

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE CUENCA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

*Trabajo de titulación previo  
a la obtención de título de  
Ingeniero Mecánico*

**PROYECTO TÉCNICO:**

**“PROPUESTA DE MEJORA DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE UN  
HORNO ARTESANAL PARA LA QUEMA DE LADRILLOS Y  
TEJAS - CÁMARA DE COCCIÓN Y DE COMBUSTIÓN”**

**AUTORES:**

MANUEL RODRIGO ARÉVALO ARÉVALO  
JULIO CÉSAR CUMBE NOVILLO

**TUTOR:**

ING. NELSON GUSTAVO JARA COBOS, Ph.D.

CUENCA - ECUADOR

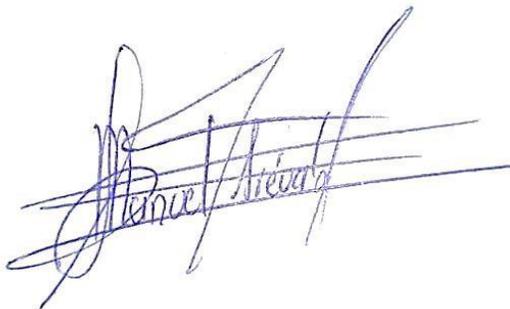
2021

## CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros, Manuel Rodrigo Arévalo Arévalo con documento de identificación N° 0106624539 y Julio César Cumbe Novillo con documento de identificación N° 0105287791, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación: **“PROPUESTA DE MEJORA DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE UN HORNO ARTESANAL PARA LA QUEMA DE LADRILLOS Y TEJAS - CÁMARA DE COCCIÓN Y DE COMBUSTIÓN”**, mismo que ha sido desarrollado para obtener el título de: *Ingeniero Mecánico*, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, noviembre de 2021.



Manuel Rodrigo Arévalo Arévalo  
C.I 0106624539

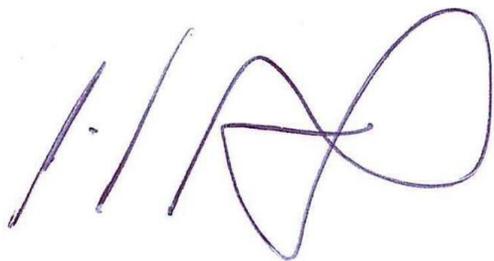


Julio César Cumbe Novillo  
C.I 0105287791

## CERTIFICACIÓN

Yo, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **“PROPUESTA DE MEJORA DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE UN HORNO ARTESANAL PARA LA QUEMA DE LADRILLOS Y TEJAS - CÁMARA DE COCCIÓN Y DE COMBUSTIÓN”**, realizado por Manuel Rodrigo Arévalo Arévalo y Julio César Cumbe Novillo, obteniendo el *Proyecto Técnico* que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, noviembre de 2021.

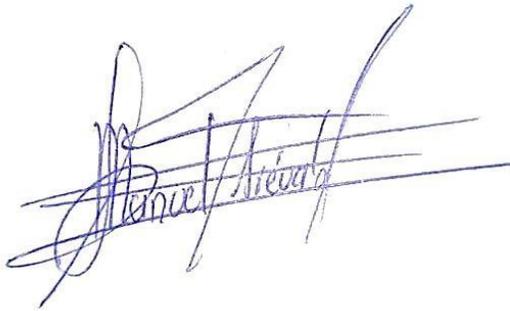
A handwritten signature in purple ink, consisting of several loops and a long horizontal stroke, likely representing the name Nelson Gustavo Jara Cobos.

Ing. Nelson Gustavo Jara Cobos, Ph.D.  
C.I. 0102679644

## DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, Manuel Rodrigo Arévalo Arévalo con documento de identificación N° 0106624539 y Julio César Cumbe Novillo con documento de identificación N° 0105287791, autores del trabajo de titulación: **“PROPUESTA DE MEJORA DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE UN HORNO ARTESANAL PARA LA QUEMA DE LADRILLOS Y TEJAS - CÁMARA DE COCCIÓN Y DE COMBUSTIÓN”**, certificamos que el total contenido del *Proyecto Técnico*, es de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Cuenca, noviembre de 2021.



Manuel Rodrigo Arévalo Arévalo  
C.I 0106624539



Julio César Cumbe Novillo  
C.I 0105287791

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo lo dedico de manera especial a ms padres, Hermanas ya que todos ellos siempre me han apoyado y ayudad de una manera incondicional en el transcurso de mi vida personal y académica.

**Manuel Rodrigo Arévalo Arévalo**

## **AGRADECIMIENTO**

Expreso mi agradecimiento a mis padres Rodrigo Arévalo y Rosario Arévalo quienes me apoyaron y ayudaron incondicionalmente en las distintas etapas y momentos de mi vida

Agradezco a mis hermanos que me dieron su apoyo en todos los momentos y no me permitieron abandonar mis estudios

Le agradezco a Dios por hacer posible todo aquello que se veía demasiado difícil e imposible a él le agradezco por darme la salud y la vida y permitirme cumplir cada meta propuesta

Agradezco al Ing. Nelson Jara por su gran aporte de conocimientos, y por brindar la ayuda necesaria para el desarrollo del presente proyecto

**Manuel Rodrigo Arévalo Arévalo**

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo lo dedico de manera especial a mis padres, quienes con su amor paciencia y esfuerzo me han permitido llegar a cumplir una meta más en mi vida, ellos siempre estuvieron de manera incondicional en mi formación académica y personal.

**Julio Cesar Cumbe Novillo**

## **AGRADECIMIENTO**

Expreso mi agradecimiento a mis padres Lautaro Cumbe y Dora Novillo quienes me apoyaron y ayudaron incondicionalmente en las distintas etapas y momentos de mi vida

Le agradezco a Dios por bendecirme, por guiarme a lo largo de mi existencia, ser el apoyo y fortaleza en aquellos momentos de gran dificultad y de debilidad.

Agradezco al Ing. Nelson Jara por su gran aporte de conocimientos y experiencia, por ser una persona muy paciente quien supo guiarnos de la mejor manera en el desarrollo de este proyecto.

**Julio Cesar Cumbe Novillo**

## ÍNDICE GENERAL

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR .....	2
CERTIFICACIÓN.....	3
DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD .....	4
AGRADECIMIENTO .....	5
DEDICATORIA .....	6
AGRADECIMIENTO .....	6
1. Tema .....	18
2. Introducción .....	18
3. Planteamiento del problema .....	18
3.1. Antecedentes .....	18
3.2. Definición del Problema .....	19
3.3. Problema general .....	19
3.4. Problemas específicos .....	20
4. Objetivos .....	20
4.1 Objetivo General .....	20
4.2 Objetivos Específicos.....	20
5. Marco Teórico Referencial .....	21
5.1 Proceso de fabricación de ladrillos previo a la cocción en los hornos artesanales. ....	21
5.1.1 Obtención de la materia prima .....	21
5.1.2 Selección y batido del material .....	21
5.1.3 Moldeo del ladrillo .....	22
5.1.4 El perfilado o raspado del ladrillo .....	22
5.1.5 Secado de ladrillo .....	22
5.2 Proceso de cocción en los hornos artesanales. ....	23
5.2.1 Combustible y Proceso de Combustión .....	23
5.2.2 Humedad de la leña .....	24
5.2.3 Rangos de temperatura para un horno ladrillero .....	25
5.2.4 Vitriificación.....	25
5.2.5 Características para una cocción perfecta. ....	26
5.2.6 Tiempo de Cocción .....	26

5.2.7	<i>Enfriamiento y descarga del horno</i> .....	26
5.2.8	<i>Almacenamiento y Comercialización</i> .....	27
5.3	<i>Proceso de fabricación de tejas y su cocción en los hornos artesanales.</i> .....	27
5.3.1	<i>Moldeo de la teja</i> .....	27
5.3.2	<i>Secado de la teja</i> .....	28
5.3.3	<i>Cocción de la teja</i> .....	28
5.3.3.1	<i>Primera quema.</i> .....	28
5.3.3.2	<i>Vidriado</i> .....	29
5.3.3.3	<i>Segunda quema</i> .....	29
5.4	<i>Algunos detalles de los hornos artesanales y la normativa establecida</i> .....	29
5.4.1	<i>Hornos de tipo volcán (tradicional).</i> .....	29
5.4.2	<i>Normativa</i> .....	31
6.	<i>Situación actual del horno artesanal del Sr. Ángel Sinchi – Caso de aplicación para el análisis.</i> 32	
6.1.	<i>Descripción general del horno.</i> .....	32
6.2.	<i>Perfil de temperaturas del horno artesanal del Sr. Ángel Sinchi.</i> .....	33
6.2.1	<i>Perfil de temperatura de calentamiento en el horno en la parte frontal</i> .....	33
6.2.2	<i>Perfil de temperatura de calentamiento en el horno en la parte posterior</i> .....	34
6.2.3	<i>Perfil de temperatura de calentamiento y enfriamiento en el horno en la parte frontal.</i> ....	34
6.3.	<i>Balance energético del horno actual.</i> .....	36
6.3.1	<i>Calor suministrado</i> .....	37
6.3.2	<i>Acumulación de calor en mampostería</i> .....	37
6.3.3	<i>Calor por carga del material a cocer</i> .....	39
6.3.4	<i>Calor por carga del material a cocer.</i> .....	42
6.3.5	<i>Calor necesario para la descomposición de la arcilla.</i> .....	44
6.3.6	<i>Calor por humeado de la leña</i> .....	45
6.3.7	<i>Calor por humedad del aire</i> .....	46
6.3.8	<i>Calor por inquemados</i> .....	50
6.3.9	<i>Pérdida de calor por las paredes</i> .....	50
6.3.10	<i>Calor por humos</i> .....	51
6.3.11	<i>Pérdidas intangibles</i> .....	52
6.3.12	<i>Rendimiento del Horno Actual</i> .....	53
6.4.	<i>Mejoras para el horno.</i> .....	54

<b>6.4.1</b>	<b><i>Perdida de energía en las paredes</i></b> .....	<b>54</b>
<b>6.4.2</b>	<b><i>Perdida de energía en las paredes</i></b> .....	<b>57</b>
<b>6.4.3</b>	<b><i>Resistencias</i></b> .....	<b>62</b>
<b>6.4.4</b>	<b><i>Rendimiento del horno</i></b> .....	<b>69</b>
<b>6.5.</b>	<b><i>Costos referenciales de los materiales.</i></b> .....	<b>72</b>
<b>7.</b>	<b><i>Resultados</i></b> .....	<b>75</b>
<b>8.</b>	<b><i>Conclusiones</i></b> .....	<b>78</b>
<b>9.</b>	<b><i>Recomendaciones</i></b> .....	<b>79</b>
<b>10.</b>	<b><i>Bibliografía</i></b> .....	<b>80</b>
<b>11.</b>	<b><i>Anexos</i></b> .....	<b>82</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Proceso de extracción manual de arcilla. Fuente: [8].....	21
Figura 2. Proceso de batido con animales como bueyes y caballos. Fuente: [8].....	21
Figura 3. Moldeo de ladrillos.....	22
Figura 4. Raspado de ladrillo actividad que realizan los niños o mujeres en su mayoría. Fuente: [8] .....	22
Figura 5. Secado del ladrillo. Fuente: [8] .....	23
Figura 6. Composición química de la madera. Fuente: [8].....	24
Figura 7. Cocción en un horno circular. Fuente: [8].....	25
Figura 8. Descarga del producto. Fuente: [8] .....	27
Figura 9. Moldeo de la teja. Fuente: Autores.....	28
Figura 10. Acomodamiento de las tejas. Fuente: Autores .....	28
Figura 11. Vidriado de la teja. Fuente: Autores.....	29
Figura 12. Termocuplas en distintos puntos del horno. Fuente: [10] .....	30
Figura 13. Temperaturas en diferentes puntos del horno. Fuente: [10].....	30
Figura 14. Temperaturas en diferentes puntos del horno. Tomado de “Estudio de definición de tipo de horno apropiado para el sector ladrillero”. Fuente: [22].....	31
Figura 15. Esquema del horno actual. Fuente: Autores .....	32
Figura 16. Esquema de la ubicación de la termocupla. Fuente: Autores .....	33
Figura 17: Perfil de temperaturas del horno actual. (Frontal). Fuente: Autores .....	34
Figura 18. Perfil de temperaturas del Horno actual. (Posterior). Fuente: Autores .....	34
Figura 19. Esquema de la ubicación de las termocuplas. Fuente: Autores.....	35
Figura 20. Perfil de temperaturas de calentamiento del Honro Tradicional. Fuente: Autores. ...	35
Figura 21. Perfil de temperaturas de enfriamiento del Horno Tradicional. Fuente: Autores. ....	36
Figura 22. Distribución de temperaturas en el horno artesanal actual en el software ANSYS. Fuente: Autores .....	53
Figura 23. Distribución de temperaturas dentro del horno realizando las Adecuaciones. Figura: Autores.....	70
Figura 24. Velocidad del aire dentro del horno realizando las Adecuaciones y tomando una velocidad de entrada de 3m/s. Fuente: Autores. ....	70
Figura 25. Simulación del castillo en el programa Inventor. Fuente: Autores .....	71
Figura 26. Simulación de la cúpula en el programa inventor. Fuente: Autores.....	72

Figura 27. Esquema del horno actual. Fuente: Autores .....	76
Figura 28. Esquema del horno con la cúpula. Fuente: Autores .....	76
Figura 29. Variación de temperatura del horno actual en la cámara de cocción. Fuente: Autores .....	77
Figura 30. Variación de temperatura del horno con la cúpula. Fuente: Autores .....	77
.....	95

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Etapas para la cocción de ladrillos. Fuente: [18].....	25
Tabla 2. Características técnicas del ladrillo.....	31
Tabla 3. Características técnicas de la teja.....	32
Tabla 4. Datos para calcular el Calor suministrado. Fuente: Autores .....	37
Tabla 5. Datos de las temperaturas. Fuente: Autores.....	38
Tabla 6. Datos para el calor acumulado en la mampostería. Fuente: Autores.....	39
Tabla 7. Peso de los ladrillos cocido. Fuente: Autores .....	39
Tabla 8. Peso de los ladrillos Crudos. Fuente: Autores. ....	40
Tabla 9. Peso de las tejas Cocidas. Fuente: Autores.....	40
Tabla 10. Peso de las tejas Crudas. Fuente: Autores .....	40
Tabla 11. Datos para determinar la Humedad de la Teja. Fuente: Autores .....	41
Tabla 12. Datos para determinar la Humedad del Ladrillo. Fuente: Autores .....	41
Tabla 13. Datos para determinar la masa seca del ladrillo y la teja. Fuente: Autores .....	42
Tabla 14. Datos para determinar el calor por carga a cocer. Fuente: Autores.....	43
Tabla 15. Datos para determinar el calor para sacar la humedad. Fuente: Autores.....	44
Tabla 16. Datos para determinar el calor para sacar la humedad. Fuente: Autores.....	44
Tabla 17. Datos para determinar el calor por humedad de la leña. Fuente: Autores .....	45
Tabla 18. Porcentaje de Hidrogeno y de Oxigeno presente en la Leña. Fuente: Autores .....	46
Tabla 19. Datos para determinar el calor por agua formada en la combustión. Fuente: Autores. ....	46
Tabla 20. Composición química de la leña. Fuente: [15] .....	47
Tabla 21. Datos para obtener el volumen de humos para el oxígeno. Fuente: Autores.....	47
Tabla 22. Datos para obtener el Factor de aire. Fuente: Autores.....	48
Tabla 23. Composición Química de la Leña. Fuente: Autores .....	48
Tabla 24. Datos para determinar la masa seca de aire. Fuente: Autores .....	49
Tabla 25. Datos para determinar el calor por humedad del aire. Fuente: Autores .....	49
Tabla 26. Datos para determinar el calor por Inquemados. Fuente: Autores .....	50
Tabla 27. Datos para determinar la perdida de calor por las paredes. Fuente: Autores.....	50
Tabla 28. Datos para determinar el peso de humos producidos. Fuente: Autores.....	51
Tabla 29. Datos para determinar el peso de los gases. Fuente: Autores.....	52
Tabla 30. Datos para determinar el calor por Humos. Fuente: Autores .....	52

Tabla 31. Datos para determinar las pérdidas Intangibles. Fuente: Autores .....	52
Tabla 32. Datos para determinar el rendimiento del Horno. Fuente: Autores .....	53
Tabla 33. Datos para determinar la temperatura media. Fuente: Autores .....	54
Tabla 34. Valores para determinar el calor requerido para elevar la temperatura. Fuente: Autores .....	54
Tabla 35. Valores para determinar el calor requerido por las paredes internas y suelo. Fuente: Autores .....	55
Tabla 36. Valores para determinar el calor requerido por los puentes. Fuente: Autores.....	55
Tabla 37. Valores para determinar el Factor de corrección del aire. Fuente: Autores .....	56
Tabla 38. Valores para determinar la masa total de aire en el Horno. Fuente: Autores .....	56
Tabla 39. Valores para determinar la masa total de aire en el Horno. Fuente: Autores .....	57
Tabla 40. Valores para determinar el diámetro Hidráulico. Fuente: Autores .....	57
Tabla 41. Valores para determinar el número de Reynolds. Fuente: Autores .....	58
Tabla 42. Valores para determinar el número de Nusselt. Fuente: Autores .....	58
Tabla 43. Valores para determinar el coeficiente de transferencia de calor de entrada. Fuente: Autores .....	59
Tabla 44. Valores para determinar el número de Biot. Fuente: Autores .....	59
Tabla 45. Valores para determinar el número de Raleigh. Fuente: Autores.....	60
Tabla 46. Valores para determinar el coeficiente de transferencia de calos a la salida. Fuente: Autores .....	61
Tabla 47. Valores para determinar el coeficiente de radicación al exterior. Fuente: Autores .....	61
Tabla 48. Valores para determinar la resistencia al interior. Fuente: Autores.....	62
Tabla 49. Valores para determinar la resistencia de la pared interna y suelo. Fuente: Autores ...	62
Tabla 50. Valores para determinar la resistencia por convección natural al exterior. Fuente: Autores .....	63
Tabla 51. Valores para determinar la resistencia por convección natural al exterior. Fuente: Autores .....	63
Tabla 52. Valores para determinar el coeficiente global de transferencia de calor. Fuente: Autores .....	64
Tabla 53. Valores para determinar la resistencia por conducción en el aislante. Fuente: Autores66	
Tabla 54. Valores para determinar la resistencia por conducción en pared externa. Fuente: Autores .....	66

Tabla 55. Valores para determinar la resistencia por radiación natural al exterior. Fuente: Autores .....	66
Tabla 56. Valores para determinar la resistencia equivalente. Fuente: Autores .....	67
Tabla 57. Valores para determinar la resistencia total. Fuente: Autores .....	67
Tabla 58. Valores para determinar el coeficiente global de transferencia de calor en la cúpula. Fuente: Autores .....	68
Tabla 59. Valores para determinar la pérdida de energía. Fuente: Autores.....	68
Tabla 60. Valores para determinar la transferencia de calor. Fuente: Autores.....	68
Tabla 61. Valores para determinar la pérdida de energía. Fuente: Autores.....	69
Tabla 62. Cotización referencial de materiales realizado en 3 lugares, para la mejora del horno. Fuente: Autores .....	72
Tabla 63 Costo referencial de las herramientas para la mejora del horno. Fuente: Autores .....	75
Tabla 64. Costo referencial de la mano de obra. Fuente: Autores .....	75

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Ficha técnica de la Fibra Cerámica. ....	82
Anexo 2 Ficha técnica Mix26 Mortar (Resina protectora para la Fibra cerámica) .....	83
Anexo 3. Tabla de Temperaturas en el ciclo de Calentamiento del Horno. Fuente: Autores.....	84
Anexo 4. Tabla de Temperaturas en el ciclo de Enfriamiento del Horno Fuente: Autores .....	86
Anexo 5. Tabla de Temperaturas en el ciclo de Calentamiento de las paredes exteriores del Horno Fuente: Autores.....	88
Anexo 6. “Propiedades de materiales de construcción. Fuente: [20] .....	90
Anexo 7. Tabla de propiedades de agua sobrecalentada. Fuente: [21].....	91
Anexo 8. Propiedades del agua saturada Termodinámica. Fuente: [20].....	92
Anexo 9. Propiedades del agua saturada Termodinámica. Fuente: [20] .....	93
Anexo 10. Propiedades del aire a la presión de 1atm”: Transferencia de calor y masa. Fuente: [20].....	94
Anexo 11. Propiedades de la atmósfera a gran altitud. Fuente: [20] .....	95
Anexo 12. Catálogo de tubo estructural cuadrado. Fuente: [21] .....	96
Anexo 13. Catálogo de tubo estructural rectangular. Fuente: [21].....	97
Anexo 14. Planos de construcción. Fuente: Autores. ....	98

## RESUMEN

La presente investigación establece algunas alternativas para mejorar la eficiencia energética de los hornos artesanales ubicados en la zona de Racar – Sinincay de la Ciudad de Cuenca y que son utilizados para la cocción de tejas y ladrillos. Por investigaciones previas se ha identificado que estos hornos trabajan con una eficiencia de un 9.6% aproximadamente y su consecuente elevada contaminación ambiental; además que provocan pérdidas del 15 al 20 % en sus productos.

En este sentido se identificó la empresa artesanal del Sr. Ángel Sinchi para establecer las propuestas de mejora en función de la realidad del proceso de producción y las características y condiciones del horno artesanal con el que cuentan.

El trabajo se desarrolló en tres etapas, la primera parte consideró el análisis de las condiciones actuales del horno artesanal y el proceso de producción establecido para desarrollar un modelo de simulación mediante software especializado en el que se determinó la eficiencia, así como las zonas más críticas donde el calor generado presenta gradientes de temperatura más elevados.

En la segunda etapa se determinó las condiciones y restricciones que se deben considerar para poder mejorar la eficiencia del horno, contar con una distribución de calor más uniforme para reducir o eliminar el alto gradiente de temperatura presente en la cámara de cocción. Todo esto se pudo verificar a través del modelo de simulación, con el cual se verificó que la cámara de cocción alcanzó una temperatura de 800 °C y mantuvo una variación de  $\pm 5$  °C en las distintas zonas críticas.

Y por último en la tercera etapa, una vez finalizado el rediseño del sistema, se procedió a realizar un análisis de precios unitarios a fin de establecer su factibilidad para la implementación.

**Palabras clave:** Hornos de tiro invertido, cocción de tejas y ladrillos, eficiencia energética, eficiencia térmica, gradiente de temperatura.

## ABSTRACT

This research establishes some alternatives to improve the energy efficiency of artisanal kilns located in the Racar - Sinincay area of the City of Cuenca and which are used for firing tiles and bricks. By previous investigations it has been identified that these furnaces work with an efficiency of approximately 9.6% and its consequent high environmental contamination; In addition, they cause losses of 15 to 20% in their products.

In this sense, Mr. Ángel Sinchi's artisan company was identified to establish improvement proposals based on the reality of the production process and the characteristics and conditions of the artisanal oven they have.

The work was developed in three stages, the first part considered the analysis of the current conditions of the artisanal kiln and the established production process to develop a simulation model using specialized software in which the efficiency was determined, as well as the most critical areas. where the heat generated presents higher temperature gradients.

In the second stage, the conditions and restrictions that should be considered in order to improve the efficiency of the oven, have a more uniform heat distribution to reduce or eliminate the high temperature gradient present in the cooking chamber, were determined. All this could be verified through the simulation model, with which it was verified that the cooking chamber reached a temperature of 800 °C and maintained a variation of  $\pm 5$  °C in the different critical areas.

Finally, in the third stage, once the redesign of the system was completed, a unit price analysis was carried out in order to establish its feasibility for implementation.

**Keywords:** Reverse draft kilns, tile and brick firing, energy efficiency, thermal efficiency, temperature gradient

## **1. Tema**

Propuesta de mejora de la eficiencia energética de un horno artesanal para la quema de ladrillos y tejas – cámara de cocción y de combustión.

