



**RECUPERACIÓN DE CALOR DE LAS PAREDES DE UN HORNO DE  
PRODUCCIÓN DE FRITA CERÁMICA**

**HEAT RECOVERY FROM THE CERAMIC FRIT PRODUCTION  
FURNACE WALLS**

**Gabriel Lizardo Vallejo Díaz**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Minas, Departamento de Procesos y Energía  
Medellín, Colombia  
2019

**RECUPERACIÓN DE CALOR DE LAS PAREDES DE UN HORNO DE  
PRODUCCIÓN DE FRITA CERÁMICA**

**HEAT RECOVERY FROM THE CERAMIC FRIT PRODUCTION  
FURNACE WALLS**

**Gabriel Lizardo Vallejo Díaz**

Tesis de investigación presentada como requisito parcial para optar el título de  
**Magister en Ingeniería Química**

Director:

Ph.D. Farid Chejne Janna

Línea de Investigación:

Eficiencia energética en procesos industriales

Grupo de Investigación:

Termodinámica Aplicada y Energías Alternativas

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Minas, Departamento de Procesos y Energía  
Medellín, Colombia

2019

*A Angeline Patiño, la mujer con la que comparto este viaje llamado vida, quien llena mis días de alegrías y me motiva a alcanzar el éxito, y a mis padres y hermanos.*

## **Agradecimientos**

Mis sinceros agradecimientos a mi director de tesis, el profesor Farid Chejne Janna, por alentarme a explorar la investigación académica desde un punto de vista creativo y por su apoyo incondicional para culminar este trabajo, a Raiza Manrique, Daniela Vásquez y Diego Camargo por sus valiosos aportes como profesionales y como amigos, a todos los miembros del grupo de investigación TAYEA.

Agradezco de manera formal a la Unión Temporal de Investigación e Innovación en Combustión Avanzada de Uso Industrial – INCOMBUSTION y a la empresa Sumicol S.A.S. por permitirme participar del proyecto “Evaluación de la factibilidad técnica y desarrollo de un prototipo a escala para la implementación de un sistema de regeneración de calor en un horno de fritas operando en modo oxicomcombustión.” Y a Colciencias por la financiación del mismo.

.

## Introducción

En el mundo actual con una población aproximada para 2017 de 7750 millones de personas es innegable que cualesquier actividad de origen antropogénico implicará una serie de impactos y afectaciones sobre la naturaleza y en general sobre el planeta; la generación de energía, los procesos de manufactura, el transporte, entre otros, han contribuido al conocido proceso de cambio climático debido al aumento de la concentración de los gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono, metano, vapor de agua y óxidos de nitrógeno. Actualmente diferentes iniciativas a nivel mundial se llevan a cabo con el objetivo de reducir dichos efectos y a su vez cubrir la creciente demanda energética; algunas de esas soluciones contemplan el diseño e implementación de metodologías que permitan hacer un uso racional de la energía para reducir costos y promover la sostenibilidad ambiental.

En países como Colombia cuya economía busca una apertura hacia mercados internacionales, definir y promover medidas que aumenten la eficiencia energética dentro de los procesos industriales manteniendo un crecimiento constante en la productividad, es una alternativa para aumentar la competitividad frente a economías más desarrolladas y posicionadas globalmente. En este contexto Colciencias a través de la convocatoria 543 llamada “Redes de Conocimiento”, permitió la creación de la Unión Temporal de Investigación e Innovación en Combustión Avanzada de Uso Industrial - INCOMBUSTION para contribuir a la generación de conocimiento que sirva como evidencia para la toma de decisiones de políticas públicas y aumentar el índice de cooperación entre grupos de investigación del país. La red INCOMBUSTION está conformada por el grupo “Termodinámica Aplicada y Energías Alternativas” de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, el grupo “Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía” y “Química de Recursos y Medio Ambiente” de la Universidad de Antioquia, el grupo “Materiales Avanzados y Energía” del Instituto Tecnológico Metropolitano y el grupo “Ciencia y Tecnología del Carbón” de la Universidad del Valle.

La red INCOMBUSTION en su primera fase desarrolló importantes investigaciones en temas como: combustión sumergida, combustión sin llama, oxicomustión en la industria cementera, combustión con transportadores químicos y diagnósticos energéticos en los sectores industriales colombianos; con resultados de alto impacto para diversos sectores industriales de la economía Colombiana, lo cual permitió la continuación de la Unión Temporal por medio del programa “Optimización y desarrollo tecnológico en eficiencia térmica en procesos industriales” con la participación activa de diferentes empresas pertenecientes a distintos sectores industriales como la empresa SUMCOL S.A.S. la cual hace parte del grupo CORONA y se dedica a la transformación de minerales no metálicos

con mezclas de valor agregado y partes o moldes para la conformación de piezas para las industrias de la cerámica, vidrio, pinturas y agricultura.

Dentro del contexto de la fase dos de la red INCOMBUSTION y en conjunto con la empresa SUMICOL S.A.S. se desarrolla el proyecto “Evaluación de la factibilidad técnica y desarrollo de un prototipo a escala para la implementación de un sistema de regeneración de calor en un horno de fritas operando en modo oxicomcombustión.” Dentro de este proyecto, y como objetivo específico se encuentra “Determinar la factibilidad de implementación de un sistema de recuperación de calor residual basado en la tecnología de Ciclo Rankine Orgánico para aumentar la eficiencia global del proceso de fusión de frita”, el cual dio origen a esta estudio.

## Contenido

Contenido.....	7
1. Diagnóstico energético en un horno de producción de fritas cerámicas .....	11
1.1. Proceso de producción de frita cerámica .....	12
1.2. Caracterización de los procesos de alta temperatura.....	14
1.3. Tecnología utilizada en el proceso de fusión .....	15
1.4. Metodología .....	17
1.5. Resultados y análisis del diagnóstico energético .....	20
1.5.1. Balance de masa.....	20
1.5.2. Balance de energía .....	21
1.5.3. Análisis termográfico.....	23
1.6. Apuntes parciales.....	25
2. Simulación de un sistema de recuperación de calor de las paredes de un horno de producción de fritas cerámicas .....	27
2.1. Descripción del sistema de recuperación de calor.....	27
2.2. Pérdidas de energía térmica a través de las paredes en hornos industriales.....	28
2.3. Método de volúmenes finitos .....	30
2.4. Estrategia de solución .....	32
2.4.1. Pre-procesamiento.....	33
2.4.2. Solución .....	40
2.5. Resultados y análisis de las simulaciones.....	44
2.5.1. Simulación de pared del horno en estado actual.....	44
2.5.2. Temperatura de pared interna fija.....	45
2.5.3. Flujo constante de calor a través de la pared .....	47
2.6. Apuntes parciales.....	50
3. Evaluación técnica de un ciclo rankine orgánico para recuperar calor de los gases de combustión.....	51
3.1. Principio de operación ciclo rankine orgánico (ORC).....	52
3.2. Selección del fluido de trabajo.....	53
3.3. Clasificación de los fluidos orgánicos de trabajo .....	54
3.4. Metodología .....	56

3.4.1.	Selección del fluido de trabajo .....	56
3.4.2.	Modelamiento del proceso .....	57
3.5.	Resultados y análisis de simulaciones .....	59
3.5.1.	Influencia de la temperatura de entrada a la turbina .....	59
3.5.2.	Influencia de la relación de presiones en la turbina .....	63
3.5.3.	Análisis económico .....	64
3.6.	Apuntes parciales .....	65
	Conclusiones Finales .....	66
	Anexo. Resumen Norma ISO 13579-1 .....	68
	Bibliografía .....	75



## Figuras

Figura 1. Proceso de producción de esmaltes.....	13
Figura 2. Diagrama esquemático de un horno de fusión de fritas cerámica en operación continua [3]. .....	16
Figura 3. Diagrama Sankey horno continuo de producción de frita. ....	22
Figura 4. Imágenes termográficas de las paredes laterales del horno de producción de fritas. ....	23
Figura 5. Imagen termográfica de la chimenea del horno. ....	24
Figura 6. Imagen termográfica del techo del horno de producción de frita.....	25
Figura 7. Fenómenos de transferencia de calor implicados en el sistema de recuperación. ....	28
Figura 8. Descripción gráfica del método de volúmenes finitos. ....	31
Figura 9. Geometría usada en el proceso de simulación. ....	33
Figura 10. Enmallado del sistema de recuperación de calor de las paredes de un horno de producción de frita cerámica. ....	34
Figura 11. Calidad ortogonal del mallado. ....	35
Figura 12. Condiciones de frontera del fluido.....	36
Figura 13. Condición de frontera superficie interior de la pared del horno. ....	37
Figura 14. Condición de frontera superficie exterior de la pared.....	37
Figura 15. Paredes adiabáticas del sistema. ....	38
Figura 16. Proceso de iteración basado en presión acoplado [14]. ....	42
Figura 17. Perfil de temperatura pared del horno, estado actual. ....	44
Figura 18. Perfil de temperatura, temperatura de superficie interna fija. ....	45
Figura 19. Perfil de temperatura superficie exterior, temperatura de la superficie interna fija. ....	46
Figura 20. Perfil de temperatura del fluido a lo largo del ducto. ....	46
Figura 21. Perfil de temperatura, flujo de calor fijo.....	48
Figura 22. Perfil de temperatura superficie interna del horno, flujo de calor fijo.....	49
Figura 23. Perfil de temperatura superficie externa del horno, flujo de calor fijo. ....	49
Figura 24. Diagrama de proceso ORC simple (I), con intercambiador de calor (II) [20].....	52
Figura 25. Diagrama T-s para fluidos secos, húmedos e isoentrópico. ....	55
Figura 26. Clasificación de sustancias para ORC de acuerdo a la temperatura de la fuente [27]. ...	55
Figura 27. Diagrama esquemático ciclo Rankine orgánico simple. ....	56
Figura 28. Efecto de la temperatura de entrada en la turbina sobre la eficiencia global del ciclo ORC.....	60
Figura 29. Comparación de eficiencia global para los diferentes fluidos de trabajo.....	62
Figura 30. Relación de caída de presión en la turbina con la eficiencia global del ciclo ORC.....	64

## Tablas

Tabla 1. Composición gas natural. ....	18
Tabla 2. Reporte de producción para el horno continuo de producción de fritas.....	19
Tabla 3. Balance de masa para la reacción de combustión en el horno de producción de frita cerámica. ....	20
Tabla 4. Balance de energía para un horno continuo de fusión de fritas. ....	21
Tabla 5. Pérdidas de energía por paredes en diferentes procesos industriales a alta temperatura.	27
Tabla 6. Dimensiones del sistema. ....	33
Tabla 7. Propiedades termofísicas de los materiales fluido y sólido. ....	40
Tabla 8. Parámetros para solución de ecuaciones.....	42
Tabla 9. Criterios de convergencia .....	43
Tabla 10. Resumen balance de energía de los casos simulados. ....	50
Tabla 11. Refrigerantes seleccionados para el análisis de ciclo ORC [30,31].....	57
Tabla 12. Análisis económico de implementación sistema ORC [32]. ....	65
Tabla 13. Sistematización del tipo de energía evaluada en la parte-1 de la norma ISO 13579-1.....	70

## **1. Diagnóstico energético en un horno de producción de fritas cerámicas**

Diversos procesos industriales como la cocción y sinterización de cerámicos, fabricación de fritas, producción de clinker, fundición de metales, entre otros, se llevan a cabo a temperatura por encima de los 1000°C y por largos periodos de tiempo, demandando un alto consumo energético. En industrias de esta naturaleza, donde la energía necesaria para realizar las transformaciones de las materias primas en productos representa una parte importante de los costos de producción, es importante identificar cada uno de los posibles focos de ineficiencia energética y realizar acciones encaminadas hacia una disminución del consumo de energía.

Los diagnósticos y auditorías energéticas, mediante la aplicación de un conjunto de técnicas y mediciones permiten determinar el nivel de eficiencia del uso de los recursos. El objetivo general del diagnóstico energético es disminuir el consumo de energía en la planta de procesos, reducir el impacto ambiental por emisiones de gases de efecto invernadero, aumentar la competitividad de la empresa, sin afectar los niveles de producción [1]. Mediante el diagnóstico energético, se determinan los focos de desperdicio de energía, se establecen metas de ahorro energético, se diseñan y aplican programas integrales para lograr ahorros energéticos significativos, se evalúan técnica y económicamente las medidas de conservación y ahorro de energía.

Para determinar la eficiencia con la que es utilizada la energía en un determinado proceso industrial se requiere realizar diversas actividades, entre las que se encuentra: la medición del flujo energético, determinación de las condiciones de operación de equipos principales y auxiliares, realización de balances de materia y energía, establecer y calcular indicadores energéticos o de productividad, determinación de los potenciales de ahorro con base en los valores de referencia para dichos indicadores, determinación de cuál o cuáles medidas de eficiencia energética son más apropiadas para un sistema en particular y realizar seguimiento al programa de ahorros mediante la aplicación de las oportunidades de conservación energética [2].

En el Capítulo 1 del presente documento se presentan los resultados más relevantes del diagnóstico energético realizado a un horno de producción de fritas cerámicas ubicado en Sabaneta, Antioquia, Colombia. Se hace una descripción general del proceso productivo identificando las etapas críticas en términos del consumo energético y se describe el tipo de tecnología utilizada para llevar a cabo las transformaciones químicas de las materias primas, toda esta información se utilizó como base para la determinación de una

metodología estandarizada que permitió realizar el diagnóstico energético y la identificación de medidas de eficiencia energética.

### **1.1. Proceso de producción de frita cerámica**

En la manufactura de esmaltes y engobes cerámicos, el componente principal es la frita cerámica cuya formulación dependerá de la aplicación requerida y del acabado final de la pieza cerámica. Una frita cerámica es un material en estado vítreo producido mediante la fusión y posterior enfriamiento de una mezcla de diferentes compuestos inorgánicos, principalmente óxidos de metales.

El proceso de producción de fritas cerámicas inicia con la selección y dosificación de las materias primas, previamente seleccionadas y controladas, en la proporción establecida, las cuales por medio de transporte neumático se trasladan a una mezcladora donde se homogenizan y se descargan en una tolva de alimentación, la que a su vez proporciona la carga al horno. La alimentación del horno se lleva a cabo mediante un tornillo sin fin, cuya velocidad controla el flujo másico de material alimentado al horno.

El horno es un equipo de calentamiento continuo donde se lleva a cabo el proceso de fritado de las materias primas, es decir, el cambio de fase de los diversos componentes a temperaturas elevadas entre 1350-1550°C. El tiempo de permanencia del material en el interior del horno se define según la velocidad de fusión de las materias primas y por la fluidez del material fundido. El producto de descarga se enfría bruscamente mediante un choque térmico con un chorro directo con agua, por lo que se transforma en un material sólido fragmentado en desmenuzados compuestos insolubles que caen a un big-bag.

Después de obtener las fritas cerámicas, se realiza una etapa de mezclado con diversas materias primas, necesarias para la producción de esmaltes. Luego, se procede a una molienda húmeda en molinos de bolas de alúmina y se añaden otros componentes como agentes colorantes. A continuación, se ajustan las condiciones de la suspensión acuosa cuyas características dependen del método de aplicación que se vaya a utilizar. Finalmente, se almacenan y despachan (Ver en la Figura 1 un esquema del proceso de producción).

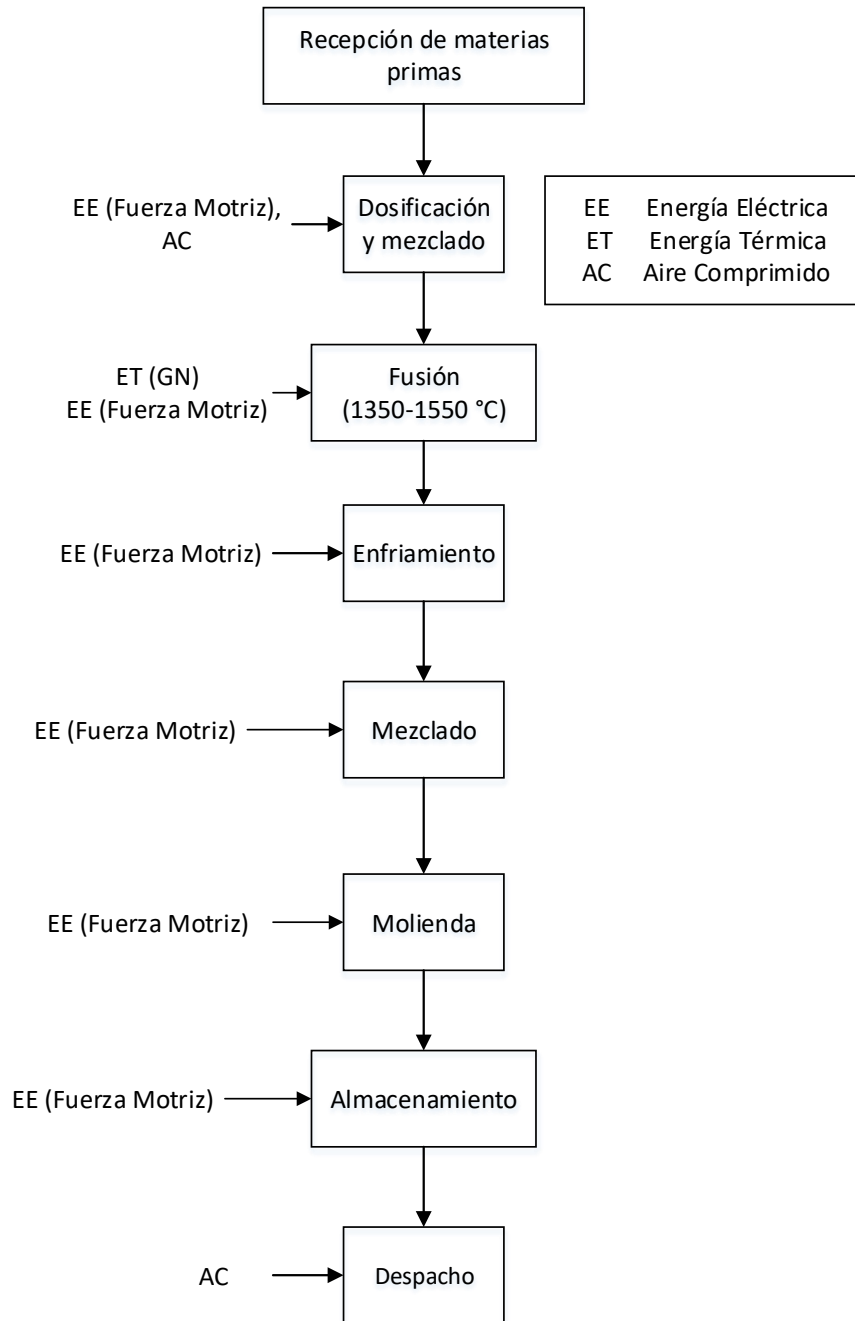


Figura 1. Proceso de producción de frita cerámica.

Como se mencionó anteriormente, dentro del proceso productivo de fritas, la etapa de fusión es la de mayor gasto energético debido a las altas temperaturas que se requiere y en donde mayores focos de ineficiencia se pueden encontrar. Por lo tanto, es de gran importancia realizar un análisis de dicha etapa para mejorar la eficiencia del proceso.

## 1.2. Caracterización de los procesos de alta temperatura

Las materias primas con las que se elaboran las fritas pueden ser de diferentes orígenes, sin embargo, en la mayoría de formulaciones se utiliza el óxido de silicio (SiO) en una fracción entre el 50 y 70% [3], además de otros compuestos como alúmina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), óxido de calcio (CaO), óxido de zinc (ZnO), óxido de boro (B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) y en menor proporción silicatos, carbonatos, aluminosilicatos, boratos, caolines, zirconio, cuarzos, feldespatos, entre otros. [4]. Cada uno de los anteriores componentes aportan una determinada propiedad al producto final de manera que se pueden diferenciar las fritas según su acabado final de brillo, opacidad, textura, rango de trabajo y efectos especiales. Algunos de los tipos de frita de mayor producción se mencionan a continuación:

- Fritas especiales: correctoras (alto coeficiente de dilatación) y fundentes (plúmbicas o borácicas).
- Fritas cristalinas: transparentes o un poco opalescentes según la temperatura de trabajo.
- Fritas blancas (Zr): son de coloración opaca.
- Fritas mates (Ba, Ca, Zn): secas, granulares, satinadas, transparentes, opacas.
- Fritas lustres (Ce): debido a la utilización de Cerio poseen un brillo metálico.

El proceso de fritado de las materias primas se realiza a altas temperaturas entre 1350 y 1550 °C y se lleva a cabo en hornos de fusión, generalmente con capacidades de producción no mayores a 30 toneladas/día. Este proceso puede desarrollarse en continuo (hornos continuos con enfriamiento por agua o por aire) o en discontinuo (hornos rotatorios con enfriamiento por agua). La industria de fritas cerámicas utiliza principalmente hornos de fusión continuos y en raras ocasiones discontinuos. La elección del tipo de horno depende de la escala de producción y de la formulación del producto [5].

El requerimiento calórico en el proceso de producción de fritas se puede dividir en dos etapas: el calor sensible para llevar las materias primas desde temperatura ambiente hasta la temperatura de fusión y el calor latente de fusión necesario para el cambio de fase [3], de acuerdo a la siguiente ecuación (1):

$$\dot{Q}_{fritas} = \dot{m}_{fritas} \left[ \int_{T_e}^{T_s} C_p dT + \Delta H_{fusión} \right] \quad (1)$$

Dónde:

$\dot{Q}_{fritas}$ : Energía requerida para el proceso de fusión [kW]

$\dot{m}_{fritas}$ : Flujo másico de las fritas cerámicas [kg/s]

$C_p$ : Capacidad calorífica a presión constante [kJ/kg K]

$\Delta H_{fusión}$ : Entalpía de fusión [kJ/kg]

$T_s$ : Temperatura de salida del producto del horno [K].

$T_e$ : Temperatura de ingreso de la materia prima al horno [K].

Como se puede ver, el requerimiento energético está relacionado directamente con la capacidad calorífica a presión constante ( $C_p$ ) y la entalpía de fusión ( $\Delta H_{fusión}$ ), estas propiedades a su vez depende de los componentes y su fracción másica presentes en la formulación de la frita cerámica.

