

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA**  
**ESCUELA DE CIENCIA E INGENIERÍA DE LOS MATERIALES**

CM-5300 Proyecto Final de Graduación para optar por el título de Ingeniero en Materiales  
con el grado académico de Licenciatura

**“Diseño de un horno que use biogás como combustible para la activación de carbón  
vegetal utilizado en la desulfuración de biogás”**

Realizado por: Calet Francisco Sáenz Zúñiga  
Profesor guía: Ing. William Jesús Benavides Ramírez MEng  
Profesores lectores:  
Ing. Fabián Araya Mora M. Sc  
Ing. Claudia Chaves Villareal Ph. D.  
Asesora industrial: Ing. Claudia Chaves Villareal Ph. D.

Cartago, 2023

Escuela Acreditada por la Agencia de Acreditación de programas de Ingeniería y de Arquitectura (AAPIA)



## Resumen

Sáenz Zúñiga, Calet Francisco, MES 2023. *Diseño de un horno que use biogás como combustible para la activación de carbón vegetal utilizado en la desulfuración de biogás*. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Profesor asesor: Ing. William Jesús Benavides Ramírez MEng.

Este proyecto fue desarrollado con el proyecto Biogás Para Todos del Instituto Tecnológico de Costa Rica y la Finca Cipreses de Oreamuno de Cartago donde se realizaron parte de las actividades. El proyecto consistió en proponer un diseño de un horno que use biogás como combustible para realizar la activación química de carbón vegetal. El objetivo del estudio fue proponer un diseño económico con materiales aptos para evitar pérdidas de calor.

Se realizó mediciones de la temperatura de la llama del biogás obteniendo un dato máximo de 840 °C. El flujo del combustible se midió durante 3 horas con un promedio de 0.63 m<sup>3</sup>/h de biogás.

La prueba de conductividad indica que el ladrillo refractario presenta una temperatura de superficie de 50.2 °C y el estructural de 122 °C con un aumento 6.3 °C por minuto y el refractario 2.6 °C lo que se refleja en un 41.3% menos que el ladrillo estructural. Se propusieron dos diseños de horno designados como diseño #1 y diseño #2, el #1 presentó un flujo 960.3 W con ladrillo estructural y 844.45 W con ladrillo refractario equivalente a un 12.97 % de variación entre ambos. El diseño #2 obtuvo un flujo máximo de 753.61 W para el ladrillo estructural y con ladrillo refractario 692.38 W lo que equivale a un 8.12 % de variación.

El análisis de resistencia para la barra de acero corrugado ASTM 615 grado 60 indica que la fuerza máxima que resiste la barra es de 8.44 kN y la fuerza máxima que debe soportar en el ensamble del horno es de 461.52 N lo que asegura la selección de este material.

La temperatura superficial externa de los ladrillos analizada por simulaciones con SolidWorks presentó una temperatura mínima de 61.8 °C y máxima de 429 °C en comparación con la prueba de conductividad térmica realizada en laboratorio.

El impacto ambiental por la combustión de un metro cúbico de biogás es de 1.9 kg de CO<sub>2</sub> eq y en comparación con un metro cúbico de gasolina se produce 5478 kg de CO<sub>2</sub> eq. Los costos del horno se estiman en ¢261840 para el diseño #1 y ¢190865 para el diseño #2.

El impacto ambiental derivado de la combustión de un metro cúbico de biogás es significativamente menor en comparación con la quema de un metro cúbico de gasolina. En concreto, se obtuvo que la combustión de un metro cúbico de biogás genera aproximadamente 1.9 kg de CO<sub>2</sub> eq, mientras que la quema de un metro cúbico de gasolina emite alrededor de 5478 kg de CO<sub>2</sub> eq.

Los costos asociados con el uso de los diferentes diseños de horno se estiman en ¢261,840 para el diseño #1, mientras que el diseño #2 tiene un costo estimado de ¢190,865. Estas cifras ilustran las diferencias económicas entre las opciones de diseño.

**Palabras Clave:** biogás, transferencia de calor, equipos a biogás, simulación, impacto ambiental.

## Abstract

This project was developed with the Biogás para todos project of the Technological Institute of Costa Rica and the Cipreses de Oreamuno de Cartago farm where part of the activities were carried out, the project consisted of proposing a design of an oven to carry out the chemical activation of charcoal. The objective of the study was to propose an economic design with suitable materials to avoid heat loss.

Measurements of the temperature of the biogas flame were made, obtaining a maximum value of 840 °C. The fuel flow was measured for 3 hours with an average of 0.63 m<sup>3</sup>/h of biogas, in addition, a flow supply speed of 0.571 m/s.

The conductivity test indicates that the refractory brick has a surface temperature of 50.2 °C and the structural one of 122 °C with an increase of 6.3 °C per minute and the refractory 2.6 °C, which is reflected in 41.3% less than the structural brick. Two kiln designs designated as design #1 and design #2 were proposed, #1 presented a flux of 960.3 W with structural brick and 844.45 W with refractory brick, equivalent to a 12.97% variation between the two. Design #2 obtained a maximum flux of 753.61 W for the structural brick and 692.38 W with refractory brick, which is equivalent to an 8.12% variation.

The resistance analysis for the ASTM 615 grade 60 corrugated steel bar indicates that the maximum force that the bar resists is 8.44 kN and the maximum force that it must withstand in the furnace assembly is 461.52 N, which ensures the selection of this material.

The external surface temperature of the bricks analyzed by simulations with SolidWorks presented a minimum temperature of 61.8 °C and a maximum of 429 °C compared to the thermal conductivity test carried out in the laboratory.

The environmental impact derived from the combustion of one cubic meter of biogas is significantly lower compared to the burning of one cubic meter of gasoline. Specifically, it was obtained that the combustion of a cubic meter of biogas generates approximately 1.9 kg of CO<sub>2</sub> eq, while the burning of a cubic meter of gasoline emits around 5478 kg of CO<sub>2</sub> eq.

The costs associated with the use of the different kiln designs are estimated at ¢261,840 for design #1, while design #2 has an estimated cost of ¢190,865. These figures illustrate the economic differences between design options.

**Key words:** biogas, heat transfer, biogas equipment, simulation, environmental impact.

## CONSTANCIA DE DEFENSA PUBLICA DEL PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN

El presente Proyecto Final de Graduación titulado “Diseño de un horno que use biogás como combustible para la activación de carbón vegetal utilizado en la desulfuración de biogás”, durante el I Semestre de 2023, ha sido defendido, ante el Tribunal Examinador integrado por los profesores William Jesús Benavides Ramírez, Fabián Araya Mora y Claudia Chaves Villareal; como requisito para optar al grado de Licenciatura en Ingeniería en Materiales de la Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Este documento y su defensa ante el Tribunal Examinador han sido declarados:

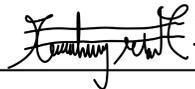
Públicos



Confidenciales



\_\_\_\_\_  
Ing. William Jesús Benavides Ramírez MEng  
Profesor Guía

\_\_\_\_\_  
  
Calet Francisco Sáenz Zúñiga  
Estudiante

\_\_\_\_\_  
Ing. Fabián Araya Mora M. Sc  
Profesor Lector

\_\_\_\_\_  
Ing. Claudia Chaves Villareal Ph. D.  
Profesor Lector

\_\_\_\_\_  
Ing. Ronald Jiménez Salas MSc  
Director Escuela de Ciencia e Ingeniería de  
los Materiales

Cartago, 22 de mayo de 2023

## CARTA DE ENTENDIMIENTO

Señores

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Biblioteca José Figueres Ferrer

Yo Calet Francisco Sáenz Zúñiga carné 2016124237, **autorizo (X)** no autorizo () a la Biblioteca José Figueres Ferrer del Instituto Tecnológico de Costa Rica disponer del Trabajo Final de Graduación realizado por mi persona, con el título “Diseño de un horno que use biogás como combustible para la activación de carbón vegetal utilizado en la desulfuración de biogás” para ser ubicado en el Repositorio institucional y Catálogo SIBITEC para ser accesado a través de la red Internet.



---

Calet Francisco Sáenz Zúñiga

116420829

## **AGRADECIMIENTO**

Quiero agradecer primero a Dios por permitirme llegar donde estoy porque sin su compañía nada hubiera alcanzado.

En parte muy importante quiero agradecer a mi familia por su apoyo durante mis años de estudio, por siempre confiar en mis capacidades y escucharme cuando lo necesité, en especial a mi madre, mi mayor agradecimiento a ella, que siempre ha estado a mi lado, escuchándome y apoyándome en cada decisión que he tomado, le agradezco todo su amor y consejo. Gracias, madre.

Mi agradecimiento al Ing. William Benavidez por todo su apoyo e instruirme durante mi proyecto, por el tiempo invertido en apoyarme, muchas gracias.

También agradezco a la Ing. Claudia Chaves, por extender su mano a mi persona para desarrollar mi trabajo final de graduación en su proyecto de investigación y por su apoyo profesional.

A mis profesores, que con su conocimiento inculcaron en mí el crecimiento profesional, por siempre brindar consejos para continuar adelante, gracias porque sin ustedes no sería quien soy hoy día.

Agradezco a mis amigos universitarios por todo el trabajo en conjunto que realizamos y el apoyo que brindaron, todos son parte de este logro.

A todas las personas que de una u otra manera fueron parte del desarrollo de mi proyecto, gracias.

A todos, muchas gracias.

## **DEDICATORIA**

A mi madre, que con su esfuerzo forjó  
la persona que soy e inculcó en mí  
el seguir adelante. Este logro es suyo.

## ÍNDICE GENERAL

CONSTANCIA DE DEFENSA PUBLICA DELPROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN ....	6
CARTA DE ENTENDIMIENTO .....	7
AGRADECIMIENTO .....	8
DEDICATORIA .....	9
<b>1</b> <b>Introducción</b> .....	<b>14</b>
<b>1.1</b> <b>Identificación de la empresa</b> .....	<b>15</b>
<b>1.2</b> <b>Justificación del estudio</b> .....	<b>16</b>
<b>1.3</b> <b>Impacto Socio-Ambiental</b> .....	<b>18</b>
<b>1.4</b> <b>Objetivos del estudio</b> .....	<b>20</b>
<b>1.4.1</b> <b>Objetivo general</b> .....	<b>20</b>
<b>1.4.2</b> <b>Objetivos específicos</b> .....	<b>20</b>
<b>1.5</b> <b>Alcances y limitaciones del estudio</b> .....	<b>21</b>
<b>2</b> <b>Marco Teórico</b> .....	<b>22</b>
<b>2.1</b> <b>Aspectos de diseño y selección de materiales</b> .....	<b>23</b>
<b>2.2</b> <b>Efectos de la corrosión</b> .....	<b>25</b>
<b>2.3</b> <b>Materiales refractarios y aislamientos térmicos</b> .....	<b>25</b>
<b>2.4</b> <b>El carbón</b> .....	<b>27</b>
<b>2.4.1</b> <b>Activación del carbono</b> .....	<b>28</b>
<b>2.5</b> <b>Biogás como combustible</b> .....	<b>30</b>
<b>2.6</b> <b>Transferencia de calor:</b> .....	<b>30</b>
<b>3</b> <b>Metodología</b> .....	<b>32</b>
<b>3.1</b> <b>Diseño del horno</b> .....	<b>34</b>
<b>3.1.1</b> <b>Método para medir la temperatura de llama del biogás</b> .....	<b>35</b>
<b>3.1.2</b> <b>Medición de flujo del biogás en el biodigestor</b> .....	<b>36</b>
<b>3.2</b> <b>Pruebas de caracterización y selección de materiales</b> .....	<b>37</b>
<b>3.2.1</b> <b>Carbón vegetal comercial</b> .....	<b>37</b>
<b>3.2.2</b> <b>Ladrillo refractario</b> .....	<b>38</b>
<b>3.2.3</b> <b>Cálculos para el análisis de transferencia de calor</b> .....	<b>40</b>
<b>3.3</b> <b>Resistencia de barra de acero corrugado grado 60 ASTM 615</b> .....	<b>45</b>
<b>3.4</b> <b>Análisis económico y ambiental</b> .....	<b>45</b>

3.5	<b>Análisis de efectividad del diseño CAD para SolidWorks .....</b>	<b>46</b>
<b>4</b>	<b>Resultados y análisis.....</b>	<b>48</b>
4.1	Temperatura de llama .....	49
4.2	Medición de flujo de biogás .....	50
4.3	Conductividad térmica de ladrillos .....	52
4.4	Cálculos para el diseño #1 del horno con ladrillo y cemento refractario .....	55
4.5	Cálculos para el diseño #1 del horno con ladrillo estructural y cemento refractario .....	60
4.6	Cálculos para el diseño #2 del horno con ladrillo estructural y cemento refractario .....	60
4.7	Cálculos para el diseño #2 del horno con ladrillo y cemento refractario .....	64
4.8	Cálculos de resistencia para el acero corrugado grado 60 ASTM 615 .....	65
4.9	Efectividad del horno .....	65
4.9.1	Diseño #1 del horno con ladrillo y cemento refractario .....	65
4.9.2	Diseño #1 del horno con ladrillo estructural y cemento refractario .....	66
4.9.3	Diseño #2 del horno con ladrillo estructural y cemento refractario .....	67
4.9.4	Diseño #2 del horno con ladrillo refractario y cemento refractario .....	68
4.10	Análisis de impacto ambiental .....	69
4.11	Análisis de impacto económico.....	72
4.12	Resumen de resultados.....	75
4.12.1	Medición de temperatura de llama .....	75
4.12.2	Medición de flujo de biogás .....	75
4.12.3	Conductividad térmica de ladrillos.....	76
4.12.4	Cálculos de transferencia de calor .....	76
4.12.5	Simulaciones con SolidWorks .....	77
4.12.6	Análisis ambiental .....	77
4.12.7	Análisis económico .....	78
<b>5</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>79</b>
<b>6</b>	<b>Bibliografía .....</b>	<b>81</b>
<b>7</b>	<b>Consultas bibliográficas.....</b>	<b>86</b>
<b>8</b>	<b>Apéndices y anexos.....</b>	<b>88</b>
8.1	Metodología y resultados de caracterización del carbón vegetal por SEM y EDS....	88

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Temperatura de cocción y energía requerida para ladrillos refractarios .....	26
<b>Tabla 2</b> Resumen de la metodología y actividades para cumplimiento de objetivos .....	33
<b>Tabla 3</b> Simbología y nombre respectivo de ecuaciones.....	41
<b>Tabla 4</b> Registro de temperatura de la estación meteorológica de Potrero Cerrado.....	42
<b>Tabla 5</b> Propiedades del viento a 15 °C. ....	42
<b>Tabla 6</b> Registro de temperatura en periodos de 15 segundos. ....	50
<b>Tabla 7</b> Registro de medición del volumen de biogás.....	51
<b>Tabla 8</b> Datos obtenidos de prueba de conductividad térmica .....	52
<b>Tabla 9</b> Propiedades del ladrillo estructural y refractario.....	54
<b>Tabla 10</b> resultados del flujo de calor y conductividad térmica. ....	55
<b>Tabla 11</b> Dimensiones externas e internas del diseño #1. ....	56
<b>Tabla 12</b> Datos de diseño #1 .....	59
<b>Tabla 13</b> Resumen de resultados de cálculos para transferencia en diseño #1 de horno.....	60
<b>Tabla 14</b> Resumen de resultados de cálculos para transferencia en diseño #1 de horno.....	60
<b>Tabla 15</b> Dimensiones externas e internas del diseño #2. ....	61
<b>Tabla 16</b> Resumen de resultados de cálculos para transferencia en diseño #2 de horno.....	64
<b>Tabla 17</b> Resumen de resultados de cálculos para transferencia en diseño #2 de horno.....	64
<b>Tabla 18</b> Equivalencias de emisiones por 1.9 kg de CO <sub>2</sub> eq de biogás con otras fuentes de emisión. .....	70
<b>Tabla 19</b> Medios para contrarrestar las emisiones de 1.9 kg de CO <sub>2</sub> eq por biogás.....	70
<b>Tabla 20</b> Equivalencias de emisiones por 5478 kg de CO <sub>2</sub> eq de gasolina con otras fuentes de emisión. ....	71
<b>Tabla 21</b> Medios para contrarrestar las emisiones de 5478 kg de CO <sub>2</sub> eq por gasolina.....	72
<b>Tabla 22</b> Costos para producir horno diseño #1 .....	73
<b>Tabla 23</b> Costos para producir horno diseño #2.....	74

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Equipo para medición de temperatura de llama de biogás. ....	36
<b>Figura 2</b> Equipo para medición de flujo del biogás. ....	37
<b>Figura 3</b> Equipo para prueba de homogenización de partículas.....	38
<b>Figura 4</b> Superficie de ladrillo refractario expuesta a fuente de calor para prueba de conductividad térmica.....	39
<b>Figura 5</b> Montaje de ladrillos para exposición a fuente de calor.....	40
<b>Figura 6</b> A) Distribución superficial para convección y radiación, B) distribución para conducción. ....	47
<b>Figura 7</b> Gráfico registro flujo vs tiempo.....	52
<b>Figura 8</b> Variación de temperatura con el tiempo. ....	53
<b>Figura 9</b> Diseño #1 de horno.....	56
<b>Figura 10</b> Diseño #2 de horno.....	61
<b>Figura 11</b> Resultado de simulación en SolidWorks para el diseño #1 con ladrillo refractario. ....	66
<b>Figura 12</b> Resultado de simulación en SolidWorks para el diseño #1 con ladrillo estructural. ....	67
<b>Figura 13</b> Resultado de simulación en SolidWorks para el diseño #2 con ladrillo estructural. ....	68
<b>Figura 14</b> Resultado de simulación en SolidWorks para el diseño #2 con ladrillo refractario. ....	69
<b>Figura 15</b> Equipo JEOL JSM-6010LA para análisis de SEM y EDS. ....	88
<b>Figura 16</b> Micrografía SEM x50 aumentos carbón vegetal. ....	89
<b>Figura 17</b> Micrografía SEM. A) x30, B) x60, C) x550 y D) x95 aumentos. ....	90
<b>Figura 18</b> Micrografía SEM de a) carbón vegetal y b) carbón activado a 700 °C. Fuente: (Cubero Montero, 2021).....	90
<b>Figura 19</b> Micrografía SEM de carbón activado a 300 °C a), 450 °C b) y 550 °C c). Fuente: (Cubero Montero, 2021).....	91
<b>Figura 20</b> Elementos presentes en el carbón vegetal obtenido por EDS.....	92

# 1 Introducción

## **1.1 Identificación de la empresa**

El trabajo de investigación se desarrolló junto al programa Biogás para Todos liderado por la escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales (ECIM) perteneciente al Instituto Tecnológico de Costa Rica. El programa tiene como finalidad utilizar los recursos que poseen familias y pequeñas industrias dedicadas a la ganadería de vacuno o porcina, para utilizar sus desechos en un proceso de biodigestión y producir biogás que es un combustible de origen biogénico y de menor impacto ambiental. Además, Biogás Para Todos posee como principio tecnificar los sistemas de biodigestión anaerobia y capacitar a los pequeños y medianos productores de biogás en Costa Rica mejorando las capacidades técnicas y de seguridad ocupacional.

La Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales pertenece al Instituto Tecnológico de Costa Rica teniendo su origen en el año 1982 con una trayectoria en la cual se ha dedicado a brindar servicios de educación e investigación en diversas disciplinas como los dispositivos médicos, aprovechamiento de energías limpias y servicios de consultoría a empresas, además, tiene como misión ser una unidad académica de alta calidad en la formación de profesionales en el área de los materiales fomentando la ejecución de proyectos de investigación para mejorar el desarrollo del país en aspectos sobre la responsabilidad de protección del ambiente.