## **2. Introducción**

En la actualidad distintas empresas a nivel nacional e internacional se encuentran realizando la implementación y adquisición de nuevas tecnologías para poder aplicarla dentro de sus líneas de producción con la finalidad de mejorar y optimizar sus sistemas para poder reducir de esta manera costos de producción tiempos de producción y a su vez reducir la contaminación hacia el medio ambiente.

El señor Ángel Sinchi se dedica a la fabricación de ladrillo macizo y teja, las cuales son principalmente utilizados en la construcción de edificaciones y viviendas, siendo así su producto altamente demandado en el mercado.

Los productos anteriormente mencionados tienen un largo proceso de producción que va desde obtener la materia prima, ser mezclado, moldeado, secado y finalmente ser quemado. Anteriormente el proceso de quemado se lo realizaba en un horno artesanal o tipo volcán, en la actualidad el señor Ángel Sinchi está en la implementación de mejoras en el proceso de quemado una de estas mejoras es la utilización de una cúpula para mejorar la eficiencia del horno y homogenizar la temperatura de quemado ya que el horno anterior al ser un horno destapado generaba pérdidas de los productos que estaban en la parte superior del horno debido a la alta gradiente de temperatura que se generaba.

## **3. Planteamiento del problema**

### **3.1. Antecedentes**

La invención del ladrillo supuso un gran avance en la historia de la arquitectura mundial, el ladrillo es uno de los materiales más usados en la construcción. La forma de fabricarlos y los tipos de hornos utilizados varían de un país a otro, dependiendo principalmente del legado cultural y de su economía.

En Ecuador, la fabricación de ladrillos sigue siendo principalmente un método artesanal, teniendo como principales desventajas la contaminación atmosférica, el uso irracional del suelo y la falta de eficiencia térmica. [1] Los ladrillos son, mayoritariamente, producidos usando hornos

artesanales con baja tecnificación, alimentados principalmente con leña (madera y sus residuos, a veces mezclados con otros tipos de biomasa) como combustible. En el proceso se emiten altas cantidades de gases de efecto invernadero (GEI) que generan contaminación al ecosistema, debido fundamentalmente a la baja tecnificación en la fabricación y uso de este tipo de hornos. La elaboración de los ladrillos tampoco cuenta con un control de calidad adecuado. [2]

Dentro del sector ladrillero es de suma importancia el estudio de mejoras en el proceso de obtención, así como la calidad del producto, ya que hoy en día el ladrillo ha venido siendo muy usado en la construcción de viviendas y de edificios, el mismo que puede poner en riesgo la vida de muchas personas, por su mal proceso de obtención resultando débiles o muy vitrificados.

### ***3.2. Definición del Problema***

La Muy Ilustre Municipalidad de Cuenca a través de un proyecto relacionado con la gestión ambiental y de acuerdo con los registros de la CGA (Comisión de Gestión Ambiental) y la EELA (Eficiencia Energética en ladrilleras) han identificado que en la ciudad existen 499 ladrilleras artesanales que se dedica a la cocción de ladrillos y tejas, mismas que por su baja eficiencia energética alrededor del 9,6% [4], ocasionada principalmente por el alto gradiente de temperatura dentro de la cámara de cocción, generan varios problemas, entre ellos está la presencia de un gran número de ladrillos y tejas en mal estado por la inadecuada cocción de los mismos, además de generar la emanación de gases de efecto invernadero al ambiente debido a que el material base (madera) utilizado como combustible no se combustiona completamente, ocasionando la generación principalmente de monóxido de carbono afectado directamente a la salud de los trabajadores, animales y plantas de la zona, así como importantes áreas y comunidades que se encuentra en zonas aledañas a las ladrilleras [5].

La investigación realizada por la auditoria ADVANCE señala que el 93% de ladrilleras son artesanales y apenas el 7% son semi-mecanizadas. El 100% de las ladrilleras artesanales utilizan hornos tradicionales y troncos de madera como combustible para la quema artesanal. [6]

### ***3.3. Problema general***

- ¿Se podrá mejorar la eficiencia energética de los hornos artesanales utilizados para la quema de tejas y ladrillos interviniendo en la cámara de cocción y de combustión?

### ***3.4. Problemas específicos***

- ¿Se podrá analizar la situación actual de los hornos artesanales para la cocción de ladrillos y tejas y estudiar el estado de la técnica?
- ¿Se podrá establecer una propuesta de mejora de la eficiencia energética para el horno artesanal del Sr. Ángel Sinchi?
- ¿Modificando el diseño de la cámara de cocción del horno se podrá disminuir la gradiente de temperatura de la misma?
- ¿Modificando el modelo de la cámara de combustión se podrá mejorar el rendimiento de la misma?
- ¿Se podrá analizar los costos de la implementación?

## **4. Objetivos**

### ***4.1 Objetivo General***

- Elaborar una propuesta de mejora de la eficiencia energética de un horno artesanal para la quema de ladrillos y tejas interviniendo en la cámara de cocción y de combustión.

### ***4.2 Objetivos Específicos***

- Analizar la situación actual de los hornos artesanales para la cocción de ladrillos y tejas y estudiar el estado de la técnica.
- Establecer propuestas de mejora de la eficiencia energética para el horno artesanal del Sr. Ángel Sinchi y seleccionar la mejor alternativa.
- Modificar el diseño de la cámara de cocción del horno para disminuir la gradiente de temperatura de la misma
- Modificar el modelo de la cámara de combustión para mejorar el rendimiento de la misma
- Analizar los costos de la implementación

## 5. Marco Teórico Referencial

### 5.1 Proceso de fabricación de ladrillos previo a la cocción en los hornos artesanales.

#### 5.1.1 Obtención de la materia prima

La explotación de la materia prima es realizada de forma manual empleando herramientas como picos, palas y carretillas convencionales. [8] La extracción de la materia prima para la fabricación de ladrillos (Arcilla y tierras arenosas) se realizan en lugares cercanos o lejanos a la fábrica (ver figura 1).



*Figura 1. Proceso de extracción manual de arcilla. Fuente:* [8]

#### 5.1.2 Selección y batido del material

Las arcillas deben ser reducidas a pequeñas partículas por lo que son disgregadas mediante herramientas manuales (picos, palas). Seguidamente se procede al retiro de pequeñas piedras o cualquier material extraño y simultáneamente son mezcladas con cantidades suficientes de agua y colocadas en noques para el batido. Normalmente el procesamiento de un lote de arcilla requiere una jornada de 6 a 8 horas de trabajo con pisoteo de animales. (ver figura 2) [8].



*Figura 2. Proceso de batido con animales como bueyes y caballos. Fuente:* [8]

### 5.1.3 Moldeo del ladrillo

Una vez que la arcilla ha sido batida en el noque con la humedad correcta, es trasladada en carretillas al secadero. Se prepara el piso adicionando pequeñas cantidades de aserrín para que absorba los excedentes de agua. El uso del aserrín varía independientemente de un sector a otro. Se coloca los moldes de madera sobre el piso y por llenado se van conformando los ladrillos. En forma inmediata se procede a retirar el molde y repetir el proceso (ver figura 3) [9].



*Figura 3. Moldeo de ladrillos. Fuente: [2]*

### 5.1.4 El perfilado o raspado del ladrillo

Transcurrido unos 15 días aproximadamente o cuando la arcilla moldeada ha perdido la cantidad suficiente de humedad se realiza el raspado de los filos y caras del ladrillo con el filo de un machete o pedazo de madera de borde regular, eliminando de esta manera cualquier irregularidad presentada en el proceso, raspando entre 500 y 600 ladrillos en una jornada de trabajo de 8 horas generalmente este proceso lo realizan las mujeres o niños de la familia. (ver figura 4) [8].



*Figura 4. Raspado de ladrillo actividad que realizan los niños o mujeres en su mayoría. Fuente: [8]*

### 5.1.5 Secado de ladrillo

La etapa del secado en ladrilleras artesanales se realiza por medios naturales mas no artificiales, esta etapa se efectúa principalmente para eliminar parte del agua que traer el ladrillo y que fue incorporado principalmente en la etapa de mezcla. Los ladrillos crudos recién moldeados se

depositan en canchas de secado o tendales que son espacios de terreno habilitado para este fin. Los ladrillos se secan aprovechando la acción natural del sol y el viento. Es recordable construir cobertizos techados para el secado. El tiempo que se requerirá para el secado de los ladrillos estará en función del clima y del tipo de ladrillo a secarse pudiendo variar entre cinco y siete días promedio en los ladrillos industriales con huecos y entre quine y treinta días para los ladrillos macizos. Esta etapa es de vital importancia en la industria ladrillera debido a que en esta etapa del proceso es donde se produce el mayor porcentaje de pérdidas de producción debido a fisuras, contracciones, demoras de producción, deformaciones. (ver figura 5) [8] [9].



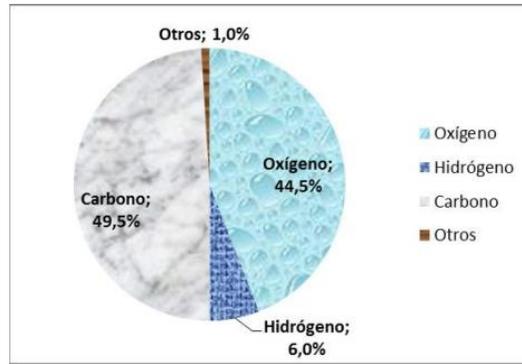
*Figura 5. Secado del ladrillo. Fuente: [8]*

## ***5.2 Proceso de cocción en los hornos artesanales.***

Es la fase más importante y más delicada del proceso de fabricación de ladrillos. En esta etapa se da a la pieza las propiedades deseadas, al mismo tiempo que pone de manifiesto si las etapas precedentes, preparación, moldeo y secado se han llevado correctamente. Los materiales que son sometidos a cocción pasan durante este proceso por diversos estados, ocurriendo complejas reacciones, regidas por su composición mineralógica y granulométrica. El proceso de cocción se lleva a cabo en hornos intermitentes de tipo circular o cuadrado a cielo abierto, es decir sin que los hornos sean cubiertos, solo se tapan al final para dejarlos enfriar cerrados y evitar la formación de fisuras en los ladrillos por disminución brusca de temperatura. [8] [9]

### ***5.2.1 Combustible y Proceso de Combustión***

Para la cocción el material utilizado generalmente suele ser la leña en forma de tucos o troncos, se adquieren en depositos existentes de las ciudades o en la misma zona de producción. La leña generalmente esta compuesta por la madera y la corteza, la composición química aceptada es la que se muestra a continuación (ver figura 6).



**Figura 6.** Composición química de la madera. **Fuente:** [8]

### 5.2.2 Humedad de la leña

La humedad es un punto considerable para el aprovechamiento energético de las leñas esto debido a que influye directamente en el poder calorífico de las mismas, la humedad puede evaluarse en base seca ( $h$ ) o en base húmeda ( $H$ ).

$$h = \frac{(Ph - Po)}{Po}$$

$$H = \frac{(Ph - Po)}{Po} \cdot 6$$

Donde :

$$Ph = \text{peso humedo}$$

$$Po = \text{peso de la misma leña luego de ser secada a } 100 + 5^{\circ}C$$

Cuanto menor sea la humedad mayor sera su poder calorifico debido a que cuanto mas humedad tiene la madera menos materia seca hay por unidad de masa, es decir si la madera tiene mayor cantidad de agua que se debe evaporar cuando se realice el proceso de combustion invertira parte del calor producido en evaporar dicha agua.

Durante este proceso se pueden observar cuatro etapas las cuales son :

- I. Pre calentamiento
- II. Calentamiento
- III. Maduracion
- IV. Enfriamiento

Cada etapa se caracteriza por los rangos de temperatura en cada una de ellas como se observa (ver tabla 1).

### 5.2.3 Rangos de temperatura para un horno ladrillero

Tabla 1. Etapas para la cocción de ladrillos. Fuente: [18]

ETAPA	RANGO DE TEMPERATURA	OBSERVACIÓN
Pre calentamiento	Temperatura ambiente hasta 150°C	Se requiere poco aire y combustible (elimina la humedad natural en la arcilla)
Calentamiento	Desde 150°C hasta los 650°C	Se aumenta el combustible y el caudal del aire para alcanzar una temperatura elevada (elimina la humedad que tiene la arcilla al mezclarla químicamente)
Cocción	Entre los 650°C y 1000°C	El horno está en su punto de cocción como se observa en la figura 7.



Figura 7. Cocción en un horno circular. Fuente: [8]

En la etapa de cocción tiene lugar la conchura que quiere decir que los óxidos de hierro se unen con la alúmina y con la sílice formando una especie de vitrificación que culmina cuando la alúmina se ha transformado en silicato

### 5.2.4 Vitrificación

La vitrificación es el proceso en el cual la materia sufre un reblandecimiento de algunos componentes de la arcilla y depende de la cantidad de fundentes que se encuentran en la arcilla, los cuales al llegar a la temperatura ideal en la cocción se compenentran y mezclan químicamente lo cual brinda al ladrillo la consistencia y dureza necesaria para resistir las condiciones atmosféricas adversas.

Para obtener una vitrificación existen dos formas:

- Tiempo máximo con temperatura mínima: es la forma adecuada debido a que el proceso de pérdida de humedad, secado y vitrificación se da de forma progresiva.
- Tiempo mínimo con temperaturas máximas: se la debe realizar siempre y cuando el secado sea óptimo, sin embargo, existe la posibilidad de que la pieza se perjudique debido a la contracción muy rápida que sufre.

### ***5.2.5 Características para una cocción perfecta.***

A continuación, se presentan algunas de las características fundamentales que se toman en cuenta para obtener una cocción que minimice al máximo el producto dañado.

- Velocidad máxima en el calentamiento de la pieza
- Temperatura mínima de cocción en la fase de vitrificación
- Temperatura máxima para evitar deformaciones

De las características anteriormente mencionadas se puede determinar las curvas de las temperaturas del horno en función del tiempo

### ***5.2.6 Tiempo de Cocción***

La conchura necesita un tiempo extenso, es decir el tiempo suficiente para que se realicen todas las reacciones a presentarse en el producto, se debe considerar que el material a calentar es poco conductor de calor, por lo que es necesario que el calor se distribuya de manera uniforme a cada pieza a quemar.

El tiempo que lleva quemar los ladrillos en un horno artesanal va en un rango de 15 a 20 horas de quema continua.

### ***5.2.7 Enfriamiento y descarga del horno***

En la etapa de enfriamiento la temperatura desciende desde la de cocción hasta la normal, esto debe realizarse paulatinamente (de 500°C a 600°C), especialmente en los hornos cerrados, para garantizar dureza, tenacidad y colorado de las piezas vitrificadas. [13]

Por el contrario, un enfriamiento rápido los hace frágiles, hasta el punto de que si han sido enfriados con demasiada premura se rompen a veces espontáneamente, sin la intervención de agentes mecánicos exteriores (Anfalit, 2002).

El enfriamiento del material puede durar hasta 10 días, luego de los cuales se procede a descargar el horno directamente al medio de transporte para evitar que se duplique los esfuerzos de carga y descarga, o puede permanecer cargado hasta la venta final (ver figura 8) [8].



*Figura 8. Descarga del producto. Fuente: [8]*

### **5.2.8 Almacenamiento y Comercialización**

Frecuentemente, el proceso de descarga del horno se la realiza directamente al camión de transporte por lo que no se dispone de espacios de almacenamiento del producto terminado. En cuanto a la comercialización, los artesanos mayoritariamente la realizan con personas negociantes del producto que se encargan del transporte final, sin descartar del posible negocio directo con el consumidor final. [8] [9]

## **5.3 Proceso de fabricación de tejas y su cocción en los hornos artesanales.**

### **5.3.1 Moldeo de la teja**

Se coloca en un pequeño estanque la materia prima para batir adicionalmente se agrega agua hasta obtener una masa suave y homogénea, este batido se lo realiza por un periodo de aproximadamente 4 horas, una vez terminado este proceso se pone a secar la mezcla para que su consistencia sea moldeable, una vez el material tenga una buena consistencia se forma montículos con el material y se realiza una mezcla final, para dar forma al material se coloca sobre un molde de madera conocido como tortuga que da la forma a la teja, se retiran algunas piedras que pudieron quedar en los procesos anteriores, y las tejas formadas se colocan sobre un galpón y se deja secar por unos días hasta que el producto se pueda manipular, al final se retira el exceso de material de los filos para que queden regulares (ver figura 9).



*Figura 9. Moldeo de la teja. Fuente: Autores*

### **5.3.2 Secado de la teja**

Esta etapa es muy parecida a la del ladrillo ya que se lo realiza por medios naturales, y esta etapa es para eliminar parte del agua que tiene la teja el cual fue incorporado en el proceso de mezclado, una vez la teja tenga el acabado deseado en el proceso de moldeo se deja secar en el mismo lugar por 15 o 20 días dependiendo del clima para que pierdan la mayor parte de contracción siendo esto entre un 15 a 20%

### **5.3.3 Cocción de la teja**

#### **5.3.3.1 Primera quema.**

Una vez la teja ha perdido la mayor cantidad de agua se procede a quemar por unas 8 horas a una temperatura de 650 C para eliminar el resto de agua, obteniendo así una teja bizcochada, lista para para el proceso de vidriado (ver figura 10).



*Figura 10. Acomodamiento de las tejas. Fuente: Autores*

### **5.3.3.2 Vidriado**

Cuando la teja bizcochada está fría, se procede a vidriar la misma, para lo cual usan un vidrio crudo que es un compuesto formado por óxido de plomo y sílice en cantidades previamente establecidas que forman una suspensión, el mismo que se coloca sobre la teja con ayuda de un recipiente.

El óxido de plomo posee un punto de fusión muy bajo (550-600° C), brindando al producto final un elevado brillo. Aunque durante la quema se puede conducir a la formación del plomo metálico el cual es muy tóxico

### **5.3.3.3 Segunda quema**

En este proceso se lo realiza por un periodo de 22 horas a una temperatura de 850°C, para lograr que el vidrio crudo se vitrifique sobre la teja dándoles un acabado brillante e impermeable, además de aumentar su resistencia mecánica, quedando así lista para la venta (ver figura 11).



*Figura 11. Vidriado de la teja. Fuente: Autores*

## **5.4 Algunos detalles de los hornos artesanales y la normativa establecida**

### **5.4.1 Hornos de tipo volcán (tradicional).**

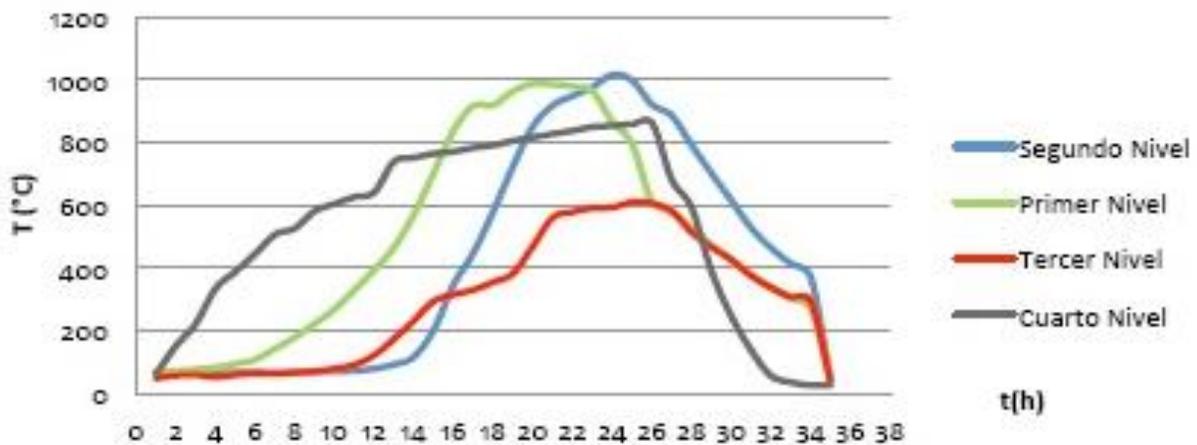
Los hornos de tipo volcán poseen una forma rectangular, cuya bóveda se encuentra en la parte inferior y es el lugar donde se colocar el combustible que en este caso será madera, este horno posee su parte superior completamente destapada, lo cual genera grandes pérdidas de calor. [10]

Las temperaturas de operación en este tipo de hornos van desde los 600°C hasta los 1000°C y su capacidad para la quema pueden llegar a ser de hasta 4000 ladrillos y 1500 tejas. En la figura 12 se puede observar los puntos de temperatura que usualmente se pueden tomar en este tipo de hornos y en la figura 13 se presenta el perfil de temperaturas obtenidos en un proceso total de quema, en

donde se puede identificar la heterogeneidad y los grandes gradientes de temperatura que limitan tener un proceso adecuado de quema.



**Figura 12.** Termocuplas en distintos puntos del horno. **Fuente:** [10]

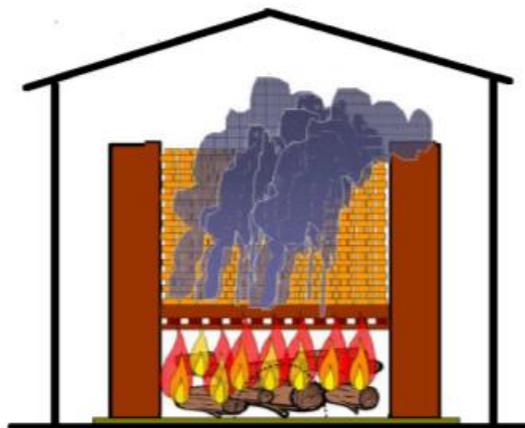


**Figura 13.** Temperaturas en diferentes puntos del horno. **Fuente:** [10]

El principio operativo consiste en quemar leña en su bóveda y que el calor emitido suba, a través de los ladrillos, permitiendo que escape calor en gran cantidad hacia el exterior. El ciclo completo de producción en este tipo de hornos es de 8 horas para cargar los ladrillos, de 15 a 20 horas para el proceso de quemado (cocción) y se deja de 3 a 10 días para el proceso de enfriado teniendo un tiempo estimado de trabajo de 12 días aproximadamente [10].

Este tipo de hornos se caracterizan por el amplio gradiente de temperatura que se genera entre la parte inferior y la parte superior del mismo, mediciones de temperatura en estos tipos de horno

arrojan valores promedios cercanos a los 1000°C en la cámara de combustión y base del horno mientras que en la parte superior alcanza los 450°C. Lo dicho anteriormente genera una baja eficiencia en la cocción generando un mayor consumo de combustible lo que incrementara los costos operativos y un considerable impacto ambiental. (ver figura 14).



**Figura 14.** Temperaturas en diferentes puntos del horno. Tomado de “Estudio de definición de tipo de horno apropiado para el sector ladrillero”. Fuente: [22]

#### 5.4.2 Normativa

##### **INEN 297**

Esta normativa tiene por objetivo establecer los requisitos que deben cumplir los ladrillos cerámicos empleados en la construcción, el alcance de la misma solo comprende los ladrillos cerámicos fabricados de arcilla moldeada y cocida. No comprende a los ladrillos refractario o fabricados con materiales sillico-cacareos

##### **INEN 294-295**

Esta normativa trata de la determinación de la resistencia a la compresión y a la flexión, en la tabla se puede observar los requerimientos establecidos por la normativa. (ver tabla 2 y 3).

