiales para el sector construcción. El equipo térmico a estudiar será evaluado como un horno hervidor ya que su función en el proceso es retirar humedad de la materia prima procesada para su posterior mezclado con otros materiales y garantizar su aplicabilidad de cara al usuario final.

Estos son ampliamente utilizados en diferentes sectores industriales; se parte de la fabricación de equipos de manera empírica con algunas recomendaciones de expertos para garantizar su funcionamiento y otros equipos que son fabricados con un diseño fundamentado en modelos y conceptos de transferencia de calor.

A menudo operan con mayores ineficiencias los equipos de fabricación empírica. El objetivo principal de esta investigación es evaluar y proponer la mejora porcentual de la eficiencia térmica del equipo, lo que permitirá reducir el consumo de combustible como fuente principal de adición de energía en el estudio realizado.

El estudio se basa en mediciones de temperatura registradas en el proceso por medio de termocuplas ubicadas en el perímetro del equipo, el consumo de combustible, capacidad de producción del horno y lecturas de medición de composición de gases realizadas por el área de mantenimiento de cara a la responsabilidad ambiental.

Se desarrolla un modelo termodinámico específico para este tipo de horno, que permite identificar en mayor medida las pérdidas de calor y las ineficiencias en el proceso térmico para el calcinado. Se proponen soluciones prácticas para mejorar la eficiencia, como el correcto aislamiento del horno y la implementación de recuperadores de calor.

En conclusión, se proporciona información relevante y práctica para mejorar la eficiencia de estos sistemas en contextos donde su uso es común.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## RECONOCIMIENTOS

---

Expreso mis sinceros agradecimientos a mi asesor de monografía, Daniel Sanín Villa, por su orientación y apoyo profesional. También agradezco a mi familia y amigos por su constante ánimo y comprensión. Gracias a la Instituto Tecnológico Metropolitano-ITM por los recursos, docentes y a todos los que contribuyeron a este proyecto de alguna manera.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN .....	6
2.	MARCO TEÓRICO.....	7
	2.1 MARMITAS.....	7
	2.2 FUNDAMENTOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR .....	13
	2.3 BALANCE DE ENERGÍA Y MASA.....	15
	2.4 BALANCE DE MASA .....	16
	2.5 EFICIENCIA ENERGÉTICA.....	17
3.	ESTADO DEL ARTE .....	18
4.	METODOLOGÍA .....	21
5.	CARACTERIZACIÓN DE MARMITA.....	22
6.	BALANCE DE MASA Y ENERGÍA MARMITA.....	27
	6.1 BALANCE ESTEQUIMETRICO IDEAL – REAL .....	28
	6.2 BALANCE DE MASA.....	30
	6.2.1 BALANCE DE MASA DE ENTRADA .....	30
	6.2.2 BALANCE DE MASA DE SALIDA.....	31
	6.3 BALANCE DE ENERGÍA.....	31
	6.3.1 BALANCE DE ENERGÍA DE ENTRADA .....	31
	6.3.2 BALANCE DE ENERGÍA DE SALIDA.....	32
7.	PROPUESTA DE MEJORA Y BENEFICIOS ECONOMICOS .....	38
8.	CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO.....	43
	REFERENCIAS .....	45

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b>	Partes Generales de una Marmita.....	8
<b>Figura 2</b>	<i>Marmita con Aprovechamiento de Generación de vapor.....</i>	9
<b>Figura 3</b>	<i>Marmita a Gas Natural para Secado de Minerales no Metálicos .....</i>	10
<b>Figura 4</b>	<i>Agitador de Marmita.....</i>	11
<b>Figura 5</b>	<i>Moto Reductor de Agitador .....</i>	11
<b>Figura 6</b>	<i>Quemador de Gas Natural tipo Swirl de Llama Plana.....</i>	12
<b>Figura 7</b>	Mecanismos de Transferencia de Calor .....	13
<b>Figura 8</b>	<i>Conductividad Térmica de algunos materiales en condiciones ambiente .....</i>	14
<b>Figura 9</b>	<i>Balance Energético de combustibles en el sector industrial Colombiano .....</i>	19
<b>Figura 10</b>	<i>Marmita o Calderín para secado de mineral no metálico.....</i>	22
<b>Figura 11</b>	Componentes Principales de la Marmita .....	23
<b>Figura 12</b>	<i>Cuerpo exterior, aislamiento y olla de la marmita.....</i>	24
<b>Figura 13</b>	Agitador de olla y Marmita.....	25
<b>Figura 14</b>	Quemador de Gas Natural de Llama plana .....	26
<b>Figura 15</b>	Frontera del sistema a analizar .....	28
<b>Figura 16</b>	Distribución de Energía del proceso.....	37
<b>Figura 17</b>	Lectura de temperatura en la superficie exterior del piso de la Marmita .....	38
<b>Figura 18</b>	Lectura de temperatura obtenida en un agujero sobre la superficie .....	39
<b>Figura 19</b>	Lectura de temperatura sobre la superficie cerca de compuertas de inspección a 90° del quemador.....	39
<b>Figura 20</b>	Lectura de temperatura en alrededor de compuerta de inspección .....	39
<b>Figura 21</b>	Lectura de temperatura en compuerta de inspección opuesta a la ubicación del quemador .....	40
<b>Figura 22</b>	Lectura de temperatura a 1 m de distancia del quemador.....	40

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## 1. INTRODUCCIÓN

---

Actualmente en la industria se hace necesario la utilización de hornos industriales que permitan transformar productos o materias primas teniendo contacto de manera directa e indirecta con los mismos; los procesos industriales requieren soporte de equipos térmicos para generación de vapor, secado de un producto, transformación de una materia prima o producto.

Existen diferentes fabricantes de Marmitas los cuales diseñan y fabrican bajo los requerimientos del proceso, los equipos son instalados y posteriormente puestos en marcha, sin embargo son pocos los casos en que se realiza seguimiento al desempeño del equipo adquirido y variables como la eficiencia son desconocidas lo que genera desconocimiento de los parámetros de operación para los cuales el equipo fue diseñado y las posibilidades de mejorarlo se reducen ya que no se tiene como comparar las condiciones de funcionamiento en la línea de tiempo en la cual viene operando.

En la empresa del sector cerámico donde se desarrolla el caso de estudio, se cuenta con un Equipo tipo Marmita el cual fue diseñado con el objetivo de calcinar minerales no metálicos, el mineral procesado en este caso tiene como condición que le debe ser eliminado el 50% de la humedad que posee llevándolo hasta una temperatura de 160 °C, sin embargo, no se conoce la eficiencia actual del equipo y si es posible mejorarlo, la criticidad del equipo en el proceso se encuentra hasta en un 50% ya que el paso del material por esta fase determina una de las características claves del producto final que es el tiempo de secado.

En la presente investigación se evaluará la eficiencia de una Marmita a gas natural para calcinado de minerales no metálicos, se realizará una revisión de las condiciones de diseño iniciales lo que permitirá comparar la eficiencia actual con la eficiencia de diseño, posteriormente se presentarán las posibles propuestas de mejora aplicables en el equipo.

Esta monografía tiene como objetivo general: proponer una mejora para la eficiencia térmica de una Marmita a gas natural para Calcinado de Minerales no metálicos con la

 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL  TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

finalidad de disminuir costos operativos. El cuál se desarrollará a partir de los siguientes objetivos específicos:

- Caracterizar la Marmita a gas, para determinar las condiciones actuales de operación del equipo
- Evaluar la eficiencia térmica de la Marmita mediante el método de balance de masa y energía
- Proponer la mejora del proceso Térmico de la Marmita y cuantificar los beneficios económicos

En este documento se desarrollará en cada capítulo un objetivo específico y terminará con las conclusiones y recomendaciones en torno a los hornos industriales que permita disminuir los costos operativos

## 2. MARCO TEÓRICO

---

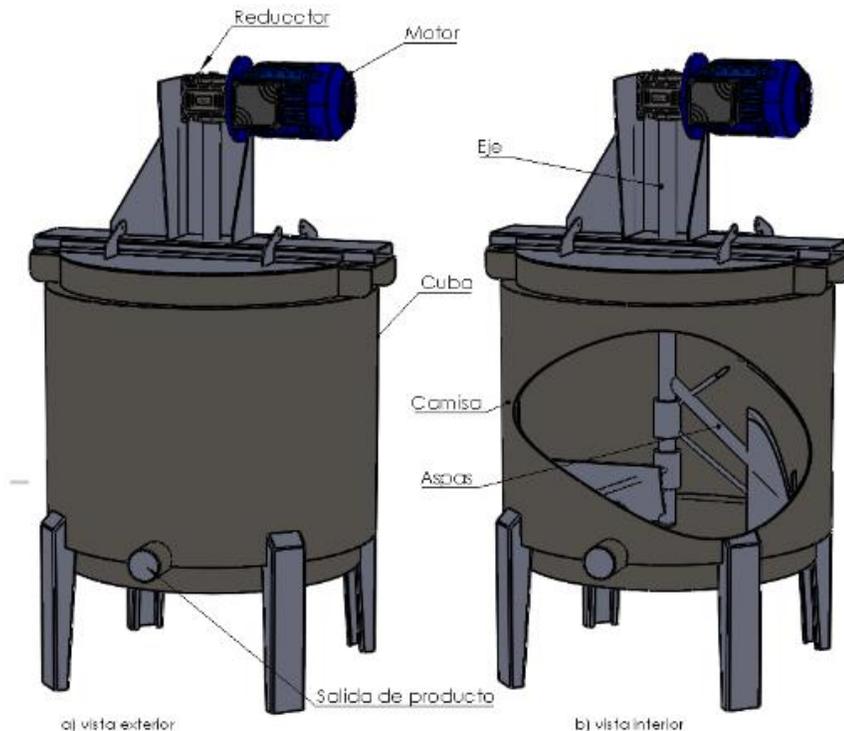
### 2.1 MARMITAS

La marmita es un equipo que brinda beneficios térmicos con usos en diferentes sectores de la industria como el sector alimentos, arcillas, maderero entre otros, este equipo ha permitido alcanzar mejoras y optimizar el procesamiento de materias primas o productos finales, por definición podemos conocerla como una olla metálica principalmente y sus componentes varían según la necesidad, como se puede ver en la figura 1, pueden comprender quemadores que funcionan con gas, GLP o Carbón, también pueden tener mezcladores con diferentes diseños que permiten la homogenización de la materia ingresada, entre otros periféricos como termocuplas u otros sensores. “Las marmitas son usualmente de barro, de hierro colado, de acero inoxidable, de aluminio o de cobre estañado. Aun cuando además se las conoce por otros nombres, a las altas además se les llaman pucheros y las bajas cazuelas”. (Trujillo2009; Imbett Ortega Daniel,2022, p. 29)

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

**Figura 1**

*Partes Generales de una Marmita*



Nota. Adaptado de *Análisis Del Comportamiento Térmico De La Máquina De Temperado Para Optimizar El Procesamiento De Chocolate*, pg.39, Rodríguez Sánchez. N. (2017).

