

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA**



TESIS

**COMPARACIÓN TERMODINÁMICA DEL PROCESO DE COCCIÓN DE
LOS HORNOS PAULISTA Y A CIELO ABIERTO EN LA PRODUCCIÓN DE
LADRILLOS EN LA EMPRESA LADRILLOS CAMALA E.I.R.L.**

(Investigación Tecnológica)

Presentado por:

Br. Lucas Gonzalo Huaman Morales

Para optar al Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico

ASESOR:

Mgt. Eduardo Fabian Ortiz Saravia

CUSCO – PERÚ

2024

INFORME DE ORIGINALIDAD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-303-2020-UNSAAC)

El que suscribe, **Asesor** del trabajo de investigación/tesis titulada: COMPARACIÓN
TERMODINÁMICA DEL PROCESO DE COCCIÓN DE LOS HORNOS PAULISTA Y A CIELO
ABERTO EN LA PRODUCCIÓN DE LADRILLOS EN LA EMPRESA LADRILLOS
CANALA F. I. P. S. (Investigación Tecnológica)

presentado por: Lucas Gonzalo Humana Morales con DNI Nro.: 73818297 presentado
por: con DNI Nro.: para optar el
título profesional/grado académico de Ingeniero Metalúrgico

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 3 veces, mediante el
Software Antiplagio, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso de Sistema Antiplagio de la**
UNSAAC y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 10%.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o
título profesional, tesis

| Porcentaje | Evaluación y Acciones | Marque con una (X) |
|----------------|---|-------------------------------------|
| Del 1 al 10% | No se considera plagio. | <input checked="" type="checkbox"/> |
| Del 11 al 30 % | Devolver al usuario para las correcciones. | <input type="checkbox"/> |
| Mayor a 31% | El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, quien a su vez eleva el informe a la autoridad académica para que tome las acciones correspondientes. Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley. | <input type="checkbox"/> |

Por tanto, en mi condición de asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y **adjunto**
la primera página del reporte del Sistema Antiplagio.

Cusco, 14 de Agosto de 2024

Firma

Post firma Eduardo Fabian ORTIZ SANCHEZ

Nro. de DNI 23932525

ORCID del Asesor 0000-0002-6142-3459

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema Antiplagio: **oid:** 27259#372679497

NOMBRE DEL TRABAJO

Tesis Final Lucas G. Huaman Morales.pdf

RECuento DE PALABRAS

22619 Words

RECuento DE PÁGINAS

122 Pages

FECHA DE ENTREGA

Aug 12, 2024 9:55 PM GMT-5

RECuento DE CARACTERES

117122 Characters

TAMAÑO DEL ARCHIVO

3.4MB

FECHA DEL INFORME

Aug 12, 2024 9:58 PM GMT-5**● 10% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 9% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 6% Base de datos de trabajos entregados
- 1% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● Excluir del Reporte de Similitud

- Material bibliográfico
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 9 palabras)



Ediverto F. ORTIZ HUAMAN
DNI: 23932575

PRESENTACIÓN

Señor Decano de la facultad de Ingeniería Geológica, Minas y Metalúrgica, señores ingenieros que forman parte del jurado y señor asesor.

Por disposición del reglamento de Grados y Títulos para optar el título profesional de Ingeniero Metalúrgico, pongo a su disposición la tesis intitulada: **COMPARACIÓN TERMODINÁMICA DEL PROCESO DE COCCIÓN DE LOS HORNOS PAULISTA Y A CIELO ABIERTO EN LA PRODUCCIÓN DE LADRILLOS EN LA EMPRESA “LADRILLOS CAMALA E.I.R.L.”** .

El siguiente trabajo muestra los principales aspectos del proyecto de tesis, el cual abarca como eje principal la tecnología, específicamente comparando termodinámicamente los procesos de cocción entre los hornos paulista y a cielo abierto en la fabricación de ladrillos, bajo diferentes tecnologías, tiempos de cocción y quemado de combustible.

Es grato de mi parte como futuro profesional intervenir y aportar con la investigación, para beneficio de la empresa y siendo precedente base para futuras investigaciones de mejoras para los hornos paulista y a cielo abierto.

Cusco junio 2023

DEDICATORIA

El trabajo de investigación está dedicada a las personas más valiosas en mi vida, mismas que me apoyaron incondicionalmente durante todo mi proceso de formación, tanto profesionalmente como en el ámbito personal.

Primeramente doy gracias a Dios por llenarme de solidez y de la energía necesaria para llegar a culminar esta meta propuesta.

De igual modo a mis papás, por su soporte y cariño absoluto, quienes siempre estuvieron motivándome a seguir adelante, por darme los recursos necesarios y sus consejos incondicionales que siempre fueron de mucha ayuda para ser una mejor persona.

A mis hermanos, por estar siempre para mí, de manera incondicional, por darme ese apoyo moral y animándome cuando era necesario para seguir adelante con la frente en alta.

A mis amigos que también son el grupo de personas que siempre confiaron en mí, y que también estuvieron presentes en buenos y malos momentos.

Mi trabajo está dedicado a todos ellos, que me enseñaron que con simples y pequeñas cosas podemos llegar a realizar cosas majestuosas que nos hacen mejores personas y ser personas de bien.

El autor.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar mi más extenso agradecimiento a mi centro de aprendizaje, Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco, que en los años de estadía me exigió tanto, que logró sacar lo mejor de mí y al mismo tiempo me ha permitido tener mi tan anhelada carrera universitaria. Y el agradecimiento no estaría completa si no mencionaría a la majestuosa Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y no olvidarme de las personas que lo conforman como docentes, administrativos y compañeros, que me enseñaron a ser un buen profesional y mejor persona, mediante consejos, enseñanzas, anécdotas y apoyo.

También agradecerle a mi familia, quienes estuvieron presentes y que con su apoyo incondicional me han impulsado en este largo camino que requirió la realización de este trabajo de investigación.

Como también no agradecer a mi asesor por haber dedicado parte de su tiempo y paciencia durante el desarrollo del trabajo, ya que sin sus palabras, correcciones e indicaciones no se hubiera podido lograr este resultado, también mencionar a la junta que formaron parte de la comisión revisora del trabajo, así como también a los administrativos que formaron parte de todo este proceso, mi más sincero agradecimiento para todos ellos.

Y para concluir, también agradecer al gerente general de la empresa ladrillos CAMALA E.I.R.L., el señor Melquiades Camala, quien me estuvo colaborando con información para la finalidad del trabajo, así mismo hacer mención de los trabajadores de esta empresa que también me brindaron su apoyo incondicional durante todo este tiempo.

El autor.

RESUMEN

El trabajo de investigación tuvo como objetivo principal, realizar una comparación termodinámica del proceso de cocción de ladrillos entre el horno a cielo abierto y paulista de la empresa ladrillos CAMALA E.I.R.L., basándonos en tipo de investigación tecnológico, de enfoque cuantitativo y con un alcance comparativo explicativo, para ello se diagnosticaron datos de diseño y condiciones de producción para determinar los flujos de energía y en base a ello poder analizar el rendimiento energético de los dos tipos de hornos. En este sentido se llegó a realizar los cálculos de flujos de energía en base a los parámetros actuales de operación, donde se obtuvo datos de eficiencia térmica de 13.74% para el horno a cielo abierto y 13.26% de eficiencia térmica para el horno paulista, la diferencia de eficiencia térmica entre ambos hornos es mínima, pero se debe tener en cuenta el diseño de los hornos, donde el horno paulista cuenta con mejor diseño estructural. También se llegó a calcular el calor requerido por cada ladrillo para llegar a su cocción, donde se obtuvo el resultado de 4 032 KJ/ladrillo, y el calor aportado por cada horno durante el proceso de cocción es de; 32 284.531 KJ/ladrillo para el horno a cielo abierto y de 33 457.201 KJ/ladrillo para el horno paulista. Y respecto a la representación numérica, esta se hizo en el programa PTC MATHCAD PRIME, en la cual se introdujeron las fórmulas del calor aportado y el calor por carga de material, teniendo como resultado la eficiencia termodinámica en porcentaje.

Palabras clave: Balance de Energía, Comparación termodinámica del Proceso de Cocción, Horno a Cielo Abierto, Horno Paulista, Proceso de Cocción.

ABSTRACT

The main objective of the research work was to carry out a thermodynamic comparison of the brick firing process between the open-air and São Paulo kiln of the Bricks CAMALA E.I.R.L. company, based on the type of technological research, with a quantitative approach and with an explanatory comparative scope. For this purpose, design data and production conditions were diagnosed to determine the energy flows and based on this, the energy performance of the two types of ovens could be analyzed. In this sense, energy flow calculations were carried out based on the current operating parameters, where thermal efficiency data of 13.74% for the open-air furnace and 13.26% thermal efficiency for the São Paulo furnace were obtained. The difference in thermal efficiency between both ovens is minimal, but the design of the ovens must be taken into account, where the São Paulo oven has a better structural design. The heat required by each brick to be fired was also calculated, where the result was 4,032 KJ/brick, and the heat provided by each kiln during the firing process is; 32,284,531 KJ/brick for the open-air kiln and 33,457,201 KJ/brick for the São Paulo kiln. And regarding the numerical representation, this was done in the PTC MATHCAD PRIME program, in which the formulas for the heat supplied and the heat per material load were introduced, resulting in the thermodynamic efficiency in percentage.

Keywords: Energy Balance, Thermodynamic Comparison of the Cooking Process, Open Air Oven, Paulista Oven, Cooking Process.

INDICE

| | |
|--|-------------|
| PRESENTACIÓN | II |
| DEDICATORIA | III |
| AGRADECIMIENTO..... | IV |
| RESUMEN | V |
| ABSTRACT | V |
| INDICE..... | VII |
| INDICE DE TABLAS | XI |
| INDICE DE FIGURAS | XII |
| SÍMBOLOS..... | XIII |
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| CAPÍTULO I | 3 |
| EL PROBLEMA..... | 3 |
| 1.1 Planteamiento del Problema | 3 |
| 1.2. Formulación de problema | 4 |
| 1.2.1 Problema general..... | 4 |
| 1.2.2 Problemas específicos..... | 5 |
| 1.3. Justificación..... | 5 |
| 1.3.1 Justificación Económica | 5 |
| 1.3.2 Justificación tecnológica | 5 |
| 1.3.3 Justificación social..... | 6 |
| 1.3.4 Justificación medio ambiental..... | 6 |
| 1.4. Objetivos | 7 |
| 1.4.1 Objetivo general | 7 |
| 1.4.2 Objetivos específicos | 7 |
| CAPITULO II..... | 8 |
| MARCO TEÓRICO..... | 8 |
| 2.1. Antecedentes de la Investigación | 8 |
| 2.1.1. Antecedentes nacionales | 8 |
| 2.1.2 Antecedentes Internacionales | 11 |
| 2.2. Bases Teóricas | 14 |
| 2.2.1 Hornos | 14 |

| | |
|--|-----------|
| 2.2.2 Horno Paulista | 14 |
| 2.2.3 Horno a cielo abierto..... | 15 |
| 2.2.4 Ladrillos | 16 |
| 2.2.5 Transferencia de Calor | 16 |
| 2.2.6 Formas de transferencia de Calor | 17 |
| 2.2.7. Exergía..... | 20 |
| 2.2.8. Energía libre de Gibbs | 21 |
| 2.2.9. Entropía (S)..... | 21 |
| 2.2.10. Entalpía (H) | 22 |
| 2.2.11. Poder calorífico..... | 22 |
| 2.2.12. Balance de Energía..... | 22 |
| 2.2.13. Calor de la Carga a Cocer | 23 |
| 2.2.14. Pérdida de Calor por Paredes | 24 |
| 2.2.15. Calor por Humos..... | 24 |
| 2.2.16. Pérdidas Intangibles..... | 24 |
| 2.2.17. Eficiencia Térmica del Horno | 25 |
| 2.2.18. Cocción de Ladrillos..... | 25 |
| CAPÍTULO III: | 28 |
| HIPÓTESIS..... | 28 |
| 3.1. Hipótesis..... | 28 |
| 3.3.1. Hipótesis general | 28 |
| 3.3.2. Hipótesis específica..... | 28 |
| 3.2. Variables | 28 |
| 3.2.1. Variable Dependiente..... | 28 |
| 3.2.2. Variable Independiente..... | 28 |
| 3.2.3. Operacionalización de variables | 29 |
| CAPITULO IV..... | 32 |
| METODOLOGÍA..... | 32 |
| 4.1. Delimitación de la investigación | 32 |
| 4.2. Delimitación temporal | 32 |
| 4.3. Tipo de la investigación..... | 33 |
| 4.4. Alcance de la investigación..... | 33 |

| | |
|--|-----------|
| 4.5. Diseño de investigación..... | 33 |
| 4.6. Población y Muestra | 34 |
| 4.6.1. Población | 34 |
| 4.6.2 Muestra | 34 |
| 4.6.3. Muestreo..... | 34 |
| 4.7. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos, Validez y Confiabilidad | 35 |
| 4.7.1. Técnicas e Instrumentos de recolección de Datos | 35 |
| • La Observación Directa..... | 35 |
| • Revisión documental técnica..... | 36 |
| 4.8 Plan de Análisis de Datos | 36 |
| CAPÍTULO V | 38 |
| RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 38 |
| 5.1. Diagnóstico de las condiciones actuales de operación de los hornos a cielo abierto y paulista para el proceso de cocción de ladrillos | 38 |
| 5.2. Análisis termodinámico..... | 46 |
| 5.2.1. Hallando la variación de entalpía..... | 46 |
| 5.2.2. Hallando la variación de entropía..... | 47 |
| 5.2.3. Hallando la variación de energía libre de Gibbs..... | 48 |
| 5.3. Determinar los flujos de energía y cálculos del proceso de cocción de los hornos a cielo abierto y paulista | 49 |
| 5.3.1. Cálculos para el Horno a cielo abierto y el horno Paulista | 49 |
| 5.3.1.1. Calor aportado (Qt)..... | 49 |
| 5.3.1.2. calor acumulado en la manposteria (Qm)..... | 51 |
| 5.3.1.3. Calor por carga del material (Qcm)..... | 56 |
| 5.3.1.4. Calor por humedad del carbón (Qwc)..... | 58 |
| 5.3.1.5. Calor por humedad de la leña y aserrín (Qwl)..... | 59 |
| 5.3.1.6. Calor por agua formada en la combustión a partir del carbón (Qacc).... | 60 |
| 5.3.1.7. Calor por agua formada en la combustión a partir de la leña y el aserrín (Qacl) | 62 |
| 5.3.1.8. Calor por inquemados (cenizas) a partir del carbón (Qic)..... | 63 |
| 5.3.1.9. Calor por inquemados (cenias) a partir de la leña y aserrín (Qil)..... | 64 |

| | |
|--|-----|
| 5.3.1.10. Calor perdido por las paredes (Q_p)..... | 65 |
| 5.3.1.11. Calor por humos (Q_h)..... | 75 |
| 5.3.1.12. Pérdidas intangibles (Q_{in})..... | 76 |
| 5.3.1.13. Eficiencia termodinamica de los hornos (n)..... | 78 |
| 5.3.1.14. Calor por ladrillo | 79 |
| 5.4. Representación numérica del proceso de cocción y quemado de ladrillos de la configuración de ambos horno..... | 82 |
| 5.5. Discusión de resultados con respecto a los antecedentes..... | 85 |
| CAPITULO VI..... | 88 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 88 |
| CONCLUSIONES | 88 |
| RECOMENDACIONES | 92 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 94 |
| ANEXO..... | 97 |
| ANEXO A Matriz de Consistencia | 97 |
| MATRIZ DE CONSISTENCIA..... | 98 |
| ANEXO B Propiedades de materiales de construcción | 100 |
| ANEXO C Propiedades del vapor de agua | 101 |
| ANEXO D Método científico | 102 |
| ANEXO E Formulario de preguntas..... | 103 |
| ANEXO F Datos de entalpía y entropía..... | 104 |
| ANEXO G Registro Fotográfico | 104 |

INDICE DE TABLAS

| | | |
|------------------|---|-----------|
| TABLA 1. | Matriz de Operacionalización de variables | 30 |
| TABLA 2. | Tipo de Análisis de Datos | 37 |
| TABLA 3. | Parámetros actuales de operación..... | 39 |
| TABLA 4. | Temperaturas de las paredes del horno a cielo abierto | 52 |
| TABLA 5. | Temperaturas del piso del horno a cielo abierto | 53 |
| TABLA 6. | Temperaturas de las paredes del horno paulista..... | 55 |
| TABLA 7. | Temperaturas del techo del horno paulista..... | 55 |
| TABLA 8. | Temperaturas del piso del horno paulista..... | 56 |
| TABLA 9. | Pesos de los ladrillos crudos y cocidos del horno a cielo abierto..... | 57 |
| TABLA 10. | Pesos de los ladrillos crudos y cocidos del horno paulista..... | 58 |
| TABLA 11. | Balance de energía del horno a cielo abierto | 77 |
| TABLA 12. | Balance de energía del horno paulista | 78 |
| TABLA 13. | Comparación de los calores resultantes, en función a calores de aporte y calores de consumo y perdidas de calor..... | 82 |

INDICE DE FIGURAS

| | | |
|------------------|--|-----------|
| Figura 1 | Horno Paulista de la Empresa LADRILLOS CALAMA E.I.R.L..... | 15 |
| Figura 2 | Horno a Cielo Abierto de la Empresa LADRILLOS CAMALA E.I.R.L... 16 | |
| Figura 3 | Conducción de Calor Unidimensional | 18 |
| Figura 4 | Conducción de calor por convección..... | 19 |
| Figura 5 | Conducción de calor por radiación..... | 20 |
| Figura 6 | Diagrama de Balance de Energía | 23 |
| Figura 7 | Perfil de Temperatura en Diferentes Puntos del Horno..... | 27 |
| Figura 8 | Ubicación Espacial de la Empresa ladrillos Camala E.I.R.L..... | 32 |
| Figura 9 | Curva de cocción del horno a cielo abierto..... | 40 |
| Figura 10 | Curva de cocción del horno paulista..... | 41 |
| Figura 11 | Plano del horno a cielo abierto desde una vista frontal y aerea..... | 42 |
| Figura 12 | Plano del horno paulista desde una vista frontal..... | 43 |
| Figura 13 | Plano del horno paulista desde una vista interna | 44 |
| Figura 14 | Esquema del proceso de cocción de ladrillo en los hornos artesanales | 45 |
| Figura 15 | Resultados de la representación numérica del horno a cielo abierto | 83 |
| Figura 16 | Resultados de la representación numérica del horno paulista..... | 84 |

SÍMBOLOS

| Símbolo | Descripción | Símbolo | Descripción |
|------------|--|---------------------------|--|
| Q_{cond} | Calor por conducción (W) | k | Conductividad térmica ($\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$) |
| A_s | Área de la superficie en contacto (m^2) | T_s | Temperatura de la superficie ($^\circ C$) |
| T_∞ | temperatura del fluido ($^\circ C$) | Q_{conv} | Calor transferido por convección (W) |
| h | Coefficiente de transferencia de calor por convección ($\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$) | $Q_{emitida-m\acute{a}x}$ | calor por radiación emitido por el cuerpo (W) |
| σ | Constante de Stefan-Boltzmann $5,67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$ | T_s | Temperatura del cuerpo en su superficie ($^\circ C$) |
| G | Energía libre de Gibbs (KJ) | S | Entropía (J/K) |
| H | Entalpia (KJ) | T | Temperatura (K) |
| ΔG | Variación de energía libre de Gibbs (KJ) | ΔS | Variación de entropía (J/K) |
| ΔH | Variación de entalpia (KJ) | Q | Calor (KJ) |
| ΔT | Diferencia de temperatura ($^\circ C$, $^\circ F$, K) | E | Energía de entrada o salida (KJ) |
| U | Energía (KJ) | C_v | Calor específico (KJ/ Kg $^\circ C$) |
| Q_{cm} | Calor de la Carga a Cocer (KJ) | mL | Masa de los ladrillos (Kg) |
| C_0 | Calor específico del ladrillo; ($\frac{KJ}{Kg K}$) | $T_{m\acute{a}x}$ | Temperatura de salida del material (K) |
| T_{min} | Temperatura de entrada de los materiales (K) | Q_p | Pérdida de Calor por Paredes (KJ) |
| U_{pa} | Coefficiente global de transferencia de calor en las paredes del horno ($\frac{W}{K}$) | t | Tiempo total del proceso de quema de los ladrillos (s) |
| Q_h | Calor por humos (KJ) | P_g | Peso de los gases producidos (Kg) |
| C_g | Calor específico de los gases de escape ($\frac{KJ}{Kg K}$) | Q_{in} | Perdidas intangibles (KJ) |
| Q_t | Calor de entrada o Calor aportado al horno (KJ) | $\sum Q$ | Sumatoria de flujos de energía (KJ) |
| η | Rendimiento del calor utilizado para la cocción del material (%) | Q_{cm} | Calor por carga de material (KJ) |
| Q_m | Calor acumulado en la manposteria (KJ) | Q_{wc} | Calor por humedad del carbón (KJ) |

| | | | |
|----------------|--|----------------|--|
| Qwl | Calor por humedad de la leña y aserrín (KJ) | Qacc | Calor por agua formada en la combustión a partir del carbón (KJ) |
| Qacl | Calor por agua formada en la combustión a partir de la leña y el aserrín (KJ) | Qic | Calor por inquemados (cenizas) a partir del carbón (KJ) |
| Qil | Calor por inquemados (cenizas) a partir de la leña y del aserrín (KJ) | Qp | Calor perdido por las paredes (KJ) |
| Pc | Poder calorífico $\frac{KJ}{Kg}$ | m | Masa de la leña (Kg) |
| masrr | Masa del aserrín (Kg) | mcb | Masa del carbón (Kg) |
| V | Volumen (m^3) | Qpa | Calor acumulado en las paredes (KJ) |
| Qpis | Calor acumulado en el piso (KJ) | p | Densidad volumétrica ($\frac{Kg}{m^3}$) |
| Cp | Calor específico ($\frac{KJ}{Kg.K}$) | Tm | Temperatura media (K) |
| Qtech | Calor acumulado en el techo (KJ) | mL | Masa de los ladrillos (Kg) |
| mC | Masa del carbón (Kg) | Yc | Humedad del carbón (%) |
| hg | Entalpia del vapor de agua ($\frac{KJ}{Kg}$) | Um | Energía interna del agua ($\frac{KJ}{Kg}$) |
| Yl | Humedad de la leña y del aserrín (%) | mac | Masa del agua formada en la combustión ($\frac{Kg H_2O}{Kg carbon}$) |
| Ce | Cenizas residuales del carbón (%) | Pf | Pérdida del fuego (%) |
| Upa | Coefficiente global de transferencia de calor en las paredes del horno ($\frac{W}{K}$) | R | Resistencia térmica para una pared cilíndrica ($\frac{K}{W}$) |
| $r_{exterior}$ | Radio exterior (m) | $r_{interior}$ | Radio interior (m) |
| K | Conductividad térmica ($\frac{W}{m.K}$) | L | Altura (m) |
| A | Área (m^2) | W | Watts |

INTRODUCCIÓN

De acuerdo a (Amell, Rubio, Y., & Echeverri, C., 2017) indica que actualmente las empresas que dependen de procesos térmicos presentan un atraso en su tecnología, lo que les trae como consecuencia una baja eficiencia térmica lo que incrementa el consumo de combustible, afectando la producción y la rentabilidad de las empresas.

Este problema no es ajeno a la empresa ladrillos CAMALA E.I.R.L., que se encuentra ubicada en el distrito de San Jerónimo de la ciudad del Cusco, dicha empresa cuenta con dos tipos de hornos, a cielo abierto y paulista, en donde no se tiene ningún tipo de control térmico y existe la ausencia de estudios respecto a este tema, motivo por el cual se planteó como objetivo de la investigación, saber cuál de los dos tipos de hornos es mucho más eficiente térmicamente en las condiciones actuales de operación de cocción de ladrillos, partiendo de la premisa de que una comparación termodinámica entre estos dos tipos de hornos proporcionará las especificaciones requeridas para mejorar la eficiencia térmica en la producción de ladrillos para una futura optimización de dichos hornos, así mismo el trabajo de investigación se tomará como precedente para el diseño de nuevas investigaciones basadas en la optimización del proceso de elaboración de ladrillos artesanales en Cusco.

Durante el desarrollo del trabajo de investigación se nos presentó dificultades como la falta de instrumentación en la empresa, la falta de capacitación de los trabajadores y esto conlleva a poner ciertas limitantes a los trabajos de investigación, y seguramente es un punto de partida para las mejoras del caso.

En este orden de ideas, el trabajo de investigación se compone de seis capítulos:

El capítulo I: se compone por el planteamiento del problema, formulación del problema, justificación y los objetivos planteados para la investigación.

El capítulo II: se compone por los antecedentes de la investigación, las bases teóricas, y definición de los términos utilizados en la investigación.

El capítulo III: se compone por las hipótesis del trabajo de investigación, las variables y la operacionalización de variables.

El capítulo IV: se compone por la metodología de investigación, tipo, alcance y diseño de la investigación. También contiene las técnicas e instrumentos de recolección de datos, validez y confiabilidad, así como también, las técnicas e instrumentos de recolección de datos.