### 1.3. Tecnología utilizada en el proceso de fusión

En la producción continua de frita se usan hornos los cuales generalmente se suspende del piso mediante vigas metálicas, la alimentación de materia prima se realiza por el extremo posterior del horno mediante un tornillo sinfín el cual permite el ingreso de la mezcla de componentes previamente mezclados de manera homogénea y los deposita dentro del horno generando una especie de pila, que puede alcanzar los 2 metros de espesor, la cual a medida que aumenta su temperatura hasta el punto de fusión adquiere fluidez y avanza en estado líquido por el horno. Para este tipo de procesos se pueden utilizar diferentes configuraciones de quemadores la más usual es utilizar dos quemadores ubicados en el extremo frontal del horno, el quemador principal produce una llama la cual se direcciona hacia la materia prima alimentada por el extremo opuesto de horno y justo sobre la frita que ya se encuentra en proceso de fusión; por otra parte el quemador secundario se ubica fuera del horno y se direcciona justo sobre la salida de fritas y cumple el objetivo de mantener el producto en estado fluido hasta que caiga en el tanque de enfriamiento y fragmentación y así evitar obstrucciones ocasionadas por la solidificación del producto en la boca del horno. Generalmente, los quemadores utilizan gas natural como combustible y oxígeno puro como comburente, debido a las ventajas técnicas que posee la oxicomustión y a los altos requerimientos de temperatura del proceso. el quemador principal genera alrededor del 90% de toda la energía utilizada en la fusión de fritas mientras que el quemador secundario solo el 10%.

Internamente el horno no posee ningún mecanismo móvil, simplemente es una especie de alberca con una ligera inclinación no mayor a  $2^\circ$  respecto al eje horizontal que permite que la frita en estado líquido fluya desde la zona de alimentación hacia la zona de descarga. Los gases producidos por la combustión y en mucha menor fracción la humedad evaporada que puede contener la materia prima salen del horno por una chimenea ubicada en la zona frontal de una de las paredes laterales, la chimenea además, posee una compuerta en la parte inferior por donde puede ingresar aire a temperatura ambiente y así disminuir la temperatura de los gases de escape. En la Figura 2, se presenta un diagrama esquematizado de un horno de producción de frita cerámica en continuo con su respectivo sistema de enfriamiento por choque térmico con agua a temperatura ambiente.

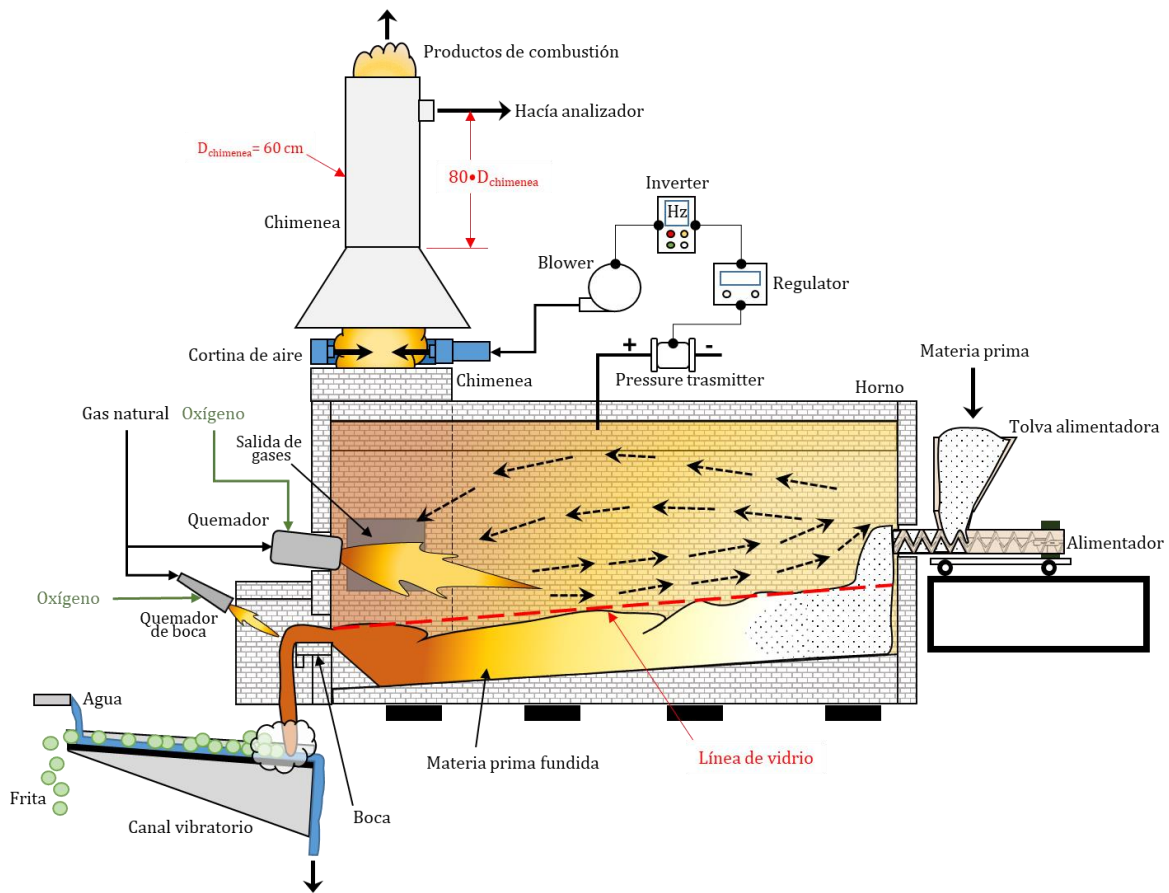


Figura 2. Diagrama esquemático de un horno de fusión de fritas cerámica en operación continua [3].

En cuanto a las paredes del horno, se debe mencionar que están construidas con diferentes tipos de aislantes y refractarios, el piso del horno consiste en una gruesa capa de material refractario electrófundido además de que sobre esta se deposita frita



vitrificada la cual ayuda con el aislamiento térmico del suelo del horno, por otra parte las paredes laterales están construidas con varias capas de ladrillos refractarios de alto contenido de aluminosilicatos y cuyo espesor puede alcanzar los 0,6 metros. El techo se construye en forma de cúpula curva de manera que permita el re direccionamiento hacia el material fundido de la energía generada por radiación y que índice directamente desde la llama sobre la cúpula del horno.

#### 1.4. Metodología

El cumplimiento de los objetivos de la tesis exigió un estudio energético del horno de producción de frita, el desarrollo de un modelo matemático del sistema de aprovechamiento de la energía desechada a través de las paredes y la recuperación de energía desechada en los gases de chimenea. Para el diagnóstico energético se siguió la norma ISO, y para el desarrollo de los modelos se realizaron los respectivos balances de materia y energía los cuales se describen en este capítulo.

Para la realización de las mediciones necesarias para llevar a cabo el diagnóstico energético se empleó la norma **ISO 13579-1** "*Industrial furnaces and associated processing equipment — Method of measuring energy balance and calculating efficiency*" la cual especifica una metodología general para la medición del balance de energía y para calcular la eficiencia de los procesos involucrados con hornos industriales y asociados a equipos de procesamiento diseñados por fabricantes de hornos. En general esta metodología incluye métodos de medición, cálculos y reporte de evaluación de balance de energía (Ver en el anexo 1 un breve resumen de los aspectos más importantes a tener en cuenta en el momento de realizar un diagnóstico energético).

Para llevar a cabo el diagnóstico energético se tomaron las siguientes mediciones en campo.

- Composición y temperatura de los gases de combustión: usando un analizador de gases portátil marca Bacharach PCA3.
- Temperaturas de pared se realiza con termopares de contacto tipo K, un pirómetro marca FLUKE 568 y una cámara termográfica marca TESTO 885; ésta última tiene un rango de medición de temperatura de hasta 1200 °C.
- Temperatura ambiente utilizando un termohigrómetro marca CEM modelo DT-171.

Para el planteamiento de los balances de materia y energía, se tomaron las siguientes consideraciones:

- La composición del gas natural utilizado se obtuvo del reporte disponible en la página web de la empresa distribuidora, la cual se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Composición gas natural.

Constituyente	Fórmula química	Composición por volumen (%)
Metano	CH <sub>4</sub>	0,8186
Etano	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,1161
Propano	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0,0192
I-Butano	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,0023
N-Butano	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,0022
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	0,0090
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	0,0318
<b>Total</b>		<b>0,9992</b>

- Poder calorífico superior del gas natural: 11,37 kWh/m<sup>3</sup>st.
- Densidad estándar: 0,8217 kg/m<sup>3</sup>st
- Se consideró conversión total del gas natural en la reacción de combustión.
- Propiedades termodinámicas de las materias primas para la producción de fritas cerámicas [3]:
  - Capacidad calorífica: 0,9 kJ/kg K
  - Entalpía de fusión: 400 kJ/kg
- La temperatura de operación del horno se consideró como la temperatura de fusión de las materias primas para la producción de fritas cerámicas.
- Estado de referencia: temperatura ambiente, presión atmosférica y estado de agregación de las sustancias correspondientes a estas condiciones.
  - Temperatura ambiente: 29,9 °C.
  - Presión atmosférica: 85,33 kPa
- Se consideró la presencia de las siguientes especies en los gases de combustión: dióxido de carbono, vapor de agua, dióxido de azufre, monóxido de carbono, monóxido de nitrógeno, oxígeno y nitrógeno.
- El análisis termográfico y pérdidas de energía al exterior del equipo se realizó de acuerdo a lo establecido en [6].

- Los valores de emisividad ( $\epsilon$ ) se tomaron de acuerdo a la norma ISO-13579-1 [7] para los materiales que componen el sistema de aislamiento del horno.
- Pérdidas asociadas al proceso de combustión del gas natural:
  - \_ El calor sensible que llevan los gases de combustión al salir del sistema, el cual depende de su temperatura.
  - \_ El calor latente de condensación del agua, dado que el sistema de combustión es sin condensación. Por tanto, el calor latente de condensación del agua en los productos no es recuperable.
  - \_ Calor latente asociado a los inquemados y productos de la combustión incompleta tales como monóxido de carbono e hidrógeno.
- Los reportes de producción del día de la visita de diagnóstico, se pueden ver en la Tabla 2. En esta tabla se consigna información sobre el flujo másico de fritas cerámicas, consumo de gas natural y oxígeno en condiciones de sitio, relación entre comburente/combustible y temperatura de operación del horno.

Tabla 2. Reporte de producción para el horno continuo de producción de fritas.

Medición	Peso (kg)	Tiempo (hh:mm:ss)	Producción de fritas kg/h	Temperatura de operación (°C)	Consumo Gas Natural (m <sup>3</sup> <sub>st</sub> /h)	Consumo Oxígeno (m <sup>3</sup> <sub>st</sub> /h)	Relación O <sub>2</sub> /GN (m <sup>3</sup> <sub>stO<sub>2</sub></sub> / m <sup>3</sup> <sub>stGN</sub> )
1	1000	01:40:00	600	1526	84	176	2,1
2	1000	01:42:00	588	1550	78	163	2,1
3	1000	01:43:00	583	1556	78	163	2,1
4	1000	01:50:00	545	1543	78	163	2,1
5	1000	01:50:00	545	1536	75	157	2,1
6	1000	01:47:00	561	1536	75	157	2,1
7	1000	01:50:00	545	1530	75	157	2,1
Promedio	1000	01:46:00	567	1540	78	162	2,1
Desviación estándar	0,0	00:04:17	23,1	10,7	3,2	6,8	0,0

Por tanto, para el planteamiento de los balances de masa y energía se utilizaron los valores promedios reportados anteriormente. Los flujos volumétricos de gas natural y oxígeno se normalizaron a condiciones estándar (15,6 °C y 1 atm).

## 1.5. Resultados y análisis del diagnóstico energético

Los resultados obtenidos mediante el diagnóstico energético que se realizó siguiendo la metodología de la norma ISO 13579-1 se condensan en los balances de masa, energía y el diagrama Sankey, los cuales permitieron determinar la distribución energética del proceso de fundición de frita cerámica y evidenciar los comportamientos que disminuyen la eficiencia global del proceso.

### 1.5.1. Balance de masa

El balance de masa para la combustión de gas natural con oxígeno puro que se lleva a cabo dentro del horno de producción de fritas se resume en la Tabla 3, este se obtuvo a partir de la información recolectada sobre aspectos como el consumo de gas natural y oxígeno, información proporcionada por la empresa en donde se encuentra instalado el horno y bajo las suposiciones presentadas anteriormente en la metodología.

Tabla 3. Balance de masa para la reacción de combustión en el horno de producción de frita cerámica.

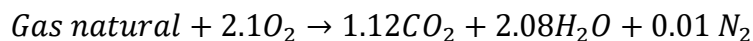
	Compuesto	Fórmula química	Entrada kg/h	Salida (teórico) kg/h
Combustible	Metano	CH <sub>4</sub>	46,84	0
	Etano	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	6,31	0
	Propano	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	3,22	0
	I-Butano	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,65	0
	N-Butano	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,63	0
	Nitrógeno	N <sub>2</sub>	0,72	0,72
	Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	1,86	1,85
Oxidante	Oxígeno	O <sub>2</sub>	194,14	0
Gases de combustión	Monóxido de carbono	CO	---	0
	Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	---	142,15
	Agua	H <sub>2</sub> O	---	109,73
	Hidrógeno	H <sub>2</sub>	---	0
	Nitrógeno	N <sub>2</sub>	---	0
	Monóxido de nitrógeno	NO	---	0
	<b>Total</b>		254,37	254,45

Las extremas condiciones de operación del horno en cuanto a temperatura y la dificultad de encontrar puntos de medición en donde no haya presencia de infiltraciones de aire provenientes de la atmosfera imposibilitó la medición de la concentración de algunas especies en los gases de combustión como óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y óxido de azufre (SO<sub>2</sub>) por lo tanto los valores reportados en la salida del balance de masa son teóricos con base en la reacción de oxidación.

### 1.5.2. Balance de energía

Por medio del balance de energía se cuantificaron las entradas y salidas del volumen de control analizado (horno de fritas). En la Tabla 4 se reportan los valores obtenidos de los flujos de energía de las corrientes de entrada y salida para el horno.

Para la composición del gas natural reportada por el distribuidor el día del diagnóstico la ecuación estequiométrica es:



De la anterior ecuación y de la relación O<sub>2</sub>/GN reportada en la Tabla 2 se observa que el proceso de combustión se lleva a cabo a condiciones estequiométricas. En la Tabla 4 se puede observar el balance de energía para el horno de producción de fritas operando en condiciones normales de proceso.

Tabla 4. Balance de energía para un horno continuo de fusión de fritas.

Descripción		Potencia (kW)	Porcentaje (%)
<b>Entradas</b>	<b>Energía aportada por el combustible</b>	<b>875,8</b>	<b>100</b>
	<b>Energía requerida para la fusión de fritas cerámicas</b>	<b>240,4</b>	<b>27,4</b>
	<b>Pérdidas por paredes</b>	<b>316</b>	<b>36,1</b>
<b>Salidas</b>	Pérdidas de calor por radiación	185,1	21,1
	Pérdidas de calor por convección	130,9	14,9
	<b>Pérdidas en gases de chimenea</b>	<b>186,8</b>	<b>21,3</b>
	Calor latente de vaporización del agua	77,3	8,8
	Calor sensible gases de combustión	109,5	12,5
<b>TOTAL</b>		<b>743,2</b>	
<b>DESBALANCE</b>		<b>132,6</b>	<b>15,1</b>

En el balance de energía que se presenta en la Tabla 4 se puede ver que solo el 27,4% de la energía aportada por el proceso de oxicomustión se utiliza en el proceso de fusión de fritas cerámicas. Por otra parte, en los gases de combustión se elimina cerca de 186,8 kW (21,3 %) correspondiente a calor sensible de los gases debido a que estos salen del equipo a temperaturas altas y al calor latente de vaporización del agua producto de la combustión.

En la Figura 3 se presenta el diagrama Sankey del proceso, en donde se puede observar que el 36,1% de la energía se pierde a través de las paredes del horno por los fenómenos de radiación y convección hacia el ambiente constituyéndose en el mayor foco de ineficiencia del proceso. esto se debe a la altas temperaturas de pared que se pueden encontrar en equipos que operan de manera continua con condiciones de temperatura elevada como los procesos de fundición de vidrio, producción de elementos cerámicos y la misma producción de frita.

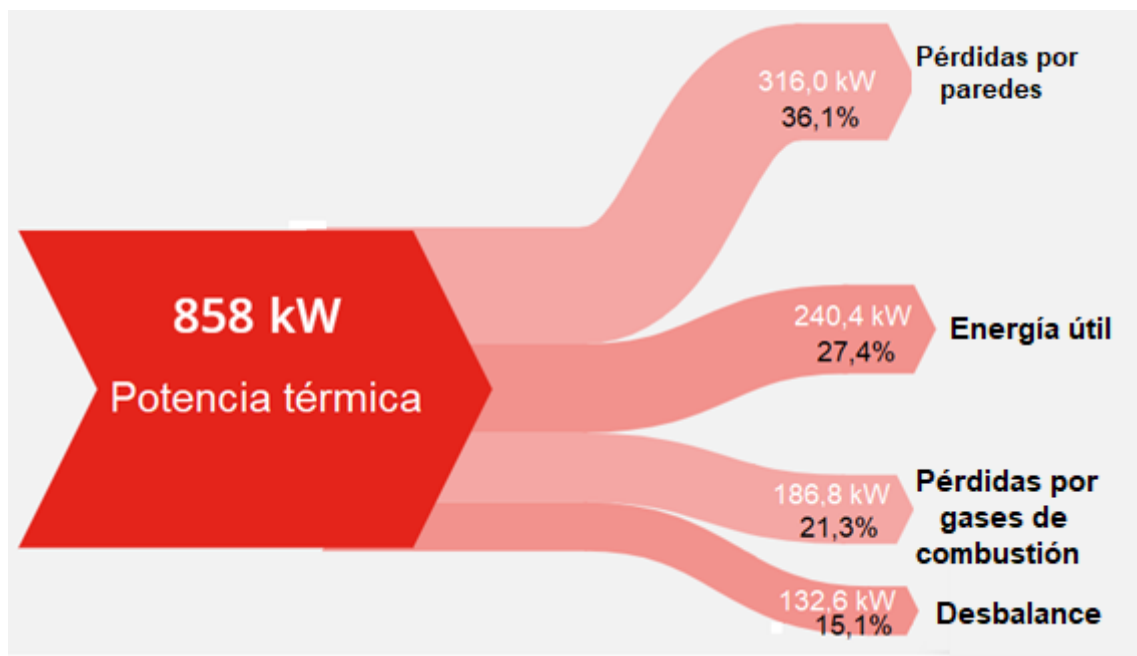


Figura 3. Diagrama Sankey horno continuo de producción de frita.

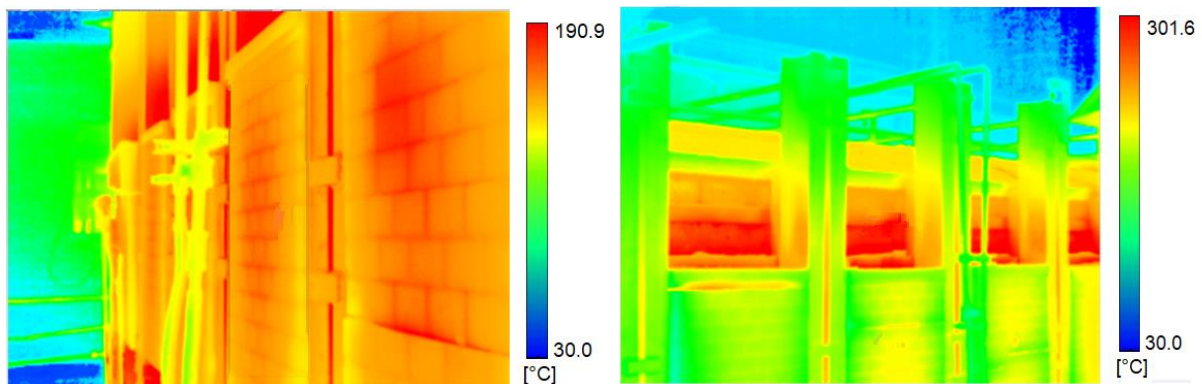
El comportamiento aquí presentado no es extraño y como se reporta en algunos estudios similares [3] abre la posibilidad de realizar estudios teórico prácticos que busquen alternativas de mitigación del impacto que tiene la operación de equipos con altas pérdidas de energía por paredes incluso para los mismos operarios y la recuperación de esta fuente de calor por diferentes medios. Cabe resaltar que en la corriente denominada desbalance se agrupan todos aquellos fenómenos que consumen la energía que ingresa al

horno pero que no se pudieron cuantificar como es el caso de la energía que se pierde por radiación y convección a través del suelo del horno debido a que por su difícil acceso y representar alto riesgo no pudieron ser medidas directamente.

### 1.5.3. Análisis termográfico

Para llevar a cabo el balance de energía presentado en la sección 1.5.2 “Balance de energía”, fue necesario determinar las pérdidas de energía a través de las paredes del horno. Como se menciona en la metodología, para la determinación de estas pérdidas se hizo un mapeo de temperaturas en cada una de las paredes del horno, siempre y cuando hubiese un acceso seguro a cada pared. Las temperaturas en las paredes del equipo y la chimenea se midieron con un pirómetro y una cámara termográfica. Con la ayuda de esta última se pudieron identificar visualmente focos de alta temperatura en algunas zonas de las paredes del horno que se traduce en mayores pérdidas por paredes y posibles riesgos para la integridad de los trabajadores. Se reportan algunos de los resultados obtenidos durante este análisis.

**Paredes laterales.** En la Figura 4 se presentan dos imágenes termográficas tomadas a las paredes lateral derecha e izquierda respectivamente, en ambos casos se puede ver que la temperatura superficial supera no es del todo uniforme sobre la extensión de la pared presentado zonas donde la temperatura sobrepasa los 200 °C (ver Figura b).



a) Pared lateral derecha

b) Pared lateral izquierda

Figura 4. Imágenes termográficas de las paredes laterales del horno de producción de fritas.

La presencia de puntos de mayor temperatura en las paredes del horno se origina principalmente cuando las capas de material refractario que constituyen el aislamiento de la pared sufren debilitamiento debido al gradiente de temperatura que existe entre el interior o cámara del horno a temperaturas superiores a los 1500 °C y el exterior a

temperatura ambiente, además del deterioro que se da usualmente con el paso del tiempo debido a que el material fundido que fluye dentro del horno puede comportarse como un material abrasivo y destruir la línea de refractario que está en contacto directo con él.

**Chimenea.** La chimenea de este tipo de hornos se ubica en la parte posterior de la pared lateral derecha y permite que los gases calientes salgan del equipo una vez que recorran el interior de la cámara, en la Figura 5 se puede observar una imagen termográfica de la chimenea y del ducto metálico que lleva los gases hacia la atmosfera.

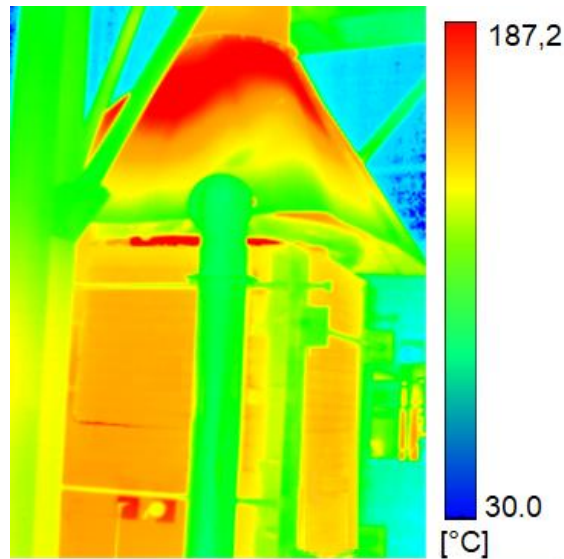


Figura 5. Imagen termográfica de la chimenea del horno.