Las Marmitas poseen características que las representan al momento de ser equipos térmicos seleccionados para la transformación de una materia prima o producto, como lo son:

1. Amplia variedad de aplicaciones
2. Se modifica con versatilidad según la necesidad
3. Equipos de Mantenimiento simple
4. Sus dimensiones se adaptan a la necesidad
5. Adaptable al proceso requerido

Las Marmitas más comunes tienen como fuente de energía térmica Gas o Vapor como se ve en la figura 2, la diferencia radica en que la marmita alimentada por gas posee un quemador el cuál es el encargado de quemar el combustible y generar la cantidad de energía térmica requerida en el caso del vapor este viene de una fuente generadora como una caldera, no obstante, la energía térmica puede ser suministrada de forma directa o indirecta la materia procesada.

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## Figura 2

*Marmita con Aprovechamiento de Generación de vapor*



*Nota. Eficiencia Energética En El Uso Del Vapor Para La Cocción De Alimentos Delgado Santana, Jiménez Borges, (2017).*

La Marmita alimentada a gas se caracteriza por emplear para su funcionamiento un quemador atmosférico, su encendido es automático y de llama regulable, posee un ducto extractor de gases residuales. Su sistema de control lo componen manómetros, sensores de temperatura y compuertas de alimentación y descarga. Su construcción es en acero inoxidable el cual funciona como una resistencia disminuyendo las pérdidas de energía. La Marmita alimentada a vapor consiste en un tanque metálico, a su alrededor circula vapor permitiendo calentar el producto dentro del tanque, generalmente la caldera entrega el vapor a una presión determinada haciendo circular el gas en la cámara de calefacción. Los componentes generales de una Marmita se pueden visualizar en la figura 3, a modo de referencia. (Trujillo2009; Imbett Ortega Daniel,2022, p. 29)

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

### Figura 3

*Marmita a Gas Natural para Secado de Minerales no Metálicos*



*Nota.* Elaboración propia

Los componentes generales de estas Marmitas son:

6. Cámara de Combustión
7. Cámara de cocción
8. Cámara de Aislamiento
9. Tapa
10. Chimenea de Gases
11. Tablero de control
12. Quemador
13. Sensores de temperatura y presión
14. Basculante o Agitador

Las Marmitas poseen unos agitadores que son dispositivos empleados para la homogenización del producto a procesar, estos son diseñados y seleccionados con base al tipo de materia a procesar ya sea sólidos o líquidos. En una Marmita garantiza que el producto no sea procesado irregularmente asegurando la calidad y correcto funcionamiento del equipo. El Agitador lo componen el motor reductor encargado de transmitir la potencia, un eje el cual transmite el movimiento de rotación y las alabes o aspas para el mezclado u homogenizado del producto procesado. A continuación, en la figura 4 y 5 se puede identificar un agitador típico y el moto reductor del equipo respectivamente:

**Figura 4**

*Agitador de Marmita*



*Nota. Elaboración propia*

**Figura 5**

*Moto Reductor de Agitador*



*Nota. Elaboración propia*

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Otro elemento fundamental es el quemador el cual entrega la energía térmica requerida al proceso por medio de una llama, el principio se da de la siguiente manera:

Utilizando un combustible, ya sea líquido o gaseoso, provocan una chispa que da origen a una flama, la cual permite obtener el calor necesario para iniciar una combustión. El quemador, utiliza el combustible y aire para lograr la combustión. Ambos entran por separado y dentro de éste se regulan las cantidades y se mezclan de manera perfecta para iniciar el proceso. (Trujillo Graciano Abel, 2021. Pg. 55).

Los quemadores son equipos que se encuentran en Hornos, Marmitas, Calderas entre otros, operan con combustible gaseoso o líquido, su funcionamiento parte de la generación de una chispa por medio de un electrodo o bujía entrando en contacto con el combustible y un comburente, lo que genera una llama la cual genera la energía calorífica requerida en el proceso. Es fundamental garantizar la eficiencia del quemador teniendo correctamente balanceada la mezcla aire combustible, bien sea en un quemador atmosférico o mecánico los cuales se diferencian según su funcionamiento. En la figura 6 puede identificarse un quemador para quemar de gas natural.

### Figura 6

*Quemador de Gas Natural tipo Swirl de Llama Plana*



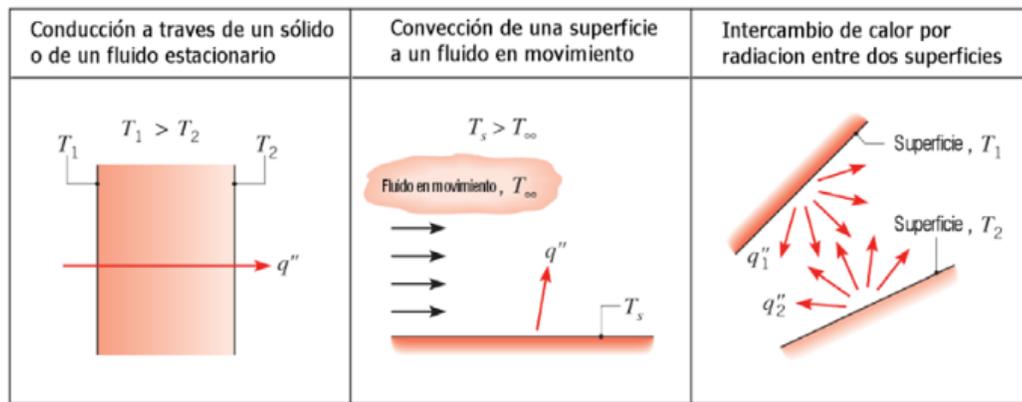
Nota. Elaboración propia

## 2.2 FUNDAMENTOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

El intercambio o transferencia de energía de un cuerpo o sistema a otro se da siempre y cuando exista un diferencial de temperaturas entre ambos, así mismo el calor se refiere a la energía transferida entre los sistemas que interactúan, este proceso de transferencia de calor sucede hasta que haya un equilibrio térmico entre los sistemas. Los mecanismos de transferencia de calor conocidos son:

**Figura 7**

*Mecanismos de Transferencia de Calor*



*Nota.* Adaptado del libro *Fundamentos de Transferencia de Calor*, Yunus Cengel. Novena edición.

La transferencia de calor por conducción sucede en sólidos, líquidos o gases; para los dos últimos sucede como la colisión entre sus moléculas debido al movimiento aleatorio, en el caso de los sólidos interactúan las vibraciones de sus moléculas como una red y transporte de energía mediante electrones libres. (Termodinámica Yunus Cengel, Novena Edición, pg. 91).

La ecuación en condiciones estacionarias y lineales que describe la transferencia de calor por conducción mediante la Ley de Fourier es, (Termodinámica Yunus Cengel, Novena Edición, pg. 91):

$$Q_{cond} = K \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \text{ [W]} \quad (1)$$

Donde:

K= Conductividad térmica del material  $\frac{W}{m^2 \cdot k}$

A= Área transversal de pared [ $m^2$ ]

$\Delta T$ = Diferencial de Temperatura  $\frac{T_2 - T_1}{L}$

## Figura 8

*Conductividad Térmica de algunos materiales en condiciones ambiente*

**TABLA 2-3**  
 Conductividades térmicas de algunos materiales en condiciones ambiente

Material	Conductividad térmica, W/m · K
Diamante	2 300
Plata	429
Cobre	401
Oro	317
Aluminio	237
Hierro	80.2
Mercurio (l)	8.54
Vidrio	1.4
Ladrillo	0.72
Agua (l)	0.613
Piel humana	0.37
Madera (roble)	0.17
Helio (g)	0.152
Hule suave	0.13
Fibra de vidrio	0.043
Aire (g)	0.026
Uretano, espuma rígida	0.026

*Nota.* Adaptado del libro de Termodinámica Yunus Cengel, Novena Edición, pg. 92

La transferencia de calor por convección se da por medio de la interacción de una superficie sólida con un gas o un líquido, “al no existir movimiento de la masa del fluido, la transferencia de calor sería netamente por conducción. Por el contrario, si hay movimiento de la masa del fluido aumenta la transferencia de calor entre la superficie sólida y el fluido” (Termodinámica Yunus Cengel, Novena Edición, pg. 93).

La tasa de transferencia de calor por convección  $Q_{conv}$  se determina a partir de la ley de enfriamiento de Newton, expresada como:

$$Q_{conv} = hA(T_s - T_f) \text{ [W]} \quad (2)$$

Donde:

$h$ = Coeficiente de transferencia de calor por convección  $\frac{W}{m^2 \cdot K}$

$A$ = Área transversal de pared [ $m^2$ ]

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Ts= Temperatura de la superficie

Tf=Temperatura del fluido

Conocer la tasa de transferencia de calor es un factor relevante dado que permite identificar la cantidad de energía por unidad de tiempo que es consumida o generada, dado:

$$Q = \dot{Q}\Delta T \quad (3)$$

Donde  $\dot{Q}$  define la tasa de transferencia de calor en  $\frac{KJ}{s}$  ó kW

### 2.3 BALANCE DE ENERGÍA Y MASA

El balance de energía se define a partir de la primera Ley de la termodinámica, donde la energía no se crea ni se destruye solo se transforma, de este modo un proceso que interactúe con algún modo de energía requiere ser analizado teniendo en cuenta las variables que entran y salen del mismo, esto permite identificar pérdidas de energía, eficiencia del sistema, energía absorbida por el proceso, calor residual, flujo de calor, potencia requerida y energía disponible, En su expresión general se define como :

$$\Delta E_{sistema} = E_{entrada} - E_{salida} \quad (4)$$

La energía del proceso es la energía requerida del combustible para llevar el producto al estado o condiciones deseadas con la temperatura adecuada. Para conocerla es necesario identificar el flujo másico., el calor específico y el diferencial de temperatura de cada una de las entradas y salida del proceso teniendo establecido cuáles serán las fronteras del sistema a evaluar y se define como:

$$E = \dot{m}.cp.\Delta T \quad [kW] \quad (5)$$

La energía pérdida hace parte de las condiciones que presenta el sistema durante el proceso que se lleve a cabo, está se ve reflejada en los gases de combustión, inquemados, vapor de agua, paredes, purgas, muestreos o hasta paros y arranques del sistema, es decir “la energía que no se está aprovechando se convierte en una pérdida del sistema generando ineficiencias y/o sobre costos en operación” (Trujillo Lopez,2020. pg.26).

En un proceso térmico puede generarse una energía residual la cuál puede ser aprovechada en el sistema o en otros procesos, esto dependerá de la fuente, la calidad de la energía la cual mientras más temperatura tenga mayor será la energía disponible para entregar al sistema, la tecnología de recuperación de calor como intercambiadores de calor y el sistema receptor donde podrá ser aprovechada. Por lo tanto, debe ser evaluada cuanta energía disponible posee la energía residual la cual se suele aprovechar de los gases de

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

combustión, para así definir si es viable utilizarla, a que proceso sería entregada, seleccionar una tecnología de recuperación de calor.