La finca Cipreses ubicada en el distrito Cot en la provincia de Cartago, se dedica a la actividad de ganadería específicamente en la producción de leche y ganado de engorde, agricultura y posee un biodigestor con capacidad para 18 m<sup>3</sup> con un consumo diario de biogás entre 1 y 2 m<sup>3</sup> con el fin de dar aprovechamiento a la materia orgánica de desecho causada por las excretas del ganado bovino para disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero y hacer uso de los beneficios del biodigestor.

El productor aprovecha los recursos del biodigestor en producción de fertilizante que es utilizado para riego de los campos destinados a la alimentación del ganado y agricultura, además, el compost es otro recurso de aprovechamiento con el que cuenta la propiedad. Esta finca tiene instalaciones de ductos con los que alimentan de biogás una parrilla destinada al calentamiento de agua que se destina para los animales.

## 1.2 Justificación del estudio

En Costa Rica se producen emisiones de gases de efecto invernadero que afectan de manera negativa las condiciones climáticas con el paso del tiempo afectando el diario vivir de los seres humanos y demás seres vivos. Los cambios más relevantes presentes en el mundo se presentan en el calentamiento global y enfriamiento del núcleo terrestre, aumentando la intensidad en los efectos de la naturaleza, el invierno con comportamientos diferentes y drásticos, veranos donde las temperaturas aumentan de manera intensa respecto a periodos previos, los incendios forestales han aumentado produciendo generaciones de dióxido de carbono a gran escala.

En los últimos registros la evolución del calentamiento global se evidencia con la creciente temperatura media del planeta, 1.2 °C más cálido que el periodo de 1981-2010 y alcanzando el récord de mayores temperaturas en la Antártida hasta los 20 °C y el Ártico calentándose dos veces más rápido que el resto del planeta alcanzando los 10 °C. Los estudios realizados en el periodo 1997-2019 indican que la cantidad de toneladas de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) liberado a la atmosfera debido a los incendios forestales representa un número de impacto, 7800 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> (Hernandez, 2020).

En Costa Rica la actividad ganadera es la responsable de la producción de un 23% de las emisiones brutas de gases de efecto invernadero (GEI) incluyendo el CO<sub>2</sub>, metano (CH<sub>4</sub>) y óxido de nitrógeno (N<sub>2</sub>O) en el país lo que indica que es una actividad muy influyente en la economía de los costarricenses generando empleo y opciones de desarrollo para el medio rural, además, de la actividad ganadera la dedicada a la producción de leche es la que mayor cantidad de emisiones de GEI emite con un promedio de 4.47, 9.37 y 9.37 toneladas anuales de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O respectivamente (Abarca Monge & Segura Guzmán, 2022), siendo de aprovechamiento estos gases para la producción de biogás a partir de la biomasa generada por los desechos como las excretas para el aprovechamiento de producir una energía limpia reduciendo el impacto negativo de las emisiones.

Debido a que las especies de ganado bovino lechero, de carne y d propósito poseen procesos generadores de emisiones de GEI, como la fermentación entérica (proceso que se da en el tracto digestivo de las especies donde los microorganismos residentes en el tracto descomponen por medio de la fermentación anaeróbica los carbohidratos ingeridos

generando como producto el gas metano (Vázquez Carrillo et al., 2020)), se puede aprovechar los gases generados por las excretas para la producción de biogás y reducir las emisiones de gases que incrementan el efecto invernadero aprovechando este biocombustible para el funcionamiento de equipos como hornos, cocinas, calentadores, secadores, procesos agroindustriales y generación eléctrica (MINAE et al., 2017).

Las emisiones de gases en la agricultura se dan no solo por métodos como lo descrito anteriormente, también por procesos mecánicos que tienen como objetivo mejorar el funcionamiento de los suelos destinados a la actividad agrícola y se incluyen procesos como el encalado que consiste en la corrección del nivel de acidez en los suelos por medio de mezclas. El gestionamiento de los suelos como las prácticas y tratamientos que incluyen maquinaria y fertilizantes para proteger y mejorar el rendimiento de los suelos producen emisiones de gas  $N_2O$  (De Klein et al., 2006).

Por los aspectos mencionados es importante el desarrollo de un horno para la activación de carbón vegetal utilizando biogás como combustible, ya que es un proceso que no se realiza en el país implicando en contribuir a la importación del producto de países pertenecientes al continente americano y asiático. El estudio es necesario para analizar la efectividad del diseño del horno y que pueda completar el proceso de activación del carbón vegetal, debido a que en la producción de biogás por medio de biodigestores se busca purificar el mismo y reducir la presencia de sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ) altamente corrosivo y tóxico para la vida humana haciendo uso del carbón activado efectivo en la adherencia y bajo requerimiento energético (Leitón, 2015).

Un aspecto importante por considerar en el desarrollo del proyecto es analizar la eficacia del horno y validar su funcionamiento, además, el estudio económico de la producción del horno para su fabricación y proyectar a futuro el diseño del horno a macro escala y aportar al país información sobre el proceso de activación de carbón vegetal para disminuir las importaciones y sus respectivas emisiones de GEI.

### 1.3 Impacto Socio-Ambiental

Los combustibles son la fuente de energía más utilizada para el desarrollo de las industrias siendo los combustibles fósiles los más utilizados y eficientes, pero a su vez el impacto negativo que representa la quema de estos generan gases de efecto invernadero siendo el 86% las emisiones globales de dióxido de carbono (BBC News Mundo, 2021) que se mantiene en la atmósfera por mucho tiempo promoviendo el calentamiento global. En el caso del dióxido de carbono y metano, son los gases que más contribuyen al calentamiento global, aunque el metano se encuentra en menor cantidad que el dióxido de carbono, el metano es entre 25 y 28 veces más efectivo en absorber la luz infrarroja. El CO<sub>2</sub> posee una durabilidad de 100 años y el metano tan solo 10 años (Bagi et al., 2017).

La quema de carbón en el mundo es la actividad industrial para la producción de combustibles que mayor influencia negativa posee en el cambio climático representando para el año 2021 una emisión de 14.98 billones de toneladas de CO<sub>2</sub> (Ritchie et al., 2020) por lo que se puede aprovechar el investigar métodos para disminuir el nivel de emisiones de gases de efecto invernadero por esta práctica o hacer uso de métodos que hagan uso de energías limpias como el biogás obtenido de procesos que emiten emisiones como la ganadería de leche.

Aprovechar las energías limpias y sus procesos de generación implican que se puede mitigar las emisiones de GEI y en la actualidad el biogás es un ejemplo de energía obtenida por medio del aprovechamiento de las emisiones de gases como el metano, por lo que utilizar el biogás como combustible para la activación de carbono vegetal representa una iniciativa para la activación de un mercado interno y evitar la importación del carbón activado que se utiliza en procesos de refinamiento de biogás.

Para un enfoque social el desarrollo de un horno con biogás como combustible, busca generar aprovechamiento en fincas donde se produce el biogás por medio de biodigestores y promover un pequeño mercado a baja escala para los productores en la venta de carbón activado.

Las familias que utilizan cocinas de leña están expuesta a contaminación y respiro de humo producto de la quema de madera para cocinar por lo que el uso del biogás como

combustible puede resultar en una disminución de la exposición de la salud a factores de riesgo.

## **1.4 Objetivos del estudio**

### **1.4.1 Objetivo general**

Diseñar y modelar un horno que funcione con biogás proveniente de un biodigestor para usarse en el proceso químico de la activación de carbón vegetal para la desulfuración de biogás.

### **1.4.2 Objetivos específicos**

- Investigar bibliográficamente la fuente de combustible de biogás, la activación de carbón vegetal y materiales aptos para el diseño del horno.
- Desarrollar la caracterización de los materiales a través pruebas de laboratorio para caracterizar los materiales contemplados en el diseño del horno y el carbón vegetal utilizado.
- Establecer los parámetros de dimensionamiento y modelación para un horno que opere con biogás.
- Determinar el costo económico de los diseños propuesto para el horno, así como el impacto ambiental del uso de biogás como combustible.

## **1.5 Alcances y limitaciones del estudio**

El proyecto se enfoca en el diseño de un horno que use biogás como combustible para realizar la activación de carbono vegetal que se utiliza como método para la refinación del biogás. El horno se busca diseñar con materiales de bajo costo económico y que mantenga una eficiencia alta para su objetivo de activar el carbón vegetal.

El uso de biogás como combustible es un alcance considerado debido al aprovechamiento de las emisiones de GEI producidas por actividades de industria como la ganadería de leche y evitar que los gases como el metano sean liberados a la atmósfera sin un aprovechamiento de su capacidad energética.

El diseño del prototipo del horno abierto a modificaciones para un desarrollo de carácter más industrial contemplando la efectividad energética y evitando las pérdidas de calor a lo interno del horno, es un alcance que permite una visión del diseño para una finalidad de tratamientos térmicos en metales y producción de carbono vegetal con modificaciones de dimensionamiento del diseño.

Debido a que el combustible a utilizar no se tiene monitoreado en la finca Cipreses en cuanto a su composición química y refinamiento, el proyecto se limita al diseño del horno sin contemplar la toxicidad de componentes como el  $H_2S$  y su alto nivel corrosivo. Otro aspecto de índole limitante es que los gases de combustión ( $CO_2$  y  $SO_2$ ) emitidos por el proceso de activación de carbono vegetal no se contemplan para disminuir su impacto negativo al ambiente.

El acceso a software de mayor eficiencia para realizar la simulación del horno es una limitante debido al limitado acceso a las licencias por lo que se trabaja con las herramientas disponibles. El factor económico para el proyecto es una condición que restringe la selección de materiales y diseño del horno de mayor eficiencia debido a su alto costo económico. Otra limitante es la obtención de equipo para medición de temperatura debido a que los precios son elevados y en la mayor parte de casos los suplidores no cuentan con ejemplares en el país y el tiempo de entrega puede ser variado con un rango de cinco a diecinueve semanas, lo que puede impactar en la verificación de temperatura durante las pruebas prácticas.

## **2 Marco Teórico**

En esta sección del capítulo se van a desarrollar algunos temas y conceptos relacionados al tema de investigación. Se encuentra información relevante para la comprensión de los resultados obtenidos y que dan soporte a los mismos.

## **2.1 Aspectos de diseño y selección de materiales**

Entre los aspectos que se consideran importantes para la selección de materiales es importante contemplar factores como la disponibilidad de material en el mercado, costo económico, propiedades, dimensionamiento del horno y método de construcción.

Para aspectos de diseño se debe considerar la aplicación final que se le va a dar al horno, la ubicación del horno y equipo para movilizar el horno, cantidad de flujo disponible del combustible y condiciones climáticas a las que se puede exponer el horno.

Respecto al diseño de hornos las formas de conducción de temperatura se consideran como un aspecto por considerar, se analiza si en el interior la transferencia de calor es por convección forzada o natural, si la conducción es en estado estacionario o transitorio y respecto a la transferencia por radiación se considera que esta depende de las dimensiones de las superficies, la relación angular y emisividad característica de los materiales. Un aspecto de diseño importante cuando el mecanismo de calentamiento es por radiación es la temperatura interna del horno, ya que si hay un mínimo cambio de esta se puede ver afectada la tasa de calentamiento debido a que la transferencia de calor por radiación depende de la cuarta potencia de la temperatura absoluta (Dryden, 1982).

La selección del combustible depende de varios factores como su estado, si es líquido, gaseoso o pulverizado, además se debe considerar la versatilidad del horno para evitar la dependencia de un solo tipo como considerar la alternativa de un combustible al principal o la combinación si es posible. Para seleccionar el tipo de combustible se requiere de conocimiento de las propiedades como el equipo requerido para su manejo y combustión (Dryden, 1982).

El método de combustión del combustible debe considerarse para evitar que alguna porción del combustible permanezca sin consumirse, para esto se utiliza la mezcla de combustible con aire y en combustibles gaseosos un exceso del 10 % de aire es suficiente para una combustión completa. Dentro del proceso de combustión para el diseño de un horno es importante considerar si se requiere una mezcla previa del combustible y aire, así como el espacio necesario para esta cámara de mezcla (Dryden, 1982).

El método de aplicación del calor es un aspecto de diseño que se clasifica en cinco maneras distintas de aplicación, en el tipo subcalentamiento la llama se produce en el inferior del corazón y los productos de combustión pasan hasta la cámara de calentamiento. El sobre tipo posee la cámara de combustión arriba de la cámara de calentamiento. En el disparo lateral la cámara de combustión se encuentra a uno o ambos lados de la cámara de calentamiento, este tipo permite una turbulencia lo que mejora la mezcla de aire y combustible. El disparo directo es la forma más sencilla y posee quemadores en los lados, extremos y en ocasiones en el techo del horno. El tipo mufla usa tubos radiantes para amortiguar la llama y productos de combustión (Dryden, 1982).

En la selección de materiales se considera necesario que este posea la capacidad de retener el calor en la cámara interna del horno y no permita el escape del flujo de calor a través de su espesor de manera sencilla, se requiere que posea una elevada capacidad calorífica y baja conductividad térmica, así como resistencia a la temperatura.

Debido a que los ladrillos refractarios están compuestos en su mayoría por óxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) y alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), compuestos que poseen una temperatura de fusión de 1728 °C y 2050 °C respectivamente (Hasan et al., 2014), le brindan al ladrillo la característica de resistir elevadas temperaturas de trabajo hasta los 1300 °C, además, al buscar que sean materiales porosos se disminuye el valor su conductividad térmica lo que los hace funcionales para su uso en hornos.

El ladrillo estructural es un material compuesto en su mayoría por óxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) que también posee buena resistencia a la temperatura, es de menor densidad que el ladrillo refractario, pero económicamente mucho más factible de conseguir, el ladrillo estructural posee una mayor conductividad térmica pero aun así considerable para el análisis del estudio, por esto se considera como posible material para el diseño del horno.

El cemento refractario es una buena opción como mezcla para unir los ladrillos debido a que posee una baja conductividad térmica lo que permite mantener el calor dentro del horno sin excesivas pérdidas, además, el cemento refractario posee un valor económico bajo y funciona como agente protector de los ladrillos ya que este es quien estará expuesto a la temperatura y en caso de mantenimiento implica menor esfuerzo e inversión económica.

Para reforzamiento de la estructura se selecciona el acero corrugado en forma de barras usadas para el refuerzo de concreto para brindar una sección más segura al techo del horno y evitar que por peso de los ladrillos o agentes externos el cemento pierda su funcionalidad y falle la estructura.

## **2.2 Efectos de la corrosión**

La corrosión es conocida mundialmente como una de las formas más comunes de deterioro experimentada por las estructuras metálicas a lo largo de su vida de servicio y puede resultar en una amenaza significativa a la seguridad integral de las estructuras ubicadas en zonas costeras como las que no. Datos indican que la corrosión es la responsable del 20% de accidentes de refinería en la Unión Europea, causante del 17% de accidentes en tuberías en los Estados Unidos de América y en la industria de aviación más del 20% de accidentes (Sajid & Kiran, 2018).

En estudios como el de (Tang et al., 2010), demuestra que el  $H_2S$  tiene alto impacto en la corrosión de los aceros al carbono y el método más preciso y exacto es analizando las pérdidas de peso de los especímenes en estudio, además, indican que conforme aumente la concentración de  $H_2S$  la tasa de corrosión aumenta provocando daños en la superficie del material aumentando la rugosidad de la superficie con la presencia de grietas y cavidades. Uno de los productos obtenidos en presencia de  $H_2S$  son mackinawite (mineral sulfuroso) y la corrosión severa ocasionando desprendimiento de cementita de los límites de grano.

## **2.3 Materiales refractarios y aislamientos térmicos**

Los materiales refractarios son materiales cerámicos no metálicos incluyendo algunos que poseen parte de metales, algunos poseen cierta refractariedad conocida como el cono pirométrico equivalente el cual es determinado en pirámides trigonales pequeñas y alargadas hechas de una mezcla de materiales cerámicos. Los refractarios son materiales que no poseen una temperatura específica de punto de fusión, sino que poseen un estrecho rango de temperatura en la que funden o se ablandan. La principal característica que poseen los refractarios es la capacidad de resistir elevadas temperaturas (600-2000 °C) y existen cuatro tipos: productos conformados, productos sin forma, funcionales y los aislantes térmicos (Routschka & Wuthnow, 2008).

La manufactura de materiales refractarios se diferencia según la finalidad del producto, se basa en los tamaños de grano, por mencionar, la manufactura de materiales monolíticos con grano desde 6 mm hasta 25 mm y las cerámicas finas poseen tamaño inferior a 1 mm. Otros procesos incluyen la manufactura por fundición, productos porosos y lanas de alta temperatura como las fibras cerámicas. Para el caso de materiales refractarios como ladrillos y la energía requerida para alcanzar dichas temperaturas de cocción (Routschka & Wuthnow, 2008), se muestran en la **Tabla 1**:

**Tabla 1** Temperatura de cocción y energía requerida para ladrillos refractarios

<b>Grado de ladrillo</b>	<b>Temperatura de cocción (°C)</b>	<b>Energía aproximada requerida (kJ/kg)</b>
Ladrillo de arcilla refractaria	1250-1500	3000
Ladrillo de sílica	1420-1500	6000
Ladrillo de alto contenido de alumina	1500-1800	5000
Ladrillo con contenido de magnesio	1500-1800	6300

Fuente: (Routschka & Wuthnow, 2008)

Las propiedades de cualquier material refractario dependen de su composición mineral, la distribución del tamaño de partícula y la manera en que reaccionan a elevadas temperaturas y ambientes de horno. Las principales propiedades por considerar son aquellas que permiten que el refractario pueda resistir las condiciones encontradas dentro de un horno. Se considera la resistencia a la abrasión, permeabilidad, resistencia al monóxido de carbono, el comportamiento térmico, la porosidad aparente y la fuerza de trituración en frío como las propiedades principales. Entre las pruebas para análisis de los materiales refractarios se conocen: la de recalentamiento, de carga, prueba de creep, módulo de ruptura en caliente y la prueba de escoria (Ruh, 1991).

## 2.4 El carbón

El uso del carbón mineral ha sido crucial en el desarrollo del mundo industrial de manera que datos sobre su uso indica que se empezó a utilizar como fuente de energía en China hace aproximadamente 2000 años (Food & Agriculture Organization, 1983). Este elemento juega un papel importante en la regulación del clima, las placas tectónicas, organismos vivientes y en la geodinámica, que se describe el proceso a través del cual un fluido giratorio, convectivo y conductor de electricidad actúa para mantener la estabilidad del campo magnético de la tierra (Soward, 1992), además, que influye en la reducción del punto de fusión del hierro puro y en la conducción de la convección compositiva en el núcleo externo que contribuye a la generación de campos magnéticos (Fischer et al., 2020).

El carbón es un elemento muy versátil que se puede combinar consigo mismo y muchos otros elementos químicos. Esta versatilidad le brinda una diversidad estructural de formas solidas al carbono como las cristalinas: diamante, grafito y fullerenos. Las formas cristalinas de diamante y grafito existen en formas cristalográficas: cúbica y hexagonal respectivamente, además, de baja presencia están en hexagonal y romboédrica. De la extensa existencia del carbón se encuentran otros tipos que varían de tamaños en lo visible por el ojo humano hasta el nivel microscópico como capas amorfas producidas por procesos como deposición física de vapor y deposición química de vapor, PVD y CVD por sus siglas en inglés respectivamente, además, las películas de diamante, nanopartículas de carbón y los carbonos ingenieriles (Burchell, 1999).

El carbón vegetal es uno de los tipos de carbón existentes y es al que se le da prioridad de estudio en este proyecto, ya que su finalidad es utilizarlo para el proceso de activación de este. El carbón vegetal se considera como un material usado en la producción de hierro hasta el año 1700 luego de que en 1709 se produjera arrabio fundido a partir de carbono coque. Para el año 2009 se estimó su producción en 47 millones de toneladas para uso industrial. Este producto es el resultado de la descomposición térmica de biomasa, generalmente madera, por medio del proceso de pirólisis en ausencia de aire a temperaturas superior a los 300 °C. Existe cuatro variantes del proceso (Da Costa Pinheiro, 2016):

- Pirólisis lenta: se realiza a bajas temperaturas y requiere de un extenso tiempo de reacción, maximizando la producción.