El capítulo V: se compone por el diagnóstico de las condiciones actuales de operación en el proceso de cocción de los hornos paulista y a cielo abierto, además contiene el desarrollo de los cálculos de calores presentes en ambos tipos de hornos y la representación numérica de ambos hornos.

El capítulo VI: se compone por las conclusiones y recomendaciones, donde vemos que si se pudo obtener las eficiencias térmicas de ambos hornos, siendo mayor la del horno a cielo abierto, pero previo a eso, se tuvo que realizar un diagnóstico para determinar los parámetros actuales de operación, como es la cantidad de consumo de combustible y la capacidad de producción.

Para finalizar se tiene las referencias bibliográficas y los anexos.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del Problema

Actualmente la elaboración de ladrillos se convirtió en una industria que se encuentra en pleno apogeo en nuestro país, en la cual hay más de 2 000 microempresas ladrilleras artesanales formalizadas (Rivera, 2021) y Cusco no es ajeno a esta realidad, las microempresas ladrilleras artesanales carecen de equipos, técnicas y mecanismos que favorezcan el proceso productivo de los ladrillos. Uno de los aspectos más importantes a considerar en la producción de ladrillos, es el proceso de cocción, el cual inicia a temperatura ambiente, llegando a los 200°C el agua se evapora casi en su totalidad, a los 500°C los materiales orgánicos presentes en la arcilla son quemados, entre los 700°C y los 800°C se forma una mezcla de silicatos y desde los 800°C hasta los 1200°C se realiza la cocción de los ladrillos en su totalidad (Rivera, 2021), el desafío recae en mantener estos rangos de temperatura en los tiempos de cocción haciéndolo de manera artesanal.

La empresa ladrillos CAMALA E.I.R.L. es una empresa artesanal ladrillera cusqueña que se encuentra en la jurisdicción de San Jerónimo siendo una empresa con varios años en la industria ladrillera, pero formando parte de la formalidad desde hace cuatro años. La empresa se dedica a la elaboración de ladrillos en base a arcilla (que esta a su vez tiene una composición de aluminosilicatos cristalinos, óxidos e hidróxidos metálicos, sulfatos, carbonatos, como también pueden llegar a contener materia orgánica (Zuluaga Castrillón, y otros, 2016)).

Esta empresa cuenta con dos tipos de hornos, el horno a cielo abierto y el horno paulista, teniendo tres hornos de tipo cielo abierto, además que estos hornos realizan tres quemas semanales de ladrillos donde cada horno tiene una capacidad promedio de 3 500 ladrillos y un horno de tipo

paulista que realiza dos quemas de ladrillos semanales teniendo una capacidad promedio de 6 800 ladrillos , lo que conlleva a que se tiene una capacidad de producción en promedio de 179 200 ladrillos mensuales y 2 150 400 ladrillos anuales.

De los dos tipos de hornos que se encuentran en la empresa ladrillos CAMALA E.I.R.L., el de tipo paulista fue incorporado recientemente a la empresa para la sustitución a futuro de los hornos a cielo abierto existentes. Ambos hornos están hechos de los mismos materiales, esencialmente de tierra arcillosa en forma barro y adobe, teniendo como única diferencia el diseño de ambos hornos, siendo el horno a cielo abierto de una forma cilíndrica sin techo y el horno paulista que tiene la forma de una camara rectangular.

La falta de control térmica y la ausencia de estudios respecto a la eficiencia térmica en la cocción de los ladrillos representan pérdidas de producción de ladrillos en la empresa ladrillos CAMALA E.I.R.L. donde se vió que el horno a cielo abierto genera una pérdida aproximada de 6% respecto a la producción y el horno paulista un aproximado del 3%, dichos datos fueron proporcionados por la misma empresa, estas pérdidas se generan por un choque térmico, agrietamiento, exceso de tiempo de cocción, entre otros factores.

En este sentido nace la necesidad de realizar una comparación térmica entre ambos hornos, el horno a cielo abierto y horno paulista, para saber con certeza cuál de los dos hornos cuenta con las mejores características térmicas para la producción de ladrillos y el beneficio de la empresa.

1.2. Formulación de problema

1.2.1 Problema general

¿Cuál será la eficiencia termodinámica comparativa del proceso de cocción entre los hornos paulista y el de cielo abierto en la producción de ladrillos en la empresa “CAMALA E.I.R.L.”?

1.2.2 Problemas específicos

PE1: ¿Cuáles serán las condiciones actuales de operación de los hornos de cocción a cielo abierto y paulista para el proceso de cocción de ladrillos?

PE2: ¿De qué manera los cálculos de los flujos de energía del proceso de cocción, incide en la eficiencia de los hornos a cielo abierto y paulista?

PE3: ¿Cuál de los hornos cielo abierto y paulista presenta mejor rendimiento energético?

1.3. Justificación

La culminación del trabajo de investigación permitió demostrar cuál de los dos hornos cuenta con las mejores condiciones de cocción, por ende con la mejor eficiencia térmica y esto se realizó por medio de una comparación termodinámica de los hornos con base a su configuración geométrica, analizando las características físicas, como es el caso de la densidad volumétrica y el calor específico de los adobes con los cuales están contruidos los mismo, las condiciones de funcionamiento y calculando los valores de calor perdido con respecto al suministrado en un periodo de tiempo durante el proceso de cocción en la producción de ladrillos.

1.3.1 Justificación Económica

Con esta propuesta de comparación termodinámica entre el horno paulista y el horno a cielo abierto se busca tener, como resultado, un horno con las mejores condiciones termodinámicas, lo cual podría conllevar también a un mejor rendimiento de producción, disminución de tiempos de quema, entre otros, lo cual se resume en mayores ingresos económicos para la empresa ladrillos CAMALA E.I.R.L.

1.3.2 Justificación tecnológica

La culminación del trabajo de investigación, permitió la aplicación de procedimientos técnicos con base a las leyes y principios de transferencia de calor, cuyos datos obtenidos

permitieron verificar de qué manera intervienen las variables que actualmente afectan el rendimiento energético en los hornos de la empresa ladrillos CAMALA E.I.R.L., tales como, el calor útil en los hornos, rangos de temperatura y tiempos de cocción adecuados, tipos de hornos, balances de energía, calor perdido y emisiones de gases a la atmósfera que producen contaminación.

1.3.3 Justificación social

El trabajo de investigación se propone como un estudio que a su vez será aprovechado como precedente y apoyo para el diseño de nuevas investigaciones que tengan como finalidad la mejora del proceso de elaboración de ladrillos artesanales en el Cusco y así poder aumentar los niveles socioeconómicos de las empresas dedicadas a este rubro. Como también sirve a modo de consulta para otras empresas ladrilleras que trabajan de manera artesanal.

1.3.4. Justificación Medio Ambiental

La culminación de la comparación termodinámica sobre el proceso de cocción en los dos hornos a fin de evaluar la eficiencia térmica de ambos y con este resultado poder saber que horno es menos contaminante, ya que a mayor eficiencia menor es la contaminación producida.

En este sentido, también la empresa ladrillera se verá beneficiada al utilizar el horno adecuado y menos contaminante colaborando en la relación con su entorno con un proceso mucho más limpio hacia el medio ambiente y hacia la salud de los ciudadanos.

Este estudio de investigación cuantitativa no solo sirve para establecer el funcionamiento óptimo de la cocción de los ladrillos en los hornos a cielo abierto y paulista en la empresa ladrillos CAMALA E.I.R.L., sino que también sirva de referencia para futuros estudios en el sentido de mejorarlo y así también minimizar la contaminación.

1.4. Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Comparar la eficiencia termodinámica del proceso de cocción entre los hornos paulista y el de cielo abierto en la producción de ladrillos en la empresa “CAMALA E.I.R.L.”.

1.4.2 Objetivos específicos

OE1: Diagnosticar el diseño, condiciones y producción de los hornos de cocción con los que se cuenta actualmente para definir las condiciones actuales de operación.

OE2: Efectuar los cálculos de los flujos de energía del proceso de cocción para determinar la eficiencia de calor de los hornos a cielo abierto y paulista.

OE3: Analizar el rendimiento energético de cada uno de los hornos por medio de un balance de energía.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la Investigación

2.1.1. Antecedentes nacionales

Actualmente se han realizado diversos estudios en relación al diseño de hornos con la finalidad de aumentar la eficiencia en el proceso y en consecuencia elevar el nivel de rentabilidad evitando la pérdida de energía en forma de calor y minimizando la contaminación ambiental, y en consecuencia mejorar la productividad.

- En este sentido (Llanos, 2018), presentó su trabajo titulado “Diseño de Horno de cocción para Productores Artesanales de Ladrillos del Centro Poblado Cerrillo, Baños del Inca”, de la Universidad Alas Peruanas en Cajamarca, Perú, cuyo objetivo fue el de mejorar la eficiencia el proceso de quemado de los ladrillos, para ello el autor aplicó una encuesta a una muestra de 26 productores artesanales y fue apoyada con la técnica de revisión documental. De la información recopilada obtuvo como resultado que los hornos utilizados por los productores no presentan las características de diseño requeridas para un funcionamiento eficiente y seguro del equipo, por lo que estos generan una distribución de calor no uniforme generando unas pérdidas aproximadas de producto del 10%. El autor concluye con base a los resultados que los productores se encuentran afectados por pérdidas económicas que han alcanzado hasta el 69,23% de la inversión, además que la pérdida de ladrillos alcanza hasta 5000 unidades por cada proceso de cocción. Finalmente, que la aplicación de las especificaciones de diseño indicadas en el estudio contribuirá a la mejora

en la eficiencia de los hornos, el rendimiento y la competitividad de la empresa. El aporte para el presente estudio radica en las condiciones de diseño para el cálculo de los parámetros de funcionamiento del horno.

- El proyecto de investigación titulado “Mejoramiento de la eficiencia Térmica de un Horno Artesanal de Ladrillo de una Microempresa del Distrito de Florencia de Mora, Provincia de Trujillo”, presentado por (Rivera, 2021), de la Universidad César Vallejo de la ciudad de Trujillo Perú, tuvo como objetivo la mejora de la eficiencia del equipo utilizando un cambio en el uso de combustible a gas natural. El autor realizó un diagnóstico a las condiciones de funcionamiento del horno obteniendo como resultado un exceso de consumo del combustible actual de 5.38 toneladas por cada lote de 35 millares de ladrillos, con una eficiencia muy baja del 60%. Posteriormente el autor realizó un balance de energía para determinar el calor requerido y el flujo másico de gas natural de 166.071,43 Kcal/h y 30,66 m³/h para una eficiencia de 81,5%. Así mismo, el autor realizó pruebas con diferentes configuraciones de la distribución de gases de combustión concluyendo que la implementación de conductos distribuidos en el interior del horno mejorará la distribución de calor en el mismo y la reducción del tiempo de cocción. Entre las conclusiones a las que llega el investigador destaca la económica, con indicadores financieros favorables a la implementación del diseño planteado, con una inversión de S/. 30435.10, un VAN de S/. 67083.31 y un TIR de 201.01% para un periodo de recuperación de la inversión de 1 año. El aporte a la presente investigación está asociado a la aplicación de las mejoras dentro del horno con la implementación de conductos distribuidos uniformemente, originando una distribución de calor uniforme y eficiente dentro del mismo.

- En este mismo orden, la investigación realizada por (Ramos, 2019) titulada “Diseño y Cálculo de Horno Continuo de Cámaras Múltiples en Fábrica de Ladrillos Cerámicos Sol del Norte”, de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, de la ciudad de Lambayeque Perú, para optar al título de ingeniero mecánico electricista. Tuvo como objetivo principal presentar una propuesta para la solución de los problemas de diseño como eficiencia energética y disminuir las emisiones contaminantes a la atmósfera del proceso. Para desarrollar su investigación, el autor consideró el uso de combustibles orgánicos, la seguridad en las operaciones, el aumento en la capacidad de producción y el aumento en la rentabilidad de la empresa. Proponiendo de esta manera nuevos parámetros en el diseño de un nuevo horno continuo de cámaras múltiples para garantizar mayor rentabilidad y disminución en la afectación por contaminación del medio ambiente y de la población cercana. De todo lo anteriormente expuesto, el aporte para el presente estudio está referido a los parámetros de diseño tomados en cuenta para la eliminación de las emisiones contaminantes a la atmósfera.
- De igual manera se tiene el trabajo de investigación “Propuesta de mejora del sistema productivo del ladrillo pandereta en la empresa Ladrillos Tayson S.A.C. para reducir las pérdidas económicas”, realizado por (Guerrero M. , 2020) de la Universidad Católica del Perú para optar al título de ingeniero mecánico. Tuvo como objetivo de analizar el proceso de producción del ladrillo tipo pandereta para reducir las pérdidas económicas generadas por las mermas en el proceso de producción. Para ello, el autor realizó en una primera fase el diagnóstico identificando las causas que producen las pérdidas obteniendo como resultado que la etapa crítica donde se originan los problemas es en cocción, debido a que la empresa no cuenta con los controles de temperatura y tiempo realizando el proceso de

manera artesanal, trabajando de manera empírica generando con ello defectos en los ladrillos finales, afectando la resistencia del mismo por la cocción no uniforme y elevando los costos asociados a esto. Seguidamente el investigador realizó un plan de capacitación al personal, implementando el uso de termocuplas para el control de la temperatura en la etapa de cocción y secado, disminuyendo el tiempo del proceso de 130 horas a 100 horas, e incrementado el rendimiento del 77% al 85%, un aumento en la producción de 4,437 lote/mes a 5,76 lote/mes, de igual manera, diseñó los formularios para llevar los registros de control para las etapas de cocción y secado. Finalmente, realizó un cálculo del indicador beneficio-costos para evaluar económicamente la propuesta presentada, en este sentido, determina que se necesita para su implementación una inversión de S/. 11 212 con un periodo de recuperación de la misma durante el primer año, y la relación beneficio costos de S/. 3,98 por cada sol invertido. El autor concluye que la propuesta presentada es totalmente factible y recomienda su implementación para que la empresa obtenga los beneficios en la mejora de la productividad y rentabilidad.

2.1.2 Antecedentes Internacionales

- En el ámbito internacional el trabajo de investigación “Balance de Energía y Exergía de un Horno de Cuba Vertical para la Producción de Cal”, presentado por (Gutierrez & Cogollos, 2019), del IJMSOR de Cuba, cuyo objetivo fue el de describir las metodologías así como los indicadores para la evaluación del uso del agua dulce en el proceso de producción de cal específicamente en la etapa de horno, resaltando el hecho que los datos obtenidos no son confiables debido a que no consideran el impacto del agua en el proceso y en la ciclo de vida útil del horno. Con esto fueron analizadas las diferentes ventajas y limitaciones con respecto a los diferentes métodos empleados para la evaluación evidenciando el alto

consumo de energía y elevadas emisiones de CO₂ a la atmósfera. De los resultados anteriores los autores desarrollaron un balance de energía en el proceso de calcinación y determinar aquellos factores que influyen en el alto consumo de combustible. Concluyen que la mayor pérdida durante el proceso está en la energía contenida en los gases de combustión del proceso. Su aporte está reflejado en que se puede aplicar el tipo de análisis y la metodología de evaluación de los diferentes procesos al presente estudio.

- El trabajo titulado “Eficiencia Energética en Hornos de Producción de Materiales Cerámicos” presentado por (Guerrero y otros, 2018), de la Universidad Pontificia Bolivariana de Colombia, tuvo como objetivo fue el de proponer procedimientos que permitan la mejora en los parámetros de funcionamiento del horno, realizaron una descripción de los procesos de producción en las ladrilleras, y con base a las temperaturas de operación calcularon los siguientes parámetros: energía necesaria para el eficiente funcionamiento durante la cocción, las temperaturas óptimas, el requerimiento de aire y las emisiones a la atmósfera. Los autores concluyen que la aplicación de nuevos procedimientos con base a las nuevas especificaciones de operación en los diferentes hornos contribuirá a mejorar la eficiencia energética y la productividad del proceso incrementando la rentabilidad.
- Por otro lado, tenemos el trabajo de investigación elaborado por (Lara, 2021), titulado “Mejora en el Procesos de Cocción de Ladrillo Artesanal en Horno Tipo MK2por Simulación Numérica”, del CIATEC, México, cuyo objetivo principal fue el de proponer mejoras en el proceso de cocción de ladrillos con el apoyo de métodos de simulación con el software Ansys y el módulo CFK. Para ello el autor realizó la recopilación de los datos de funcionamiento del horno MK2 tales como la distribución de temperatura.

Seguidamente realiza la simulación obteniendo modelos y comparándolos con los perfiles de temperatura originales y determinar las mejoras que puedan aplicar para el funcionamiento del equipo. El autor determinó mediante la comparación de los valores del modelo y los obtenidos durante el funcionamiento la distribución de calor y la eficiencia energética del horno. Finalmente, el autor concluye que la aplicación de un modelo matemático con el apoyo de software Ansys CFK se genera una representación de las condiciones óptimas de funcionamiento del horno y su influencia en el proceso de cocción del producto. En este sentido, resalta la importancia sobre el uso de herramientas computacionales para obtener resultados que experimentalmente no pueden ser conocidos. El aporte para la presente investigación radica en que el análisis con el apoyo de software especializado puede plantear condiciones de mejora en la eficiencia y productividad para el proceso de cocción de ladrillos.

- Finalmente, el trabajo “Propuesta de Mejora de la Eficiencia Energética de un Horno Artesanal para la Quema de Ladrillos y Tejas- Cámara de Cocción y de Combustión”, de la Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador, presentado por (Arévalo & Cumbe, 2021), tuvo por objetivo el planteamiento de parámetros para la mejora en rendimiento energético de los hornos artesanales, por lo cual realizó la recopilación de datos en campo determinando que los hornos presentan una eficiencia muy baja del 9,6% con un alto nivel de contaminación atmosférica y pérdidas de productos en el orden del 15% al 20%, generando elevadas pérdidas económicas. El trabajo fue desarrollado en tres etapas, en la primera el investigador realizó un diagnóstico sobre las condiciones actuales de operación de los hornos artesanales, en la segunda etapa con los resultados obtenidos en el diagnóstico, realizó una simulación obteniendo modelos de distribución de temperatura

interior, gradientes de temperaturas en la cámara de combustión con temperaturas de aproximadamente 800°C y $\pm 5\%$ en zonas críticas. En la tercera etapa, se aplicaron los nuevos parámetros de funcionamiento mejorando la eficiencia en las operaciones con un análisis de precios para establecer la factibilidad en la propuesta de mejora. La contribución para el presente estudio está centrada en la aplicación de los parámetros de temperatura y los gradientes en las distintas zonas de la cámara de combustión a fin de determinar las pérdidas de energía.

2.2. Bases Teóricas

2.2.1 Hornos

De acuerdo a (Figueroa & Martínez, 2000), el horno” es un equipo que transfiere la energía térmica a los materiales ubicados en su interior con el propósito de elevar su temperatura y producir su cocción”. Los hornos de cocción para ladrillos son de diferentes tipos como por ejemplo lo de carga y descarga manual y de tipo mecanizado para el movimiento de la carga a procesar. Así mismo, (Figueroa & Martínez, 2000) señala que entre los combustibles más empelados para la generación de calor se tiene:

- Madera y carbón vegetal
- Gas natural
- Carbón mineral
- Propano
- Fuel-Oil.

2.2.2 Horno Paulista

(Guerrero, Acevedo, & Escobar, 2018) Señala que un horno de tipo paulista puede tener diferentes configuraciones, se caracteriza por tener una cámara donde se coloca el lote de ladrillos

a cocer, de manera que los gases de combustión fluyen y cubren todo el material para realizar la cocción completa. En la Figura 1 se presenta el horno paulista usado en la empresa.

Figura 1

Horno Paulista de la Empresa ladrillos CALAMA E.I.R.L.



Nota. Figura fotografiada por el autor.

2.2.3 Horno a cielo abierto

Los hornos a cielo abierto según (Guerrero, Acevedo, & Escobar, 2018), “son equipos contruidos de manera artesanal con geometría circular tipo bóveda”, en donde la puerta está situada al lateral y la disposición de los ladrillos sometidos a cocción se realiza por ruma intercalando capas de carbón entre ellas, el proceso de quema (calentamiento, cocción y enfriamiento) en este tipo de horno tendrá una duración variada de entre 2 y 5 días, esto dependerá directamente de la capacidad del horno. Una de las desventajas de este tipo de horno es que no cuentan con medidor de temperatura, ni de aire y combustible como consecuencia un bajo nivel de eficiencia y altas pérdidas de energía. Así mismo, producen altos niveles de contaminación a la atmósfera lo que se traduce en un ladrillo de baja calidad del ladrillo final y grandes diferencias entre uno y otro pertenecientes a una misma carga. Seguidamente, se muestra la figura 2 donde se muestra el horno a cielo abierto.

Figura 2

Horno a Cielo Abierto de la Empresa ladrillos CAMALA E.I.R.L.



Nota. Figura fotografiada por el autor.

En el anexo F se muestra más fotografías de las condiciones actuales en que se encuentran los hornos paulista y a cielo abierto.

2.2.4 Ladrillos

El Comité de Nomenclatura y Definición de la ASTM, 2009, denomina ladrillo a “toda pieza pequeña, maciza o prácticamente maciza, por lo común en forma de prisma rectangular, formada a base de sustancias inorgánicas, no metálicas y endurecida a su forma acabada por acción térmica”. (p.38)

2.2.5 Transferencia de Calor

La transferencia de calor es definida por (Cengel & Ghajar, transferencia de Calor y Masa, 2011), como una ciencia básica cuya finalidad es la de estudiar las causas de la transferencia de energía térmica entre sistemas, en los cuales no se presenta equilibrio térmico y obedece a dos leyes fundamentales de la transferencia de calor: La primera Ley: Requiere que la razón de

transferencia de calor hacia un sistema sea equivalente a la razón del incremento de la energía en ese sistema. Y la segunda ley: requiere que el calor transferido se realice en dirección decreciente.

Por lo tanto, para que exista transferencia de calor debe presentarse una diferencia de temperatura entre sistemas.

2.2.6 Formas de transferencia de Calor

(Cengel & Ghajar, transferencia de Calor y Masa, 2011) Indica que: Los mecanismos conocidos de transferencia de calor son por conducción, convección y radiación, requiriendo para todos, que exista un gradiente de temperatura entre los sistemas que interactúan con una dirección de su transferencia desde el sistema de mayor temperatura hacia el de menor temperatura. (p.17)

Así mismo, (Cengel & Ghajar, transferencia de Calor y Masa, 2011) señala los mecanismos de transferencia de calor como se describen a continuación:

- **Por Conducción:** La transferencia de calor ocurre a nivel de las partículas de mayor energía hacia las de energía más baja, tanto en un mismo elemento como por contacto de elementos diferentes. Puede ocurrir en sólidos, líquidos y gases. La expresión matemática es la siguiente:

$$Q_{cond} = kA \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} = kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (1)$$

Donde:

Q_{cond} : Calor por conducción (W)

k: Conductividad térmica ($\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$)

ΔT : Diferencia de temperatura ($^\circ C$)

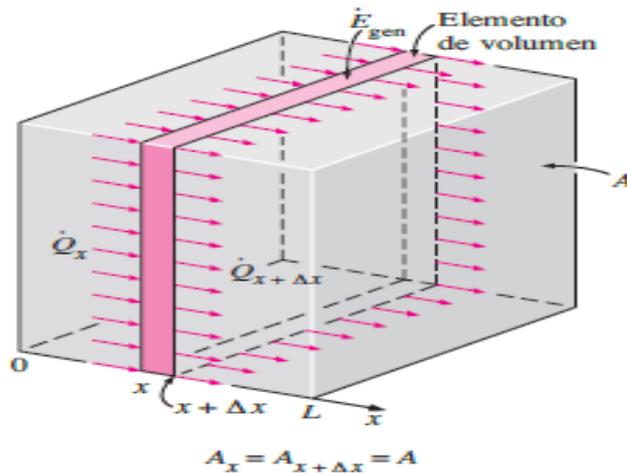
Δx : Espesor del material (m)

A: Área (m^2)

En la figura 3 se muestra la representación gráfica de la transferencia de calor por conducción.

Figura 3

Conducción de Calor Unidimensional



Nota. Muestra la conducción de calor en un elemento de volumen en una pared grande. Tomado de (Cengel & Ghajar, transferencia de Calor y Masa, 2011)

La presencia de la forma de transferencia de calor por conducción se da dentro de ambos tipos de hornos específicamente en la zona de cocción donde están los ladrillos, estos se encuentran de forma apilada por lo que el calor se transfiere de ladrillo en ladrillo.

- **Por Convección:** La transferencia de calor por convección ocurre entre una superficie sólida con un líquido o gas en movimiento y en presencia de una diferencia de temperatura entre ambos. La transferencia de calor por convección aumenta en la medida que la velocidad del líquido o gas aumenta, por lo tanto, la transferencia de calor es proporcional a la diferencia de temperatura y es regida por la Ley de Newton del enfriamiento. En la figura 4 se muestra la conducción de calor por convección.