**Tabla 2.** Características técnicas del ladrillo. Fuente: [17]

LADRILLO	NORMA	RANGO
Capacidad Absorción de Humedad	NTE INEN 297	Máximo de 25%
Flexión	NTE INEN 295, 1978	Mínimo 2 Mpa./20 kg/cm <sup>2</sup>
Compresión	INEN 294	Mínimo 6 Mpa./61 kg/cm <sup>2</sup>

Conductividad Térmica	ISO 8302	0,002 a 2,5 W/m°K
-----------------------	----------	-------------------

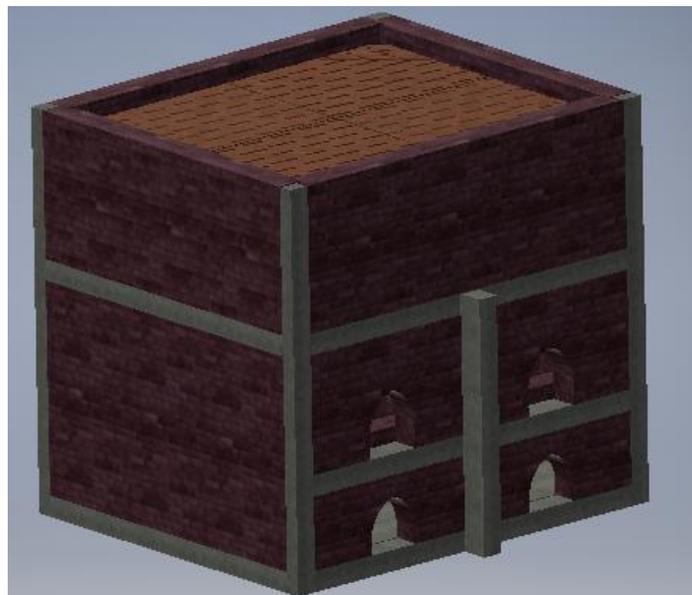
**Tabla 3.** Características técnicas de la teja. **Fuente:** [18]

TEJA	NORMA	RANGO
Capacidad Absorción de		
Humedad	NTE INEN 297, 1978	Máximo de 25%
Flexión	NTE INEN 990,1982	Mínimo 80 kg/cm <sup>2</sup>
Conductividad térmica	ISO 8302	0,002 a 2,5 W/m°K

## 6. Situación actual del horno artesanal del Sr. Ángel Sinchi – Caso de aplicación para el análisis.

### 6.1. Descripción general del horno.

Este tipo de horno tiene forma rectangular, con una cámara de combustión en la parte inferior en donde se coloca el combustible, y un cenicero para filtrar el material combustionado, la parte superior de este horno esta destapada, lo cual genera mucha perdida de calor (ver figura 15).



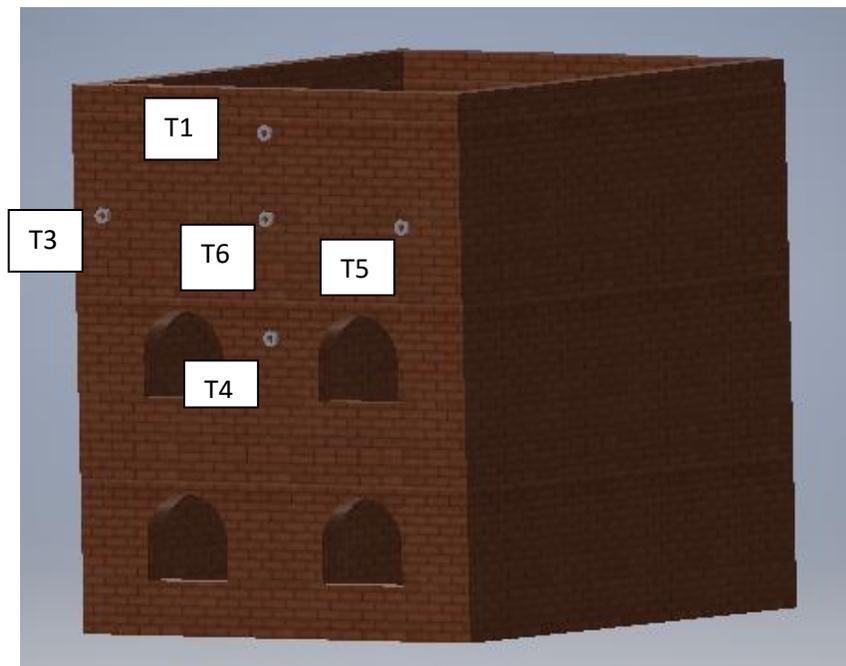
**Figura 15.** Esquema del horno actual. **Fuente:** Autores

El principio operativo consiste en quemar leña (principal combustible es el eucalipto) en su cámara de combustión, para que el calor emitido suba a través de los ladrillos y los cocione al llegar a la temperatura adecuada. El ciclo completo de producción en el horno artesanal incluye 8 horas para

cargar los ladrillos, 15 – 20 horas para el proceso de cocción y hasta 3 días para el proceso de enfriamiento, la temperatura de operación va de 400°C a 550°C, en la cámara de cocción.

### **6.2. Perfil de temperaturas del horno artesanal del Sr. Ángel Sinchi.**

Para obtener los datos de partida y realizar el balance energético del horno artesanal se utilizó un sistema de adquisición de datos de temperatura en los distintos puntos del horno; los termopares utilizados para la medición de temperatura se montan en posiciones representativas como se observa en la figura 16, a fin de registrar las temperaturas internas presentadas en el proceso de cocción.

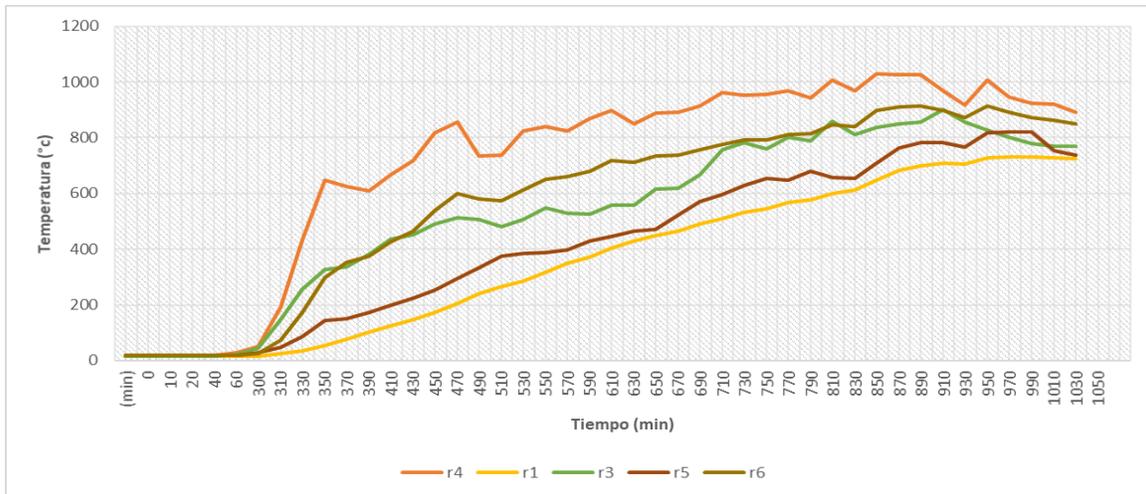


**Figura 16.** Esquema de la ubicación de la termocupla. **Fuente:** Autores

En el horno, se programó un software de adquisición de datos que registra las temperaturas en intervalos de tiempo de 20 minutos.

#### **6.2.1 Perfil de temperatura de calentamiento en el horno en la parte frontal**

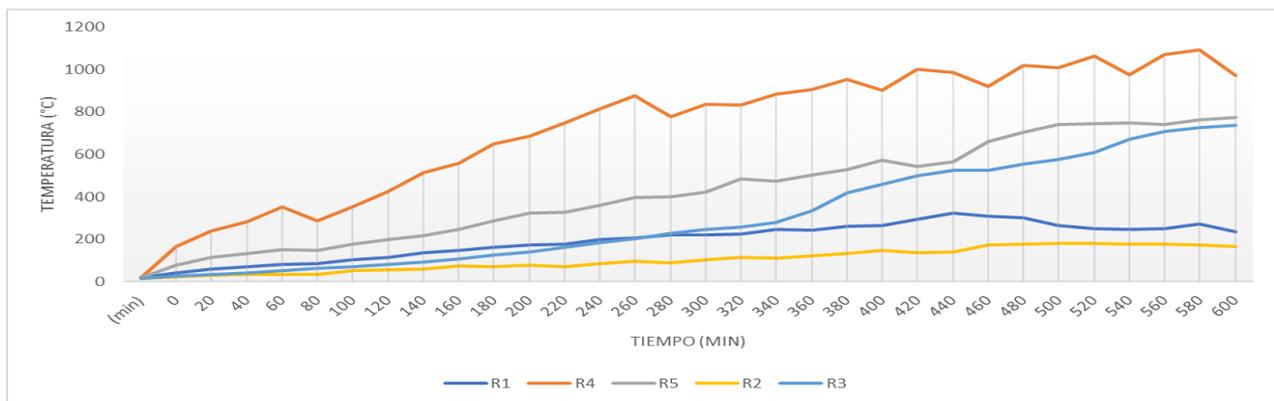
El proceso de registro de datos inició el día martes 2 de febrero del 2021 a las 04:53:09, monitoreando en primera instancia en varios puntos del frente del horno, desde el inicio del proceso de combustión de la leña en la parte inferior del horno, hasta el final del proceso de cocción del mismo día a las 22:20:00. El monitoreo en estos puntos tuvo una duración de 17 horas obteniéndose un perfil de temperaturas (ver figura 17).



**Figura 17:** Perfil de temperaturas del horno actual. (Frontal). **Fuente:** Autores

### 6.2.2 Perfil de temperatura de calentamiento en el horno en la parte posterior

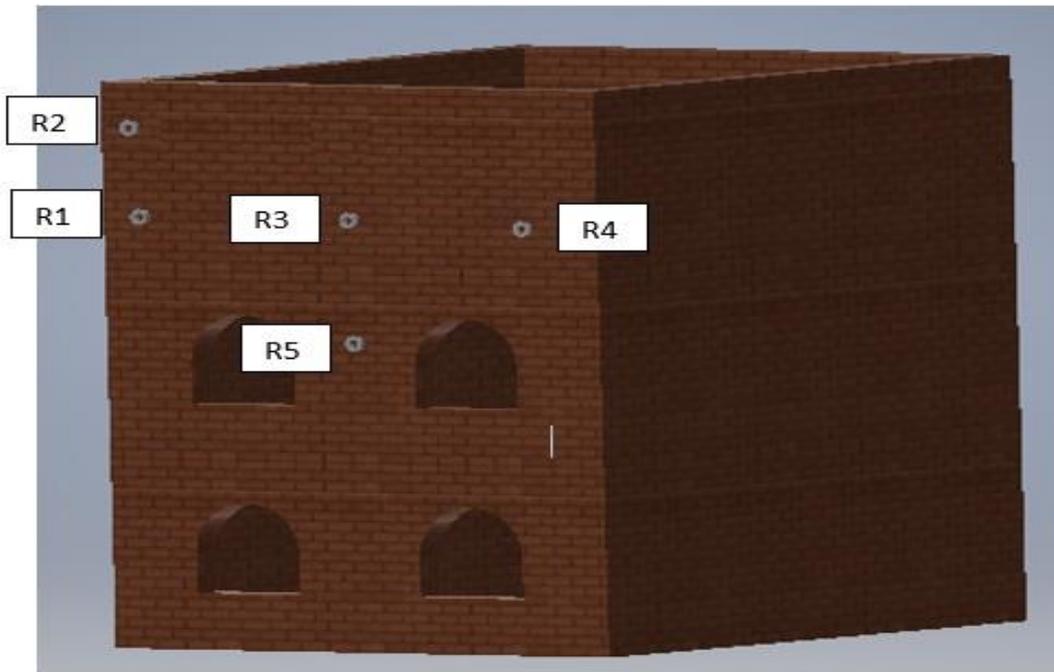
El día jueves 25 de febrero del 2021 a las 05:00:00, se tomó nuevamente un registro de datos, las termocupas se ubicaron en la misma posición de la toma anterior con la única diferencia que fueron ubicadas en la parte de posterior del horno, de igual manera se registró los datos en intervalos de 20 minutos, hasta las 23:00:00, el proceso termino el día 25 de febrero con una duración de 18 horas (ver figura 18).



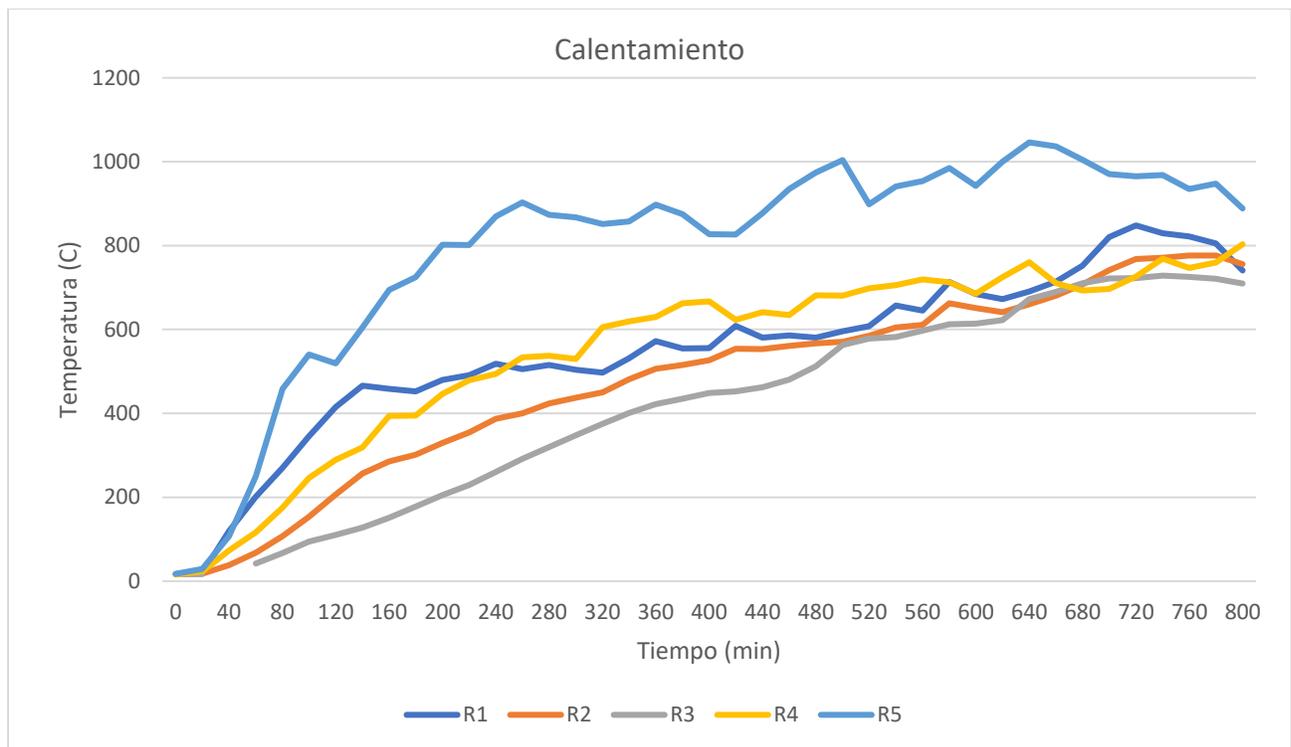
**Figura 18.** Perfil de temperaturas del Horno actual. (Posterior). **Fuente:** Autores

### 6.2.3 Perfil de temperatura de calentamiento y enfriamiento en el horno en la parte frontal.

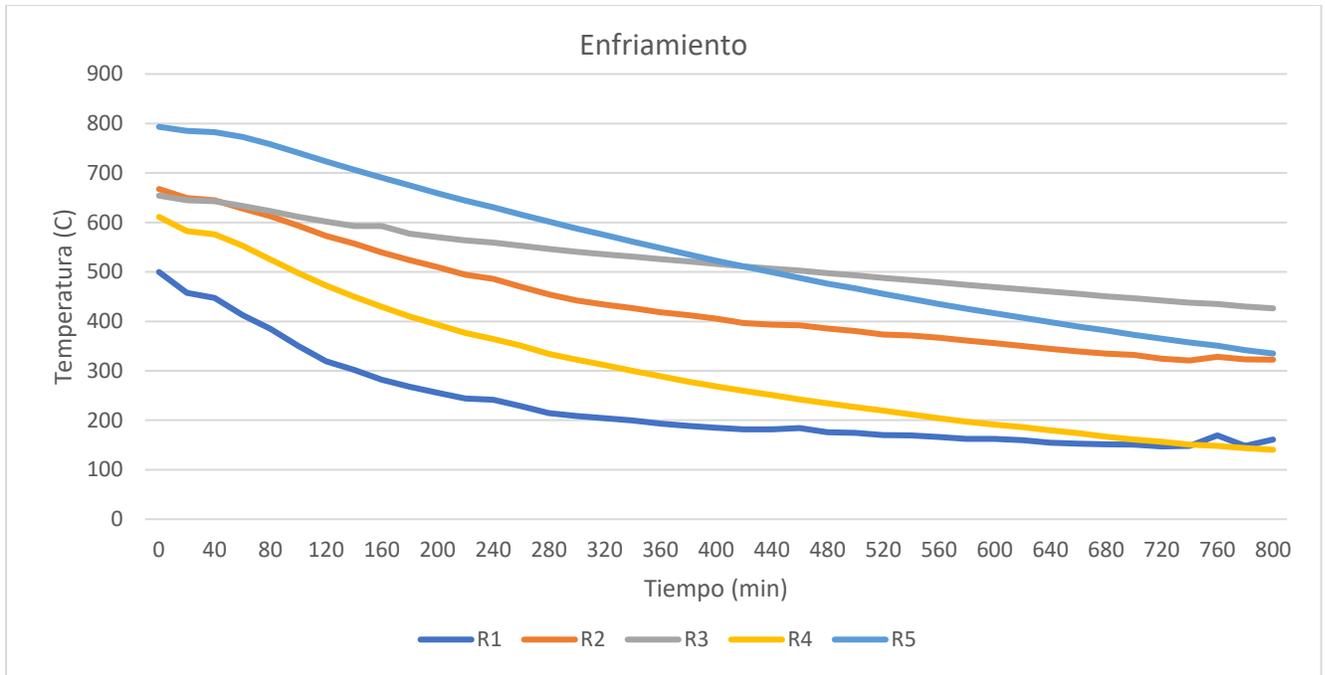
El día jueves 23 de marzo a las 05:00:00 a.m. del 2021, se tomó nuevamente un registro de datos, en la parte frontal del horno, con intervalos de 20 minutos, esta vez incluyendo el ciclo de enfriamiento del horno (ver figura 19, 20 y 21).



**Figura 19.** Esquema de la ubicación de las termocuplas. **Fuente:** Autores.



**Figura 20.** Perfil de temperaturas de calentamiento del Honro Tradicional. **Fuente:** Autores.



**Figura 21.** Perfil de temperaturas de enfriamiento del Horno Tradicional. **Fuente:** Autores.

### 6.3. Balance energético del horno actual.

El balance energético del horno tiene como objetivo estimar el intercambio de calor, en general para mejorar los procesos térmicos de los hornos hay que tener en cuenta la energía suministrada, y ver el consumo en las diferentes etapas del proceso, este análisis de determina a partir de la siguiente ecuación:

$$Q_t = Q_o + Q_{cm} + Q_{wm} + Q_{dp} + Q_{wc} + Q_{ac} + Q_{wa} + Q_i + Q_{pa} + Q_h \quad (1)$$

Donde:

$Q_t$  = Calor total suministrado

$Q_o$  = Calor acumulado en la mampostería

$Q_{cm}$  = Calor por carga del material a cocer

$Q_{wm}$  = Calor para sacar la humedad del material

$Q_{dp}$  = Calor necesario para la descomposición química de la arcilla

$Q_{wc}$  = Calor por humedad de la leña

$Q_{ac}$  = Calor por agua formada en la combustión

Qwa = Calor por humedad de aire

Qi = Calor por inquemados

Qpa = Pérdida de calor por las paredes del horno

Qh = Calor por humos

Se busca el aporte de calor que se produce en los productos, tanto en las paredes como en la chimenea, garantizando una mayor eficiencia térmica.

### 6.3.1 Calor suministrado

Es la energía liberada por la combustión de la leña y es igual al poder calorífico de la leña por el consumo de carbón durante el proceso de cocción.

$$Qh = Pc . mc \quad (2)$$

$$Qh = 131,4 \times 10^6 \text{ kJ}$$

*Tabla 4. Datos para calcular el Calor suministrado. Fuente: Autores*

DESCRIPCIÓN	VALOR	UNIDAD
Pc Poder calorífico de la leña	15000	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$
mc Masa de combustible	8760	kg

### 6.3.2 Acumulación de calor en mampostería

Una vez obtenido el calor de entrada se procede a determinar la acumulación de calor en la mampostería la cual será el resultado del calor acumulado en las paredes (Qpa) y el calor acumulado en el piso (Qpis), aquí utilizaremos la densidad volumétrica del ladrillo ( $\rho_0$ ), el calor específico del mismo ( $C_p$ ), el volumen total de las paredes del Horno ( $V_{pa}$ ) y del piso ( $V_{pis}$ ) del mismo

Para evaluar el calor sensible de los materiales se toman las temperaturas máximas durante las pruebas realizadas en el Horno artesanal en el mes de marzo y abril

Tmpa = Temperatura media de la pared del Horno (°C)

$$T_{mpa} = \frac{T3 \text{ max} + T7 \text{ max}}{2} \quad (3)$$

$$T_{mpa} = 400,7455 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Tmpis = Temperatura media del piso del Horno ( $^{\circ}\text{C}$ )

$$T_{mpis} = \frac{T_{2\max} + T_{6\max}}{2} \quad (4)$$

$$T_{mpis} = 598,075 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

**Tabla 5.** Datos de las temperaturas. **Fuente:** Autores

DESCRIPCIÓN	VALOR	UNIDAD
T3max	751,231	$^{\circ}\text{C}$
T7max	50,26	$^{\circ}\text{C}$
T2max	1046	$^{\circ}\text{C}$
T6max	150,15	$^{\circ}\text{C}$

Qo= Calor Total Acumulado en la mampostería

$$Q_o = Q_{pa} + Q_{pis} \quad (5)$$

$$Q_o = 14 \times 10^6 \text{ kJ}$$

Qpa= Calor Acumulado en las paredes

$$Q_{pa} = \rho \cdot C_p \cdot V_{pa} \cdot T_{mpa} \quad (6)$$

$$Q_{pa} = 7015819 \text{ kJ}$$

Qpis= Calor Acumulado en el piso

$$Q_{pis} = \rho \cdot C_p \cdot V_{pis} \cdot T_{mpis} \quad (7)$$

$$Q_{pis} = 6983328,321 \text{ kJ}$$

La densidad ( $\rho$ ) y el calor específico ( $C_p$ ) se la toma a una temperatura media de 24°C (ver anexo 6).

**Tabla 6.** Datos para el calor acumulado en la mampostería. **Fuente:** Autores

DESCRIPCIÓN		VALOR	UNIDAD
$\rho$	Densidad volumétrica del ladrillo del horno	1922	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
$C_p$	Calor específico del ladrillo del horno	0,79	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg } ^\circ\text{K}}$
$V_{pa}$	Volumen total de la pared del horno	11,53	$\text{m}^3$
$V_{pis}$	Volumen del piso del horno	7,69	$\text{m}^3$
$T_{mpa}$	Temperatura media de la pared del horno	400,7455	$^\circ\text{C}$
$T_{mpis}$	Temperatura media del piso del horno	598,075	$^\circ\text{C}$

### 6.3.3 Calor por carga del material a cocer

#### *Humedad de los ladrillos y Tejas*

Para determinar la humedad de los ladrillos fue necesario la toma de datos de los productos (Ladrillo y Teja) antes y después de ser quemados, los datos medidos se los puede revisar (ver tabla 7,8,9,10).