- Pirólisis rápida: posee un rango de temperatura de trabajo entre 450-550 °C y alta velocidad de reacción.
- Pirólisis flash: la temperatura de trabajo es mayor a 700 °C y se extiende la producción de líquido y gas.
- Pirólisis convencional: se realiza a temperaturas inferiores a 600 °C y produce cantidades similares de gas, líquido y carbón.

La madera utilizada en la fabricación del carbón vegetal está compuesta por tres principales componentes: celulosa, lignina y agua. La celulosa y lignina están ligados junto a otras materias y juntos constituyen la materia denominada madera. El agua presente es retenida dentro de la madera por moléculas de celulosa y lignina. La lignina se considera como una de las principales estructuras de la pared celular de las plantas y las dota de rigidez estructural, resistencia a la tensión y presión hidráulica (Maceda et al., 2021).

El proceso para la fabricación de carbón vegetal a base de madera conlleva a un gran uso de energía debido al primer paso que es el secado de la madera, ya que debe poseer un porcentaje de humedad del 0% y se logra por medio de la evaporización del agua, su impacto energético puede ser mitigado por un presecado de la madera al sol así los restos de humedad pueden ser eliminados durante la carbonización y en muchos casos se requiere del uso de la misma madera para alcanzar el proceso de combustión lo que implica en un porcentaje de desaprovechamiento del recurso. La madera estacionada o secada al aire puede contener entre 12-18 % de agua, por lo que el primer paso es llevar el producto al horno a 100 °C para la evaporación del agua, luego la temperatura se eleva aproximadamente a 280 °C, y es cuando la madera se fracciona espontáneamente y se libran compuesto químicos en forma de alquitrán y gases no condensables (H<sub>2</sub>, CO y CO<sub>2</sub>), el proceso de carbonización se puede llevar a cabo a un máximo de temperatura de 400 °C y obtener un rendimiento aproximado del 67-70 % de carbono (Food and Organization of the United Nations, 2007).

#### **2.4.1 Activación del carbono**

El carbón activado a escala comercial se puede obtener de productos como la madera, carbón de antracita y betún, cáscaras de turba y el coco, aunque dos fuentes alternativas son el olivo y las cáscaras de almendras. El proceso de activación se puede llevar a cabo de dos formas, ya sea física o químicamente.

La activación puede darse a través de la activación directa de un precursor crudo seco o un proceso que incluye dos etapas, como primera la carbonización y segunda la activación. Dentro de la carbonización se debe exponer el material a una temperatura inferior a los 700 °C en un aparato de destilación para evaporar y remover los hidrocarburos en ausencia de oxígeno. La carbonización es un proceso pirolítico y su producto se conoce como material carbonizado, carbón vegetal o biocarbón (Heidarinejad et al., 2020).

Activar el carbón vegetal de manera física involucra la carbonización y activación, básicamente se refiere a la oxidación seca que incluye la reacción entre la muestra y gases ( $\text{CO}_2$  y aire), vapor o una mezcla de vapor y gases a temperatura superior a los 700 °C. El gas  $\text{CO}_2$  es apto para el proceso debido a su pureza, fácil de manejar y que el proceso de activación se puede controlar fácilmente a los 800 °C debido a su baja tasa de reacción y que en comparación con el vapor se logra una uniformidad de poro mayor. En la carbonización se logra la descomposición pirolítica del precursor y las especies no carbónicas, donde los volátiles de bajo peso molecular se libera de primero, luego los aromáticos livianos y el gas hidrógeno (Yahya et al., 2015).

El proceso químico para activar el carbón se conoce como la oxidación húmeda que requiere de un catalizador para ser impregnado en el precursor, luego lavarlo y así obtener el carbón activado (Yahya et al., 2015). La temperatura de activación se mantiene en el rango desde los 300 °C hasta los 900°C dependiendo de los aditivos para degradar y deshidratar los materiales celulósicos encontrados en el precursor, se repiten los lavados con la intención de recuperar sustancias activas (Heidarinejad et al., 2020). Las variables que se deben considerar en las características finales del carbón activado son la cantidad de impregnación y la relación en peso de los agentes químicos al precursor seco (Gratis et al., 2008).

En comparación de ambos procesos para la activación del carbón vegetal se obtiene que el químico es más efectivo en aspectos económicos debido a que requiere menores temperaturas para el proceso, además los resultados en tamaño y densidad de la porosidad de la morfología son mayores que el proceso físico.

La activación química puede incluir compuestos químicos como el hidróxido de potasio (KOH), hidróxido de sodio (NaOH), el cloruro de calcio ( $\text{CaCl}_2$ ) y el carbonato de potasio ( $\text{K}_2\text{CO}_3$ ), grupos como ácido fosfórico ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) y ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), sales de

metales intermedios tales como  $ZnCl_2$ . Estudios como el de (Rambabu et al., 2015) presentan en sus resultados que la activación del carbono por medio del KOH es más efectivo según el área superficial y volumen de porosidad que el proceso de activación por vapor, dióxido de carbono ( $CO_2$ ), pirólisis y amonio ( $NH_3$ ).

## **2.5 Biogás como combustible**

El biogás se conoce como una mezcla de diferentes gases obtenido por medio del proceso de degradación anaeróbica de componentes orgánicos como excretas de animales en su mayoría provenientes de la ganadería de vacuna y porcina, aunque el uso de residuos vegetales es otra fuente de biomasa que puede ser utilizada. La tecnología del biogás se considera como la forma más sostenible de utilizar el contenido energético de las excretas de animales al mismo tiempo que recicla los nutrientes y disminuye las emisiones de GEI. Al existir variedad de biomasa para la alimentación del proceso de descomposición dentro de un biodigestor se debe considerar los lineamientos que se pueden aplicar porque algunos materiales son más apropiados según el fin para un proceso estable en la producción de biogás. El sustrato debe incluir componentes necesarios para la actividad de los sistemas enzimáticos microbianos, y estos deben cumplir con los requisitos nutricionales de los microorganismos en términos de energía y crecimiento de nuevas células (Alhassan et al., 2019).

La composición química del biogás se basa principalmente en la presencia de metano (50 – 77 % molar), dióxido de carbono (19 – 50 % molar), nitrógeno gaseoso (0 – 5 %), sulfuro de hidrógeno (3 – 20000 ppm), hidrógeno (5000 – 10000 ppm) y siloxanos (0 – 15 ppm) (Maria et al., 2020).

La temperatura de trabajo del biogás puede alcanzar aproximadamente los 965 °C en su proceso de combustión y al aumentar la concentración de oxígeno se puede aumentar la temperatura de la llama, con un 15% de concentración el valor puede alcanzar aproximadamente los 1420 °C (Hosseini et al., 2014).

## **2.6 Transferencia de calor:**

La transferencia de calor y masa se considera como una ciencia básica que trata sobre la rapidez de transferencia de energía térmica de un sistema a otro y va de la mano con la

termodinámica ya que se considera fundamental para el comprender la transferencia de calor (Cengel & Ghajar, 2011).

El proceso de transferencia se basa en las leyes de la termodinámica y la primordial es la ley cero, la cual se puede interpretar como el equilibrio térmico entre dos sistemas que posean la misma temperatura, además se considera que el equilibrio se mantiene si los sistemas no transfieren calor incluso si están en capacidad de hacerlo basado en otros factores (Urone & Hinrichs, 2020).

Para comprender como se transmite la energía en forma de calor se requiere conocer las formas de transferencia que existen, conducción, convección y radiación según lo detalla (Cengel & Ghajar, 2011):

- **Conducción:** proceso de transferencia de energía desde las partículas con mayor energía de una sustancia a las adyacentes que poseen menor energía como consecuencia de las interacciones y se puede dar en sólidos, líquidos y gases. Los aspectos que influyen en la rapidez de conducción son la geometría del medio, espesor y el material, así como la diferencia de temperatura.
- **Convección:** es el modo en que se transfiere energía entre un sólido y un líquido o gas que se encuentra en movimiento y relaciona los efectos de la conducción y movimiento de fluidos. Existen dos tipos, la convección forzada que sucede cuando el fluido es forzado a fluir y la convección natural cuando el fluido fluye por fuerzas de empuje debido a la diferencia de densidad por variación de temperatura en el fluido.
- **Radiación:** se considera como la energía que emite la materia en formas de ondas electromagnéticas resultado de los cambios en la configuración electrónica de los átomos y moléculas, esta forma de transferencia no requiere de un medio interventor para transmitirse. Existen dos propiedades de importancia, la emisividad que es la radiación emitida por las superficies y posee un valor entre 0 y 1. La absorptividad es la fracción de la energía de radiación incidente sobre una superficie que es absorbida.

### **3 Metodología**

El desarrollo de la investigación insta al diseño de un horno que use el biogás como combustible para la activación de carbono vegetal, con materiales refractarios que permitan la conservación de la temperatura en su interior. Los dos diseños propuestos trabajan con dos quemadores de combustible que distribuyen la llama a lo largo del espacio interno para distribuir el calor de manera uniforme en el contenedor de carbón vegetal. El biogás proviene del biodigestor instalado en la finca Cipreses y por medio de tuberías se distribuye para diferentes fines.

En este apartado se describen las etapas realizadas durante el desarrollo del proyecto y en la tabla 2 de resumen se describen las actividades para llevar a cabo cada objetivo del proyecto y lograr el producto esperado de cada uno.

**Tabla 2** Resumen de la metodología y actividades para cumplimiento de objetivos

Objetivo Específico	Productos	Actividades
<p><b>OE1</b> Investigar bibliográficamente la fuente de combustible de biogás, la activación de carbón vegetal, materiales aptos para el diseño del horno y temas relacionados a transferencia de calor.</p>	<p>Información sobre los procesos y materiales para el diseño.</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Hacer un estudio bibliográfico acerca del biogás, proceso de activación del carbón vegetal y transferencia de calor.</li> <li>2. Identificar las condiciones que debe soportar el diseño en cuanto a temperatura y condiciones externas.</li> <li>3. Realizar la efectiva selección de materiales según datos investigados.</li> </ol>
<p><b>OE2</b> Desarrollar la caracterización de los materiales a través pruebas de laboratorio para caracterizar los materiales contemplados en el diseño del horno y el carbón vegetal utilizado.</p>	<p>Morfología y composición química del carbón vegetal. Propiedades térmicas de materiales.</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Determinar las pruebas y procedimientos para caracterizar los materiales.</li> <li>2. Coordinar con los laboratorios universitarios para realizar las pruebas de caracterización.</li> <li>3. Comparar resultados de caracterización del carbón vegetal con datos existentes.</li> </ol>
<p><b>OE3</b> Establecer los parámetros de dimensionamiento y modelación para un horno que opere con biogás.</p>	<p>Diseños de horno y simulaciones con software.</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Analizar la capacidad de volumen necesario del horno para el proceso de activación del carbono vegetal.</li> <li>2. Modelar los diseños propuestos, obtener resultados de simulación y cálculos de transferencia de calor.</li> <li>3. Elaborar los planos del diseño del horno.</li> </ol>
<p><b>OE4</b> Determinar el costo económico de los diseños propuesto para el horno, así como el impacto ambiental del uso de biogás como combustible.</p>	<p>Análisis económico y ambiental.</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Determinar los costos de materiales requeridos para cada diseño de horno.</li> <li>2. Investigar el impacto ambiental sobre las emisiones de combustibles.</li> </ol>

### 3.1 Diseño del horno

Para llevar a cabo el diseño del horno se tomó en cuenta los aspectos más importantes, la capacidad volumétrica, la geometría, la selección de materiales adecuados para soportar las condiciones de trabajo, la comparación de industrias que suplen con materia y los planos de construcción.

Para esta sección de la investigación se consideró la búsqueda de diseños actuales en cuanto a geometría general de los hornos por medio de fuentes bibliográficas y se consideró los aspectos de diseño como la estabilidad de la ubicación del horno debido a que se decidió que el horno fuera estacionario, por lo que la zona seleccionada para su construcción debe ser lo más estable y con la menor inclinación de nivel posible.

Se realizó una comparativa entre diseños de hornos no industriales destinados a la fundición de metales y sus aleaciones debido a que estos son diseñados para que alcancen temperaturas elevadas para el caso de aleaciones de acero inoxidable hasta 1530 °C (World Material, n.d.) y de aleaciones de cobre entre 475 °C y 677 °C (Fischer-Cripps, 2004) por lo que se consideraron como diseños aptos a seleccionar para el horno debido a que el carbón activado se logra en rangos de temperatura entre 400 °C y 700 °C (Njewa et al., 2022).

La capacidad del horno en volumen se obtuvo según la necesidad de producir 0.95L de carbón activado, considerando la densidad del carbón activado como  $0.3 - 0.35 \frac{kg}{L}$  (Navas-O, 2016), en este caso se usó el valor máximo para asegurar mayor capacidad del horno por varianza de la densidad del carbón vegetal. Se obtuvo que la capacidad mínima del horno debe ser  $0.95 \times 10^{-3} m^3$  para activar 0.95L de carbón vegetal equivalente a 0.33 kg.

Para adaptar la capacidad del horno a una mayor demanda de lo solicitado, se tomó la decisión de diseñar dos modelos de horno diferentes con variación en volumen del horno y diseño, así como aspecto económico. Por medio de la ecuación de densidad (ecuación 1), teniendo en cuenta el dato de densidad del carbono y la masa se realizó el despeje del volumen del horno para obtener un valor mínimo de  $5.71 \times 10^{-3} m^3$ .

Para obtener una guía sobre el dimensionamiento y volumen requerido del horno se utilizó la norma ASTM C136-19 para obtener partículas de tamaño conocido del carbón, una vez obtenido 100 gramos de la muestra se almacenó en un recipiente con volumen conocido

y por medio de dimensionamiento extra se obtuvieron dimensiones para obtener una mayor cantidad de carbón para el proceso de activación. Considerando las dimensiones del recipiente como  $(0.15 \times 0.15 \times 0.055) \text{ m}^3 = 1.237 \times 10^{-3} \text{ m}^3$  con capacidad de almacenar 150 gramos de carbón se obtuvo que un nuevo recipiente de dimensiones  $(0.35 \times 0.15 \times 0.10) \text{ m}^3 = 5.25 \times 10^{-3} \text{ m}^3$  puede albergar 636.36 gramos. Para el segundo diseño de contenedor se consideró el mismo volumen de referencia y para el nuevo recipiente almacenador se tomaron dimensiones de  $(0.25 \times 0.18 \times 0.10) \text{ m}^3 = 4.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3$  para almacenar una masa de 545.45 gramos de carbón vegetal.

De esta forma se obtuvieron dos diseños de recipientes destinados al almacenamiento del carbón vegetal durante el proceso de activación por medio de agentes químicos, las dimensiones se consideraron respecto al volumen interno utilizable de cada diseño de horno propuesto en la sección de resultados.

### **3.1.1 Método para medir la temperatura de llama del biogás**

Esta prueba se considera en la investigación para determinar si la temperatura de llama obtenida por el biogás es suficiente para llevar a cabo el proceso de activación del carbón, debido a que el fin es lograr una temperatura de  $700 \text{ }^\circ\text{C}$  en el interior del horno. Además, es de importancia obtener este registro para descartar la necesidad de mejorar el proceso de combustión por medio de una mezcla de biogás con oxígeno y los cálculos de termodinámica.

Para la determinación de temperatura de la llama obtenida del proceso de combustión del biogás se consideró el uso de una termocupla de tipo K compuesta por Níquel-Cromo y Níquel-Aluminio con una temperatura de recepción máxima de  $1250 \text{ }^\circ\text{C}$  conectada a un controlador para interpretación de datos, el equipo de medición usado es perteneciente a la escuela de Ciencia e Ingeniería de Materiales del ITCR, en la figura 1 se presenta el equipo utilizado y la técnica de medición.



**Figura 1** Equipo para medición de temperatura de llama de biogás.

Los cálculos respectivos para el análisis de transferencia de calor y condiciones necesarias para llevar a cabo la combustión del biogás se realizarán después de obtener mediciones en campo sobre el caudal del gas proveniente del biodigestor y tomas de temperatura de la llama, así como el diseño de geometría para el horno.

### **3.1.2 Medición de flujo del biogás en el biodigestor**

Esta medición se requiere para determinar si el flujo de biogás a lo largo de las tuberías es constante sin fluctuaciones en el volumen suministrado por el biodigestor al quemador. Además, se considera necesario realizar la medición para determinar si hay pérdidas de presión en el biodigestor o fugas en la tubería que puedan afectar el funcionamiento del horno.

Para obtener el flujo se realizó un análisis de la instalación de tuberías para el biogás en la finca y por medio de un medidor de flujo que se instaló se realizaron mediciones periódicas durante tres horas, cada dato se tomó al pasar 20 minutos y se registró el flujo en metros cúbicos. El equipo de medición instalado es de la marca Ekaton modelo GB/T6968-2011 que posee una medición de flujo máximo de  $4\text{m}^3/\text{h}$  y presión máxima de trabajo de  $10\text{kPa}$ . Además, el uso de una bomba impulsora para biogás modelo J-LY-20 se encuentra instalada para brindar mejor rendimiento al flujo del biogás. En la figura 2 se presenta el equipo instalado en la medición del flujo:



**Figura 2** Equipo para medición de flujo del biogás.

## **3.2 Pruebas de caracterización y selección de materiales**

### **3.2.1 Carbón vegetal comercial**

Utilizar la técnica para homogenización del tamaño de partículas ASTM C136M-19 es con el fin de poder caracterizar el carbón vegetal y conocer su morfología para comparación con el rendimiento del proceso de activación en una siguiente etapa del proyecto, además, se utilizó la norma para aspectos de diseño en cuanto a la capacidad del contenedor de carbón vegetal y determinar un peso máximo de carbón vegetal en el contenedor según el volumen interno disponible de cada diseño de horno.

Para esta sección se obtuvo muestras de carbón vegetal de la empresa Carbonera J&M, se realizó una fragmentación de las partículas según la norma ASTM C136M-19 para obtener un tamaño de partícula homogéneo, en este caso se seleccionó un tamaño de partícula entre 3.35 mm y 4.75 mm para la caracterización de la morfología y composición química de las muestras.

Se tomó una muestra de carbono vegetal de 50.6 g, se trituró y se pasó por el tamiz de tamaño de partícula 4.75 mm y 3.35 mm, se obtuvo 4.4 g de carbón vegetal con tamaño de partícula entre 3.35 mm y 4.75 mm, un residuo 12.1 g con tamaño inferior, 20.2 g de muestra en el tamiz 4.75 mm para 13.9 g de desperdicio, es decir que de un 100% de la muestra se obtuvo 8.7% de partícula usable.

En la figura 3 se presenta el equipo utilizado para llevar a cabo la separación de partículas y el tamaño de partícula homogenizada para utilizar en el proceso de caracterización del carbón vegetal por medio del equipo SEM. En la figura 3A se muestra el equipo usado para el pesaje y trituración de partícula, así como las mallas de tamaño 3.35 mm y 4.75 mm, en la figura 3B el equipo Sieve Shaker de la marca CSC Scientific utilizado para el proceso de agitación.



**Figura 3** Equipo para prueba de homogenización de partículas.

### 3.2.2 Ladrillo refractario

Esta prueba se realizó con el fin de conocer el comportamiento práctico de los ladrillos y lograr una comparación con las simulaciones a través de SolidWorks. Fue de carácter importante realizar la prueba para definir condiciones de riesgo personal ante las personas que hagan uso del horno a futuro, además, esta prueba permitió determinar si los materiales seleccionados son aptos para cumplir con los aspectos de diseño considerados.