A pesar de que los productos de la oxicomustión salen del horno a alta temperatura  $>1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ , en la imagen se puede ver que la temperatura de la chimenea no supera los  $130\text{ }^{\circ}\text{C}$  debido en gran parte a que se realiza una dilución de los gases de combustión con aire a temperatura ambiente mediante una pequeña compuerta ubicada en la parte inferior de la chimenea y a la adhesión de una pequeña porción de material vítreo que se deposita en las paredes de la chimenea durante la evacuación de los gases que genera una capa interna que actúa como material aislante.

**Pared superior o techo.** El techo del horno está constituido por material refractario al igual que las paredes laterales del horno y con una forma de semicírculo, que permite mejorar la transferencia de calor hacia el material a fundir.



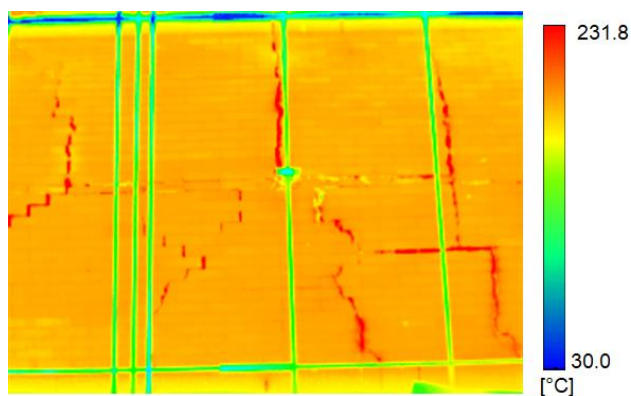


Figura 6. Imagen termográfica del techo del horno de producción de frita.

En la Figura 6 se puede observar una imagen termográfica de la cúpula del horno, en general, la temperatura toma un valor homogéneo sobre toda la superficie de aproximadamente 170 °C; sin embargo, se evidencian una serie de fisuras de gran tamaño que evidencian el deterioro del sistema de aislamiento térmico, estas fisuras permiten que los gases de la cámara escapen traduciéndose en un foco de pérdidas de energía y por consiguiente disminuyendo la eficiencia del proceso de fritado.

## 1.6. Apuntes parciales

La realización del diagnóstico energético en el horno de producción de fritas permitió obtener una visión global de la distribución de la energía que se genera por la oxcombustión de gas natural, evidenciando que solo el 27,4% se consume en la transformación fisicoquímica de la materia prima; lo cual representa un valor bajo para la eficiencia global del proceso y pone en evidencia la necesidad de buscar alternativas tecnológicas que permitan realizar un mayor aprovechamiento de la energía.

Como se puede evidenciar en el diagrama de Sankey, las pérdidas de energía al exterior del equipo a través de las paredes del mismo son sin lugar a duda el mayor fenómeno que afecta de manera negativa el consumo de energía en el horno debido a que representa más del 36% de la energía generada por la oxcombustión de gas natural, además de representar un riesgo de salud para los operarios del horno debido a la alta temperatura externa de las paredes del equipo. En el Capítulo 2 se evaluará una alternativa que permita disminuir la temperatura externa de la pared y recuperar parte de la energía que se pierde hacia el exterior.

Los gases producidos por la oxidación y que salen del horno por la chimenea contienen más del 21% de la energía que se le suministra al horno representado principalmente en calor sensible, debido a la alta temperatura a la que se evacúan, y calor latente de vaporización del contenido de agua. Características como una alta temperatura y su composición que mayormente es  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  hacen que dichos gases posean un alto potencial para realizar recuperación de energía residual, mediante tecnologías como los ciclos Rankine orgánicos de esta manera se puede generar energía eléctrica a partir de energía térmica de desecho, contribuyendo a un uso más responsable del consumo de energía y por lo tanto aumentando la eficiencia global del proceso de fritado, este aspecto se evaluará en el Capítulo 3, de este documento.

## 2. Simulación de un sistema de recuperación de calor de las paredes de un horno de producción de fritas cerámicas

En procesos industriales donde se llevan a cabo transformaciones térmicas a altas temperaturas las pérdidas de calor hacia el ambiente por las paredes de los hornos son uno de los fenómenos que disminuyen la eficiencia de los procesos y está directamente relacionado con las condiciones de operación, el tipo, porosidad y espesor del material refractario o aislante térmico del cual están construidas las paredes del horno. En la Tabla 5 se resumen algunos procesos industriales que se llevan a cabo a altas temperaturas y el porcentaje aproximado de pérdidas energéticas por paredes.

Tabla 5. Pérdidas de energía por paredes en diferentes procesos industriales a alta temperatura.

Proceso	Pérdidas por paredes	Temperatura operación
Cocción de cerámicos	5-10%	950-1100 °C
Clinker horno rotatorio	15-20%	1400 °C
Sinterización aisladores eléctricos de cerámica	25%	1250 °C
Calcinación yeso	30%	900 °C
Producción fritas cerámicas	30-36%	1550 °C

Los valores reportados en la Tabla 5, hacen parte de los resultados obtenidos por la Unión Temporal INCOMBUSTION en el marco del proyecto “Diagnósticos energéticos en los sectores industriales”, en donde se intervino 33 empresas pertenecientes a sectores industriales con alta intensidad de energía térmica. Se puede ver que existe una relación directa entre las pérdidas energéticas por paredes y la temperatura de operación.

### 2.1. Descripción del sistema de recuperación de calor

El análisis energético permitió evidenciar que una gran parte de la energía que ingresa al horno se pierde a través de las paredes del mismo, por lo tanto se propone un sistema que permita minimizar las pérdidas energéticas al exterior del horno, disminuir la temperatura de las paredes y recuperar parte de esa energía que se pierde para la

transformación en energía eléctrica que puede ser usada en la operación de equipos eléctricos auxiliares impactando de manera positiva la eficiencia global del proceso de fundición de frita cerámica.

El sistema de recuperación de calor se basa en la tecnología de ciclo Rankine [8], el cual opera bajo el principio de Carnot y requiere de una fuente de energía o foco térmico, que en este caso será la energía que se disipa por las paredes del horno, para producir trabajo que posteriormente se transforme en energía eléctrica a través de un turbogenerador. La forma de recolectar la energía de las paredes del horno consiste en la instalación de una serie de ductos internos a las paredes del horno por cuyo interior circula un fluido térmico; que aumenta su temperatura a medida que fluye desde la zona de alimentación del horno hasta la zona de descarga, como se puede ver en la Figura 9.

## 2.2. Pérdidas de energía térmica a través de las paredes en hornos industriales

El proceso de transferencia de calor desde una superficie caliente hacia el ambiente es bien conocido y durante este se presentan en mayor o menor grado los fenómenos de conducción, convección y radiación dependiendo principalmente de factores como: rango de temperatura, material que compone la superficie caliente y tipo de contacto con el ambiente (convección libre o forzada).

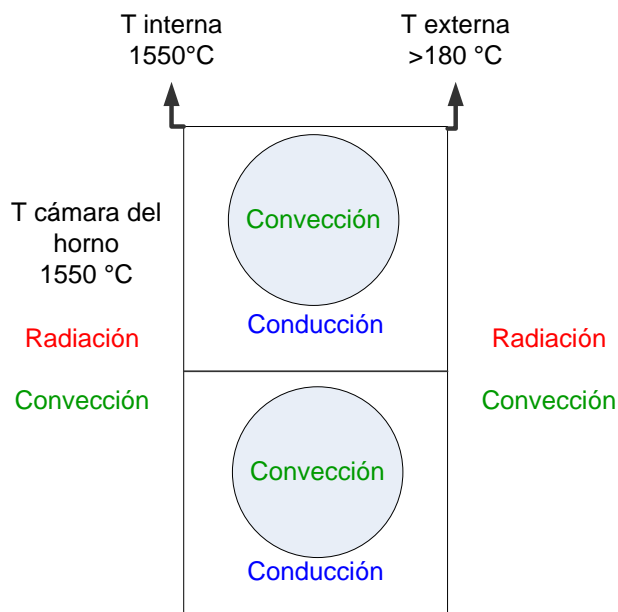


Figura 7. Fenómenos de transferencia de calor implicados en el sistema de recuperación.

La transferencia de energía desde adentro de la cámara de combustión del horno de producción de fritas cerámicas se da mediante los mecanismos que se ilustran en la Figura 7. El aporte energético requerido para llevar a cabo las transformaciones de los minerales crudos en fritas es suministrado por medio de la combustión de gas natural con oxígeno puro como comburente, la mayor parte de dicha energía se transmite por radiación directa desde la llama del quemador hasta la superficie de la colada, otra parte se radia hacia la cúpula cóncava del horno de manera que se refleja hacia la superficie del material fundido, otra porción de la energía se irradia directamente a las paredes del horno y otra más se transfiere por convección debido al movimiento de la atmosfera dentro del horno; movimiento inducido tanto por la velocidad de los gases en el quemador como por la diferencia de presiones en el ducto de la chimenea.

La energía que ingresa a las paredes se trasmite a través de ellas por conducción cumpliendo con la siguiente ecuación en estado transitorio

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{q_G'''}{k} \quad (2)$$

Donde  $\alpha$  representa el coeficiente de difusividad térmica del material refractario que compone las paredes del horno y se puede escribir como  $\alpha = \frac{k}{\rho c}$ , la ecuación anterior se puede simplificar considerando que no hay generación adicional de calor y que la temperatura es constante en la dirección z, esta última simplificación es racional debido a que la temperatura de la pared interior del horno es constante y uniforme por lo que el flujo de calor se da hacia la superficie exterior en dirección "x" y "y" de forma que la ecuación (2) se expresa así:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = -K_p \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right)$$

La transferencia de energía de la pared hacia el banco de tubos se da también por conducción por lo tanto se puede modelar bajo la ecuación (2) pero aplicada en coordenadas cilíndricas debido a que es un sistema más acorde con la geometría de esa zona.

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} \right) + \left( \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \frac{q_G'''}{k} \quad (3)$$

Nuevamente, se puede hacer la simplificación de cero generación adicional de calor y que la temperatura es constante en dirección y. Por lo tanto, la ecuación (3) queda simplificada de la siguiente manera:

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} \right)$$

Donde solo se considera gradientes de temperatura en las dirección  $r$  y  $\phi$ .

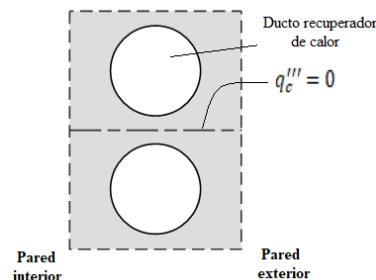
Por último la energía se transfiere por convección al fluido de trabajo (agua) la cual fluye dentro del banco de tubos obedeciendo la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = hA(T_p - T_f) \quad (4)$$

Donde  $h$  representa el coeficiente de convección y depende de múltiples factores como la geometría, temperatura, velocidad del fluido y tipo de convección,  $A$  es el área de contacto entre el fluido y la superficie del tubo y  $T_p$  y  $T_f$  representan las temperaturas de pared del tubo y del fluido respectivamente.

Para poder resolver el sistema completamente se hace necesario plantear ecuaciones adicionales o condiciones de frontera debido a que el hasta el momento el sistema posee más incógnitas que ecuaciones y por lo tanto es insolvente, las condiciones de frontera que se han planteado son las siguientes:

- Los ductos de recuperación de energía están espaciados de manera que no existe interferencia térmica de uno sobre otro.



- La temperatura es constante y uniforme sobre toda la pared interior del horno, por lo que la variación de temperatura con respecto al tiempo es cero.

$$T|_{x=0} = \text{constante}, \frac{\partial T}{\partial t}|_{x=0} = 0$$

### 2.3. Método de volúmenes finitos

Una vez se han planteado las ecuaciones que gobiernan el modelo se requiere resolverlo mediante alguna de las diversas herramientas matemáticas que actualmente se encuentran disponibles, el método de volúmenes finitos, fue planteado por primera vez en 1956 pero su uso alcanzó mayor aplicación en los años 90 cuando se empezó a utilizar para resolver problemas físicos que involucraban las ecuaciones de Euler o Navier-Stokes. Este método permite discretizar y resolver numéricamente ecuaciones diferenciales

complejas y se diferencia de los métodos de elementos y diferencias finitas en que cada punto de la malla es un volumen de control que evita que los resultados se traslapen entre puntos vecinos, de esta manera el volumen total del fluido es igual a la sumatoria de todos los volúmenes de control considerados en la malla.

Una importante propiedad del método de volúmenes finitos es que los principios de conservación (masa, momentum y energía), los cuales son la base de la modelación matemática para la mecánica del continuo, son respetados por las ecuaciones discretas deducidas por el método de volúmenes finitos. El método no se limita sólo a problemas de mecánica de fluidos, y de forma general envuelve los siguientes pasos:

- Descomponer el dominio en volúmenes de control.
- Formular las ecuaciones integrales de conservación para cada volumen de control.
- Aproximar numéricamente las integrales.
- Aproximar los valores de las variables en las caras y las derivadas con la información de las variables nodales.
- Ensamblar y resolver el sistema algebraico obtenido.

El punto de partida del método de volúmenes finitos es la descomposición del dominio en pequeños volúmenes de control (VCs) donde las variables son almacenadas en los nodos. Usualmente, los volúmenes de control y los nodos son definidos con una grilla numérica. Los nodos, donde se guardan las variables a resolver, se ubican en los vértices de esta malla o en los centros de los volúmenes y es la referencia con la que se cuenta para aproximar la solución en el resto del dominio [9]. En la Figura 8 se ilustran los elementos antes mencionados.

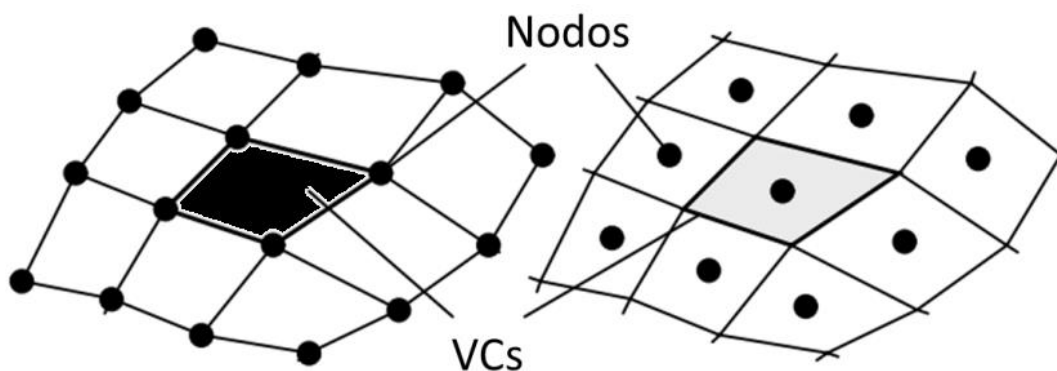


Figura 8. Descripción gráfica del método de volúmenes finitos.

Después de haber definido los volúmenes de control, las ecuaciones de conservación son descritas en su forma integral para cada volumen. En este proceso el teorema de la divergencia de Gauss es usado para convertir integrales de volumen sobre operadores de divergencia y gradiente a integrales de superficie [10]. Por ejemplo la ecuación (5) que representa una ecuación de transporte general:

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V \phi) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi) + S_{\phi} \quad (5)$$

La ecuación (5) se transforma en:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \phi dV + \oint_A \rho V \phi \cdot dA = \oint_A \Gamma \nabla \phi \cdot dA + \int_V S_{\phi} dV$$

Dónde:  $\phi$  es la variable transportada a través de un medio de densidad  $\rho$  y coeficiente de difusión  $\Gamma$  que se mueve a una velocidad  $V$  con un término fuente  $S_{\phi}$ . Para la obtención final del sistema algebraico de ecuaciones se debe aproximar las integrales son, las volumétricas haciendo un cálculo simple basado en las variables nodales, las superficiales aproximándolas por los balances a través de las caras de los volúmenes de control [9]. En dicho proceso las aproximaciones de las variables en las caras y de los gradientes son hechas en función de los valores de las variables en los nodos de la siguiente manera:

$$V_{cell} \cdot \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} + \sum_f^{N_{faces}} \rho_f V_f \phi_f \cdot A_f = \sum_f^{N_{faces}} \Gamma_{\phi} \nabla \phi_f \cdot A_f + S_{\phi} \cdot V_{cell}$$

Finalmente, el sistema de ecuaciones se resuelve por medio de métodos segregados o acoplados. Un aspecto fundamental en los algoritmos de solución es el proceso de inversión de matrices donde diversas técnicas han sido desarrolladas para aumentar la eficiencia del uso de los recursos computacionales y la velocidad de la obtención de la solución [9].

## 2.4. Estrategia de solución

Para resolver matemáticamente el modelo que representa el sistema de recuperación de la energía que se pierde a través de las paredes de un horno de producción de frita cerámica se utilizara un software comercial como lo es ANSYS, este software ofrece una serie de paquetes para realizar simulaciones ingenieriles en diversos campos, el paquete que se adecua a este caso en particular se conoce como FLUENT y permite desarrollar



simulaciones de sistemas que involucran flujo de fluidos (flujo interno y externo) con o sin transferencia de masa y calor, basado en la teoría de volúmenes y elementos finitos como método de discretización.

El proceso de simulación en este tipo de software se puede clasificar en tres etapas principales, inicialmente se realiza el pre-procesamiento, en donde se fijan todos los parámetros físicos y de los modelos utilizados para posteriormente realizar el mallado del sistema, obtener los resultados y realizar el análisis de los mismos. La descripción de todas y cada uno de las etapas del proceso de simulación se presentará a continuación.

### 2.4.1. Pre-procesamiento

Esta etapa requiere de mucho cuidado debido a que los resultados que se obtengan más adelante dependerán totalmente de la información que se suministre en esta etapa, la correcta definición de la geometría del sistema, la realización de mallado, la definición de parámetros y selección de modelos de flujo determinan que tan cercana de la realidad física esta nuestra simulación.

**Geometría:** La geometría del sistema que se va a simular consiste en una sección de una pared lateral del horno, por cuyo interior se ubica un ducto que permitirá el flujo del fluido de trabajo (agua). Las dimensiones de la pared y ducto se determinaron a partir de los planos del horno en donde se realizó el diagnostico energético y se pueden observar en la Tabla 6 y en la Figura 9 se presenta una ilustración de la geometría definida en el programa de simulación.

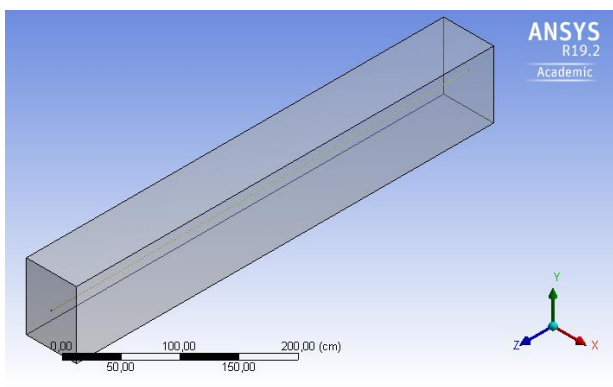


Figura 9. Geometría usada en el proceso de simulación.

<b>Largo</b>	m	5,0
<b>Ancho</b>	m	0,6
<b>Alto</b>	m	0,8
<b>Diámetro ducto</b>	m	0,00625 (1/4")
<b>Material pared</b>	---	Refractario UA26
<b>Fluido</b>	---	Agua

Tabla 6. Dimensiones del sistema.

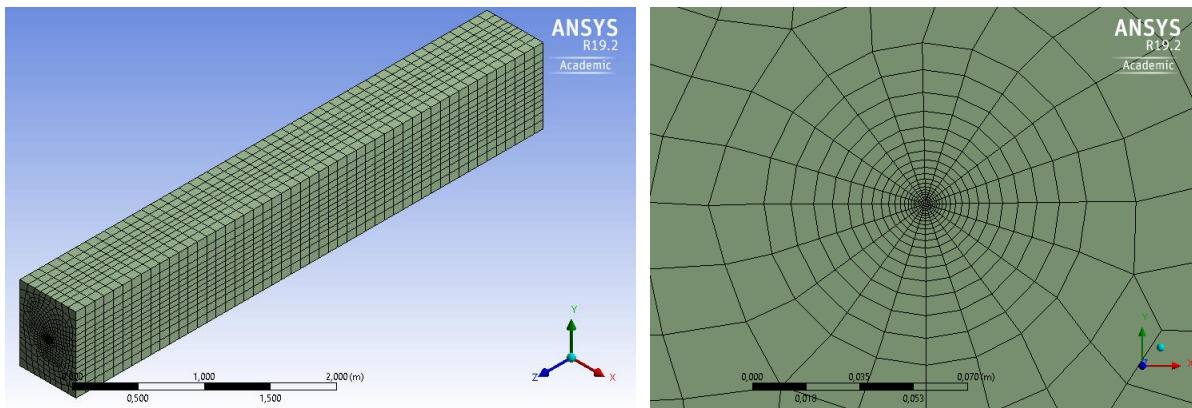
**Mallado:** El proceso de mallado de la geometría del sistema es un proceso dispendioso y de sumo cuidado, debido a que la generación de una malla de buena calidad implica tener en cuenta diferentes aspectos como:

- Tiempo empleado para construir la malla.
- Tiempo de solución del modelo enmallado.
- La difusión numérica.

Generalmente las geometrías que se utilizan en simulación actualmente, son geometrías complejas, por lo que la generación de mallas estructuradas (elementos cuadriláteros o hexaédricos) requiere de mucho tiempo o en ocasiones es imposible de realizar, por lo que una alternativa es la constitución de mallas con elementos triangulares o tetraédricos (mallas no estructuradas) [9,11]. Esto se debe a que permite agrupar las celdas en regiones específicas del sistema mientras que las mallas estructuradas requieren un número alto de celdas en zonas de bajo interés. Sin embargo, para geometrías simples o de complejidad moderada, las mallas cuadriláteras o hexaédricas permiten mejorar la relación de aspectos y por ende la calidad de la malla [11].

En cuanto a la difusión numérica, la cual es una fuente común de error en procesos de simulación CFD multidimensional y se debe a la acumulación del error de truncamiento originado al realizar la discretización de las ecuaciones, la difusión numérica está muy relacionada con el refinamiento de la malla, una malla más refinada o con elementos más pequeños disminuye la acumulación del error de truncamiento que una malla cuyos nodos estén más separados [11].

Para la simulación del sistema de ductos que recupera el calor de las paredes del horno de producción de fritas se implementó una malla estructurada, compuesta por elementos hexaédricos debido que la geometría del problema es relativamente simple, en la Figura 10 se puede observar una sección del enmallado realizado.



a). Dibujo Isométrico del mallado.

b). Mallado en la zona de ducto de recuperación de calor.