La expresión es la siguiente:

$$Q_{conv} = hAs (T_s - T_{\infty}) \quad (2)$$

Donde:

Q_{conv} : Calor transferido por convección (W)

h : Coeficiente de transferencia de calor por convección ($\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$)

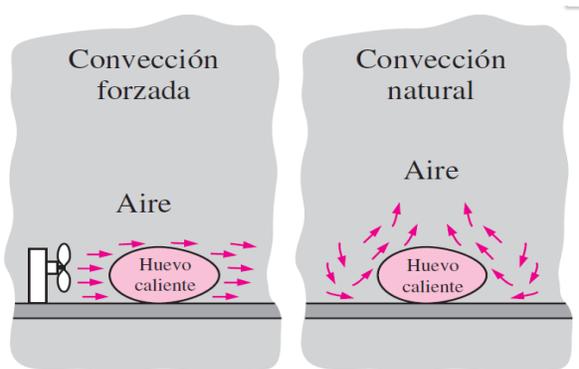
A_s : Área de la superficie en contacto (m^2)

T_s : Temperatura de la superficie ($^\circ C$)

T_{∞} : temperatura del fluido ($^\circ C$)

Figura 4

Conducción de calor por convección



Nota. Se muestra el enfriamiento de un huevo por medio de convección forzada y natural.

Tomado de (Cengel & Ghajar, transferencia de Calor y Masa, 2011)

La transferencia de calor por convección se da por el flujo de aire que hay en los hornos paulista y a cielo abierto durante la cocción de los ladrillos, como también se hace presente en el calor perdido por humos.

- **Por radiación:** Se refiere a la transferencia de calor emitida por los cuerpos por causa de su temperatura, conocida por radiación térmica. Y en la figura 5 se muestra la representación gráfica de la conducción por radiación.

Está regida por la ley de Stefan-Boltzmann cuya expresión es la siguiente:

$$Q_{\text{emitida-max}} = \sigma A_s T_s^4 \quad (3)$$

Donde:

$Q_{\text{emitida-máx}}$: calor por radiación emitido por el cuerpo (W)

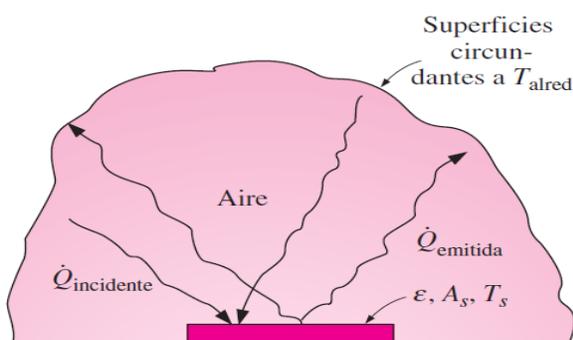
σ : Constante de Stefan-Boltzmann $5,67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$

A_s : Área de la superficie (m^2)

T_s : Temperatura del cuerpo en su superficie ($^{\circ}C$)

Figura 5

Conducción de calor por radiación



Nota. Transferencia de calor por radiación entre un objeto y el medio circundante. Tomado de (Cengel & Ghajar, transferencia de Calor y Masa, 2011)

2.2.7. Exergía

La exergía es una propiedad termodinámica, que nos indica la energía útil y aprovechable de un proceso, depende de las condiciones del entorno como es el caso de temperatura y presión

(Gómez Ribelles, Monleón, & Ribes, 1990). La exergía, al ser un indicador de trabajo útil es empleado para realizar un análisis de eficiencia energética para procesos.

2.2.8. Energía libre de Gibbs

La energía libre de Gibbs, está relacionada directamente con la entalpía, entropía y temperatura, el resultado de estos tres factores resulta en un producto que nos da a conocer la espontaneidad y la no espontaneidad de un proceso, que esto a su vez da a conocer la posibilidad de que se dé o no se dé una determinada reacción. (BYJU'S, 2023)

$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S \quad (4)$$

Donde:

ΔG : Variación de energía libre de Gibbs (KJ)

ΔH : Variación de entalpía (KJ)

T : Temperatura (K)

ΔS : Variación de entropía ($\frac{J}{K}$)

- Si ΔG resulta negativo, se deduce que la reacción va a ocurrir de manera espontánea.
- Si ΔG es positivo, da a conocer que la reacción es no espontánea.
- Si ΔG es cero, quiere decir que la reacción se encuentra en equilibrio.

Respecto al proceso principal del trabajo de investigación que viene a ser la cocción de los ladrillos, que básicamente se realiza por la combustión del carbón, leña y aserrín, siendo este un proceso exotérmico en donde se libera calor, y también un proceso que se da de manera espontánea.

2.2.9. Entropía (S)

La entropía es una medida del desorden molecular de un sistema (Cengel & Boles, M., Termodinámica, 2012) la entropía es resultado de la división del calor cedido de parte de uno de los cuerpos del sistema y la temperatura absoluta del mismo.

2.2.10. Entalpía (H)

La entalpía es una magnitud física de termodinámica, la variación de entalpía representa la medida de la cantidad de energía absorbida o cedida por el sistema termodinámico, visto de otra manera, la entalpía es la cantidad de energía que un sistema termodinámico puede intercambiar con su entorno. (Química.ES, s.f.)

Si la variación de entalpía es negativa la reacción es exotérmica y si la variación es positiva la reacción es endotérmica.

- **Calor (Q):** Es la energía total del movimiento molecular de una sustancia, también denominada energía térmica, esta energía se transfiere del sistema más caliente al sistema más frío teniendo un contacto entre ellos.(Khan Academy, 2017)
- **Temperatura (T):** Es una medida de la energía cinética promedio de los átomos o moléculas en el sistema. (Khan Academy, 2017)

2.2.11. Poder calorífico

El poder calorífico de un combustible está dada por el total de energía suministrada o brindada a partir de la reacción exotérmica de combustión completa. Esta se mide se mide en KJ por kilogramo, metro cúbico o litros, esto dependerá del estado en que se encuentre el combustible, ya sea sólido, gaseoso o líquido respectivamente. (Scribd, 2023)

2.2.12. Balance de Energía

De acuerdo a (Cengel & Ghajar, transferencia de Calor y Masa, 2011), “la energía total E para un sistema cerrado con masa fija, no incluye de velocidad o de elevación durante el proceso”(p.11). Por lo tanto, señala que la relación para el balance de energía viene dada por la siguiente expresión:

Sistema estacionario cerrado:

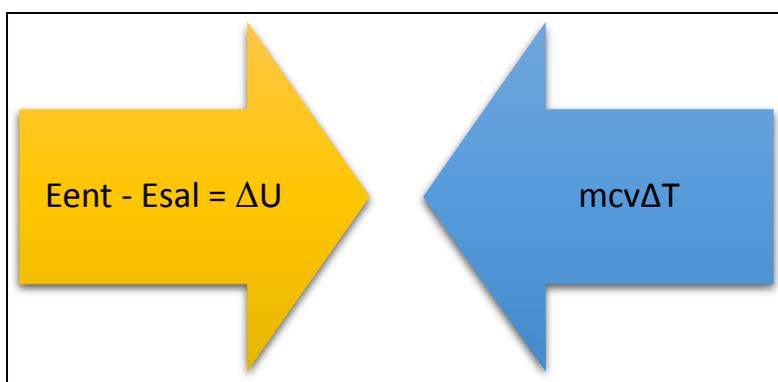
$$E_{ent} - E_{sal} = \Delta U = mC_v\Delta T \quad (5)$$

Expresando el cambio de energía interna en función a la masa m , el calor específico c_v y al cambio de temperatura ΔT . Donde E es la energía total de entrada y salida, y U es la energía interna.

Todo esto se expresa en la imagen número 6.

Figura 6

Diagrama de Balance de Energía



Nota. Muestra el gradiente de energía.

Tomado de (Cengel & Ghajar, transferencia de Calor y Masa, 2011)

2.2.13. Calor de la Carga a Cocer

El calor de la carga a cocer, de acuerdo a (Guerrero, Acevedo, & Escobar, 2018), “es el calor que se necesita para realizar la cocción del producto”(p.23), y su cálculo se realiza con la siguiente expresión:

$$Q_{cm} = mL \times C_0 (T_{max} - T_{min}) \quad (6)$$

Siendo:

mL: Masa de los ladrillos;(Kg)

C_0 = Calor específico del ladrillo; $(\frac{KJ}{Kg K})$

Tmáx: Temperatura de salida del material; (K)

T_{min} : Temperatura de entrada de los materiales; (K)

2.2.14. Pérdida de Calor por Paredes

La pérdida de calor a través de las paredes del horno, de acuerdo a (Guerrero, Acevedo, & Escobar, 2018) se presenta por la diferencia de temperatura entre la pared y el medioambiente. Para el caso de horno se considera estado transitorio y la expresión para su cálculo es la siguiente:

$$Q_p = U_{pa} \times \Delta T \times t \quad (7)$$

Donde:

U_{pa} : Coeficiente global de transferencia de calor en las paredes del horno. $\left(\frac{W}{K}\right)$

ΔT : Variación de temperatura en las paredes externas del horno. (K)

t : Tiempo total del proceso de quema de los ladrillos. (s)

2.2.15. Calor por Humos

(Guerrero, Acevedo, & Escobar, 2018) Señala que “es el calor asociado a los gases emitidos por el horno producto de la combustión” (p.58), cuya expresión matemática es la siguiente:

$$Q_h = P_g \times C_g \times \Delta T \quad (8)$$

Donde:

P_g : Peso de los gases producidos; (Kg)

C_g : calor específico de los gases de escape; $\left(\frac{KJ}{Kg K}\right)$

ΔT : Diferencia de temperatura entre los gases de escape y el medio ambiente; (K)

2.2.16. Pérdidas Intangibles

De acuerdo a (Guerrero, Acevedo, & Escobar, 2018) indica que: Las pérdidas asociadas a los humos negros y radiación hacia el exterior presentan dificultad para ser calculadas, se

consideran pérdidas intangibles, en cuyo caso su determinación se centra en determinar la diferencia de energía disponible y la sumatoria de todos los flujos de energía calculados. (p.58).

Para ello se utiliza la siguiente expresión:

$$Q_{in} = Q_t - \sum Q \quad (9)$$

Donde:

Q_{in} : Pérdidas intangibles (KJ)

Q_t : calor de entrada (KJ)

$\sum Q$: Sumatoria de flujos de energía (KJ)

2.2.17. Eficiencia Térmica del Horno

Según (Gutierrez & Cogollos, 2019), señala que la “eficiencia del horno viene dada por la relación entre el calor efectivo utilizado para el proceso y el calor aportado por el combustible” (p.43). Su expresión es la siguiente:

$$\eta = \frac{Q_{cm}}{Q_t} \times 100 \quad (10)$$

De donde:

η : Rendimiento del calor utilizado para la cocción del material (%)

Q_{cm} : calor por carga de cocer (KJ)

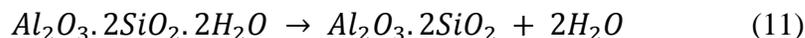
Q_t : Sumatoria de los flujos de energía. (KJ)

2.2.18. Cocción de Ladrillos

La cocción de ladrillos es un proceso de suma importancia en la industria ladrillera, ya que es la fase en la que se elimina la humedad de los ladrillos y se ve la descomposición química de la arcilla, todo esto gracias al calor suministrado por los hornos, este proceso se realiza en tres etapas consecutivas:

La primera etapa es el calentamiento, esto se da por debajo de los 600°C, aquí es donde la humedad absorbida en el proceso de mezclado es eliminado. (Palacios Larotta & Gomez Sierra, 2020).

La segunda etapa es la cocción, aquí es donde vemos la descomposición de la arcilla que se da entre los 600°C y los 1200°C. (Palacios Larotta & Gomez Sierra, 2020).



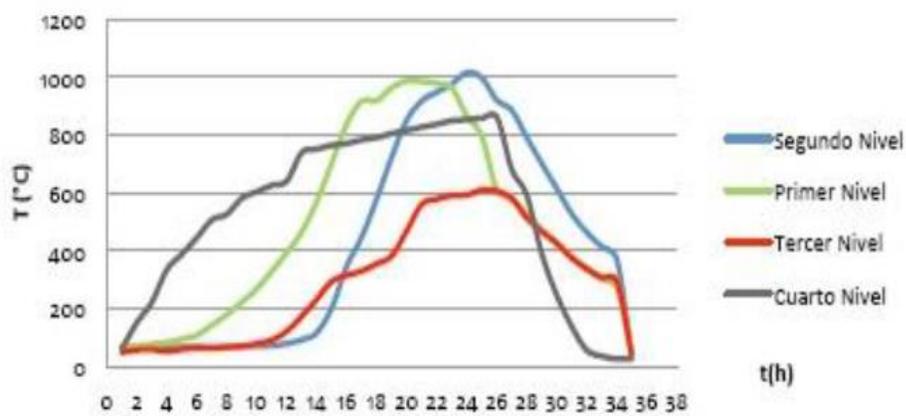
En esta etapa se logra ver una reducción de tamaño en los ladrillos por lo ocurrido en la etapa de calentamiento y cocción.

La tercera etapa es el enfriamiento, aquí la temperatura alcanzada en la cocción empieza a descender de manera gradual, ya que un descenso brusco haría que los ladrillos se fisuren. Los ladrillos que sufran un enfriamiento lento tendrán mejores propiedades mecánicas en cuanto a tenacidad y resistencia, mientras que los ladrillos que sufran enfriamiento rápido serán mucho más frágiles. (Palacios Larotta & Gomez Sierra, 2020).

En la figura 7 se muestra unos ejemplos de curvas de cocción de los ladrillos, también está incluido las tres etapas (calentamiento, cocción y enfriamiento).

Figura 7

Perfil de Temperatura en Diferentes Puntos del Horno



Nota. Ejemplo de la distribución de temperatura dentro de un horno artesanal, con respecto a distintos puntos de ubicación de las termocuplas. Tomado de (Figuroa & Martínez, 2000).

CAPÍTULO III:

HIPÓTESIS

3.1. Hipótesis

3.3.1. Hipótesis general

Al evaluar las condiciones de operación como combustible y producción la eficiencia termodinámica del horno de cielo abierto es más eficiente respecto al horno paulista.

3.3.2. Hipótesis específica

HE1: Es posible identificar las condiciones de diseño y de producción del proceso de cocción de cada uno de los hornos.

HE2: Los cálculos de los flujos de energía del proceso de cocción de cada uno de los hornos inciden significativamente en la eficiencia de cada uno de ellos.

HE3: El rendimiento energético demuestra la mejor eficiencia de uno de los hornos, que se halla realizando un balance de energía.

3.2. Variables

3.2.1. Variable Dependiente

- Eficiencia termodinámica de cada uno de los hornos.

3.2.2. Variable Independiente

- Pérdidas de calor.
- Diseño de los hornos.
- Combustible.

3.2.3. Operacionalización de variables

De acuerdo a (Verano, 2021), la operacionalización de la variable es un proceso por medio del cual se detallan aquellos conceptos que conforman el estudio para hacerlos más útiles y medibles. En la Tabla 1, se presenta el cuadro de operacionalización de la variable en estudio.

Título: COMPARACIÓN TERMODINÁMICA DEL PROCESO DE COCCIÓN DE LOS HORNOS PAULISTA Y A CIELO ABIERTO EN LA PRODUCCIÓN DE LADRILLOS EN LA EMPRESA “LADRILLOS CAMALA E.I.R.L.”

TABLA 1.

Matriz de Operacionalización de variables

| Variables | | Definición Conceptual | Definición Operacional | Dimensiones | Indicadores | Unidades | Instrumentos y técnicas |
|-------------------------------|---|---|--|---|----------------------|-------------|---|
| Variable Dependiente | Eficiencia termodinámica de cada uno de los hornos. | Evaluación de los parámetros de operación de entrada y salida de energía a fin de determinar su rendimiento (Guerrero, Acevedo, & Escobar, 2018) | Porcentaje que se da como resultado del calor útil respecto al calor aportado a los dos tipos de hornos. | Rendimiento energético de los hornos | Calor útil (exergia) | - % | -Rangos de temperatura y sus promedios. - Termómetro analógico para horno. - Reloj. - cálculo de gabinete. |
| Variable independiente | Pérdidas de calor. | La pérdida de calor es el desplazamiento voluntario o no voluntario del calor de un material a otro. Esto se puede dar a través de la radiación, la conducción y la | Análisis de las pérdidas de calor a través de las paredes, por humos o mala combustión del combustible que se da | Transferencia de calor por conducción y convección. | Temperatura | - °C - K | - Planos de los hornos. - Cálculo de gabinete, computador, registros de datos - Uso de software PTC |

| Variables | Definición Conceptual | Definición Operacional | Dimensiones | Indicadores | Unidades | Instrumentos y técnicas |
|-----------------------|---|---|--|--|--------------------------------------|-------------------------|
| | convección.(Cengel & Boles, M., Termodinámica, 2012) | durante el proceso de cocción de ladrillos. | | | | MATHCAD PRIME. |
| Diseño de los hornos. | La determinación de los parámetros geométricos, dimensiones, calidad de los materiales de construcción y las especificaciones de operación para la cocción de ladrillos (Cabrera, 2019) | Análisis de los diseños de los dos tipos de hornos, considerando solo la zona de combustión y la zona de cocción. | Parámetros de diseño de los hornos. | -Área y volumen de los hornos. - densidad volumétrica -Coeficiente de transferencia de calor en las paredes. | - (m3) - (m2) - Kg/m3 - W/K | |
| Combustible. | Los combustibles son sustancias sólidas, líquidas o gaseosas, que cuando combustionan liberan energía calorífica. | Los combustibles que se usan en la empresa ladrillos CAMALA E.I.R.L. son la leña, aserrín y carbón. | Cantidad de combustible consumido en todo el proceso de cocción. | Peso de los combustibles. | - Kg | |

Nota. Elaboración Propia

CAPITULO IV

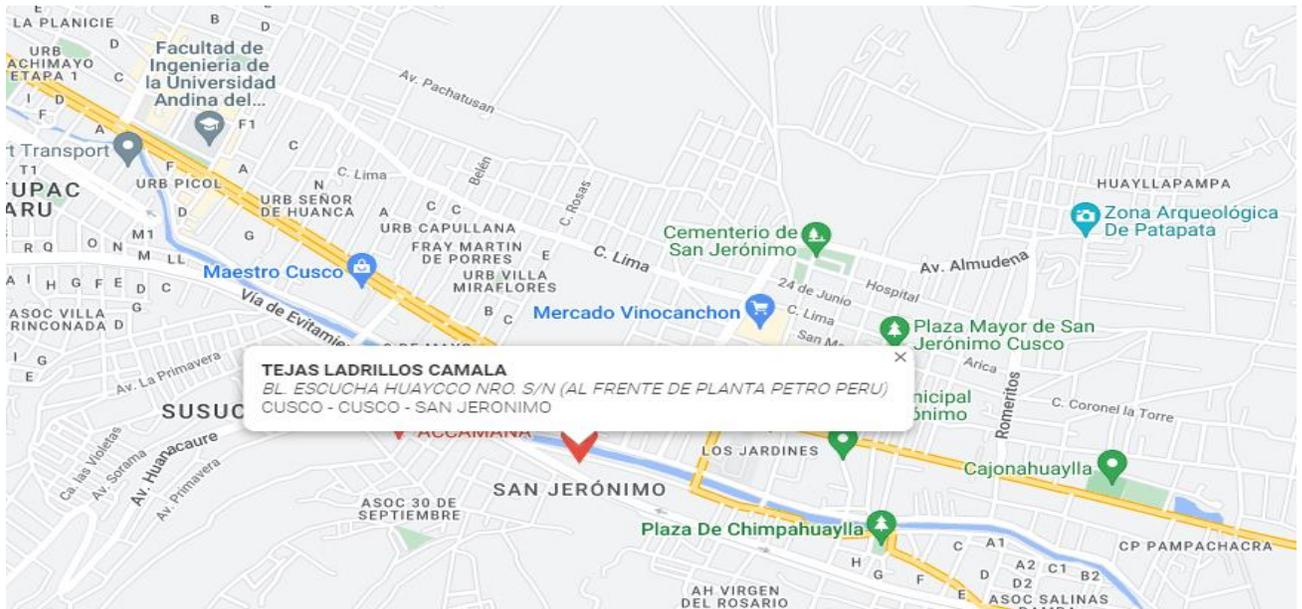
METODOLOGÍA

4.1. Delimitación espacial

La investigación tecnológica está limitada a la empresa ladrillos CAMALA E.I.R.L. ubicada en la vía de Evitamiento del distrito de San Jerónimo en la provincia de Cusco, así como se puede verificar en la figura 8.

Figura 8

Ubicación Espacial de la Empresa ladrillos CAMALA E.I.R.L.



Nota. Google Earth

4.2. Delimitación temporal

El periodo definido para la investigación será un total de 12 meses, comenzando en el periodo de julio del 2022 a julio del año 2023.

4.3. Tipo de investigación

El estudio es una investigación de tipo tecnológica, con enfoque cuantitativo dado que a partir de una situación se busca la adaptación de conocimientos técnicos anticipados para la obtención de resultados, tal como la comparación termodinámica que se aplicó en el proceso de cocción en los hornos paulista y a cielo abierto para ser analizados y con los resultados obtenidos plantear los resultados correspondientes, en este sentido, (Murillo , 2009) está caracterizada por la puesta en práctica de los conocimientos de forma sistemática para conocer la realidad..

4.4. Alcance de la investigación

El alcance del estudio de investigación es comparativo y explicativo, comprende la realización de la comparación termodinámica sobre el proceso de cocción en hornos de cielo abierto y paulista, por medio de los cálculos de diseño a fin de obtener bases de parámetros para el funcionamiento óptimo de estos y así seguir tratando de perfeccionar el proceso de cocción, en la empresa ladrillos CAMALA E.I.R.L.

Dicho alcance está fundamentado en el cálculo y análisis de datos por medio de una comparación termodinámica del proceso de cocción en un periodo de tiempo. Es de temática tecnológica dado que busca demostrar la eficiencia de la cocción de ladrillos en hornos ladrilleros.

4.5. Diseño de investigación

El estudio tecnológico es una investigación experimental, porque se determinará los flujos de calor que se llevan a cabo durante el proceso de cocción de ladrillos en ambos tipos de hornos. En este sentido, (Arias, 2012) señala que “La investigación experimental es un proceso que consiste en someter a un objeto o grupo de individuos, a determinadas

condiciones, estímulos o tratamiento (variable independiente), para observar los efectos o reacciones que se producen (variable dependiente)”.

4.6. Población y Muestra

4.6.1. Población

Para llevar a cabo el estudio de investigación se necesita determinar la población de estudio, para lo cual se seleccionó la totalidad de objetos de estudio conformados por; los hornos, a cielo abierto y paulista que pertenecen a la empresa ladrillos CAMALA E.I.R.L., en los cuales puedan presentarse determinadas características susceptibles de ser estudiadas para un total de dos, (1) horno paulista y un (1) horno a cielo abierto. En este sentido, (Arias F. , 1999), señala que la población se refiere al conjunto de unidades con características comunes con los que se llega a conclusiones dentro de la investigación.

4.6.2 Muestra

Para (Arias F. , 1999), la muestra es un “un subconjunto representativo y finito que se extrae de la población accesible” (p. 83). Para efectos de este estudio la muestra está conformada por los dos hornos indicados, el horno a cielo abierto y el horno paulista, dado que son los objetos de estudio de la presente investigación.

4.6.3. Muestreo

Se seleccionó las muestras de manera probabilística permitiendo recolectar datos de manera aleatoria en este sentido, (Sampieri, R., 2003) indica que una muestra probabilística es que todos los elementos tienen la misma posibilidad de ser elegidos, razón por la cual se realiza de manera aleatoria, y esto se vio al momento de elegir las muestras de ladrillos para hallar pesos y porcentaje de humedad.

4.7. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos, Validez y Confiabilidad

4.7.1. Técnicas e Instrumentos de recolección de Datos

Para la recolección de los datos y obtener una información precisa y confiable, el investigador debe valerse de determinadas técnicas e instrumentos, a fin de alcanzar los objetivos del estudio en cuestión. A este respecto, (Sabino, C., 2000), señala que “un instrumento de recolección de datos es, en principio, cualquier recurso de que se vale el investigador para acercarse a los fenómenos y extraer de ellos información” (p.145). Así mismo, (Arias F. , 1999), define las técnicas como “el procedimiento o forma particular de obtener datos o información” (p.67). Las técnicas utilizadas en esta investigación son: la observación científica y la revisión documental técnica, para lo cual se aplican como instrumentos una encuesta directa a los trabajadores anexo E, también se tomó en cuenta tablas de propiedades de materiales de construcción como se muestra en el anexo A y como también los diseños y dimensiones de ambos hornos como se muestra en las figuras 11, 12 y 13.

- **La Observación Directa**

La observación directa es definida por Sabino (ob. cit.), como “el uso sistemático de nuestros sentidos en la búsqueda de los datos que se necesitan para resolver un problema de investigación” (p. 148). Por lo tanto, para el presente estudio se realizó una observación directa científica para determinar las condiciones de funcionamiento incluyendo los parámetros de temperatura, tiempo y eficiencia de los hornos de cocción de tal manera de poder obtener los datos primarios sobre las condiciones actuales del proceso. Para ello se utilizó una guía de anotaciones para registrar datos como temperaturas, tiempos de cocción, peso de combustible, capacidad de los hornos, entre otros. En relación a la guía de observación, (Tamayo & Tamayo, 2007), describe la guía de observación como un formato

donde se recolectan los datos de manera sistemática y se registran uniformemente, por lo que ofrecen una revisión clara y objetiva de los hechos, permitiendo agruparlos de manera específica, según las necesidades.