Para la caracterización de los ladrillos se planteó el uso de un ladrillo refractario del proveedor Ladrillera La Uruca y uno estructural del proveedor Ladrillera Industrial Agua Caliente, se expuso la muestra a una fuente de calor constante para analizar la conductividad térmica del material, se utilizó un termómetro de infrarrojo marca FLUKE modelo 62 MAX con un rango de temperatura de medición de  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ , para realizar la medición de temperatura superficial inicial de la cara contraria a la superficie expuesta a la fuente de calor, luego se expuso la muestra a la fuente de calor y se registró la temperatura de superficie

externa. Para la medición del tiempo en que se presentó un gradiente de temperatura en la cara del ladrillo expuesta a temperatura ambiente, se usó un temporizador, esto con la finalidad de obtener el tiempo en que la temperatura fluye a través del material.

En la figura 4 se presenta la superficie expuesta a la prueba de conductividad térmica, en la cara A del ladrillo se expuso la fuente de llama y en el otro extremo se consideró analizar el gradiente de temperatura:



**Figura 4** Superficie de ladrillo refractario expuesta a fuente de calor para prueba de conductividad térmica.

Para llevar a cabo la prueba se utilizó un horno del Centro de Investigación y Extensión en Ingeniería de los Materiales (CIEMTEC) con temperatura máxima de trabajo de 1300 °C, la presión de inyección del combustible gas licuado de petróleo (LPG) fue de 45 kPa y el aire comprimido de 303,4 kPa, los registros de temperatura con el termómetro se realizaron a una distancia aproximada de 25 cm de la superficie. La temperatura interna del horno no se logró medir debido a la limitante del equipo para medición.

En la figura 5 se presenta la manera en que se expusieron ambos ladrillos para llevar a cabo la prueba, se utilizaron dos ladrillos como base para exponer el ladrillo de interés directamente a la fuente de calor, el uso de algodón fue usado para disminuir las pérdidas de calor debido a un espacio libre que las dimensiones del ladrillo no lograron cubrir.



**Figura 5** Montaje de ladrillos para exposición a fuente de calor.

Ambos ladrillos se expusieron ante la fuente de calor por un tiempo de 19.35 minutos, se registró la temperatura superficial de cada muestra al inicio, luego se realizaron seis registros de temperatura superficial en el centro del ladrillo cada 3 minutos hasta finalizar la prueba y registrar el dato de temperatura de la superficie expuesta a la fuente de calor.

Previo a realizar la toma de datos el termómetro se configuró para medir temperatura en grados Celsius y como aspecto importante se definió en la configuración la constante de emisividad, para el ladrillo refractario se usó un valor de 0.94 y 0.6 para el ladrillo estructural.

### **3.2.3 Cálculos para el análisis de transferencia de calor**

Para analizar la transferencia de calor desde el interior del horno hacia el exterior se debe considerar los aspectos de diseño del horno como espesor de paredes, propiedades térmicas de los materiales y condiciones de ambiente, esto se realizó por medio del uso de ecuaciones del flujo de calor para y verificar la efectividad de los materiales seleccionados.

Por medio de los cálculos de transferencia se puede conocer la cantidad de flujo de calor y la influencia de sus diferentes formas de transmisión, además, de esta manera se puede calcular la temperatura en la superficie y analizar si los materiales resultan seguros.

En la tabla 3 se presenta la simbología de las ecuaciones y su significado:

**Tabla 3** Simbología y nombre respectivo de ecuaciones

Símbolo	Nombre	Símbolo	Nombre	Símbolo	Nombre
$\dot{Q}$	Flujo de calor	$\Delta T_{temp}$	Diferencial de temperatura	$K_{aire}$	Conductividad del aire
$m$	Masa	$t$	Tiempo	$Ra$	Rayleigh
$Cp$	Calor específico	$A_{sup}$	Área superficial	$Gr$	Grashof
$K$	Constante conductividad	$\Delta_x$	Diferencial de espesor	$Pr$	Prandtl
$\dot{Q}_{conv}$	Flujo convección	$\dot{Q}_{rad}$	Flujo de radiación	$g$	Gravedad
$\dot{Q}_{comb}$	Flujo combinado	$h_r$	Resistencia radiación	$\beta$	Expansión volumétrica
$\varepsilon$	Emisividad	$\theta$	Stefan-Boltzmann	$T_{sup}$	Temperatura superficial
$R_{Tot}$	Resistencia total	$L_c$	Longitud característica	$T_{\infty}$	Temperatura del medio
$\nu$	Viscosidad cinemática	$R_{cond}$	Resistencia conductiva	$R_{conv}$	Resistencia convectiva
$h_{ext}$	Coefficiente de convección externo	$Nu$	Nusselt	$a$ $b$	Ancho exterior Ancho interior

Para obtener el valor de la resistencia convectiva se requiere obtener el valor del coeficiente de convección externa  $h_{ext}$  por medio de convección natural, se obtiene usando las propiedades del viento a una temperatura promedio de 15°C, esto se obtuvo por medio de un registro de datos de la estación meteorológica de Potrero Cerrado, Sartalillo de Cartago. Durante cinco días se registraron los datos, se calculó un promedio entre la máxima y mínima

temperatura para cada día y para el dato final se obtuvo un promedio general de los promedios de temperatura obtenida. Los datos se registraron en diferentes horas del día y en la tabla 4 se muestra los datos obtenidos.

**Tabla 4** Registro de temperatura de la estación meteorológica de Potrero Cerrado.

Fecha	Hora	Temperatura máxima (°C)	Temperatura mínima (°C)	Promedio de temperatura (°C)
29 marzo 2023	9:27 am	17.1	11.8	14.45
30 marzo 2023	2:58 pm	17.9	10.5	14.2
31 marzo 2023	2:08 pm	19.2	10.2	14.7
1 abril 2023	4:57 pm	20.7	11.6	16.15
2 abril 2023	11:47 pm	20.6	12.1	16.35
Promedio general de temperatura (°C)			15.17 ≈ 15	

Para el cálculo del número de Nusselt se utilizaron las propiedades del viento a la temperatura general promedio, las cuales se presentan en la tabla 5:

**Tabla 5** Propiedades del viento a 15 °C.

k (W/mK)	0.025
Cp (J/kgK)	1007
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	1.23
Difusividad (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )	0.00002009
Viscosidad dinámica (kg/ms)	0.00001802
Viscosidad cinemática (m <sup>2</sup> /s)	0.0000147
# Prandtl	0.7323

Fuente: (Cengel & Ghajar, 2011)

Por medio de las propiedades del viento en las condiciones a temperatura promedio obtenida por la metodología anteriormente explicada, se hace uso de las ecuaciones: 10 y 11

para el cálculo del número de Nusselt como placas verticales, 13 para obtener el número de Rayleigh y 14 para calcular el valor del número de Grashof, ya que la multiplicación del número de Grashof por el valor de Prandtl dan el valor de Rayleigh que se utiliza según su valor para la selección de la ecuación para calcular el valor de Nusselt.

Una vez se obtenidos los valores se realizó la solución de la ecuación 12 para obtener el valor del coeficiente convectivo del aire usado en el cálculo de la resistencia convectiva externa del sistema.

Las ecuaciones utilizadas para llegar a la conclusión del análisis térmico considerando convección natural en el exterior y convección forzada en el interior del horno, son las siguientes (Cengel & Ghajar, 2011):

$$\delta = \frac{m}{V} \text{ Ec. 1}$$

$$\dot{Q} = \frac{m \times Cp \times \Delta T_{temp}}{t} \left( \frac{kg \times \frac{J}{kgK} \times K}{seg} \right) \text{ Ec. 2}$$

$$\dot{Q} = \frac{A_{sup} \times K \times \Delta T_{temp}}{\Delta x} \left( \frac{m^2 \times \frac{W}{mK} \times K}{m} \right) \text{ Ec. 3}$$

$$k = \frac{\dot{Q} \times \Delta x}{A_{sup} \times \Delta T_{temp}} \left( \frac{W}{mk} \right) \text{ Ec. 4}$$

$$\dot{Q}_{comb} = (\dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{rad}) \times A_{sup} \text{ Ec. 5}$$

$$\dot{Q}_{rad} = h_r \times A_{sup} \times \Delta T \text{ Ec. 6}$$

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon \times \theta \times A_{sup} \times (T_s^4 + T_\infty^4) \text{ Ec. 7}$$

$$\dot{Q}_{conv} = h \times A_{sup} \times \Delta T \text{ Ec. 8}$$

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R_{Tot}} \text{ Ec. 9}$$

$$Nu = \frac{h_{ext} \times L_c}{K_{aire}} \text{ Ec. 10}$$

$$Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 \times \left( Ra_L^{\frac{1}{6}} \right)}{\left[ 1 + \left( \frac{0.492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2 \quad \text{Ec. 11}$$

$$h_{ext} = \frac{Nu \times K_{aire}}{L_c} \quad \text{Ec. 12}$$

$$Ra = Gr \times Pr \quad \text{Ec. 13}$$

$$Gr = \frac{g \times \beta \times (T_{sup} + T_{\infty}) \times L_c^3}{\nu^2} \quad \text{Ec. 14}$$

$$R_{cond} = \frac{1}{S \times K} \quad \text{Ec. 15}$$

$$R_{conv} = \frac{1}{h_{ext} \times A_{sup}} \quad \text{Ec. 16}$$

$$h_{ext} = \frac{Nu \times K_{aire}}{L_c} \quad \text{Ec. 17}$$

$$R_{Tot} = \sum_i^n R_i \quad \text{Ec. 18}$$

$$\text{para } \frac{a}{b} > 1.41 \quad S = \frac{2\pi \times L}{0.93 \times \ln\left(0.948 \times \frac{a}{b}\right)} \quad \text{Ec. 19}$$

$$\text{para } \frac{a}{b} < 1.4 \quad S = \frac{2\pi \times L}{0.785 \times \ln\left(\frac{a}{b}\right)} \quad \text{Ec. 20}$$

$$\dot{Q}_{cond} = \dot{Q}_{rad} + \dot{Q}_{conv} \quad \text{Ec. 21}$$

$$F = \sigma \times A_{transversal} \quad \text{Ec. 22}$$

$$A_{transversal} = \pi \times r^2 \quad \text{Ec. 23}$$

### **3.3 Resistencia de barra de acero corrugado grado 60 ASTM 615**

Para analizar la resistencia de la barra seleccionada, se obtuvo la cantidad máxima de ladrillos que van a ejercer un peso sobre la barra, el cual debe ser menor que la resistencia máxima de la barra obtenida. Para considerar seguridad extra se tomó un 40 % del esfuerzo mínimo a fluencia que resiste la barra para trabajar en la zona donde se deforme elásticamente.

La barra posee un diámetro de 9.52 mm, dato que se requiere para calcular el área transversal utilizada en la ecuación para obtener el valor de la fuerza a la que se somete la barra.

### **3.4 Análisis económico y ambiental**

Para el análisis económico se va a tomar en cuenta el costo de los componentes para construcción del horno, tanto la materia prima como los componentes que se requieren del comercio, es decir, componentes ya manufacturados, el transporte de la materia prima y se considera analizar el costo de producción del biogás utilizado para el funcionamiento del horno. Se pretende realizar un análisis del costo total del horno según los diseños propuesto y materiales seleccionados.

El análisis de impacto ambiental se va a realizar considerando la unidad internacional para medir las emisiones de gases de efecto invernadero, kilogramos de CO<sub>2</sub> equivalente (kg CO<sub>2</sub> eq), y comparar la emisión de un metro cúbico (m<sup>3</sup>) de biogás con otras fuentes de combustible. Para esto se requiere convertir la unidad de medición del m<sup>3</sup> de biogás en la unidad de energía termia (Thm) más utilizada para los cálculos de emisión según la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América (EPA) por sus siglas en inglés, unidad que es equivalente a 1.0548x10<sup>8</sup> Julios.

Para la conversión de metros cúbicos de biogás se utilizó el siguiente factor (Rafay, 2023):

$$1 \text{ m}^3 = 0.3644 \text{ thm}$$

Luego por medio de la calculadora de equivalencias de gases de efecto invernadero disponible en la página web de la EPA se procedió a realizar el cálculo de los kilogramos de CO<sub>2</sub> equivalentes por consumir un metro cúbico de biogás.

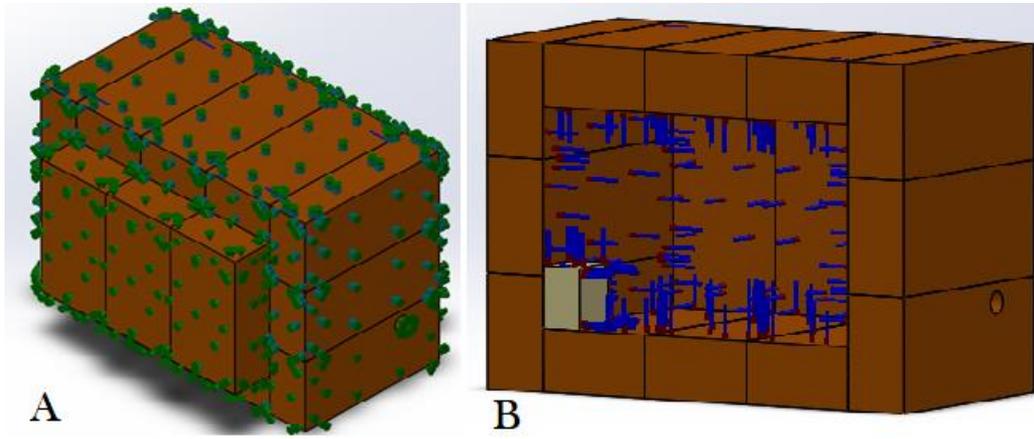
### **3.5 Análisis de efectividad del diseño CAD para SolidWorks**

El diseño del modelo se llevó a cabo por medio de las consideraciones de diseño en cuanto a dimensionamiento y propiedades de los materiales seleccionados. Para la modelación del diseño se crearon piezas individuales para los ladrillos con las dimensiones ofrecidas por el mercado, se diseñó las tapas del horno conforme a las dimensiones de cada diseño de horno, las piezas internas como rejilla utilizada como base para el contenedor de carbón vegetal y los tubos para distribución de llama, se diseñaron según modelos ofrecidos en el mercado y adaptados al dimensionamiento de cada horno.

La simulación se llevó a cabo con la operación de SolidWorks Simulation únicamente con el ensamble de ladrillos por simplificación del análisis, se establecieron las condiciones de frontera según las condiciones ambientales a las cuales estará expuesto el horno, la distribución de calor interno en las paredes por conducción se estableció como condición inicial y las propiedades térmicas de los materiales se incluyeron en las configuraciones de material. Relacionado a las formas de conducción de calor en conducción, convección y radiación se establecieron conforme al método respectivo en la realidad, la conducción en el interior del horno distribuida esta forma de transferencia sobre todas las paredes internas, la convección en la superficie externa de las paredes del horno excluyendo la base del diseño, así como la radiación por el material se estableció en la superficie externa de las paredes.

Para la solución de la simulación se utilizó un mallado fino con la perspectiva de obtener un estudio de mayor precisión sobre toda la superficie del diseño. Estas condiciones se establecieron según cada diseño modelado y las propiedades respectivas de cada material.

En la figura 6 se presenta la distribución superficial de las tres formas de transferencia de calor, en 7a se presenta por convección y radiación y, 7b por conducción, esta figura representa la distribución para el diseño #2 y cabe destacar que para el diseño #1 se utilizó la misma:



**Figura 6** A) Distribución superficial para convección y radiación, B) distribución para conducción.

## **4 Resultados y análisis**

En este apartado de la investigación se pretende mostrar los resultados obtenidos del estudio en el proceso de diseño del horno, caracterización de materiales, métodos para recopilación de datos, así como la funcionalidad del diseño.

## 4.1 Temperatura de llama

La medición de temperatura de llama del biogás utilizado como combustible en la Finca Cipreses se midió con un termopar en comparación con la teoría sobre la máxima temperatura de trabajo de llama para el biogás en condiciones normales, es decir sin aumentar el porcentaje de oxígeno en el proceso de combustión.

En las primeras mediciones se estableció una distancia entre el termopar y la llama de aproximadamente 5 centímetros para un registro de 280 °C y de manera continua se expuso el equipo de medición directamente a la llama de manera que se obtuvo un registro de temperatura máxima de aproximadamente 840 °C.

Los registros de temperatura obtenidos poseen variación, se observó en momentos donde se realizó la prueba de temperatura que esta disminuía y aumentaba con el paso del tiempo, este comportamiento se considera respecto a condiciones externas como el viento que puede hacer variar la ubicación de llama y disminuir el registro en el termopar debido a disminución del contacto entre ambos, además, que la medición se realizó de manera manual, es decir que no se utilizó ningún equipo para mantener fija la termocupla en contacto con la flama del biogás, por lo que los movimientos por falta de estabilidad también se consideran como un factor que proveyó un incremento de temperatura no uniforme.

En la tabla 6 se presenta un registro de temperatura y el tiempo en que se obtuvo la medición por parte de la termocupla, el tiempo se tomó desde que se obtuvo el contacto entre el producto de la combustión del biogás y la termocupla hasta obtener una temperatura registrada lo suficientemente mayor a la temperatura de trabajo deseada para el horno:

**Tabla 6** Registro de temperatura en periodos de 15 segundos.

N° de Registro	Registro de temperatura (°C)	Tiempo de registro (s)
1	280	0
2	390	15
3	471	30
4	590	45
5	650	60
6	737	75
7	723	90
8	778	105
9	840	120

De la tabla anterior se observa un comportamiento no exponencial debido a que en el dato de registro 7 hubo una disminución de la temperatura de registro en 14 °C.

#### **4.2 Medición de flujo de biogás**

Los resultados obtenidos de la medición de flujo del biogás de un biodigestor con capacidad de 18 m<sup>3</sup> se presenta en la tabla 7, donde se consideró realizar una medición del tiempo en que el flujo de biogás tarda en desabastecer el quemador después de cerrar la llave de paso principal del biodigestor, además, el tiempo en que el biogás tarda en abastecer el quemador fue medido para considerar analizar la velocidad del flujo de biogás a través del sistema de tubería que considera 20 metros siendo 0.571 m/s la velocidad de suministro del biodigestor hasta el quemador y una velocidad de 0.0667 m/s para desabastecer los 20 metros de tubería una vez que se cerró la llave principal.

Las mediciones se realizaron una vez instalado el equipo de medición marca Ekaton modelo GB/T6968-2011, se mantuvo el flujo de biogás y encendido el quemador para verificar el flujo constante de combustible. Una vez el equipo en estado inicial con el contador en cero se procedió a habilitar el paso de combustible y cada 20 minutos se realizó el registro del dato por un lapso de tres horas.

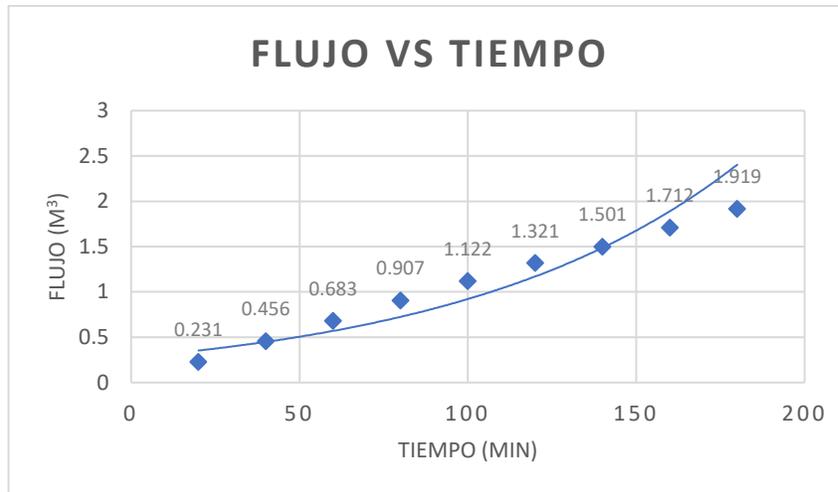
**Tabla 7** Registro de medición del volumen de biogás.