**Tabla 7.** Peso de los ladrillos cocido. **Fuente:** Autores

Nº	VALOR	UNIDAD
1	3,9	kg
2	3,8	kg
3	3,9	kg
4	4	kg
5	4	kg
6	3,9	kg
7	4	kg
8	4	kg
9	4	kg
10	3,8	kg

**Tabla 8.** *Peso de los ladrillos Crudos. Fuente: Autores.*

<b>Nº</b>	<b>VALOR</b>	<b>UNIDAD</b>
1	4,7	kg
2	4,5	kg
3	4,4	kg
4	4,5	kg
5	4,4	kg
6	4,7	kg
7	4,2	kg
8	4,7	kg
9	4,2	kg
10	4,5	kg

**Tabla 9.** *Peso de las tejas Cocidas. Fuente: Autores*

<b>Nº</b>	<b>VALOR</b>	<b>UNIDAD</b>
1	0,917	kg
2	0,926	kg
3	0,914	kg
4	0,946	kg
5	0,897	kg
6	0,916	kg
7	0,939	kg
8	0,897	kg
9	0,897	kg
10	0,933	kg

**Tabla 10.** *Peso de las tejas Crudas. Fuente: Autores*

<b>Nº</b>	<b>VALOR</b>	<b>UNIDAD</b>
1	1,19	kg
2	1,1	kg
3	1,06	kg
4	1,014	kg
5	0,98	kg
6	1,17	kg
7	1,004	kg

8	1,027	kg
9	1,003	kg
10	1,023	kg

**Porcentaje de Humedad de la Teja**

$$Y_{mT} = \left( \frac{mhT - MsT}{Msb} \right) \cdot 100\% \quad (8)$$

$$Y_{mT} = 0,139949109 \%$$

**Tabla 11.** Datos para determinar la Humedad de la Teja. **Fuente:** Autores

DESCRIPCIÓN		VALOR	UNIDAD
mh T	Masa húmeda de las tejas	1,0571	kg
Ms T	Masa seca de las tejas	0,9182	kg

**Porcentaje de humedad de los Ladrillos**

$$Y_{mL} = \left( \frac{mhL - Msl}{Msl} \right) \cdot 100\% \quad (9)$$

$$Y_{mL} = 0,15127423 \%$$

**Tabla 12.** Datos para determinar la Humedad del Ladrillo. **Fuente:** Autores

DESCRIPCIÓN		VALOR	UNIDAD
mh L	Masa húmeda de los Ladrillos	4,48	kg
ms L	Masa seca de los Ladrillos	3,93	kg

**Masa seca de las tejas y los ladrillos.**

Para la obtención de la masa seca de ladrillo y tejas es necesario saber la cantidad total de ladrillos y la cantidad total de tejas que van a ser suministradas por quema en este caso es un total de 750 ladrillos y 8000 tejas respectivamente.

### *Masa seca del Ladrillo*

$$m_{seL} = (1 - y_{mL}) * m_{tL} \quad (10)$$

$$m_{seL} = 2889,770992 \text{ kg}$$

### *Masa seca de la Teja*

$$m_{seT} = (1 - y_{mT}) * m_{tT} \quad (11)$$

$$m_{seT} = 7177,504073 \text{ kg}$$

*Tabla 13. Datos para determinar la masa seca del ladrillo y la teja. Fuente: Autores*

DESCRIPCIÓN		VALOR	UNIDAD
ymL	Humedad del ladrillo	0,139949109	%
ymT	Humedad de la teja	0,151274232	%
mtL	Masa total de los Ladrillos	3360	kg
mtT	Masa total de las tejas	8457	kg

#### **6.3.4 Calor por carga del material a cocer.**

A continuación, procedemos a obtener el calor por carga del material a cocer, en donde será necesario obtener también la masa seca de ladrillo ( $m_{seL}$ ) y la masa seca de las tejas ( $m_{seT}$ ), el calor específico del material ( $C_p$ )

$$Q_{cm} = Q_{cmL} + Q_{cmT} \quad (12)$$

$$Q_{cm} = 8,2 \times 10^6 \text{ kJ}$$

#### **Calor por carga a cocer de Ladrillo**

$$Q_{cmL} = m_{seL} \cdot C_p \cdot (T_{max} - T_{min}) \quad (13)$$

$$Q_{cmL} = 2339544,609 \text{ kJ}$$

### *Calor por carga a cocer de la teja*

$$Q_{cmT} = m_{seT} \cdot C_p \cdot (T_{max} - T_{min}) \quad (14)$$

$$Q_{cmT} = 5810872,559 \text{ kJ}$$

*Tabla 14. Datos para determinar el calor por carga a cocer. Fuente: Autores*

DESCRIPCIÓN		VALOR	UNIDAD
mse L	Masa seca de los Ladrillos	2889,77099	kg
mse T	Masa seca de las tejas	7177,50407	kg
Cp	Calor específico del ladrillo	0,72	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{K}}$
Tmáx	Temperatura de salida de los materiales	1046	°C
Tmín	Temperatura de entrada de los materiales	21,196	°C

### *Calor para sacar la humedad del material*

El material a conocer en el horno debe ser calentado a una temperatura predeterminada, parte de este calor es necesario para evaporar el agua del proceso que se ha quedado incluso después del proceso de secado.

$$Q_{wm} = Q_{wmb} + Q_{wmL} \quad (15)$$

$$Q_{wm} = 4,4 \times 10^6 \text{ kJ}$$

### *Calor para sacar la humedad del Ladrillo*

$$Q_{wmL} = m_{tL} \cdot y_{mL} \cdot (h_g - u_m) \quad (16)$$

$$Q_{wmL} = 1177359,389 \text{ kJ}$$

### *Calor para sacar la humedad de la Teja*

$$Q_{wmT} = m_{tT} \cdot y_{mT} \cdot (h_g - u_m) \quad (17)$$

$$Q_{wmT} = 3203101,142 \text{ kJ}$$

La entalpia del vapor de agua ( $h_g$ ) se lo obtuvo mediante una interpolación. (ver anexo 7).

**Tabla 15.** Datos para determinar el calor para sacar la humedad. **Fuente:** Autores

DESCRIPCIÓN		VALOR	UNIDAD
mt L	Masa total de los Ladrillos	3360	kg
mt T	Masa total de las tejas	8456,8	kg
ym L	Humedad del Ladrillos	0,13994911	%
ym T	Humedad de la teja	0,15127423	%
hg	Entalpía del vapor de agua	2587,75	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$
um	Energía interna del agua dentro del material a la temperatura de 20°C	83,95	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

### 6.3.5 Calor necesario para la descomposición de la arcilla

Hace referencia al calor necesario para descomponer la composición química de los carbonatos  $\text{CaCO}_3$  y la evaporación del agua de la arcilla presentes en la arcilla, Para obtener estos valores necesitamos el calor específico para la combustión del  $\text{CaCO}_3$ .

$$Qdp = QdpL + QdpT \quad (18)$$

$$Qdp = 4 \times 10^6 \text{ kJ}$$

*Calor necesario para descomponer la arcilla del Ladrillo*

$$QdpL = mseL \cdot Cp \quad (19)$$

$$QdpL = 1137298,27 \text{ kJ}$$

*Calor necesario para descomponer la arcilla de la Teja*

$$QdpT = mseT \cdot Cp \quad (20)$$

$$QdpT = 28244778,5 \text{ kJ}$$

**Tabla 16.** Datos para determinar el calor para sacar la humedad. **Fuente:** Autores

DESCRIPCIÓN	VALOR	UNIDAD
-------------	-------	--------

mse L	Masa seca de los ladrillos	2889,77	kg
mse T	Masa seca de las tejas	7177,50	kg
Cp	Calor específico por la combustión del CaCO3	393,56	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

### 6.3.6 Calor por humeada de la leña

Cuando la leña se quema se puede asumir que la humedad contenida en ella es calentada a la temperatura de ebullición de 100°C y finalmente recalentada a temperatura de los gases de escape porque es una pérdida de calor debida a la humedad presente en la misma.

El valor de la entalpia (hga) del vapor de agua es 2575,336 kJ/kg que se obtuvo luego de haber realizado una interpolación (ver anexo 8).

$$Q_{wc} = mL \cdot yL \cdot (hg \cdot uc) \quad (21)$$

$$Q_{wc} = 83 \times 10^3 \text{ kJ}$$

**Tabla 17.** Datos para determinar el calor por humedad de la leña. **Fuente:** Autores

DESCRIPCIÓN		VALOR	UNIDAD
mL	Masa de Leña consumida en cada período de tiempo	166,5	kg
yL	Humedad de la leña	0,2	%
hg	Entalpía del vapor de agua a la temperatura de los gases de la chimenea	2575,336	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$
uc	Energía interna del agua en la Leña	83,95	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

### Calor por agua formada en la combustión.

Este es el calor absorbido por el agua producto de la combustión con el hidrogeno del combustible, para efectos de calentarse, evaporarse y sobrecalentar hasta la temperatura a la cual son expulsados los humos. A continuación, se procede a obtener el calor por agua formada en la combustión en donde utilizaremos la masa de leña consumida por periodo de tiempo (mcl), la masa de agua formada en la combustión (mac), la entalpia del vapor de agua en todo el proceso, el valor de la entalpia (hg) del vapor de agua es 2575,336 kJ/kg que se obtuvo luego de haber realizado una

interpolación de los datos (ver anexo 9) y la energía interna del agua dentro del material a la temperatura de 20 °C es un dato bibliográfico [23]

**La masa del agua formada en la combustión.**

$$mac = 9 * (H2 - \frac{O2}{8}) \quad (22)$$

$$mac = 0,02691$$

**Tabla 18.** Porcentaje de Hidrogeno y de Oxigeno presente en la Leña. **Fuente:** Autores

DESCRIPCIÓN		VALOR	UNIDAD
H2	Porcentaje de hidrógeno en el carbón	0,04696	%
O2	Porcentaje de oxígeno en el carbón	0,35176	%

$$Qac = mcu . mac . (hg - um) \quad (23)$$

$$Qac = 11,2 \times 10^3 \text{ kJ}$$

**Tabla 19.** Datos para determinar el calor por agua formada en la combustión. **Fuente:** Autores

DESCRIPCIÓN		VALOR	UNIDAD
mcu	Masa de Leña consumida por período de evaluación	166,5	kg
mac	Masa del agua formada en la combustión	0,02691	Kg
hg	Entalpía del vapor de agua en todo el proceso	2575,336	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$
um	Energía interna del agua dentro del material a la temperatura de 20 °C	83,95	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

### 6.3.7 Calor por humedad del aire

Es el calor que se requiere para eliminar la humedad que está presente en el aire y este dependerá de las condiciones atmosféricas del lugar. Para obtener este calor es necesario la masa de humedad del aire (mwa), masa de aire seco (mrm), la masa de la leña consumida en cada periodo de tiempo y la entalpia del agua (hwa) que depende de la humedad relativa en la ciudad de cuenca y la temperatura del bulbo seco.

***Oxígeno teórico en volumen.***

Para determinar la cantidad del oxígeno teórico en volumen para la combustión de la leña es necesario obtener la composición química de la leña (ver tabla 20).

**Tabla 20.** Composición química de la leña. Fuente: [15]

COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA LEÑA		
C	0,39232	%
H <sub>2</sub>	0,04696	%
S	0,0008	%
O <sub>2</sub>	0,35176	%
N <sub>2</sub>	0,0003	%
W	0,2	%

$$Oov = \left( \frac{C}{12} + \frac{H2}{4} + \frac{S - O2}{32} \right) * 22.4 \frac{m^3 \text{ n } O2}{kg \text{ Comb}} \quad (24)$$

$$Oov = 0,7496346 \frac{m^3 \text{ n } O2}{kg \text{ Comb}}$$

***El volumen de humos para el oxígeno teórico.***

$$VgOo = \left( \frac{C}{12} + \frac{H2}{3} + \frac{S}{32} + \frac{N2}{28} + \frac{W}{18} \right) * 22.4 \frac{m^3 \text{ n } \text{humos}}{kg \text{ Comb}} \quad (25)$$

$$VgOo = 1,33265422 \frac{m^3 \text{ n } \text{humos}}{kg \text{ Comb}}$$

***El volumen de humos para el oxígeno teórico.***

$$VgAo = VgOo + 3.76 * Oov \frac{m^3 \text{ n } \text{humos}}{kg \text{ Comb}} \quad (26)$$

$$VgAo = 4,151280569 \frac{m^3 \text{ n } \text{humos}}{kg \text{ Comb}}$$

**Tabla 21.** Datos para obtener el volumen de humos para el oxígeno. Fuente: Autores

DESCRIPCIÓN	VALOR	UNIDAD
Vg Oo Volumen de humos para el oxígeno teórico	1,33265422	$\frac{m^3 \text{ n } \text{humos}}{kg \text{ Comb}}$

Oov	Oxígeno teórico en volumen	0,74963467	$\frac{m^3 \text{ n O2}}{kg \text{ Comb}}$
-----	----------------------------	------------	--

**Factor de aire.**

$$\lambda = 1 + \frac{(VgAr - VgAo)}{4.762 + Oov} \quad (27)$$

$$\lambda = 2,668451808 \frac{m^3 \text{ n humos}}{kg \text{ Comb}}$$

**Tabla 22.** Datos para obtener el Factor de aire. **Fuente:** Autores

DESCRIPCIÓN		VALOR	UNIDAD
Vg Ar	Volumen de humos de aire real	14,75	$\frac{m^3 \text{ n humos}}{kg \text{ Comb}}$
Vg Ao	Volumen de humos de aire teórico	4,15128057	$\frac{m^3 \text{ n humos}}{kg \text{ Comb}}$
Oov	Oxígeno teórico en volumen	0,74963467	$\frac{m^3 \text{ n humos}}{kg \text{ Comb}}$

**La masa de aire teórico.**

La masa de aire teórico a aquel calor que necesario para que se lleve a cabo la reacción de la combustión en un combustible en este caso de la leña,

$$mom = \left( \frac{c}{12} + \frac{H2}{4} + \frac{S - O2}{32} \right) * \frac{32}{0.23} \quad (28)$$

$$mom = 4,656115942 \frac{kg \text{ aire}}{kg \text{ comb}}$$

**Tabla 23.** Composición Química de la Leña. **Fuente:** Autores

DESCRIPCIÓN		VALOR	UNIDAD
C	Porcentaje de carbono en el carbón	0,39232	%
H2	Porcentaje de hidrógeno en el carbón	0,04696	%

S	Porcentaje de azufre en el carbón	0,0008	%
O2	Porcentaje de oxígeno en el carbón	0,35176	%

*La masa de aire seco.*

$$mrm = \lambda * mom \quad (29)$$

$$mrm = 12,424621 \frac{kg \text{ aire}}{kg \text{ comb}}$$

*Tabla 24. Datos para determinar la masa seca de aire. Fuente: Autores*

DESCRIPCIÓN	VALOR	UNIDAD
$\lambda$ Masa de aire teórico	2,668451808	$\frac{kg \text{ aire}}{kg \text{ comb}}$
mom Factor de aire	4,656115942	$\frac{kg \text{ aire}}{kg \text{ comb}}$

*Calor por humedad del aire*

$$Qwa = mwa . mrm . mcu . (hg - hwa) \quad (30)$$

$$Qwa = 90,7 \times 10^3 \text{ kJ}$$

*Tabla 25. Datos para determinar el calor por humedad del aire. Fuente: Autores*

DESCRIPCIÓN	VALOR	UNIDAD
mwa Masa de humedad del aire	0,0175	$\frac{kgH2O}{kg \text{ Aire}}$
mrm Masa de aire seco	12,424621	$\frac{kgH2O}{kg \text{ Comb}}$
mcu Masa de la leña consumida en cada período de tiempo	166,5	kg
hg Entalpía del vapor de agua	2575,336	$\frac{kJ}{kg}$
hwa Entalpía del agua	71,2	$\frac{kJ}{kg}$

### 6.3.8 Calor por inquemados

Es la cantidad de leña que se queda sin quemar en las cenizas. Esto ocurre por la no uniformidad del tamaño de las partículas de la leña y la mala distribución de esta en el Horno. Para la evaluación de este calor se utiliza la masa total de leña ( $M_c$ ), las cenizas residuales ( $C_e$ ) el cual es un dato bibliográfico tomado de [15], la pérdida al fuego ( $P_f$ ) [15] y el poder calorífico de la leña como quemado que tiene un valor de  $12000 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$  [15]

$$Q_i = m_c \cdot C_e \cdot P_f \cdot P_{cq} \quad (31)$$

$$Q_i = 3,3 \times 10^6 \text{ kJ}$$

**Tabla 26.** Datos para determinar el calor por Inquemados. **Fuente:** Autores

DESCRIPCIÓN	VALOR	UNIDAD
mc Masa total de la leña	8760	kg
Ce Cenizas residuales	0,2	%
Pf Pérdida al fuego	0,158	%
Pcq Poder calorífico de la Leña como quemado	12000	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

### 6.3.9 Pérdida de calor por las paredes

Esta hace referencia a la pérdida de calor por conducción en las paredes se ve representada por la diferencia de temperatura dentro de la pared y el medio ambiente. La conductividad Térmica de la pared de ladrillo se considerará como homogénea.

$$Q_{pa} = U_{pa} \cdot (T_{3i} - T_{7e}) \cdot t \quad (32)$$

$$Q_{pa} = 2539392,466 \text{ KJ} = 105,808 \text{ kW}$$

**Tabla 27.** Datos para determinar la pérdida de calor por las paredes. **Fuente:** Autores

DESCRIPCIÓN	UNIDAD
Upa Coeficiente global de transferencia de calor en las paredes del horno	$\frac{\text{W}}{\text{°K}}$
T3i Temperatura interior de la pared del horno	°C

T7e	Temperatura exterior de la pared del horno	°C
t	Periodo de tiempo de trabajo	s
t	1.800,00	s

*Coefficiente global de transferencia de calor por la pared*

$$U_{pa} = \frac{1}{R_{kpa}} \quad (33)$$

### 6.3.10 Calor por humos

*El peso de humos producidos por unidad de tiempo*

Para determinar el peso de los humos producidos por unidad de tiempo es necesario conocer masa total de leña producida por periodo de tiempo  $\frac{mc}{t}$ , además del peso de los gases producidos por unidad de tiempo (pgu)

$$\frac{Pg}{t} = \frac{mc}{t} * Pgu \quad (34)$$

$$\frac{Pg}{t} = 3170,16 \frac{kg \text{ humos}}{h}$$

*Tabla 28. Datos para determinar el peso de humos producidos. Fuente: Autores*

DESCRIPCIÓN	VALOR	UNIDAD
Pgu    Peso de gases producidos por unidad de tiempo	19,04	$\frac{kg \text{ humos}}{kg \text{ comb}}$
mc/t    Masa de Leña producido por periodo de tiempo	166,5	$\frac{kg \text{ comb}}{h}$

A continuación, procedemos a calcular el peso de los gases en donde utilizaremos el peso de humos producidos por unidad de tiempo ( $\frac{Pg}{t}$ ), periodo de tiempo de trabajo (t),

$$Pg = \frac{Pg}{t} * t \quad (35)$$

$$Pg = 634 \text{ kg humos}$$

**Tabla 29.** Datos para determinar el peso de los gases. **Fuente:** Autores

DESCRIPCIÓN		VALOR	UNIDAD
Pg/t	Peso de humos producidos por unidad de tiempo	3170	$\frac{\text{kg humos}}{\text{h}}$
t	Periodo de tiempo de trabajo	0,2	h

Para la evaluación del calor por humos se utiliza la siguiente expresión.

$$Qh = Pg * Cg * \Delta T \quad (36)$$

$$Qh = 2,947 \times 10^3 \text{ kJ}$$

**Tabla 30.** Datos para determinar el calor por Humos. **Fuente:** Autores

DESCRIPCIÓN		VALOR	UNIDAD
Pg	Peso de gases producidos	634	kg
Cg	Calor específico de gases de escape	0,23241	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg } ^\circ\text{K}}$
$\Delta T$	Diferencia de temperatura entre los gases de escape y el medio ambiente	20,004	$^\circ\text{K}$

### 6.3.11 Pérdidas intangibles

Las pérdidas intangibles denotan la energía perdida por los fenómenos que presentan cierta dificultad para determinarse como hidrogeno, hidrocarburos por los humos negros y la radiación hacia el exterior. Esta pérdida se calculará como el excedente o diferencia entre la energía disponible por el combustible y la sumatoria de los Flujos de energía calculados anteriormente

$$Qin = Qh - QT \quad (37)$$

$$Qin = 73 \times 10^6 \text{ kJ}$$

**Tabla 31.** Datos para determinar las pérdidas Intangibles. **Fuente:** Autores

DESCRIPCIÓN		VALOR	UNIDAD
QH	Calor de entrada	131,4E+6	kJ
QT	Sumatoria flujos de energía	58,4E+6	kJ

### 6.3.12 Rendimiento del Horno Actual

El rendimiento por calor utilizado para la cocción del material está dado por la relación entre el calor real utilizado para la cocción del material y la sumatoria de los flujos de energía.

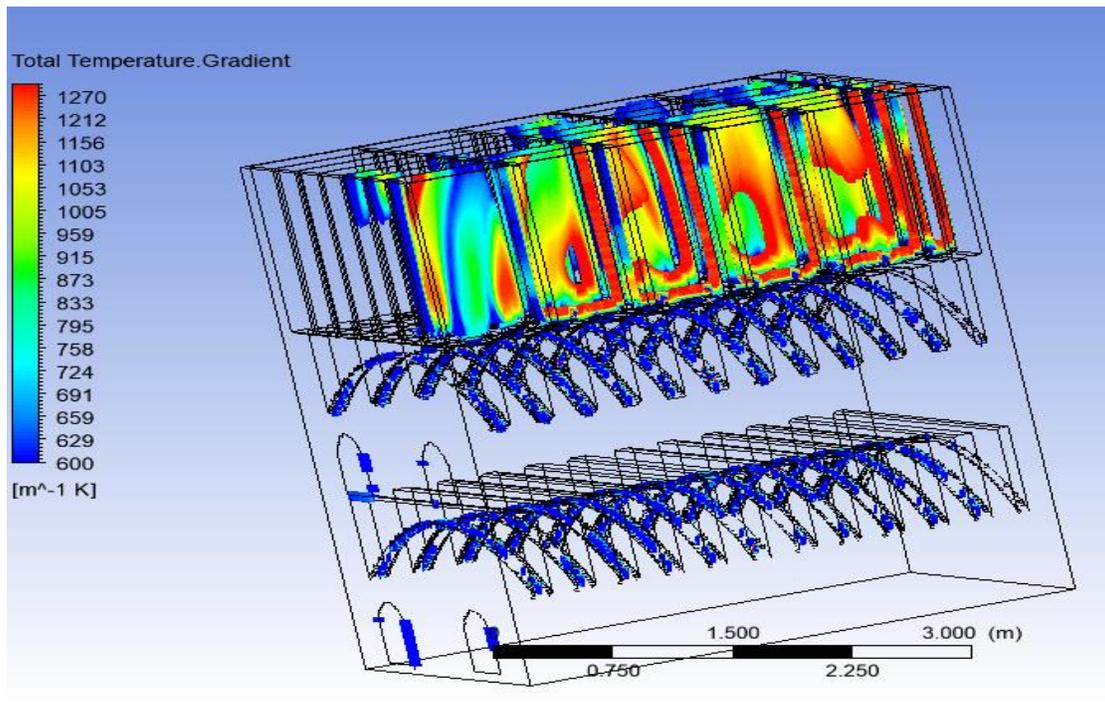
$$nc = \frac{Q_{cm}}{QT} * 100 \quad (38)$$

$$nc = 14\%$$

**Tabla 32.** Datos para determinar el rendimiento del Horno. **Fuente:** Autores

DESCRIPCIÓN	VALOR	UNIDAD
Q <sub>cm</sub> Calor por carga a cocer	8,2x10 <sup>6</sup>	kJ
QT Sumatoria flujos de energía	58,4x10 <sup>6</sup>	kJ

En la figura 22 se puede observar la distribución de temperaturas en el horno artesanal actual, desarrollado a través del software ANSYS. Se puede observar también los gradientes de temperatura muy grandes, lo que ocasiona que los productos que se queman presenten características diversas.



**Figura 22.** Distribución de temperaturas en el horno artesanal actual en el software ANSYS. **Fuente:** Autores

#### 6.4. Mejoras para el horno.

##### 6.4.1 Pérdida de energía en las paredes

Para poder determinar la cantidad de energía que se genera por la transferencia de calor en las paredes, es necesario determinar el coeficiente de transferencia por convección al interior, el coeficiente de transferencia por convección al exterior y el coeficiente de radiación al exterior.

Para determinar el coeficiente de transferencia por convección al interior, se utiliza la convección forzada por flujo interno, es necesario conocer la velocidad de entrada del aire al ser este forzado se tomará en cuenta la velocidad recomendada para hornos de tiro invertido la cual es de 3 m/s.