- **Revisión documental técnica**

De acuerdo a (Arias, 2012) la revisión documental está referida a la revisión de la información y su análisis documental y de contenido, sobre las bibliografía, textos, normas, especificaciones, que estén relacionadas al área de estudio. En tal sentido, se realizó una revisión de los parámetros de cocción de ambos tipos de hornos. Esto permitirá plantear soluciones producto de la comparación termodinámica entre los parámetros energéticos de los hornos pertenecientes a la empresa en estudio, de igual manera, estar conforme a la normas y condiciones de trabajo que garanticen el cumplimiento de las leyes y el rendimiento de la producción.

4.8. Plan de Análisis de Datos

- **Procesamiento de Resultados:** La investigación y los datos recopilados por medio de las técnicas utilizadas se realizaron con el apoyo de computadora, la revisión documental técnica y el uso de herramientas estadísticas como por ejemplo los promedios aritméticos (que se usó en la recolección de datos de temperatura de los dos tipos de hornos) para la información cuantitativa, mientras que la información cualitativa se procesó en base a la obtención de datos, su respectiva revisión, selección y transcripción según los datos obtenidos en la guía de observación científica la cual se muestra como parte del método científico en el anexo D.

- **Análisis de Resultados:**

Con las referencias numéricas obtenidas en la observación y a partir de cuestionarios realizados directamente a los trabajadores como se muestra en el anexo E, se realizó los cálculos correspondientes para determinar la eficiencia térmica de los hornos, el análisis, interpretación y discusión de todos los resultados realizando una comparación de los valores obtenidos de los procesos en ambos hornos, manteniendo referencia en datos bibliográficos y haciendo de esta misma en ciertas operaciones, como es el caso de poderes caloríficos de los combustibles, calor específico de los adobes, calor específico de los ladrillos, entalpía del vapor de agua, entre otros.

TABLA 2.

Tipo de Análisis de Datos

| Técnica | Tipo de Análisis |
|------------------------|----------------------------|
| Observación Científica | Cualitativo / Cuantitativo |
| Revisión documental | Cualitativo / Cuantitativo |

Nota. Elaboración Propia

CAPÍTULO V

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el siguiente capítulo se presenta los resultados obtenidos con relación a los objetivos planteados y luego de la aplicación de las técnicas y herramientas para dar respuesta a las interrogantes planteadas a fin de dar solución a la problemática en estudio.

5.1. Diagnóstico de las condiciones actuales de operación de los hornos a cielo abierto y paulista para el proceso de cocción de ladrillos

El diagnóstico de los hornos a cielo abierto y paulista se basó en los parámetros y condiciones del proceso con que cada uno de los hornos está trabajando actualmente, a fin de verificar la eficiencia térmica en relación a la operatividad de los mismos. En este sentido, la empresa ladrillos CAMALA E.I.R.L. cuenta con dos tipos de hornos artesanales de tipo paulista y a cielo abierto, en ninguno de los casos cuenta con controles de temperatura, control de aire y tampoco de combustible. A continuación en la tabla 13 se muestra los parámetros de operación de cada horno.

TABLA 3.*Parámetros actuales de operación*

| Parámetros de operación | Horno a cielo abierto | Horno paulista |
|-----------------------------------|------------------------------|-------------------------|
| por proceso de cocción | | |
| Combustible (leña) | 4 800 kg | 10 500 kg |
| Combustible (aserrín) | 400 kg | 25 kg |
| Combustible (carbón) | 20 kg | 5 kg |
| Capacidad de producción | 3 400 a 3 600 ladrillos | 6 700 a 6 900 ladrillos |
| Tiempo de precalentamiento | 10 horas | 12 horas |
| Tiempo de cocción | 10 horas | 20 horas |
| Tiempo de enfriamiento | 12 horas | 20 horas |

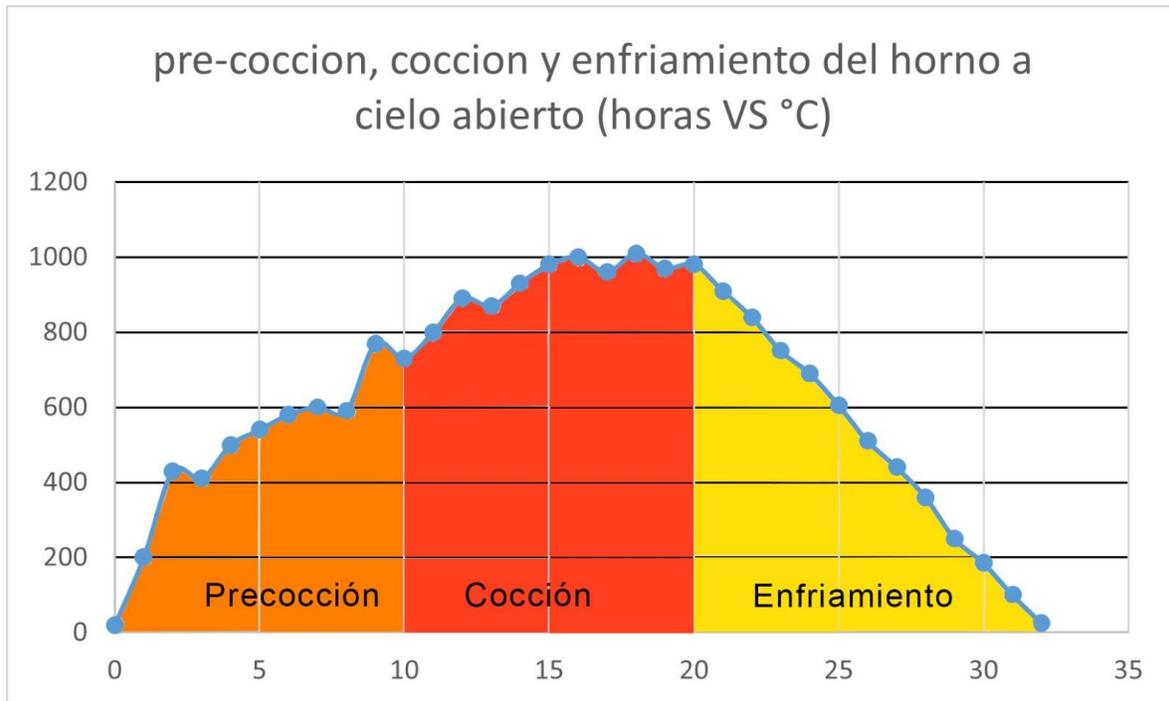
Nota. Elaboración propia.

En cuanto a producción de ladrillos, se deduce, que el horno paulista tiene una capacidad de producción del doble que tiene el horno a cielo abierto.

Ambos tipos de hornos de la empresa presentan pérdidas de calor lo cual conlleva a una baja eficiencia térmica y esto conduce a pérdidas en la producción de ladrillos, durante las quemas se evidenció que el horno a cielo abierto genera una pérdida de 6% aproximadamente y el horno paulista un 3% de pérdidas respecto a la producción.

Estas pérdidas de producción de ladrillos están compuestas, por ladrillos que presentan quemaduras, por ladrillos que no alcanzan el punto de cocción y ladrillos que presentan fracturas por choque térmico.

Seguidamente se presenta la curva de quema referencial de ladrillos de la empresa Ladrillera CAMALA en los hornos artesanales a cielo abierto y paulista:

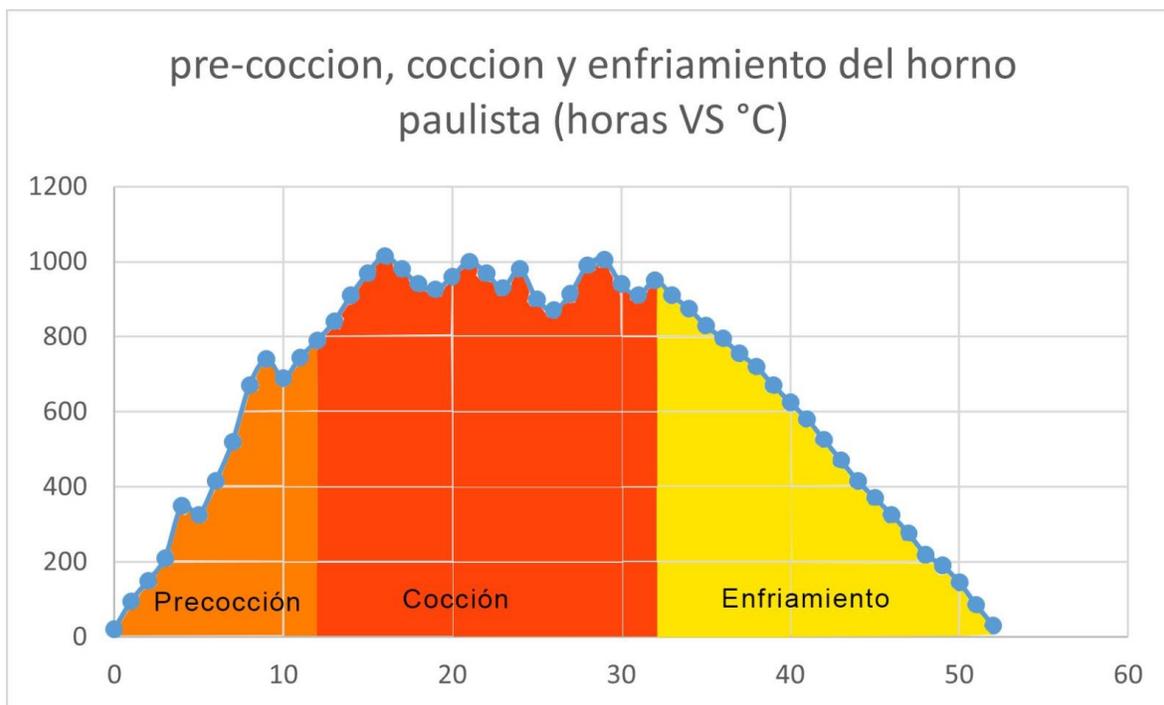
Figura 9*Curva de cocción del horno a cielo abierto*

Nota. Elaboración propia.

En la figura 9 se muestra la curva de cocción para el horno a cielo abierto se desdobra en tres aspectos, la pre-cocción que se realiza por 10 horas y se realiza a temperaturas por debajo de los 800°C, la cocción que se realiza por 10 horas alcanzando una temperatura promedio de 1000°C y un enfriamiento lento que se realiza por 12 horas.

Figura 10

Curva de cocción en el horno paulista



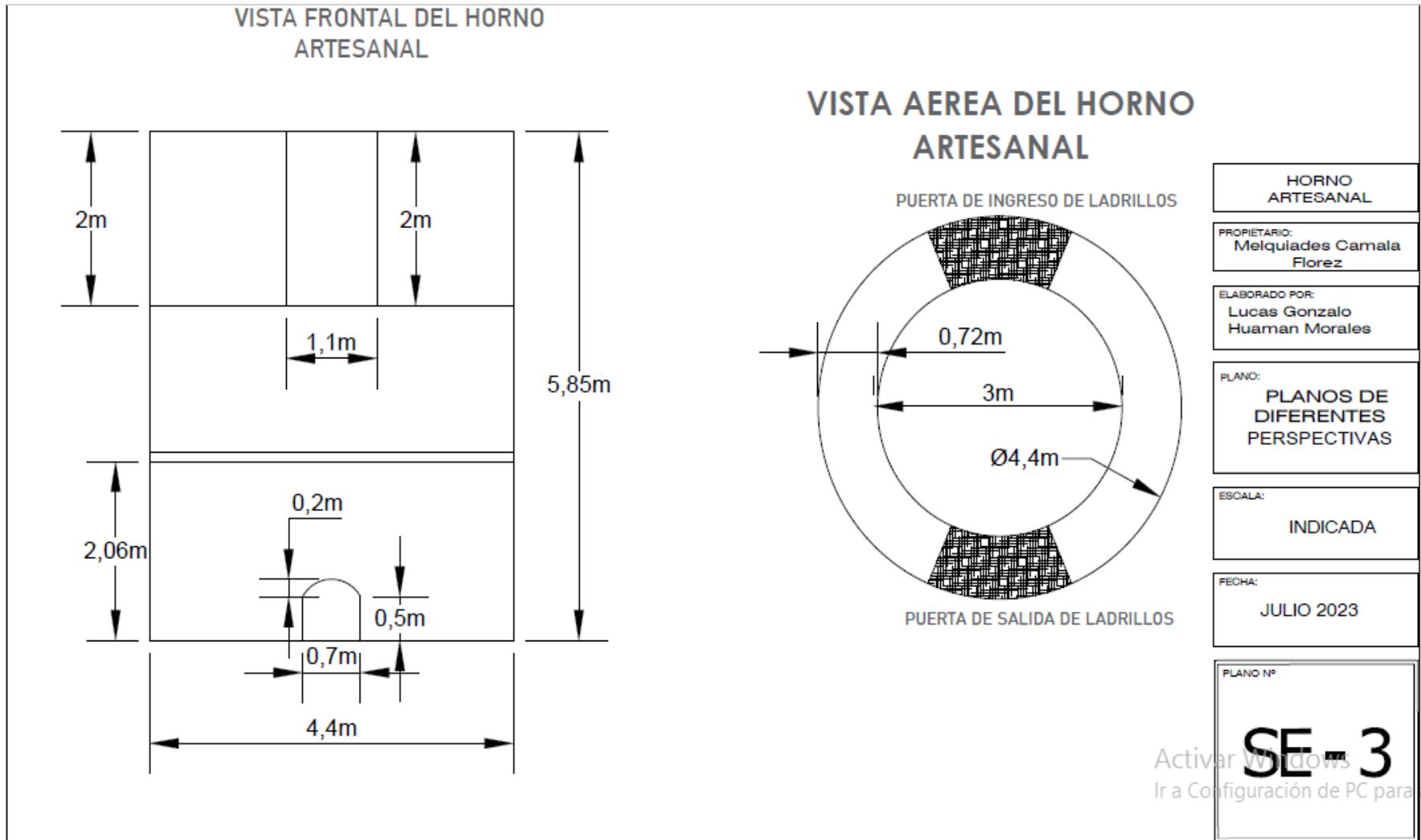
Nota. Elaboración propia.

En la imagen 10 se muestra la curva de cocción para el horno paulista esta se divide también en tres aspectos, la primera que es la pre-cocción que se lleva a cabo por 12 horas y se realiza por debajo a los 800°C, segundo la cocción que se lleva a cabo por 20 horas sobrepasando ligeramente los 1000°C y un enfriamiento lento que se lleva a cabo por 20 horas.

A continuación se muestran las figuras 11, 12 y 13. En donde en la figura 11 se presenta los planos del horno a cielo abierto y en las figuras 12 y 13 los planos del horno paulista.

Figura 11

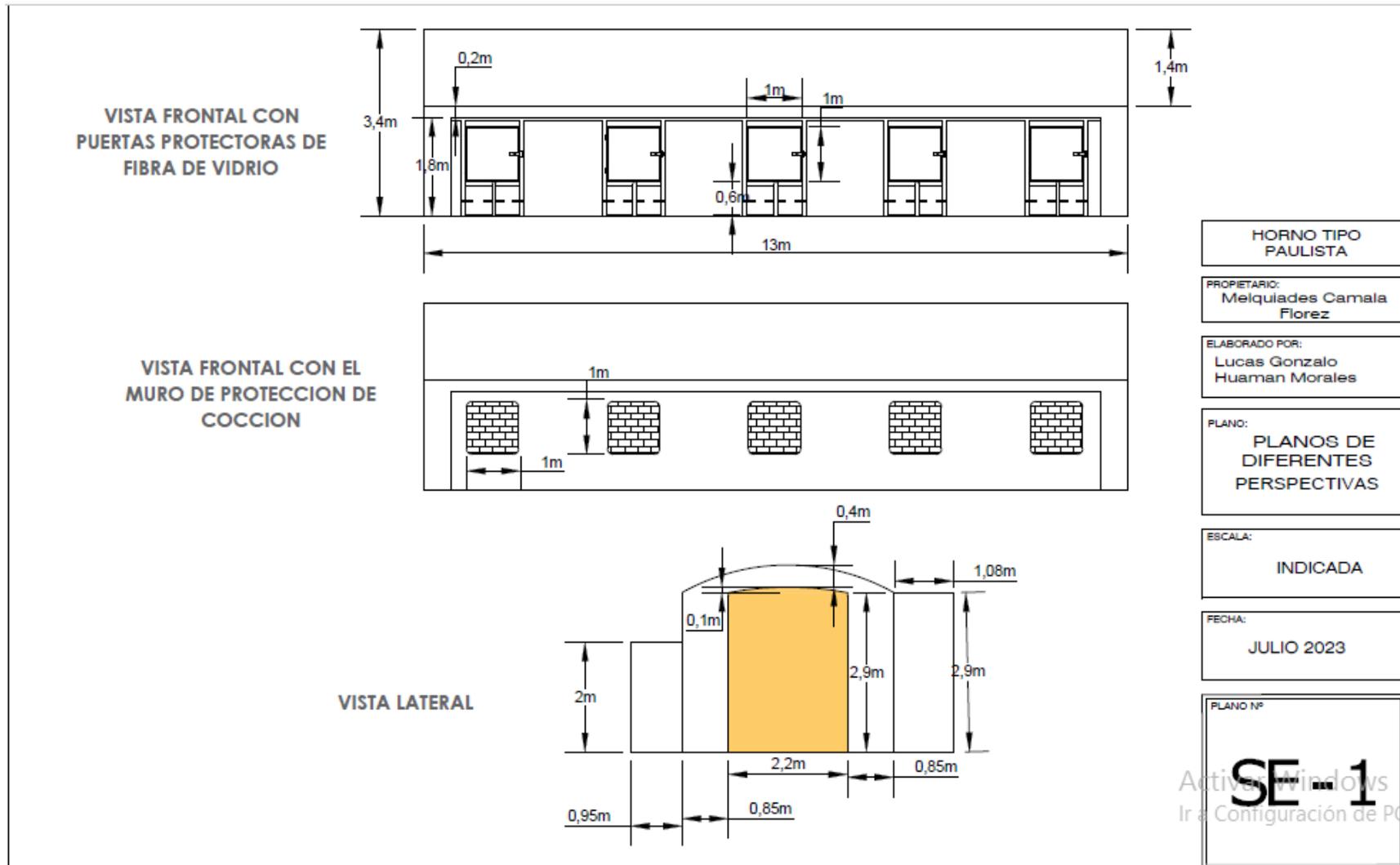
Plano del horno a cielo abierto desde una vista frontal y aérea.



Nota. Elaboración propia.

Figura 12

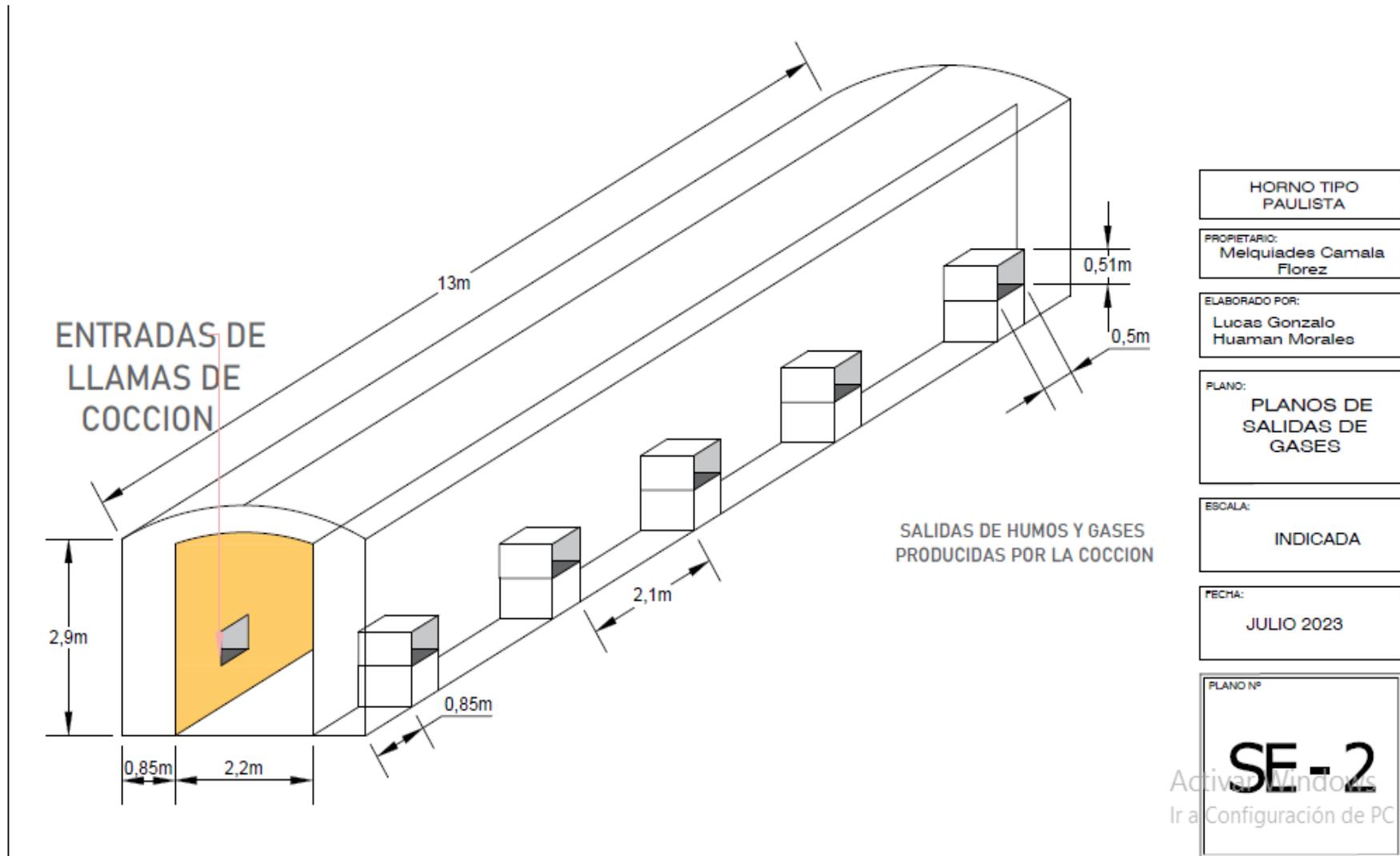
Plano del horno paulista desde una vista frontal.



Nota. Elaboración propia.

Figura 13

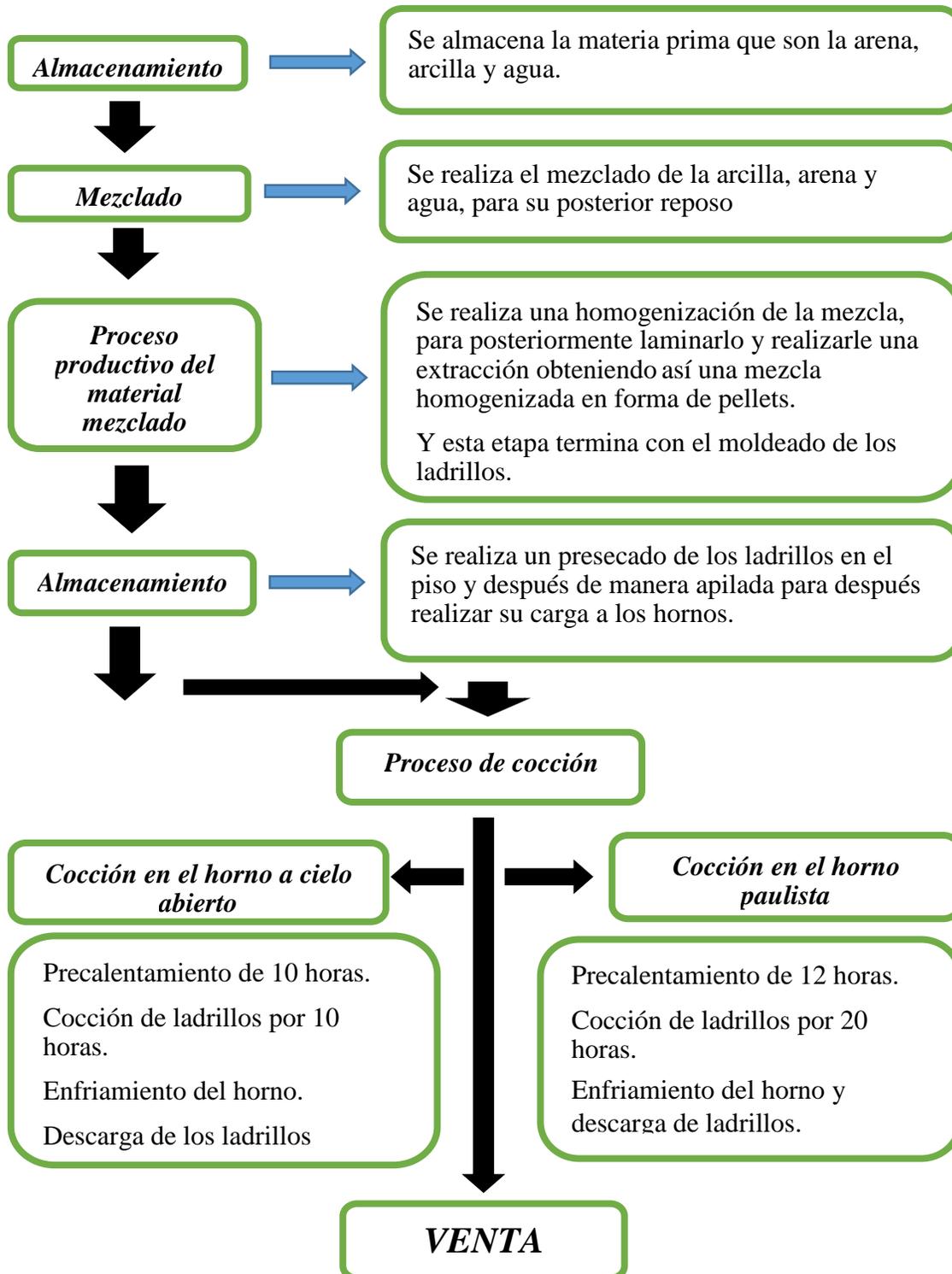
Plano del horno paulista desde una vista interna.