N° de medición	Dato de volumen (m <sup>3</sup> )	Tiempo de medición (min)
1	0.231	20
2	0.456	40
3	0.683	60
4	0.907	80
5	1.122	100
6	1.321	120
7	1.501	140
8	1.712	160
9	1.919	180

De los datos mostrados en la tabla anterior se puede deducir que el comportamiento del volumen de biogás a través de los 20 metros de tubería se mantiene en aumento con el paso del tiempo, es necesario aclarar que el equipo de medición hace un conteo continuo del volumen, es decir que siempre se va a encontrar en aumento el volumen de biogás medido. El flujo medido es de 1.919 m<sup>3</sup> para el tiempo de tres horas en que se realizaron los registros con 0.639 m<sup>3</sup> por hora, además se tiene un aumento de flujo en 0.211 m<sup>3</sup> por cada 20 minutos y como dato final se obtuvo un flujo de 0.64 m<sup>3</sup> por cada hora de trabajo.

Analizando el comportamiento del flujo se observa que no hay fluctuaciones en el flujo que afecten el funcionamiento del quemador de combustible utilizado para el análisis lo que implica en un comportamiento uniforme para el funcionamiento del horno.

En la figura 7 se presenta un gráfico donde se presentan los datos registrados anteriormente para una mejor visualización del comportamiento del flujo de biogás, para la línea de tendencia se observa un comportamiento exponencial lo que asegura una buena alimentación de combustible, en este caso biogás, por parte del biodigestor:



**Figura 7** Gráfico registro flujo vs tiempo.

### 4.3 Conductividad térmica de ladrillos

La prueba de conductividad térmica para los ladrillos se realizó para obtener la cantidad de flujo de calor conducido por ambos materiales de manera experimental. En la tabla 8 se presenta un resumen de los datos tomados para la prueba de conductividad y las principales propiedades necesarias del ladrillo estructural y refractario para el análisis de conductividad. Se trabajaron las temperaturas en unidad de Kelvin por conveniencia de unidades:

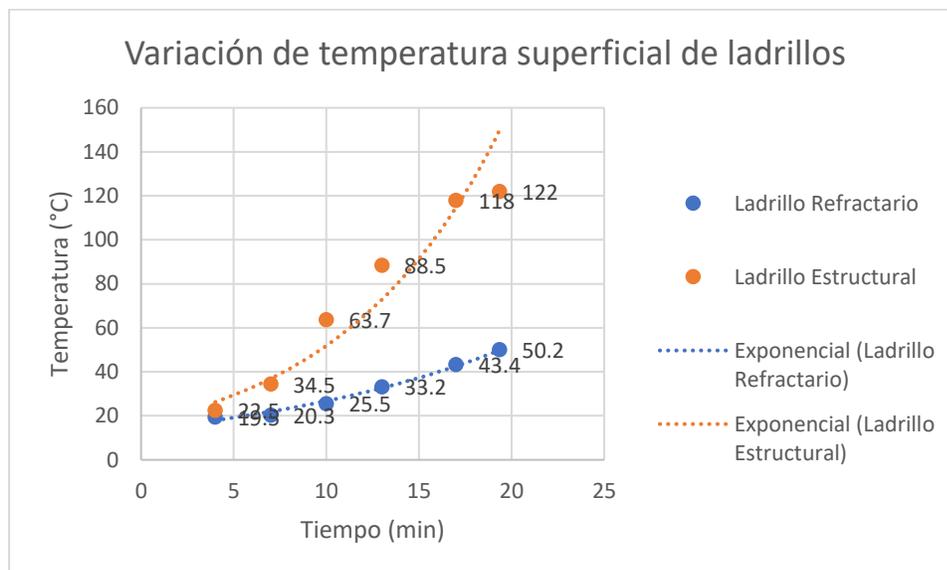
**Tabla 8** Datos obtenidos de prueba de conductividad térmica

Dato	Ladrillo estructural	Ladrillo refractario
Temp superficial (K)	295.75	292.55
Temp superficial a llama (K)	777.95	544.15
Temp superficial opuesta (K)	395.15	323.35
Tiempo (s)	1161	1161
Promedio temp externa	345.45	307.95
Promedio temp interna	536.85	418.35
$\Delta$ promedio de temperatura	191.4	110.4
Peso (kg)	2.1	3.92
Largo (m)	0.23	0.23
Alto (m)	0.11	0.11

Espesor (m)	0.06	0.06
Área superficial (m <sup>2</sup> )	0.0253	0.0253

Los datos recopilados en la tabla anterior se obtuvieron por medio de la medición de temperatura de la superficie de ambos ladrillos, en cada prueba se tomó la temperatura superficial de la cara del ladrillo expuesta a la llama y la opuesta, es decir la superficie del ladrillo en contacto con el ambiente, el tiempo de exposición se mantuvo igual para ambas muestras y los promedios de temperatura obtenidos se realizaron entre el dato de la temperatura inicial y final para cada superficie, para la expuesta a la llama y la opuesta.

Para tener una comparación entre ambos ladrillos se tomaron mediciones de temperatura durante el tiempo de exposición, en la figura 8 se muestra un gráfico con el tiempo en que se hizo la medición de temperatura superficial y su respectivo valor:



**Figura 8** Variación de temperatura con el tiempo.

Como se observa ambas líneas de tendencia tienen un comportamiento exponencial con el paso del tiempo y coincide con los datos teóricos que el ladrillo estructural posee mayores valores de temperatura comparado al ladrillo refractario debido a sus propiedades, así como que la constante de conductividad térmica es menor para el ladrillo refractario lo que implica en que posee menor conductividad del calor a través de su espesor, además, que la capacidad calorífica es mayor por lo que le permite retener mayor temperatura

internamente que el ladrillo estructural. El ladrillo estructural en promedio aumenta 6.3 °C por minuto y el refractario 2.6 °C lo que se refleja en un 41.3% menos que el ladrillo estructural.

En la tabla 9 se presentan las propiedades térmicas de los ladrillos y cemento refractario utilizadas en la solución de las ecuaciones de transferencia de calor.

**Tabla 9** Propiedades del ladrillo estructural y refractario.

	Ladrillo estructural	Ladrillo refractario
Constante emisividad	0.6	0.75
Conductividad térmica “K” (W/mK)	1.4	0.72
Calor específico “Cp” (J/kgK)	880	960
Densidad teórica (kg/m <sup>3</sup> )	2300	2645
Densidad práctica (kg/m <sup>3</sup> )	1383.4	2582.3

Fuente: (Cengel & Ghajar, 2011)

Utilizando las ecuaciones 2 y 3 para obtener el flujo de calor a través de cada ladrillo de manera práctica y teórica respectivamente, además, la ecuación 4 se utilizó para obtener el valor de la constante de conductividad térmica teórica y compararla con la obtenida de manera práctica. En la tabla 10 se presenta los resultados obtenidos de los cálculos realizados:

**Tabla 10** resultados del flujo de calor y conductividad térmica.

Cálculo – ecuación utilizada	Ladrillo estructural	Ladrillo refractario
Flujo de calor teórico (W) – ecu 3	112.99	33.52
Conductividad térmica teórica (W/mK) – ecu 4	1.4	0.72

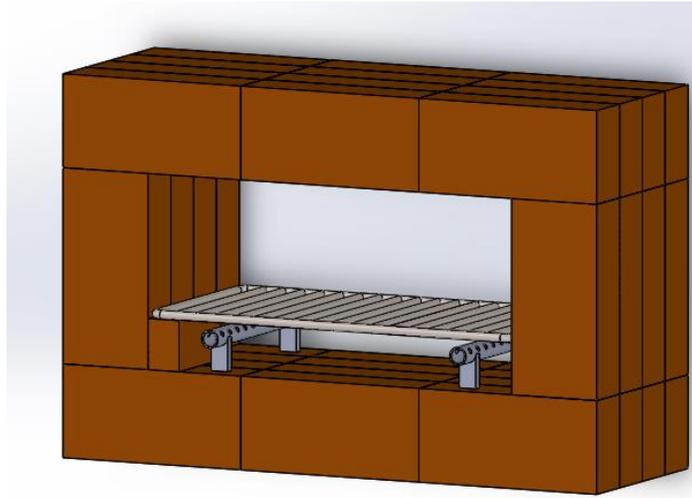
Para este resultado la variación entre los datos teóricos y prácticos se considera debido a la variación entre la densidad de ambos ladrillos, ambos materiales al poseer las mismas dimensiones y el material refractario al poseer una densidad mayor que el material estructural, quiere decir que posee mayor cantidad de materia por unidad de volumen lo que conlleva a que las partículas estén de manera más compactada en el ladrillo y por ende haya menos espacios libres por los cuales circule el viento el cual es un mal conductor térmico, debido a esta propiedad es que hay variación entre ambos resultados y que el ladrillo estructural tenga un flujo de calor menor que el ladrillo refractario.

Otro aspecto que afecta en el resultado obtenido es el peso de ambos ladrillos, ya que en la ecuación 2 la variable del peso se encuentra en el numerador y junto al poder calorífico son las únicas dos variables de la ecuación debido a que los demás términos se mantienen igual por las condiciones de la prueba, esto conlleva a que el valor de flujo de calor para el ladrillo refractario sea mayor que el ladrillo estructural.

#### **4.4 Cálculos para el diseño #1 del horno con ladrillo y cemento refractario**

Para esta sección de resultados se mantuvo las siguiente consideraciones: en el exterior se analiza convección natural no forzada, en el interior del horno convección forzada y considerando que el horno se encuentra a presión atmosférica, que los gases de combustión se expulsan al exterior, se considera que parte del calor es perdido y como la llama no está en contacto directo y uniforme con las paredes del horno el coeficiente de convección interna no se considera para la solución de los cálculos ya que este al calcularse sería muy lejano de la realidad. Por esto se considera que la transferencia de calor es por conducción en el interior del horno. La última consideración es que para el cálculo del número de Nusselt se utiliza la ecuación que considera placas verticales y se toma en consideración cinco excluyendo el fondo del horno.

El diseño analizado en esta sección se presenta en la figura 9:



**Figura 9** Diseño #1 de horno.

En la tabla 11 se presenta las dimensiones externas e internas del diseño utilizadas en los cálculos:

**Tabla 11** Dimensiones externas e internas del diseño #1.

Dimensiones externas		Dimensiones internas		Volumen	
Largo (m)	0.73	Largo (m)	0.43	Interno (m <sup>3</sup> )	0.0229
Alto (m)	0.49	Alto (m)	0.19	Total (m <sup>3</sup> )	0.1
Profundidad (m)	0.28	Profundidad (m)	0.28	--	

Considerando convección natural para obtener el coeficiente de convección externa ( $h_{ext}$ ) se utiliza la ecuación de Rayleigh y Nusselt.

$$Ra = \left( \frac{9.81 \frac{m}{s^2} \times \frac{1}{700.65K} \times (1113.15 - 288.15)K \times (0.49m)^3}{\left(1.47 \times 10^{-5} \frac{m^2}{s}\right)^2} \right) \times 0.7323$$

$$= 4.605 \times 10^9$$

Con el valor del Ra se utiliza la ecuación 11 para calcular el valor de Nu:

$$Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 \times \left( 4.605 \times 10^{9\frac{1}{6}} \right)}{\left[ 1 + \left( \frac{0.492}{0.7323} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2 = 198.48$$

Por medio de la ecuación 10 se realiza el despeje de la incógnita  $h_{ext}$  y se aplica la ecuación 17:

$$h_{ext} = \frac{198.48 \times 0.025 \frac{W}{mK}}{0.49m} = 10.03 \frac{W}{m^2K}$$

Previo a calcular las resistencias por material se calcula el factor de forma  $S$  para las configuraciones comunes existentes por medio de las ecuaciones 19 y 20:

Para el factor de forma en la capa interna de cemento usando los valores de  $a = 0.47$  m y  $b = 0.43$  m con  $L = 0.28$  m se utiliza la ecuación 20:

$$para \frac{a}{b} < 1.4 \quad S = \frac{2\pi \times 0.28 \text{ m}}{0.785 \times \ln \left( \frac{0.47m}{0.43m} \right)} = 25.2 \text{ m}$$

Para el factor de forma en la capa interna de ladrillo usando los valores de  $a = 0.69$  m y  $b = 0.47$  m con  $L = 0.28$  m se utiliza la ecuación 19:

$$para \frac{a}{b} > 1.41 \quad S = \frac{2\pi \times 0.28m}{0.93 \times \ln \left( 0.948 \times \frac{0.69m}{0.47m} \right)} = 5.72 \text{ m}$$

Para el factor de forma en la capa externa de cemento usando los valores de  $a = 0.73$  m y  $b = 0.69$  m con  $L = 0.28$  m se utiliza la ecuación 20:

$$para \frac{a}{b} < 1.4 \quad S = \frac{2\pi \times 0.28 \text{ m}}{0.785 \times \ln \left( \frac{0.73m}{0.69m} \right)} = 39.77 \text{ m}$$

Seguido se realiza los cálculos de las resistencias para cada material aplicando el factor de forma.

Cálculo de resistencias conductivas haciendo uso de la ecuación 15:

$$R_1 = \frac{1}{25.2m \times 8.6 \frac{W}{mK}} = 4.614 \times 10^{-3} \frac{K}{W}$$

$$R_2 = \frac{1}{5.72m \times 0.72 \frac{W}{mK}} = 0.243 \frac{K}{W}$$

$$R_3 = \frac{1}{39.77m \times 8.6 \frac{W}{mK}} = 2.92 \times 10^{-3} \frac{K}{W}$$

Cálculo de resistencia convectiva por medio de la ecuación 16:

$$R_4 = \frac{1}{10.03 \frac{W}{m^2K} \times 0.1372m^2} = 0.7267 \frac{K}{W}$$

Cálculo de resistencia total por medio de la ecuación 18:

$$R_{Tot} = (4.614 \times 10^{-3} + 0.243 + 2.92 \times 10^{-3} + 0.7267) \frac{K}{W} = 0.9770 \frac{K}{W}$$

El cálculo del flujo de calor total se obtuvo por la ecuación 9:

$$\dot{Q} = \frac{825K}{0.9790 \frac{K}{W}} = 844.45 W$$

Conociendo el flujo de calor total se procede a utilizar la ecuación 22 para obtener el valor de la incógnita de la temperatura en la superficie externa del horno y al despejar la variable  $T_s$  se obtiene:

$$844.45 W = 0.94 \times 5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2K^4} \times 0.1372m^2 \times (T_s^4 - 288.15^4)K^4$$

$$+ 10.03 \frac{W}{m^2K} \times 0.1372m^2 \times (T_s - 288.15)K$$

$$T_s = 527.38K$$

Para el cálculo del flujo de calor por radiación se utilizó la ecuación 7:

$$\dot{Q}_{rad} = 0.94 \times 5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4} \times 0.1372 m^2 \times (527.38^4 - 288.15^4) K^4 = 515.25 W$$

El valor del flujo por convección se obtiene por medio de la ecuación 8:

$$\dot{Q}_{conv} = 10.03 \frac{W}{m^2 K} \times 0.1372 m^2 \times (527.38 - 288.15) K = 329.21 W$$

En la tabla 12 se presentan las dimensiones de espesor de cada material usado en el diseño #1 del horno y las propiedades respectivamente necesarias para realizar los cálculos de transferencia de calor.

**Tabla 12** Datos de diseño #1

	Ladrillo refractario	Cemento refractario	Aire	Horno
Conductividad térmica (W/mK)	0.72	8.6	0.025	-
Emisividad	0.75	0.94	-	-
Espesor de capa (m)	0.11	$20 \times 10^{-3}$	-	-
$h_{ext}$ (W/m <sup>2</sup> K)	-	-	10.03	-
$T_{int}$ (K)	-	-	1113.15	-
$T_{ext}$ (K)	-	-	288.15	-
$A_{sup}$ pared interna de horno (m <sup>2</sup> )	-	-	-	$46.6 \times 10^{-3}$

Con los datos de la tabla anterior se realizó el cálculo del flujo para el primer diseño del horno los cuales se presentan a continuación y se obtuvieron por medio de las ecuaciones 15, 16 y 18 para obtener las resistencias conductivas, convectiva y total, respectivamente, previo se usó las ecuaciones 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13 y 14, así como los datos de la tabla 11 para obtener los datos del coeficiente de convección externo del aire, coeficiente de radiación, flujo por radiación, flujo convectivo, flujo combinado, número de Nusselt, Rayleigh y Grashof. En la tabla 13 se muestran los resultados obtenidos:

**Tabla 13** Resumen de resultados de cálculos para transferencia en diseño #1 de horno

R1 (K/W)	$4.614 \times 10^{-3}$	$Q_{\text{rad}}$ (W)	515.25
R2 (K/W)	0.243	$Q_{\text{conv}}$ (W)	329.21
R3 (K/W)	$2.92 \times 10^{-3}$	Nu	183.21
R4 (K/W)	0.0992	$Ra_L$	$8.46 \times 10^9$
$R_{\text{Tot}}$ (K/W)	0.9770	$h_{\text{ext}}$ (W/m <sup>2</sup> K)	10.03
$Q_{\text{comb}}$ (W)		844.45	

#### 4.5 Cálculos para el diseño #1 del horno con ladrillo estructural y cemento refractario

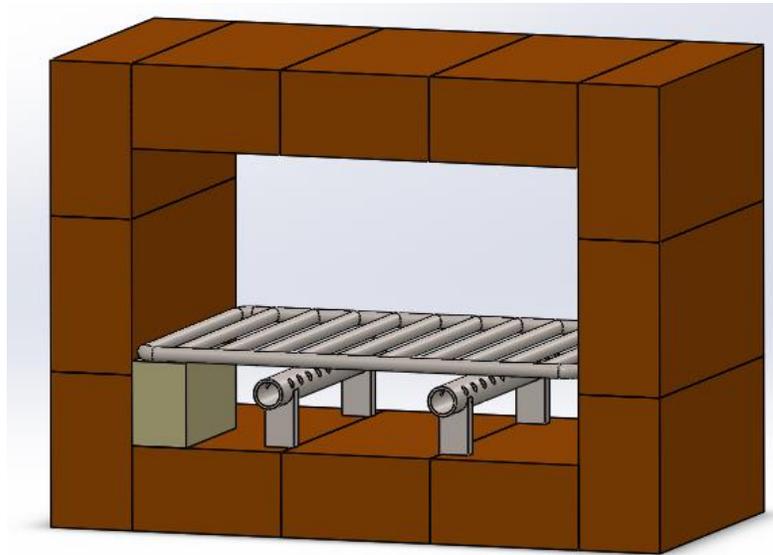
Para esta sección de cálculos se consideran los mismos aspectos que el apartado anterior y, además, en las ecuaciones utilizadas solo se cambian unos datos por lo que se procede a presentar la tabla 14 tipo resumen con los resultados de los cálculos. El diseño del horno corresponde al mismo de la sección anterior:

**Tabla 14** Resumen de resultados de cálculos para transferencia en diseño #1 de horno

R1 (K/W)	$4.61 \times 10^{-3}$	$Q_{\text{rad}}$ (W)	604.14
R2 (K/W)	0.125	$Q_{\text{conv}}$ (W)	356.18
R3 (K/W)	$2.92 \times 10^{-3}$	Nu	198.48
R4 (K/W)	0.7267	$Ra_L$	$4.605 \times 10^9$
$R_{\text{Tot}}$ (K/W)	0.8591	$h_{\text{ext}}$ (W/m <sup>2</sup> K)	10.03
$Q_{\text{comb}}$ (W)		960.3	