Los aislamientos térmicos son característicos por tener una baja conductividad característica que reduce su capacidad de transferencia de calor, sus propiedades definen la capacidad de aislamiento que posee y son utilizados como práctica de eficiencia energética ya que evita que haya intercambio de energía directo con el medio evitando fluctuaciones de temperatura garantizando las condiciones del sistema y hasta reduciendo los tiempos de calentamiento, (CAEM 2021).

La eficiencia térmica según la enciclopedia de la (University of Calagary) “es la relación porcentual entre la energía de salida y la energía de entrada de un sistema y es asociada a cualquier proceso o sistema que utilice energía de un combustible o flujo asociado”, dada así:

$$eficiencia = \frac{E_{out}}{E_{in}} \cdot 100\% \quad (7)$$

## 2.4 BALANCE DE MASA

El principio de conservación de la masa es clave en un análisis de eficiencia térmica ya que por medio de este se puede identificar el equilibrio energético del sistema conociendo la relación estequiometría de la combustión o hasta la potencia térmica del combustible. Este balance es referente al cambio de la masa de un volumen de control en una unidad e tiempo o más conocido como flujo de masa y se puede expresar como:

$$\Delta \dot{m} = \dot{m}_{entrada} - \dot{m}_{salida} \quad (8)$$

La relación estequiométrica ideal o combustión ideal es llevada a cabo con el objetivo de aumentar las posibilidades de combustión completa, disminuyendo pérdidas de calor, generación de gases de efecto invernadero o desbalance del sistema por inquemados; para su realización se realiza el balance de masa tanto a los reactivos como a los productos de la ecuación de combustión lo que permitirá definir la cantidad e exceso de aire porcentual requerida para quemar una unidad másica del combustible de manera completa, así:

$$AC = \frac{m_{aire}}{m_{combustible}} \quad (9)$$

La potencia térmica del combustible es clave en el balance de masa y energía ya que es el mayor porcentaje de energía de entrada que recibe el sistema, por lo tanto, el flujo másico del combustible y su poder calorífico superior son las variables que definen la potencia del mismo, así:

$$\dot{m}_C = \frac{PCS}{Potencia\ Térmica} \quad (10)$$

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## 2.5 EFICIENCIA ENERGÉTICA

La eficiencia energética tiene como objetivo implementar mejoras y planes donde se logre utilizar menos energía para la producir la misma cantidad o más de un producto o servicio. La eficiencia energética la podemos implementar a los diferentes tipos de energía sin embargo es de mayor prioridad implementar planes y estrategias enfocadas al uso racional y eficiente de los energéticos provenientes de recursos no renovables.

Es necesario partir de una línea base según el Consejo colombiano de Eficiencia Energética en su módulo Gestión Energética recomienda partir de allí, lo cual permitirá identificar las variables críticas del proceso, los recursos energéticos, el consumo de los recursos energéticos y el porqué de los mismos. Al definir la línea base se pueden identificar los puntos críticos donde se presenta mayor consumo, proponer e implementar mejoras para disminuir u optimizar el consumo del energético sin afectar la calidad el bien o servicio, definir indicadores, realizar control y evaluación de los mismos.

Es importante tener en cuenta que la eficiencia energética y el consumo energético son variables que funcionan en conjunto ya que este último según la Oficina de Eficiencia Energética y Energía Renovable de los Estados Unidos (Office Of Energy Efficiency & Renewable Energy) “es la cantidad de energía necesaria para un sitio independiente de su actividad y del tipo de energético consumido sea Gas Natural, biomasa, Diesel, Carbón u otros, siendo está variable medida en kWh”.

La norma ISO 5000:1 tiene como enfoque la Gestión Energética mediante el establecimiento de un sistema para fomentar la eficiencia energética en la industria, sectores comerciales y organizaciones en general. En esta norma no instaura metas u objetivos, pero si orienta a las organizaciones procedimientos y maneras en que pueden emplearse para lograr una mejora en el rendimiento y la gestión energética. (NTC-ISO 50000:1, enero 2019) Dentro de las recomendaciones que establece la norma para lograr una mejora en la gestión energética se encuentran:

- Desarrollar una política de uso eficiente de la energía
- Invertir en tecnologías que ayuden a mejorar el modelo de consumo energético
- Contar con un plan para mejorar y desarrollar la comunicación entre las áreas
- Desarrollar proyectos para mejorar la gestión energética y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero
- Controlar y medir el consumo de energía y utilizar los datos para tomar decisiones
- Seguir y medir los resultados de las iniciativas adoptadas
- Analizar el rendimiento del Sistema de Gestión Energética y determinar dónde se puede aumentar la eficiencia
- Cumplir los requisitos legales y contractuales en materia de gestión energética
- Invertir en la mejora continua de la Gestión Energética

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

### 3. ESTADO DEL ARTE

---

En la edad de hierro el hombre ya implementaba técnicas empíricas de secado para el procesamiento de alimentos, tejido, artículos de barro entre otros. Los experimentos nacientes anteriores al siglo XVIII asociados al secado de trigo fueron el preámbulo para describir procedimientos de secado, para el siglo XIV en Londres se realizan procesos de secado de textiles, alimentos y papel buscando reducir la humedad contenida. La máquina de vapor no solo abrió las puertas a nuevas tecnologías de generación de energía y su transformación, si no que marcó el inicio de la era de la revolución Industrial, según Maupoey y colaboradores del libro “Introducción al secado de alimentos por aire caliente”, nos reseña el momento de reconocimiento de los secadores como equipos debidamente desarrollados:

En 1877 se crea la oficina alemana de patentes y un año más tarde se presenta la patente de un secador calentado por radiación y 4 años después se registra la patente de un secador a vacío. A principios de este siglo Hausbrand publica “Drying of air and steam” (1901) donde describe lo que puede ser considerado como el primer intento serio de aplicación de los métodos de ingeniería al cálculo de deshidratadores. En la actualidad puede afirmarse que la deshidratación es una operación unitaria plenamente desarrollada y con unos fundamentos teóricos bien establecidos (Maupoey, 2001) nos indica que,

La revolución industrial llega a Colombia entre las décadas de 1830 y 1850, con ella llega aparecen las primeras fábricas en Bogotá contando con equipos como Hornos, Martinetes, fundición entre otros, donde se le aprovecha en múltiples usos especialmente en el sector cerámico y tejidos de algodón (Mayor Alberto, párr. 2).

Los hornos hervidores o también conocidos en algunos sectores de la industria como Marmitas han tenido múltiples utilidades en la industria por ejemplo en el sector cementero, alimentos, textil, agroquímico entre otros, según su utilización varía el diseño y componente de una Marmita como lo pueden ser calentadas por vapor, gases de combustión indirectos o fuego directo, se pueden encontrar de tipo estacionario, con agitador, rotativo y de operación continua o discontinua; su principal ventaja frente a otros sistemas de calentamiento frente al proceso de secado, hervido o calcinado es que se realiza por medio de vapor o aire caliente, al no tener contacto con la materia a procesar se evita afectar otras variables que pueda tener el producto durante el proceso.

Algunos fabricantes de Hornos hervidores a nivel mundial son AMARC, INDUSDRYOVENS, IAC-INTL. Cada compañía brinda sean de tipo rotativos, estacionarios y alimentados a gas o eléctricos.

En Colombia podemos encontrar empresas que fabrican y comercializan Hornos Hervidores para diferentes sectores de la industria, los diseños para secado van desde operación con vapor directo o a gas, los proveedores más reconocidos son: Industrial Oñater, Industrias Protón, Citalsa, MGC, Pallomaro.

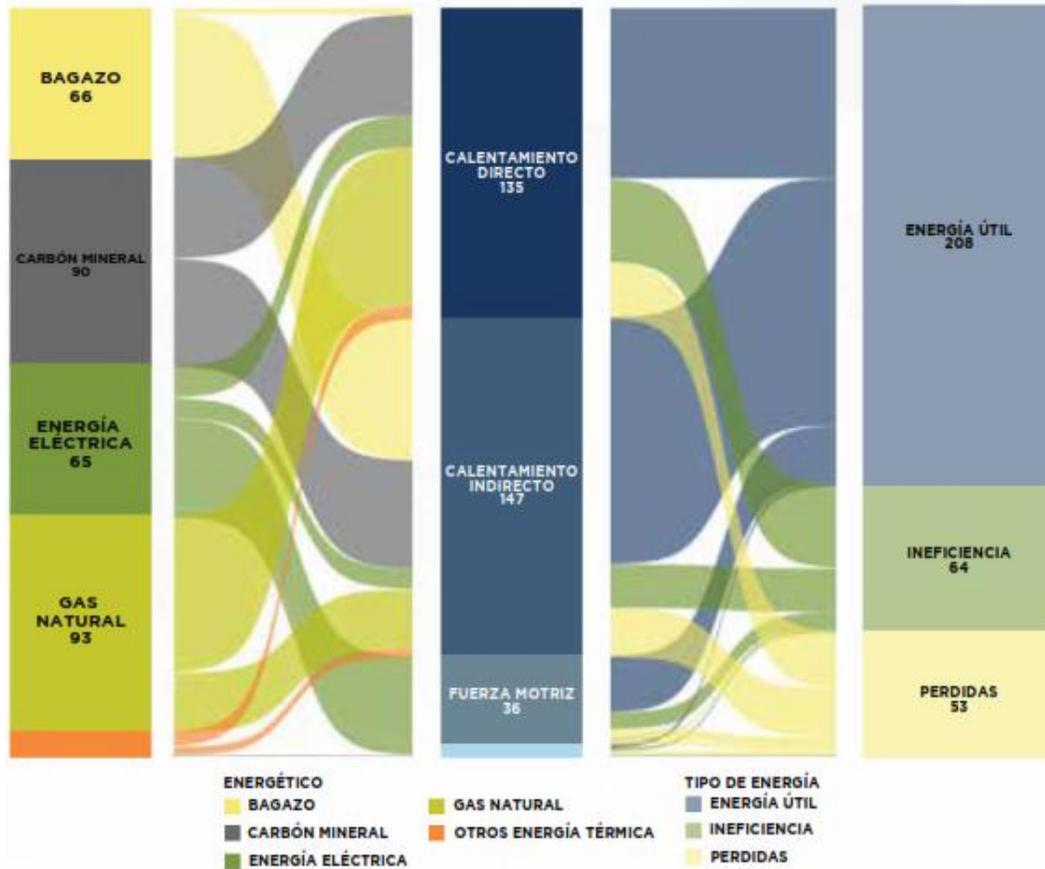
En los diferentes sectores de la industria se ha hecho necesario optimizar los sistemas energéticos que soportan los procesos productivos o de manufactura, se establecen metas que permitan alcanzar mejoras como disminuir la huella de carbono de sus operaciones, reducir costos operativos, mejorar la calidad o ser más competitivos, los diferentes sectores emplean múltiples métodos que permiten lograr alcanzar estas metas ya sea mediante estrategias de mantenimiento, optimización en los métodos de producción, overhaul de equipos o reemplazo por nuevas tecnologías según PROURE(2021):

El mayor potencial de eficiencia energética en el sector industrial se encuentra en los usos de calor directo, en los que se estima una eficiencia promedio del 55%

cuando se podrían alcanzar niveles de 68% o incluso del 80% (BEU<sup>1</sup>, UPME 2018) con el BAT<sup>2</sup>.(p. 64).