Nota. Elaboración propia.

Figura 14

Esquema del proceso de producción de ladrillos en hornos artesanales



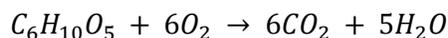
Nota. Elaboración propia.

En la figura 14 se muestra el esquema del proceso de producción de ladrillos, desde la obtención de materia prima hasta la venta del producto final.

5.2. Análisis termodinámico

5.2.1. Hallando la variación de entalpía

Para la leña



$$\Delta H_{C_6H_{10}O_5} = -1277 \text{ KJ}$$

$$\Delta H_{O_2} = 0$$

$$\Delta H_{CO_2} = -393.5 \text{ KJ}$$

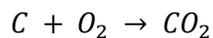
$$\Delta H_{H_2O} = -285.8 \text{ KJ}$$

$$\Delta H = 6 (-393.5 \text{ KJ}) + 5 (-285.8 \text{ KJ}) - (-1277 \text{ KJ})$$

$$\Delta H = -2361 \text{ KJ} - 1429 \text{ KJ} + 1277 \text{ KJ}$$

$$\Delta H = -2513 \text{ KJ}$$

Para el carbón



$$\Delta H_C = 0$$

$$\Delta H_{O_2} = 0$$

$$\Delta H_{CO_2} = -393.5 \text{ KJ}$$

$$\Delta H = -393.5 \text{ KJ}$$

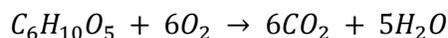
Como se explicó en el marco teórico, la entalpía nos da a conocer la cantidad de energía cedida o absorbida durante el proceso de reacción. Por los resultados obtenidos tanto para la leña como para el carbón, decimos que, en ambas reacciones son de tipo exotérmico pues liberan energía a su entorno en forma de calor.

La leña, cuando llega a una temperatura de 275°C, se produce una combustión ampliamente exotérmica (Peris, 1985). Y en cuanto al carbón presenta dos etapas de combustión, la primera que se encuentra entre los rangos de temperatura de 25°C a 50°C,

donde se comienza la eliminación de la humedad e inicia la liberación del material volátil y la segunda etapa que se da desde los 300°C en donde ocurre la combustión netamente exotérmica (Rojas González & Barraza Burgos, 2009).

5.2.2. Hallando la variación de entropía

Para la leña



$$\Delta S_{C_6H_{10}O_5} = 188 \frac{J}{K}$$

$$\Delta S_{O_2} = 205 \frac{J}{K}$$

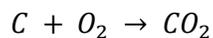
$$\Delta S_{CO_2} = 213.8 \frac{J}{K}$$

$$\Delta S_{H_2O} = 69.91 \frac{J}{K}$$

$$\Delta S = 6 \left(213.8 \frac{J}{K} \right) + 5 \left(69.91 \frac{J}{K} \right) - \left(188 \frac{J}{K} + 6 \left(205 \frac{J}{K} \right) \right)$$

$$\Delta S = 214.35 \frac{J}{K}$$

Para el carbón



$$\Delta S_C = 5.74 \frac{J}{K}$$

$$\Delta S_{O_2} = 205 \frac{J}{K}$$

$$\Delta S_{CO_2} = 213.8 \frac{J}{K}$$

$$\Delta S = 213.8 \frac{J}{K} - \left(5.74 \frac{J}{K} + 205 \frac{J}{K} \right)$$

$$\Delta S = 3.06 \frac{J}{K}$$

Respecto a la entropía, en ambas reacciones, tanto de la leña como del carbón se tuvieron resultados positivos lo cual conlleva a deducir que el resultado beneficia a la espontaneidad de la reacción.

5.2.3. Hallando la variación de energía libre de Gibbs

Para la leña

$$\Delta H = -2\,513\text{ KJ}$$

$$\Delta S = 214.35 \frac{\text{J}}{\text{K}} \rightarrow 0.21435 \frac{\text{KJ}}{\text{K}}$$

$$T = 25^\circ\text{C} \rightarrow 298.15\text{K}$$

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S$$

$$\Delta G = -2\,513\text{ KJ} - \left(298.15\text{K} \times 0.21435 \frac{\text{KJ}}{\text{K}}\right)$$

$$\Delta G = -2\,576.908\text{ KJ}$$

Para el carbón

$$\Delta H = -393.5\text{ KJ}$$

$$\Delta S = 3.06 \frac{\text{J}}{\text{K}} \rightarrow 0.00306 \frac{\text{KJ}}{\text{K}}$$

$$T = 25^\circ\text{C} \rightarrow 298.15\text{K}$$

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S$$

$$\Delta G = -393.5\text{ KJ} - \left(298.15\text{K} \times 0.00306 \frac{\text{KJ}}{\text{K}}\right)$$

$$\Delta G = -394.412\text{ KJ}$$

En cuanto a los resultados obtenidos respecto a la energía libre de Gibbs, en ambos casos se obtuvieron resultados negativos, lo cual nos da a conocer que son reacciones espontaneas, es decir, que estas reacciones se darán en condiciones naturales y no se requiere que la reacción sea impulsada para llevarse a cabo. La energía libre de Gibbs resulta ser una herramienta muy esencial y necesaria para poder pronosticar el comportamiento de una reacción.

5.3. Determinar los flujos de energía y cálculos del proceso de cocción de los hornos a cielo abierto y paulista

Para la determinación de los flujos de energía y calor, se usó la siguiente ecuación tanto para el horno a cielo abierto como para el horno paulista:

$$Q_t = Q_{cm} + Q_m + Q_{wc} + Q_{wl} + Q_{acc} + Q_{acl} + Q_{ic} + Q_{il} + Q_p + Q_h + Q_{in} \quad (12)$$

Donde:

Q_t : Calor aportado al horno.

Q_{cm} : Calor por carga del material.

Q_m : Calor acumulado en la mampostería.

Q_{wc} : Calor por humedad del carbón.

Q_{wl} : Calor por humedad de la leña y aserrín.

Q_{acc} : Calor por agua formada en la combustión a partir del carbón.

Q_{acl} : Calor por agua formada en la combustión a partir de la leña y el aserrín.

Q_{ic} : Calor por inquemados (cenizas) a partir del carbón.

Q_{il} : Calor por inquemados (cenizas) a partir de la leña y del aserrín.

Q_p : Calor perdido por las paredes.

Q_h : Calor por humos.

Q_{in} : Pérdidas intangibles de calor.

5.3.1. Cálculos para el Horno a cielo abierto y el horno Paulista

5.3.1.1. Calor aportado al horno (Q_t)

El calor aportado al horno, se refiere a la energía calorífica liberada durante la combustión del combustible que se da en el proceso de quema de ladrillos que en este caso es el carbón, leña y aserrín, y está dado por el poder calorífico de cada combustible multiplicado por la cantidad utilizada.

Para el horno a cielo abierto

$$Qt = Pc \times mc \quad (13)$$

Donde:

Pc: Poder calorífico del carbón; $33\,793 \frac{KJ}{Kg}$ (Palacios Larotta & Gomez Sierra, 2020)

Pc: Poder calorífico de la leña y el aserrín; $21\,600 \frac{KJ}{Kg}$

ml: Masa leña; 4 800 Kg

masrr: Masa aserrín; 400 Kg

mcb: Masa carbón: 20 Kg

$$Qt = (20 \text{ Kg} \times 33\,793 \frac{KJ}{Kg}) + (5\,200 \text{ Kg} \times 21\,600 \frac{KJ}{Kg})$$

$$Qt = 112\,995\,860 \text{ KJ}$$

Para el horno Paulista

$$Qt = Pc \times mc \quad (13)$$

Donde:

Pc: Poder calorífico del carbón; $33\,793 \frac{KJ}{Kg}$ (Palacios Larotta & Gomez Sierra, 2020)

Pc: Poder calorífico de la leña y el aserrín; $21\,600 \frac{KJ}{Kg}$

ml: Masa leña; 10 500 Kg

masrr: Masa aserrín; 25 Kg

mcb: Masa carbón: 5 Kg

$$Qt = (5 \text{ Kg} \times 33\,793 \frac{KJ}{Kg}) + (10\,525 \text{ Kg} \times 21\,600 \frac{KJ}{Kg})$$

$$Qt = 227\,508\,965 \text{ KJ}$$

5.3.1.2. Calor acumulado en la mampostería (Qm)

El calor de entrada es transferido hacia las paredes y piso de los hornos, por lo que existe una diferencia de temperatura entre la sección interna y externa de los hornos, lo que genera una cantidad de calor acumulado en el techo, en las paredes y piso de los hornos. Para hallar este calor intervienen datos como los volúmenes de piso y paredes, densidad volumétrica de los adobes, su capacidad calorífica y la temperatura media entre el interior y el exterior de los hornos, tanto de paredes como de piso, ver también Anexo B.

Para el horno a cielo abierto

- **Hallando volúmenes del horno**

Volumen total de horno

$$V = \frac{\pi}{4} (D_{\text{exterior}}^2 - D_{\text{interior}}^2) H \quad (14)$$

$$V = \frac{\pi}{4} ((4.44\text{m})^2 - (3\text{m})^2) 5.85\text{m}$$

$$V = 49.224 \text{ m}^3$$

Volumen de la puerta donde inicia la combustión de combustible

V = volumen de la sección semicircular

+ volumen de la sección rectangular

$$V = \left(\frac{\pi}{2} \times 0.35\text{m} \times 0.20\text{m} \times 0.72\text{m} \right) + (0.50\text{m} \times 0.70\text{m} \times 0.72\text{m})$$

$$V = 0.079\text{m}^3 + 0.252\text{m}^3$$

$$V = 0.331\text{m}^3$$

Volumen de las puertas de carga y descarga

$$V = H \times b \times a \quad (15)$$

$$V = 2(1.1\text{m} \times 2\text{m} \times 0.72\text{m})$$

$$V = 3.168\text{m}^3$$

Entonces:

Volumen de la pared

V_{paredes del horno}

$$= V_{\text{total del horno}} - (V_{\text{puerta de coccion}} + V_{\text{puertas de carga y descarga}})$$

$$V_{\text{paredes del horno}} = 49.224 \text{ m}^3 - (0.331\text{m}^3 + 3.168\text{m}^3)$$

$$V_{\text{paredes del horno}} = 45.725\text{m}^3$$

Volumen del piso

$$V = \pi r^2 \times H \quad (16)$$

$$V = \pi (2.2\text{m})^2 \times 0.14\text{m}$$

$$V = 2.168m^3$$

- **Hallando calor acumulado en la manposteria**

$$Q_{pa} \text{ y } Q_{pis} = p \times Cp \times V \times Tm \quad (17)$$

Donde:

p = densidad volumétrica de los abobes del horno; $1\ 896.825 \frac{Kg}{m^3}$

Cp = calor especifico de los adobes del horno; $0.79 \frac{KJ}{Kg.K}$ (Dato obtenido del anexo

B)

V = volumen de la pared o del piso del horno; m^3

Tm = temperatura media de la pared o del piso del horno; K

Hallando densidad volumétrica del adobe

Los adobes tienen las siguientes dimensiones (20cm x 45 cm x 14 cm) y un peso de (23.9 Kg)

$$V = H \times b \times a$$

$$V = 0.45\ m \times 0.20m \times 0.14m$$

$$V = 0.0126m^3$$

Entonces la densidad volumétrica del adobe es:

$$p = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}} = \frac{23.9Kg}{0.0126m^3} = 1\ 896.825 \frac{Kg}{m^3} \quad (18)$$

Hallando calor acumulado en la pared

En la tabla 4 se muestra la temperatura media de las temperaturas de las paredes en el horno a cielo abierto.

TABLA 4.

Temperaturas de las paredes del horno a cielo abierto.

| | Temperatura interna (°C) | Temperatura externa (°C) | Temperatura media (°C) | Temperatura media (K) |
|-----------------|--------------------------|--------------------------|------------------------|-----------------------|
| Pared | 1 005 | 88 | | |
| | 992.5 | 82.5 | | |
| | 980 | 79 | | |
| Promedio | 992.5 | 83.17 | 537.835 | 810.985 |

Nota. Elaboración propia.

$$Q_{pa} = 1\ 896.825 \frac{Kg}{m^3} \times 0.79 \frac{KJ}{Kg.K} \times 45.725m^3 \times 810.985\ K$$

$$Q_{pa} = 55\ 567\ 504.32\ KJ$$

Hallando calor acumulado en el piso

La tabla 5 contiene datos de la temperatura media del piso del horno a cielo abierto.

TABLA 5.

Temperatura del piso del horno a cielo abierto.

| | Temperatura interna (°C) | Temperatura externa (°C) | Temperatura media (°C) | Temperatura media (K) |
|-------------|--------------------------|--------------------------|------------------------|-----------------------|
| Piso | 997 | 278 | 637.5 | 910.65 |

Nota. Elaboración propia.

$$Q_{pi} = 1\ 896.825 \frac{Kg}{m^3} \times 0.79 \frac{KJ}{Kg.K} \times 2.168m^3 \times 910.65K$$

$$Q_{pi} = 2\ 958\ 456.078\ KJ$$

$$Q_m = Q_{pa} + Q_{pi} \quad (19)$$

$$Q_m = 55\ 567\ 504.32\ KJ + 2\ 958\ 456.078\ KJ$$

$$Q_m = 58\ 525\ 960.4\ KJ$$

Para el horno Paulista

- **Hallando volúmenes del horno**

Volumen de las paredes donde inicia la combustión de combustible (V_1)

Se usa la fórmula 14 para hallar los volúmenes del horno

$$V_1 = 2(0.50m \times 2m \times 0.95m) + (0.20m \times 12m \times 0.95m)$$

$$V_1 = 4.18m^3$$

Volumen de las paredes donde se cocen los ladrillos (V_2)

$$V_2 = 2(0.85m \times 2.90m \times 13m)$$

$$V_2 = 64.09m^3$$

Volumen de las entradas y desfuegos de calor (V_3)

$$V_3 = 10(0.50m \times 0.50m \times 0.85m)$$

$$V_3 = 2.125m^3$$

Volumen de las puertas de carga y descarga (V_4)

$$V_4 = 2\left(\left(\frac{\pi}{2}\right) \times 0.10m \times 1.10m \times 0.115m\right) + (2.20m \times 2.90m \times 0.115m)$$

$$V_4 = 1.507 \text{ m}^3$$

Volumen del techo (V_5)

$$V_5 = \left(\frac{\pi}{2} \times 0.50\text{m} \times 1.95\text{m} \times 13\text{m} \right) - \left(\frac{\pi}{2} \times 0.10\text{m} \times 1.10\text{m} \times 13\text{m} \right)$$

$$V_4 = 17.663 \text{ m}^3$$

Volumen del piso (V_6)

$$V_6 = 4.85\text{m} \times 13\text{m} \times 0.14\text{m}$$

$$V_6 = 8.827\text{m}^3$$

Entonces:

Volumen de la pared ($V_1 + V_2 + V_4 - V_3$)

$$V = 4.18\text{m}^3 + 64.09\text{m}^3 + 1.507 \text{ m}^3 - 2.125\text{m}^3$$

$$V = 67.652\text{m}^3$$

Volumen del techo

$$V = 17.663 \text{ m}^3$$

Volumen del piso

$$V = 8.827\text{m}^3$$

- **Hallando calor acumulado en la manposteria**

$$Q_{pa} \text{ y } Q_{pis} \text{ y } Q_{tech} = p \times Cp \times V \times Tm \quad (17)$$

Donde:

p = densidad volumétrica de los abobes del horno; $1\ 896.825 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$

Cp = calor especifico de los adobes del horno; $0.79 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg.K}}$ (Dato obtenido del anexo

B)

V = volumen de la pared, del techo o del piso del horno; m^3

Tm = temperatura media de la pared, del techo o del piso del horno; K

Hallando calor acumulado en la pared

En la tabla 6 se muestra la temperatura media de las temperaturas medidas en las paredes de horno paulista.

TABLA 6.*Temperaturas de las paredes del horno paulista.*

| | Temperatura interna (°C) | Temperatura externa (°C) | Temperatura media (°C) | Temperatura media (K) |
|-----------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| Pared | 1 047 | 72 | | |
| | 1 050 | 92 | | |
| | 1 015 | 58 | | |
| Promedio | 1037.33 | 74 | 555.665 | 828.815 |

Nota. Elaboración propia.

$$Q_{pa} = 1\,896.825 \frac{Kg}{m^3} \times 0.79 \frac{KJ}{Kg.K} \times 67.652 m^3 \times 828.815 K$$

$$Q_{pa} = 84\,021\,919.5 KJ$$

Hallando calor acumulado en el techo

La tabla 7 contiene datos de la temperatura media del techo del horno paulista.

TABLA 7.*Temperatura del techo del horno paulista.*

| | Temperatura interna (°C) | Temperatura externa (°C) | Temperatura media (°C) | Temperatura media (K) |
|--------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| Techo | 927 | 89 | 508 | 781.15 |

Nota. Elaboración propia.

$$Q_{tech} = 1\,896.825 \frac{Kg}{m^3} \times 0.79 \frac{KJ}{Kg.K} \times 17.663 m^3 \times 781.15 K$$

$$Q_{tech} = 20\,675\,368.67 KJ$$

Hallando calor acumulado en el piso

La tabla 8 contiene datos de la temperatura media del piso del horno paulista.

TABLA 8.*Temperaturas del piso del horno paulista*

| | Temperatura interna (°C) | Temperatura externa (°C) | Temperatura media (°C) | Temperatura media (K) |
|-------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| Piso | 1003 | 197 | 600 | 873.15 |

Nota. Elaboración propia.

$$Q_{pi} = 1\,896.825 \frac{Kg}{m^3} \times 0.79 \frac{KJ}{Kg.K} \times 8.827 m^3 \times 873.15K$$

$$Q_{pi} = 11\,549\,318.05 KJ$$

$$Q_m = Q_{pa} + Q_{tech} + Q_{pi} \quad (20)$$

$$Q_m = 84\,021\,919.5 KJ + 20\,675\,368.67 KJ + 11\,549\,318.05 KJ$$

$$Q_m = 116\,246\,606.2 KJ$$

5.3.1.3. Calor por carga del material (Qcm)

El calor por carga del material, se refiere al calor teórico requerido para la cocción de los ladrillos y está dado por la multiplicación de la masa de los ladrillos, el calor específico de los ladrillos y la variación de temperatura con que entran y salen los ladrillos.

Para el horno a cielo abierto (3 500 ladrillos)

TABLA 9.

Pesos de los ladrillos crudos y cocidos del horno a cielo abierto.

| Peso del ladrillo crudo (kg) | Peso del ladrillo cocido (kg) | Humedad (%) |
|---------------------------------|----------------------------------|-------------|
| 5.200 | 4.495 | 13.558 |
| 5.145 | 4.520 | 12.148 |
| 5.230 | 4.700 | 10.134 |
| 5.190 | 4.590 | 11.560 |
| 5.270 | 4.670 | 11.385 |
| 5.215 | 4.590 | 11.985 |
| Promedio | | |
| 5.208 kg | 4.594 kg | 11.795 % |

Nota. Elaboración propia.

En la tabla 9 se muestra el promedio del peso crudo, peso cocido y porcentaje de humedad de 6 muestras de ladrillo que se cocieron en el horno a cielo abierto.

$$Q_{cm} = mL \times C_0 (T_{max} - T_{min}) \quad (6)$$

Donde:

mL: Masa de los ladrillos; $(5.208 \frac{Kg}{lad.} \times 3\ 500\ lad.)$

C_0 = Calor específico del ladrillo; $(0.79 \frac{KJ}{Kg\ K})$ (Dato obtenido del anexo B)

$T_{máx}$: Temperatura de salida del material; $1\ 000^{\circ}C = 1\ 273.15K$

T_{min} : Temperatura de entrada de los materiales; $20^{\circ}C = 293.15K$

$$Q_{cm} = 5.208 \frac{Kg}{lad.} \times 3\ 500\ lad. \times 0.79 \frac{KJ}{Kg\ K} (1\ 273.15K - 293.15K)$$

$$Q_{cm} = 14\ 112\ 117.6\ KJ$$

Para el horno paulista (6 800 ladrillos)

En la tabla 10 se muestra el promedio del peso crudo, peso cocido y porcentaje de humedad de 6 muestras de ladrillo que se cocieron en el horno paulista.

TABLA 10.

Peso de los ladrillos crudos y cocidos del horno paulista.

| Peso del ladrillo crudo (kg) | Peso del ladrillo cocido (kg) | Humedad (%) |
|---------------------------------|----------------------------------|-------------|
| 5.210 | 4.525 | 13.148 |
| 5.190 | 4.620 | 10.983 |
| 5.230 | 4.570 | 12.619 |
| 5.170 | 4.535 | 12.282 |
| 5.155 | 4.550 | 11.736 |
| 5.205 | 4.580 | 12.007 |
| Promedio | | |
| 5.193 kg | 4.563 kg | 12.129 % |

Nota. Elaboración propia.

$$Q_{cm} = mL \times C_0 (T_{max} - T_{min}) \quad (6)$$

Donde:

mL: Masa de los ladrillos; $(5.193 \frac{Kg}{lad.} \times 6\ 800\ lad.)$

C₀ = Calor específico del ladrillo; $(0.79 \frac{KJ}{Kg\ K})$ (Dato obtenido del anexo B)

T_{máx}: Temperatura de salida del material; $1\ 003^{\circ}C = 1\ 276.15K$

T_{min}: Temperatura de entrada de los materiales; $20^{\circ}C = 293.15K$

$$Q_{cm} = 5.193 \frac{Kg}{lad.} \times 6\ 800\ lad. \times 0.79 \frac{KJ}{Kg\ K} (1\ 276.15K - 293.15K)$$

$$Q_{cm} = 27\ 422\ 550.47\ KJ$$

5.3.1.4. Calor por humedad del carbón (Q_{wc})

Se refiere al calor necesario para la evaporación del contenido de agua que contiene el carbón, que en este caso y para finalidad del trabajo se está considerando un 9% de humedad.

Para el horno a cielo abierto

$$Q_{wc} = mC \times Yc (hg - Uc) \quad (21)$$

Donde:

mC: Masa del carbón; (20Kg)

Yc: Humedad del carbón; (9% = 0.09)

hg: Entalpía del vapor de agua; ($2\,677.7 \frac{KJ}{Kg}$) (dato obtenido por la extrapolación de datos del anexo C)

Um: Energía interna del agua dentro del material; ($83.919 \frac{KJ}{Kg}$) (Palacios Larotta & Gomez Sierra, 2020)

$$Q_{wc} = 20Kg \times 0.09 \left(2\,677.7 \frac{KJ}{Kg} - 83.919 \frac{KJ}{Kg} \right)$$

$$Q_{wc} = 4\,668.806 KJ$$

Para el horno paulista

$$Q_{wc} = mC \times Yc (hg - Uc) \quad (21)$$

Donde:

mC: Masa del carbón; (5Kg)

Yc: Humedad del carbón; (9% = 0.09)

hg: Entalpía del vapor de agua; ($2\,677.7 \frac{KJ}{Kg}$) (Dato obtenido por la extrapolación de datos del anexo C)

Um: Energía interna del agua dentro del material; ($83.919 \frac{KJ}{Kg}$) (Palacios Larotta & Gomez Sierra, 2020)

$$Q_{wc} = 5Kg \times 0.09 \left(2\,677.7 \frac{KJ}{Kg} - 83.919 \frac{KJ}{Kg} \right)$$

$$Q_{wc} = 1\,167.201 KJ$$

5.3.1.5. Calor por humedad de la leña y aserrín (Qwl)

Es el calor necesario para la evaporación del agua contenida en la leña y el aserrín, que en este caso y para finalidad del trabajo se está considerando un 20% de humedad.