#### 4.6 Cálculos para el diseño #2 del horno con ladrillo estructural y cemento refractario

Para los cálculos obtenidos en esta sección se consideran las mismas condiciones que en el apartado 4.6, se muestra en la figura 10 el diseño del horno considerado en el estudio para los cálculos de flujo de calor:



**Figura 10** Diseño #2 de horno.

De la figura anterior se nota el cambio en la orientación de los ladrillos, lo que implica en un cambio de espesor de pared del horno y distribución interna de espacio. Las dimensiones externas e internas del diseño se presentan en la tabla 15:

**Tabla 15** Dimensiones externas e internas del diseño #2.

Dimensiones externas		Dimensiones internas		Volumen	
Largo (m)	0.49	Largo (m)	0.29	Interno (m <sup>3</sup> )	0.01305
Alto (m)	0.37	Alto (m)	0.17	Total (m <sup>3</sup> )	0.04895
Profundidad (m)	0.27	Profundidad (m)	0.27	--	

Considerando convección natural para obtener el coeficiente de convección externa ( $h_{ext}$ ) se utiliza la ecuación de Rayleigh y Nusselt.

$$Ra = \left( \frac{9.81 \frac{m}{s^2} \times \frac{1}{700.65K} \times (1113.15 - 288.15)K \times (0.37m)^3}{\left(1.47 \times 10^{-5} \frac{m^2}{s}\right)^2} \right) \times 0.7323$$

$$= 1.9828 \times 10^9$$

Con el valor del Ra se utiliza la ecuación 11 para calcular el valor de Nu:

$$Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 \times \left(1.9828 \times 10^{9\frac{1}{6}}\right)}{\left[1 + \left(\frac{0.492}{0.7323}\right)^{\frac{9}{16}}\right]^{\frac{8}{27}}}\right\}^2 = 152.53$$

Por medio de la ecuación 10 se realiza el despeje de la incógnita  $h_{ext}$  y se aplica la ecuación 17:

$$h_{ext} = \frac{152.53 \times 0.025 \frac{W}{mK}}{0.37m} = 10.21 \frac{W}{m^2K}$$

Previo a calcular las resistencias por material se calcula el factor de forma  $S$  para las configuraciones comunes existentes por medio de las ecuaciones 19 > y 20 <:

Para el factor de forma en la capa interna de cemento usando los valores de  $a = 0.33$  m y  $b = 0.29$  m con  $L = 0.27$  m se utiliza la ecuación 20:

$$para \frac{a}{b} < 1.4 \quad S = \frac{2\pi \times 0.27 \text{ m}}{0.785 \times \ln\left(\frac{0.33m}{0.29m}\right)} = 16.73 \text{ m}$$

Para el factor de forma en la capa interna de ladrillo usando los valores de  $a = 0.45$  m y  $b = 0.33$  m con  $L = 0.27$  m se utiliza la ecuación 20:

$$para \frac{a}{b} < 1.4 \quad S = \frac{2\pi \times 0.27 \text{ m}}{0.785 \times \ln\left(\frac{0.45m}{0.33m}\right)} = 6.97 \text{ m}$$

Para el factor de forma en la capa externa de cemento usando los valores de  $a = 0.49$  m y  $b = 0.45$  m con  $L = 0.27$  m se utiliza la ecuación 20:

$$para \frac{a}{b} < 1.4 \quad S = \frac{2\pi \times 0.27 \text{ m}}{0.785 \times \ln\left(\frac{0.49m}{0.45m}\right)} = 25.38 \text{ m}$$

Seguido se realiza los cálculos de las resistencias para cada material aplicando el factor de forma.

Cálculo de resistencias conductivas haciendo uso de la ecuación 15:

$$R_1 = \frac{1}{16.73m \times 8.6 \frac{W}{mK}} = 6.95 \times 10^{-3} \frac{K}{W}$$

$$R_2 = \frac{1}{6.97m \times 1.4 \frac{W}{mK}} = 0.1025 \frac{K}{W}$$

$$R_3 = \frac{1}{25.38m \times 8.6 \frac{W}{mK}} = 4.58 \times 10^{-3} \frac{K}{W}$$

Cálculo de resistencia convectiva por medio de la ecuación 16:

$$R_4 = \frac{1}{10.21 \frac{W}{m^2K} \times 0.0999m^2} = 0.9807 \frac{K}{W}$$

Cálculo de resistencia total por medio de la ecuación 18:

$$R_{Tot} = (6.95 \times 10^{-3} + 0.1025 + 4.58 \times 10^{-3} + 0.9807) \frac{K}{W} = 1.0947 \frac{K}{W}$$

El cálculo del flujo por conducción se obtuvo por la ecuación 9:

$$\dot{Q} = \frac{825K}{1.0947 \frac{K}{W}} = 753.61 W$$

Conociendo el flujo de calor total se procede a utilizar la ecuación 22 para obtener el valor de la incógnita de la temperatura en la superficie externa del horno y al despejar la variable  $T_s$  se obtiene:

$$753.61 W = 0.94 \times 5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2K^4} \times 0.0999m^2 \times (T_s^4 - 288.15^4)K^4$$

$$+ 10.21 \frac{W}{m^2K} \times 0.0999m^2 \times (T_s - 288.15)K$$

$$T_s = 557.76K$$

Para el cálculo del flujo de calor por radiación se utilizó la ecuación 7:

$$\dot{Q}_{rad} = 0.94 \times 5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4} \times 0.0999 m^2 \times (557.76^4 - 288.15^4) K^4 = 478.59 W$$

El valor del flujo por convección se obtiene por medio de la ecuación 8:

$$\dot{Q}_{conv} = 10.21 \frac{W}{m^2 K} \times 0.0999 m^2 \times (557.76 - 288.15) K = 274.99 W$$

En la tabla 16 se muestra un resumen de los datos obtenidos con las ecuaciones anteriormente resueltas:

**Tabla 16** Resumen de resultados de cálculos para transferencia en diseño #2 de horno

R1 (K/W)	$6.95 \times 10^{-3}$	$Q_{rad}$ (W)	478.59
R2 (K/W)	0.1025	$Q_{conv}$ (W)	274.99
R3 (K/W)	$4.58 \times 10^{-3}$	Nu	152.53
R4 (K/W)	0.9807	$Ra_L$	$1.9828 \times 10^9$
$R_{Tot}$ (K/W)	1.0947	$h_{ext}$ (W/m <sup>2</sup> K)	10.21
$Q_{comb}$ (W)		753.61	

#### 4.7 Cálculos para el diseño #2 del horno con ladrillo y cemento refractario

Para esta sección de cálculos se consideran los mismos aspectos que el apartado anterior, por lo que se procede a presentar la tabla 17 tipo resumen. El diseño del horno corresponde al mismo de la sección anterior:

**Tabla 17** Resumen de resultados de cálculos para transferencia en diseño #2 de horno

R1 (K/W)	$6.95 \times 10^{-3}$	$Q_{rad}$ (W)	431.01
R2 (K/W)	0.1993	$Q_{conv}$ (W)	261.38
R3 (K/W)	$4.58 \times 10^{-3}$	Nu	152.53
R4 (K/W)	0.9807	$Ra_L$	$1.9828 \times 10^9$
$R_{Tot}$ (K/W)	1.1915	$h_{ext}$ (W/m <sup>2</sup> K)	10.21
$Q_{comb}$ (W)		692.38	

## 4.8 Cálculos de resistencia para el acero corrugado grado 60 ASTM 615

Considerando las propiedades mecánicas del acero ASTM 615 como su resistencia a fluencia se procede a realizar el cálculo del esfuerzo máximo que resiste una barra de este material con un diámetro de 9.52 mm.

Por medio de la ecuación 23 se procede a obtener el área transversal de la barra con diámetro de 9.52 mm:

$$A_{transversal} = \pi \times 4.76^2 mm^2 = 71.18 mm^2$$

Una vez este dato obtenido se utiliza la resistencia a la fluencia reportada en 420 MPa considerando utilizar un 40 % de este valor se obtiene 168 MPa y por medio de la ecuación 22 se obtiene el resultado de la fuerza máxima que es capaz de resistir la barra de acero corrugado:

$$F = 168 \frac{N}{mm^2} \times 71.18 mm^2 = 11958 N \cong 11.958 kN$$

Considerando que la barra se somete al esfuerzo provocado por 12 ladrillos refractarios con un peso de 3.92 kg con una fuerza equivalente a 461.52 N lo que implica una fuerza que no alcanza a ser suficiente para provocar la falla de la barra de acero por flexión.

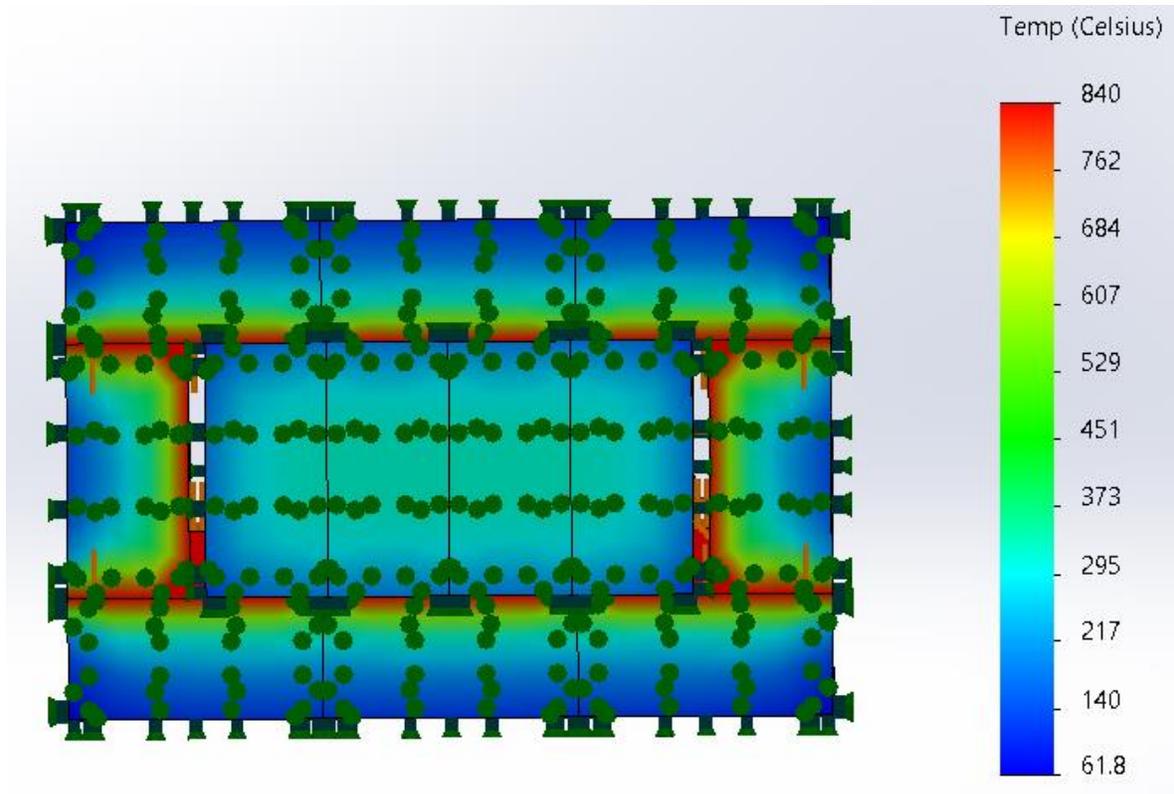
## 4.9 Efectividad del horno

Para esta sección se consideró el uso del software SolidWorks para realizar una simulación de la transferencia de calor desde el interior del horno a través de las paredes del horno hacia el exterior con la intención de obtener una comparación de datos entre la prueba práctica y la teoría.

### 4.9.1 Diseño #1 del horno con ladrillo y cemento refractario

Las condiciones seleccionadas son en régimen estacionario, se ubicó en las paredes internas del horno la temperatura máxima de trabajo de llama del biogás siendo 840 °C, un coeficiente de conducción de 0.72 W/m°C para el ladrillo y 8.6 W/m°C para el cemento refractario, la temperatura externa en 15 °C y coeficiente externo de convección del aire en 10.03 W/m<sup>2</sup> °C. Por simplificación del método para simulación se optó por usar solo el material con mayor volumen, siendo el ladrillo refractario, no se contempló el uso de la capa de cemento refractario.

En la figura 11 se presenta el resultado obtenido de la simulación con una temperatura máxima de 840 °C para las paredes internas, debido a la configuración de la simulación, y en el exterior del horno una temperatura de 61.8 °C, lo que al comparar los resultados del software con la prueba de laboratorio (ver sección 4.4) muestra que la simulación es muy exacta en comparación con la realidad representando un 23.1 % de error respecto al dato teórico de temperatura superficial externa.

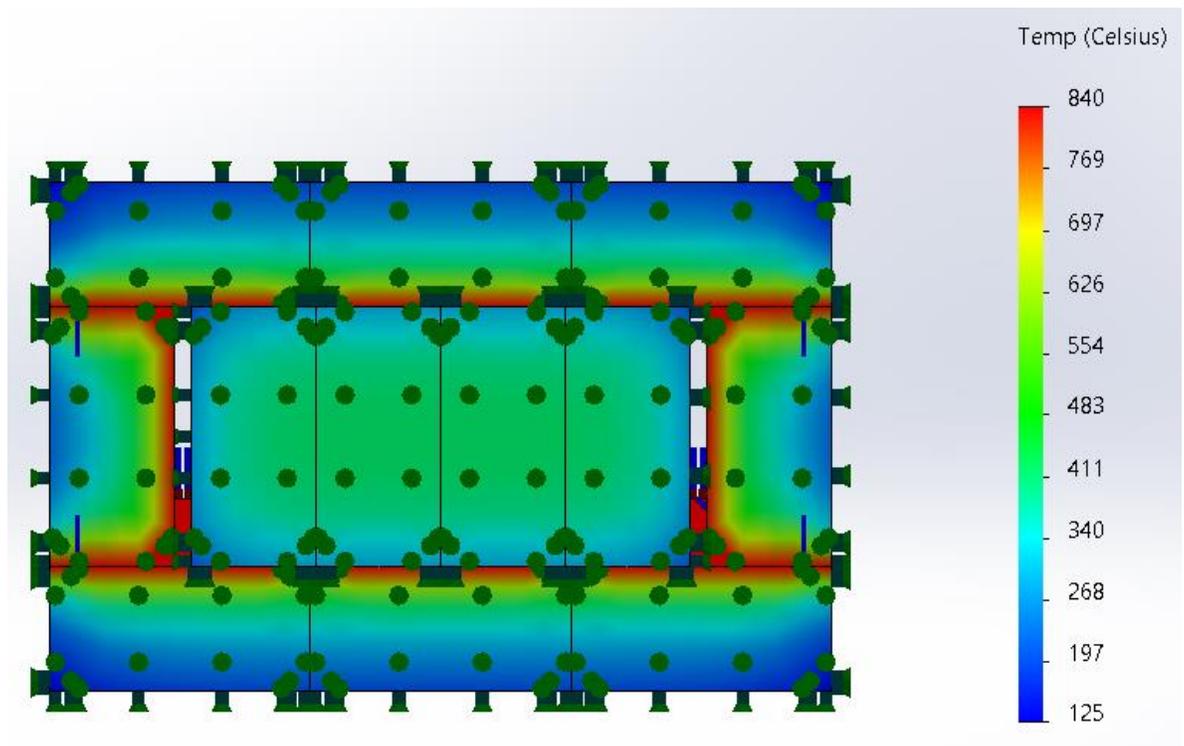


**Figura 11** Resultado de simulación en SolidWorks para el diseño #1 con ladrillo refractario.

#### **4.9.2 Diseño #1 del horno con ladrillo estructural y cemento refractario**

Para esta simulación se utilizó el mismo diseño de horno con una variación en el material de construcción, el ladrillo estructural fue el utilizado para la estructura considerando una misma temperatura de trabajo distribuida en las paredes internas del horno suministrada por la llama de biogás, para el coeficiente de conducción térmica del ladrillo se estableció el valor de 1.4 W/m°C, una temperatura externa igual a la simulación del punto anterior así como las mismas condiciones del viento a una temperatura de 15 °C con coeficiente de convección 10.03 W/m<sup>2</sup>°C.

En la figura 12 se presenta el resultado obtenido de la simulación con las condiciones anteriores, en este caso se muestra como en la superficie externa de los ladrillos del horno se alcanza una temperatura mayor que en el caso anterior, representado una temperatura máxima de 125 °C debido al aumento de conductividad y flujo térmico por las propiedades del ladrillo estructural, el cual posee propiedades térmicas con menor eficacia, además, el comparar la temperatura obtenida con la prueba de laboratorio realizada se representa tan solo un 2.5 % de error.

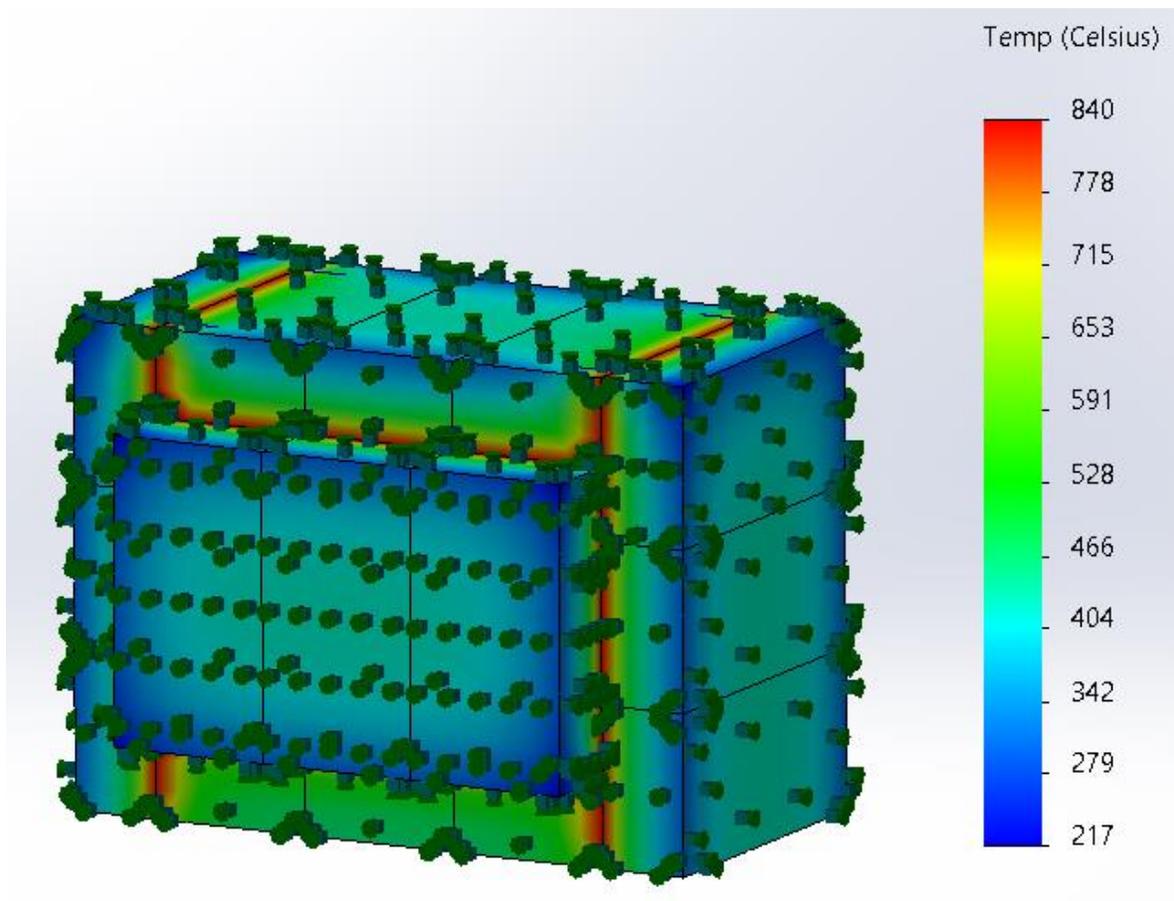


**Figura 12** Resultado de simulación en SolidWorks para el diseño #1 con ladrillo estructural.

#### **4.9.3 Diseño #2 del horno con ladrillo estructural y cemento refractario**

El resultado en este caso hay un aumento de la temperatura superficial externa del horno debido a la disminución del espesor de pared debido a la posición de los ladrillos, aunque el diseño represente un mejor aprovechamiento de los recursos en cuanto a la cantidad de ladrillos necesaria para lograr el diseño. Las condiciones de trabajo son las mismas que para los estudios de simulación anteriormente demostrados. En la superficie se obtuvo una temperatura máxima de 429 °C, las zonas que se denotan con una temperatura de 840 °C en la superficie externa es debido al acomodo de la carga de temperatura, no es debido a que por

la transferencia de calor se alcanza esta temperatura. En la figura 13 se presenta el resultado obtenido de la simulación:

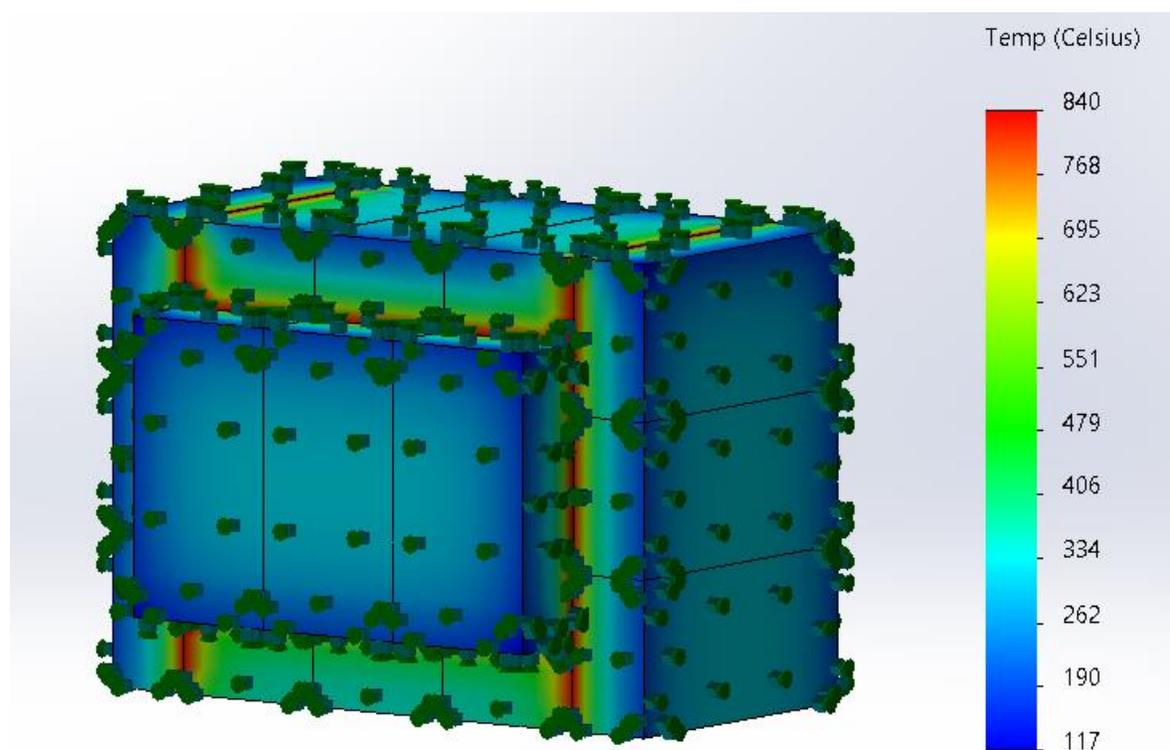


**Figura 13** Resultado de simulación en SolidWorks para el diseño #2 con ladrillo estructural.

#### **4.9.4 Diseño #2 del horno con ladrillo refractario y cemento refractario**

Para este diseño se presenta el resultado y concuerda con lo esperado en obtener un aumento en la temperatura superficial así como en el flujo de calor, para el resultado se tuvo una temperatura superficial externa de 321 °C debido a las propiedades del ladrillo refractario que presentan una ventaja en cuanto a conductividad respecto al ladrillo estructural, aun así la temperatura obtenida por la simulación resulta más elevada que los datos obtenidos en la práctica y se justifica debido a que para los cálculos varían aspectos como el área superficial debido a que en la prueba de laboratorio se utiliza el área superficial de un ladrillo y en la simulación toda el área superficial de la pared del horno, por lo que resulta en una mayor

conducción del flujo de calor. En la figura 14 se presenta el resultado obtenido por la simulación:



**Figura 14** Resultado de simulación en SolidWorks para el diseño #2 con ladrillo refractario.

#### **4.10 Análisis de impacto ambiental**

Para analizar el impacto ambiental que tiene el uso del biogás sobre las emisiones de gases de efecto invernadero se utilizó la metodología presentada en la sección 3.4 de esta investigación.

El consumo de un metro cúbico de biogás es equivalente a 0.3508 termias lo que es equivalente a 1.9 kg de CO<sub>2</sub> eq (Environmental Protection Agency (EPA), 2023). Se puede interpretar de una manera más sencilla si se compara este valor con otras fuentes de emisión de gases de efecto invernadero presentadas por conducir 0.0004 vehículos de pasajeros a gasolina por año y 77.3 kilómetros recorridos por un vehículo de la misma índole.

En la tabla 18 se presentan datos adicionales de emisiones de CO<sub>2</sub> sobre la equivalencia de 1.9 kg de CO<sub>2</sub> eq (Environmental Protection Agency (EPA), 2023):

**Tabla 18** Equivalencias de emisiones por 1.9 kg de CO<sub>2</sub> eq de biogás con otras fuentes de emisión.

Dato	Unidad	Dato	Unidad
Gasolina consumida	0.8 L	Diesel consumido	0.7 L
Carbón quemado	0.95 kg	Barriles de petróleo consumido	0.6 L
Energía consumida por hogar al año	0.0002 kWh	Celulares inteligentes cargados	226
Cilindros de propano utilizado para barbacoa	0.085	-	-

En la tabla 19 se presenta un resumen de los medios que se pueden usar para evitar o contrarrestar las emisiones provocadas por 1.9 kg de CO<sub>2</sub> eq producido por el biogás:

**Tabla 19** Medios para contrarrestar las emisiones de 1.9 kg de CO<sub>2</sub> eq por biogás.

Dato	Unidad
0.0006	Toneladas de desecho reciclado en lugar de ser tirado al ambiente
0.08	Bolsas de desecho reciclado en lugar de ser tirado al ambiente
0.07	Bombillas incandescentes cambiadas por LED

Estas emisiones se pueden absorber por medio de la naturaleza por 0.031 plantas de árboles cultivadas por 10 años y por 8.1 metros cuadrados de bosques Estadounidenses (Environmental Protection Agency (EPA), 2023).

Para realizar una comparación del impacto que provoca el uso de biogás ante el ambiente se va a utilizar la gasolina como combustible para analizar su impacto en cuanto a gases de efecto invernadero.

Considerando gasolina con densidad de 740.9 kg/m<sup>3</sup> (RECOPE, 2023a) como combustible de comparación en cuanto a sus emisiones se analiza un metro cúbico lo que es equivalente a 616.42 galones (utilizando un factor de conversión de 0.008345 gal/lb) equivalente a 5478 kg de CO<sub>2</sub> eq, con este dato se utilizó la calculadora de equivalencias de gases de efecto invernadero de (Environmental Protection Agency (EPA), 2023) para obtener los siguientes resultados presentados en la tabla 20:

**Tabla 20** Equivalencias de emisiones por 5478 kg de CO<sub>2</sub> eq de gasolina con otras fuentes de emisión.

Dato	Unidad	Dato	Unidad
Gasolina consumida	2329 L	Diesel consumido	2036 L
Carbón quemado	2783 kg	Barriles de petróleo consumido	2019 L
Energía consumida por hogar al año	0.69 kWh	Celulares inteligentes cargados	666374
Cilindros de propano utilizado para barbacoa	252	-	-

Los datos presentados en la tabla anterior indican cuánto se requiere de cada una de las fuentes de emisión de gases de efecto invernadero para que sea equivalente a los 5478 kg de CO<sub>2</sub> eq que se producen al utilizar un metro cúbico de gasolina.

Los 5478 kg de CO<sub>2</sub> eq producen las mismas emisiones de gases de efecto invernadero que el utilizar 1.2 vehículos de pasajeros a gasolina por año y 22600 kilómetros recorridos por un vehículo de la misma índole.

En la tabla 21 se presenta un resumen de los medios que se pueden usar para evitar o contrarrestar las emisiones provocadas por 5478 kg de CO<sub>2</sub> eq producido por la gasolina:

**Tabla 21** Medios para contrarrestar las emisiones de 5478 kg de CO<sub>2</sub> eq por gasolina.

Dato	Unidad
1.9	Toneladas de desecho reciclado en lugar de ser tirado al ambiente
237	Bolsas de desecho reciclado en lugar de ser tirado al ambiente
208	Bombillas incandescentes cambiadas por LED
0.002	Turbinas funcionando durante un año

Por medio de la naturaleza para absorber las emisiones provocadas por la equivalencia de los 5478 kg de CO<sub>2</sub> eq tomaría 90.6 plantas de árboles cultivadas por 10 años y 26304 metros cuadrados de bosques Estadounidenses durante un año (Environmental Protection Agency (EPA), 2023).

#### **4.11 Análisis de impacto económico**

La inversión económica para el diseño del horno se considera según los dos modelos propuestos, a continuación, se incluye los aspectos económicos analizados para obtener el costo del diseño #1 y #2.

Considerando el diseño #1 los materiales necesarios, así como su costo unitario y total se presenta en la tabla 22:

**Tabla 22** Costos para producir horno diseño #1

Concepto	Cantidad	Precio unitario ¢	Precio total ¢
Ladrillo refractario	41	2825	115825
Cemento refractario	1	15255	15255
Parrilla	1	10000	10000
Servicio transporte	1	30000	30000
Mano de obra	8	1645/h	13160
Tubo acero AISI 304	2	11300/m	22600
Recipiente contenedor	1	55000	55000
Monto total		¢261840	

Los datos presentados en la tabla anterior se obtuvieron por medio de cotizaciones realizadas a suplidores en Cartago, Costa Rica. El costo de la hora por mano de obra se obtuvo de los datos brindados por el Ministerio de Trabajo y Seguridad Social (MTSS, 2023).

Considerando producir los tubos de acero AISI 304 por medio de un servicio privado se consideró la empresa ATEMISA Precisión S.A, donde se obtuvieron cotizaciones por medio de planos, para manufacturar el tubo se tiene un costo de \$175 por unidad y el diseño de la parrilla por \$400. El costo total se puede reducir si el material seleccionado es el ladrillo estructural el cual posee un costo unitario de ¢450 y ¢18450 es el monto por cantidad de ladrillos requerida para el diseño para obtener un costo final del horno en ¢164445.

El recipiente contenedor del carbón vegetal se estimó el precio considerando el área total de acero requerido, obteniendo así por medio de lo ofrecido en el mercado por lámina de 1.22 x 2.44 metros un costo de ¢50505 (considerando un monto ¢55000 por imprevistos) ya que el precio de la lámina AISI 304 es de \$543530. Si se considera cambiar el material se recomienda el acero AISI A36 con las mismas dimensiones se tiene un precio de ¢169500 por lámina de material y considerando el área superficial que se requiere para el contenedor se obtiene un precio de ¢15750 y considerando inconvenientes se obtiene un monto de ¢20000.

Considerando el diseño #2 los materiales necesarios, así como su costo unitario y total se presenta en la tabla 23:

**Tabla 23** Costos para producir horno diseño #2

Concepto	Cantidad	Precio unitario ¢	Precio total ¢
Ladrillo refractario	18	2825	50850
Cemento refractario	1	15255	15255
Parrilla	1	10000	10000
Servicio transporte	1	30000	30000
Mano de obra	8	1645/h	13160
Tubo acero AISI 304	2	11300/m	22600
Recipiente contenedor	1	49000	49000
Monto total		¢190865	

Para el diseño #2 también se consideró cotizar la manufactura de los tubos de acero AISI 304 con la empresa ATEMISA Precisión S.A. Para manufacturar el tubo se tiene un costo de \$175 por unidad y el diseño de la parrilla por \$300. El costo se reduce si el ladrillo seleccionado es el estructural, el cual posee un costo unitario de ¢450 y para el diseño el monto total es de ¢8550 por cantidad de ladrillos necesarios para un costo total del horno en ¢148565.

El monto de dinero para el recipiente contenedor de carbón vegetal se realizó de la misma manera que para el diseño #1, se obtuvo un precio de ¢43640 por el área superficial necesaria para su manufactura y considerando un monto por ¢49000 por imprevistos. Si se desea disminuir el costo final del contenedor se puede realizar un cambio de material al acero AISI A36 y obtener un precio de ¢13610 y considerando un margen por inconvenientes se considera un precio de ¢18610.

Un aspecto considerado es analizar la producción de energía por el combustible, se considera que el biogás con un promedio de metano entre 55 y 75 % de la composición química del combustible produce entre 6 y 6.5 kWh/m<sup>3</sup> (SSWM, 2020) y en comparación

con gas licuado de petróleo (LPG) se produce 7285 kWh/m<sup>3</sup> esto considerando una densidad del LPG de 532.2 kg/m<sup>3</sup> (RECOPE, 2023) partiendo de su poder calorífico en 13.69 kWh/kg (Engineering Tool Box, 2003).

Considerando que el desarrollo del proyecto ya posee una producción de biogás a la cual no se le da uso en su totalidad, esto implica que no se requiere agregar costos por combustible y en caso contrario que el horno se trabaje con LPG, un cilindro de 21.84 litros del proveedor Z Gas posee un precio de €7257 (Z Gas, 2023) y considerando que se requiere abastecer el horno de 1.9 m<sup>3</sup> como mínimo se tendría un costo por combustible de LPG en €336300 para poder llevar a cabo el proceso de activación de carbón vegetal.

## **4.12 Resumen de resultados**

En esta sección del documento se presenta un resumen breve de cada resultado obtenido durante la investigación para un análisis más sencillo de los datos obtenidos.

### **4.12.1 Medición de temperatura de llama**

En la medición de temperatura en la prueba práctica se obtuvo un promedio de temperatura de 606,6 °C por un minuto de tiempo transcurrido y para lograr una medición de temperatura de 700 °C con el equipo utilizado se requiere un tiempo de 69.2 segundos y como temperatura máxima registrada se obtuvo un valor de 840 °C.

### **4.12.2 Medición de flujo de biogás**

El flujo analizado del biogás suministrado por el biodigestor se estudió para conocer si su comportamiento es fijo o variable, según lo analizado se obtuvo un comportamiento sin fluctuaciones en el suministro del biogás.

Se obtuvo que 1.919 m<sup>3</sup> de biogás se abastecen en promedio por cada 3 horas con un aumento de 0.211 m<sup>3</sup> de biogás por minuto y un promedio de 0.64 m<sup>3</sup> por hora.

La velocidad de suministro de biogás por parte del biodigestor a través de 20 metros de tubería es de 0.571 m/s y la velocidad de desabastecimiento una vez cerrada la llave principal de abastecimiento es de 0.0667 m/s mientras está el quemador de gas en funcionamiento.

### **4.12.3 Conductividad térmica de ladrillos**

Para el análisis de la conductividad de los ladrillos refractario y estructural se obtuvo en cuanto a las temperaturas registradas en la superficie en contacto con el ambiente en ambos ladrillos, un comportamiento coherente con la teoría indicado por un 41.3 % de variación entre ambas muestras donde para el refractario hay un aumento de 2.6 °C por minuto y para el estructural 6.3 °C, para lo que el ladrillo refractario presenta temperaturas superficiales inferiores a las del ladrillo estructural.

### **4.12.4 Cálculos de transferencia de calor**

Los resultados de los cálculos para transferencia contemplando el análisis por los tres métodos de conducción de calor se resumen en que al comparar el diseño #1 con ladrillo refractario y su variación que incluye el uso del ladrillo estructural (datos que se pueden verificar en las tablas 13 y 14) se puede evidenciar que la sumatoria de las resistencias por conducción y convección es mayor para el diseño con ladrillo refractario debido a las propiedades térmicas del material así como un factor importante en la conducción de calor que es el espesor de pared, esto se resume en que existe un 12.07% de variación de la resistencia térmica total entre el diseño con ladrillo refractario y el estructural. Además, el comparar el flujo de calor total que contempla la sumatoria del flujo por radiación y convección entre ambos diseños, se evidencia que exista mayor flujo de calor para el ladrillo estructural con 960.3 W contra 844.45 W del ladrillo refractario, esto equivale a un 12.97 % de variación coincidiendo con el porcentaje de variación entre la resistencia térmica de ambos diseños, otro aspecto que se puede analizar es que en la práctica existe mayor conducción por radiación que por convección y para ambos casos se tiene que el flujo de radiación es mayor al convectivo.

De la misma manera se puede resumir esta información para el diseño #2 donde la variación de diseño es el dimensionamiento por acomodo de los ladrillos. Para las resistencias por conducción y convección se posee el mismo comportamiento que el diseño #1 donde el modelo con ladrillo refractario posee mayor resistencia a la conductividad de calor que el ladrillo estructural, esto se resume en un 8.12 % de variación coincidiendo con lo esperado, la diferencia de porcentaje respecto al diseño #1 es por el carácter de dimensionamiento que influye junto al factor de forma. El resumen del análisis para flujo de calor se posee mayor

en el diseño de ladrillo estructural con 753.61 W y para el diseño con ladrillo refractario 692.38 W lo que equivale a un 8.12 % de variación. En este caso el flujo por radiación es mayor que el convectivo como es de esperar según la teoría. Estos datos se pueden verificar en las tablas 16 y 17.

#### **4.12.5 Simulaciones con SolidWorks**

Los datos obtenidos de las simulaciones realizadas con el software SolidWorks resultan en que el diseño #1 posee mejor rendimiento que el diseño #2 debido a la temperatura superficial externa, mostrando una mejoría en cuanto a mantener el flujo de calor en el interior del horno y como consecuencia directa una menor exposición térmica de las personas que puedan estar cerca del horno haciendo uso de este, además que una temperatura superficial de 61.8 °C en la superficie obtenida con la simulación para el diseño #1 con ladrillo refractario no representa un riesgo de consideración para que represente en una quemadura.

Estos datos obtenidos evidencian la eficacia de la selección de materiales de tipo refractario debido a sus buenas propiedades para retener el calor frente a otros materiales como los metales y sus aleaciones.

El obtener una temperatura superficial en el exterior del horno de 61.8 °C respecto a la temperatura interna de análisis representa un 7.35 % de pérdida de calor desde el interior, además la variación del diseño #1 que posee una temperatura superficial de 125 °C representa un 14.88 % de pérdida, el diseño #2 25.83 % y 13.93 % respectivamente, de los cuales se considera descartar el diseño #2 con ladrillo estructural debido a que representa un porcentaje mayor de pérdida por temperatura y a su vez un riesgo para la integridad física de los futuros usuarios del diseño.

#### **4.12.6 Análisis ambiental**

La comparación de dos fuentes de combustible en su impacto ambiental resultado de su combustión resulta de gran impacto ya que al comparar el combustible de interés (biogás) y uno de los combustibles más utilizados a diario como la gasolina, se obtuvieron datos con una gran diferencia de impacto ambiental.