##### Temperatura media

$$T_m = \frac{T_{max} - T_{min}}{2} \quad (39)$$

$$T_m = 389,5 \text{ } ^\circ\text{K}$$

Tabla 33. Datos para determinar la temperatura media. Fuente: Autores

DESCRIPCIÓN	VALOR	UNIDAD
Tmax Temperatura máxima	1073	°K
Tmin Temperatura mínima	294	°K

##### Calor requerido para llevar de la temperatura ambiente a 800°C

Es el calor necesario para calentar la carga es decir llevarla de la temperatura ambiente a la temperatura de operación. En donde se obtendrán los valores del Calor específico (Cp) (ver anexo 6).

$$Q_{rec} = m \cdot c_p \cdot (T_{max} - T_{min}) \quad (40)$$

$$Q_{rec} = 6629601,6 \text{ KJ} = 276233,4 \text{ kW}$$

Tabla 34. Valores para determinar el calor requerido para elevar la temperatura. Fuente: Autores

DESCRIPCIÓN	VALOR	UNIDAD
m Masa total a calentar	11820	kg
Cp Calor específico	0,72	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg } ^\circ\text{K}}$

Tm	Temperatura media	779	°K
----	-------------------	-----	----

### *Calor requerido por las paredes internar y suelo*

Es el calor necesario para calentar el Horno es decir llevarla de la temperatura ambiente a la temperatura de operación en donde utilizamos la masa total de Horno, El calor especifico del ladrillo (Cp) y la temperatura media (Tm).

$$Q_{rec2} = mh \cdot cp \cdot (T_{max} - T_{min}) \quad (41)$$

$$Q_{rec2} = 175655398 \text{ KJ} = 731901 \text{ kW}$$

**Tabla 35.** Valores para determinar el calor requerido por las paredes internas y suelo. **Fuente:** Autores

DESCRIPCIÓN		VALOR	UNIDAD
<b>mh</b>	Masa total de las paredes del horno	31318	kg
<b>Cp</b>	Calor especifico del material	0,72	$\frac{kJ}{kg \cdot ^\circ K}$
<b>Tm</b>	temperatura media	779	°K

### *Calor requerido para calentar los puentes*

Es el calor necesario para elevar la temperatura de los puentes desde la temperatura ambiente a la temperatura de operación.

$$Q_{rec3} = mp \cdot cp \cdot (T_{max} - T_{min}) \quad (42)$$

$$Q_{rec3} = 6448437,36 \text{ KJ} = 268684,89 \text{ kW}$$

**Tabla 36.** Valores para determinar el calor requerido por los puentes. **Fuente:** Autores

DESCRIPCIÓN		VALOR	UNIDAD
<b>mh</b>	Masa total de los puentes del horno	11497	kg
<b>Cp</b>	Calor especifico del material	0,72	$\frac{kJ}{kg \cdot ^\circ K}$
<b>Tm</b>	Temperatura media	779	°K

### ***Factor de corrección del aire***

Previo al cálculo de la masa de aire al interior del Horno se debe obtener el valor del factor de corrección por la diferencia de altitudes

Como primer paso se debe obtener las propiedades físicas del fluido (ver anexo 10) “Propiedades del aire a la presión de 1 atm”, (ver anexo 11) “Propiedades de la atmosfera a gran altitud”

$$G = \frac{\rho_3}{\rho_2} \quad (43)$$
$$G = 0,776$$

**Tabla 37.** Valores para determinar el Factor de corrección del aire. **Fuente:** Autores

DESCRIPCIÓN		VALOR	UNIDAD
$\rho_3$	Densidad del aire a la altitud de la ciudad de cuenca	0,951	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
$\rho_2$	Densidad a nivel del mar	1,225	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

### ***Masa total de aire en el horno***

El volumen interno del Horno se determina en base a las dimensiones de la misma y se obtuvo un valor de 17 metros cúbicos, la masa total de aire depende también de la densidad del aire a la temperatura ambiente ( $\rho_1$ ) y del factor de corrección del aire G.

$$mta = Vc \cdot \rho_1 \cdot G \quad (44)$$

$$mta = 15,88 \text{ kg}$$

**Tabla 38.** Valores para determinar la masa total de aire en el Horno. **Fuente:** Autores

DESCRIPCIÓN		VALOR	UNIDAD
$Vc$	Volumen de aire	17	$\text{m}^3$
$\rho_1$	Densidad del aire a la temperatura ambiente	1,204	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
$G$	Factor de corrección de aire	0,776	

### Calor requerido para calentar el volumen de aire

Finalmente se obtiene el calor requerido por el aire al interior del Horno

$$Q_{rec4} = m_{ta} \cdot c_p \cdot (T_{max} - T_{min}) \quad (45)$$

$$Q_{rec4} = 12464,8416 \text{ KJ} = 519,36 \text{ kW}$$

Tabla 39. Valores para determinar la masa total de aire en el Horno. Fuente: Autores

DESCRIPCIÓN	VALOR	UNIDAD
<b>mta</b> Masa total de aire	15,889	kg
<b>Cp</b> Calor específico del material	1	$\frac{kJ}{kg \text{ } ^\circ K}$
<b>Tm</b> Temperatura media	779	$^\circ K$

#### 6.4.2 Pérdida de energía en las paredes

A continuación, se determinará el coeficiente de transferencia de calor por convección al interior del Horno (hen) utilizando la teoría de convección forzada por flujo interno. Para determinar este coeficiente es necesario determinar la velocidad del fluido al interior del Horno, la velocidad recomendada es de  $3 \frac{m}{s}$  la cual es recomendada en hornos tiro invertido [12]. Se procede a determinar el número de Reynolds, con el cual se puede verificar si el flujo es o no Turbulento

#### Diámetro Hidráulico

El diámetro hidráulico ( $D_{h1}$ ) se determinó debido a que el Horno posee una forma rectangular

$$D_{h1} = \frac{4 \cdot A_{t1}}{P_{m1}} \quad (46)$$

$$D_{h1} = 16m$$

Tabla 40. Valores para determinar el diámetro Hidráulico. Fuente: Autores

DESCRIPCIÓN	VALOR	UNIDAD
$A_{t1}$ Área transversal del flujo (m <sup>2</sup> )	43,2	m <sup>2</sup>
$P_{m1}$ Perímetro mojado	10,8	m

### Numero de Reynolds

$$Re = \frac{pa \cdot vt \cdot Dh1}{ua} \quad (47)$$

$$Re > 2100 \text{ Turbulento} \quad (48)$$
$$Re = 361925,7221 \text{ Turbulento}$$

*Tabla 41. Valores para determinar el número de Reynolds. Fuente: Autores*

DESCRIPCIÓN		VALOR	UNIDAD
Dh1	Diámetro hidráulico cámara de cocción	16	m
vt	Velocidad del fluido	3	$\frac{m}{s}$
pa	Densidad del aire a 800°C	0,3289	$\frac{kg}{m^3}$
ua	Viscosidad dinámica del aire a 800°C	0,00004362	$\frac{m^2}{s}$

### Nusselt

Una vez comprobado que el número de Reynolds es mayor a 2100 es decir existe flujo Turbulento. Se procede a obtener el número de Nusselt.

$$Nu1 = 0.023 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^n \quad (49)$$

$$Nu1 = 562,7577888$$

*Tabla 42. Valores para determinar el número de Nusselt. Fuente: Autores*

DESCRIPCIÓN		VALOR
Re	Reynold	361925,7221
Pr	Número de prandalt a 800 °C	0,7149
n	Coefficiente para casos de calentamiento	0,4

***Coefficiente de transferencia de calor por convección en el interior de la cabina***

Una vez obtenido el número de nusselt se procede a calcular el coeficiente de transferencia de calor por convección al interior del Horno. El valor de la conductividad térmica del aire a 800 °C es de  $0,07037 \frac{W}{m \cdot ^\circ k}$  (ver anexo 10).

$$h_{en} = \frac{K_a \cdot Nu_1}{D_{h1}} \quad (50)$$

$$h_{en} = 2,475079 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ k}$$

**Tabla 43.** Valores para determinar el coeficiente de transferencia de calor de entrada. **Fuente:** Autores

DESCRIPCIÓN	VALOR	UNIDAD
Ka	Conductividad térmica del aire a 800 °C	$\frac{W}{m \cdot ^\circ k}$
Nu1	Nusselt	562,7577888
Dh1	Diámetro hidráulico	m

***Número de Biot***

Luego de haber obtenido el coeficiente de transferencia de calor por convección al interior del Horno se procede a determinar el número de Biot si el número es  $< 1$  se puede decir que los valores tienen una precisión adecuada. la longitud característica se obtiene al dividir el volumen total de del ladrillo y teja entre su área superficial total.

$$Bi = \frac{h_{en} \cdot L_c}{K_{ca}} \quad (51)$$

$$Bi = 0,002259197 < 1$$

**Tabla 44.** Valores para determinar el número de Biot. **Fuente:** Autores

DESCRIPCIÓN	VALOR	UNIDAD
h <sub>en</sub>	Coefficiente de transferencia por convección al interior	$\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ k}$
L <sub>c</sub>	Longitud característica	m
K <sub>ca</sub>	Conductividad térmica del ladrillo a 800°C	$\frac{W}{m \cdot ^\circ k}$

### Numero de Rayleigh

A continuación, se procede a la obtención del valor del coeficiente de transferencia por convección al exterior de la cabina de curado ( $h_{sal}$ ). Para obtener el mismo es necesario obtener el número de Rayleigh

$$Ra = \frac{g \cdot Ba \cdot (Ts - Tmin)Lc^3}{\nu a^2} \quad (52)$$

$$Ra = 2,83 \times 10^{12}$$

$L_c = L$  en placa plana vertical correlaciones empíricas del promedio de Nusselt para convección natural sobre superficies. La viscosidad cinemática es tomada de la tabla “Propiedades del aire a la presión de 1 atm” (ver anexo 10)

**Tabla 45.** Valores para determinar el número de Raleigh. **Fuente:** Autores

DESCRIPCIÓN	VALOR	UNIDAD
g Gravedad	9,81	$\frac{m}{s^2}$
Ba Coeficiente de expansión volumétrica del aire	0,1	
Ts Temperatura superficial C valor del aislamiento térmico a (800C)	800	°C
Tmin Temperatura ambiente(C)	21,196	°C
Lc Longitud característica para una placa vertical (m)	4,4	m
Va Viscosidad cinemática del aire	0,00001516	

### Nusselt

$$Nu = 0,1 \cdot Ra^{\frac{1}{3}} \quad (53)$$

$$Nu = 6,57 \times 10^3$$

### Coefficiente de transferencia calor por convección en la salida de la cabina.

Una vez obtenido el Numero de Nusselt se procede a obtener el valor del coeficiente de Transferencia de Calor por convección al exterior. El valor de la conductividad térmica del aire ( $K_a$ ) es tomado de (ver anexo 10) “Propiedades del aire a la presión de 1 atm”

$$hsal = \frac{Ka \cdot Nu}{Lc} \quad (54)$$

$$hsal = 37,52$$

**Tabla 46.** Valores para determinar el coeficiente de transferencia de calos a la salida. **Fuente:** Autores

DESCRIPCIÓN	VALOR	UNIDAD
Ka Conductividad térmica del material a 800 °C	0,02514	$\frac{W}{m \cdot ^\circ K}$
Un Numero de nusselt	$6,57 \times 10^3$	
Lc Longitud característica	4,4	m

### **Coeficiente de radiación al exterior.**

Luego de determinar los valores del  $h_{en}$  y  $h_{sal}$ , se puede determinar el coeficiente de radiación al exterior del Horno ( $h_r$ ) utilizando la siguiente ecuación.

$$h_r = \sigma \cdot \epsilon \cdot \frac{T_s^4 - T_{min}^4}{T_s - T_{min}} \quad (55)$$

$$h_r = 2,88 \frac{W}{m^2 K}$$

**Tabla 47.** Valores para determinar el coeficiente de radicación al exterior. **Fuente:** Autores

DESCRIPCIÓN	VALOR	UNIDAD
$\sigma$ Constante de Stefan-Boltzman	5,70E-08	$\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ K^4}$
$\epsilon$ Emisividad del Ladrillo	0,96	
$T_s$ Temperatura superficial	800	$^\circ C$
$T_{min}$ Temperatura ambiente	21	$^\circ C$

### 6.4.3 Resistencias

#### *Resistencia por convección forzada al interior.*

Finalmente se realiza el desarrollo de resistencias para obtener la pérdida de energía en las paredes de la cabina de curado. Para esto se debe obtener los valores de la resistencia interna del horno (Ri), resistencia por conducción en la pared interna (Rcond), Resistencia por convección natural al exterior (Rconex), resistencia por radiación al exterior (Rradext), resistencia por conducción del aislante (Rcais) y finalmente la resistencia por conducción pared exterior (Rcex).

$$Ri = \frac{1}{h_{en} \cdot A_p} \quad (56)$$

$$Ri = 0,0046271 \frac{^{\circ}K}{W}$$

**Tabla 48.** Valores para determinar la resistencia al interior. **Fuente:** Autores

DESCRIPCIÓN	VALOR	UNIDAD
hen                      Coeficiente de transferencia por convección al interior	2,4750791	$\frac{W}{m^2 \cdot ^{\circ}K}$
Ap                        Área total de las paredes laterales y suelo	87,317	m <sup>2</sup>

#### *Resistencia por conducción pared interna (lateral y suelo)*

Para el cálculo de la resistencia de conducción (Rcon) se utiliza el espesor de la pared del aislante (L1), el área total de las paredes y suelo (Ap) y la conductividad térmica del ladrillo

$$Rcon = l1 K Lad. Ap \quad (57)$$

$$Rcon = 0,022724 \frac{^{\circ}K}{W}$$

**Tabla 49.** Valores para determinar la resistencia de la pared interna y suelo. **Fuente:** Autores

DESCRIPCIÓN	VALOR	UNIDAD
L1                        Espesor de pared (m)	0,25	m
Klad                    Conductividad térmica del ladrillo a temperatura máxima	0,72	$\frac{W}{m \cdot ^{\circ}K}$
Ap                        Área total de las paredes laterales, techo y suelo	30,56	m <sup>2</sup>

### ***Resistencia por convección natural al exterior***

Para la obtención de la resistencia por convección forzada al interior del Horno se utiliza el Área total de las paredes laterales y suelo del Horno ( $A_p$ ), el coeficiente de transferencia de calor por convección al exterior

$$R_{conex} = \frac{1}{h_{sal} \cdot A_p} \quad (58)$$

$$R_{conex} = 0,0003198 \frac{^{\circ}K}{W}$$

**Tabla 50.** Valores para determinar la resistencia por convección natural al exterior. **Fuente:** Autores

DESCRIPCIÓN	VALOR	UNIDAD
hsal	Coficiente de transferencia por convección al exterior	37,52
		$\frac{W}{m^2 \cdot ^{\circ}K}$
$A_p$	Área total de las paredes laterales, techo y suelo	83,317
		$m^2$

### ***Resistencia por radiación al exterior***

Para obtener la resistencia por radiación al exterior se utiliza el área total de las paredes laterales, techo y suelo del Horno ( $A_p$ ) y el coeficiente de transferencia por radiación al exterior ( $h_r$ )

$$R_{radex} = \frac{1}{h_{rad} \cdot A_p} \quad (59)$$

$$R_{radex} = 2,895049373 \frac{^{\circ}K}{W}$$

**Tabla 51.** Valores para determinar la resistencia por convección natural al exterior. **Fuente:** Autores

DESCRIPCIÓN	VALOR	UNIDAD
$h_r$	Coficiente de transferencia por radiación al exterior	$2,88 \times 10^1$
		$\frac{W}{m^2 \cdot ^{\circ}K}$
$A_p$	Área total de las paredes laterales, techo y suelo	83,317
		$m^2$

### **Resistencia equivalente entre $R_{conex}$ y $R_{radex}$**

Luego se obtiene el valor de la resistencia equivalente entre la resistencia de convección al exterior y la resistencia de radiación al exterior para posterior a eso obtener la resistencia total y obtener la pérdida de energía en las paredes del Horno.

$$R_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{R_{conex}} + \frac{1}{R_{radex}}} \quad (60)$$

$$R_{eq} = 0,0003198 \frac{^{\circ}K}{W}$$

### **Resistencia total**

$$R_{total} = R_i + R_{con} + R_{cais} + R_{cex} + R_{eq} \quad (61)$$

$$R_{total} = 0,0163089 \frac{^{\circ}K}{W}$$

### **Coefficiente global de transferencia de calor.**

Luego obtenemos el coeficiente global de transferencia de calor debido a que este relaciona todas las resistencias térmicas del sistema, y al área de transferencia de calor total.

$$U = \frac{1}{R_t \cdot A_p} \quad (62)$$

$$U = 0,911300 \frac{W}{m^2 \cdot ^{\circ}K}$$

**Tabla 52.** Valores para determinar el coeficiente global de transferencia de calor. **Fuente:** Autores

DESCRIPCIÓN	VALOR	UNIDAD
Rt Resistencia total	0,0163089	$\frac{^{\circ}K}{W}$
Ap Área total de las paredes laterales, techo y suelo del horno	67,284	m <sup>2</sup>

### ***Perdida de energía en las paredes.***

Una vez obtenido el coeficiente global de transferencia de calor se procede a obtener la pérdida de energía en las paredes del Horno

$$Qt2 = \frac{U \cdot AP \cdot (Tmax - tmin)}{1000} \quad (63)$$

$$Qt2 = 47,765 \text{ kW}$$

### ***Razón de transferencia de calor estacionaria.***

Mediante los valores conocidos de la temperatura ambiente (Tmin) y la resistencia por convección natural al exterior (Rconex) y la pérdida de energía en las paredes del Horno se puede obtener la temperatura en la superficie (T4).

$$Qte = \frac{Tmax - tmin}{Rt} \quad (64)$$

$$Qte = 47765,115 \text{ kW}$$

### ***Temperatura en la superficie de la pared externa.***

$$T4 = Qte \cdot R4 + Tmin \quad (65)$$

$$T4 = 309,2796 \text{ °K} = 36,1296 \text{ °C}$$

### ***Cúpula***

#### ***Resistencia por conducción aislante***

Para el cálculo de Resistencia por conducción del aislante (Rcais) se utiliza el espesor de la pared aislante (L2), el área total del aislante (Ap) y la conductividad térmica del Aislante. El valor de la conductividad Térmica del aislante se toma de la tabla “TECHNICAL FEATURES DMEC” para la fibra cerámica (ver anexo 1).

$$Rcais = \frac{L2}{Kais \cdot Ap} \quad (66)$$

$$Rcais = 0.02833259 \frac{\text{°K}}{\text{W}}$$

**Tabla 53.** Valores para determinar la resistencia por conducción en el aislante. **Fuente:** Autores

DESCRIPCIÓN	VALOR	UNIDAD
L2	0,1	m
Kais	0,176	$\frac{W}{m \text{ } ^\circ K}$
Ap	20.054	m <sup>2</sup>

**Resistencia por conducción pared externa.**

Para obtener la resistencia por conducción en la pared Externa se utiliza es espesor de la pared (L3), el área total de la cúpula (Ap) y la conductividad térmica del acero galvanizado a 800 °C.

$$R_{cex} = \frac{L3}{K_{cex} \cdot Ap} \quad (67)$$

$$R_{cex} = 3,4688 \times 10^{-6} \frac{^\circ K}{W}$$

**Tabla 54.** Valores para determinar la resistencia por conducción en pared externa. **Fuente:** Autores

DESCRIPCIÓN	VALOR	UNIDAD
L3	0,0007	m
Kgal	10	$\frac{W}{m \text{ } ^\circ K}$
Ap	20.18	m <sup>2</sup>

**Resistencia por radiación natural al exterior**

Para obtener la resistencia por radiación al exterior se utiliza el área total de la cúpula del Horno (Ap) y el coeficiente de transferencia por radiación al exterior (hr)

$$R_{conex} = \frac{1}{h_{sal} \cdot Ap} \quad (68)$$

$$R_{conex} = 0,001319 \frac{^\circ K}{W}$$

**Tabla 55.** Valores para determinar la resistencia por radiación natural al exterior. **Fuente:** Autores

DESCRIPCIÓN	VALOR	UNIDAD
hsal	37,52	$\frac{W}{m \text{ } ^\circ K}$

Ap	Área total del, techo	20.2	m <sup>2</sup>
----	-----------------------	------	----------------

### **Resistencia equivalente entre $R_{conex}$ y $R_{radex}$**

Luego se obtiene el valor de la resistencia equivalente entre la resistencia de convección al exterior y la resistencia de radiación al exterior para posterior a eso obtener la resistencia total y obtener la pérdida de energía en las paredes del Horno.

$$Re = \frac{1}{\frac{1}{R_{conex}} + \frac{1}{R_{radex}}} \quad (69)$$

$$Re = 0,00032 \frac{^{\circ}K}{W}$$

**Tabla 56.** Valores para determinar la resistencia equivalente. **Fuente:** Autores

DESCRIPCIÓN	VALOR	UNIDAD	
Rconex	Resistencia por radiación natural al exterior	0,001319	$\frac{^{\circ}K}{W}$
Rradex	Resistencia de radiación al exterior	2,895049373	$\frac{^{\circ}K}{W}$

### **Resistencia total**

$$total = Ri + Rcon + Rcais + Rcex + Re \quad (70)$$

$$Rtotal = 0,032366 \frac{^{\circ}K}{W}$$

**Tabla 57.** Valores para determinar la resistencia total. **Fuente:** Autores

DESCRIPCIÓN	VALOR	UNIDAD	
Ri	Resistencia por convección forzada al interior	0,004621	$\frac{^{\circ}K}{W}$
Rcon	Resistencia por conducción pared interna	0,022724	$\frac{^{\circ}K}{W}$
Rcais	Resistencia por conducción aislante	0,02833259	$\frac{^{\circ}K}{W}$
Rcex	Resistencia por conducción a pared externa	$3,4688 \times 10^{-6}$	$\frac{^{\circ}K}{W}$
Re	Resistencia equivalente	0,00032	$\frac{^{\circ}K}{W}$

***Coefficiente global de transferencia de calor.***

El coeficiente global de transferencia de calor relaciona todas las resistencias térmicas del sistema, y al área de transferencia de calor total.

$$U = \frac{1}{Rt \cdot Ap} \quad (71)$$

$$U = 1.44354 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ K}$$

**Tabla 58.** Valores para determinar el coeficiente global de transferencia de calor en la cúpula. **Fuente:** Autores

DESCRIPCIÓN	VALOR	UNIDAD
Rt Resistencia total	0,02704714	$\frac{^\circ K}{W}$
Ap Área total de las paredes laterales, techo y suelo del horno	20.02	m <sup>2</sup>

***Perdida de energía en la cúpula.***

$$Qt2 = \frac{U \cdot AP \cdot (Tmax - tmin)}{1000} \quad (72)$$

$$Qt2 = 24,0681 \text{ kW}$$

**Tabla 59.** Valores para determinar la perdida de energía. **Fuente:** Autores

DESCRIPCIÓN	VALOR	UNIDAD
U Coeficiente global de transferencia de calor	1.444354	$\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ K}$
Ap Área total de las paredes laterales, techo y suelo del horno	20.02	m <sup>2</sup>

***Razón de transferencia de calor estacionaria.***

$$Qte = \frac{Tmax - tmin}{Rt} \quad (73)$$

$$Qte = 22,51284 \text{ kW}$$

**Tabla 60.** Valores para determinar la transferencia de calor. **Fuente:** Autores

DESCRIPCIÓN	VALOR	UNIDAD
Tmax Temperatura máxima	800	°C

Tmin	Temperatura mínima	21	°C
Rt	Resistencia total	<b>0,032366</b>	$\frac{^{\circ}\text{K}}{\text{W}}$

*Temperatura en la superficie de la pared externa.*

$$T4 = Qte \cdot Rcex + Tmin \quad (74)$$

$$T4 = 323,7039 \text{ } ^{\circ}\text{K} = 50,55 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

*Tabla 61. Valores para determinar la perdida de energía. Fuente: Autores*

DESCRIPCIÓN	VALOR	UNIDAD	
Qte	Razón de transferencia estacionaria	22,51284	kW
Tmin	Temperatura mínima	21	°C
Rcex	Resistencia por conducción a pared externa	$3,4688 \times 10^{-6}$	$\frac{^{\circ}\text{K}}{\text{W}}$

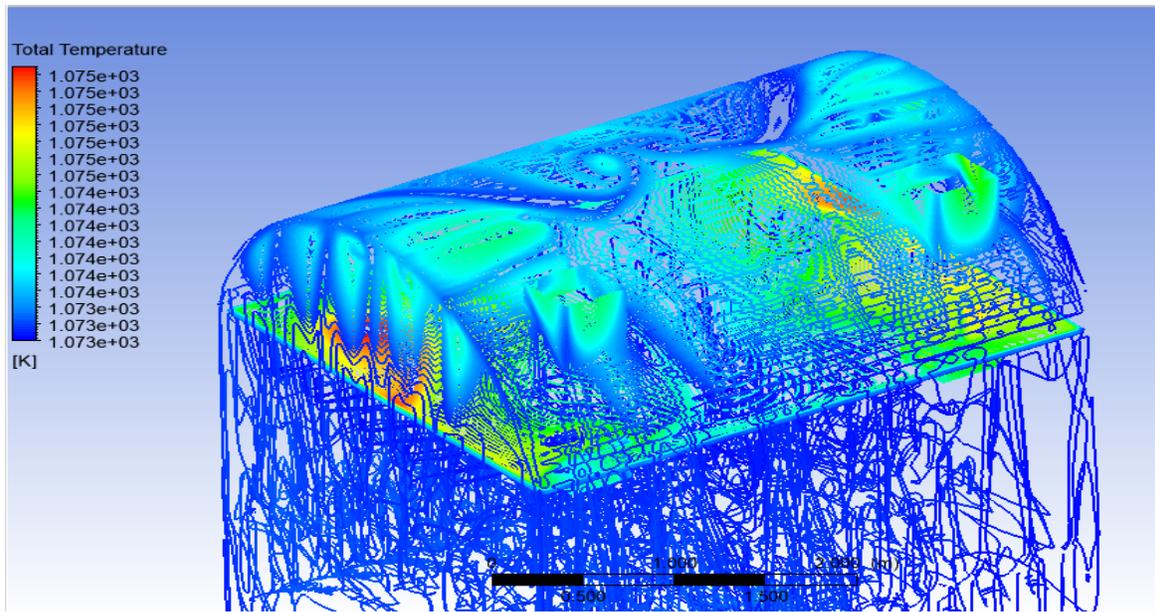
#### **6.4.4 Rendimiento del horno**

El rendimiento por calor utilizado para la cocción del material está dado por la relación entre el calor requerido para la cocción del material y la sumatoria de los flujos de energía.