Figura 10. Enmallado del sistema de recuperación de calor de las paredes de un horno de producción de frita cerámica.

La malla está constituida por 37128 nodos y 35400 elementos hexaédricos de tamaño variable, con un refinamiento de la malla en la zona cercana al ducto debido a que es justo allí donde se presentan mayores gradientes de temperatura debido al contacto de la pared con el fluido que ingresa a temperatura ambiente y para poder evidenciar los efectos en la capa límite del fluido con el ducto. En cuanto a la calidad del mallado se puede ver en la Figura 11 un diagrama de barras que relaciona el número de elementos y la calidad ortogonal de los mismos.

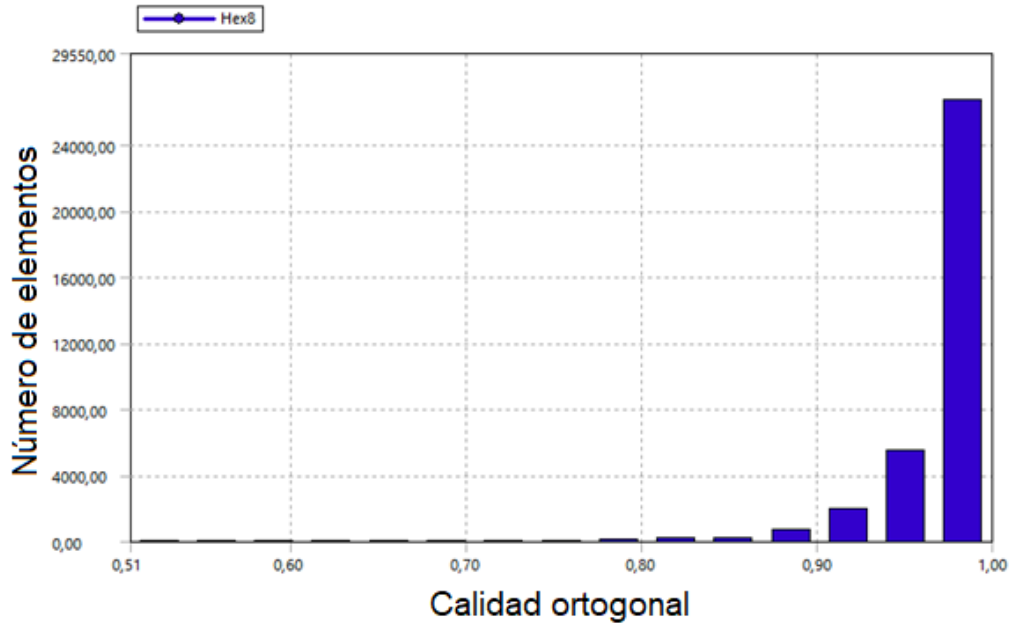


Figura 11. Calidad ortogonal del mallado.

La calidad ortogonal es una de las tantas métricas disponibles para medir la calidad de una celda y se clasifica entre 0 y 1, siendo  $[0,75, 1]$  un intervalo donde la malla se considera apropiada para ser usada en la solución de un modelo. En la Figura 11 se puede ver que más del 95% de las celdas poseen una calidad ortogonal del 0,90 lo cual clasifica la malla obtenida para esta geometría como adecuada para resolver el sistema de ecuaciones sin interferir en la obtención de los resultados [9].

**Condiciones de frontera:** Para resolver el sistema de ecuaciones planteado anteriormente se necesita definir algunas condiciones de contorno como las entrada y salida de fluido y las condiciones de los bordes de las paredes tal como se detalla a continuación.

*Entrada y salida de fluido:* estas condiciones se ubican en la cara frontal y posterior del ducto por donde fluirá el agua de recuperación de calor, para la entrada se establece una condición del tipo *mass flow inlet* en donde se especificar el flujo másico de entrada (0,025 kg/s) el cual se fija en función de garantizar que el flujo dentro del ducto sea

totalmente turbulento (número de Reynolds  $> 4000$ ), una temperatura fija de 300 K, además el método de especificación de la turbulencia se hace en función del diámetro hidráulico y la intensidad (1%). En la Figura 12 se esquematiza la ubicación de la entrada y salida del ducto.

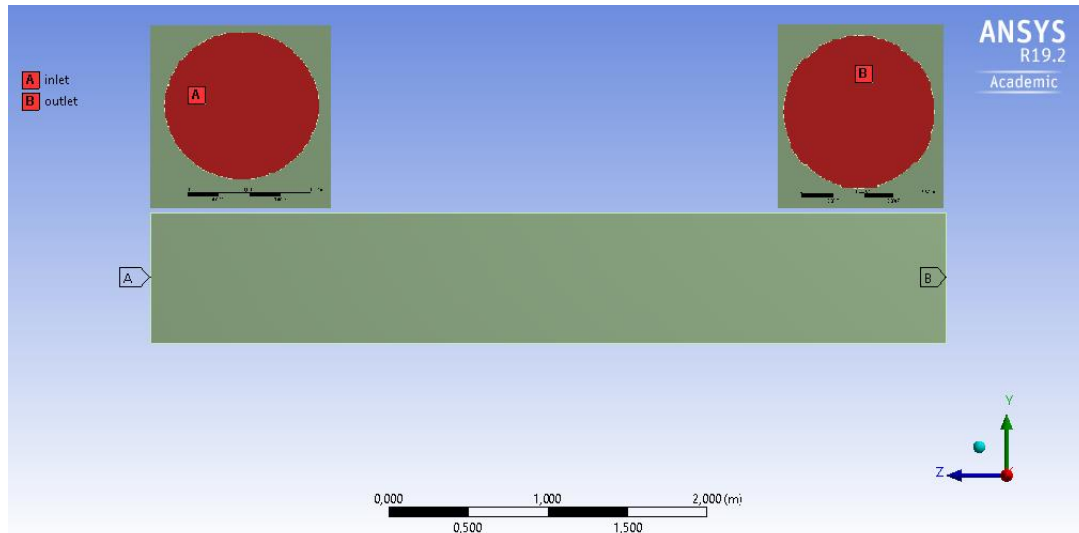


Figura 12. Condiciones de frontera del fluido.

Para la condición de frontera a la salida del ducto, esta corresponde a una condición del tipo *pressure-outlet* en donde se determina la presión de descarga de 0 pascales (presión atmosférica) además de la intensidad de turbulencia de reflujo (1%) y el diámetro hidráulico.

*Superficie interna de la pared:* La cara interna de la pared corresponde a la zona que está en contacto directo con la atmosfera del horno y que se encuentra sometida a una alta temperatura. Para esta, la condición de frontera utilizada fue del tipo *stationary-wall* que representa una pared que no se encuentra en movimiento relativo a un sistema de referencia, en cuanto a las condiciones térmicas de esta pared, se evaluarán de dos formas diferentes, una fijándole la temperatura, la cual es de 1773 K, y la otra es fijando el flujo de calor que atraviesa la pared ( $2860 \text{ W/m}^2$ ) sin generación adicional de calor, ambas condiciones se determinaron con base en las mediciones realizadas en el diagnóstico energético del horno de producción de frita cerámica que se presentó en la primera parte. En la Figura 13 se puede ver un esquema de la geometría del sistema que corresponde a la condición de frontera.

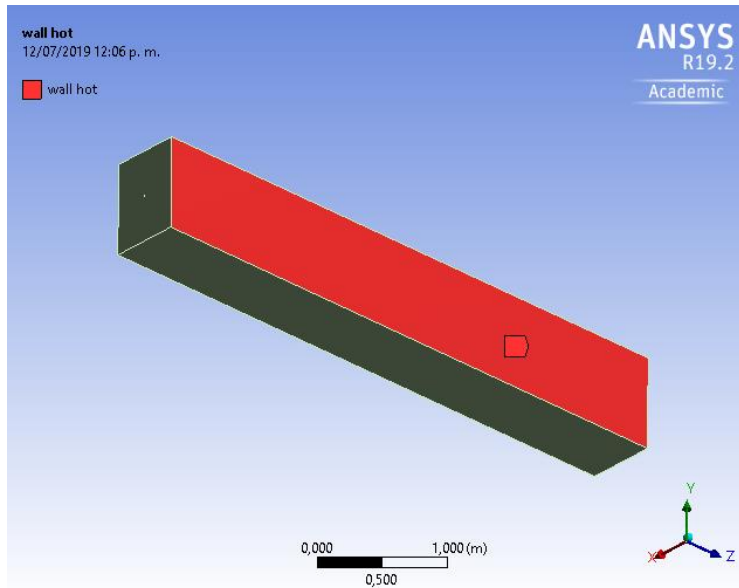


Figura 13. Condición de frontera superficie interior de la pared del horno.

*Superficie exterior de la pared del horno:* La cara externa de la pared del horno se especifica bajo la condición de frontera tipo *stationary-wall* debido a que no presenta ningún tipo de movimiento relativo al sistema de referencia. En cuanto a las condiciones térmicas de esta zona, se tiene que está en contacto directo con aire a temperatura ambiente por lo que la transferencia de calor hacia el exterior se da principalmente por los fenómenos de radiación y convección. Para el fenómeno de radiación se debe determinar la temperatura externa de radiación o temperatura ambiente la cual se fija en 300 K y la emisividad del material de la pared 0,95. Por otra parte para la convección se debe determinar el coeficiente de transferencia de calor por convección libre debido a que no se emplea ningún tipo de mecanismo para acelerar el enfriamiento de la superficie externa del horno. En la Figura 14 se puede ver los valores determinados para esta condición de frontera.

Thermal Conditions

<input type="radio"/> Heat Flux	Heat Transfer Coefficient (w/m2-k)	6.82	constant
<input type="radio"/> Temperature	Free Stream Temperature (k)	300	constant
<input type="radio"/> Convection	External Emissivity	0.95	constant
<input type="radio"/> Radiation	External Radiation Temperature (k)	300	constant
<input checked="" type="radio"/> Mixed	Wall Thickness (m)	0	P
<input type="radio"/> via System Coupling	Heat Generation Rate (w/m3)	0	constant
<input type="radio"/> via Mapped Interface			

Figura 14. Condición de frontera superficie exterior de la pared.

*Pared adiabática:* La condición de frontera de pared adiabática se utiliza debido a que solo se simulará un corte de la pared del horno, e implica que por dichas paredes no

hay transferencia de energía, en la Figura 15 se puede ver la geometría del sistema y las paredes a las cuales se les asocia dicha condición.

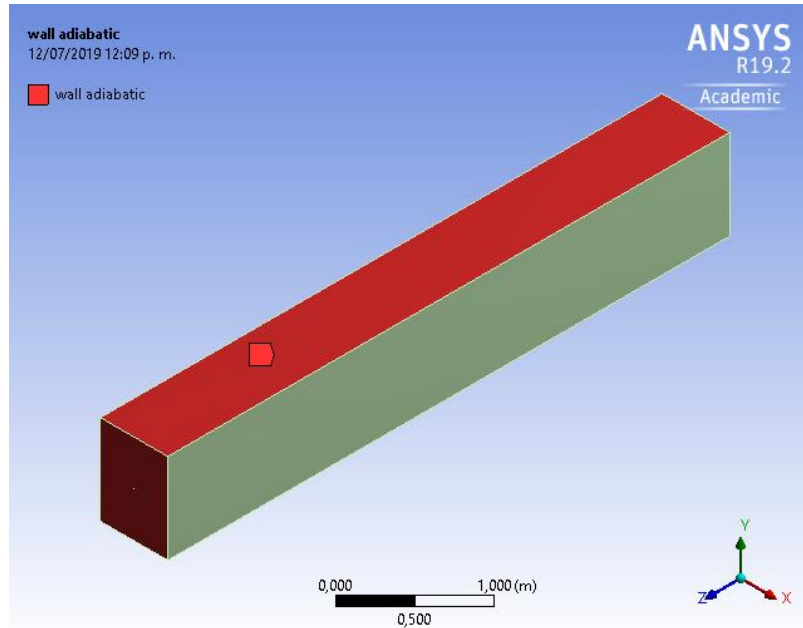


Figura 15. Paredes adiabáticas del sistema.

*Interface fluido-sólido:* la interface entre el fluido (agua) y el sólido (pared del horno) se genera automáticamente por el software de forma que permita la transferencia libre de calor entre la pared y el agua. Además no se considera generación adicional de calor en esta zona.

**Modelos de dinámica de fluidos empleados:** Las simulaciones de dinámica de fluidos se basan en resolver las ecuaciones de conservación de masa, momento y energía en cada uno de los volúmenes de control que se determinan mediante el mallado y condiciones de frontera, a continuación se describen en su manera más general en las ecuaciones (6), (7) y (8).

*Conservación de masa*

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (6)$$

*Conservación de momento*

$$\frac{\partial \rho u_j}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \mu \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + g_j (\rho - \rho_0) \quad (7)$$

### Conservación de la energía

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i H) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial P}{\partial t} \quad (8)$$

Para resolver problemas de dinámica de fluidos como el caso en cuestión, se debe apoyar en un modelo que permita predecir el esfuerzo de Reynolds y los términos escalares de transporte con el objetivo de facilitar la aplicación de las ecuaciones de continuidad.

*Modelo k-ε realizable:* Es un modelo de viscosidad desarrollado recientemente en comparación con el modelo k-épsilon estándar, es una formulación alternativa para viscosidad turbulenta además de contener una nueva ecuación del transporte para la razón de disipación. El beneficio inmediato del modelo realizable es que tiene una resolución superior para flujos que incluyen rotación, capas límites bajo gradientes de presión fuertes y adversos, separación y recirculación. Tanto el modelo RNG k-épsilon como el realizable presentan avances notables sobre el modelo Estándar donde las características del flujo incluyen fuertes curvaturas, vórtices y rotaciones. Como el modelo es relativamente nuevo, no está claro, cuando el modelo realizable k-épsilon supera al modelo RNG, aunque en estudios iniciales se haya demostrado que para flujos separados y flujos secundarios complejos tiene un mejor comportamiento y da mejores resultados frente a otras versiones de modelos k-épsilon [12].

*Modelo de transferencia de calor:* El software Ansys Fluent realiza un balance de energía en cada uno de los volúmenes de control, resolviendo en cada uno la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (v(\rho E + p)) = \nabla \cdot \left( k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j J_j + (\tau_{eff} \cdot v) \right) + S_h \quad (9)$$

Dónde:

$k_{eff}$  Representa la conductividad térmica efectiva ( $k_{eff} = k + k_t$ ), y  $k_t$  es la conductividad térmica turbulenta que se define de diferente manera dependiendo del modelo de turbulencia que se aplique en cada caso.

$J_j$  Representa el flux difusivo por especies

Los términos del lado derecho de la ecuación (9) representan la transferencia de energía por los fenómenos de conducción, difusión por especies y disipación por esfuerzos viscosos, el último término hace referencia a la generación de calor que se puede dar

mediante las reacciones químicas [9]. Para nuestro sistema se desprecian algunos de los términos como el diferencial con respecto al tiempo debido a que el análisis se realiza en estado estacionario, además como no se presenta ningún tipo de reacción química ni generación adicional de calor, el último término del lado derecho también se desprecia.

**Materiales:** La geometría que se definió para el sistema consta de dos secciones una sólida, que corresponde a la sección de pared del horno y una fluida correspondiente al fluido de recuperación de calor. En la Tabla 7 se resumen las principales propiedades termofísicas de cada una de las sustancias usadas en las simulaciones.

Tabla 7. Propiedades termofísicas de los materiales fluido y sólido.

Sustancia	Fluido Agua	Sólido Refractario*
Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	998,2	800
C <sub>p</sub> [j/kg*K]	4182	910
Conductividad térmica [w/m*K]	0,6	1,3
Viscosidad [kg/m*s]	0,001003	---

\* Los valores reportados se obtuvieron de la página web oficial del fabricante [13].

Las propiedades del agua fueron obtenidas a partir de las bases de datos incluidas en el software de Ansys fluent, mientras que las propiedades del sólido que compone la pared del horno se obtuvieron de la página web de la empresa que produce dicho material [13].

#### 2.4.2. Solución

En Ansys Fluent existen dos métodos para resolver las ecuaciones de continuidad de masa, momento y energía, el método basado en presión y el método basado en densidad [14]. El método basado en presión fue desarrollado inicialmente para flujos incompresibles a bajas velocidades, en este método el campo de velocidades se obtiene resolviendo las ecuaciones de momento y el campo de presiones se obtiene al resolver la ecuación de presión o corrección de presiones que se puede deducir al combinar las ecuaciones de continuidad y momento [14].

**Solución basada en presión:** El método de solución basado en presión está basado en un método general llamado método de proyección, en el cual la restricción de la conservación de masa (continuidad) del campo de velocidad se logra resolviendo una ecuación de presión (o corrección de presión). Dicha ecuación se obtiene al manipular las ecuaciones de continuidad y momento, de manera que el campo de velocidad corregido,



puede satisfacer la condición de continuidad, como se puede ver, el sistema de ecuaciones resultantes es complejo, no lineal y está acoplado entre sí, por lo que se hace necesario realizar un proceso iterativo para llegar a una solución convergente. En Ansys Fluent están disponibles dos algoritmos de solución, uno segregado y uno acoplado.

*Algoritmo de solución basado en presión acoplado:* en este proceso iterativo de solución, cada iteración comprende los siguientes pasos:

- 1) Actualización de las propiedades fisicoquímicas (densidad, viscosidad, calor específico, viscosidad turbulenta, entre otros.) del fluido con base en la solución actual.
- 2) Resolver simultáneamente el sistema de ecuaciones de momento y continuidad basada en presión.
- 3) Se actualiza el flux de masa
- 4) Se resuelven las ecuaciones adicionales (energía, especies, turbulencia)
- 5) Se verifica la convergencia, con base en un error máximo admitido.

En la Figura 16 se ilustra dicho proceso de iteración.

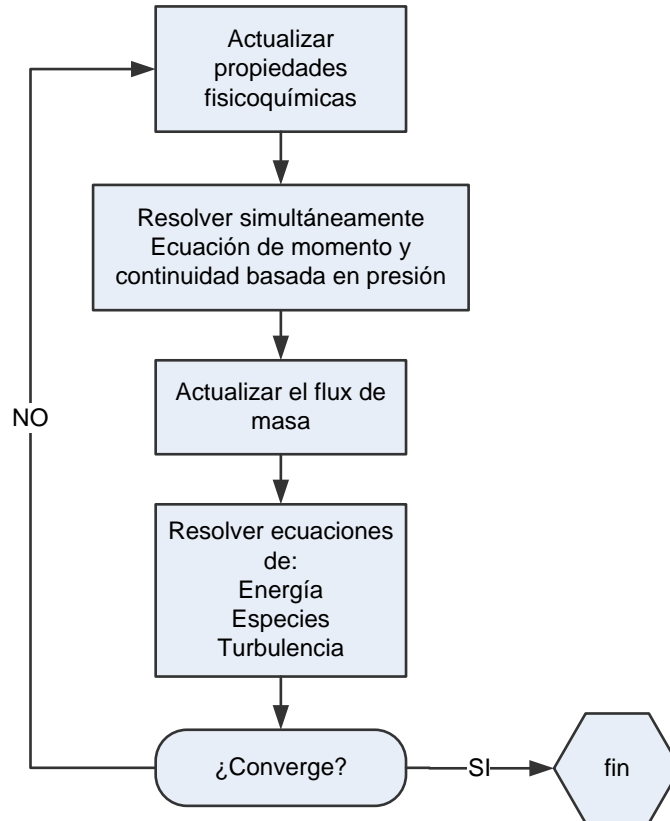


Figura 16. Proceso de iteración basado en presión acoplado [14].

Para resolver el problema de flujo del sistema de recuperación de energía de las paredes de un horno de producción continua de fritas se optó por implementar el método de solución basado en presión acoplado, debido a la complejidad que representa resolver las ecuaciones de conservación de masa, momento y energía al tiempo en estado estacionario, además de que permite una convergencia más rápida en el simulador; como contraparte se requiere una mayor capacidad de memoria (1,5 a 2 veces) debido a que se debe almacenar el campo de velocidad y presión en cada paso de iteración. En la Tabla 8 se resumen los factores más importantes en la etapa de solución.

Tabla 8. Parámetros para solución de ecuaciones.

<b>Método de solución</b>	Basado en presión Acoplado
<b>Obtención de gradiente</b>	Mínimos cuadrados
<b>Esquemas de discretización</b>	
<b>Ecuación de presión</b>	Segundo orden

<b>Ecuación del momentum</b>	Segundo orden "upwind"
<b>Energía cinética turbulenta</b>	Segundo orden "upwind"
<b>Taza de disipación turbulenta</b>	Segundo orden "upwind"
<b>Discretización de energía</b>	Segundo orden "upwind"

Como se mencionó anteriormente, las ecuaciones deben ser linealizadas y discretizadas para poder ser resueltas de manera discreta en cada uno de los volúmenes de control, a la hora de realizar la discretización, existen diferentes esquemas (lineal, estándar segundo orden), algunos más complejos que otros; el esquema de segundo orden es el que permite obtener una aproximación más acertada que el resto de los modelos.

*Criterio de convergencia:* Debido a que el proceso de solución es un proceso iterativo, en donde las ecuaciones son linealizadas, discretizadas y finalmente resueltas, las soluciones no son del todo exactas y se genera una acumulación de error a lo largo del proceso, el criterio de convergencia es el error máximo que se acepta para que la solución sea tomada como convergente.

Tabla 9. Criterios de convergencia

<b>Residual de ecuación</b>	<b>Criterio de convergencia absoluta</b>
Continuidad	$1 \times 10^{-7}$
Velocidad-X	$1 \times 10^{-7}$
Velocidad-Y	$1 \times 10^{-7}$
Velocidad-Z	$1 \times 10^{-7}$
Energía	$1 \times 10^{-12}$
K (energía cinética turbulenta)	$1 \times 10^{-7}$
Épsilon (Taza de disipación turbulenta)	$1 \times 10^{-7}$

Dado que el proceso de solución es iterativo, se requiere inicializar el sistema con un valor semilla o valor inicial, en Ansys Fluent existe la posibilidad de inicializar el proceso de iteración de dos maneras, una ingresando los valores manualmente y la segunda de manera automática. La inicialización automática fue la escogida para resolver nuestro sistema.

En resumen, una vez ajustados todos los modelos y parámetros empleados para la simulación del proceso (ecuaciones de continuidad, momento y energía, modelos de turbulencia, modelos de solución, parámetros de convergencia, entre otros), se procede a resolver el problema de manera iterativa para obtener los resultados y realizar su posterior análisis.

## 2.5. Resultados y análisis de las simulaciones

En esta sección se presentaran los resultados obtenidos para la simulación de un sistema de recuperación de calor de las paredes de un horno de producción de frita cerámica, los resultados se dividirán en dos secciones una en donde se fija la temperatura interna de la pared y otros en los que se fija el flujo de calor a través de la pared, esto con el objetivo de evidenciar algunos comportamientos que son relevantes a la hora de determinar la posibilidad de aplicación del sistema planteado.