Para el horno a cielo abierto

$$Q_{wl} = mL \times Yl (hg - Uc) \quad (22)$$

Donde:

mL: Masa de la leña y del aserrín; (5 200 Kg)

Yl: Humedad de la leña y del aserrín; (20% = 0.2)

hg: Entalpía del vapor de agua; ($2\,677.7 \frac{KJ}{Kg}$) (Dato obtenido por la extrapolación de datos del anexo C)

Um: Energía interna del agua dentro del material; ($83.919 \frac{KJ}{Kg}$) (Palacios Larotta & Gomez Sierra, 2020)

$$Q_{wl} = 5\,200\,Kg \times 0.2 \left(2\,677.7 \frac{KJ}{Kg} - 83.919 \frac{KJ}{Kg} \right)$$

$$Q_{wl} = 2\,697\,532.24\,KJ$$

Para el horno Paulista

$$Q_{wl} = mL \times Yl (hg - Uc) \quad (22)$$

Donde:

mL: Masa de la leña y aserrín; (10 525 Kg)

Yl: Humedad de la leña y aserrín; (20% = 0.2)

hg: Entalpía del vapor de agua; ($2\,677.7 \frac{KJ}{Kg}$) (Dato obtenido por la extrapolación de datos del anexo C)

Um: Energía interna del agua dentro del material; ($83.919 \frac{KJ}{Kg}$) (Palacios Larotta & Gomez Sierra, 2020)

$$Q_{wl} = 10\,525\,Kg \times 0.2 \left(2\,677.7 \frac{KJ}{Kg} - 83.919 \frac{KJ}{Kg} \right)$$

$$Q_{wl} = 5\,459\,909.005\,KJ$$

5.3.1.6. Calor por agua formada en la combustión a partir del carbón (Qacc)

Es el calor que absorbe el agua que se forma por la combustión del hidrogeno, por efectos de calentarse, evaporarse y sobrecalentar hasta la temperatura a la cual sale con los humos. (Palacios Larotta & Gomez Sierra, 2020)

Para el horno a cielo abierto

$$Q_{acc} = mc \times mac (hg - Ua) \quad (23)$$

Donde:

mac: masa del agua formada en la combustión; $\left(\frac{Kg H_2O}{Kg carbon}\right)$

mc: Masa del carbón durante la cocción; (20 Kg)

hg: Entalpía del vapor de agua; $\left(2\,677.7 \frac{KJ}{Kg}\right)$ (Dato obtenido por la extrapolación de datos del anexo C)

Ua: Energía interna del agua; $\left(83.919 \frac{KJ}{Kg}\right)$ (Palacios Larotta & Gomez Sierra, 2020)

Hallando mac:

$$mac = 9\left(H_2 - \frac{O_2}{8}\right) \quad (24)$$

Donde:

H₂: porcentaje de hidrogeno en el carbón: (5.1% = 0.051) (Palacios Larotta & Gomez Sierra, 2020)

O₂: porcentaje de oxígeno en el carbón: (6% = 0.06) (Palacios Larotta & Gomez Sierra, 2020)

$$mac = 9\left(0.051 - \frac{0.06}{8}\right)$$

$$mac = 0.3915 \frac{Kg H_2O}{Kg carbon}$$

Entonces:

$$Q_{acc} = 20 Kg \times 0.3915 \frac{Kg H_2O}{Kg carbon} \left(2\,677.7 \frac{KJ}{Kg} - 83.919 \frac{KJ}{Kg}\right)$$

$$Q_{ac} = 20\,309.305 KJ$$

Para el horno paulista

$$Q_{acc} = mc \times mac (hg - Ua) \quad (23)$$

Donde:

mac: masa del agua formada en la combustión; $\left(\frac{Kg H_2O}{Kg carbon}\right)$

mc: Masa del carbón durante la cocción; (5 Kg)

hg: Entalpía del vapor de agua; $(2\,677.7 \frac{KJ}{Kg})$ (Dato obtenido por la extrapolación de datos del anexo C)

Ua: Energía interna del agua; $(83.919 \frac{KJ}{Kg})$ (Palacios Larotta & Gomez Sierra, 2020)

$$Q_{acc} = 5\,Kg \times 0.3915 \frac{Kg\,H_2O}{Kg\,carbon} (2\,677.7 \frac{KJ}{Kg} - 83.919 \frac{KJ}{Kg})$$

$$Q_{acc} = 5\,077.326\,KJ$$

5.3.1.7. Calor por agua formada en la combustión a partir de la leña y aserrín (Qacl)

Para el horno a cielo abierto

$$Q_{acl} = mc \times mac (hg - Ua) \quad (23)$$

Donde:

mac: masa del agua formada en la combustión; $(\frac{Kg\,H_2O}{Kg\,leña})$

mc: Masa de la leña durante la cocción; $(5\,200\,Kg)$

hg: Entalpía del vapor de agua; $(2\,677.7 \frac{KJ}{Kg})$ (Dato obtenido por la extrapolación de datos del anexo C)

Ua: Energía interna del agua; $(83.919 \frac{KJ}{Kg})$ (Palacios Larotta & Gomez Sierra, 2020)

Hallando mac:

$$mac = 9(H_2 - \frac{O_2}{8}) \quad (24)$$

Donde:

H₂: porcentaje de hidrogeno en el carbón: $(4.696\% = 0.04696)$ (Arévalo & Cumbe, 2021)

O₂: porcentaje de oxígeno en el carbón: $(35.176\% = 0.35176)$ (Arévalo & Cumbe, 2021)

$$mac = 9(0.04696 - \frac{0.35176}{8})$$

$$mac = 0.02691 \frac{Kg\,H_2O}{Kg\,leña}$$

Entonces:

$$Q_{acl} = 5\,200\text{ Kg} \times 0.02691 \frac{\text{Kg } H_2O}{\text{Kg leña}} \left(2\,677.7 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} - 83.919 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \right)$$

$$Q_{acl} = 362\,952.963\text{ KJ}$$

Para el horno paulista

$$Q_{acl} = mc \times mac (hg - Ua) \quad (23)$$

Donde:

mac: masa del agua formada en la combustión; $\left(\frac{\text{Kg } H_2O}{\text{Kg leña}} \right)$

mc: Masa del carbón durante la cocción; (10 525 Kg)

hg: Entalpía del vapor de agua; $\left(2\,677.7 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \right)$ (Dato obtenido por la extrapolación de datos del anexo C)

Ua: Energía interna del agua; $\left(83.919 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \right)$ (Palacios Larotta & Gomez Sierra, 2020)

$$Q_{acl} = 10\,525\text{ Kg} \times 0.02691 \frac{\text{Kg } H_2O}{\text{Kg carbon}} \left(2\,677.7 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} - 83.919 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \right)$$

$$Q_{acl} = 734\,630.757\text{ KJ}$$

5.3.1.8. Calor por inquemados (cenizas) a partir del carbón (Qic)

Es el carbón que queda sin quemar en las cenizas, debido a la no uniformidad del tamaño de las partículas, a la mala distribución de este en la hornilla, por lo tanto, se presenta una combustión incompleta, (Palacios Larotta & Gomez Sierra, 2020)

Para el horno a cielo abierto

$$Q_{ic} = mc \times Ce \times Pf \times Pcq \quad (25)$$

Donde:

mc: masa del carbón; (20Kg)

Ce: cenizas residuales del carbón; (4.02% = 0.0402)

Pf: pérdida del fuego; (15.8% = 0.158) (Arévalo & Cumbe, 2021)

Pcq: poder calorífico del carbón; $\left(33\,793 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \right)$ (Palacios Larotta & Gomez Sierra, 2020)

$$Q_{ic} = 20 \text{ Kg} \times 0.0402 \times 0.158 \times 33\,793 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

$$Q_{ic} = 4\,292.792 \text{ KJ}$$

Para el horno Paulista

$$Q_{ic} = mc \times Ce \times Pf \times Pcq \quad (25)$$

Donde:

mc: masa del carbón; (5Kg)

Ce: cenizas residuales del carbón; (4.02% = 0.0402)

Pf: pérdida del fuego; (15.8% = 0.158) (Arévalo & Cumbe, 2021)

Pcq: poder calorífico del carbón; ($33\,793 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$) (Palacios Larotta & Gomez Sierra, 2020)

$$Q_{ic} = 5 \text{ Kg} \times 0.0402 \times 0.158 \times 33\,793 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

$$Q_{ic} = 1\,073.198 \text{ KJ}$$

5.3.1.9. Calor por inquemados (cenizas) a partir de la leña y aserrín (Qil)

Este calor está considerado como calor perdido ya que es generado por las cenizas que quedan a partir de la combustión de la leña y el aserrín.

Para el horno a cielo abierto

$$Q_{il} = mc \times Ce \times Pf \times Pcq \quad (26)$$

Donde:

mc: masa del leña; (5 200 Kg)

Ce: cenizas residuales del leña; (20% = 0.2)

Pf: pérdida del fuego; (15.8% = 0.158) (Arévalo & Cumbe, 2021)

Pcq: poder calorífico del carbón; ($21\,600 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$)

$$Q_{il} = 5\,200 \text{ Kg} \times 0.2 \times 0.158 \times 21\,600 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

$$Q_{il} = 3\,549\,312 \text{ KJ}$$

Para el horno paulista

$$Q_{il} = m_c \times C_e \times P_f \times P_{cq} \quad (26)$$

Donde:

m_c : masa del leña; (10 525 Kg)

C_e : cenizas residuales del leña; (20% = 0.2)

P_f : pérdida del fuego; (15.8% = 0.158) (Arévalo & Cumbe, 2021)

P_{cq} : poder calorífico del carbón; ($21\,600 \frac{KJ}{Kg}$)

$$Q_{il} = 10\,525\,Kg \times 0.2 \times 0.158 \times 21\,600 \frac{KJ}{Kg}$$

$$Q_{il} = 7\,183\,944\,KJ$$

5.3.1.10. Calor perdido por las paredes (Qp)

Hace referencia al calor desperdiciado por las paredes, hace referencia al calor perdido por conducción a través de las paredes que se da en todo el tiempo del proceso de quema de ladrillos. Esto se da por el fenómeno de pérdida de calor a través de la conducción.

Para el horno a cielo abierto

$$Q_p = U_{pa} \times \Delta T \times t \quad (7)$$

Donde:

U_{pa} : Coeficiente global de transferencia de calor en las paredes del horno.

ΔT : Variación de temperatura en las paredes externas del horno en un tiempo de una hora.
($55.5^\circ C - 53^\circ C$) = ($328.65K - 326.15K$)

t : Tiempo total del proceso de quema de los ladrillos. (20 horas = 72 000 segundos)

U_{pa} :

$$U_{pa} = \frac{1}{R} \quad (28)$$

Donde:

R : Resistencia térmica para una pared cilíndrica

R :

$$R = \frac{\ln\left(\frac{r_{exterior}}{r_{interior}}\right)}{2\pi KL} \quad (29)$$

Donde:

$r_{exterior}$: Radio exterior del horno. (4.44m)

$r_{interior}$: Radio interior del horno. (3m)

K: Conductividad térmica. $(0.72 \frac{W}{m K})$

L: Altura del horno.

Hallando R

$$R = \frac{\ln\left(\frac{4.44 \text{ m}}{3 \text{ m}}\right)}{2\pi \times 0.72 \frac{W}{m K} \times 5.85 \text{ m}}$$

$$R = 0.014813731 \frac{K}{W}$$

Hallando Upa

$$Upa = \frac{1}{0.014813731 \frac{K}{W}}$$

$$Upa = 67.50493849 \frac{W}{K}$$

Hallando el calor perdido por las paredes

$$Qp = 67.50493849 \frac{W}{K} \times (328.65K - 326.15K) \times 72\,000 \text{ s}$$

$$Qp = 12\,150\,888.93 \text{ W.s}$$

$$Qp = 12\,150\,888.93 \text{ KJ}$$

Hallando calor de las paredes de las puertas de carga y descarga

R: Resistencia térmica para una pared plana

$$R = \frac{L}{KA} \quad (30)$$

Donde:

L: espesor de las paredes del horno. (0.72m)

K: Conductividad térmica. $(0.72 \frac{W}{m K})$ (Dato obtenido del anexo B)

A: Área de la pared.

$$R = \frac{0.72m}{0.72 \frac{W}{m K} \times 2.2m^2}$$

$$R = 0.454545454 \frac{K}{W}$$

Hallando Upa

$$Upa = \frac{1}{0.454545454 \frac{K}{W}}$$

$$Upa = 2.2 \frac{W}{K}$$

Hallando el calor perdido por las dos puertas de carga y descarga

$$Qp = 2(2.2 \frac{W}{K} \times (328.65K - 326.15K) \times 72\,000\,s)$$

$$Qp = 792\,000\,W.s$$

$$Qp = 792\,000\,KJ$$

Hallando calor de la puerta donde inicia la combustión

R: Resistencia térmica para una pared plana

$$R = \frac{L}{K A} \quad (30)$$

Donde:

L: espesor de las paredes del horno. (0.72m)

K: Conductividad térmica. ($0.72 \frac{W}{m K}$) (Dato obtenido del anexo B)

A: Área de la pared.

$$A = (0.50m \times 0.70m) + \left(\frac{\pi}{2} \times 0.35m \times 0.20m\right)$$

$$A = 0.459955742m^2$$

Entonces:

$$R = \frac{0.72m}{0.72 \frac{W}{m K} \times 0.459955742m^2}$$

$$R = 2.174122222 \frac{K}{W}$$

Hallando Upa

$$Upa = \frac{1}{2.174122222 \frac{K}{W}}$$

$$Upa = 0.459955742 \frac{W}{K}$$

Hallando el calor perdido por la puerta donde inicia la combustión

$$Qpa = 0.459955742 \frac{W}{K} \times (328.65K - 326.15K) \times 72\,000\,s$$

$$Qp = 82\,792.034\,W.s$$

$$Qp = 82\,792.034\,KJ$$

Entonces el calor perdido por paredes descontando el calor perdido por las puertas seria:

$$Qpa = 12\,150\,888.93\,KJ - (792\,000\,KJ + 82\,792.034\,KJ)$$

$$Qp = 11\,276\,096.9KJ$$

Para el horno paulista

Calor perdido en la pared del techo donde inicia la combustión de combustible

$$Qp = Upa \times \Delta T \times t \quad (7)$$

Donde:

Upa: Coeficiente global de transferencia de calor en las paredes del horno.

ΔT : Variación de temperatura en las paredes externas del horno en un tiempo de una hora.
(79°C – 78°C) = (352.15K – 351.15K)

t: Tiempo total del proceso de quema de los ladrillos. (32 horas = 115 200 segundos)

$$R = \frac{L}{KA} \quad (30)$$

Donde:

L: espesor de las paredes del horno. (0.20m)

K: Conductividad térmica. ($0.72 \frac{W}{mK}$) (Dato obtenido del anexo B)

A: Área de la pared.

$$A = (12m \times 0.95m)$$

$$A = 11.4m^2$$

Entonces:

$$R = \frac{0.20m}{0.72 \frac{W}{m K} \times 11.4m^2}$$

$$R = 0.024366471 \frac{K}{W}$$

Hallando Upa

$$Upa = \frac{1}{0.024366471 \frac{K}{W}}$$

$$Upa = 41.04000124 \frac{W}{K}$$

Hallando el calor perdido

$$Qp = 41.04000124 \frac{W}{K} \times (352.15K - 351.15K) \times 115\,200\,s$$

$$Qp = 4\,727\,808.143\,W.s$$

$$Qp = 4\,727\,808.143\,KJ$$

Calor perdido en las paredes donde inicia la combustión de combustible

$$Qp = Upa \times \Delta T \times t \quad (7)$$

Donde:

Upa: Coeficiente global de transferencia de calor en las paredes del horno.

ΔT : Variación de temperatura en las paredes externas del horno en un tiempo de una hora.

$$(72^\circ C - 70.5^\circ C) = (345.15K - 343.65K)$$

t: Tiempo total del proceso de quema de los ladrillos. (32 horas = 115 200 segundos)

$$R = \frac{L}{KA} \quad (30)$$

Donde:

L: espesor de las paredes del horno. (0.50m)

K: Conductividad térmica. $(0.72 \frac{W}{m K})$ (Dato obtenido del anexo B)

A: Área de la pared.

$$A = (2m \times 0.95m)$$

$$A = 1.9m^2$$

Entonces:

$$R = \frac{0.50m}{0.72 \frac{W}{m K} \times 1.9m^2}$$

$$R = 0.365497076 \frac{K}{W}$$

Hallando Upa

$$Upa = \frac{1}{0.365497076 \frac{K}{W}}$$

$$Upa = 2.736 \frac{W}{K}$$

Hallando el calor perdido

$$Qp = 2 (2.736 \frac{W}{K} \times (345.15K - 343.65K) \times 115\,200\,s)$$

$$Qp = 945\,561.6\,W \cdot s$$

$$Qp = 945\,561.6KJ$$

Calor perdido en las paredes donde cocen los ladrillos

Pared 1

$$Qp = Upa \times \Delta T \times t \quad (7)$$

Donde:

Upa: Coeficiente global de transferencia de calor en las paredes del horno.

ΔT : Variación de temperatura en las paredes externas del horno en un tiempo de una hora.
 $(56^\circ C - 55^\circ C) = (329.15K - 328.15K)$

t: Tiempo total del proceso de quema de los ladrillos. (32 horas = 115 200 segundos)

$$R = \frac{L}{KA} \quad (30)$$

Donde:

L: espesor de las paredes del horno. (0.85m)

K: Conductividad térmica. ($0.72 \frac{W}{mK}$)

A: Área de la pared.

$$A = (13m \times 0.90m)$$

$$A = 11.7m^2$$

Entonces:

$$R = \frac{0.85m}{0.72 \frac{W}{mK} \times 11.7m^2}$$

$$R = 0.100902184 \frac{K}{W}$$

Hallando Upa

$$Upa = \frac{1}{0.100902184 \frac{K}{W}}$$

$$Upa = 9.910588258 \frac{W}{K}$$

Hallando el calor perdido

$$Qp = 9.910588258 \frac{W}{K} \times (329.15K - 328.15K) \times 115\,200\,s$$

$$Qp = 1\,141\,699.767\,W.s$$

$$Qp = 1\,141\,699.767\,KJ$$

Pared 2

$$Qp = Upa \times \Delta T \times t \quad (7)$$

Donde:

Upa: Coeficiente global de transferencia de calor en las paredes del horno.

ΔT : Variación de temperatura en las paredes externas del horno en un tiempo de una hora.
($56^\circ C - 55^\circ C$) = (329.15K - 328.15K)

t: Tiempo total del proceso de quema de los ladrillos. (32 horas = 115 200 segundos)

$$R = \frac{L}{KA} \quad (30)$$

Donde:

L: espesor de las paredes del horno. (0.85m)

K: Conductividad térmica. ($0.72 \frac{W}{mK}$) (Dato obtenido del anexo B)

A: Área de la pared.

$$A = (13m \times 2.90m) - (5(0.50m \times 0.50m))$$

$$A = 36.45m^2$$

Entonces:

$$R = \frac{0.85m}{0.72 \frac{W}{mK} \times 36.45m^2}$$

$$R = 0.032388355 \frac{K}{W}$$

Hallando Upa

$$Upa = \frac{1}{0.032388355 \frac{K}{W}}$$

$$Upa = 30.87529453 \frac{W}{K}$$

Hallando el calor perdido

$$Qp = 30.87529453 \frac{W}{K} \times (329.15K - 328.15K) \times 115\,200\,s$$

$$Qp = 3\,556\,833.93\,W.s$$

$$Qp = 3\,556\,833.93\,KJ$$

Calor perdido en las paredes de las puertas de carga y descarga

$$Qp = Upa \times \Delta T \times t \quad (7)$$

Donde:

Upa: Coeficiente global de transferencia de calor en las paredes del horno.

ΔT : Variación de temperatura en las paredes externas del horno en un tiempo de una hora.
 $(85^\circ C - 83^\circ C) = (358.15K - 356.15K)$

t: Tiempo total del proceso de quema de los ladrillos. (32 horas = 115 200 segundos)

$$R = \frac{L}{KA} \quad (30)$$

Donde:

L: espesor de las paredes del horno. (0.115m)

K: Conductividad térmica. ($0.72 \frac{W}{mK}$) (Dato obtenido del anexo B)

A: Área de la pared.

$$A = (2.90m \times 2.20m) + \left(\frac{\pi}{2} \times 1.10m \times 0.10m\right)$$

$$A = 6.552787596m^2$$

Entonces:

$$R = \frac{0.115m}{0.72 \frac{W}{mK} \times 6.552787596m^2}$$

$$R = 0.024374698 \frac{K}{W}$$

Hallando Upa

$$Upa = \frac{1}{0.024374698 \frac{K}{W}}$$

$$Upa = 41.02614933 \frac{W}{K}$$

Hallando el calor perdido

$$Qp = 2(41.02614933 \frac{W}{K} \times (358.15K - 356.15K) \times 115\,200\,s)$$

$$Qp = 18\,904\,849.61\,W.s$$

$$Qp = 18\,904\,849.61\,KJ$$

Calor perdido por el techo

$$Qp = Upa \times \Delta T \times t \quad (7)$$

Donde:

Upa: Coeficiente global de transferencia de calor en las paredes del horno.

ΔT : Variación de temperatura en las paredes externas del horno en un tiempo de una hora.
 $(79^{\circ}\text{C} - 78^{\circ}\text{C}) = (352.15\text{K} - 351.15\text{K})$

t: Tiempo total del proceso de quema de los ladrillos. (32 horas = 115 200 segundos)

$$R = \frac{L}{KA} \quad (30)$$

Donde:

L: espesor de las paredes del horno. (0.40m)

K: Conductividad térmica. $(0.72 \frac{W}{mK})$ (Dato obtenido del anexo B)

A: Área de la pared.

Hallando la longitud de techo

$$L = \frac{\pi}{2} (3(A + B) - \sqrt{(3A + B) \times (A + 3B)}) \quad (31)$$

Donde:

A = 1.95m y B = 0.50m

$$L = \frac{\pi}{2} (3(1.95m + 0.50m) - \sqrt{(3(1.95m) + 0.50m) \times (1.95m + 3(0.50m))})$$

$$L = 4.19317036 \text{ m}$$

$$A = 4.19317036m \times 13m$$

$$A = 54.51121468m^2$$

Entonces:

$$R = \frac{0.40 \text{ m}}{0.72 \frac{W}{mK} \times 54.51121468 \text{ m}^2}$$

$$R = 0.010191582 \frac{K}{W}$$

Hallando Upa

$$Upa = \frac{1}{0.010191582 \frac{K}{W}}$$

$$Upa = 98.1201937 \frac{W}{K}$$

Hallando el calor perdido por el techo

$$Qp = 98.1201937 \frac{W}{K} \times (352.15K - 351.15K) \times 115\,200\,s$$

$$Qp = 11\,303\,446.31\,W.s$$

$$Qp = 11\,303\,446.31\,KJ$$

Hallando el calor perdido por las paredes

$$Qp = 4\,727\,808.143\,KJ + 945\,561.6KJ + 1\,141\,699.767\,KJ + 3\,556\,833.93\,KJ \\ + 18\,904\,849.61\,KJ$$

$$Qp = 29\,276\,753.05\,KJ$$

5.3.1.11. Calor por humos (Qh)

Es el calor perdido por la producción de humos. Esta pérdida de calor se da a través de la convección.

Para el horno a cielo abierto

$$Qh = Pg \times Cg \times \Delta T \quad (8)$$

Donde:

Pg: Peso de los gases producidos; (Kg)

Cg : calor específico de los gases de escape; $\left(0.23241 \frac{KJ}{Kg K}\right)$ (Arévalo & Cumbe, 2021)

ΔT : Diferencia de temperatura entre los gases de escape y el medio ambiente; $(84^\circ C - 20^\circ C) = (357,15K - 293,15K)$

Hallando Pg

$$Pg = mc \times Pg_{teorico} \quad (32)$$

mc: Masa total del combustible; (5 220 Kg combustible)

$Pg_{teorico}$: Peso de los gases producidos; $\left(19,04 \frac{Kg\,humos}{Kg\,combustible}\right)$ (Arévalo & Cumbe, 2021)

$$Pg = 5\,220\,Kg\,combustible \times 19,04 \frac{Kg\,humos}{Kg\,combustible}$$

$$Pg = 99\,388,8 \text{ Kg humos}$$

Entonces:

$$Qh = 99\,388,8 \text{ Kg humos} \times 0,23241 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg K}} (357,15\text{K} - 293,15\text{K})$$

$$Qh = 1\,478\,332,865 \text{ KJ}$$

Para el horno paulista

$$Qh = Pg \times Cg \times \Delta T \quad (8)$$

Donde:

Pg: Peso de los gases producidos; (Kg)

Cg : calor específico de los gases de escape; $\left(0,23241 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg K}}\right)$ (Arévalo & Cumbe, 2021)

ΔT : Diferencia de temperatura entre los gases de escape y el medio ambiente; $(57^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) = (330,15\text{K} - 293,15\text{K})$

Hallando Pg

$$Pg = mc \times Pg_{teorico} \quad (32)$$

mc: Masa total del combustible; (10 530 Kg combustible)

$Pg_{teorico}$: Peso de los gases producidos; $\left(19,04 \frac{\text{Kg humos}}{\text{Kg combustible}}\right)$ (Arévalo & Cumbe, 2021)

$$Pg = 10\,530 \text{ Kg combustible} \times 19,04 \frac{\text{Kg humos}}{\text{Kg combustible}}$$

$$Pg = 200\,491,2 \text{ Kg humos}$$

Entonces:

$$Qh = 200\,491,2 \text{ Kg humos} \times 0,23241 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg K}} (330,15\text{K} - 293,15\text{K})$$

$$Qh = 1\,724\,057,912 \text{ KJ}$$

5.3.1.12. Pérdidas intangibles (Qin)

Es la energía pérdida por fenómenos que presentan dificultades para determinarse como puede ser: hidrógeno, hidrocarburos en los humos negros y la radiación hacia el exterior de las hornillas, esta pérdida se determina como la diferencia entre la energía

disponible por el combustible y la sumatoria de los calores calculados anteriormente, (Palacios Larotta & Gomez Sierra, 2020)

Para el horno a cielo abierto

$$Q_{in} = Q_t - \sum Q \quad (9)$$

$$Q_{in} = 112\,995\,860\text{ KJ} - 92\,031\,575.87\text{KJ}$$

$$Q_{in} = 20\,964\,284.13\text{KJ}$$

Para el horno paulista

$$Q_{in} = Q_t - \sum Q \quad (9)$$

$$Q_{in} = 227\,508\,965\text{ KJ} - 199\,359\,215.4\text{KJ}$$

$$Q_{in} = 28\,149\,749.57\text{ KJ}$$

TABLA 11.