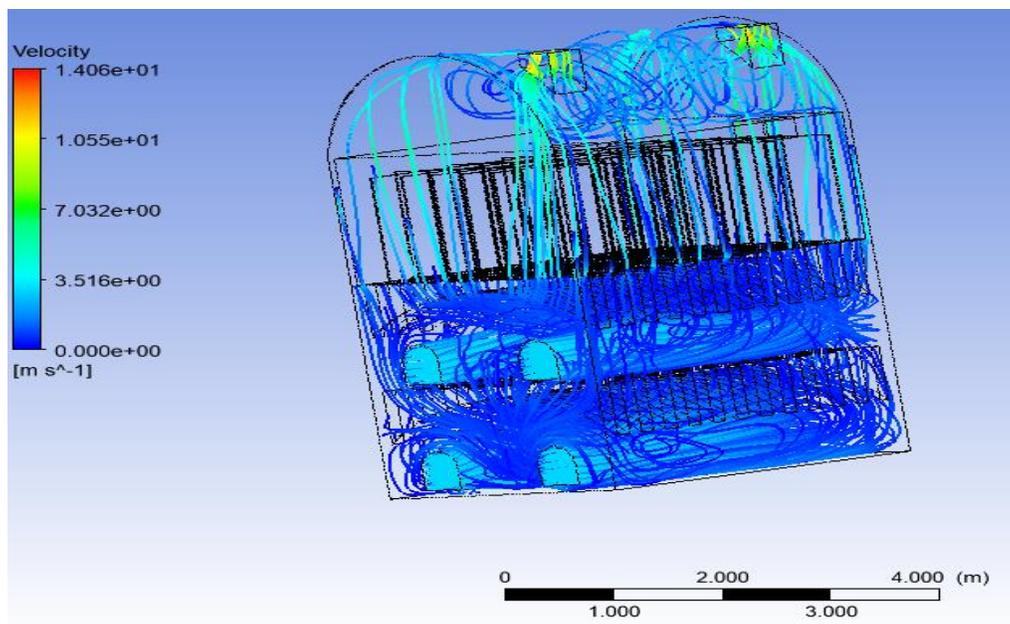
$$\eta = \frac{Qrec}{Qrectotal} \cdot 100 \quad (75)$$

$$\eta = \frac{276233,4 \text{ kw}}{1277415,878} \cdot 100$$

$$\eta = 21,62 \%$$



**Figura 23.** Distribución de temperaturas dentro del horno realizando las Adecuaciones. **Figura:** Autores.

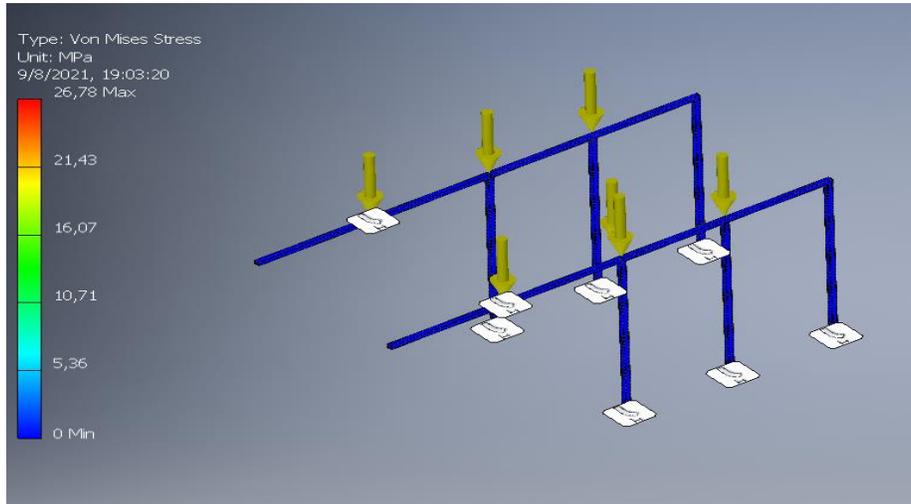


**Figura 24.** Velocidad del aire dentro del horno realizando las Adecuaciones y tomando una velocidad de entrada de 3m/s. **Fuente:** Autores.

A continuación, se realiza el diseño de la estructura o castillo para la cúpula, utilizaremos el software de ingeniería INVENTOR STRESS ANALYSIS, no se realizará un diseño analítico, esto debido a que es una estructura compuesta compleja, por lo tanto, no es viable realizar un diseño analítico, se tomó en consideración que esta estructura debe soportar la carga total de la cúpula.

Para saber que el sistema tiene una configuración adecuada, se debe obtener un factor de seguridad igual o mayor a 1.6 ya que este valor es el recomendado para el diseño de estructuras metálicas.

Se puede observar el tubo estructural y la viga seleccionada tanto para el castillo como para la cúpula respectivamente (ver figura 25 y 26) se puede observar la simulación con los valores de desplazamiento y el esfuerzo máximo respectivamente

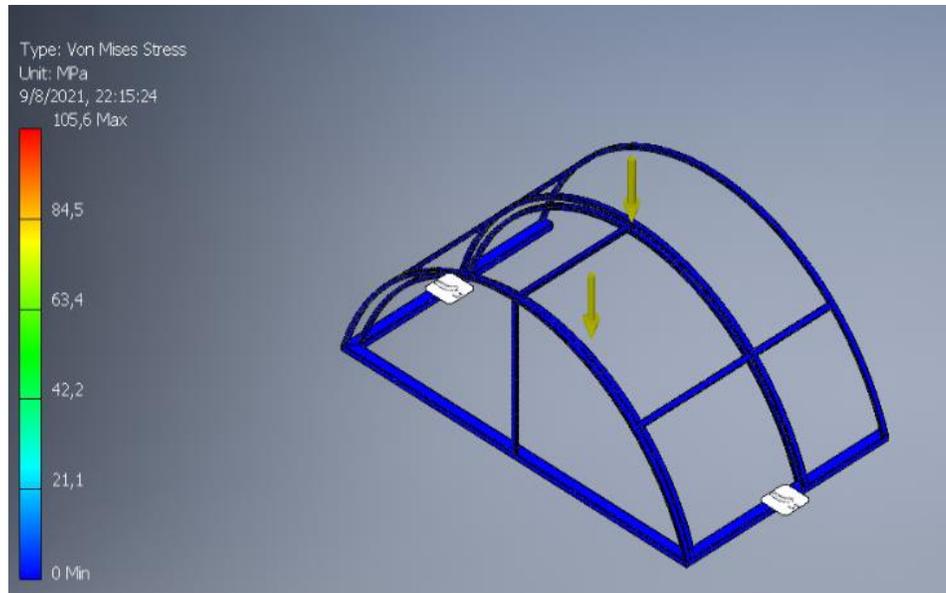


**Figura 25.** Simulación del castillo en el programa Inventor. **Fuente:** Autores

$$Fs = \frac{\text{Yield Strength}}{\text{Max Von Mises}} = \frac{250 \text{ Mpa}}{27 \text{ Mpa}} = 9,25 \quad (76)$$

$$Fs = \frac{\text{Yield Strength}}{\text{Max Von Mises}} = \frac{250 \text{ Mpa}}{27 \text{ Mpa}} = 9,25$$

El factor de seguridad es mayor a 1.6, por lo tanto se cumple la condición y asu vez es elevado esto se debe a que las dimensiones internas de la vida superior de la estructura no se puede reducir ya que dentro de esta debe acoplarse un sistema de guaido y movimiento para la cupula.



**Figura 26.** Simulación de la cúpula en el programa inventor. **Fuente:** Autores

$$Fs = \frac{\text{Yield Strength}}{\text{Max Von Mises}} = \frac{250 \text{ Mpa}}{105.6 \text{ Mpa}} = 2,3 \quad (77)$$

Dado que la cupula fue dividida en 2 partes iguales para poder realizar el montaje se asume que el factor de seguridad sera el mismo en ambas partes y dado que este factor de seguridad esta encima de 1.6 se asume que los materiales asignados son los idoneos.

### 6.5. Costos referenciales de los materiales.

Para los cotos se realizó una cotización de los distintos materiales existentes en el mercado en la ciudad de Cuenca (DIPAC, IPAC, FERRESUR), mismos que a continuación se presentan.

**Tabla 62.** Cotización referencial de materiales realizado en 3 lugares, para la mejora del horno. **Fuente:** Autores

Elemento	Normativa	Cantidad	Precio Unitario (IPAC)	Precio Unitario (DIPAC)	Precio Unitario (FERRESUR)	Precio Total (IPAC)	Precio Total (DIPAC)	Precio Total (FERRESUR)	Foto
Perfil estructural canal "U" (6000 x 100 x 50 x 2) mm	NTE INEN 1623	4	\$ 26,78	\$ 23,63	\$ 25	\$ 107,12	\$ 94,52	\$ 100	
Tubo estructural cuadrado (6000 x 100 x 2) mm	NTE INEN 2415	6	\$ 56,8	\$ 54,9	\$ 54,1	\$ 340,8	\$ 329,4	\$ 324,6	
Plancha negra (250 x 250 x 10) mm		6	\$ 6	\$ 6	\$ 6	\$ 36	\$ 36	\$ 36	
Planchas galvanizadas 4 x 8 pies Espesor 0.7mm	NTE INEN 115	7	\$ 26,83	\$ 23,52	\$ 26,25	\$ 187,81	\$ 16,64	\$ 123,75	
Ruedas (4")		8	\$ 30	\$ 28,4	\$ 28,6	\$ 240	227,2	\$ 228,8	
Manta de fibra cerámica superwool (1000 X 600 X 25) mm		82 m	\$ 15	\$ 15	\$ 15	\$ 1230	\$ 1230	\$ 1230	

Tubo estructural rectangular (6000 x 50 x 25 x 2) mm	NTE INEN 2415	20	\$ 20,01	\$ 20,27	\$ 21,8	\$ 400,2	\$ 405,4	\$ 436	
Tubo estructural rectangular (6000 x 150 x 50 x 2) mm	NTE INEN 2415	4	\$ 57,43	\$ 56	\$ 54,91	\$ 229,2	\$ 224	\$ 219,64	
Varios (Tornillos, electrodos, discos de corte, etc.)						\$ 100	\$ 100	\$ 100	
Rigidizante para fibra cerámica (1 galón)		5	\$ 25	\$ 25	\$ 25	\$ 100	\$ 100	\$ 100	
<b>TOTAL</b>						<b>\$2971,13</b>	<b>\$2764,16</b>	<b>\$2898,79</b>	

**Tabla 63** Costo referencial de las herramientas para la mejora del horno. **Fuente:** Autores

<b>Horas</b>	<b>Descripción</b>	<b>USD/Hora</b>	<b>Precio Total</b>
5	Soldadura	\$ 9	\$ 45
16	Amoladora	\$ 1	\$ 16
12 (tubos)	Roladora	\$ 15 /tubo	\$ 180
7	Taladro	\$ 2	\$ 14
21	Herramientas menores	\$ 2	\$ 42
3	Cizalla	\$ 3,5	\$ 10,5
<b>TOTAL</b>			<b>\$ 307,5</b>

**Tabla 64.** Costo referencial de la mano de obra. **Fuente:** Autores

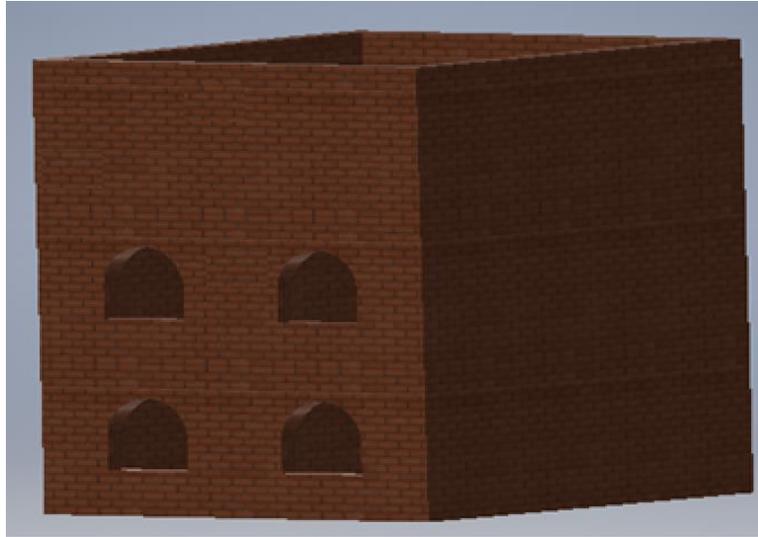
<b>Cantidad</b>	<b>Descripción</b>	<b>Horas-Hombre</b>	<b>USD/Hora</b>	<b>Precio Total/USD</b>
1	Maestro Mecánico	64	\$ 3,75	\$ 240
1	Ayudante	64	\$ 2,5	\$ 160
<b>TOTAL</b>				<b>\$ 400</b>

El costo referencial para la mejora del horno, tendría un valor de \$ 3472, se debe tener en cuenta que los precios mencionados en la tabla 62, pueden variar, esto debido a que los precios están variando constantemente en la ciudad de Cuenca.

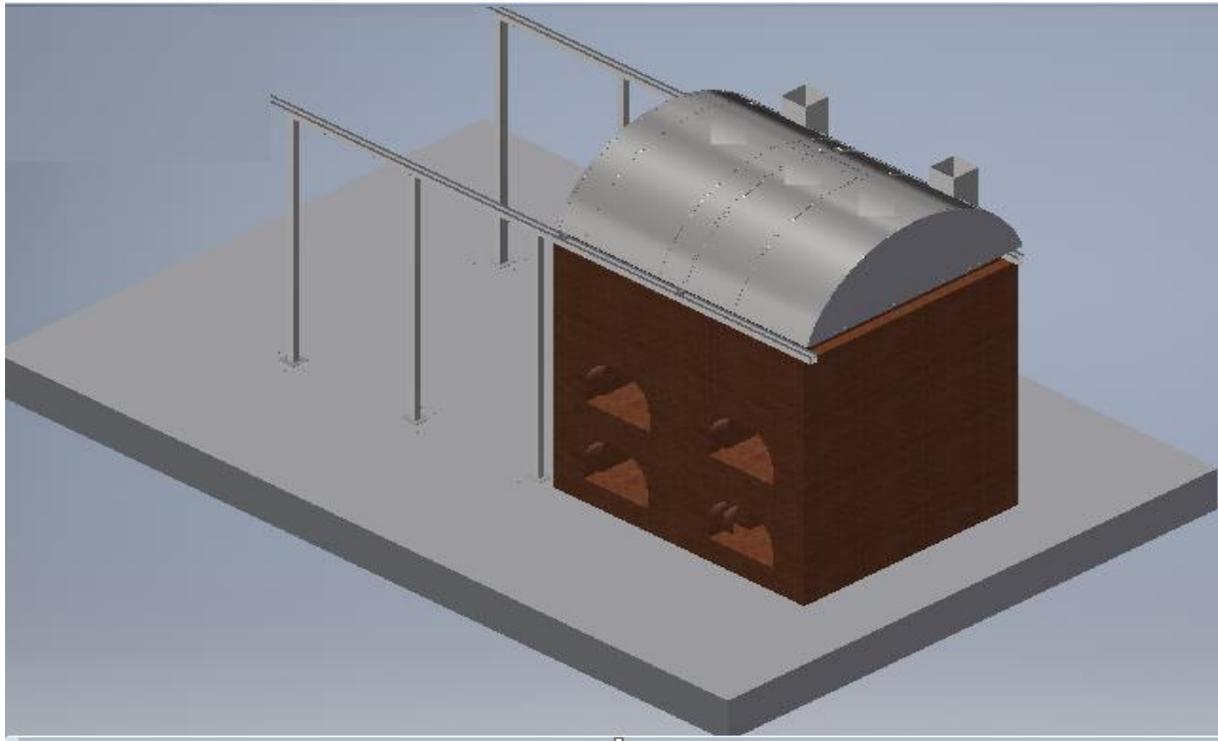
## **7. Resultados**

Una vez realizado el análisis del horno artesanal del señor Ángel Sinchi (ver figura 27), se determinó que tiene una eficiencia energética del 14 %, esto debido fundamentalmente a que es un horno de tipo volcán.

Mediante el diseño y simulación para la implementación de una cúpula a ser instalada en la parte superior del horno y su debida adaptación a un ducto que conduce los gases hacia un extractor conectado de manera directa a la chimenea (ver figura 28), los resultados presentaron una mejora de la eficiencia energética llegando a un valor de hasta un 21,62%, siendo un valor comparable con la eficiencia que presentan los hornos de tiro invertido, es decir que la energía suministrada es utilizada de mejor manera dentro del horno. Cabe indicar que los hornos de tiro invertido son costosos, con un precio aproximado de 16.000,00 USD y su eficiencia es de 23%, mientras que con la mejora establecida para el horno tipo volcán del Sr. Sinchi, se debería invertir un costo aproximado de 4.000,00 USD.



**Figura 27.** Esquema del horno actual. **Fuente:** Autores

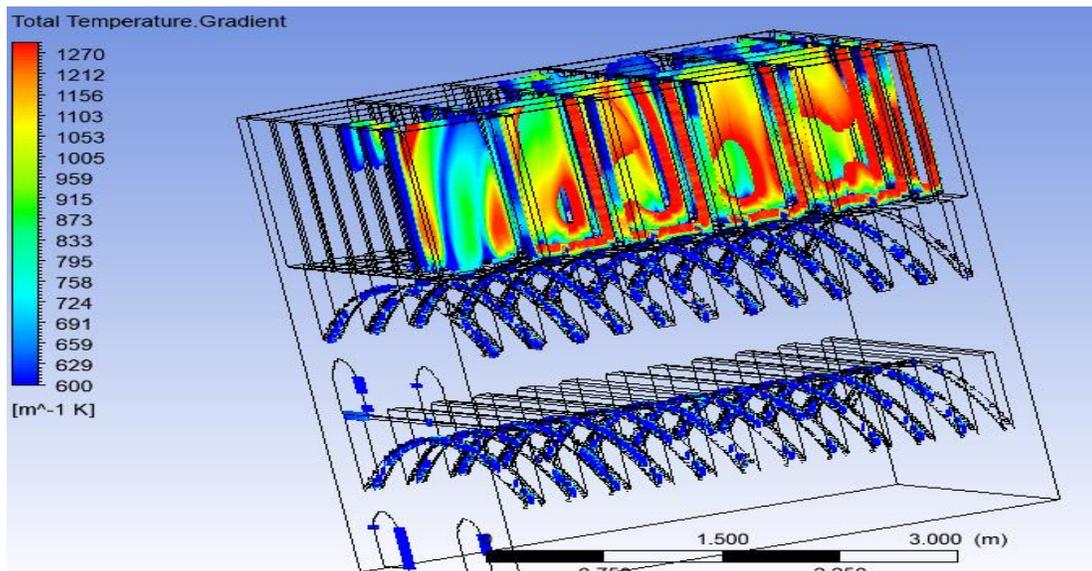


**Figura 28.** Esquema del horno con la cúpula. **Fuente:** Autores

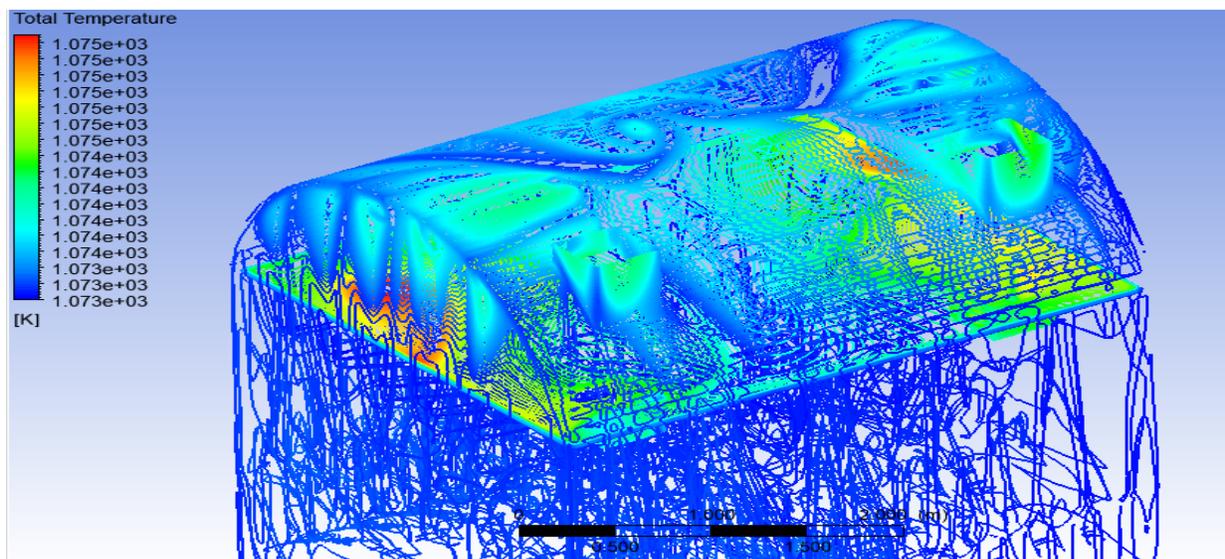
Con los cálculos desarrollados se determinó que mediante la implementación de la cúpula, extractor y ductos de transporte de los gases de combustión que manejen un flujo de aire con velocidad de 3m/s, se posibilita una mejor distribución de calor dentro del horno, homogenizando los valores de temperatura en los distintos puntos del horno, con una variación de  $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$  (ver figura

30), esto ha llevado a una disminución considerable del gradiente de temperatura que en el análisis de la situación actual se llegó a considerar entre 350 y 400 °C (ver figura 29).