### 2.5.1. Simulación de pared del horno en estado actual

Con esta simulación se pretende replicar de manera computacional el perfil de temperatura a través de la pared del horno en el estado actual, sin incluir el sistema de captación de energía residual de las paredes. El perfil de temperatura que se obtuvo se presenta en la Figura 17.

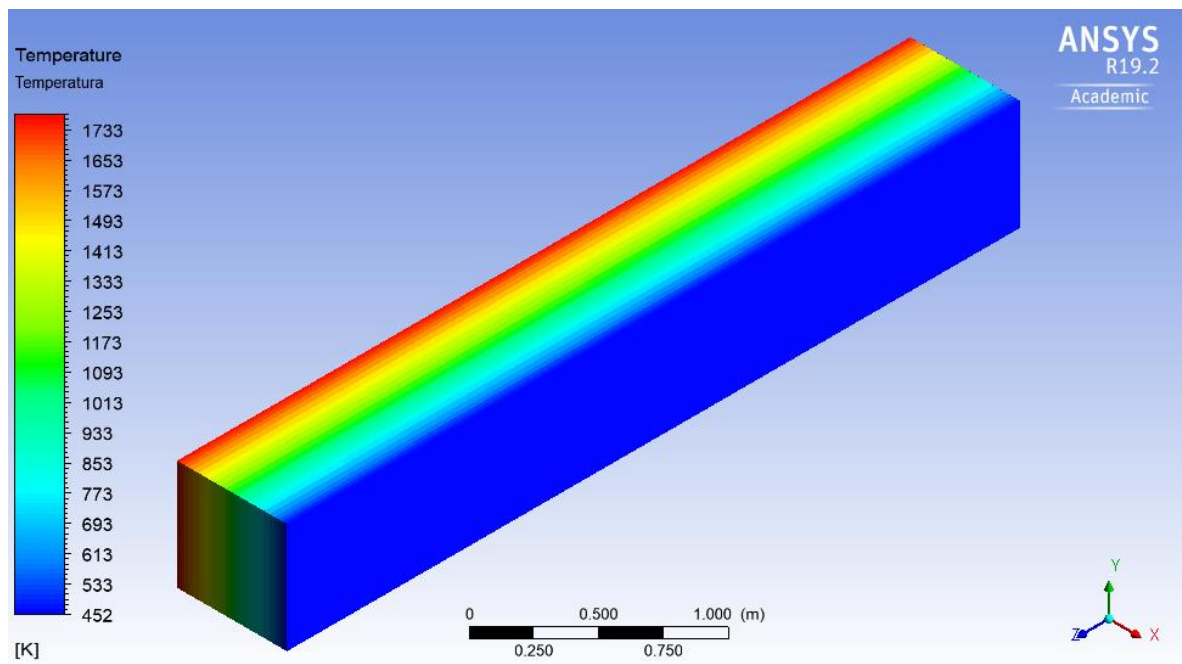


Figura 17. Perfil de temperatura pared del horno, estado actual.

Como se puede observar, el perfil de temperatura a través de la pared del horno disminuye desde los 1733 K (1500 °C) en la superficie interna hasta alcanzar una temperatura exterior uniforme de unos 453 K (180 °C), tal como se presentó en el análisis

termográfico realizado en el capítulo 1; sin embargo, en las mediciones de temperatura e imágenes termográfica se evidenciaban zonas con temperaturas superiores a las obtenidas mediante la simulación, esto puede estar asociado al desgaste que sufre el material refractario al estar expuesto a una alta temperatura por un periodo de tiempo prolongado, que puede alterar las propiedades fisicoquímicas como el coeficiente de conductividad térmica del material e incluso el espesor de la capa de aislamiento térmico debido a que el material que fluye dentro del horno puede ser abrasivo y arrastrar parte del material refractario ubicado bajo la línea de vidrio, que es el nivel más alto que alcanza la frita fundida dentro de la cámara del horno.

### 2.5.2. Temperatura de pared interna fija

Al fijar la temperatura de la superficie interna de la pared del horno se pretende evidenciar de qué manera influye el flujo de un fluido para recuperación de calor interno en la pared en el flujo de calor y el perfil de temperatura de la misma. La integración de la pared del horno con el sistema de ductos de recuperación de calor internos, modifica el perfil de temperatura de la pared tal y como se puede ver en la Figura 12, a diferencia del estado actual del horno, en donde la totalidad de la energía que se transfiere desde la cámara a la pared se pierde en el ambiente por medio de los fenómenos de radiación y convección, con la implementación del sistema de ductos de recuperación de calor, la energía se debe distribuir entre el fluido, el cual aumenta su temperatura entre la entrada y salida, y la superficie externa de la pared, por lo que la temperatura de esta zona disminuye sustancialmente, disminuyendo las pérdidas de energía al exterior del equipo.

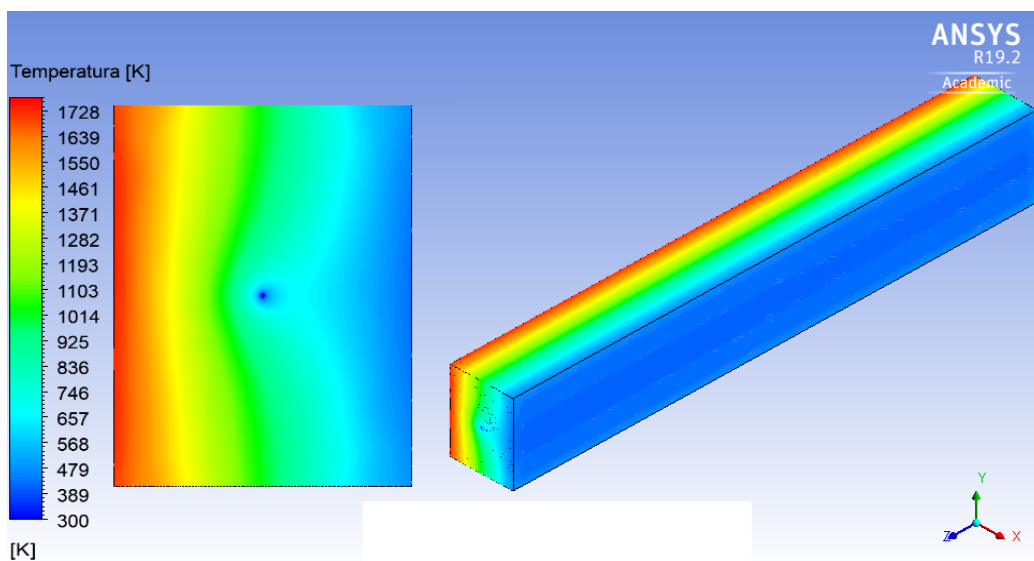


Figura 18. Perfil de temperatura, temperatura de superficie interna fija.

En la Figura 19 se ilustra el perfil de temperatura en el exterior de la pared del horno, se puede ver como la temperatura disminuyó hasta en 40 K en la zona central de la geometría simulada en comparación con el perfil térmico de la superficie exterior del horno sin el sistema de recuperación presentado en la Figura 17 y como el efecto del paso de fluido térmico disminuye hacia los extremos superior e inferior del área ilustrada.

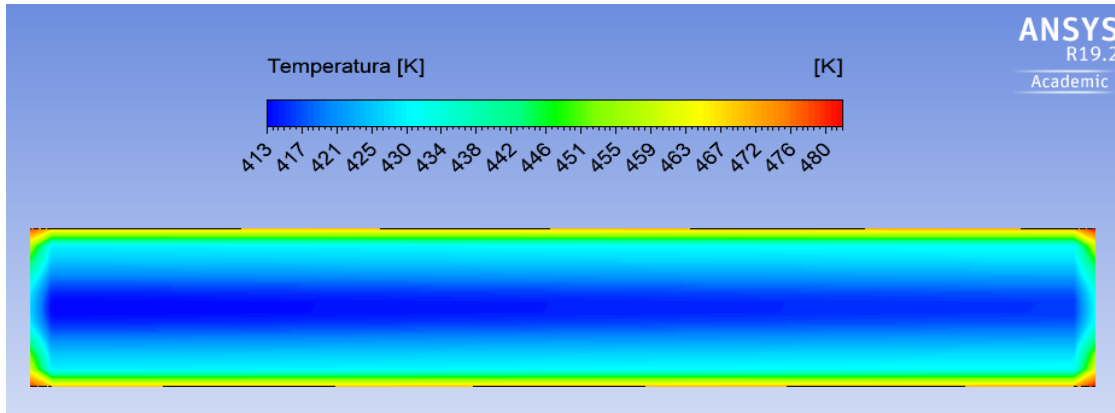


Figura 19. Perfil de temperatura superficie exterior, temperatura de la superficie interna fija.

Por otra parte, es importante analizar no solo el efecto sobre la temperatura exterior de la pared, sino también el efecto sobre el fluido térmico, el cual gana parte de la energía que fluye desde dentro de la cámara del horno hasta el exterior en forma de calor a medida que fluye por dentro de la pared, en la Figura 20 se puede ver el perfil de temperatura desde que ingresa a temperatura ambiente (300 K) hasta que sale de la pared a unos 360 K.

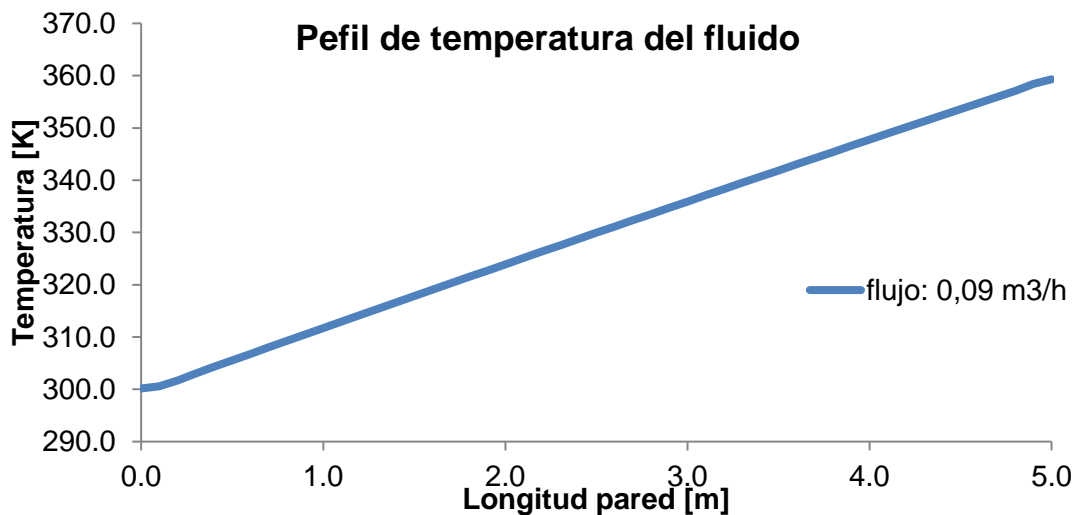


Figura 20. Perfil de temperatura del fluido a lo largo del ducto.

Como se puede ver, el calentamiento del fluido es constante y depende entre varios factores del tipo de fluido, flujo másico, temperatura de la pared, además de otros factores de diseño como el diámetro del ducto el cual determina el área de transferencia de calor y el régimen de flujo. En este caso se simuló un flujo turbulento completamente desarrollado debido a que de esta forma se obtiene un perfil de temperatura constante en dirección radial en el ducto. A pesar de que el fluido permite disminuir la temperatura del exterior de la pared del horno, la temperatura máxima del fluido no lo hace atractivo para una posible recuperación de calor debido a su bajo flujo másico ( $0,09\text{m}^3/\text{h}$ ) y baja temperatura.

### **2.5.3. Flujo constante de calor a través de la pared**

Esta es otra forma de analizar el comportamiento térmico del sistema acoplado entre las paredes del horno y los ductos de recuperación de energía, a diferencia de las simulaciones anteriormente presentadas, en donde al fijar la temperatura de la superficie interna de la pared, con los valores medidos durante las visitas de campo, se pretendía evidenciar principalmente el efecto del funcionamiento de los ductos de recuperación de energía sobre la temperatura externa de la pared, permitiendo concluir que se puede disminuir la temperatura superficial disminuyendo las pérdidas energéticas al exterior por las paredes. Por otra parte, al fijar el flujo de calor que atraviesa la pared del horno con base en los valores obtenidos mediante medición directa y corroborada con las simulaciones realizadas, lo que se pretende observar es si existe o no un efecto de enfriamiento sobre la superficie interna de la pared del horno. Como se puede ver en la Figura 21, el perfil de temperatura a través de la pared se ve afectado debido al paso de fluido térmico por los ductos de recuperación, debido a que el enfriamiento se propaga tanto hacia afuera como hacia adentro de la pared.

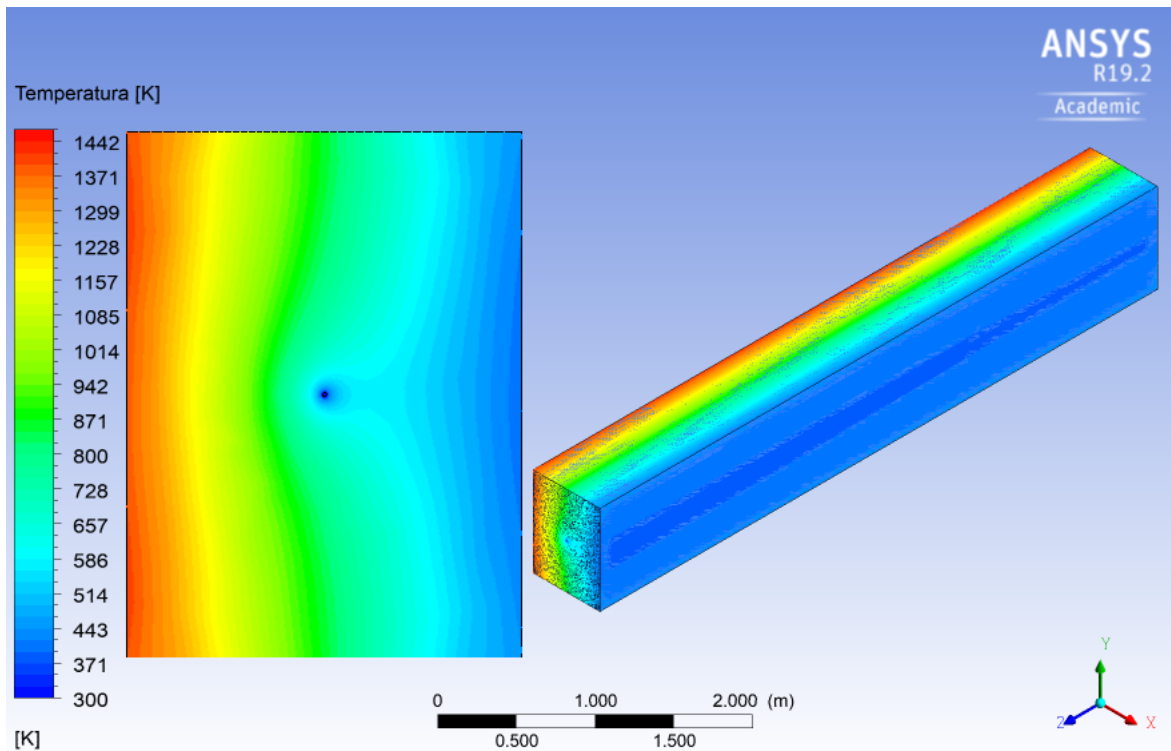


Figura 21. Perfil de temperatura, flujo de calor fijo.

El efecto térmico que tiene la circulación de un fluido a través de unos ductos para recuperación de energía térmica de las paredes del horno de fritas se puede ver en la Figura 22, la simulación permite evidenciar como se presenta una caída importante en la temperatura interna de la pared, la cual experimenta una disminución de cerca de 200 K, esto se debe a que el efecto térmico del flujo de agua a través de los ductos se propaga en forma radial desde el centro del ducto afectando todo el espesor de la pared del horno, este efecto es indeseable para el proceso que se lleve a cabo dentro del horno debido a que una disminución en la temperatura de la superficie interna por debajo de la temperatura de proceso, implica que los quemadores deban suplir dicha disminución de temperatura quemando más combustible, lo cual es contrario a la filosofía de ahorro energético y uso racional de los recursos.

Por otra parte, se puede ver que el efecto térmico es mayor del lado derecho de la imagen y esto se debe a que es justamente por esta zona donde ingresa el fluido a temperatura ambiente de manera que los gradientes de temperatura entre el fluido y el sólido son mayores y se van acentuando a medida que el fluido fluye y va ganando energía térmica hasta salir de la pared por el extremo izquierdo de la Figura 22.



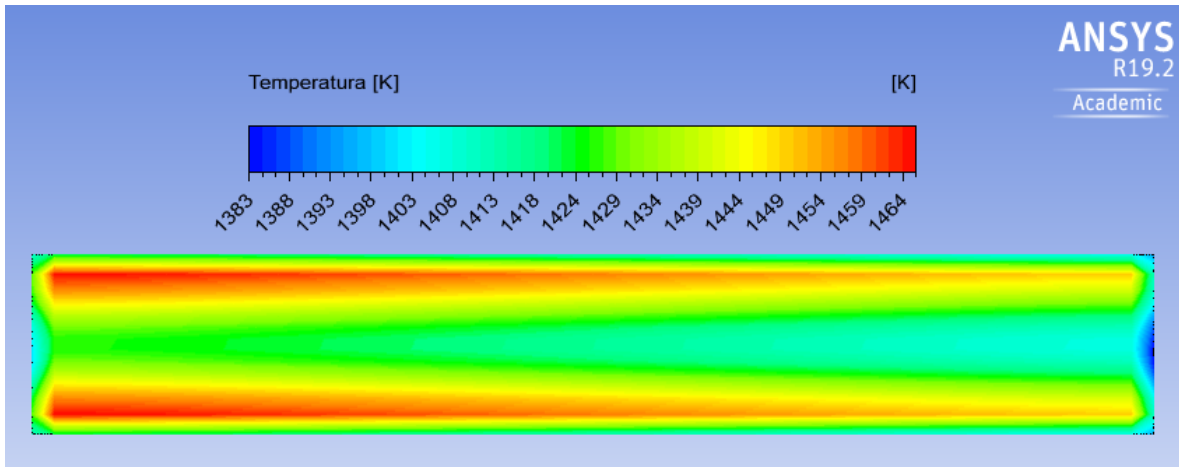


Figura 22. Perfil de temperatura superficie interna del horno, flujo de calor fijo.

El efecto térmico sobre la superficie exterior es similar al presentado cuando se fija la temperatura interna de la pared, hay una disminución sustancial de la temperatura, que alcanza un descenso de 60 K, en el centro de la imagen y que va disminuyendo a medida que aumenta la distancia entre el ducto y la superficie exterior, como se puede ver en la Figura 23.

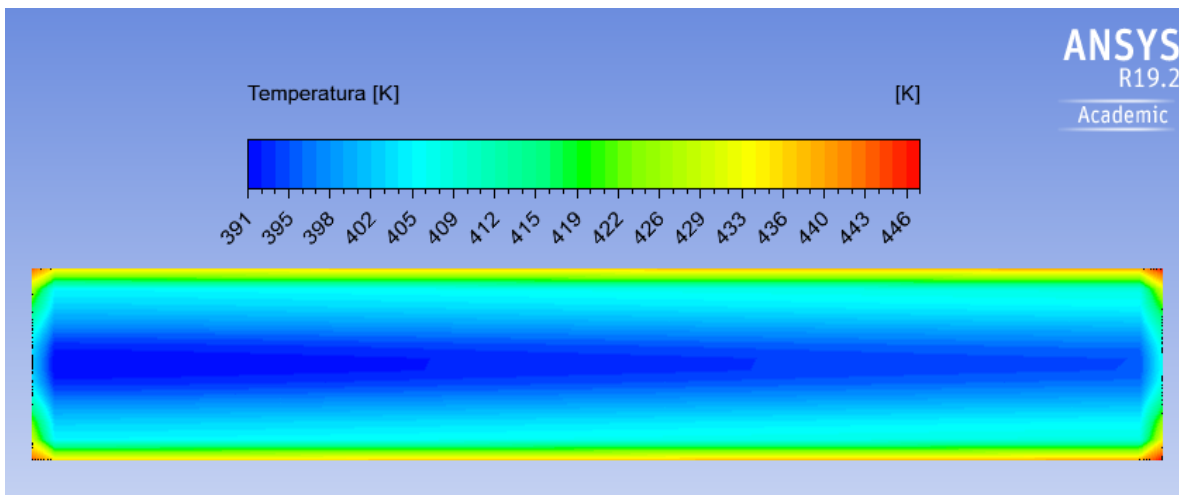


Figura 23. Perfil de temperatura superficie externa del horno, flujo de calor fijo.

Un balance de energía resumido para los tres casos simulados se presenta en la Tabla 10, en donde se puede ver las temperaturas de la superficie interna y externa de la pared y los flujos de calor a través de las anteriores superficies y el calor retirado por el fluido de

recuperación, además de una comparación porcentual de cada caso con respecto al estado actual de las paredes del horno de producción de frita.

Tabla 10. Resumen balance de energía de los casos simulados.

	<b>Temperatura interna [K]</b>	<b>Temperatura externa [K]</b>	<b>Flujo de calor pared interna [W]</b>	<b>Flujo de calor pared externa [W]</b>	<b>Flujo de calor agua [w]</b>
<b>Estado actual</b>	1773	453	11440	-11440	---
<b>Temperatura fija</b>	1773	423 (-6,6%)	14836 (+29%)	-8560 (-25%)	-6280
<b>Flujo de calor fijo</b>	1440 (-18%)	401 (-11,5%)	11440	-6579 (-42%)	-4860

Como se puede observar ambos casos permiten disminuir la temperatura externa de la superficie de la pared, disminuyendo así la transferencia de energía al exterior del equipo, sin embargo se evidencia un aumento en el flujo de calor cuando se fija la temperatura de la superficie interna, esto obliga a los quemadores del horno a aumentar la potencia térmica, consumiendo más cantidad de combustible y disminuyendo la eficiencia del proceso.

## 2.6. Apuntes parciales

Los resultados obtenidos mediante la simulación de una sección de la pared lateral de un horno continuo de producción de frita acoplado a un sistema de recolección de energía, permiten evidenciar un efecto positivo sobre la temperatura de la superficie externa de la pared, debido a que la implementación de los ductos colectores de energía térmica, permiten disminuir la temperatura externa del horno y por consiguiente disminuyendo las pérdidas energéticas por radiación y convección hacia el ambiente, además de brindar al personal de operación de los hornos, un ambiente más cómodo y seguro.

En cuanto a la corriente agua que se retira por medio de los ductos colectores, se puede clasificar como una corriente de baja temperatura (<373 K) pero que aun así posee un alto potencial de reutilización dentro de los procesos propios de la plata bien sea cómo agua para procesos de mezclado y homogenización de materias primas en otros procesos productivos, como fluido térmico precalentado en un sistema de generación eléctrica tipo ORC o simplemente como agua caliente que se utilizó en baños y duchas de la empresa.