**Figura 9**

*Balance Energético de combustibles en el sector industrial Colombiano*



*Nota.* Adaptado del Plan Energético Nacional Colombia: Ideario Energético 2050, pg. 64

El panorama actual en Colombia en el sector energético muestra oportunidades para realizar un uso racional de la energía, siendo el sector térmico uno de los que más oportunidades ofrece y al cual lo representa equipos como hornos y calderas, el enfoque de la gestión energética va desde mejorar la transferencia de calor a las materias primas procesadas, el aprovechamiento de calor residual, el uso de combustibles óptimos o la implementación de planes de gestión energética adecuados.

En Colombia según el PROURE (2021), “el balance energético arroja en segunda posición como los principales demandantes el sector industrial, donde el gas natural

<sup>1</sup> BEU: Balance de energía útil empleado para comparar la cantidad de energía que consumen las tecnologías actualmente en nuestro país.

<sup>2</sup> El BAT hace referencia a las mejores tecnologías disponibles a escala nacional o internacional.

 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL  TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

predomina como principal fuente de energía con un 34% y 30% Carbón Mineral para el calentamiento indirecto”.

Para implementar mejoras en sistemas energéticos industriales donde se soportan procesos o se transforman productos es fundamental identificar y conocer las condiciones de operación actuales del sistema lo que permitirá estudiar y diseñar posibles mejoras que optimicen el funcionamiento del equipo.

En las investigaciones realizadas no se han obtenido valores de referencia para la eficiencia de Hornos hervidores o secadores por transferencia de calor por conducción, sin embargo se encuentran según el estudio realizado por Cerquera y Pastrana (2014), en la evaluación energética de hornos tradicionales para curado de tabaco se habla de eficiencias entre un 60 y 65%; otro estudio de Biset y Ferreyra (2013), en sus conclusiones hablan de eficiencias sobre el 80% para hornos de Refinería mediante la evaluación y comportamiento de los Hornos durante operación

En la industria se encuentran diferentes tipos de hornos los cuales emplean diferentes tipos de combustibles como lo son el Gas Natural, GLP(Gas licuado de petróleo), Carbón, Biogás; su función principal es reducir o eliminar un porcentaje determinado de humedad y dar características como dureza, peso, dimensiones entre otras mediante el calentamiento directo o indirecto del producto que ingresa al equipo, los requerimientos del proceso definen la calidad que debe llevar el vapor y si su uso está en contacto directo con el producto o es transversal al proceso. En la línea de las Marmitas se pueden encontrar equipos que son diseñados para secar productos estos son suelen conocerse como Marmitas para Calcinado los cuales se asemejan a hornos hervidores donde la fuente de calor tiene contacto indirecto con el producto y puede operar de manera continua o discontinua.

Como parte de la gestión energética integral a la que se viene acogiendo la industria Colombiana mediante Estándares como la norma ISO<sup>3</sup> 50000:1 buscando ser más sostenibles y amigables con el medio ambiente se ha identificado puntos clave en el sector de industrial para mejorar la eficiencia en los equipos que demandan energía térmica, basados en el uso de gas natural, optimización de sistemas de calentamiento centralizado y descentralizado.

---

<sup>3</sup> La ISO 50000:1 es una normativa internacional que tiene como objetivo mantener y mejorar el sistema de gestión de energía de una organización

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

#### 4. METODOLOGÍA

---

Se requiere partir de conocer el impacto del equipo dentro del proceso y la situación actual en la que opera el equipo, esta información se obtendrá desde el área de producción, el laboratorio y mantenimiento. La caracterización de la Marmita permite establecer el punto de partida para la evaluación de la eficiencia energética del equipo la toma de datos de las variables de temperatura requerida en el proceso, temperatura de salida de gases, tiempos de funcionamiento y consumo de combustible durante la operación del equipo se registra al día de hoy ayudando al área de producción a tener una trazabilidad del funcionamiento del equipo; a su vez mantenimiento es clave para identificar sistemas de aislamiento y las zonas de pérdida de calor. Se requerirá caracterizar la composición de los gases de salida para determinar el estudio de eficiencia y calor disponible.

Para llevar a cabo dicho estudio se empleará el equipo objeto del caso, el sistema de captación de datos por PLC y el modelo de Balance de masa y energía con lo que se partirá de las condiciones actuales del sistema. La evaluación de la propuesta de optimización del equipo partirá de la investigación desarrollada en esta monografía donde se plantean las buenas prácticas como las norma ISO 50000:1, UPME, PROURE y otras mejoras que partirán de los conocimientos obtenidos durante la especialización de Gestión Sistemas Energéticos Industriales en la Institución Universitaria ITM los cuales permitirán evaluar desde el funcionamiento técnico del equipo y sus componentes analizar el estado actual del equipo y las posibles mejoras a implementar.

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## 5. CARACTERIZACIÓN DE MARMITA

La marmita a evaluar observada en la Figura 10 es empleada para el calcinado de un mineral no metálico, su operación parte de recibir por una compuerta superior el mineral a procesar el cuál ingresa directamente a la olla y es almacenado y agitado al interior de esta durante 60 a 90 minutos según el porcentaje de humedad que tenga el mismo, allí el mineral recibe energía calorífica por medio del aire que se calienta en el interior a través de la transferencia de calor de las paredes de la olla y que a su vez la pared recibe los gases calientes del quemador de manera distribuida; de este modo es retirado un porcentaje de masa de agua por medio del aire caliente allí concentrado donde la temperatura es controlada por las termocuplas instaladas en los diferentes puntos del equipo hasta alcanzar los 165 grados Celsius, para posteriormente ser descargado el mineral por una compuerta inferior al siguiente proceso.

### Figura 10

*Marmita o Calderín para secado de mineral no metálico.*



*Nota.* Elaboración propia.

Las componentes principales que componen la Marmita como se pueden ver en la figura 11, son:

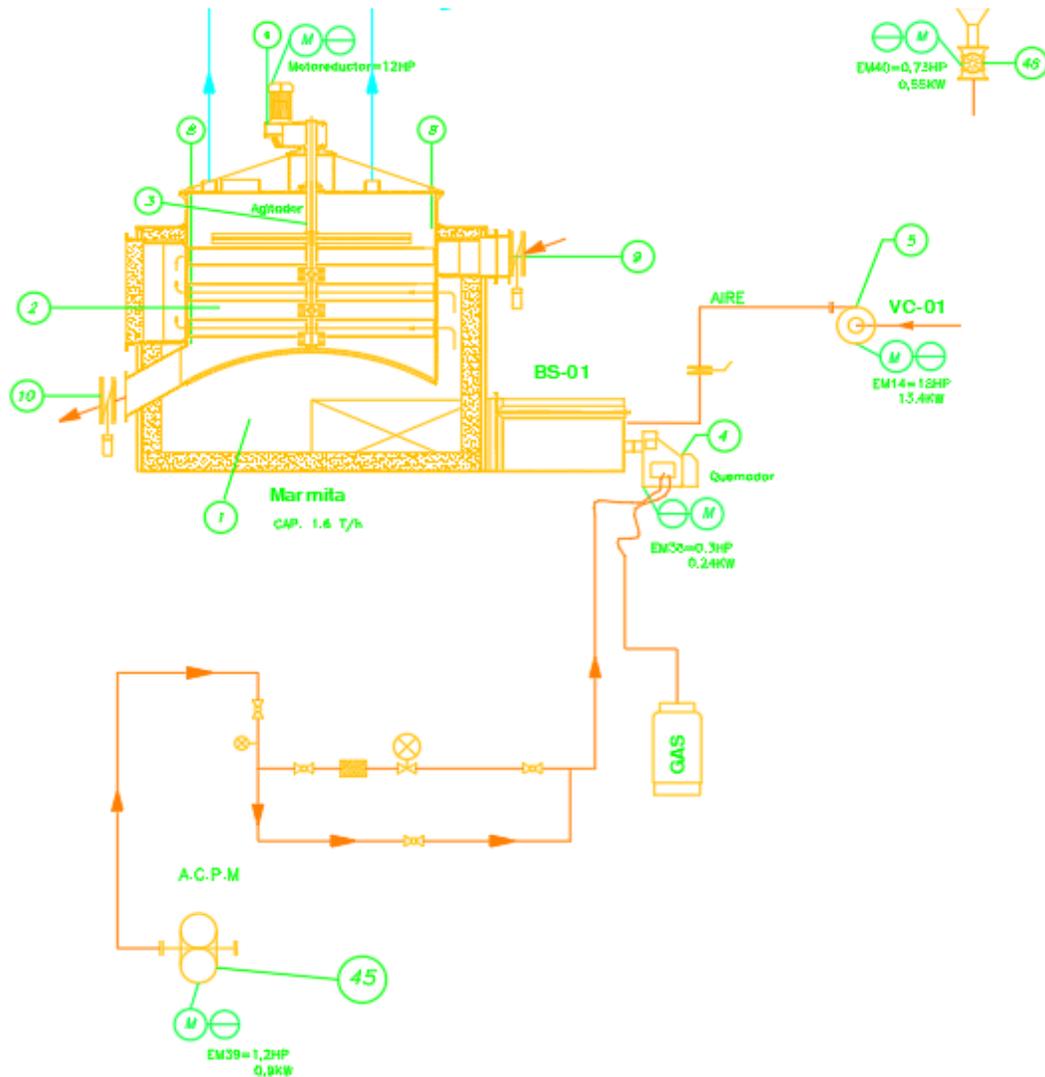
1. Hogar
2. Olla
3. Agitador
4. Quemador

 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

5. Ventilador
6. Motor reductor
7. PLC
8. Termocuplas
9. Entrada Materia prima
10. Salida producto

**Figura 11**

*Componentes Principales de la Marmita*



*Nota.* Elaboración propia

Los sistemas de servicio para el funcionamiento del equipo son: alimentación eléctrica y red de gas natural.