Al disminuir el gradiente de temperatura de manera considerable se garantiza que los productos se quemén de forma homogénea tanto en la parte inferior de la cámara de cocción como en la parte superior de la misma, es decir que independientemente de la ubicación del ladrillo o teja dentro del horno, estos se cocerán de manera uniforme evitando productos de mala calidad por cocción incompleta.



*Figura 29. Variación de temperatura del horno actual en la cámara de cocción. Fuente: Autores*



*Figura 30. Variación de temperatura del horno con la cúpula. Fuente: Autores*

Considerando en el diseño un aislante de fibra de vidrio (ver anexo 1) a ser colocado en la parte interna de la cúpula, además de un incremento del espesor de las paredes del horno de 25 cm, se obtuvo una pérdida de calor total de 71,825 kW mientras que en el análisis del estado actual del horno del Sr. Sinchi se determinó una pérdida de energía de 105,808 kW.

El material aislante de fibra cerámica representa una muy buena alternativa a ser colocada al interior de la cúpula diseñada, ya que soporta temperaturas de hasta 1400°C y para que resista la radiación provocada por el calor generado en el horno, se deberá considerar la colocación de un rigidizante el cual se encarga de protegerlo y alargar su vida útil (ver anexo 2); sin embargo, esta alternativa es muy costosa.

## **8. Conclusiones**

### **Conclusión específica 1.**

Tanto los ladrillos como las tejas son altamente utilizados en la construcción de edificios, casas etc., por lo que se debe garantizar que la calidad y las características de los productos sean semejantes, para esto es necesario mejorar aspectos como homogenizar la temperatura de quemado y evitar la pérdida de calor dentro del horno; en este sentido se optó por implementar una cúpula, además del incremento del espesor en las paredes de la cámara de combustión y de cocción y la adaptación de un ventilador, todo esto posibilitará la homogenización de la temperatura en el horno y su consecuente disminución en las pérdidas de energía, mejorando la eficiencia del Horno.

### **Conclusión específica 2.**

Mediante la adquisición de los datos de temperatura obtenidos durante las pruebas en el horno artesanal tipo volcán, se logró determinar la eficiencia energética cuyo valor es del 14%, además de analizar el estado de la técnica y poder determinar los puntos críticos por donde pierde el calor generado, como son las esquinas que alcanzan temperaturas máximas de 183°C, y por la parte superior por donde se evacuan los gases con temperaturas máximas de 325°C.

### **Conclusión específica 3.**

Mediante el diseño y la simulación de una cúpula instalada en el horno tipo volcán, los resultados indican que se logró aumentar la eficiencia energética hasta un 21.62%, además de disminuir el alto gradiente de temperatura, garantizando una temperatura homogénea de 800°C al interior de la

cámara de cocción, lo que permitiría que los productos se quemen de manera homogénea independientemente de la posición que tengan en el horno.

#### **Conclusión específica 4.**

En la cámara de cocción se optó por aumentar el espesor de la pared a 250 mm con lo cual se obtiene una pérdida de calor por las paredes de 47,765 kW durante todo el proceso de cocción, lo cual garantiza una temperatura externa en el horno de 37°C con respecto a la temperatura ambiente, siendo un valor idóneo que no genera problemas al momento de manipular el horno.

#### **Conclusión específica 5.**

En la cámara de combustión se optó por aumentar el espesor de la pared a 250 mm, al igual que en la cámara de cocción, además de implementar una entrada de aire con una velocidad de 3 m/s mediante la utilización de un ventilador, el cual genera un flujo de aire que provoca una convección forzada al interior de la cámara, lo que conlleva a contar con una homogenización de la temperatura dentro del horno; los resultados numéricos fueron validados mediante el software ANSYS FLUET.

#### **Conclusión específica 6.**

Las mejoras en el horno artesanal tienen un costo total de 4.300,00; estas mejoras cumplen con todos los requerimientos operacionales para realizar el quemado apropiado de ladrillos y tejas. Se concluye que con certeza su construcción será viable técnica y económica ya que hornos con esas características como son los hornos de tiro invertido tiene un precio de venta en el mercado que oscila entre los 20.000,00 y 25.000,00 USD.

### ***9. Recomendaciones***

Previo al diseño del sistema, es de gran importancia determinar todas las variables tanto física como operacionales que van a intervenir en el sistema.

Al momento de elegir materiales, componentes y equipos se debe priorizar aquellos que sean económicos, prácticos para la aplicación dentro del horno, que no sean contaminantes y que no afecten la calidad de vida y salud de los moradores del sector y los trabajadores.

En la adquisición de datos del horno se recomienda realizar una mayor cantidad de mediciones en más puntos del horno, estas pueden ser en la parte lateral del horno y en la parte inferior o base del horno para obtener una mayor cantidad de datos y tener una mayor exactitud en cuanto al cálculo de pérdidas del horno y su consecuente determinación exacta de la eficiencia

## 10. Bibliografía

- [1] M. I. González Escobar, «Determinar los Perfiles de Temperatura de un Horno para Ladrillos del Sector Chambo.», B.S. thesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 2011.
- [2] J. Sánchez-Molin, J. A. Orozco-Cacique, y L. Peñaloza-Isidro, «Evaluación de mezclas de arcillas para la fabricación de ladrillos refractarios que sirvan para la reconversión tecnológica de los hornos utilizados en Norte de Santander», *Rev. Investig. Univ. Quindío*, vol. 26, n.º 1, pp. 59-66, 2014.
- [3] G. E. García Pacheco y L. X. Pañi Riera, «Optimización de la eficiencia energética de la leña (*Eucalyptus Globulus*) como combustible en un modelo de horno de ladrillo artesanal, a través del análisis y modificación de las características del combustible», B.S. thesis, 2013.
- [4] R. M. Angel Alejandro y C. O. Morelia Elizabeth, «Determinación de niveles de co de ladrilleras y su posible afectación a la formación de carboxihemoglobina en el cantón Chambo.», B.S. thesis, Universidad Nacional de Chimborazo, 2018, 2018.
- [5] J. L. Jaya Sucozhañay y J. L. Gomezcoello Vásquez, «Análisis comparativo de la contaminación atmosférica producida por la combustión en ladrilleras artesanales utilizando tres tipos de combustibles», B.S. thesis, 2012.
- [6] A. F. C. Zuñiga, «Análisis de las emisiones ambientales y de la eficiencia energética de los hornos de las ladrilleras de Cuenca. Propuesta de límites referenciales de emisiones ambientales», PhD Thesis, UNIVERSIDAD DE CUENCA, 2019.
- [7] E. D. J. Fontalvo Porras y E. J. Gutiérrez Robles, «Diseño de un horno para cocción de ladrillos refractarios en una empresa del sector ladrillero», 2014.
- [8] S. F. Alvarez Guerrero, «Optimización del proceso de mezcla de arcilla para la producción de ladrillos, en el sector artesanal». Cuenca: sn, 2014.
- [9] J. del Real-Olvera, «ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA GENERADA EN DOS TIPOS DE HORNOS LADRILLEROS TRADICIONALES», *Eval. Calid. Agua Lluvia En El Munic. Atlixco Puebla 2 Util. Un Residuo MnCO 3 Proveniente Un Proceso Met. Para El Trat.*
- [10] T. Febres Herrera, «Alternativa de solución a la problemática ambiental producida por las ladrilleras artesanales en Arequipa», 2017.

- [11] D. A. Riera Bravo, «Estandarización del proceso productivo y control de calidad en la industria ladrillera. Caso: Ladrillera y Comercializadora Alfredo», B.S. thesis, Univesidad del Azuay, 2018.
- [12] H. E. Vásquez Montenegro, «Evaluación de la producción y mejoramiento de la calidad estructural del ladrillo artesanal producidos en la comunidad del frutillo, Bambamarca, Cajamarca 2016», 2016.
- [13] G. E. García Pacheco y L. X. Pañi Riera, «Optimización de la eficiencia energética de la leña (*Eucalyptus Globulus*) como combustible en un modelo de horno de ladrillo artesanal, a través del análisis y modificación de las características del combustible», B.S. thesis, 2013.
- [14] G. C. Santellán Naulasaca y C. F. Gavilanes Castillo, «Normalización y estandarización de la fabricación de ladrillos y tejas del cantón Chambo.», B.S. thesis, Riobamba: Universidad Nacional de Chimborazo, 2016., 2016.
- [15] C. J. Urbina Tirado, «Influencia de la temperatura de cocción sobre la contracción, absorción y resistencia a la compresión en ladrillos de arcilla cocidos», 2016.
- [16] W. E. R. Párraga, M. S. A. Campos, y E. H. O. Hernández, «Mechanical properties of artisanal bricks», *Int. Res. J. Eng. IT Sci. Res.*, vol. 4, n.º 4, pp. 1-6, 2018.
- [17] C. Yunus, «Transferencia de calor», *Impr. En México Editor. McGraw Hill*, 2004.
- [18] R. N. Salinas Ojeda, «CARACTERIZACIÓN TÉRMICA Y MECÁNICA DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN MÁS USADOS EN ECUADOR. MATERIALES PARA PARED Y TECHO», 2018.
- [19] J. E. Cuzco Cantos y J. M. Domínguez Ochoa, «Diseño, construcción e implementación de un horno de curado para pintura electrostática», B.S. thesis, 2019.
- [20] Y. A. CENGEL, «TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA: UN ENFOQUE PRACTICO/YUNS A. CENGEL; REV. SOFIA FADDEERA.»
- [21] J. N. Erazo Suárez, «Manual Administrativo para la empresa distribuidora y comercializadora de productos de acero DIPAC, en la ciudad de Ibarra, provincia de Imbabura», B.S. thesis, 2015.
- [22] M. Luján y D. Guzmán, «Diseño, Construcción y Evaluación de un Horno (MK3) para la Cocción de Ladrillos Artesanales», *Acta Nova*, vol. 7, n.º 2, pp. 165-193, 2015.
- [23] G. Guerrero Gómez, C. H. Acevedo Peñaloza, y N. Escobar Mora, «Eficiencia energética en hornos de producción de materiales cerámicos». Universidad Pontificia Bolivariana, 2018.

## 11. Anexos

### Anexo 1. Ficha técnica de la Fibra Cerámica.

#### TECHNICAL FEATURES

LOW THERMAL CONDUCTIVITY  
 HIGH CHEMICAL STABILITY  
 GOOD HEAT STABILITY AND SHOCKPROOF  
 HIGH TENSION STRENGTH  
 GOOD SOUND INSULATION

#### APPLICATIONS:

INDUSTRIAL KILN AND HEATING FURNACE AND HIGH  
 TEMPERATURE PIPE LINER  
 CHEMICAL INDUSTRY, HIGH TEMPERATURE REACTION  
 AND HEATING EQUIPMENT LINER



GLASS KILN INSULATION THERMAL, KILN DOOR AND ROOF INSULATION THERMAL

ALLUMINUM SILICATE SWINGING FIBER CARPET					
Type	General type	Standard type	High pure type	High aluminum type	Zirconium type
Model	HY-401	HY-402	HY-403	HY-404	HY-405
Classified temp. °C	1260	1260	1260	1400	1400
Working temp. °C	< 1000	1000	1100	1260	1360
COLOUR	WHITE	PURE WHITE	PURE WHITE	PURE WHITE	PURE WHITE
Bulk Density Kg/m <sup>3</sup>	96, 128, 160	96, 128, 160	96, 128, 160	128, 160	128, 160
Permanent line contractility % (24hours, 128kg/m <sup>3</sup> )	-4 1000°C	-3 1000°C	-3 1100°C	-3 1260°C	-3 1360°C
Conduct heat data under each temp. (128kg/m <sup>3</sup> )	0.09 ( 400°C ) 0.176 ( 800°C )	0.09 ( 400°C ) 0.176 ( 800°C ) 0.22 ( 1000°C )	0.09 ( 400°C ) 0.176 ( 800°C ) 0.22 ( 1000°C )	0.132 ( 600°C ) 0.22 ( 1000°C )	0.176 ( 800°C ) 0.22 ( 1000°C )
Tensile strength Mpa (128kg/m <sup>3</sup> )	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	44	46	47-49	52-55	32-33
Al <sub>x</sub> O <sub>3</sub> +SiO <sub>2</sub>	96	97	99	99	-
ZrO <sub>2</sub>	-	-	-	-	17-18
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	< 1.2	< 1.0	0.2	0.2	0.2
Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O	≤0.5	≤0.5	0.2	0.2	0.2

## SUPER #3000® Mix 26 MORTAR

### Product Information Sheet

### Monolithic Refractory

SUPER #3000® is a premium quality, super duty mortar. Exceptional strength is achieved at low, intermediate, and high temperatures, used for all types of molten metal applications including steel, iron, aluminum and other non-ferrous metals.

<b>Service Temperature:</b>	-	<b>Material Required:</b>	-
<b>Typical Water Required:</b>	-	<b>Maximum Grain Size:</b>	-
<b>Service Temperature:</b>	1650 °C	<b>Mortar required per 1000 Standard:</b>	300-350 lbs

#### Chemical Analysis

SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O + K <sub>2</sub> O	
44.6-49.6	1.05-1.55	44.6-49.6	0.75-1.25	0-0.3	0-0.3	3.15-3.65	

--	--	--	--	--	--	--	--

#### Typical Physical Properties

Tested in accordance with International and ASTM Standards

Prefired to	Bulk Density	Cold Crushing Strength	Cold Modulus of Rupture	Permanent Linear Change
(°F)	(lb/ft <sup>3</sup> )	(psi)	(psi)	(%)

#### Other Physical Properties

Tested in accordance with International and ASTM Standards

Prefired to	Apparent Porosity	Thermal Conductivity	Hot Modulus of Rupture	Permanent Volume Change
(°F)	(%)	(Btu.in/h.ft <sup>2</sup> .F)	(psi)	(%)

Formerly: SUPER #3000®

Product Number: LEY10235 MX1N MOR  
Effective Date: 16/08/2004

MSDS Reference: LEY10235  
Revision: B:00

The physical and/or chemical properties and specifications of the product set forth above represent typical average results obtained in accordance with generally accepted standard test methods conducted under controlled conditions, and are subject to normal manufacturing variations. Vesuvius reserves the right to modify the properties and specifications at any time without prior notice.

NO WARRANTY IS EXPRESSED OR IMPLIED REGARDING THE ACCURACY OF THIS INFORMATION, THE SUITABILITY OF THE PRODUCT FOR A PARTICULAR PURPOSE, OR THE RESULTS TO BE OBTAINED BY THE USE OF THE PRODUCT. USERS EXPRESSLY ASSUME ALL RISKS AND LIABILITIES ARISING FROM THE USE OF OR RELIANCE UPON THIS INFORMATION.



*Anexo 3. Tabla de Temperaturas en el ciclo de Calentamiento del Horno. Fuente: Autores*

### Quema del Ladrillo y Teja

<b>Tiempo</b>	<b>R1</b>	<b>R2</b>	<b>R3</b>	<b>R4</b>	<b>R5</b>
min	°C	°C	°C	°C	°C
0	16,4	16,6993	16,616	15,9421	17,3811
20	19,5	17,3609	17,1409	22,8587	29,122
40	119,4	38,4281	-----	73,3339	106,938
60	201	67,7381	42,2026	115,935	249,578
80	270,6	106,837	66,6867	175,436	458,45
100	345,5	153,427	94,0181	246,225	540,573
120	415,4	206,447	110,455	289,126	518,828
140	466	256,813	127,605	318,786	605,097
160	458,2	285,122	151,071	393,691	694,735
180	452,3	301,496	177,454	394,935	724,775
200	479,6	329,653	205,338	446,183	801,988
220	490,8	354,552	229,359	478,654	801,512
240	518,6	386,842	260,435	494,429	869,336
260	505,6	399,747	291,763	533,317	902,841
280	515,7	423,583	319,951	537,365	873,315
300	504,2	437,287	347,355	530,13	867,537
320	497,4	450,283	375,029	605,325	851,085
340	531,3	480,991	400,714	619,358	857,532
360	572,1	506,419	421,968	629,556	897,569
380	554,9	515,569	435,096	662,395	874,961
400	555,5	526,538	448,898	667,128	827,346
420	608,4	553,822	452,745	622,872	826,651
440	580,7	553,571	462,407	641,501	876,819
460	585,6	560,792	480,445	634,067	934,892
480	580,7	567,111	512	681,728	974,081
500	595,6	570,599	563,033	681,016	1004,14
520	607,7	585,375	578,667	697,985	898,247
540	657	604,582	582,162	705,784	940,804
560	645,3	610,828	597,426	719,749	953,479
580	713,4	662,248	612,233	712,537	985,073

600	684,6	651,282	613,582	685,251	942,75
620	672,6	641,343	622,032	724,353	1000,22
640	690,7	660,274	672,678	760,672	1046,04
660	713,9	680,594	689,593	710,654	1036,39
680	752,1	707,163	709,957	692,966	1004,89
700	820,6	741,741	721,864	696,355	970,141
720	848,1	767,796	722,143	726,254	964,895
740	829,1	771,348	728,415	768,342	968,075
760	821,9	775,942	725,64	746,588	934,759
780	805,2	776,382	721,123	759,907	947,613
800	740,9	755,856	709,639	803,155	888,783

**Anexo 4. Tabla de Temperaturas en el ciclo de Enfriamiento del Horno Fuente: Autores**

**Ciclo enfriamiento del Ladrillo y Teja**

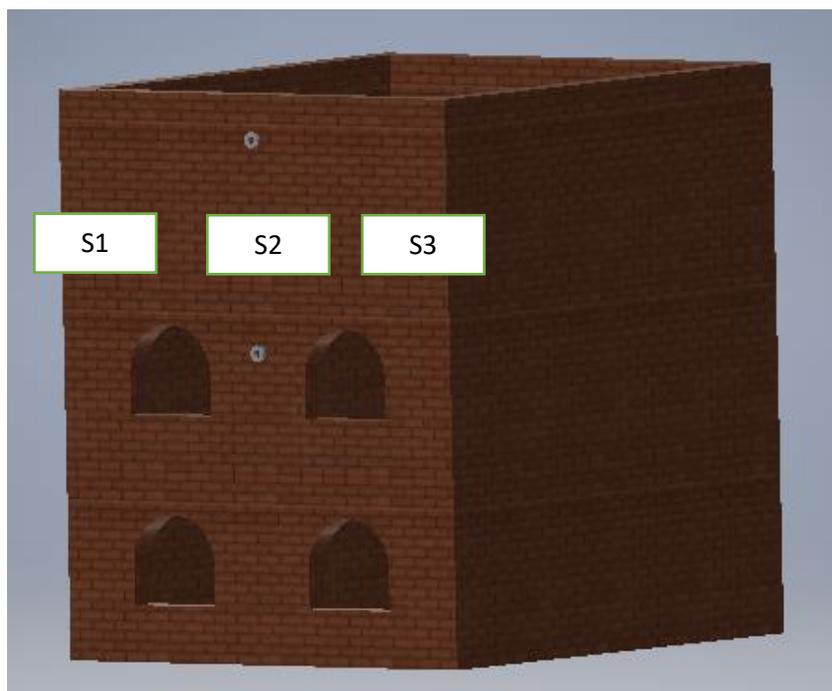
<b>Tiempo</b>	<b>R1</b>	<b>R2</b>	<b>R3</b>	<b>R4</b>	<b>R5</b>
min	°C	°C	°C	°C	°C
0	499,8	667,477	654,124	611,191	793,307
20	457,4	649,478	645,064	582,371	784,969
40	447,1	644,88	642,671	576,06	782,68
60	412,8	628,171	633,466	552,629	772,891
80	385,1	612,659	623,006	525,025	757,784
100	350,4	593,482	611,598	497,211	740,618
120	319,6	572,851	601,699	472,381	723,546
140	301,9	557,256	592,94	449,96	706,781
160	282,1	539,374	>>>>>>>>	429,215	690,705
180	267,9	524,133	577,14	410,188	674,883
200	255,4	509,406	570,379	393,012	659,218
220	244	494,237	564,006	376,631	644,127
240	241,6	485,832	559,426	364,599	630,775
260	228,8	469,689	553,024	350,876	616,014
280	214,6	454,242	546,105	334,388	601,544
300	208,5	442,303	540,478	322,291	587,609
320	204,1	433,933	535,554	311,495	574,439
340	199,5	426,468	530,863	300,269	561,11
360	193,1	418,372	525,927	289,352	548,174
380	189	412,713	521,085	278,346	535,197
400	184,6	405,272	516,061	268,178	522,803
420	181,8	396,729	511,021	259,678	511,046
440	181,6	393,224	506,656	250,91	499,26
460	184,4	392,293	502,369	242,356	487,76
480	175,7	385,312	497,397	234,237	476,562
500	174,8	380,479	492,883	226,739	466,292
520	170	373,347	487,843	219,804	455,819
540	169,5	371,411	483,315	211,821	445,374
560	166	367,19	478,732	204,123	435,268
580	162,4	361,333	473,846	197,033	425,552

---

600	162	355,832	469,321	191,134	416,248
620	159,8	349,941	464,941	185,846	407,185
640	154,6	344,671	460,107	179,824	398,208
660	152,4	338,998	455,403	173,769	389,625
680	151,3	334,497	450,551	167,094	381,453
700	150,5	331,839	446,365	161,316	372,622
720	147,1	324,495	441,918	156,38	364,948
740	148	320,824	437,518	150,87	357,343
760	169,2	328,526	435,083	148,308	350,488
780	148,3	322,887	430,052	143,879	341,939
800	161,2	322,704	426,276	140,336	334,982

---

*Anexo 5. Tabla de Temperaturas en el ciclo de Calentamiento de las paredes exteriores del Horno Fuente: Autores*



**Temperaturas iniciales de la quema**

<b>Tiempo (min)</b>	<b>sección 1 (C°)</b>	<b>sección 2(C°)</b>	<b>sección 3(C°)</b>
0	13,26	13,23	12,97
	13,38	13,4	13,05
20	15,59	14,28	13,9
	15,36	14,27	13,93
40	14,95	14,78	14,52
	15,09	14,64	14,46
60	17,7	18,25	16,42
	19,45	17,42	16,34
80	16,3	16,56	14,85
	18,53	15,68	14,82
100	15,14	15	14,51
	15,36	15	14,44
120	15,89	15,97	14,93
	16,35	15,95	14,92

### Temperaturas finales de la quema

<b>Tiempo (min)</b>	<b>sección 1 (C°)</b>	<b>sección 2 (C°)</b>	<b>sección 3 (C°)</b>
480	38,79	40,17	33,7
	38,75	39,5	35,8
500	38,85	45,44	45,17
	37,73	43,73	52,6
520	46	51,32	48,5
	45,8	49,2	46,76
540	31,25	35,2	39,52
	34,46	38,09	37,92
560	68,92	46,92	41,78
	63,79	47,4	46,47
580	59,36	48,25	37,59
	64,19	48,69	48,61
600	46,65	56,32	43,54
	53,76	54,9	42,14

Anexo 6. "Propiedades de materiales de construcción. Fuente: [20]"

**TABLA A-5**

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

Material	Espesor, <i>L</i> mm	Densidad, $\rho$ kg/m <sup>3</sup>	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 <sup>2</sup> /W
<b>Materiales para mampostería</b>					
<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	—	—

Anexo 7. Tabla de propiedades de agua sobrecalentada. Fuente: [21]