### **3. Evaluación técnica de un ciclo rankine orgánico para recuperar calor de los gases de combustión**

El cambio climático que actualmente está sufriendo el planeta es uno de los retos que la humanidad debe resolver a corto plazo debido los impactos negativos sobre los ecosistemas más vulnerables asociados al aumento de la temperatura global de la tierra, este fenómeno se atribuye principalmente a las emisiones de gases de efecto invernadero que son producidas en diferentes medidas por las actividades que realiza la humanidad. La generación de energía (31%), el transporte (15%) y la actividad agropecuaria (11%) son los sectores que más gases de efecto invernadero producen y estas emisiones se concentran principalmente en países cuyas economías son más desarrolladas [15], actualmente China es el mayor emisor de gases de efecto invernadero con cerca de 12000 MtCO<sub>2e</sub>/año, seguido de Estados Unidos (6000 MtCO<sub>2e</sub>/año) y la Unión Europea con 4000 MtCO<sub>2e</sub>/año, sin embargo la proyección para estos dos últimos se mantiene fija a diferencia de China en donde se espera que dichas emisiones sigan en aumento debido a que su economía aún está en expansión [15].

La problemática del cambio climático y las emisiones de gases de efecto invernadero se debe abordar como una cadena en donde el papel principal lo tienen las grandes políticas de reducción de los niveles de emisión y compromisos entre países como el protocolo de Kioto o el acuerdo de Paris, ambos firmados durante la Convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático en 1998 y 2015 respectivamente [16,17] apoyadas en medidas individuales que cada sector, sub sector o entidad pueda aplicar para ayudar a que las políticas globales se cumplan. Entre los objetivos planteados para combatir efectivamente el cambio climático se pueden destacar los siguientes:

- a.) Disminuir la intensidad energética en sectores residenciales e industriales.
- b.) Sustituir los combustibles fósiles por energía eléctrica en actividades como el transporte y calefacción, refrigeración de edificios.
- c.) Generación de energía limpia, mediante la migración hacia fuentes de energía renovable como energía eólica, fotovoltaica, biomasa, geotérmica y grandes centrales hidroeléctricas.
- d.) Reforzar la capacidad de las redes y líneas de transmisión interregionales para absorber las fluctuaciones diarias y estacionales.

La tecnología de ciclo Rankine orgánico es una alternativa que permite dar cumplimiento a los objetivos a y c antes planteados debido a que puede tener un efecto positivo sobre la intensidad energética en sectores industrial y residencial mediante la recuperación de

calor residual que de otra manera se estaría desechando a la atmosfera dando un mayor uso a la energía primaria mediante la generación combinada de electricidad y calor [18]. Por otra parte, los sistemas ORC pueden utilizarse en la conversión de fuentes de energía renovable en electricidad como ocurre con las fuentes de energía geotérmica, solar o biomásica [19].

### 3.1. Principio de operación ciclo rankine orgánico (ORC)

El principio de operación del Ciclo Rankine Orgánico (ORC) es el mismo que el del tradicional ciclo Rankine operado con agua, la diferencia fundamental es la sustitución del fluido de trabajo por una sustancia de carácter orgánico que generalmente posee una mayor volatilidad, lo cual posibilita la recuperación de calor de focos térmicos de menor calidad a bajas y medias temperaturas. El ORC por ser un ciclo de potencia opera en cuatro etapas fundamentales; en primera instancia, el fluido de trabajo en estado líquido es presurizado por una bomba (c) y por medio de tuberías se inyecta a un evaporador (d) o intercambiador de calor donde se da la recuperación de energía de la fuente de calor residual. Luego de la etapa de evaporación, El vapor a alta presión producido se expande en una turbina (a) la cual esta acoplada a un generador eléctrico. Finalmente, el vapor que sale de esta se condensa (b) y es succionado por la bomba, comenzando de nuevo el ciclo (Figura 24 a).Adicionalmente, como medida para aumentar la eficiencia del ciclo puede incluirse un intercambiador interno de calor (e) para aprovechar aún más la energía del vapor expansionado, precalentando con éste el fluido que sale de la bomba y que entra al evaporador, tal y como puede verse en la Figura 24 b.

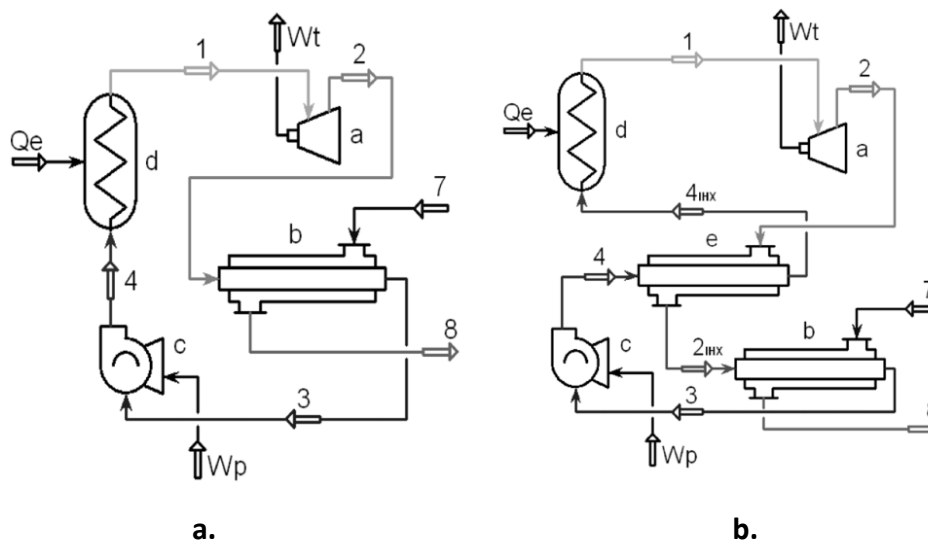


Figura 24. Diagrama de proceso ORC simple (I), con intercambiador de calor (II) [20].

### 3.2. Selección del fluido de trabajo

La correcta selección del fluido de trabajo es un aspecto clave en el proceso de diseño de un ORC para recuperación de calor residual, debido a que este determina incluso la eficiencia final del proceso. En general se busca que el fluido posea la menor temperatura y presión de ebullición posible. Además de cumplir con otros aspectos igual de importantes como son: no ser tóxico, no inflamable, ser abundante y económicamente viable de utilizar.

- **Seguridad:** El fluido no debe ser tóxico (en caso de haber fugas en la planta o en su manipulación), ni corrosivo (evidentemente evita costos mayores de mantenimiento y/o daño de la instalación) e inflamable. Para lo anterior, se suele emplear la clasificación de seguridad estándar 34 de la ASHRAE, como indicador del grado de peligrosidad de los fluidos. Esta clasificación de los fluidos va desde A1 (menor toxicidad y no inflamable) hasta A3 (menor toxicidad y más alta inflamabilidad) ó B1 (mayor toxicidad y no inflamable) hasta B3 (mayor toxicidad y más alta inflamabilidad) [20].
- **Estabilidad:** La estabilidad química del fluido a utilizar limita la temperatura de la fuente de calor, ya que al exponerse a determinadas temperaturas éste puede descomponerse, produciéndose sustancias que provocarían un funcionamiento del ciclo diferente al inicialmente diseñado. Además, podrían producirse compuestos tóxicos e irritantes que conducen a problemas de salud si ocurre alguna fuga.
- **Presión:** Un fluido que requiera altas presiones para alcanzar un proceso eficiente, aumenta los costos de equipos debido a la mayor resistencia que deben soportar y además, aumenta la complejidad de la planta, por ello este factor es muy importante.
- **Disponibilidad y bajo costo:** Un fluido de baja disponibilidad y/o alto costo limita su utilización en los sistemas ORC debido a que restringe la viabilidad económica de proyectos de recuperación de energía.
- **Calor latente y peso molecular:** Cuanto mayor sea el peso molecular y el calor latente del fluido, éste podrá absorber más energía de la fuente de calor en el evaporador y, por tanto, reducir el tamaño de la instalación y el consumo de la bomba debido a la disminución del flujo másico requerido.
- **Bajo punto de congelación:** El punto de congelamiento del fluido debe ser más bajo que la temperatura más baja del ciclo.

### 3.3. Clasificación de los fluidos orgánicos de trabajo

Como se mencionó anteriormente, la selección de que fluido es más apropiado para determinada aplicación es un proceso complejo y dependiente de múltiples factores, además de influir de manera importante en la eficiencia final del sistema. Existe una amplia gama de sustancias que han sido probadas y utilizadas en diferentes sistemas ORC, evidencia de ello son las investigaciones como las de Bard et al [21,22]. en donde se llevó a cabo una identificación, clasificación y evaluación de 68 sustancias orgánicas con potencial para ser utilizadas en un ciclo Rankine Orgánico, los resultados obtenidos demostraron que sustancias como el R11, R113 y R114 permiten obtener una mayor eficiencia; sin embargo, este tipo de compuestos representan un riesgo para el medio ambiente debido a su alto potencial de destrucción de la capa de ozono o actúan como gases de efecto invernadero por lo que su utilización hoy en día es restringida e incluso prohibida. En estudios más recientes como los realizados por [23–26] se evaluaron otro tipo de compuestos como hidrocarburos livianos, CO<sub>2</sub>, HFC, amoniaco entre otros, e incluso mezclas de ellos. Dichos estudios permitieron identificar que fluidos como el R245fa y R134a son ideales para aplicaciones en ciclos que operan en condiciones subcríticas debido a que permiten una mayor capacidad de generación eléctrica y permiten realizar diseños más compactos debido a que sus propiedades termodinámicas permiten disminuir el área de transferencia en equipos como evaporadores y condensadores.

En general los fluidos orgánicos con potencial de ser utilizadas en aplicaciones ORC en sus distintas configuraciones y condiciones de operación se pueden clasificar de diferentes maneras, la principal clasificación está asociada a su comportamiento termodinámico dentro de un proceso cíclico que se refleja en la forma que toma la pendiente de la curva de saturación o diagrama T-s la cual puede ser negativa, vertical o positiva como se puede ver en la Figura 25.

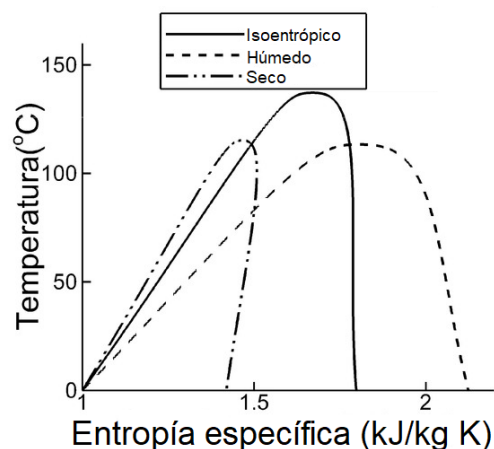


Figura 25. Diagrama T-s para fluidos secos, húmedos e isoentrópico.

El comportamiento de la línea de saturación de un fluido es fundamental en el proceso de expansión en un ciclo Rankine orgánico cuyo objetivo principal es la recuperación de calor residual de baja y media temperatura; por ejemplo, si un fluido de trabajo cuyo comportamiento tenga pendiente negativa (fluido húmedo) se expande sin aporte adicional de calor, el resultado cae dentro del domo de saturación formando una mezcla de líquido/vapor, indeseable en equipos como turbinas debido a que genera desgaste adicional, este aspecto no es relevante en fluidos isoentrópicos (pendiente vertical) y fluidos secos (pendiente positiva), debido a que la expansión de vapor no genera líquido bajo ninguna condición de operación.

Otra forma de clasificar los fluidos de trabajo en ciclos Rankine orgánicos está asociada con el nivel de temperaturas a extraer de una fuente de calor; puesto que, como se ha mencionado anteriormente la selección del fluido de trabajo para un sistema ORC posee una dependencia importante de la fuente de calor residual. En la Figura 26 se puede una clasificación propuesta por Vélez et al. [27] en el año 2012.

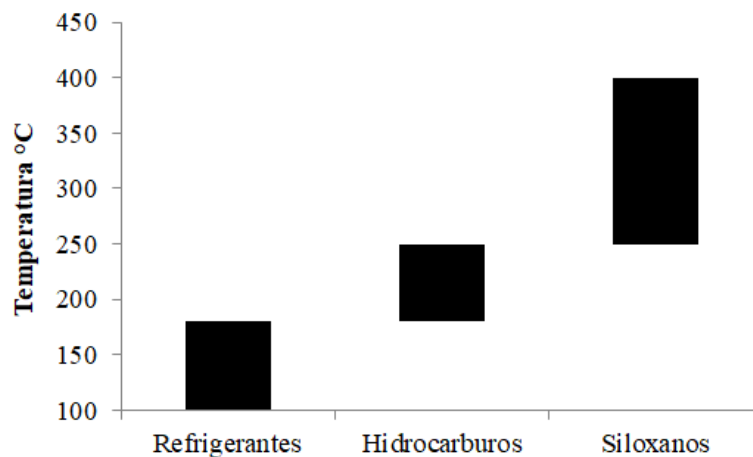


Figura 26. Clasificación de sustancias para ORC de acuerdo a la temperatura de la fuente [27].

De acuerdo con esta clasificación, los refrigerantes HFC como el R134a, R245af son los más utilizados para recuperación de calor residual de baja temperatura, hasta 180 °C, seguidos de los hidrocarburos livianos como el propano, butano, iso-butano, cuyas propiedades termofísicas permiten utilizarlos a condiciones de temperatura de hasta 250 °C y por último están los siloxanos caracterizados por estar compuestos por silicio, oxígeno e hidrógeno, su utilización está restringida a sistemas de alta intensidad térmica que operan por encima de los 250 °C.

### 3.4. Metodología

Con el objetivo de evaluar la factibilidad de recuperar el calor residual de los gases de combustión que salen por la chimenea en el proceso de producción continua de frita mediante un sistema ORC se propone la siguiente metodología de trabajo en donde se seleccionan algunos de los fluidos refrigerantes más estudiados y se simula un ciclo Rankine orgánico para cada uno de ellos evaluando aspectos de importancia en el diseño del ciclo como: la eficiencia del proceso, trabajo producido en la etapa de expansión, entre otros, en la Figura 27 se presenta el esquema del ORC que se va a analizar y sus principales corrientes.

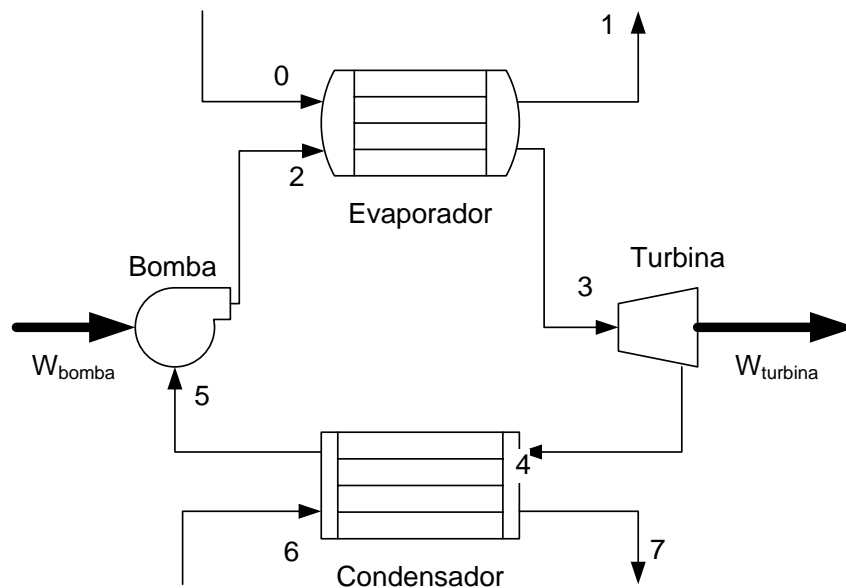


Figura 27. Diagrama esquemático ciclo Rankine orgánico simple.

El sistema de recuperación de energía térmica tipo ORC que se presenta en la Figura 27 corresponde al caso más simplificado de ciclo Rankine orgánico, este diseño permitirá obtener una primera aproximación de cómo es el comportamiento de cada uno de los fluidos de trabajo dentro del ciclo y de su eficiencia.

#### 3.4.1. Selección del fluido de trabajo

Como se mencionó anteriormente, la selección del fluido de trabajo en un ciclo de generación de potencia posee fuerte inferencia en el diseño y operación del mismo, pudiendo inclusive determinar la eficiencia y las condiciones de operación de los equipos



que componen el sistema. La selección de fluidos se realiza con base en los resultados publicados en diferentes estudios de selección y clasificación de fluidos de trabajo para ciclos ORC [20,28,29] un ejemplo es el trabajo de Thurairaja, K. et al [28]. En donde se clasifican diferentes sustancias usadas como fluidos de trabajo en ciclos Rankine orgánicos en función de la temperatura de la fuente de energía a recuperar. Las sustancias seleccionadas, sus propiedades fisicoquímicas de mayor relevancia y clasificación de seguridad se pueden ver en la Tabla 11.

Tabla 11. Refrigerantes seleccionados para el análisis de ciclo ORC [30,31].

	Nombre	tipo	peso molecular kg/kmol	Temperatura evaporación K	Temperatura crítica K	Presión crítica kPa	seguridad	*ODP	**GWP
R113	Triclorofluorometano	seco	187,4	321	486	338	B2	0,9	6000
R123	2,2-dicloro-1,1,1-trifluoroetano	seco	152,9	246	456	336	B2	0	120
R290	Propano	húmedo	44,1	231	369	418	A3	0	20
R600	Butano	seco	58,1	273	425	379	A3	0	20'
R718	Agua	húmedo	18	373	647	22060	A1	0	<1
R744	Dióxido de carbono	húmedo	44	216	304	7380	A1	0	1

\*Potencial de agotamiento de la capa de ozono.

\*\*Potencial de calentamiento global.

Como se puede ver en la Tabla 11, la selección de refrigerantes incluye una gran variedad de fluidos considerados como los más adecuados en términos de eficiencia, propiedades fisicoquímicas y factores medioambientales como el ODP y GWP.

### 3.4.2. Modelamiento del proceso

El modelamiento del ciclo Rankine orgánico permite diseñar y analizar teóricamente el comportamiento del fluido de trabajo bajo unas condiciones de operación determinadas, para ello se realizaran los balances de masa y energía en cada uno de los equipos que constituyen un ORC simple basado en las siguientes suposiciones que simplifican el proceso.

- Se considera estado estacionario.
- Tanto la bomba como la turbina operan de manera isoentrópico con una eficiencia de 75%.
- No se consideran pérdidas de calor ni caídas de presión en el evaporador, condensador ni en las líneas de conexión.
- Los procesos de adición de calor (evaporador) y enfriamiento (condensador) se consideran procesos isobáricos.

- Las propiedades termofísicas de los fluidos seleccionados se obtuvieron de las bases de datos del programa **Engineering Equation Solver EES**.
- La corriente caliente del evaporador corresponde a los gases de combustión que salen del horno de producción de fritas, con una temperatura  $T_0=1173$  K y un flujo másico  $\dot{m}_{gas} = 300$  kg/h.
- El fluido de enfriamiento en el condensador es agua a temperatura ambiente  $T_6=300$  K.

### **Turbina**

El trabajo producido en la turbina se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$W_{turbina} = \dot{m}_{ref} * (h_3 - h_4) * \eta_{turbina} \quad (10)$$

En donde:

$$\dot{m}_{ref} \left[ \frac{kg}{s} \right] = \text{flujo másico de refrigerante}$$

$$h_3 \left[ \frac{kJ}{kg} \right] = \text{entalpia antes del proceso de expansión}$$

$$h_4 \left[ \frac{kJ}{kg} \right] = \text{entalpia despues del proceso de expansión}$$

$$\eta_{turbina} = \text{eficiencia de la turbina}$$

### **Bomba**

El trabajo consumido por la bomba en el proceso de compresión del fluido de trabajo se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$W_{bomba} = \frac{\dot{m}_{ref} * (h_5 - h_2)}{\eta_b} \quad (11)$$

En donde:

$$\dot{m}_{ref} \left[ \frac{kg}{s} \right] = \text{flujo másico de refrigerante}$$

$$h_5 \left[ \frac{kJ}{kg} \right] = \text{entalpia antes de la compresión}$$

$$h_2 \left[ \frac{kJ}{kg} \right] = \text{entalpia despues de la compresión}$$

$$\eta_b = \text{eficiencia de la bomba}$$

### **Evaporador**

El diseño de un evaporador es un proceso complejo y extenso que incluye la determinación del calor transferido, temperaturas de entrada y salida de los fluidos caliente y frío, coeficientes y áreas de intercambio, entre otros aspectos. Sin embargo, para el correcto análisis del ciclo ORC que pretende recuperar el calor residual de una corriente de gases a alta temperatura basta con la determinación del calor transferido en el equipo, el cual se calcula a través de la siguiente ecuación:

$$Q_{\text{evaporador}} = m_{\text{gases}} * C_{p_{\text{gases}}} * (T_0 - T_1) = m_{\text{ref}} * (h_2 - h_3) \quad (12)$$

En donde:

$Q_{\text{evaporador}} [kW]$  = calor transferido del fluido caliente al frío.

$m_{\text{gases}} \left[ \frac{kg}{s} \right]$  = flujo másico de fluido caliente.

$C_{p_{\text{gases}}} \left[ \frac{kJ}{kg * K} \right]$  = capacidad calorífica a presión constante del fluido caliente.

$T_0$  y  $T_1 [K]$

= temperaturas del fluido caliente a la entrada y salida del evaporador.

$m_{\text{ref}} \left[ \frac{kg}{s} \right]$  = flujo másico de refrigerante.

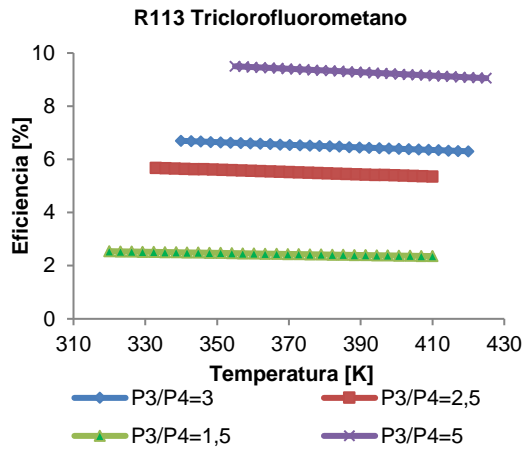
$h_2$  y  $h_3 \left[ \frac{kJ}{kg} \right]$  = entalpia de refrigerante a la entrada y salida del evaporador.