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

El hogar está conformado por un cuerpo metálico exterior e interior como se visualiza en la figura 12, su material es en acero al carbón el cual hace parte de la estructura general del equipo, en medio de estos dos cuerpos se encuentra el material de aislamiento térmico siendo este fibra de vidrio marca Max Wool referencia LTS-6-1 siendo esta clave para reducir las pérdidas de calor al exterior y garantizar un óptimo funcionamiento del equipo conservando en mayor medida el calor suministrado por el quemador, ejemplo de esto es que la temperatura que reporta el exterior de la marmita es de esta en hasta 56 grados Celsius en las zonas completamente aisladas.

**Figura 12**

*Cuerpo exterior, aislamiento y olla de la marmita.*



*Nota. Elaboración propia*

La olla es un cuerpo metálico cilíndrico en acero al carbón calibre 0.25 pulgadas y tiene como función principal contener el producto de flujo periódico, procesarlo al interior y posteriormente entregarlo al siguiente proceso. Durante la estancia del producto allí se retira la humedad por medio del calor entregado por el quemador, el aire caliente que este genera no entra en contacto con el producto procesado. Su capacidad de almacenamiento por carga es de 1600 kg.

El agitador observado en la figura 13, está conformado por un eje con aspas en acero inoxidable ubicado en el centro e interior de la olla; este es accionado por un moto reductora de 10 hp de potencia, ubicado en la parte superior exterior de la Marmita, su función es mezclar el producto para lograr una homogenización de la temperatura

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

absorbida, con el objetivo de que la eliminación de humedad sea lograda en el porcentaje requerido para todo el producto

### Figura 13

*Agitador de olla y Marmita*



*Nota.* Elaboración propia.

La marmita cuenta con un sistema de recuperación de calor residual generado durante la combustión, este es utilizado para realizar el precalentamiento de aire en el quemador. Los gases calientes salen del hogar de la marmita con una temperatura de hasta 435 °C, pasando por un intercambiador de calor donde estos transfieren energía al aire para combustión que es usado por el quemador.

Se cuenta con un quemador (Figura 14) de llama plana tipo Swirl, según Legrand (2008) “ Esto consiste en generar chorros con giro que inducen poca pérdida de presión frente a otros sistemas, y evitan problemas de ensuciamiento o de puntos calientes” el cual puede operar con gas natural principalmente o ACPM en casos de emergencia; un venturí es el encargado de permitir la entrada de aire, el electrodo es encargado de realizar la ignición y posteriormente generar la llama para iniciar el proceso de generación de aire caliente al interior del hogar. La potencia térmica es de 300 kW (1.023.642.49 Btu/h).

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

**Figura 14**

*Quemador de Gas Natural de Llama plana*



*Nota. Elaboración propia*

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## 6. BALANCE DE MASA Y ENERGÍA MARMITA

---

El balance de masa y energía se llevarán a cabo con el propósito de tener un diagnóstico energético de la Marmita, donde se partirá de un análisis de los gases producto de la combustión, la temperatura de las paredes y del medio donde se encuentra el equipo, el análisis realizado será efectuado como un Horno Hervidor.

En los cálculos a realizar se tomará como referencia la composición química y propiedades físicas del gas natural indicados por EITI-Colombia, Gas Natural Fenosa (2017), esta se indica en la tabla 1:

**Tabla 1**

*Composición típica del gas natural*

Reactivo	Formula Química	Composición volumétrica (%)
Metano	CH <sub>4</sub>	81.86
Etano	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	11.61
Propano	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	1.92
I-Butano	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.23
N-Butano	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.22
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	0.9
Dióxido de Carbono	CO <sub>2</sub>	3.18

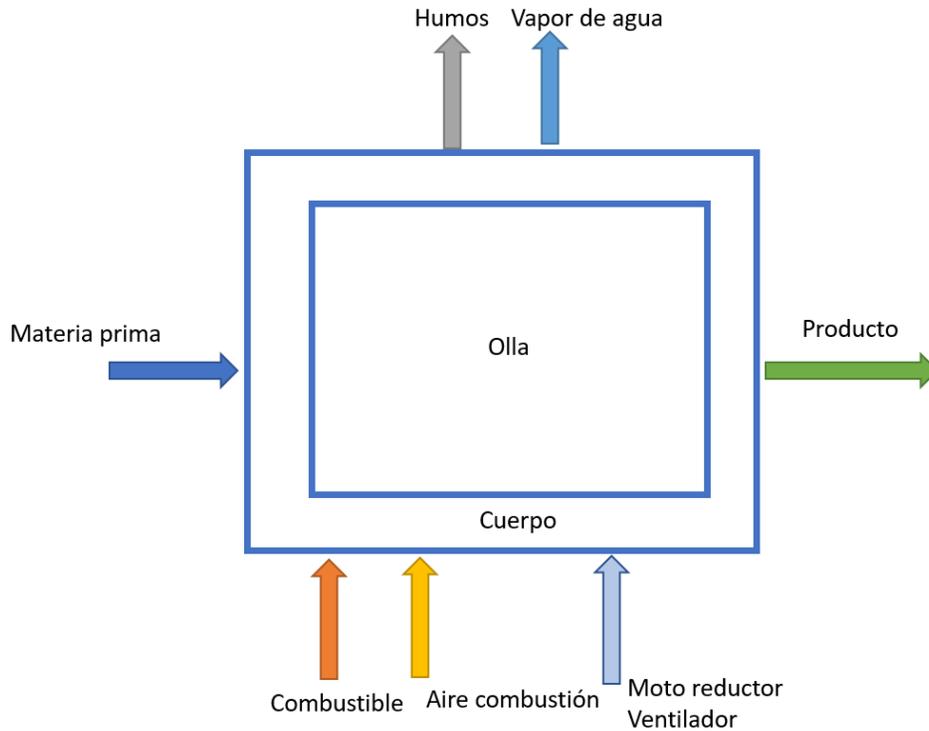
Nota. Tomado de EITI Colombia, (<https://www.eiticolombia.gov.co/es/informes-eiti/informe-2016/perfiles-hidrocarburos/perfiles-gas/>)

Las condiciones de referencia para el caso de estudio son: temperatura de 22.5 grados °C y presión atmosférica de 1 atm.

Para la realización de balance de masa y energía es necesario definir la frontera y los elementos que hacen parte de la operación de la Marmita, así:

**Figura 15**

*Frontera del sistema a analizar*



*Nota. Elaboración Propia*

### 6.1 BALANCE ESTEQUIMETRICO IDEAL – REAL

Dado que realizar un análisis de gases en el equipo se dificulta por factores no controlables se tendrá como referencia una medición realizada al equipo trabajando en condiciones normales de operación y a régimen de temperatura, dicha medición fue reportada por la empresa Soluciones energéticas y de Automatización, la composición de los gases de combustión se evidencia en la tabla 2:

**Tabla 2**

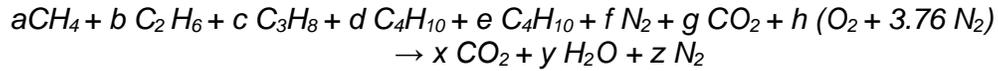
*Composición de Gases de Combustión*

Marmita (Calderín)	O <sub>2</sub> (%)	CO (ppm)	CO <sub>2</sub> (%)	Temperatura Gases (°C)
2	1.4	50	11	209

La importancia de conocer la relación aire- combustible en el análisis de combustión del sistema radica en identificar la mínima cantidad de aire necesaria requerida para una combustión completa. De este modo se tomarán los valores reportados de la Tabla 1 para

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

realizar el balance estequiométrico y posteriormente se realizará el mismo procedimiento con los valores medidos durante la operación del equipo reportados en la tabla 2.

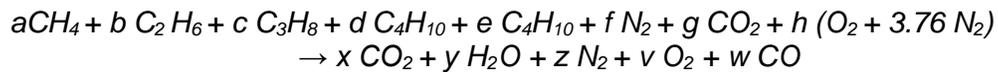


**Tabla 3**

*Valores para el balance estequiométrico ideal*

Reactivos		Productos	
a	0.8186	x	0.5214
b	0.1161	y	2.2009
c	0.0192	z	5.97
d	0.0023		
e	0.0022		
f	0.009		
g	0.0318		
h	1.59		

Realizando el balance nuevamente luego de añadir la composición de los gases relacionada en la tabla 2, se obtiene:



**Tabla 4**

*Valores para el balance estequiométrico real*

Reactivos		Productos	
a	0.8186	x	0.578
b	0.1161	y	2.2009
c	0.0192	z	6.07
d	0.0023	v	0.014
e	0.0022	w	0.005
f	0.0092		
g	0.035		
h	1.612		

9: De este modo podemos obtener la relación aire combustible empleando la ecuación

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

$$AC = \frac{h(4.76) m \text{ aire}}{m \text{ combustible}}$$

Donde:

- Peso molecular del aire (m aire) = 29 kg/kmol
- Peso molecular del combustible (m combustible) = 16 kg combustible

Por lo tanto, la relación aire combustible ó factor de aireación corresponde a:

- A/F Estequiométrico: = 13.71
- A/F Real = 13.9

Para conocer el exceso de aire podemos emplear la siguiente expresión:

$$\% \text{ Exceso de aire} = \frac{\text{Aire real} - \text{Aire estequimetrico}}{\text{Aire estequimetrico}} \times 100 \quad (11)$$

Obteniendo un exceso de aire = 1.38 %

El exceso de aire recomendado para equipos de combustión con quemador para gas natural se encuentra entre el 5 y 10% según el Manual De Mantenimiento Centrado En La Eficiencia Energética Para Sistemas Industriales (2009). (Pg. 33).

## 6.2 BALANCE DE MASA

Se hace necesario partir de las entradas y salidas en el sistema para finalmente conocer la diferencia del balance de masa. De este modo el balance de masa a la entrada lo podemos definir para el combustible, la materia prima y el aire de combustión; para la salida se calcula para los humos, el producto y vapor húmedo.

### 6.2.1 BALANCE DE MASA DE ENTRADA

Para determinar la masa del combustible es necesario conocer su densidad ( $\rho$ ) empleando el siguiente modelo:

$$\rho = \frac{PM}{RT} \quad (12)$$

Donde:

- Presión atmosférica del sitio (P) = 1.157 atm
- Peso molar del gas natural (M), valor obtenido de Nedgi - Grupo Naturgy =  $18.02 \frac{kg}{kmol}$
- Constante universal de los gases (R) =  $0.082 \frac{atm.l}{mol.K}$
- Temperatura en Kelvin (K) = 295.65

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

- Flujo volumétrico ( $\dot{v}$ ), valor obtenido de datos registrados en el proceso productivo =  $32 \frac{m^3}{h}$

Donde el flujo másico del combustible se obtiene de la siguiente manera:

$$\dot{m}_c = \dot{v} \cdot \rho \quad (13)$$

Dado la operación del equipo y los datos registrados en el proceso se conoce que hay un flujo de  $905 \frac{kg}{h}$  de materia prima.