Balance de energía del horno a cielo abierto.

| Flujo de energía | Horno a cielo abierto | |
|--|-----------------------|----------------|
| | Calor (KJ) | Porcentaje (%) |
| Calor acumulado en la mampostería | 58 525 960.4 | 51.79 |
| Calor por carga del material | 14 112 117.6 | 12.48 |
| Calor por humedad del carbón | 4 668.81 | 0.01 |
| Calor por humedad de la leña y aserrín | 2 697 532.24 | 2.38 |
| Calor por agua formada en la combustión a partir del carbón | 20 309.31 | 0.01 |
| Calor por agua formada en la combustión a partir de la leña y el aserrín | 362 952.96 | 0.32 |
| Calor por inquemados a partir del carbón | 4 292.79 | 0.05 |
| Calor por inquemados a partir de la leña y el aserrín | 3 549 312 | 3.14 |
| Calor perdido por las paredes | 11 276 096.9 | 9.97 |
| Calor por humos | 1 478 332.87 | 1.30 |
| Perdidas intangibles | 20 964 284.13 | 18.55 |
| TOTAL (calor aportado al horno) | 112 995 860 | 100 |

Nota. Elaboración propia.

TABLA 12.*Balance de energía del horno paulista.*

| Flujo de energía | Horno paulista | |
|--|--------------------|----------------|
| | Calor (KJ) | Porcentaje (%) |
| Calor acumulado en la mampostería | 116 246 606.2 | 51.09 |
| Calor por carga del material | 27 422 550.47 | 12.05 |
| Calor por humedad del carbón | 1 167.20 | 0.01 |
| Calor por humedad de la leña y aserrín | 5 459 909.01 | 2.39 |
| Calor por agua formada en la combustión a partir del carbón | 5 077.33 | 0.01 |
| Calor por agua formada en la combustión a partir de la leña y el aserrín | 734 630.76 | 0.32 |
| Calor por inquemados a partir del carbón | 1 073.19 | 0.04 |
| Calor por inquemados a partir de la leña y el aserrín | 7 183 94 | 3.15 |
| Calor perdido por las paredes | 29 276 753.05 | 12.86 |
| Calor perdido por el techo | 11 303 446.31 | 4.96 |
| Calor por humos | 1 724 057.91 | 0.75 |
| Perdidas intangibles | 28 149 749.57 | 12.37 |
| TOTAL (calor aportado al horno) | 227 508 965 | 100 |

Nota. Elaboración propia.

Las tablas 10 y 11 muestran un resumen de todos los resultados de calores obtenidos, como también el porcentaje que representan cada uno de estos respecto al total.

5.3.1.13. Eficiencia termodinámica de los hornos (n)

Para el horno a cielo abierto

$$n = \frac{Q_{cm} + (10\%Q_{cm})}{Q_t} \times 100\% \quad (10)$$

$$n = \frac{14\ 112\ 117.6\text{KJ} + (10\%(14\ 112\ 117.6\text{KJ}))}{112\ 995\ 860\ \text{KJ}} \times 100\%$$

$$n = 13.74\%$$

Para el horno paulista

$$n = \frac{Q_{cm}}{Q_t} \times 100\% \quad (10)$$

$$n = \frac{27\,422\,550.47\text{KJ} + (10\%(27\,422\,550.47\text{KJ}))}{227\,508\,965\text{KJ}} \times 100\%$$

$$n = 13.26\%$$

5.3.1.14. Calor por ladrillo.

Calor aportado por ladrillo

Para el horno a cielo abierto

$$Q = \frac{Q_{cm} + Q_m}{\text{cantidad de ladrillos}} \quad (33)$$

$$Q = \frac{112\,995\,860\text{KJ}}{3\,500\text{ ladrillos}}$$

$$Q = 32\,284.531 \frac{\text{KJ}}{\text{ladrillos}}$$

Para el horno paulista

$$Q = \frac{Q_t}{\text{cantidad de ladrillos}} \quad (33)$$

$$Q = \frac{227\,508\,965\text{KJ}}{6\,800\text{ ladrillos}}$$

$$Q = 33\,457.201 \frac{\text{KJ}}{\text{ladrillos}}$$

Calor requerido por ladrillo

Para el horno a cielo abierto

$$Q = \frac{Q_{cm}}{\text{cantidad de ladrillos}} \quad (34)$$

$$Q = \frac{14\,112\,117.6\text{KJ}}{3\,500\text{ ladrillos}}$$

$$Q = 4\,032.034 \frac{\text{KJ}}{\text{ladrillos}}$$

Para el horno paulista

$$Q = \frac{Q_{cm}}{\text{cantidad de ladrillos}} \quad (34)$$

$$Q = \frac{27\,422\,550.47\text{KJ}}{6\,800\text{ ladrillos}}$$

$$Q = 4\,032.728 \frac{KJ}{\text{ladrillos}}$$

Con los resultados mostrados en las tablas 10 y 11 donde se muestra los resultados obtenidos de los diferentes tipos de calores se puede apreciar de que el horno a cielo abierto llega a contener un total de calor de 112 995 860 KJ por quema, este horno puede acumular en su mampostería un total de 58 525 960.4 KJ que equivale a 51.795% del calor total, y en caso del horno paulista llega a contener un total de 227 508 965 KJ por quema, de cual llega a acumular en su mampostería un total de 116 246 606.2 KJ que equivale a un 51.095% del calor total, lo que sugiere que ambos hornos tienen casi la misma capacidad de acumulación de calor en sus mamposterías, por lo que la diferencia de la eficiencia en la mantención de calor en la mampostería de ambos hornos es mínima.

En cuanto a la pérdida de calor a través de las paredes se obtuvieron los siguientes datos, respecto al horno a cielo abierto se tiene una pérdida de 11 276 096.9 KJ que equivale a un 9.979% del total de calor aportado y en cuanto al horno paulista se tiene 29 276 753.05 que equivale al 12.896% del total de calor aportado, lo que quiere decir, que el horno paulista proporciona una mayor pérdida de calor a través de las paredes respecto al horno a cielo abierto, pese a que el horno a cielo abierto realiza el proceso de cocción con las puertas de carga y descarga totalmente abiertas.

Por otro lado, el horno a cielo abierto arrojó como resultado una eficiencia de 13.74% y el horno paulista una eficiencia de 13.26%, siendo ligeramente más eficiente el horno a cielo abierto. También se calculó el calor consumido por ladrillo respecto al calor total suministrado por quema y se obtuvo los siguientes datos, el horno a cielo abierto consumió un total de 32 284,531KJ para la cocción de un ladrillo y el horno paulista se consumió 33 457.201KJ para la cocción de un ladrillo, y lo que se puede apreciar es que hay una diferencia

y por ello podemos decir que el horno paulista necesita un poco más de calor para poder realizar la cocción de un ladrillo, respecto al horno a cielo abierto.

Cabe recalcar también, que se debe tomar en cuenta que el horno paulista tiene aproximadamente el doble de capacidad respecto al horno a cielo abierto, por el detalle de que este horno tiene una forma cilíndrica por lo que la disposición de ladrillos dentro de este horno ocasiona ciertas pérdidas de espacio, cosa que no pasa en el horno paulista ya que el espacio de este horno es aprovechado al máximo por su forma rectangular.

En la tabla 13 se muestra la comparación de ambos hornos.

TABLA 13.

Comparación de los calores resultantes, en función a calores de aporte y calores de consumo y pérdidas de calor.

| | Horno a cielo abierto | Horno paulista |
|---|------------------------------|-----------------------|
| Calor aportado al horno | +112 995 860 | +227 508 965 |
| Calor acumulado en la manpostería | - 58 525 960.4 | - 116 246 606.2 |
| Calor por carga del material | - 14 112 117.6 | - 27 422 550.47 |
| Calor por humedad del carbón | - 4 668.81 | - 1 167.20 |
| Calor por humedad de la leña y el aserrín | - 2 697 532.24 | - 5 459 909.01 |
| Calor por agua formada en la combustión a partir del carbón | - 20 309.31 | - 5 077.32 |
| Calor por agua formada en la combustión a partir de la leña y el aserrín | - 362 952.96 | - 734 630.76 |
| Calor por inquemados (cenizas) a partir del carbón | - 4 292.79 | - 1 073.19 |
| Calor por inquemados (cenizas) a partir de la leña y el aserrín | - 3 549 312 | - 7 183 944 |
| Calor perdido por las paredes | - 11 276 096.9 | - 29 276 753.05 |
| Calor perdido por el techo | 0 | - 11 303 446.31 |
| Calor por humos | - 1 478 332.87 | - 1 724 075.91 |
| Perdidas intangibles | - 20 964 248.13 | - 28 149 749.57 |

Nota. Elaboración propia.

5.4. Representación numérica del proceso de cocción y quemado de ladrillos de la configuración de ambos horno

Figura 15

Resultados de la representación numérica del horno a cielo abierto

| DATOS - CIELO ABIERTO | |
|--|--|
| Densidad volumétrica | $p := 1896.825$ |
| Volumen de pared | $V_{pa} := 45.725$ |
| Volumen de piso | $V_{pis} := 2.168$ |
| temperatura media de la pared | $Tm_{pa} := 810.985$ |
| temperatura media piso | $Tm_{pi} := 910.65$ |
| Temperatura de salida del material | $T_{max} := 1273.15$ |
| Temperatura de entrada de los materiales | $T_{min} := 293.15$ |
| Calor específico del ladrillo | $C_o := 0.79$ |
| peso por unidad de ladrillo | $Peso_{ladrillo} := 5.208$ |
| Cantidad de ladrillo | $Cant_{ladrillo} := 3500$ |
| Poder calorífico de leña | $Pc_{leña.aserrin} := 21600$ |
| Poder calorífico de carbón | $Pc_{carbon} := 33793$ |
| masa de leña | $m_{leña} := 4800$ |
| masa de carbón | $m_{carbon} := 20$ |
| masa de aserrín | $m_{aserrin} := 400$ |
| CALOR TOTAL | |
| | $m_{leña.aserrin} := m_{leña} + m_{aserrin}$ |
| | $Q_t := (Pc_{leña.aserrin} \cdot m_{leña.aserrin}) + (Pc_{carbon} \cdot m_{carbon}) = 112995860$ |
| CALOR POR CARGA DE MATERIAL | |
| | $mL := Cant_{ladrillo} \cdot Peso_{ladrillo}$ |
| | $Q_{cm} := mL \cdot C_o \cdot (T_{max} - T_{min}) = 14112117.6$ |
| PORCENTAJE DE EFICIENCIA TERMICA | |
| | $P_{Eficiencia_Termica} := \frac{Q_{cm+10\%}}{Q_t} = 0.13$ |

Nota. Elaboración propia haciendo uso del programa PTC MATHCAD PRIME

Figura 16

Resultados de la representación numérica del horno paulista

| DATOS - PAULISTA | |
|--|------------------------------|
| Densidad volumétrica | $p := 1896.825$ |
| Volumen de pared | $V_{pa} := 67.652$ |
| Volumen de piso | $V_{pis} := 8.827$ |
| Volumen de techo | $V_{tech} := 17.663$ |
| temperatura media de la pared | $Tm_{pa} := 828.815$ |
| temperatura media piso | $Tm_{pi} := 873.15$ |
| temperatura media techo | $Tm_{tech} := 781.15$ |
| Temperatura de salida del material | $T_{max} := 1276.15$ |
| Temperatura de entrada de los materiales | $T_{min} := 293.15$ |
| Calor específico del ladrillo | $C_o := 0.79$ |
| peso por unidad de ladrillo | $Peso_{ladrillo} := 5.193$ |
| Cantidad de ladrillo | $Cant_{ladrillo} := 6800$ |
| Poder calorífico de leña | $Pc_{leña.aserrin} := 21600$ |
| Poder calorífico de carbón | $Pc_{carbon} := 33793$ |
| masa de leña | $m_{leña} := 10500$ |
| masa de carbón | $m_{carbon} := 5$ |
| masa de aserrín | $m_{aserrin} := 25$ |
| CALOR TOTAL | |
| $m_{leña.aserrin} := m_{leña} + m_{aserrin}$ | |
| $Q_t := (Pc_{leña.aserrin} \cdot m_{leña.aserrin}) + (Pc_{carbon} \cdot m_{carbon}) = 227508965$ | |
| CALOR POR CARGA DE MATERIAL | |
| $mL := Cant_{ladrillo} \cdot Peso_{ladrillo}$ | |
| $Q_{cm} := mL \cdot C_o \cdot (T_{max} - T_{min}) = 27422550.47$ | |
| PORCENTAJE DE EFICIENCIA TERMICA | |
| $P_{Eficiencia_Termica} := \frac{Q_{cm+10\%}}{Q_t} = 0.13$ | |

Nota. Elaboración propia haciendo uso del programa PTC MATHCAD PRIME

5.5. Discusión de resultados con respecto a los antecedentes

Con relación al proyecto de (Llanos, 2018), para la Universidad Alas Peruanas en Cajamarca, Perú señala que los productores son afectados por pérdidas económicas que han llegado alcanzar hasta el 69,23% de la inversión, sumado a la pérdida de ladrillos de aproximadamente 5000 unidades por cada proceso de cocción. Concluye que la aplicación de las especificaciones de diseño indicadas en el estudio contribuirá a la mejora en la eficiencia de los hornos, el rendimiento y la competitividad de la empresa. Esto indica que el cumplimiento de las especificaciones del fabricante es de vital importancia para garantizar un proceso eficiente de cocción para el caso del horno Paulista de la empresa de Ladrillos CAMALA

Así mismo del trabajo de (Rivera, 2021) para la Universidad César Vallejo de la ciudad de Trujillo Perú, trabajo en el mejoramiento de la eficiencia Térmica de un Horno Artesanal de Ladrillo de una Microempresa del Distrito de Florencia de Mora, Provincia de Trujillo, obtuvo en el diagnóstico que se presenta un exceso de consumo del combustible actual de 5.38 toneladas por cada lote de 35 millares de ladrillos, con una eficiencia muy baja del 60% y en el balance de energía obtuvo una eficiencia del 81,5%. Luego de aplicar pruebas concluye destaca indicadores financieros favorables a la implementación del diseño planteado, con una inversión de S/. 30435.10, un VAN de S/. 67083.31 y un TIR de 201.01% para un periodo de recuperación de la inversión de 1 año. Con base a este antecedente, se demuestra que es factible aplicar un balance de energía para verificar los valores de calor en diferentes puntos del proceso que se traducen como pérdidas de energía, datos importante para la toma de decisiones que permitan seleccionar en un futuro la tecnología más importante para la empresa.

En relación al trabajo realizado por (Ramos, 2019) relacionado al diseño “Cálculo de Horno Continuo de Cámaras Múltiples en Fábrica de Ladrillos Cerámicos Sol del Norte”, de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, de la ciudad de Lambayeque Perú, para ello el autor utilizó como criterios el combustibles orgánicos, la seguridad en las operaciones, el aumento en la capacidad de producción y el aumento en la rentabilidad de la empresa. Proponiendo de esta manera nuevos parámetros en el diseño de un nuevo horno continuo de cámaras múltiples para garantizar mayor rentabilidad y disminución en la afectación por contaminación del medio ambiente y de la población cercana, en este sentido, se evidencia que dichos resultados tienen relación con el presente estudio en cuanto a la definición de los parámetros como el combustible utilizado, los valores de temperatura y considerar, además, la minimización de la contaminación ambiental con la elección del horno más moderno de tipo Paulista.

Seguidamente, el trabajo elaborado por (Guerrero M. , 2020), para la Universidad Católica del Perú con la finalidad de analizar el proceso de producción del ladrillo tipo pandereta para reducir las pérdidas económicas generadas por las mermas en el proceso de producción, para ello el autor realizó en una primera fase el diagnóstico identificando las causas que producen las pérdidas, concluyendo que los defectos en los ladrillos finales son generados por la falta de instrumentos de medición y control de temperatura y de tiempos. Concluye que la implementación del uso de termo-cuplas y disminución del tiempo de cocción logra un incremento de la eficiencia del 77% al 85%, un aumento en la producción de 4,437 lote/mes a 5,76 lote/mes, de igual manera, diseña los formularios para llevar los registros de control para las etapas de cocción y secado. Los resultados de este trabajo indican que es importante aplicar los controles de tiempo y temperatura, usando termo-cuplas debidamente ubicadas en el equipo, la toma de registros para garantizar los parámetros

adecuados del proceso y la calidad del producto final, así como también, aumentar la rentabilidad de la empresa en el presente estudio.

CAPITULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

Una vez completada las etapas para el logro de cada uno de los objetivos y dando respuestas a las interrogantes planteadas en el presente trabajo de investigación se tienen las siguientes conclusiones:

1. Se logró realizar la comparación termodinámica de los procesos de cocción de los hornos a cielo abierto y Paulista en la producción de ladrillos, con los datos obtenidos de los parámetros actuales de operación, obteniendo así que, el horno a cielo abierto recibe una energía calorífica total de 112 995 860 KJ por parte de los combustibles utilizados durante la cocción, de este total de calor el 51.79% se acumula en la manpostería del horno y un 12.48% es el calor utilizado para la carga del material, haciendo que el calor aprovechable solo sea el 64.28% del total de calor aportado a este horno.

Por otro lado, al horno paulista se le suministra una energía calorífica total de 227 508 965KJ, del cual un 51.09% es acumulado en la manpostería del horno y un 12.05% es el calor requerido para la carga por material, haciendo que el calor aprovechable sea de 63.15% del total del calor suministrado a este horno.

2. Durante el diagnóstico realizado se logró determinar las condiciones de operación de los dos hornos, a cielo abierto y Paulista pertenecientes a la empresa ladrillos Camala E.I.R.L., se evidenció la falta de control con instrumentos de las temperaturas

generadas durante el proceso de cocción, así como, del aire y de la cantidad de combustible (que en el horno a cielo abierto es de 4 800 kg de leña, 400 kg de aserrín y 20 kg de carbón y en el caso del horno paulista es de 10 500kg de leña 25 kg de aserrín y 5kg de carbón)lo que puede variar en la dosificación para cada cocción, todo esto sin el debido registro para cada procesos de cocción, lo que trae como consecuencia que la empresa no pueda detectar que tan eficiente es su producción de ladrillos, y que impacto tiene esto en su rentabilidad.

En el horno a cielo abierto se destina un tiempo de precalentamiento de 10 horas y un promedio de 10 horas para la cocción de aproximadamente de 3 500 ladrillos usando un aproximado de 5 220 Kg de combustible (entre leña, aserrín y carbón). Con respecto al horno Paulista, producen un promedio de 6 800 ladrillos para ello se invierte 12 horas de precalentamiento y 20 horas de cocción, haciendo uso de 10 530 Kg de combustible (entre leña, aserrín y carbón). Por los resultados obtenidos, se evidencia pérdidas de calor en ambos hornos, por ende se tendrá pérdidas en la producción y se cuenta con una baja eficiencia en ambos hornos que podría ser mejorada. También se evidencio que gran parte de la producción presenta problemas de calidad en la producción ya sea quemaduras, falta de cocción e incluso pequeñas fisuras, sumado a un mal manejo de los residuos generados tales como cenizas y ladrillos rotos que puedan servir para ser usadas como reciclaje o materia prima para otras industrias

3. Después de realizarse los cálculos de los distintos flujos de energía que se dan en el proceso de cocción de los hornos se tiene los siguientes resultados, para el horno a cielo abierto se cuenta con un calor útil de 72 638 078 KJ del cual el calor acumulado en la manposteria es de 58 525 960.4 KJ que equivale al 51.795% del calor total y un

total de 40 357 782 KJ de calor perdido (ya sea por humos, por humedad, por inquemados y pérdidas intagibles). En cuanto al horno paulista se tiene un calor útil de 143 669 156.7 KJ del cual 116 246 606.2 KJ representa el calor acumulado en la manposteria que en porcentaje es 51.095% y una pérdida de calor de 83 839 808.33 KJ (ya sea por humos, por humedad, por inquemados y pérdidas intagibles). Realizando una comparación respecto al calor acumulado en la manposteria, se dedujo que el horno a cielo abierto tiene una ligera ventaja en almacenamiento de calor respecto al horno paulista, lo que garantiza una ligera mejor cocción de los ladrillos, pese a que el horno paulista es un horno de tipo encapsulado y el horno a cielo abierto no lo es.

Dichos aspectos mencionados también interfieren en la eficiencia del horno, datos que se discutirán más adelante.

4. En cuanto al rendimiento energético o eficiencia termodinámica, se tuvo resultados similares con cierta ventaja para el lado del horno a cielo abierto, podrá haber cierta similitud pero no son resultados buenos para la empresa.

El horno a cielo abierto da como resultado una eficiencia de 13.74% y el horno paulista da 13.26% de eficiencia, la diferencia podría verse como una diferencia mínima pero en producción esa mínima desigualdad podría marcar la diferencia entre una mejor cocción, o una mejor acumulación de calor en la manposteria.

Esta ligera diferencia en la eficiencia de ambos hornos se ve plasmado en otros resultados tales como, el calor útil, el calor necesario por ladrillo y el calor brindado por ladrillo.

Respecto a la representación numérica se utilizó el programa PTC MATHCAD PRIME, que es un software matemático utilizado en ingeniería, para esta representación numérica se tomó en cuenta los valores de calor por carga de material y el calor total suministrado a cada tipo de horno.

- El calor total donde se tiene variables como el peso del combustible y el poder calorífico de estos mismos.
- El calor por carga de material que depende de la cantidad de ladrillos y de la temperatura en que se llegará a realizar la cocción de ladrillos y también está presente el dato de calor específico.

El resultado de esta representación numérica nos da en porcentaje de eficiencia, esta representación puede ser utilizada para pruebas donde puedes variar datos como la cantidad de combustible, cantidad de ladrillos e incluso poder variar la temperatura de cocción y así obtener diferentes porcentajes de eficiencia para su posterior análisis y así llegar a posibles cambios de variables, esto ya con la finalidad de mejoras.

RECOMENDACIONES

Como resultado de la presente investigación se dan a conocer las siguientes recomendaciones con la intención de mejorar el proceso de cocción de ladrillos con los hornos pertenecientes a la empresa ladrillos Camala E.I.R.L.

Se le recomienda al dueño de la empresa implementar termocuplas o también llamados termopares en diferentes partes de los hornos, para registrar y monitorear por períodos de tiempos preestablecidos el comportamiento del proceso de cocción en ambos hornos, este tipo de registro permitirá cuantificar a partir del balance energético en los hornos, el calor generado por los combustibles y podremos hallar las pérdidas que conlleva este calor.

Se recomienda a los trabajadores de la empresa implementar un plan de orden y limpieza respecto al combustible utilizado en la cocción de ladrillos, así como también implementar un método de control de dosificación del combustible implementando el uso de balanza de pesaje, esto con la finalidad de monitorear el consumo de combustible.

Se recomienda al personal de producción implementar un sistema para medir las proporciones óptimas de la mezcla para la fabricación de los ladrillos, de manera de poder estandarizar el proceso, para contribuir a mejorar la calidad del producto final, en relación a la falta de cocción y manchas en los ladrillos.

Se sugiere al dueño de la empresa plantear la alternativa de dar mantenimiento al forro de las paredes de los hornos, ya que estos están contruidos a base de barro y se llegan a deteriorar con el tiempo, esto con la finalidad de mantener la eficiencia térmica en los hornos.

Para el caso del horno a cielo abierto de la empresa ladrillos Camala E.I.R.L., se recomienda la implementación de un techo con dos finalidades, la primera es evitar pérdida de calor por ese sector ya que en la actualidad no cuenta con aislante térmico en esa parte y

la segunda de poder adaptarle una chimenea y así simplificar las cosas para un futuro estudio ambiental.

Se recomienda a la empresa, la implementación de un plan de recirculación de los gases expulsados durante la combustión, con la finalidad de aprovechar la temperatura de los gases a favor de la cocción de los ladrillos. Caso contrario de no poder realizarse la recirculación se podría canalizar estos gases del horno paulista al horno a cielo abierto y viceversa y así poder aprovechar la temperatura de los gases en la pre cocción de los ladrillos.