### 3.5. Resultados y análisis de simulaciones

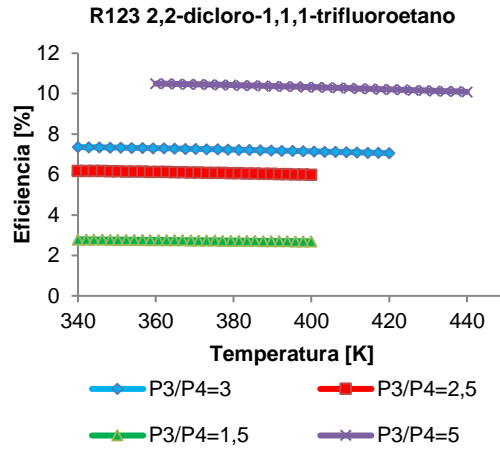
Para analizar el comportamiento termodinámico del ciclo Rankine orgánico se evaluará el efecto sobre la eficiencia energética global del ciclo que tienen dos de los principales factores como son la temperatura a la entrada de la turbina la cual depende de factores como el fluido de trabajo, del diseño del evaporador y del calor disponible para recuperación y la diferencia de presiones en el equipo de expansión (turbogenerador).

#### 3.5.1. Influencia de la temperatura de entrada a la turbina

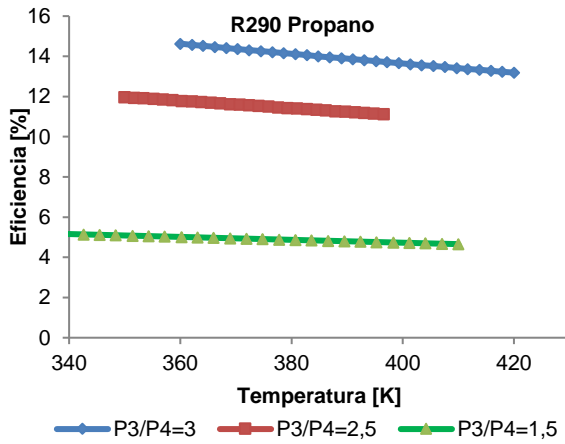
Con base en las suposiciones planteadas en la sección 3.4.2 se presentan los resultados de las simulaciones en la Figura 28, en donde para cada uno de los fluidos de trabajo seleccionados (R113, R123, R290, R600, R718 y R744) se presenta la correlación que existe entre la temperatura de entrada a la turbina y la eficiencia global del ciclo para diferentes caídas de presión de la turbina.



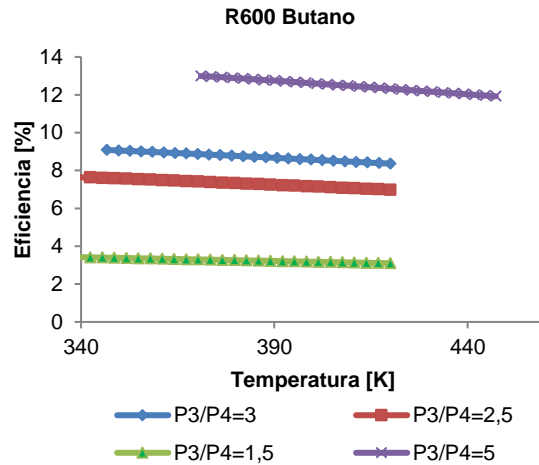
a) R113



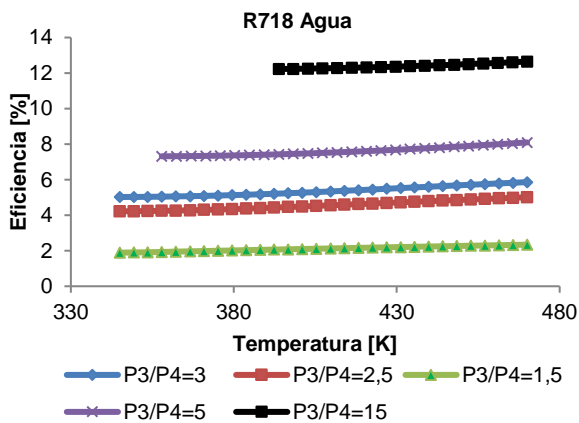
b) R123



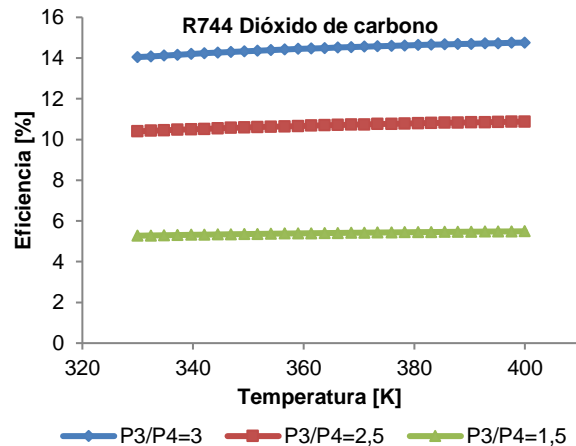
c) R290



d) R600



e) R718

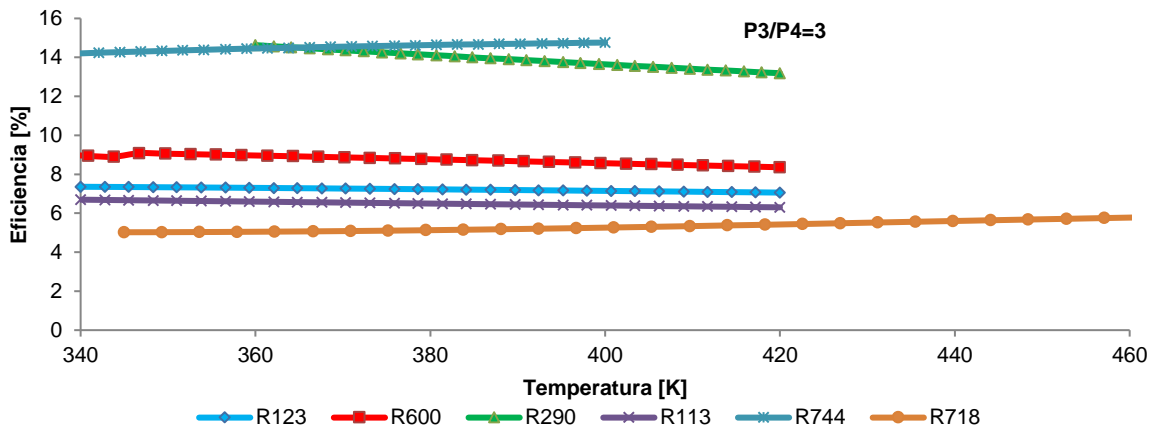


f) R744

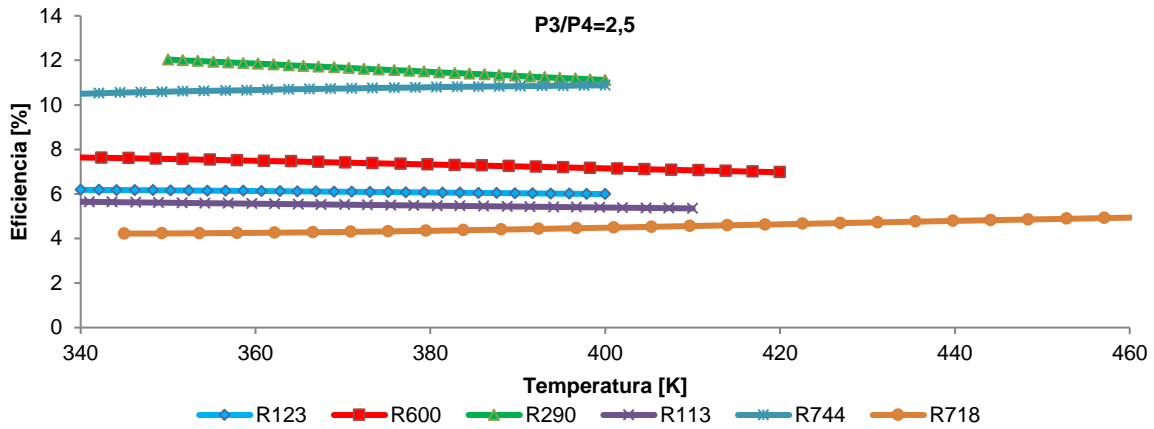
Figura 28. Efecto de la temperatura de entrada en la turbina sobre la eficiencia global del ciclo ORC.

En la Figura 28 se puede ver la relación que existe entre temperatura del fluido a la entrada de la turbina y la eficiencia global del ciclo para los diferentes fluidos de trabajo y a una relación de presiones constante de  $P_3/P_4=1,5, 3$  y  $5$ . Para los fluidos como el R113, R123, R290 y R600 que son fluidos secos, el comportamiento de la eficiencia del ciclo es decreciente con respecto a un aumento de la temperatura del fluido de trabajo; sin embargo, la disminución es baja, menor a 0,5% eficiencia por cada aumento de 100 K en la temperatura del fluido. Por otra parte fluidos de naturaleza húmeda como el R718 (agua) y el R744 ( $CO_2$ ) poseen un comportamiento totalmente diferente debido a que la eficiencia aumenta a medida que aumenta la temperatura del fluido de trabajo pero aun así, la dependencia sigue siendo débil con un incremento de menos del 0,4% en la eficiencia por cada 100 K que aumente la temperatura del fluido. Estos resultados permiten evidenciar la baja correlación que existe entre temperatura y eficiencia por lo que llevar el fluido de trabajo hasta la región de vapor sobrecalentado, en la etapa de evaporación no representará un aumento significativo de la eficiencia.

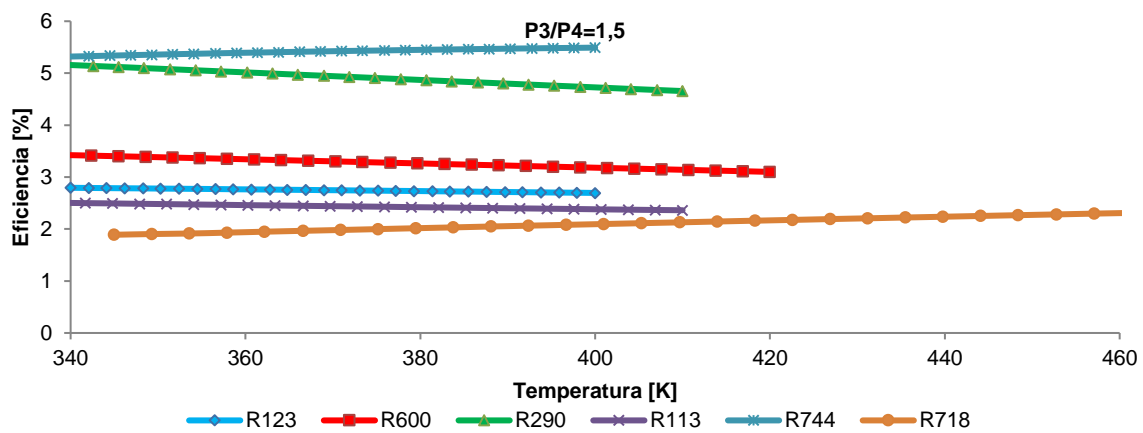
Con el fin de realizar un análisis comparativo de la eficiencia global del ciclo entre los fluidos estudiados se presenta la Figura 29 (a, b, c) en donde se fija el valor de la caída de presión en tres valores diferentes 3, 2,5 y 1,5 y se agrupan las sustancias seleccionadas en una misma gráfica.



a) Relación de presiones  $P_3/P_4=3$



b) Relación de presiones  $P_3/P_4=2,5$



c) Relación de presiones  $P_3/P_4=1,5$

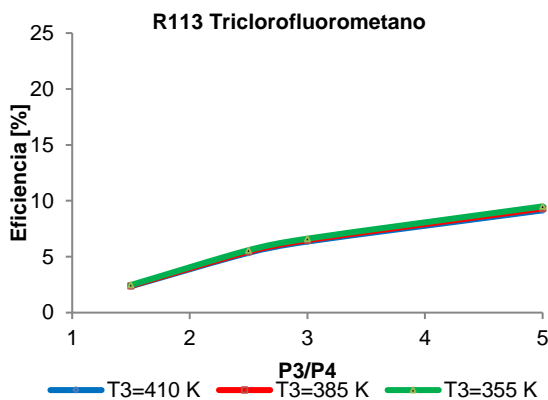
Figura 29. Comparación de eficiencia global para los diferentes fluidos de trabajo.

El comportamiento es similar para los tres casos presentados en la Figura 29 en donde los fluidos R744 ( $\text{CO}_2$ ) y R290 (propano) presentan una significativa ventaja sobre el resto de fluidos en cuanto a mayor eficiencia esto se puede asociar a que; como se puede ver en la Tabla 11, son las sustancias cuyas propiedades termofísicas (temperatura de evaporación y presión crítica bajas) se adecuan mejor a un ciclo Rankine orgánico de baja temperatura. Sin embargo, la selección de uno u otro fluido de trabajo está sujeta no solo a la fuente de energía que se pretende recuperar sino que además depende del rango de temperaturas de operación del ciclo y de las condiciones de presión en la turbina, esto se evidencia en la Figura 29. En donde para las relaciones de presión  $P_3/P_4$  3 y 1,5 y un rango de temperaturas entre 360 y 400 K el R744 posee la eficiencia más alta entre los fluidos estudiados pero esto no ocurre para el caso de  $P_3/P_4=2,5$  donde la mayor eficiencia se obtiene con el uso de propano (R290) como fluido de trabajo.

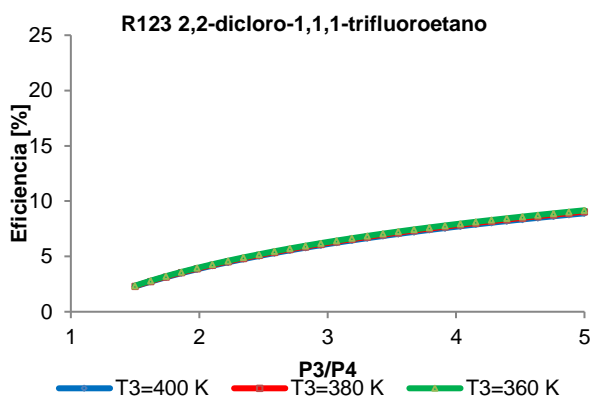
### 3.5.2. Influencia de la relación de presiones en la turbina

A diferencia de la relación entre temperatura de fluido a la entrada de la turbina y eficiencia del ciclo que se mostró en la sección anterior, la relación de presiones antes y después de la etapa de expansión si posee una alta inferencia en la eficiencia del ciclo Rankine orgánico como se puede ver en la Figura 30 (a - f) en donde se graficó la caída de presión en la etapa de expansión contra la eficiencia global del ciclo Rankine para diferentes temperaturas del mismo fluido a la entrada a la turbina.

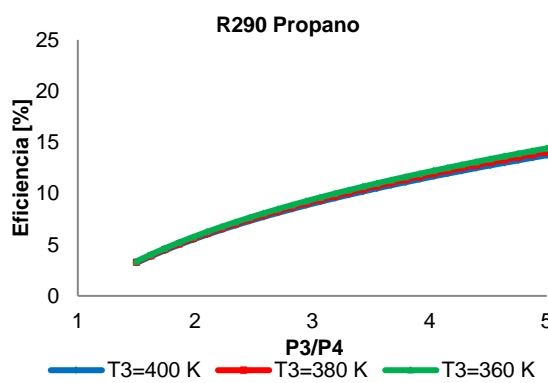
Los resultados permiten observar un comportamiento generalizado para todos los fluidos de trabajo estudiados; en donde a medida que aumenta la relación de presiones en la turbina ( $P_3/P_4$ ) también lo hace la eficiencia del ciclo sin importar la temperatura en la turbina ( $T_3$ ); siendo el  $CO_2$  y el R290 los fluidos que sienten mayor efecto positivo en la eficiencia del proceso. Además y consecuente con los resultados presentados anteriormente en la sección 3.5.1 se puede observar que para fluidos cuya clasificación según la forma del diagrama T-s es “fluido húmedo” (R718 y R744) la eficiencia del proceso alcanza los mayores valores para temperaturas más altas (ver Figura 30 e y f).



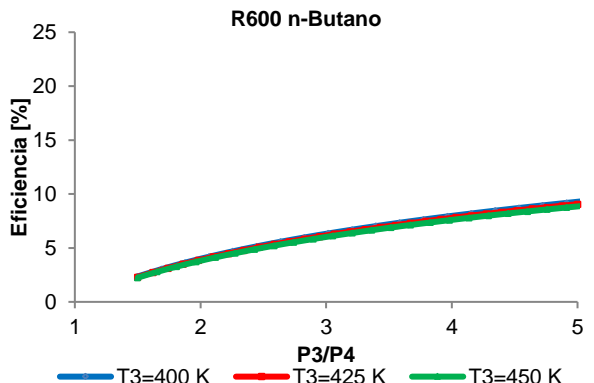
a) R113 Triclorofluorometano



b) R123 2,2-dicloro-1,1,1-trifluoroetano



c) R290 Propano



d) R600 n-Butano

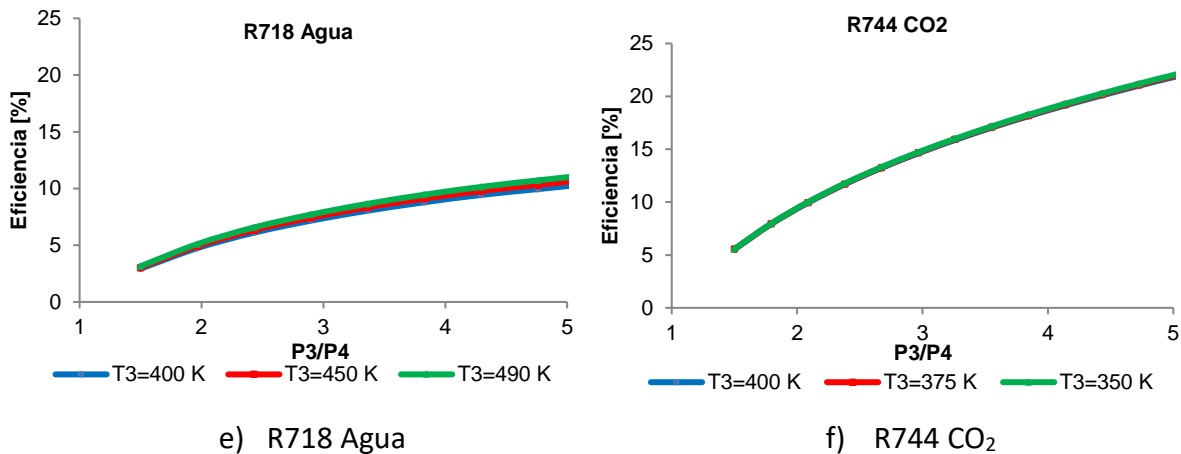


Figura 30. Relación de caída de presión en la turbina con la eficiencia global del ciclo ORC.

Son varios los factores que han hecho que el agua (R718) sea históricamente el fluido de trabajo de mayor aplicación en ciclos de potencia de media y alta temperatura a escala industrial, entre los que se encuentra: su estabilidad química a temperaturas y presiones elevadas, bajo costo y alta disponibilidad en la naturaleza. Sin embargo, los resultados obtenidos en este análisis permiten ver que debido a sus propiedades termofísicas no es el fluido más adecuado en cuanto a eficiencia debido a que para alcanzar valores razonablemente adecuados en cuanto a eficiencia global del ciclo es necesario realizar sobrecalentamiento del fluido en la etapa de evaporación y caídas de presión en la turbina del orden de 1000:1, lo cual implica un mayor riesgo para a la operación segura de los equipos y costos adicionales al momento de la construcción y puesta en marcha del sistema que debe ser diseñado para soportar presiones altas.

### 3.5.3. Análisis económico

Para la realización de un análisis económico riguroso y completo se requiere conocer aspectos específicos del sistema como los costos reales de construcción y operación los cuales dependen de factores como el dimensionamiento y diseño de los equipos involucrados, materiales en los cuales se construirá, entre otros aspectos que para el alcance del análisis de viabilidad técnica realizado no se tuvieron en cuenta. Sin embargo, con la información actual e información secundaria se puede calcular la inversión necesaria para la construcción de un sistema de recuperación de energía residual del tipo ciclo Rankine orgánico con base en la energía disponible en la fuente, la eficiencia típica de un sistema ORC comercial y el tiempo de operación; de esta manera se estima la energía total producida por el sistema en un periodo de tiempo, energía que se puede considerar como dinero ahorrado por el inversionista y que se comparará con la inversión inicial para finalmente estimar cuanto tiempo le toma al inversionista recuperar dicha inversión.



Tabla 12. Análisis económico de implementación sistema ORC [32].

<b>Energía disponible para recuperación</b>	kW	102
<b>*Eficiencia típica ORC</b>	%	10%
<b>Tiempo de operación ORC</b>	h/año	8000
<b>Energía producida por ORC</b>	kW/año	81600
<b>**Precio de la energía [32]</b>	dólares/kW	0,173
<b>Ahorros</b>	dólares/año	\$14117
<b>***Costo sistema ORC</b>	dólares/kW	\$3000
<b>Costo total</b>	dólares	30000
<b>Tiempo de retorno de la inversión</b>	años	2,1

\*La eficiencia se obtuvo a partir de los resultados de las simulaciones y de información secundaria [8,18,19,28].

\*\*Precio determinado por la Comisión Reguladora de Energía y Gas (CREG) para el sector industrial en Colombia [32].

\*\*\*Costo aproximado por kWe producido por plantas de pequeña escala <100 kWe [8,19].

Como se puede ver en la Tabla 12, el tiempo de retorno de la inversión para una pequeña planta de generación de energía eléctrica basada en ciclo Rankine orgánico puede ser razonablemente corto (inferior a 5 años), lo que podría hacerlo viable económicamente teniendo en cuenta que la vida útil del sistema puede llegar a los 20 años y que los costos de operación y mantenimiento anuales oscilan cerca del 5% de la inversión en construcción y puesta en marcha del sistema [18]. Adicionalmente dicho tiempo de retorno de la inversión puede verse afectado por factores como el precio de la energía eléctrica en el lugar donde se pretende instalar la planta de generación ORC el cual varía entre países y dentro de las mismas regiones como lo presentan Vélez et al. [31] en su análisis económico de viabilidad de sistemas tipo ORC para recuperación de energía térmica de baja temperatura, los autores analizan cuanto puede ser la inversión máxima posible para la implementación de un sistema ORC en términos del dinero ahorrado con la producción de energía eléctrica durante un periodo de tiempo determinado y en dos sectores totalmente diferentes, el residencial y el industrial para tres países cuyas tarifas energéticas son diferentes (Colombia, Estados Unidos y España), los resultados permiten concluir que debido a que el precio del kWe producido en España (0,1124 euros/kWh) es alto, la inversión para un sistema tipo ORC puede ser mayor mientras que en países como Colombia, donde el precio del kWe está alrededor de 0,0766 euros/kWh la inversión disminuye.