Para el conocer el flujo másico del aire empleamos la ecuación 9 y 13, donde:

$$\dot{m}_a = \dot{m}_c \cdot \frac{A}{F} \quad (14)$$

El flujo de masa total a la entrada =  $1312.16 \frac{kg}{h}$

### 6.2.2 BALANCE DE MASA DE SALIDA

Para determinar la masa de los humos es necesario emplear la ecuación 14 y 13 empleando el siguiente modelo:

$$\dot{m}_h = \dot{m}_c + \dot{m}_a \quad (15)$$

Teniendo en cuenta la eliminación del 50% de humedad de la materia prima ingresada podemos definir respecto al peso inicial de la materia prima que el flujo másico para el producto y para el vapor húmedo corresponde a  $452.5 \frac{kg}{h}$  respectivamente.

El flujo de masa total a la salida =  $1312.163 \frac{kg}{h}$

### 6.3 BALANCE DE ENERGÍA

Al igual que en el balance de masa se hace necesario partir de las entradas y salidas en el sistema para finalmente conocer la diferencia de la energía suministrada al sistema y la aprovechada. De este modo el balance de energía a la entrada lo podemos definir para el combustible, la materia prima, el quemador, el ventilador, el moto reductor y el aire de combustión; para la salida se calcula para los humos, el producto y vapor húmedo.

#### 6.3.1 BALANCE DE ENERGÍA DE ENTRADA

Partiendo del poder calorífico inferior del combustible equivalente a  $9.8 \frac{kW.h}{Nm^3}$ , el valor empleado es suministrado por el área de mantenimiento de la empresa y el flujo másico del combustible obtenido en la ecuación 13, podemos definir la energía del combustible como:

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

$$Q_{combustible} = \dot{m} \cdot PCI \quad (16)$$

Para conocer la energía de la materia prima consideramos el flujo másico de entrada  $905 \frac{kg}{h}$ , el calor específico (cp) del mineral siendo este de  $1 \frac{kJ}{kg.K}$ , valor obtenido de Termodinámica Yunus Cengel, Novena Edición, pg. 910 Tabla A3, se toma el valor de referencia del yeso como material homólogo al mineral empleado en este caso de estudio para el calor específico, la temperatura ambiente promedio registrada en el área de operación  $25.5^{\circ}C$  y la temperatura ambiente  $22.5^{\circ}C$  de referencia, por lo tanto se puede emplear la ecuación 5:

$$Q_{mp} = \dot{m} \cdot cp \cdot \Delta T \quad (17)$$

La energía del aire de combustión es determinada empleando el flujo másico del aire  $379.635 \frac{kg}{h}$ , el calor específico (cp)  $1.005 \frac{kJ}{kg.K}$ , a temperatura de referencia  $22.5^{\circ}C$  y con la temperatura ambiente promedio en el proceso  $25.5^{\circ}C$ , mediante la siguiente expresión se determina la energía del aire de combustión.

$$Q_{aire\ combustión} = \dot{m} \cdot cp \cdot \Delta T \quad (18)$$

El moto reductor tiene una potencia de 10 kW y el ventilador de 14 kW  
Energía total de entrada = 338.67 kW

### 6.3.2 BALANCE DE ENERGÍA DE SALIDA

Para determinar la energía de los humos consideramos el flujo másico de salida de los humos  $407.163 \frac{kg}{h}$ , la temperatura de salida de los humos  $435^{\circ}C$  y la temperatura ambiente  $22.5^{\circ}C$ , a su vez será necesario emplear la ecuación 5, sin embargo, el calor específico (cp) de los gases debe ser determinado mediante el cp ponderado y la temperatura promedio, obteniendo los siguientes valores descritos en la Tabla 5:

**Tabla 5**

*Calor específico ponderado para los humos de combustión*

<b>CP Ponderado Productos Combustión</b>	
CO <sub>2</sub>	0.108
O <sub>2</sub>	0.0016
CO	0.0061
H <sub>2</sub> O	0.312
N <sub>2</sub>	0.758
$c_{phumos} = 1.185 \frac{kJ}{kg.K}$	

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Para lo cual se emplea la expresión:

$$Q_{humos} = \dot{m} \cdot c_{p_{humos}} \cdot \Delta T \quad (19)$$

Para conocer la energía del vapor de agua H<sub>2</sub>O, será necesario conocer la entalpía del vapor de agua a 435 °C y 1 atm, siendo 3541.63  $\frac{kJ}{kg}$ ; valor extraído del Ebook de Transferencia de Calor y Masa (Y.A. Cengel & Ghajar, tabla A6, pg 892. Novena Edición).

El flujo másico del vapor de agua se calcula a partir del flujo másico de los humos a la salida y la fracción másica correspondiente a 0.167 kg; por lo tanto el flujo másico del H<sub>2</sub>O a la salida corresponde a 58.64  $\frac{kg}{h}$ , de esta manera se emplea nuevamente la ecuación 5 para obtener la energía del vapor de agua a la salida del sistema.

$$Q_{H_2O} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (20)$$

El CO (Monóxido de Carbono), hace parte de los inquemados en el proceso de combustión, por lo tanto, tiene una energía residual que debe tenerse en cuenta, para la cual se requiere la temperatura de los gases 435 °C, el flujo másico 2.21  $\frac{kg}{h}$  obtenido a partir de la fracción másica del mismo, temperatura ambiente y poder calorífico 10106  $\frac{kJ}{kg}$ , la energía del CO se puede obtener mediante la siguiente expresión:

$$Q_{CO} = \dot{m} \cdot (c_p \cdot \Delta T + PC) \quad (21)$$

La energía del producto procesados es determinada mediante la expresión:

$$Q_{CO} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T + PC \quad (22)$$

Para la energía por radiación analizamos el sistema como la energía que irradia la superficie caliente del cuerpo de la Marmita al medio, se requiere emplear las siguientes variables:

- Emisividad del material  $\varepsilon$ , valor obtenido de Fluke Process Instruments: 0.99
- Constante de Boltzman  $\sigma$ :  $5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$
- Área de la superficie de la base, la tapa y pared, valor obtenido mediante el software CAD Inventor donde fue modelada la Marmita: 32.95  $m^2$
- Temperatura de la superficie (K): 80+273.15K
- Temperatura del fluido (K): 22.5+273.15K

Por lo tanto, la energía por radiación se obtiene de:

$$Q_{rad} (kw): \frac{\varepsilon \cdot \sigma \cdot A_s \cdot (T_s^4 - T_o^4)}{1000} \quad (23)$$

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

La energía de convección es analizada de la siguiente manera del aire caliente a la pared de la olla y del aire caliente a la pared del cuerpo, para lo cual se requiere emplear las siguientes variables:

- Área total de la superficie de la olla:  $15.7 \text{ m}^2$
- Área total de la superficie del cuerpo:  $32.95 \text{ m}^2$
- Temperatura del fluido ( $T_f$ ) valor promedio obtenido de las lecturas realizadas durante operación del equipo por medio de termocuplas :868 °C
- Temperatura promedio del fluido ( $T_{prom}$ ): 446.75 °C ó 719.9 K
- Temperatura de la superficie: 25.5 °C
- Coeficiente conductivo del fluido:  $0.025 \frac{W}{m.K}$
- Longitud característica ( $L_c$ ), valor obtenido mediante el software CAD Inventor= 6.3 m
- Numero de Prandtl (PR), valor obtenido del Ebook de Transferencia de Calor y Masa (Y.A. Cengel & Ghajar, Tabla A-15I, Apéndice 2, pg. 887. Novena Edición). Se asume que el fluido es aire caliente a 1 atm de presión: 0.7047
- Gravedad:  $9.8 \frac{m}{s^2}$ .
- Viscosidad cinemática ( $\nu$ ), valor obtenido de la Tabla A-15I, Apéndice 2, pg. 887 - Ebook de Transferencia de Calor y Masa (Y.A. Cengel & Ghajar, Novena Edición). Se asume que el fluido es aire caliente a 1 atm de presión:  $9.884 \times 10^{-5} \frac{m^2}{s}$

A partir de las siguientes expresiones es calculada la energía por convección en el sistema definido:

Difusividad térmica

$$\alpha = \frac{Pr}{\nu} \quad (24)$$

Coeficiente expansión volumétrica

$$B = \frac{1}{T_{prom}} \left[ \frac{1}{K} \right] \quad (25)$$

Número de Rayleigh

$$RaL = \frac{g.B.(T_f - T_s).L_c^3}{\nu * \alpha} \quad (26)$$

Número de Nusselt

$$Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387.RaL^{\frac{1}{6}}}{\left[ 1 + \left( \frac{0.492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2 \quad (27)$$

Coeficiente convectivo

 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

$$h = \frac{Nu.k}{Lc} \left[ \frac{W}{m^2.K} \right] \quad (28)$$

Energía por convección

$$Q_{conv} = \frac{As.h.(Tf-Ts)}{1000} [kW] \quad (29)$$

Para calcular la pérdida de energía por aislamiento se emplea un modelo de cálculo propio donde se parte del supuesto de asumir el cuerpo de la marmita como un tubo aislado para el cuál se tienen en cuenta los siguientes datos descritos en la tabla 6:

**Tabla 6**

*Variables de para cálculo de pérdida de energía por aislamiento*

Datos de Entrada	Abrev.	Unidades	Valores
Diámetro exterior tubo	do	in	118
Schedule	sch		40
Diámetro exterior tubo	do	m	2,9972
Espesor del material aislante	esp	m	0,025
Temperatura de operación	Top	k	719.9
Temperatura supuesta de superficie termoaislante	Tsup	k	333,15
Temperatura calculada superficie	Tsc	k	368.57
Temperatura ambiente	Ta	k	295,65
Conductividad térmica del aislante	kais	$\frac{W}{m^2.K}$	0,04
Velocidad del viento	V	m/h	5000
Emisividad de la superficie aislada	Emss		0,9
Coeficiente de forma tubería	C	1,016	

Los resultados obtenidos a partir del modelo de cálculo son se describen en la tabla 7:

 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

**Tabla 7**

*Calculo de pérdida de energía por aislamiento*

Variable	Abr	Unidades	Resultados
Calculo del coeficiente de transferencia de calor por convección	hc	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$	6,5414
Calculo del coeficiente de transferencia de calor por radiación	hr	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$	1,103012278
Calculo del coeficiente global de transferencia	hs	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$	7,6444
Calculo del flujo de calor por unidad de área	q	$\frac{W}{m^2}$	5336.91
Verificación de la temperatura de superficie	tsc	K	368.57
Calculo del flujo de calor por unidad de longitud	Q	$\frac{KW}{m}$	50.25

Energía total de salida = 338.22 kW

En la tabla 8, se registraron los resultados obtenidos para las diferentes expresiones descritas en el balance de energía, es importante tener en cuenta que los modelos definidos han sido considerados para un estado estable y estacionario del sistema.