918  
TABLAS DE PROPIEDADES, FIGURAS Y DIAGRAMAS (UNIDADES SI)

TABLA A-6

Vapor de agua sobrecalentado

T °C	v m <sup>3</sup> /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m <sup>3</sup> /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m <sup>3</sup> /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K
P = 0.01 MPa (45.81°C)*				P = 0.05 MPa (81.32°C)				P = 0.10 MPa (99.61°C)				
Sat. <sup>†</sup>	14.670	2437.2	2583.9	8.1488	3.2403	2483.2	2645.2	7.5931	1.6941	2505.6	2675.0	7.3589
50	14.867	2443.3	2592.0	8.1741								
100	17.196	2515.5	2687.5	8.4489	3.4187	2511.5	2682.4	7.6953	1.6959	2506.2	2675.8	7.3611
150	19.513	2587.9	2783.0	8.6893	3.8897	2585.7	2780.2	7.9413	1.9367	2582.9	2776.6	7.6148
200	21.826	2661.4	2879.6	8.9049	4.3562	2660.0	2877.8	8.1592	2.1724	2658.2	2875.5	7.8356
250	24.136	2736.1	2977.5	9.1015	4.8206	2735.1	2976.2	8.3568	2.4062	2733.9	2974.5	8.0346
300	26.446	2812.3	3076.7	9.2827	5.2841	2811.6	3075.8	8.5387	2.6389	2810.7	3074.5	8.2172
400	31.063	2969.3	3280.0	9.6094	6.2094	2968.9	3279.3	8.8659	3.1027	2968.3	3278.6	8.5452
500	35.680	3132.9	3489.7	9.8998	7.1338	3132.6	3489.3	9.1566	3.5655	3132.2	3488.7	8.8362
600	40.296	3303.3	3706.3	10.1631	8.0577	3303.1	3706.0	9.4201	4.0279	3302.8	3705.6	9.0999
700	44.911	3480.8	3929.9	10.4056	8.9813	3480.6	3929.7	9.6626	4.4900	3480.4	3929.4	9.3424
800	49.527	3665.4	4160.6	10.6312	9.9047	3665.2	4160.4	9.8883	4.9519	3665.0	4160.2	9.5682
900	54.143	3855.9	4398.3	10.8429	10.8280	3856.8	4398.2	10.1000	5.4137	3856.7	4398.0	9.7800
1000	58.758	4055.3	4642.8	11.0429	11.7513	4055.2	4642.7	10.3000	5.8755	4055.0	4642.6	9.9800
1100	63.373	4260.0	4893.8	11.2326	12.6745	4259.9	4893.7	10.4897	6.3372	4259.8	4893.6	10.1698
1200	67.989	4470.7	5150.8	11.4132	13.5977	4470.8	5150.7	10.6704	6.7988	4470.7	5150.6	10.3504
1300	72.604	4687.4	5413.4	11.5857	14.5209	4687.3	5413.3	10.8429	7.2605	4687.2	5413.3	10.5229
P = 0.20 MPa (120.21°C)				P = 0.30 MPa (133.52°C)				P = 0.40 MPa (143.61°C)				
Sat.	0.88578	2529.1	2706.3	7.1270	0.60582	2543.2	2724.9	6.9917	0.46242	2553.1	2738.1	6.8955
150	0.95986	2577.1	2769.1	7.2810	0.63402	2571.0	2761.2	7.0792	0.47088	2564.4	2752.8	6.9306
200	1.08049	2654.6	2870.7	7.5081	0.71643	2651.0	2865.9	7.3132	0.53434	2647.2	2860.9	7.1723
250	1.19890	2731.4	2971.2	7.7100	0.79645	2728.9	2967.9	7.5180	0.59520	2726.4	2964.5	7.3804
300	1.31623	2808.8	3072.1	7.8941	0.87535	2807.0	3069.6	7.7037	0.65489	2805.1	3067.1	7.5677
400	1.54934	2967.2	3277.0	8.2236	1.03155	2966.0	3275.5	8.0347	0.77265	2964.9	3273.9	7.9003
500	1.78142	3131.4	3487.7	8.5153	1.18672	3130.6	3486.6	8.3271	0.88936	3129.8	3485.5	8.1933
600	2.01302	3302.2	3704.8	8.7793	1.34139	3301.6	3704.0	8.5915	1.00558	3301.0	3703.3	8.4580
700	2.24434	3479.9	3928.8	9.0221	1.49580	3479.5	3928.2	8.8345	1.12152	3479.0	3927.6	8.7012
800	2.47550	3664.7	4159.8	9.2479	1.65004	3664.3	4159.3	9.0605	1.23730	3663.9	4158.9	8.9274
900	2.70656	3856.3	4397.7	9.4598	1.80417	3856.0	4397.3	9.2725	1.35298	3855.7	4396.9	9.1394
1000	2.93755	4054.8	4642.3	9.6599	1.95824	4054.5	4642.0	9.4726	1.46859	4054.3	4641.7	9.3396
1100	3.16848	4259.6	4893.3	9.8497	2.11226	4259.4	4893.1	9.6624	1.58414	4259.2	4892.9	9.5295
1200	3.39938	4470.5	5150.4	10.0304	2.26624	4470.3	5150.2	9.8431	1.69966	4470.2	5150.0	9.7102
1300	3.63026	4687.1	5413.1	10.2029	2.42019	4686.9	5413.0	10.0157	1.81516	4686.7	5412.8	9.8828
P = 0.50 MPa (151.83°C)				P = 0.60 MPa (158.83°C)				P = 0.80 MPa (170.41°C)				
Sat.	0.37483	2560.7	2748.1	6.8207	0.31560	2566.8	2756.2	6.7593	0.24035	2576.0	2768.3	6.6616
200	0.42503	2643.3	2855.8	7.0610	0.35212	2639.4	2850.6	6.9683	0.26088	2631.1	2839.8	6.8177
250	0.47443	2723.8	2961.0	7.2725	0.39390	2721.2	2957.6	7.1833	0.29321	2715.9	2950.4	7.0402
300	0.52261	2803.3	3064.6	7.4614	0.43442	2801.4	3062.0	7.3740	0.32416	2797.5	3056.9	7.2345
350	0.57015	2883.0	3168.1	7.6346	0.47428	2881.6	3166.1	7.5481	0.35442	2878.6	3162.2	7.4107
400	0.61731	2963.7	3272.4	7.7956	0.51374	2962.5	3270.8	7.7097	0.38429	2960.2	3267.7	7.5735
500	0.71095	3129.0	3484.5	8.0893	0.59200	3128.2	3483.4	8.0041	0.44332	3126.6	3481.3	7.8692
600	0.80409	3300.4	3702.5	8.3544	0.66976	3299.8	3701.7	8.2695	0.50186	3298.7	3700.1	8.1354
700	0.89696	3478.6	3927.0	8.5978	0.74725	3478.1	3926.4	8.5132	0.56011	3477.2	3925.3	8.3794
800	0.98966	3663.6	4158.4	8.8240	0.82457	3663.2	4157.9	8.7395	0.61820	3662.5	4157.0	8.6061
900	1.08227	3855.4	4396.6	9.0362	0.90179	3855.1	4396.2	8.9518	0.67619	3854.5	4395.5	8.8185
1000	1.17480	4054.0	4641.4	9.2364	0.97893	4053.8	4641.1	9.1521	0.73411	4053.3	4640.5	9.0189
1100	1.26728	4259.0	4892.6	9.4263	1.05603	4258.8	4892.4	9.3420	0.79197	4258.3	4891.9	9.2090
1200	1.35972	4470.0	5149.8	9.6071	1.13309	4469.8	5149.6	9.5229	0.84980	4469.4	5149.3	9.3898
1300	1.45214	4686.6	5412.6	9.7797	1.21012	4686.4	5412.5	9.6955	0.90761	4686.1	5412.2	9.5625

Anexo 8. Propiedades del agua saturada Termodinámica. Fuente: [20]

**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, $kJ/kg \cdot K$		
		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

Anexo 9. Propiedades del agua saturada Termodinámica. Fuente: [20]

**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, $kJ/kg \cdot K$		
		Líquido sat., $v_f$	Vapor sat., $v_g$	Líquido sat., $u_f$	Evapor., $u_{fg}$	Vapor sat., $u_g$	Líquido sat., $h_f$	Evapor., $h_{fg}$	Vapor sat., $h_g$	Líquido sat., $s_f$	Evapor., $s_{fg}$	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

Anexo 10. Propiedades del aire a la presión de 1 atm: Transferencia de calor y masa. Fuente: [20]

**TABLA A-15**

Propiedades del aire a la presión de 1 atm

Temp., $T$ , °C	Densidad, $\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	Calor específico, $c_p$ , J/kg · K	Conductividad térmica, $k$ , W/m · K	Difusividad térmica, $\alpha$ , m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>	Viscosidad dinámica, $\mu$ , kg/m · s	Viscosidad cinemática, $\nu$ , m <sup>2</sup> /s	Número de Prandtl, Pr
-150	2.866	983	0.01171	$4.158 \times 10^{-6}$	$8.636 \times 10^{-6}$	$3.013 \times 10^{-6}$	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	$8.036 \times 10^{-6}$	$1.189 \times 10^{-5}$	$5.837 \times 10^{-6}$	0.7263
-50	1.582	999	0.01979	$1.252 \times 10^{-5}$	$1.474 \times 10^{-5}$	$9.319 \times 10^{-6}$	0.7440
-40	1.514	1 002	0.02057	$1.356 \times 10^{-5}$	$1.527 \times 10^{-5}$	$1.008 \times 10^{-5}$	0.7436
-30	1.451	1 004	0.02134	$1.465 \times 10^{-5}$	$1.579 \times 10^{-5}$	$1.087 \times 10^{-5}$	0.7425
-20	1.394	1 005	0.02211	$1.578 \times 10^{-5}$	$1.630 \times 10^{-5}$	$1.169 \times 10^{-5}$	0.7408
-10	1.341	1 006	0.02288	$1.696 \times 10^{-5}$	$1.680 \times 10^{-5}$	$1.252 \times 10^{-5}$	0.7387
0	1.292	1 006	0.02364	$1.818 \times 10^{-5}$	$1.729 \times 10^{-5}$	$1.338 \times 10^{-5}$	0.7362
5	1.269	1 006	0.02401	$1.880 \times 10^{-5}$	$1.754 \times 10^{-5}$	$1.382 \times 10^{-5}$	0.7350
10	1.246	1 006	0.02439	$1.944 \times 10^{-5}$	$1.778 \times 10^{-5}$	$1.426 \times 10^{-5}$	0.7336
15	1.225	1 007	0.02476	$2.009 \times 10^{-5}$	$1.802 \times 10^{-5}$	$1.470 \times 10^{-5}$	0.7323
20	1.204	1 007	0.02514	$2.074 \times 10^{-5}$	$1.825 \times 10^{-5}$	$1.516 \times 10^{-5}$	0.7309
25	1.184	1 007	0.02551	$2.141 \times 10^{-5}$	$1.849 \times 10^{-5}$	$1.562 \times 10^{-5}$	0.7296
30	1.164	1 007	0.02588	$2.208 \times 10^{-5}$	$1.872 \times 10^{-5}$	$1.608 \times 10^{-5}$	0.7282
35	1.145	1 007	0.02625	$2.277 \times 10^{-5}$	$1.895 \times 10^{-5}$	$1.655 \times 10^{-5}$	0.7268
40	1.127	1 007	0.02662	$2.346 \times 10^{-5}$	$1.918 \times 10^{-5}$	$1.702 \times 10^{-5}$	0.7255
45	1.109	1 007	0.02699	$2.416 \times 10^{-5}$	$1.941 \times 10^{-5}$	$1.750 \times 10^{-5}$	0.7241
50	1.092	1 007	0.02735	$2.487 \times 10^{-5}$	$1.963 \times 10^{-5}$	$1.798 \times 10^{-5}$	0.7228
60	1.059	1 007	0.02808	$2.632 \times 10^{-5}$	$2.008 \times 10^{-5}$	$1.896 \times 10^{-5}$	0.7202
70	1.028	1 007	0.02881	$2.780 \times 10^{-5}$	$2.052 \times 10^{-5}$	$1.995 \times 10^{-5}$	0.7177
80	0.9994	1 008	0.02953	$2.931 \times 10^{-5}$	$2.096 \times 10^{-5}$	$2.097 \times 10^{-5}$	0.7154
90	0.9718	1 008	0.03024	$3.086 \times 10^{-5}$	$2.139 \times 10^{-5}$	$2.201 \times 10^{-5}$	0.7132
100	0.9458	1 009	0.03095	$3.243 \times 10^{-5}$	$2.181 \times 10^{-5}$	$2.306 \times 10^{-5}$	0.7111
120	0.8977	1 011	0.03235	$3.565 \times 10^{-5}$	$2.264 \times 10^{-5}$	$2.522 \times 10^{-5}$	0.7073
140	0.8542	1 013	0.03374	$3.898 \times 10^{-5}$	$2.345 \times 10^{-5}$	$2.745 \times 10^{-5}$	0.7041
160	0.8148	1 016	0.03511	$4.241 \times 10^{-5}$	$2.420 \times 10^{-5}$	$2.975 \times 10^{-5}$	0.7014
180	0.7788	1 019	0.03646	$4.593 \times 10^{-5}$	$2.504 \times 10^{-5}$	$3.212 \times 10^{-5}$	0.6992
200	0.7459	1 023	0.03779	$4.954 \times 10^{-5}$	$2.577 \times 10^{-5}$	$3.455 \times 10^{-5}$	0.6974
250	0.6746	1 033	0.04104	$5.890 \times 10^{-5}$	$2.760 \times 10^{-5}$	$4.091 \times 10^{-5}$	0.6946
300	0.6158	1 044	0.04418	$6.871 \times 10^{-5}$	$2.934 \times 10^{-5}$	$4.765 \times 10^{-5}$	0.6935
350	0.5664	1 056	0.04721	$7.892 \times 10^{-5}$	$3.101 \times 10^{-5}$	$5.475 \times 10^{-5}$	0.6937
400	0.5243	1 069	0.05015	$8.951 \times 10^{-5}$	$3.261 \times 10^{-5}$	$6.219 \times 10^{-5}$	0.6948
450	0.4880	1 081	0.05298	$1.004 \times 10^{-4}$	$3.415 \times 10^{-5}$	$6.997 \times 10^{-5}$	0.6965
500	0.4565	1 093	0.05572	$1.117 \times 10^{-4}$	$3.563 \times 10^{-5}$	$7.806 \times 10^{-5}$	0.6986
600	0.4042	1 115	0.06093	$1.352 \times 10^{-4}$	$3.846 \times 10^{-5}$	$9.515 \times 10^{-5}$	0.7037
700	0.3627	1 135	0.06581	$1.598 \times 10^{-4}$	$4.111 \times 10^{-5}$	$1.133 \times 10^{-4}$	0.7092
800	0.3289	1 153	0.07037	$1.855 \times 10^{-4}$	$4.362 \times 10^{-5}$	$1.326 \times 10^{-4}$	0.7149
900	0.3008	1 169	0.07465	$2.122 \times 10^{-4}$	$4.600 \times 10^{-5}$	$1.529 \times 10^{-4}$	0.7206
1 000	0.2772	1 184	0.07868	$2.398 \times 10^{-4}$	$4.826 \times 10^{-5}$	$1.741 \times 10^{-4}$	0.7260
1 500	0.1990	1 234	0.09599	$3.908 \times 10^{-4}$	$5.817 \times 10^{-5}$	$2.922 \times 10^{-4}$	0.7478
2 000	0.1553	1 264	0.11113	$5.664 \times 10^{-4}$	$6.630 \times 10^{-5}$	$4.270 \times 10^{-4}$	0.7539

Nota: Para los gases ideales, las propiedades  $c_p$ ,  $k$ ,  $\mu$  y Pr son independientes de la presión. Las propiedades  $\rho$ ,  $\nu$  y  $\alpha$  a una presión  $P$  (en atm) diferente de 1 atm se determinan al multiplicar los valores de  $\rho$ , a la temperatura dada, por  $P$  y al dividir  $\nu$  y  $\alpha$  entre  $P$ .

Fuente: Datos generados basándose en el software EES desarrollado por S. A. Klein y F. L. Alvarado. Fuentes originales: Keenan, Chao, Keyes, Gas Tables, Wiley, 198, y Thermophysical Properties of Matter, Vol. 3: Thermal Conductivity, Y. S. Touloukian, P. E. Liley, S. C. Saxena, Vol. 11: Viscosity, Y. S. Touloukian, S. C. Saxena y P. Hestermans. IFI/Plenum. NY. ISBN 0-306067020-8.

*Anexo 11. Propiedades de la atmósfera a gran altitud. Fuente: [20]*

**TABLA A-16**

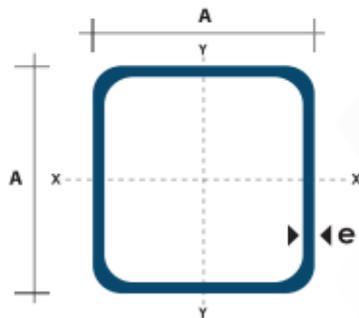
Propiedades de la atmósfera a gran altitud

Altitud, m	Temperatura, °C	Presión, kPa	Gravedad g, m/s <sup>2</sup>	Velocidad del sonido, m/s	Densidad, kg/m <sup>3</sup>	Viscosidad $\mu$ , kg/m · s	Conductivi- dad térmica, W/m · K
0	15.00	101.33	9.807	340.3	1.225	$1.789 \times 10^{-5}$	0.0253
200	13.70	98.95	9.806	339.5	1.202	$1.783 \times 10^{-5}$	0.0252
400	12.40	96.61	9.805	338.8	1.179	$1.777 \times 10^{-5}$	0.0252
600	11.10	94.32	9.805	338.0	1.156	$1.771 \times 10^{-5}$	0.0251
800	9.80	92.08	9.804	337.2	1.134	$1.764 \times 10^{-5}$	0.0250
1000	8.50	89.88	9.804	336.4	1.112	$1.758 \times 10^{-5}$	0.0249
1200	7.20	87.72	9.803	335.7	1.090	$1.752 \times 10^{-5}$	0.0248
1400	5.90	85.60	9.802	334.9	1.069	$1.745 \times 10^{-5}$	0.0247
1600	4.60	83.53	9.802	334.1	1.048	$1.739 \times 10^{-5}$	0.0245
1800	3.30	81.49	9.801	333.3	1.027	$1.732 \times 10^{-5}$	0.0244
2000	2.00	79.50	9.800	332.5	1.007	$1.726 \times 10^{-5}$	0.0243
2200	0.70	77.55	9.800	331.7	0.987	$1.720 \times 10^{-5}$	0.0242
2400	-0.59	75.63	9.799	331.0	0.967	$1.713 \times 10^{-5}$	0.0241
2600	-1.89	73.76	9.799	330.2	0.947	$1.707 \times 10^{-5}$	0.0240
2800	-3.19	71.92	9.798	329.4	0.928	$1.700 \times 10^{-5}$	0.0239
3000	-4.49	70.12	9.797	328.6	0.909	$1.694 \times 10^{-5}$	0.0238
3200	-5.79	68.36	9.797	327.8	0.891	$1.687 \times 10^{-5}$	0.0237
3400	-7.09	66.63	9.796	327.0	0.872	$1.681 \times 10^{-5}$	0.0236
3600	-8.39	64.94	9.796	326.2	0.854	$1.674 \times 10^{-5}$	0.0235
3800	-9.69	63.28	9.795	325.4	0.837	$1.668 \times 10^{-5}$	0.0234

## TUBO ESTRUCTURAL CUADRADO

### Especificaciones Generales:

<b>Norma:</b>	NTE INEN 2415
<b>Calidad:</b>	SAE J 403 1008
<b>Acabado:</b>	Acero negro o Galvanizado
<b>Largo Normal:</b>	6.00m y medidas especiales
<b>Dimensiones:</b>	Desde 20mm a 100mm
<b>Espesores:</b>	Desde 1,20mm a 5,00mm



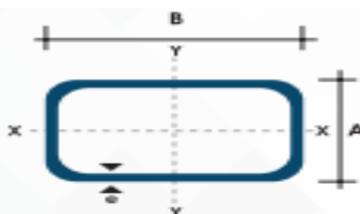
Dimensiones			Área	Ejes X-Xe Y-Y		
A mm	Espesor mm (e)	Peso Kg/m	Área cm <sup>2</sup>	I cm <sup>4</sup>	W cm <sup>3</sup>	i cm <sup>3</sup>
20	1,2	0,72	0,90	0,53	0,53	0,77
20	1,5	0,88	1,05	0,58	0,58	0,74
20	2,0	1,15	1,34	0,69	0,69	0,72
25	1,2	0,90	1,14	1,08	0,87	0,97
25	1,5	1,12	1,35	1,21	0,97	0,95
25	2,0	1,47	1,74	1,48	1,18	0,92
30	1,2	1,09	1,38	1,91	1,28	1,18
30	1,5	1,35	1,65	2,19	1,46	1,15
30	2,0	1,78	2,14	2,71	1,81	1,13
40	1,2	1,47	1,80	4,38	2,19	1,25
40	1,5	1,82	2,25	5,48	2,74	1,56
40	2,0	2,41	2,94	6,93	3,46	1,54
40	3,0	3,54	4,44	10,20	5,10	1,52
50	1,5	2,29	2,85	11,06	4,42	1,97
50	2,0	3,03	3,74	14,13	5,65	1,94
50	3,0	4,48	5,61	21,20	4,48	1,91
60	2,0	3,66	3,74	21,26	7,09	2,39
60	3,0	5,42	6,61	35,06	11,69	2,34
75	2,0	4,52	5,74	50,47	13,46	2,97
75	3,0	6,71	8,41	71,54	19,08	2,92
75	4,0	8,59	10,95	89,98	24,00	2,87
100	2,0	6,17	7,74	122,99	24,60	3,99
100	3,0	9,17	11,41	176,95	35,39	3,94

## TUBO ESTRUCTURAL RECTANGULAR



### Especificaciones Generales:

Norma	NTE INEN 2415
Calidad:	SAE J 403 1008
Acabado:	Acero negro o galvanizado
Largo normal:	6.00 m y medidas especiales
Dimensiones:	Desde 20mm x 40mm a 50mm x 150mm
Espesores:	Desde 1,20mm a 3,00mm



Dimensiones			Peso Kg/m	Área cm <sup>2</sup>	Ejes Y-Y			Ejes X-X		
A mm	B mm	Espesor (e) mm			I cm <sup>4</sup>	W cm <sup>3</sup>	i cm	I cm <sup>4</sup>	W cm <sup>3</sup>	i cm
20	40	1.2	1.09	1.32	2.61	1.30	1.12	0.88	0.88	0.83
20	40	1.5	1.35	1.65	3.26	1.63	1.40	1.09	1.09	0.81
20	40	2.0	1.78	2.14	4.04	2.02	1.37	1.33	1.33	0.79
25	50	1.5	1.71	2.10	6.39	2.56	1.74	2.19	1.75	1.02
25	50	2.0	2.25	2.74	8.37	3.35	1.75	2.80	2.24	1.01
25	50	3.0	3.30	4.14	12.56	5.02	1.74	3.99	3.19	0.99
30	50	1.5	1.88	2.25	7.27	2.91	1.80	3.32	2.21	1.21
30	50	2.0	2.41	2.94	9.52	3.81	1.80	4.28	2.85	1.21
30	50	3.0	3.30	4.21	12.78	5.11	1.74	5.66	3.77	1.16
30	70	2.0	3.03	3.74	22.20	6.34	2.44	5.85	3.90	1.25
30	70	3.0	4.48	5.41	30.50	8.71	2.37	7.84	5.23	1.20
40	60	1.5	2.29	2.91	14.90	4.97	2.26	7.94	3.97	1.65
40	60	2.0	3.03	3.74	18.08	6.13	2.22	9.81	4.90	1.62
40	60	3.0	4.48	5.41	25.31	8.44	2.16	13.37	6.69	1.57
30	70	1.5	2.34	2.91	18.08	5.17	2.49	4.76	3.17	1.28
30	70	2.0	2.93	3.74	22.20	6.34	2.44	5.85	3.90	1.25
30	70	3.0	4.25	5.41	30.50	8.71	2.37	7.84	5.23	1.20
40	80	1.5	2.76	3.74	31.75	7.94	2.91	10.77	5.39	1.70
40	80	2.0	3.66	4.54	37.32	9.33	2.87	12.70	6.35	1.67
40	80	3.0	5.42	6.61	52.16	13.04	2.81	17.49	8.75	1.63
50	100	2.0	4.52	5.74	74.94	14.99	3.61	25.65	10.26	2.11
50	100	3.0	6.71	8.41	106.34	21.27	3.56	35.07	14.30	2.07
50	150	2.0	6.17	7.74	207.45	27.66	5.18	37.17	14.87	2.19
50	150	3.0	9.17	11.41	298.35	39.78	5.11	52.54	21.02	2.15

*Anexo 14. Planos de construcción. Fuente: Autores.*