### 3.6. Apuntes parciales

Los gases de combustión que salen del horno de producción continua de frita cerámica son potencialmente una fuente de energía recuperable, debido a que poseen una alta

temperatura ( $\sim 1100$  K). Sin embargo, existen algunos aspectos que pueden disminuir su atractivo energético como por ejemplo el hecho de que el flujo volumétrico de estos gases es bajo ( $\sim 300$  kg/h) debido a que provienen de un proceso de oxidación, el cual se caracteriza por llevar a cabo la combustión del gas natural con oxígeno puro en proporciones casi estequiométricas. Además, se debe tener una caracterización rigurosa de posibles componentes que se encuentren presentes en los gases que representen riesgo para la operación del sistema ya sea por su toxicidad, alta volatilidad o posible material particulado que sea arrastrado desde la cámara del horno y que se pueda depositar sobre los ductos del evaporador y generar taponamiento o corrosión.

La correcta selección del fluido de trabajo es un factor de vital importancia en el diseño de sistemas de recuperación de energía residual que operen bajo el principio de ciclo Rankine orgánico; debido a que, como se mostró anteriormente la eficiencia global depende directamente de la sustancia con la que opere el ciclo y de la máxima diferencia de presiones en la etapa de expansión que se pueda alcanzar. Por otra parte, se pudo mostrar que la temperatura del fluido no afecta significativamente el rendimiento del sistema, por lo que realizar un sobrecalentamiento del fluido antes de que este ingrese a la turbina es innecesario a excepción de los fluidos clasificados como fluidos “húmedos”, en cuyo caso se requiere que el vapor que ingrese sobrecalentado para evitar que cambie de fase durante la expansión debido a los problemas que este fenómeno conlleva.

Desde el punto de vista económico, la recuperación de energía térmica de los gases producidos por la oxidación de gas natural en hornos de producción de frita es un proyecto cuya inversión puede ser recuperada en el corto o mediano plazo, dependiendo de factores internos como el tamaño del sistema, la selección del fluido de trabajo, la eficiencia del ciclo entre otros, y factores externos como el precio de la energía eléctrica producida y políticas gubernamentales o incentivos a este tipo de proyectos que además de representar un beneficio en términos económicos, también contribuye a hacer un uso más razonable y eficiente de la energía y a disminuir los impactos negativos sobre el medio ambiente.

## **Conclusiones Finales**

La realización de diagnósticos energéticos en sistemas de producción industrial es una valiosa herramienta que permite obtener, a partir de algunas mediciones en campo y datos de consumos, una visión acertada del comportamiento y distribución de la energía que se ingresa al sistema; además, permite la identificación de comportamientos

anómalos que propician las pérdidas energéticas afectando de manera directa la eficiencia global del proceso además de ir en contra del aprovechamiento racional de los recursos naturales. En el caso puntual que se presentó en este documento, el diagnóstico energético permitió determinar que la energía que se transfería a las paredes del horno y el calor de los gases de chimenea son las principales fuentes de ineficiencia en el proceso de fusión de fritas cerámicas, una vez identificados los factores que afectan la eficiencia del proceso se puede avanzar hacia la búsqueda de alternativas para corregir, mitigar o disminuir el efecto de dichos factores.

Se evaluaron dos medidas alternativas para mejorar la eficiencia del proceso de fusión de fritas, la primera de ellas corresponde a la instalación de un sistema de ductos de recuperación de energía internos a las paredes del horno que permitieron disminuir la temperatura exterior del horno en 60 K y la transferencia de energía hacia el exterior del horno por los fenómenos de radiación y convección hasta en un 40%; además, de la obtención de una corriente de agua a una temperatura cercana a los 373 K la cual se podría aprovechar de diferentes maneras dentro de las instalaciones de la empresa.

La segunda alternativa que se evaluó se enfoca en la recuperación del calor contenido en los gases de combustión, que corresponden a cerca del 21% de la energía suministrada al horno y que actualmente se dispersa en el ambiente. La tecnología de ciclo Rankine orgánico permite aprovechar dicha fuente de energía térmica y transformarla en energía eléctrica, como se pudo ver en el Capítulo 3 de este documento, esta alternativa parece ser viable desde el punto de vista técnico ya que permite recuperar cerca de un 10% de la energía contenida en los gases de chimenea y producir cerca de 10 kWe.

## Anexo. Resumen Norma ISO 13579-1

### 1. Principios básicos

#### 1.1 Aspectos generales

Los siguientes aspectos deberán ser incluidos en la medición del balance de energía:

a. Energía que entra:

- Energía equivalente del combustible,  $E_{fe}$
- Otra energía que entra,  $E_{others}$

b. Energía que sale:

- Energía térmica que sale,  $E_{therm,out}$
- Energía consumida en equipos eléctricos auxiliares,  $E_{aux}$
- Energía usada para generar utilidades,  $E_{utilities}$
- Pérdidas de generación eléctrica,  $E_{l,eg}$

El resultado de las mediciones del balance de energía deberá resumirse en energía que entra y energía que sale en una hoja con la información necesaria, como resumen de los equipos, medidas de las condiciones y medidas de la fecha.

#### 1.2 Diagrama de flujo energético

El diagrama de flujo energético es una herramienta útil para representar flujos de entrada y salida de energía, este diagrama también es conocido como un diagrama Sankey.

#### 1.3 Herramientas de estudio para la valoración del proceso de calentamiento (PHAST)

Este es un software desarrollado por el departamento de energía de Estados Unidos, proporciona una introducción a los métodos del proceso de calentamiento y herramientas para el mejoramiento de la eficiencia térmica de equipos de calentamiento. Esta herramienta es usada para el estudio de procesos que impliquen calentamiento de equipos a través de fuel, vapor o electricidad e identificar el equipo que mayor energía consume. El usuario también puede realizar un balance de energía en equipos seleccionados para identificar y reducir el uso de energía no productiva, comparar los rendimientos del horno bajo diversas condiciones de operación.

### 2. Condiciones básicas de mediciones y cálculos

#### 2.1 Estado del horno

El horno sujeto a las mediciones debe operar bajo condiciones normales y

- En caso de hornos continuos, la temperatura y el rendimiento deben estar en estado estable según los cálculos de su diseño.
- En el caso de hornos tipo batch, el ciclo de temperatura y el rendimiento deben ser como las consideradas en el cálculo de su diseño.

En el caso de no especificarse estas condiciones, estas serán definidas por el proveedor.

## **2.2 Duración de las mediciones**

En el caso de hornos continuos, la duración de las mediciones deberá ser al menos dos veces el tiempo que los productos se quedan en la cámara del horno. En el caso de un horno tipo batch, se llevarán a cabo los cálculos para cada batch.

## **2.3 Unidad de consumo de energía específica**

La unidad básica para el consumo de energía específica deberá ser un kilo joule por tonelada (kJ/t) de producto. A menos que se especifique lo contrario.

## **2.4 Condiciones de referencia**

Las condiciones de referencia deben ser 0°C (273,15 K) y 101.325 Pa, a menos de que especifique lo contrario.

## **2.5 Unidad de cantidad de gas**

Los valores de la unidad de cantidad de gas deberá expresarse en metros cúbicos normales [m<sup>3</sup>(n)], a menos de que se especifique lo contrario.

## **2.6 Combustible**

La unidad de la cantidad de combustible es:

- 1 kg en el caso de líquidos, o
- Un metro cúbico normal [m<sup>3</sup>(n)] en el caso de combustibles gaseosos.

# **3. Tipos de energía y su sistematización**

## **3.1 Balance de energía**

La sistematización de la energía evaluada en la parte 1 de la norma ISO 13579 está descrita en la Tabla 13.

Tabla 13. Sistematización del tipo de energía evaluada en la parte-1 de la norma ISO 13579-1.

Tipo de energía		
Energía total que entra/sale	Categoría Intermedia	Ítem detallado
Energía total que entra, $E_{input}$	Energía equivalente de combustible, $E_{fe}$	Poder calorífico del combustible, $E_{h,fuel}$
		Poder calorífico de los residuos, $E_{h,waste}$
		Poder calorífico de la fuente de gas de gas atmosférico, $E_{fe,atm,cal}$
		Energía eléctrica equivalente en combustible, $E_{fe,el}$
		Calor sensible del combustible, $E_{s,fuel}$
		Calor sensible del aire de combustión, $E_{s,air}$
		Calor sensible del agente atomizante, $E_{s,atomize}$
		Calor de reacción, $E_{react}$
		Calor sensible de infiltración, $E_{s,infilt}$
		Energía efectiva, $E_{effect}$
Energía total que sale, $E_{output}$	Otras energías que entran, $E_{others}$	Pérdida de plantilla, $E_{l,jig}$
		Calor sensible de las sustancias oxidadas, $E_{s,oxid}$
		Calor sensible de gases de escape, $E_{exhaust}$
		Pérdidas de calor por almacenamiento en hornos tipo batch, $E_{l,storage}$
		Pérdidas de calor sensible de gas atmosférico, $E_{s,atm}$
		Pérdidas por pared, $E_{l,wall}$
		Pérdidas de calor por abrir el horno, $E_{l,blowout}$
		Pérdidas de calor por radiación por abrir el horno, $E_{l,opening}$
		Pérdidas de calor de partes del horno instaladas en la pared del horno, $E_{l,parts}$
		Energía total que sale, $E_{output}$

	Pérdidas por enfriamiento de agua, $E_{l,cw}$
	Otras pérdidas, $E_{l,other}$
Equipos eléctricos auxiliares, $E_{aux}$	Energía consumida en equipos eléctricos auxiliares, $E_{aux,installed}$
	Energía usada para la transferencia de un fluido, $E_{aux,fluid}$
	Oxígeno, $E_{u,oxy}$
Generación de utilidades, $E_{utility}$	Vapor, $E_{u,steam}$
	Gas atmosférico: Energía para la generación, $E_{u,atm,gen}$ , Poder calorífico de la fuente de gas, $E_{u,atm,cal}$
	Pérdidas de generación eléctrica, $E_{l,eg}$

---

Nota: Si una parte consumida en el equipo auxiliar eléctrico,  $E_{aux,installed}$ , es usada como energía térmica en el proceso de calentamiento, la energía térmica deberá restar de la energía total consumida en la instalación los equipos auxiliares eléctricos.

La energía usada para la transferencia de fluido,  $E_{aux,fluid}$ , deberá ser aplicada cuando la energía consumida en los equipos eléctricos auxiliares para la transferencia de fluidos, como las bombas, no puedan ser determinadas desde la medida de la energía eléctrica.

#### 4. Método de medición

En los resultados de las mediciones en el balance de energía se deberá incluir la indicación de la precisión.

Para disminuir la incertidumbre de la medida, las mismas mediciones deberán hacerse múltiples veces y se debe hacer un promedio. El personal que lleve a cabo las mediciones deberá verificarlos.

##### 4.1 Combustible

El volumen del combustible gaseoso deberá ser medido con un rotámetro en la cercanías del horno, el valor deberá ser corregido acorde a la presión y temperatura, lo anterior debe estar acuerdo a la norma ISO 5167-1. Si el combustible es líquido deberá ser medido con un medidor de flujo volumétrico.

Si el poder calorífico del combustible no es dado por el proveedor, se deberá hacer un muestreo y análisis del combustible, estos análisis se deben hacer siguiendo las normas estándares internacionales.

La presión del combustible se medirá aguas arriba del medidor de flujo y quemadores y su temperatura se medirá aguas arriba del medidor de flujo y en la parte adyacente de los quemadores. Cuando se precalienta el combustible la temperatura deberá ser medida a la entrada y salida del dispositivo de precalentamiento.

#### **4.2 Agente atomizador**

El volumen del agente atomizador deberá ser medido con un medidor de flujo de presión diferencial, y deberá ser corregido por presión y temperatura. Sin embargo, si la medición no se puede realizar, el valor aproximado calculado puede ser utilizado con una cláusula condicional.

La presión y la temperatura del agente atomizador deberá ser medida aguas arriba del medidor de flujo y quemadores.

#### **4.3 Aire de combustión y gas de escape**

##### **4.3.1 Aire de combustión**

La cantidad de aire de combustión deberá ser medido cerca de la entrada del equipo de combustión con un medidor de flujo y el valor medido se corregirá con la presión y la temperatura. La presión del aire de combustión deberá medirse aguas arriba del medidor de flujo y quemadores, su temperatura deberá medirse en la entrada de los quemadores y en la parte adyacente de los quemadores. Cuando el aire es precalentado deberá medirse su temperatura a la entrada y salida del dispositivo de calentamiento.

##### **4.3.2 Gas de escape**

La temperatura media de los gases de combustión se mide a la salida de la zona de balance de energía. La fracción volumétrica de CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> y otros hidrocarburos contenidos en el gas de combustión deberán ser medidos usando un analizador. La fiabilidad del muestreo, análisis y medición deberán ser mantenidos por el cumplimiento de las normas internacionales pertinentes.

##### **4.3.3 Método de medición para hornos con funciones recuperativas**

El calor sensible de los gases de combustión del horno se medirá aguas debajo de la sección regenerativa de los quemadores y en la combustión auxiliar por separado. La temperatura de los gases de combustión a través de los quemadores regenerativos deben ser medidos en la salida de los quemadores regenerativos, el volumen de tales gases se obtendrá mediante medición. La temperatura de los gases de escape a través de la combustión auxiliar se medirá a la salida del horno y su volumen se puede obtener por medio de cálculos.



Para determinar la temperatura las condiciones deben ser totalmente estabilizadas utilizando un termopar con una respuesta satisfactoria, se ajusta en el lado de la salida del regenerador, pero no entra en contacto con él, se realizan al menos 10 ciclos de medición.

#### **4.4 Gas atmosférico controlado**

El volumen del gas atmosférico controlado deberá ser medido con un medidor de flujo, los valores deberán ser corregidos por presión y temperatura. La temperatura deberá ser medida en su puerto de alimentación al horno.

#### **4.5 Productos y plantillas/accesorios para productos de manipulación**

Determinar su peso ya sea en hornos continuos o batch, la superficie y la temperatura interna se mide justo antes de la descarga. Si la medición de la temperatura no es posible realizarse, la estimación de la temperatura en los productos se puede utilizar la temperatura calculada por el sistema informático de control para las operaciones del horno.

#### **4.6 Temperatura de la superficie del horno**

La medición de la temperatura de la superficie de la pared del horno se llevará a cabo de manera separada, es decir, lado, arriba, abajo, delante, atrás y cuando hay zonas en el horno con diferente temperatura.

#### **4.7 Temperatura interna de la pared del horno**

La temperatura interna de la pared del horno deberá ser sustituido por datos de temperatura recopilada por la unidad de control de temperatura del horno.

#### **4.8 Presión interna del horno**

Utilice los valores indicados desde la instrumentación de presión del horno, si está instalado.

#### **4.9 Agua de enfriamiento**

La temperatura y el volumen del agua refrigerante se medirán en el puerto de conexión de alimentación y descarga del horno.

#### **4.10 Equipos eléctricos auxiliares**

Determine la energía consumida en equipos eléctricos auxiliares que es necesaria para el funcionamiento de los hornos industriales con la duración de la medida y convierta la energía eléctrica consumida en su energía de combustible equivalente. La energía usada en los equipos auxiliares puede ser obtenida desde la capacidad nominal de cada equipo si es razonable.

#### **4.11 Generación de utilidades**

Determinar las utilidades para la operación de los hornos industriales dentro de la duración de la medición.

#### **4.12 Energía reciclada**

Cuando la energía reciclada se genera a partir de la energía térmica, se determina la cantidad de energía generada dentro de la duración de la medida global del balance de energía.

### **5 Cálculos**

Las condiciones básicas para llevarse a cabo los cálculos se explican en la sección 2, sección detallada anteriormente. Así mismo, las ecuaciones se encuentran especificadas en la norma ISO 13579-1 en la sección 9 de la misma.

### **6 Reporte de evaluación del balance de energía**

Crear una hoja de evaluación del balance de energía que comprenda las entradas y salidas de energía. Cada ítem de entrada y salida de energía deberá ser resumido en el balance con su valor en energía y su porcentaje. El reporte debe contener la siguiente información:

- Diagramas esquemáticos del área del balance de energía.
- La fecha de medición.
- La eficiencia energética.
- Un resumen de las especificaciones del equipo.
- Esbozar dibujos de la zona bajo prueba.
- Flujos de energía o diagramas Sankey.

## Bibliografía

- [1] Kluczek A, Olszewski P. Energy audits in industrial processes. *J Clean Prod* 2017;142:3437–53. doi:10.1016/j.jclepro.2016.10.123.
- [2] Fresner J, Morea F, Krenn C, Aranda Uson J, Tomasi F. Energy efficiency in small and medium enterprises: Lessons learned from 280 energy audits across Europe. *J Clean Prod* 2016;142:1–11. doi:10.1016/j.jclepro.2016.11.126.
- [3] Possamai TS, Oba R, Nicolau VP. Numerical and experimental thermal analysis of an industrial kiln used for frit production. *Appl Therm Eng* 2012;48:414–25. doi:10.1016/j.applthermaleng.2012.05.025.
- [4] Cerámica Industrial : Producción de Pavimento y Revestimiento Cerámico n.d.:1–19.
- [5] Asociación Nacional de Fabricantes de Fritas Esmaltes y Colores Cerámicos. Fritas 2015.
- [6] Bagavathiappan S, Lahiri BB, Saravanan T, Philip J, Jayakumar T. Infrared thermography for condition monitoring - A review. *Infrared Phys Technol* 2013;60:35–55. doi:10.1016/j.infrared.2013.03.006.
- [7] International Standart Organization. Norma ISO 13579: Industrial Furnaces and associated thermal processing equipment. 2009.
- [8] Wei F, Senchuang G, Zhonghe H. Economic analysis of Organic Rankine Cycle (ORC) and Organic Rankine Cycle with internal heat exchanger (IORC) based on industrial waste heat source constraint. *Energy Procedia* 2019;158:2403–8. doi:10.1016/j.egypro.2019.01.291.
- [9] Malalasekera W, Versteeg HK. An Introduction to Computational Fluid Dynamics - The Finite Volume Method. vol. 44. 2006. doi:10.2514/1.22547.
- [10] James S. Calculo de varias variables. vol. العدد الحا. Septima. Mexico D.F: Brooks/Cole; 2012.
- [11] Correa Allepuz E. Influencia de la Calidad de Malla en las Simulaciones . Uso de Condiciones de Contorno Periódicas. *Univ Sevilla* 2017:145–61.
- [12] Jines J. Simulación de Flujo Incompresible y de una Fase en Accesorio de Tuberías ( Codo 90 ° de alto radio ) mediante Dinámica de Fluidos Computacional ( CFD ), para Cálculo de Factor de Pérdida K L. *Rev Tecnológica ESPOL* 2017;30:56–74.
- [13] Eléctroporcelanas GAMMA. Refractarios 2016. <https://www.gamma.com.co/erecos/> (accessed February 2, 2019).
- [14] ANSYS Fluent. Ansys fluent theory guide. ANSYS Inc, USA 2015;15317:96–100.
- [15] Center for climatic change and energy solutions. Global emissions 2018. <https://www.c2es.org/content/international-emissions/> (accessed June 17, 2019).
- [16] Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Acuerdo de París de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.

Cop21 2015;21930:18.

- [17] Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático. Protocolo de Kioto. *Protoc Kioto* 1998;61702:20. doi:10.1056/NEJMp1205634.
- [18] Declaye S, Papadakis G. ECONOMIC FEASIBILITY STUDY OF A SMALL SCALE ORGANIC RANKINE CYCLE SYSTEM IN WASTE HEAT RECOVERY APPLICATION. 10th Bienn Conf Eng Syst Des Anal 2010.
- [19] Quoilin S, Broek M Van Den, Declaye S, Dewallef P, Lemort V. Techno-economic survey of organic rankine cycle (ORC) systems. *Renew Sustain Energy Rev* 2013;22:168–86. doi:10.1016/j.rser.2013.01.028.
- [20] Vélez F. Selecting working fluids in an organic Rankine cycle for power generation from low temperature heat sources. *Dyna* 2014;81:153–9. doi:10.15446/dyna.v81n188.41666.
- [21] Badr O, Probert SD, O’Callaghan PW. Selecting a working fluid for a Rankine-cycle engine. *Appl Energy* 1985;21:1–42. doi:10.1016/0306-2619(85)90072-8.
- [22] Badr O, O’Callaghan PW, Probert SD. Thermodynamic and thermophysical properties of organic working fluids for Rankine-cycle engines. *Appl Energy* 1985;19:1–40. doi:https://doi.org/10.1016/0306-2619(85)90037-6.
- [23] Vivian J, Manente G, Lazzaretto A. A general framework to select working fluid and configuration of ORCs for low-to-medium temperature heat sources. *Appl Energy* 2015;156:727–46. doi:https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.07.005.
- [24] Oyewunmi OA, Kirmse CJW, Pantaleo AM, Markides CN. Performance of working-fluid mixtures in ORC-CHP systems for different heat-demand segments and heat-recovery temperature levels. *Energy Convers Manag* 2017;148:1508–24. doi:https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.05.078.
- [25] Chen H, Goswami DY, Stefanakos EK. A review of thermodynamic cycles and working fluids for the conversion of low-grade heat. *Renew Sustain Energy Rev* 2010;14:3059–67. doi:https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.006.
- [26] Lakew AA, Bolland O. Working fluids for low-temperature heat source. *Appl Therm Eng* 2010;30:1262–8. doi:https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.02.009.
- [27] Vélez F, Segovia JJ, Martín MC, Antolín G, Chejne F, Quijano A. A technical, economical and market review of organic Rankine cycles for the conversion of low-grade heat for power generation. *Renew Sustain Energy Rev* 2012;16:4175–89. doi:10.1016/j.rser.2012.03.022.
- [28] Thurairaja K, Wijewardane A, Jayasekara S, Ranasinghe C. Working fluid selection and performance evaluation of ORC. *Energy Procedia* 2019;156:244–8. doi:10.1016/j.egypro.2018.11.136.
- [29] Frutiger J, Andreasen J, Liu W, Spliethoff H, Haglind F, Abildskov J, et al. Working fluid selection for organic Rankine cycles - Impact of uncertainty of fluid properties. *Energy* 2016;109:987–97. doi:10.1016/j.energy.2016.05.010.

- [30] Climalife. Especificaciones fisicoquímicas del R-744 CO2 2014. <https://es.climalife.dehon.com/uploads/product/media/document/r-744-fd-es-17.pdf> (accessed May 20, 2019).
- [31] Vélez F, Segovia JJ, Martín MC, Antolín G, Chejne F, Quijano A. Comparative study of working fluids for a Rankine cycle operating at low temperature. *Fuel Process Technol* 2012;103:71–7. doi:10.1016/j.fuproc.2011.09.017.
- [32] COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS (CREG). TARIFAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA (\$/kWh) REGULADAS POR LA COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS (CREG) 2019:1. [http://www.codensa.com.co/documentos/1317\\_1901\\_2\\_22\\_2013\\_11\\_34\\_06\\_AM\\_Tarifario\\_Febrero.pdf](http://www.codensa.com.co/documentos/1317_1901_2_22_2013_11_34_06_AM_Tarifario_Febrero.pdf) (accessed June 10, 2019).