**Tabla 8**

*Resultados de las expresiones descritas en el balance de energía*

Variables	Resultado	Unidades
Q combustible	313.16	kW
Q materia prima	0.754	kW
Q moto reductor	10	kW
Q Ventilador	14	kW
Q aire combustión	0.3179	kW
Q humos	113.38	kW
Q H2O	63.11	kW
Q CO	6.63	kW
Q producto	17.91	kW
Difusividad Térmica	0.000140	$\frac{m^2}{s}$
Coeficiente expansión volumétrica	0.00139	1/K
Número de Rayleigh para cuerpo	$5.3017 \times 10^{11}$	
Número de Nusselt para cuerpo	899.68	
Coeficiente Convectivo para cuerpo	2.6153	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$
Q convección cuerpo	72.87	kW
Q aislamiento	50.25	kW

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

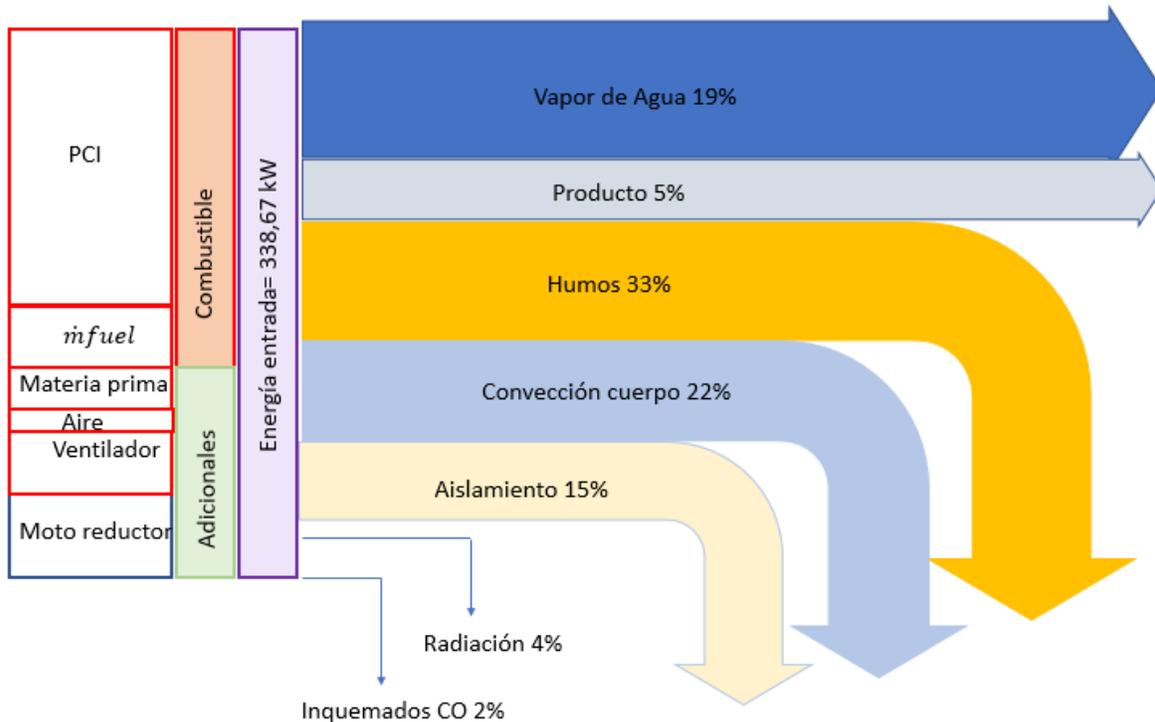
Para determinar la eficiencia térmica del equipo no tendremos en cuenta la energía necesaria para calentar la materia prima y ser transformada, ya que el funcionamiento del equipo se centra en calentar o retirar humedad de la materia prima, por lo tanto, la eficiencia será determinada mediante la expresión:

$$eficiencia(\eta) = \frac{Q_{H_2O} + Q_{producto}}{E_{in}} \cdot 100\% = 23.9\% \quad (30)$$

Este valor de eficiencia, aunque es bajo es comparable con la eficiencia obtenida por Trujillo L. Sergio (2020). En el "Diagnóstico Energético De Un Horno De Fundición", siendo esta de 18.66%.

**Figura 16**

*Distribución de Energía del proceso*



*Nota. Elaboración propia*

Según la distribución de las energías se puede deducir que las pérdidas de calor más representativas están asociadas al proceso de convección y aislamiento siendo 22% y 15% respectivamente. Los Humos, aunque representan un valor porcentual significativo con un 33% donde se pueden contemplar para un análisis de la implementación de un intercambiador de calor para el equipo no objeto del alcance actual.

El vapor de agua hace referencia a la cantidad de humedad retirada de la materia prima propósito para el cuál es empleada la Marmita. El producto representa una pérdida de un 6% dado su poca capacidad para recibir y almacenar energía calorífica.

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Las emisiones de CO<sub>2</sub> recomendadas deben ser del 10% para el Gas natural, el porcentaje de oxígeno debe ser de 1% a 4% máximo y no debe existir CO, según el Manual De Mantenimiento Centrado En La Eficiencia Energética Para Sistemas Industriales (2009). (pg. 32).

Ya que por ser un equipo con algunas similitudes en su forma constructiva a una caldera se puede tomar como referencia de eficiencia energética según la Guía de sistemas de Vapor eficientes, Área Metropolitana Valle del Aburra, (2020) que las mejoras del aislamiento térmico pueden representar un aumento del rendimiento del combustible entre el 3 y 8% según lo indica.

## 7. PROPUESTA DE MEJORA Y BENEFICIOS ECONOMICOS

---

Las políticas de gestión energética que vienen implementando a nivel industrial deben ser ejecutadas de manera tal que los procesos o se vean afectados, haya un uso racional y una mejora de la eficiencia de los equipos.

En esta propuesta de mejora se plantean adecuaciones necesarias a implementar en el equipo con el objetivo de mejorar la eficiencia actual disminuyendo algunas de las pérdidas de energía que se han logrado identificar.

Actualmente se evidencia una temperatura máxima en la superficie del equipo de hasta 190°C respecto a la deseada en el proceso siendo esta de 60 °C. esto es debido a que no se tiene el espesor de aislamiento necesario en compuertas de inspección que posee el equipo y en los alrededores más cercanos al quemador.

Como se visualiza en las imágenes a continuación las temperaturas de la superficie fueron registradas empleando un termómetro de láser infrarrojo marca EXTECH:

### Figura 17

*Lectura de temperatura en la superficie exterior del piso de la Marmita*



*Nota. Elaboración propia*

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

**Figura 18**

*Lectura de temperatura obtenida en un agujero sobre la superficie*



*Nota. Elaboración propia*

**Figura 19**

*Lectura de temperatura sobre la superficie cerca de compuertas de inspección a 90° del quemador*



*Nota. Elaboración propia*

**Figura 20**

*Lectura de temperatura en alrededor de compuerta de inspección*



*Nota. Elaboración propia*

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

### Figura 21

*Lectura de temperatura en compuerta de inspección opuesta a la ubicación del quemador*



*Nota. Elaboración propia*

### Figura 22

*Lectura de temperatura a 1 m de distancia del quemador*



*Nota. Elaboración propia*

Al identificar una de las pérdidas más representativas en el sistema se propone:

Implementar un intercambiador de calor el cual entregue la energía de los gases de combustión al aire de entrada al quemador, con lo cual se logrará utilizar la energía residual correspondiente a 113.38 kW, para este caso se tiene en cuenta un intercambiador de calor de coraza y tubos recomendado por un fabricante local con un costo instalado de \$20.000.000 aproximadamente.

realizar el aislamiento adecuado con la manta de Fibra cerámica actual, la cual cuenta con las propiedades necesarias para su debido funcionamiento; la instalación de la manta térmica debe constar de un espesor de pared de 50 mm y cubrir toda la superficie de la pared del cuerpo de la Marmita.

Realizando el cálculo (Tabla 9) de pérdidas de calor por aislamiento para un tubo mediante el modelo de cálculo previamente empleado (Tabla 10), se establece que con la implementación de la mejora recomendada se obtiene una disminución de pérdida de energía por radiación de un 50%, esto representa una disminución de consumo de combustible de 6.6% como se puede ver en la tabla 11.

 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

**Tabla 9**

*Variables de para cálculo de pérdida de energía por aislamiento*

Datos de Entrada	Abrev.	Unidades	Valores
Diámetro exterior tubo	do	in	118
Schedule	sch		40
Diámetro exterior tubo	do	m	2,9972
Espesor del material aislante	esp	m	0,05
Temperatura de operación	Top	k	719.9
Temperatura supuesta de superficie termoaislante	Tsup	k	333,15
Temperatura calculada superficie	Tsc	k	335.35
Temperatura ambiente	Ta	k	295,65
Conductividad térmica del aislante	kais	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$	0,04
Velocidad del viento	V	m/h	5000
Emisividad de la superficie aislada	Emss		0,9
Coeficiente de forma tubería	C	1,016	

Los resultados obtenidos a partir del modelo de cálculo son se describen en la tabla 10:

**Tabla 10**

*Calculo de pérdida de energía por aislamiento*

Variable	Abr	Unidades	Resultados
Calculo del coeficiente de transferencia de calor por convección	hc	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$	6,5202
Calculo del coeficiente de transferencia de calor por radiación	hr	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$	1,103012278
Calculo del coeficiente global de transferencia	hs	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$	7,6232
Calculo del flujo de calor por unidad de área	q	$\frac{W}{m^2}$	2944.79
Verificación de la temperatura de superficie	tsc	K	335.35
Calculo del flujo de calor por unidad de longitud	Q	$\frac{KW}{m}$	27.72

Según los resultados obtenidos se realiza la evaluación económica de la propuesta de mejora a implementar (Tabla 11), teniendo en cuenta que las actividades serán ejecutadas por el personal de mantenimiento.