Se recomienda a la empresa, la adquisición de un dispositivo (filtro) para implementarlo en la chimenea del horno Paulista, con la finalidad de disminuir las emisiones contaminantes a la atmósfera, en caso del horno a cielo abierto primero se debe adaptar el techo después una chimenea y así ya poder implementar dicho dispositivo.

Finalmente, se recomienda al dueño de la ladrillera, implementar el uso de los EPPs para la prevención y mitigación de los riesgos laborales asociados a las condiciones de trabajo y sus métodos, para ello debe establecer un plan de capacitación de personal en temas asociados a la advertencia y control de los riesgos laborales, de igual manera, la formación en los nuevos métodos de trabajo que surjan de las mejoras aplicadas al proceso de cocción.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amell, A., Rubio, Y., & Echeverri, C. (2017). *Informe Final de Proyecto: Evaluación de las Necesidades Tecnológicas para Mitigación del Cambio Climático*. Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Arévalo, M., & Cumbe, J. (2021). *Propuesta de Mejora de la Eficiencia Energética de un Horno Artesanal para la Quema de Ladrillos y Tejas- Cámara de Cocción y de Combustión*. Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca Ecuador.
- Arias. (2012). *El Proyecto de la Investigación: Introducción a la Investigación Científica*. Caracas, Venezuela: Episteme C.A. Obtenido de: https://tauniversity.org/sites/default/files/libro_el_proyecto_de_investigacion_de_fidias_g_arias.pdf
- BYJU'S. (5 de diciembre de 2023). *Energía libre de Gibbs*. Obtenido de BYJU'S: https://byjus-com.translate.google.com/chemistry/gibbs-energy-change-spontaneity-of-a-process/?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=rq#:~:text=Gibbs%20Energy%20in%20Chemistry,-The%20energetics%20of&text=The%20transformation%20of%20a%20system,two%20stat
- Cabrera, D. (2019). *Diseño y Construcción de un Horno Crisol Estacionario para Reciclaje de Chatarra de Cobre-Cajamarca*. Cajamarca: Universidad Privada del Norte.
- Castán, Y. (s.f.). *Introducción al método científico y sus etapas*. Zaragoza, España. Instituto Aragonés de Ciencias de la Salud. Obtenido de: <https://claustrouniversitariodeorientee.edu.mx/pedagogia-linea/introduccionalmetodocientificosusetapas.pdf>
- Cengel, Y., & Boles, M. (2012). *Termodinámica*. McGraw-Hill. Mexico. Obtenido de: <https://bibliotecaia.ism.edu.ec/Repo-book/t/Termodinamica.pdf>
- Cengel, Y., & Ghajar, A. (2011). *transferencia de Calor y Masa*. McGraw Hill. doi:15-0540-8. Mexico. Obtenido de: <https://pavisva.wordpress.com/wp-content/uploads/2016/01/transferencia-de-calor-y-masa-yunus-cengel.pdf>
- Comite de Nomenclatura y Definición de la ASTM. (2009). *Manual del Ingeniero Mecánico*. MARKS. Obtenido de: <http://www1.frm.utn.edu.ar/electromecanica/materias%20pagina%20nuevas/elementoMaquina/material/libroCabecera.pdf>

- Figuroa, E., & Martínez, J. (2000). *Diseño de un Horno de Cocción de Ladrillos Cerámicos Utilizando Gas Natural Como Combustible y COonstrucción de un Prototipo*. Cartagena: Corporación Universitaria Tecnológica de Bolívar.
- Gómez Ribelles, J. L., Monleón, M., & Ribes, A. (1990). *Termodinámica. Analisis exergetico*. Editorial Reverté.
- Guerrero, G., Acevedo, C., & Escobar, N. (2018). *Eficiencia Energética en Hornos de Producción de Materiales Cerámicos*. Universidad Pontificia Bolivariana.
- Guerrero, M. (2020). *Propuesta de mejora del sistema productivo del ladrillo pandereta en la empresa Ladrillos Tayson S.A.C. para reducir las pérdidas económicas*. Obtenido de <http://hdl.handle.net/20.500.12423/2674>
- Gutierrez, A., & Cogollos, J. (2019). *Balance de Energía y Exergía de un Horno de Cuba Vertical para la Producción de Cal*. Obtenido de <http://doi.org:> <http://doi.org/10.17981/ijmsor.04.01.08>
- Jacome, S. (2015). *Evaluación Termodinámica del Proceso de Cocción y Análisis de Gases en Hornos a Cielo Abierto y Hoffman en Ocaña*. Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña.
- Kerlinger, F., & Lee, H. (2008). *Investigación del Comportamiento: Métodos de Investigación en Ciencias Sociales*. México: McGraw Hill.
- Khan Academy. (2017). Calor y Temperatura. Química avanzada (AP chemistry), 1-5. Obtenido de <https://es.khanacademy.org/science/ap-chemistry/thermodynamics-ap/internal-energy-tutorial-ap/a/heat#:~:text=El%20calor%2C%20%E2%80%8D%20%2C%20es%20energ%C3%ADa,o%20mol%C3%A9culas%20en%20el%20sistema>.
- Lara, J. (2021). *Mejora en el Procesos de Cocción de Ladrillo Artesanal en Horno Tipo MK2por Simulación Numérica*. Guanajuato: CIATEC.
- Llanos, A. (2018). *Diseño de Horno de Cocción para Productores Artesanales de Ladrillos del Centro Poblado Cerrillo, Baños del Inca- Cajamarca*. Cajamarca: Universidad Alas Peruanas.
- Murillo , W. (2009). La Investigación Científica. *La Investigación Aplicada: Una Forma de Conocer las Realidades con Evidencia Científica*, 159.
- Ogon, G. (2019). *Buildex.techinfus.com*. Obtenido de <http://www.Buildex.techinfus.com/es/>
- PALACIOS LAROTTA , G. A., & GOMEZ SIERRA, P. J. (2020). Título del trabajo (tesis): evaluación de la combustión de los hornos colmena de la empresa cerámicas américa s.a con inyección de aire y suministro de carbón manual. san José de cúcuta.

- Peris, F. J. (1985). *El Comportamiento de la Madera al Fuego. revista de extensión agraria* , 1- 8. Departamento de Maderas del INIA. Obtenido de:
[https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/Biblioteca/Revistas/pdf_REA%2F
REA_1985_06_133_140.pdf](https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/Biblioteca/Revistas/pdf_REA%2FREA_1985_06_133_140.pdf)
- QUIMICA.ES. (s.f.). Entalpia. Obtenido de:
<https://www.quimica.es/enciclopedia/Entalp%C3%ADa.html>
- Ramos, E. (2019). *Diseño y Cálculo de Horno Continuo de Cámaras Múltiples en Fábrica de Ladrillos Cerámicos Sol del Norte*. Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.
- Rivera, J. (2021). *Mejoramiento de la eficiencia Térmica de un Horno Artesanal de Ladrillo de una Microempresa del Distrito de Florencia de Mora, Provincia de Trujillo*. Universidad César Vallejo.
- Rojas González, A. F., & Barraza Burgos, J. M. (2009). Características termogravimétricas de carbonizados obtenidos a altas velocidades de calentamiento. *Ingeniería e investigación vol. 29*, 25-34.
- Ruiz, C. (2002). <http://virtual.urbe.edu>. Obtenido de Índice de Consistencia Interna Alfa Cronbach: <http://virtual.urbe.edu>
- Sabino, C. (2000). *El Proceso de Investigación*. caracas: Panapo.
- Sampieri Hernández, R. & Mendoza Torres C.P. (2018). *Metodología de la Investigación*. Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta.
- SCRIBD. (05 de diciembre de 2023). Obtenido de SCRIBD:
<https://es.scribd.com/embeds/619148951/content>
- Tamayo, & Tamayo. (2007). *El Proceso de Investigación Científica*. México: LIMUSA.
- Vera, D. (2003). *Análisis Termodinámico y Simulación de un Horno Tipo Colmena Invertido* . Cúcuta: Universidad Francisco De Paula Santander.
- Verano, F. (2021). Operacionalización de las Variables en la Investigación. Barquisimeto, Lara, Venezuela. Obtenido de:
<https://docs.bvsalud.org/biblioref/2020/05/1096354/operacionalizacion-de-variables.pdf>
- WIKIPEDIA. (s.f.). Entropia. Obtenido de
<https://es.wikipedia.org/wiki/Entrop%C3%ADa>
- Zuluaga Castrillón, D., Henao Arrieta, A. P., García Palacio, D. E., Rodríguez, J. E., Hoyos Machado, Á. M., López, M. E., & Gómez Álvarez, C. (2016). Caracterización térmica, química y mineralógica de un tipo de arcilla roja propia de la región andina colombiana, empleada para la producción de ladrillos para construcción. *revista colombiana de materiales*, 53-63.

ANEXO

ANEXO A

Matriz de Consistencia

MATRIZ DE CONSISTENCIA

Título: COMPARACIÓN TERMODINÁMICA DEL PROCESO DE COCCIÓN DE LOS HORNOS PAULISTA Y A CIELO ABIERTO EN LA PRODUCCIÓN DE LADRILLOS EN LA EMPRESA “LADRILLOS CAMALA E.I.R.L.”

| PROBLEMAS | OBJETIVOS | HIPÓTESIS | VARIABLES | METODOLOGÍA |
|---|--|---|--|--|
| <p>General ¿Cuál será la eficiencia termodinámica comparativa del proceso de cocción entre los hornos paulista y el de cielo abierto en la producción de ladrillos en la empresa “CAMALA E.I.R.L.”?</p> | <p>General Comparar la eficiencia termodinámica del proceso de cocción entre los hornos paulista y el de cielo abierto en la producción de ladrillos en la empresa “CAMALA E.I.R.L.”.</p> | <p>General Al evaluar las condiciones de operación como combustible y producción la eficiencia termodinámica del horno de cielo abierto es más eficiente respecto al horno paulista.</p> | <p>Dependiente: Eficiencia termodinámica de cada uno de los hornos.</p> | <p>Tipo de Investigación Tecnológica de enfoque cuantitativo.</p> <p>Alcance Comparativo y explicativo.</p> <p>Población Total, (1) horno paulista y (1) horno a cielo abierto pertenecientes a la empresa ladrillos CAMALA E.I.R.L.</p> |
| <p>Específicos: PE1: ¿Cuáles serán las condiciones actuales de operación de los hornos de cocción a cielo abierto y paulista para el proceso de cocción de ladrillos?</p> <p>PE2: ¿De qué manera los cálculos de los flujos de energía del proceso de cocción, incide en la eficiencia de los hornos a cielo abierto y paulista?</p> | <p>Específicos: OE1: Diagnosticar el diseño, condiciones y producción de los hornos de cocción con los que se cuenta actualmente para definir las condiciones actuales de operación.</p> <p>OE2: Efectuar los cálculos de los flujos de energía del proceso de cocción para determinar la eficiencia de calor de los hornos a cielo abierto y paulista.</p> | <p>Específicos: HE1: Es posible identificar las condiciones de diseño y de producción del proceso de cocción de cada uno de los hornos.</p> <p>HE2: Los cálculos de los flujos de energía del proceso de cocción de cada uno de los hornos inciden significativamente en la eficiencia de cada uno de ellos.</p> | <p>Independiente:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Pérdidas de calor. - Diseño de los hornos. - Combustible. | <p>Muestreo Total, dos (2) hornos objeto de estudio de la empresa</p> <p>Técnicas -Observación directa -Revisión documental técnica</p> <p>Instrumentos -Guía de observación directa -Especificaciones de diseño de hornos -Termómetro analógico para horno -Cronómetro -Computadora -Tablas TDS.</p> |

| PROBLEMAS | OBJETIVOS | HIPÓTESIS | VARIABLES | METODOLOGÍA |
|--|---|---|-----------|-------------|
| <p>PE3: ¿Cuál de los hornos cielo abierto y paulista presenta mejor rendimiento energético?</p> | <p>OE3: Analizar el rendimiento energético de cada uno de los hornos por medio de un balance de energía.</p> | <p>HE3: El rendimiento energético demuestra la mejor eficiencia de uno de los hornos, que se halla realizando un balance de energía.</p> | | |

Nota: Elaboración propia

ANEXO B

Propiedades de materiales de construcción

TABLA A-5

Propiedades de materiales de construcción
(a una temperatura media de 24°C)

| Material | Espesor, <i>L</i> mm | Densidad, ρ kg/m ³ | Conductividad térmica, <i>k</i> W/m · K | Calor específico, c_p kJ/kg · K | Valor <i>R</i> (para los espesores de la lista, <i>L/k</i>), K · m ² /W |
|--|-------------------------|---------------------------------------|---|---|--|
| Tableros de construcción | | | | | |
| Tablero de asbesto-cemento | 6 mm | 1 922 | — | 1.00 | 0.011 |
| Tablero de yeso de revoque | 10 mm | 800 | — | 1.09 | 0.057 |
| | 13 mm | 800 | — | — | 0.078 |
| Madera contrachapada (abeto Douglas) | — | 545 | 0.12 | 1.21 | — |
| | 6 mm | 545 | — | 1.21 | 0.055 |
| | 10 mm | 545 | — | 1.21 | 0.083 |
| | 13 mm | 545 | — | 1.21 | 0.110 |
| | 20 mm | 545 | — | 1.21 | 0.165 |
| Tablero y entablado aislados (densidad común) | 13 mm | 288 | — | 1.30 | 0.232 |
| | 20 mm | 288 | — | 1.30 | 0.359 |
| Tablero duro (de alta densidad, amasado estándar) | — | 1 010 | 0.14 | 1.34 | — |
| Tablero aglutinado: | | | | | |
| Densidad media | — | 800 | 0.14 | 1.30 | — |
| Contrapiso | 16 mm | 640 | — | 1.21 | 0.144 |
| Contrapiso de madera | 20 mm | — | — | 1.38 | 0.166 |
| Membrana de construcción | | | | | |
| Fieltro permeable al vapor | — | — | — | — | 0.011 |
| Sello de vapor (2 capas de fieltro de 0.73 kg/m ² estropajado) | — | — | — | — | 0.021 |
| Materiales para piso | | | | | |
| Alfombra y carpeta fibrosa | — | — | — | 1.42 | 0.367 |
| Alfombra y carpeta de caucho | — | — | — | 1.38 | 0.217 |
| Loseta (asfalto, linóleo, vinilo) | — | — | — | 1.26 | 0.009 |
| Materiales para mampostería | | | | | |
| <i>Unidades de mampostería:</i> | | | | | |
| Ladrillo común | | 1 922 | 0.72 | — | — |
| Ladrillo para fachada | | 2 082 | 1.30 | — | — |
| Ladrillo de arcilla refractaria | | 2 400 | 1.34 | — | — |
| | | 1 920 | 0.90 | 0.79 | — |
| | | 1 120 | 0.41 | — | — |
| Bloques de concreto (3 núcleos ovales, agregado de arena y grava) | 100 mm | — | 0.77 | — | 0.13 |
| | 200 mm | — | 1.0 | — | 0.20 |
| | 300 mm | — | 1.30 | — | 0.23 |
| <i>Concretos:</i> | | | | | |
| Agregados ligeros (incluyendo esquisto, arcilla o pizarra expandidos; | | 1 920 | 1.1 | — | — |
| escorias de alto horno expandidas; | | 1 600 | 0.79 | 0.84 | — |
| cenizas de alto horno; | | 1 280 | 0.54 | 0.84 | — |
| piedra pómez y escoria) | | 960 | 0.33 | — | — |
| | | 940 | 0.18 | — | — |
| Cemento/cal, mortero y estuco | | 1 920 | 1.40 | — | — |
| | | 1 280 | 0.65 | — | — |
| Estuco | | 1 857 | 0.72 | — | — |

Fuente. (Cengel & Ghajar, transferencia de Calor y Masa, 2011)

ANEXO C
Propiedades del Vapor de Agua

TABLA A-4

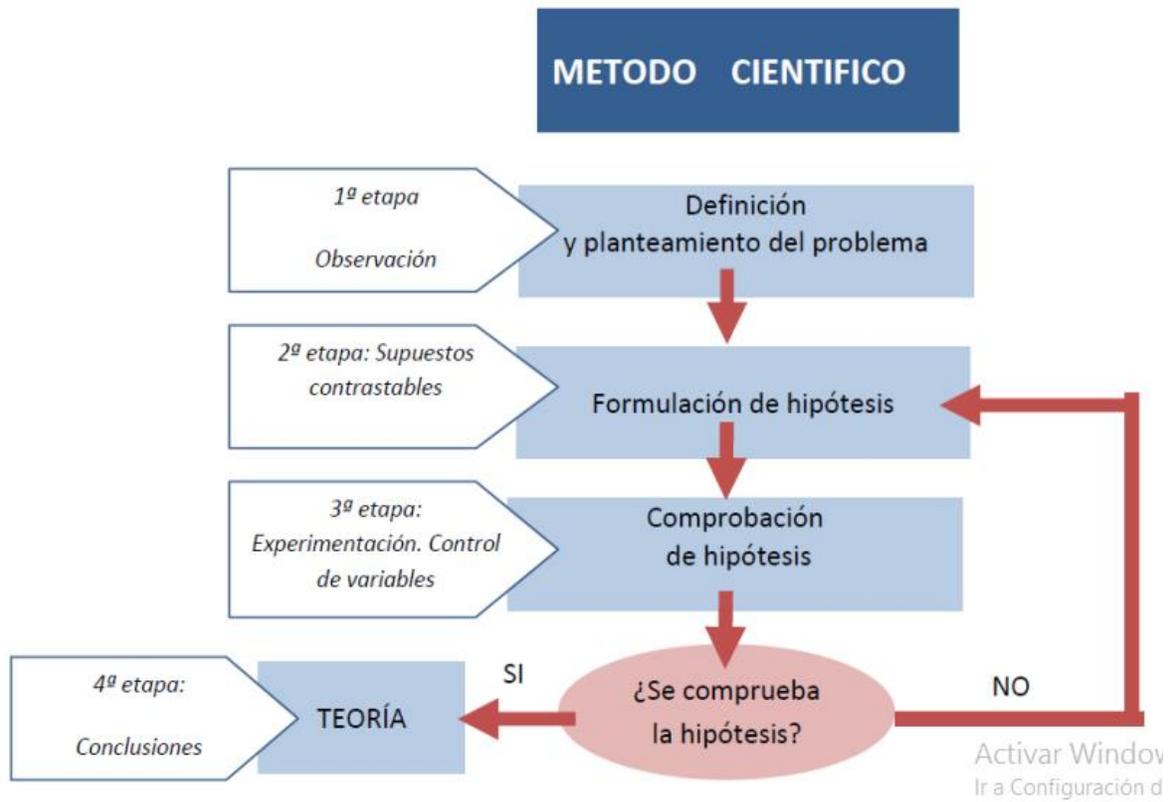
Agua saturada. Tabla de temperaturas

| Temp., T °C | Pres. sat., P_{sat} kPa | Volumen específico, m^3/kg | | Energía interna, kJ/kg | | | Entalpía, kJ/kg | | | Entropía, kJ/kg · K | | |
|------------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------|---------------------------|--------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------|-------------------------|
| | | Líqu. sat., v_f | Vapor sat., v_g | Líqu. sat., u_f | Evap., u_{fg} | Vapor sat., u_g | Líqu. sat., h_f | Evap., h_{fg} | Vapor sat., h_g | Líqu. sat., s_f | Evap., s_{fg} | Vapor sat., s_g |
| 0.01 | 0.6117 | 0.001000 | 206.00 | 0.000 | 2374.9 | 2374.9 | 0.001 | 2500.9 | 2500.9 | 0.0000 | 9.1556 | 9.1556 |
| 5 | 0.8725 | 0.001000 | 147.03 | 21.019 | 2360.8 | 2381.8 | 21.020 | 2489.1 | 2510.1 | 0.0763 | 8.9487 | 9.0249 |
| 10 | 1.2281 | 0.001000 | 106.32 | 42.020 | 2346.6 | 2388.7 | 42.022 | 2477.2 | 2519.2 | 0.1511 | 8.7488 | 8.8999 |
| 15 | 1.7057 | 0.001001 | 77.885 | 62.980 | 2332.5 | 2395.5 | 62.982 | 2465.4 | 2528.3 | 0.2245 | 8.5559 | 8.7803 |
| 20 | 2.3392 | 0.001002 | 57.762 | 83.913 | 2318.4 | 2402.3 | 83.915 | 2453.5 | 2537.4 | 0.2965 | 8.3696 | 8.6661 |
| 25 | 3.1698 | 0.001003 | 43.340 | 104.83 | 2304.3 | 2409.1 | 104.83 | 2441.7 | 2546.5 | 0.3672 | 8.1895 | 8.5567 |
| 30 | 4.2469 | 0.001004 | 32.879 | 125.73 | 2290.2 | 2415.9 | 125.74 | 2429.8 | 2555.6 | 0.4368 | 8.0152 | 8.4520 |
| 35 | 5.6291 | 0.001006 | 25.205 | 146.63 | 2276.0 | 2422.7 | 146.64 | 2417.9 | 2564.6 | 0.5051 | 7.8466 | 8.3517 |
| 40 | 7.3851 | 0.001008 | 19.515 | 167.53 | 2261.9 | 2429.4 | 167.53 | 2406.0 | 2573.5 | 0.5724 | 7.6832 | 8.2556 |
| 45 | 9.5953 | 0.001010 | 15.251 | 188.43 | 2247.7 | 2436.1 | 188.44 | 2394.0 | 2582.4 | 0.6386 | 7.5247 | 8.1633 |
| 50 | 12.352 | 0.001012 | 12.026 | 209.33 | 2233.4 | 2442.7 | 209.34 | 2382.0 | 2591.3 | 0.7038 | 7.3710 | 8.0748 |
| 55 | 15.763 | 0.001015 | 9.5639 | 230.24 | 2219.1 | 2449.3 | 230.26 | 2369.8 | 2600.1 | 0.7680 | 7.2218 | 7.9898 |
| 60 | 19.947 | 0.001017 | 7.6670 | 251.16 | 2204.7 | 2455.9 | 251.18 | 2357.7 | 2608.8 | 0.8313 | 7.0769 | 7.9082 |
| 65 | 25.043 | 0.001020 | 6.1935 | 272.09 | 2190.3 | 2462.4 | 272.12 | 2345.4 | 2617.5 | 0.8937 | 6.9360 | 7.8296 |
| 70 | 31.202 | 0.001023 | 5.0396 | 293.04 | 2175.8 | 2468.9 | 293.07 | 2333.0 | 2626.1 | 0.9551 | 6.7989 | 7.7540 |

Fuente. (Arévalo & Cumbe, 2021)

ANEXO D

METODO CIENTIFICO



Fuente: (Castán)

ANEXO E
FORMULARIO DE PREGUNTAS

Nº. Preguntas:

1 ¿Cuál es la capacidad de producción de cada tipo de horno?

2 ¿Cuántos ladrillos aproximadamente se pierden en cada tipo de horno por cada proceso de cocción que se realiza?

3 ¿Cuánto tiempo toma la cocción de ladrillos en cada tipo de horno?

4 ¿Qué tipo de combustible y en que proporciones consume cada tipo de horno?

5 ¿Se tiene registros de temperaturas?

6 ¿La empresa cuenta con estudios previos respecto a la eficiencia térmica?

7 ¿Con cuánto de humedad promedio ingresan los ladrillos a la zona de cocción?

8 ¿Cuáles son las dimensiones de los adobes con que están contruidos los hornos ladrilleros?

ANEXO F

DATOS DE ENTALPIA Y ENTROPIA

| | |
|---------------------------------|--|
| Entalpia de la leña | $\Delta H_{C_6H_{10}O_5} = -1277 \frac{KJ}{mol}$ |
| Entalpia del carbón | 0 |
| Entalpia del oxígeno molecular | 0 |
| Entalpia del dióxido de carbono | $\Delta H_{CO_2} = -393.5 \frac{KJ}{mol}$ |
| Entalpia del agua | $\Delta H_{H_2O} = -285.8 \frac{KJ}{mol}$ |
| Entropía de la leña | $\Delta S_{C_6H_{10}O_5} = 188 \frac{J}{mol.K}$ |
| Entropía del carbón | $\Delta S_C = 5.74 \frac{J}{mol.K}$ |
| Entropía del oxígeno molecular | $\Delta S_{O_2} = 205 \frac{J}{mol.K}$ |
| Entropía del dióxido de carbono | $\Delta S_{CO_2} = 213.8 \frac{J}{mol.K}$ |
| Entropía del agua | $\Delta S_{H_2O} = 69.91 \frac{J}{mol.K}$ |

Fuente: datos obtenidos de <https://chatgpt.com/?oai-dm=1> (chatGPT)

ANEXO G

REGISTRO FOTOGRÁFICO



Carga de horno Paulista



horno a cielo abierto



Horno a cielo abierto



Horno Paulista



Horno a cielo abierto



Cierre de entrada horno Paulista



Lateral de Horno Paulista



Distribución ladrillos a cocción



Suministro de aire



Cierre entrada horno Paulista



Cocción horno Paulista



Tipo de ladrillo cocido



Interior horno Paulista



Cocción en horno Paulista



Colocación de ladrillos para cocción en horno Paulista