 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

**Tabla 11**

*Resultados de los ahorros, inversiones y ROI proyectados*

<b>Variable</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
Energía del combustible- Energía perdida con Aislamiento actual	263	kW
Energía del combustible con Aislamiento del aislamiento propuesto reduciendo en este el 50% de pérdidas	286	kW
$\Delta E$ -Combustible por aislamiento	23	kW
Combustible ahorrado	2	m <sup>3</sup> /h
Combustible ahorrado	6,7%	
Días del mes	24	
Tiempo operación día	22	h/ día
Tiempo operación mes	528	h/ mes
Combustible ahorrado al mes	1213.86	m <sup>3</sup> / mes
Consumo combustible al mes sin ahorro	16896	m <sup>3</sup> /h mes
Costo combustible	1550	\$/ m <sup>3</sup>
Ahorro combustible Costo mes	\$ 1.881485	\$/ mes
Ahorro combustible Costo año	\$ 22.577.819	\$/ año
Costo intercambiador de calor	\$ 20.000.000	
Cantidad aislante requerido	98.86	m <sup>2</sup>
Costo aislante	\$ 130.000	m <sup>2</sup>
Costo total	\$ 32.852.478	
<b>Payback</b>	1.46	años

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## 8. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

---

- El estudio de la eficiencia térmica del equipo arroja un valor de 23.9% el cuál puede ser considerado bajo respecto a los referenciados en el estado del arte, sin embargo, según la referencia citada en los resultados obtenidos se puede decir que es un valor comparativo viable para este tipo de análisis. Es importante mencionar que las implementaciones de las mejoras propuestas son económicamente viables desde el punto de vista financiero, aunque su implementación depende del recurso financiero disponible de la compañía. Se resalta la posibilidad de obtener métricas de diferentes variables del proceso lo que evita realizar altas inversiones iniciales para el estudio y paros de proceso. Dentro de las limitaciones encontradas se presenta la variabilidad del proceso productivo y claridad de las propiedades exactas de la materia a procesar; sin embargo, no se encuentran restricciones ya que los resultados de este estudio serán de evaluación económica para la empresa como mejora de impacto ambiental.
- Partir de la caracterización de la marmita permite establecer un punto de partida con información detallada sobre su actual estado de operación, incluyendo datos sobre su capacidad, funcionamiento y a su vez ser referenciada con equipos similares en funcionamiento pero que físicamente u operacionalmente puede presentar diferencias que influyen en el modo de análisis implementado para este equipo y en la identificación de partes específicas que pueden requieren mejoras.
- A través del método de balance y energía se conoce la eficiencia térmica en términos de la conversión de energía térmica a energía útil siendo 23.9%, sin embargo, también permitió conocer las pérdidas de energía en el sistema, además de las que mayor impacto generan como lo son humos con un 33%, convección 22% y aislamiento un 18%, cabe resaltar que esto permite establecer las propuestas de mejora definida como punto de partida para lograr un impacto en la eficiencia energética del equipo. Los resultados obtenidos permiten ser una referencia para futuras comparaciones y mejoras en la eficiencia.
- La cuantificación de los beneficios económicos de estas mejoras, como la reducción de costos de energía, la optimización del recurso, reducción de emisiones subrayan la importancia de tratar la eficiencia energética como como un impacto positivo en términos de resultados financieros como en la sostenibilidad del proceso, de este modo se resalta que al ser implementadas las mejoras se tiene un payback de 18 meses, esto permitiría obtener ahorros más representativos a partir de la libranza de la inversión inicial.
- En el trabajo realizado algunas consideraciones debieron ser asumidas como la composición química del combustible, así como la composición de los gases dado una medición realizada en años anteriores, por lo tanto, es importante emplear con

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

precisión los elementos que componen químicamente el combustible utilizado y en lo posible obtener mediciones ORSAT para los gases de combustión permitiendo estos dar un dato más preciso de la eficiencia del equipo. A su vez existen pérdidas por resistencia a la transferencia de calor que es importante identificar dado la capa de hollín que puede presentarse en las paredes de la olla durante la combustión generando ineficiencia en el proceso de calcinado.

- El quemador empleado en el equipo es de alta potencia lo que podría inferir en que su eficiencia en el proceso térmico depende de su ubicación, sin embargo, este debe llenar un volumen con el gas caliente y transferir este calor a la olla, para lo cual se plantea la posibilidad de instalar un segundo quemador a 180° con el objetivo de reducir la curva de tiempo para la ganancia de temperatura. Es necesario por lo tanto identificar su comportamiento e integrar factores como la programación actual del sistema, la reducción de los tiempos de calcinado y su viabilidad económica desde la mejora del proceso productivo.

	<b>INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

## REFERENCIAS

---

- Alberto Mayor Mora (2022) *Un parto de hierro, hidráulica y trabajo femenino e infantil*. <https://www.banrepcultural.org/biblioteca-virtual/credencial-historia/numero-151/el-nacimiento-de-la-industria-colombiana>
- Acosta P. Andrés, Salazar F. Andrés, Lanceta David, Antón V. Javier, Calderón C. Javier, Gay-Tarazona Luis, Vesga M. Natalia, Salamanca A. Sara. (2020). *Guía de Sistemas de Vapor Eficientes*. Área Metropolitana Valle del Aburra. Registro ISBN: 978-958-5560-12-3. <https://www.medellin.gov.co/es/wp-content/uploads/2021/09/Medellin-Sistemas-Vapor.pdf>
- CAEM Corporación ambiental Empresarial (2021). *Aislamientos Térmicos. Una Opción Para La Eficiencia energética*. <https://www.caem.org.co/noticias/aislamientos-termicos-una-opcion-para-la-eficiencia-energetica/>
- Campos A. Juan, Lora F. Edgar, Álvarez G. Karen. (2009). *Manual de Mantenimiento Centrado en la Eficiencia Energética para Sistemas Industriales*. Grupo De Gestión Eficiente De Energía, Kaí. Universidad Del Atlántico. Registro ISBN: 978-958-8123-66-0. Patente de invención No. 29069
- CCEE Consejo colombiano de Eficiencia Energética en su módulo Gestión Energética [http://cceecol.org/newweb\\_ccee/areas-de-interes/gestion-energetica/eficiencia-energetica/](http://cceecol.org/newweb_ccee/areas-de-interes/gestion-energetica/eficiencia-energetica/)
- Delgado Santana, Jiménez Borges, Reinier, Lapido Rodríguez, Margarita Josefa. (2017). *Eficiencia Energética En El Uso Del Vapor Para La Cocción De Alimentos*. El Hombre y la Máquina, núm. 48, enero-junio, 2017, pp. 29-36. Universidad Autónoma de Occidente. ISSN: 0121-0777. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=47849964003>
- Enciclopedia University of Calagary. Eficiencia. [https://energyeducation.ca/Enciclopedia\\_de\\_Energia/index.php/Eficiencia](https://energyeducation.ca/Enciclopedia_de_Energia/index.php/Eficiencia)
- Gloria Lotha (2021) *MacTutor History of Mathematics Archive - Biography of Denis Papin*. <https://enciclopedia.banrepcultural.org/index.php/Marmita>
- Imbett Ortega. D. (2022). *Diseño de una marmita con una capacidad de 80 litros para la producción de yogurt*. [Tesis de Pregrado. Universidad Santo Tomás]. Repositorio Institucional Universidad Santo Tomás. <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/46045/2022danielimbett.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Ing. Qco. Sebastián Biset, Ing. Qco. Martín E. Ferreyra (2013). *Calculo Riguroso De Hornos De Eficiencia De Proceso*. AAIQ, Asociación Argentina de Ingenieros Químicos – CSPQ. [https://www.aaiq.org.ar/SCongresos/docs/04\\_025/papers/04a/04a\\_1406\\_538.pdf](https://www.aaiq.org.ar/SCongresos/docs/04_025/papers/04a/04a_1406_538.pdf)

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Manrique Moreno. V. (2010). *Desarrollo Tecnológico E Innovación En Marmitas Auto generadoras De Vapor Como Alternativa Para Promover Sistemas De Calentamiento Descentralizado En Aplicaciones De Procesamiento De Alimentos. Grupo de Investigación en Fluidos y Energía GIFE. Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico de Gas. Parque Tecnológico UIS Santander. Colombia. Volume 10 (MET&Flu 10).* [http://cdtdegas.com/images/Descargas/Nuestra\\_revista/MetFlu11/5Marmita.pdf](http://cdtdegas.com/images/Descargas/Nuestra_revista/MetFlu11/5Marmita.pdf)

Néstor Enrique Cerquera Peña, Eduardo Pastrana Bonilla (2014). *Evaluation Of Energy Efficiency In Traditional Tobacco Curing Ovens.* Rev.EIA.Esc. Ing.Antioq no.22 Envigado July/Dec. 2014.[http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1794-12372014000200013](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-12372014000200013)

NTC- ISO 50000:1, (2019). *Sistemas De Gestión De Energía. Requisitos con Orientación Para Su Uso.* <https://tienda.icontec.org/gp-sistemas-de-gestion-de-energia-requisitos-con-orientacion-para-su-uso-ntc-iso50001-2019.html>

Oficina De Energética y Energía Renovable de los Estados Unidos (Office Energy Efficiency & Renewable Energy). <https://www.energy.gov/eere/analysis/energy-intensity-indicators-terminology-and-definitions>

Pedro Maupoey, Ana Andrés, Jose Barat, Ana Albors. (2001). *Introducción Al Secado De Alimentos Por Aire Caliente.* EDITORIAL UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA. [https://gdocu.upv.es/alfresco/service/api/node/content/workspace/SpacesStore/e8b523c5-4970-4ae6-b2a3-86f576e81359/TOC\\_4092\\_02\\_01.pdf?guest=true](https://gdocu.upv.es/alfresco/service/api/node/content/workspace/SpacesStore/e8b523c5-4970-4ae6-b2a3-86f576e81359/TOC_4092_02_01.pdf?guest=true)

Programa de Uso Racional y Eficiente de la Energía PROURE. Plan de Acción Indicativo (2022-2030). *Unidad de Planeación Minero Energética UPME; 2022.* [https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/PROURE/Presentacion\\_plan\\_accion\\_indicativo\\_PROURE-PAI\\_PROURE\\_2022-2030.pdf](https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/PROURE/Presentacion_plan_accion_indicativo_PROURE-PAI_PROURE_2022-2030.pdf)

Rodríguez Sánchez. N. (2017). *Análisis Del Comportamiento Térmico De La Máquina De Temperado Para Optimizar El Procesamiento De Chocolate.* [Tesis de Magíster en Universidad Técnica De Ambato]. Repositorio Institucional Universidad Técnica De Ambato. <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/31321>

Trujillo Graciano. A. (2021). *Implementación De Una Matriz Energética En La Instalación Interna De Glp A Gn En Los Quemadores De Las Areas De Horneado De Pintura Para La Planta Industrial Modasa Lurin – Lima.* [Trabajo De Suficiencia Profesional Para Optar El Título Profesional De Ingeniero Mecánico]. Repositorio Institucional digital Universidad Nacional Del Callao. <http://repositorio.unac.edu.pe/handle/20.500.12952/6847>

Trujillo Lopez. S. (2020). *INFORME SEMESTRE INDUSTRIA DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO DE HORNO DE FUNDICIÓN.* [Tesis de pregrado. UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA]. Repositorio Institucional Universidad de Antioquia. <https://hdl.handle.net/10495/16087>

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Unidad De Planeación Minero Energética UPME. (2015). *Plan Energético Nacional Colombia: Ideario Energético 2050*.  
[http://www.upme.gov.co/Docs/PEN/PEN\\_IdearioEnergetico2050.pdf](http://www.upme.gov.co/Docs/PEN/PEN_IdearioEnergetico2050.pdf).

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

FIRMA ESTUDIANTES

Jonathan Chaves

FIRMA ASESORES

David Sosa

FECHA ENTREGA: 14/11/23