Siendo la unidad internacional para medir el impacto por emisiones de gases de efecto invernadero los kilogramos de dióxido de carbono equivalente (kg CO<sub>2</sub> eq) se obtuvo una diferencia donde el impacto de un metro cúbico de gasolina produce aproximadamente 5478 kg CO<sub>2</sub> eq y el biogás representa tan solo el 0.03% de esta cantidad. Aunque el carbón es una fuente de combustible utilizada a gran escala, el impacto ambiental por los dos combustibles analizados representa quemar 2783 kg de carbón para alcanzar el mismo impacto que la gasolina y el biogás representa de igual manera el 0.03% y en cuanto a ambos combustibles, llevar a combustión un m<sup>3</sup> de cada uno representa el uso de 252 cilindros de propano de 16 libras para la gasolina y el biogás tan solo 0.085 cilindros lo que implica 1.36 libras de propano.

#### **4.12.7 Análisis económico**

El costo total para el primer diseño propuesto del horno contempla los costos por materiales, mano de obra, transporte y accesorios, para este primer diseño se obtuvo un monto de inversión de ¢259015 y el diseño #2 ¢168265 lo que representa una variación del 65% comparado al diseño #1, esto por la cantidad de ladrillos requerida para construir el diseño.

Se consideró cotizar la manufactura de tres componentes de cada diseño con acero AISI 304, los tubos quemadores de combustible, la parrilla y el contenedor, obteniéndose montos de \$175 para los tubos, \$400 y \$300 para la parrilla y el contenedor en ¢55000 y ¢49000 para el diseño #1 y diseño #2 respectivamente. Si se desea una reducción de los montos para el contenedor de carbón se cotizó con un cambio de material al acero AISI A36 y se obtuvo una reducción del 36.4 % y 38 % para el diseño #1 y #2 respectivamente.

## 5 Conclusiones

Con la determinación de la temperatura de llama del biogás se comprobó que alcanza una temperatura superior a la requerida para llevar a cabo el proceso de activación del carbón vegetal sin necesidad de realizar un estudio de combustión para aumentar la temperatura de trabajo de la llama.

Se requiere un caudal de 1.919 m<sup>3</sup> para un tiempo de activación de carbón vegetal de 3 horas (0.64 m<sup>3</sup>/h) con un potencial calorífico de 12.47 kWh para lo cual el biodigestor posee la capacidad de brindar el flujo sin fluctuaciones.

La conductividad térmica de ambos ladrillos, refractario y estructural, resulta coincidir con la teoría, representando en la práctica para el refractario un aumento de temperatura en 2.6 °C por minuto y el estructural en 6.3 °C con un 41.1 % de diferencia entre la superficie opuesta a la fuente de calor.

Los cálculos teóricos realizados para la transferencia de calor indican que el espesor de pared del horno y material influye en el valor de resistencia total al flujo de calor, se presentó un 12.1 % de variación entre el ladrillo refractario y estructural para el diseño #1. Para el diseño #2 el espesor de pared presenta variación en el flujo con una diferencia del 21.5 % entre el diseño #1 y #2 analizado con ladrillo estructural. Los resultados de flujo para el diseño con ladrillo refractario son menores que el ladrillo estructural, lo que coincide con la teoría y propiedades de cada material.

El análisis de la conductividad de los ladrillos por medio de simulaciones con SolidWorks en comparación con la prueba práctica indica que el diseño #1 con ladrillo refractario comparado al diseño #2 representa una variación de 80.7% en la temperatura superficial. El diseño #1 con ladrillo estructural en comparación al diseño #2 indica un 70.8% de diferencia entre la temperatura superficial. Estos porcentajes se consideran por el acomodo del ladrillo en la simulación y prueba práctica.

El impacto ambiental que representan los combustibles utilizados en la industria es de gran importancia y se evidencia que, en la comparación del biogás con la gasolina, el primero representa menor impacto negativo al ambiente con tan solo 1.9 kg de CO<sub>2</sub> eq por metro cúbico de combustible consumido y la gasolina hasta 5478 kg de CO<sub>2</sub> eq. Por esto se

es de mayor provecho utilizar combustibles como el biogás que proviene de desechos que provocan contaminación por metano.

El diseño #2 en cuanto al factor económico es más rentable que el diseño #1 debido a la distribución de los ladrillos y en cuanto a las pérdidas de calor hacia la superficie externa el diseño #1 es el que presenta mayor flujo de calor del interior hacia el exterior del horno.

## 6 Bibliografía

- Abarca Monge, S., & Segura Guzmán, J. (2022). Avances de la NAMA Ganadería Resultados e impactos positivos en el ambiente. *Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica*.
- Alhassan, K. A., Abdullahi, B. T., & Shah, M. M. (2019). A review on biogas production as the alternative source of fuel. *Journal of Applied and Advanced Research, March*, 61–65. <https://doi.org/10.21839/jaar.2019.v4i2.266>
- Bagi, Z., Ács, N., Böjti, T., Kakuk, B., Rákhely, G., Strang, O., Szuhaj, M., Wirth, R., & Kovács, K. L. (2017). Biomethane: The energy storage, platform chemical and greenhouse gas mitigation target. *Anaerobe*, 46, 13–22. <https://doi.org/10.1016/j.anaerobe.2017.03.001>
- BBC News Mundo. (2021). *Los gráficos que muestran que más del 50% de las emisiones de CO2 ocurrieron en los últimos 30 años*. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-59013521>
- Burchell, T. D. (1999). *Carbon Materials for Advanced Technologies* (I). Elsevier Ltd. [https://books.google.co.cr/books?hl=es&lr=&id=CEeVS3LcuuoC&oi=fnd&pg=PP1&dq=carbon+uses+and+properties&ots=19uW3hD5uD&sig=2Xm0-9Dgvf8crh2ThDL9CTzIz4c&redir\\_esc=y#v=onepage&q=carbon uses and properties&f=false](https://books.google.co.cr/books?hl=es&lr=&id=CEeVS3LcuuoC&oi=fnd&pg=PP1&dq=carbon+uses+and+properties&ots=19uW3hD5uD&sig=2Xm0-9Dgvf8crh2ThDL9CTzIz4c&redir_esc=y#v=onepage&q=carbon+uses+and+properties&f=false)
- Cengel, Y., & Ghajar, A. (2011). *Transferencia de Calor y Masa | Fundamentos y Aplicaciones* (4th ed.). MCGRAW-HILL.
- Cubero Montero, G. E. (2021). *Activación de carbón vegetal para desulfuración de biogás producido por biodigestor anaerobio en proceso agroindustrial*. 1–79.
- Da Costa Pinheiro, P. C. (2016). La producción del carbón vegetal. *Universidad Nacional Del Sur*. [https://www.researchgate.net/publication/334947921\\_LA\\_PRODUCION\\_DEL\\_CARBON\\_VEGETAL](https://www.researchgate.net/publication/334947921_LA_PRODUCION_DEL_CARBON_VEGETAL)
- De Klein, C., Novoa, R., Ogle, S., Smith, K. A., Rochette, P., Wirth, T. C., McConkey, B.

- G., Mosier, A., & Rypdal, K. (2006). Emisiones De N<sub>2</sub>O De Los Suelos Gestionados Y Emisiones De CO<sub>2</sub> Derivadas De La Aplicación De Cal y Urea. *Directrices Del IPCC de 2006 Para Los Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero*, 4, 1–56.
- Dryden, I. (1982). Furnaces: principles of design and use. In *The Efficient Use of Energy* (2nd ed.). <https://doi.org/10.1016/b978-0-408-01250-8.50017-9>
- Engineering Tool Box. (2003). *Fuels Higher and Lower Calofiric Values*. [https://www.engineeringtoolbox.com/fuels-higher-calorific-values-d\\_169.html](https://www.engineeringtoolbox.com/fuels-higher-calorific-values-d_169.html)
- Environmental Protection Agency (EPA). (2023). *Greenhouse Gas Equivalencies Calculator*. <https://www.epa.gov/energy/greenhouse-gas-equivalencies-calculator>
- Fischer-Cripps, A. C. (2004). Materials data. *The Physics Companion*. <https://doi.org/10.1887/0750309539/b1258b1>
- Fischer, R. A., Cottrell, E., Hauri, E., Lee, K. K. M., & Le Voyer, M. (2020). The carbon content of Earth and its core. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 117(16), 8743–8749. <https://doi.org/10.1073/pnas.1919930117>
- Food & Agriculture Organization. (1983). *Métodos simples para fabricar carbón vegetal*. <https://www.fao.org/3/x5328s/x5328s00.htm>
- Food and Organization of the United Nations. (2007). Vegetable Carbon. *Food Additives Data Book*, 4(1990), 312–315. <https://doi.org/10.1002/9780470995327.ch81>
- Gratuito, M. K. B., Panyathanmaporn, T., Chumnanklang, R. A., Sirinuntawittaya, N., & Dutta, A. (2008). Production of activated carbon from coconut shell: Optimization using response surface methodology. *Bioresource Technology*, 99(11), 4887–4895. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.09.042>
- Hanke, L. D. (2018). Surface Characterization for Medical Devices. *Materials for Medical Devices*, 23, 331–342. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v23.a0005685>
- Hasan, A., Alshammari, A., & Al-Attar, A. F. (2014). *Characterizations of Semi-Silica*

*Refractory Bricks Produced from Local Iraqi Materials Solid Oxide Fuel Cells View project. April 2014.* <https://www.researchgate.net/publication/311735230>

- Heidarinejad, Z., Dehghani, M. H., Heidari, M., Javedan, G., Ali, I., & Sillanpää, M. (2020). Methods for preparation and activation of activated carbon: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 18(2), 393–415. <https://doi.org/10.1007/s10311-019-00955-0>
- Hernandez, L. (2020). *EL Planeta en Llamas*. [https://wwfes.awsassets.panda.org/downloads/wwf\\_informe\\_incendios\\_2020\\_el\\_planeta\\_en\\_llamas\\_ok.pdf?54921/Informe-incendios-forestales-2020-El-planeta-en-llamas](https://wwfes.awsassets.panda.org/downloads/wwf_informe_incendios_2020_el_planeta_en_llamas_ok.pdf?54921/Informe-incendios-forestales-2020-El-planeta-en-llamas)
- Hosseini, S. E., Bagheri, G., & Wahid, M. A. (2014). Numerical investigation of biogas flameless combustion. *Energy Conversion and Management*, 81, 41–50. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.02.006>
- Leitón, J. (2015). Purificación de biogás utilizando agua a presión óxido de calcio y carbón. *Revista Científica Universidad de San Carlos de Guatemala*, 25(1), 66–73. <https://doi.org/10.54495/rev.cientifica.v25i1.98>
- Leong, S. S., Ng, W. M., Lim, J. K., & Yeap, S. P. (2018). Dynamic light scattering: Effective sizing technique for characterization of magnetic nanoparticles. In *Handbook of Materials Characterization*. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-92955-2\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-92955-2_3)
- Maceda, A., Soto-Hernández, M., Peña-Valdivia, C. B., Trejo, C., & Terrazas, T. (2021). Lignin: composition, synthesis and evolution. *Madera y Bosques*, 27(2). <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2722137>
- Maria, D., Mohedano, R. D. A., Willian, C., Castilhos, A. B. De, Alves, V., & Filho, P. B. (2020). *H<sub>2</sub>S adsorption on nanostructured iron oxide at room temperature for biogas purification: Application of renewable energy*. 154, 151–160. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.02.054>
- MINAE, RECOPE, & SEPSE. (2017). *Estrategia Nacional de Bioenergía y su plan de acción*. 1–35. <https://sepse.go.cr/wp-content/uploads/2021/08/Estrategia-Nacional-de-Bioenergía.pdf>

- MTSS. (2023). *Lista de salarios mínimos del sector privado*.  
<https://www.mtss.go.cr/temas-laborales/salarios/lista-salarios.html>
- Navas-O, S. (2016). Calidad del carbón: evaluación preeliminar. *Revista Tecnología En Marcha*, 12(1), 99–106.  
[https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec\\_marcha/article/view/2684](https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/view/2684)
- Njewa, J. B., Vunain, E., & Biswick, T. (2022). Synthesis and Characterization of Activated Carbons Prepared from Agro-Wastes by Chemical Activation. *Journal of Chemistry*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/9975444>
- Rafay, K. (2023). *Natural Gas Converter*.  
<https://www.omnicalculator.com/conversion/natural-gas-converter>
- Rambabu, N., Rao, B. V. S. K., Surisetty, V. R., Das, U., & Dalai, A. K. (2015). Production, characterization, and evaluation of activated carbons from de-oiled canola meal for environmental applications. *Industrial Crops and Products*, 65, 572–581.  
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.09.046>
- RECOPE. (2023a). *Gasolina Superior*. <https://www.recope.go.cr/productos/calidad-y-seguridad-de-productos/gasolina-super/>
- RECOPE. (2023b). *MANUAL DE PRODUCTOS 2023*. 0–65.
- Ritchie, H., Roser, M., & Rosado, P. (2020). *CO<sub>2</sub> and Greenhouse Gas Emissions*. Our World in Data. <https://ourworldindata.org/emissions-by-fuel>
- Routschka, G., & Wuthnow, H. (2008). *Refractory Materials* (3rd ed.). Vulkan-Verlag GmbH.  
<https://books.google.co.cr/books?id=0ugkNtlWKWEC&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>
- Ruh, E. (1991). Refractory Materials, Metallurgical. *Concise Encyclopedia of Advanced Ceramic Materials*, 394–402. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-034720-2.50109-x>
- Sajid, H. U., & Kiran, R. (2018). Influence of corrosion and surface roughness on wettability of ASTM A36 steels. *Journal of Constructional Steel Research*, 144, 310–

326. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.01.023>
- Soward, A. M. (1992). Dynamo theory. *Advances in Space Research*, 12(8), 257–263.  
[https://doi.org/10.1016/0273-1177\(92\)90396-F](https://doi.org/10.1016/0273-1177(92)90396-F)
- SSWM. (2020). *Combustión de biogás*. <https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de/tecnologias-de-saneamiento/uso-yo-disposicion-final/combustión-de-biogás#:~:text=El biogás obtenido en los reactores de biogás,para una caldera o para calentar un espacio.>
- Tang, J., Shao, Y., Guo, J., Zhang, T., Meng, G., & Wang, F. (2010). The effect of H<sub>2</sub>S concentration on the corrosion behavior of carbon steel at 90 °C. *Corrosion Science*, 52(6), 2050–2058. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.02.004>
- Urone, P. P., & Hinrichs, R. (2020). Physics. *OpenStax*, 1157.  
<https://openstax.org/books/physics/pages/1-introduction>
- Vázquez Carrillo, M. F., Ku-Vera, J. C., González Ronquillo, M., Castillo Gallegos, E., Kebreab, E., & Castelán Ortega, O. A. (2020). EMISIONES DE METANO POR FERMENTACIÓN ENTÉRICA DE LA GANADERÍA BOVINA DE MÉXICO: LA IMPORTANCIA DE CONTAR CON INVENTARIOS NACIONALES PRECISOS Y DE ESTRATEGIAS VIABLES DE MITIGACIÓN. In *Programa Mexicano del Carbono* (Vol. 4, Issue 1).
- World Material. (n.d.). *Melting point of Stainless Steel 304, 316 Melting temperature in °F & °C*. Retrieved February 22, 2023, from <https://www.theworldmaterial.com/melting-point-of-stainless-steel/>
- Yahya, M. A., Al-Qodah, Z., & Ngah, C. W. Z. (2015). Agricultural bio-waste materials as potential sustainable precursors used for activated carbon production: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 46, 218–235.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.051>
- Z Gas. (2023). *Precios del Gas*. <https://zetagascr.com/>

## 7 Consultas bibliográficas

Prasetyo, E., & Anderson, C. (2020). Platinum group elements recovery from used catalytic converters by acidic fusion and leaching. *Metals*, 10(4).

<https://doi.org/10.3390/met10040485>

Richard Martin Gibbons. (2016). Thermodynamic Equilibrium. *Journal of Energy and Power Engineering*, 10(10). <https://doi.org/10.17265/1934-8975/2016.10.006>

Suzin, Y., Buettner, L. C., & LeDuc, C. A. (1999). Characterizing the ignition process of activated carbon. *Carbon*, 37(2), 335–346. [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(97\)00138-3](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(97)00138-3)

TechTube. (n.d.). *Stainless Steel Alloys*. Retrieved February 22, 2023, from

<https://www.techtube.com/alloys/>

PCE Instruments. (n.d.). *Termómetro infrarrojo · Medición de temperatura sin contacto*.

[www.pce-iberica.es](http://www.pce-iberica.es)[www.pce-instruments.com/espanol](http://www.pce-instruments.com/espanol)

Skoog, D. A., Holler, J. H., & Crouch, S. R. (2008). *Principios de análisis instrumental* (6th ed., pp. 486–490). Cengage Learning Editores, S.A.

Purdue University. (2014). *Fossil Fuel Use and Carbon Dioxide Emissions*. 1–7.

<https://ag.purdue.edu/climate/wp-content/uploads/2018/06/FossilFuelUseR2014.pdf>

Food and Organization of the United Nations. (2007). Vegetable Carbon. *Food Additives Data Book*, 4(1990), 312–315. <https://doi.org/10.1002/9780470995327.ch81>

Seto, K. C., Davis, S. J., Mitchell, R. B., Stokes, E. C., Unruh, G., & Ürge-Vorsatz, D.

(2016). Carbon Lock-In: Types, Causes, and Policy Implications. *Annual Review of Environment and Resources*, 41, 425–452. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-110615-085934>

Bakti, A. I., & Gareso, P. L. (2018). Characterization of Active Carbon Prepared from

Coconuts Shells using FTIR, XRD and SEM Techniques. *Jurnal Ilmiah Pendidikan Fisika Al-Biruni*, 7(1), 33–39. <https://doi.org/10.24042/jipfalbiruni.v7i1.2459>

Pu, T., & Peng, W. (1998). SEM Analysis of Ablated Carbon Felt-Carbon Composite

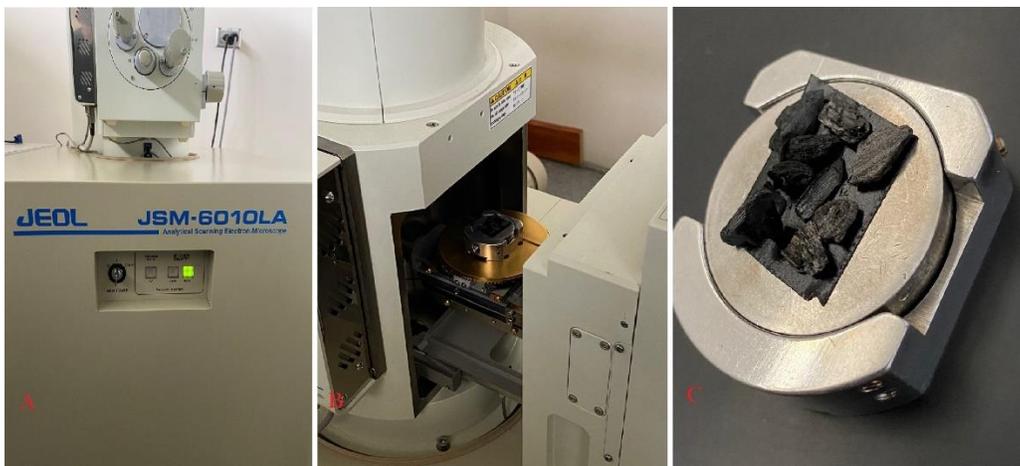
Samples. *Ceramics International*, 24(8), 611–615. [https://doi.org/10.1016/s0272-8842\(97\)00064-3](https://doi.org/10.1016/s0272-8842(97)00064-3)

## 8 Apéndices y anexos

### 8.1 Metodología y resultados de caracterización del carbón vegetal por SEM y EDS

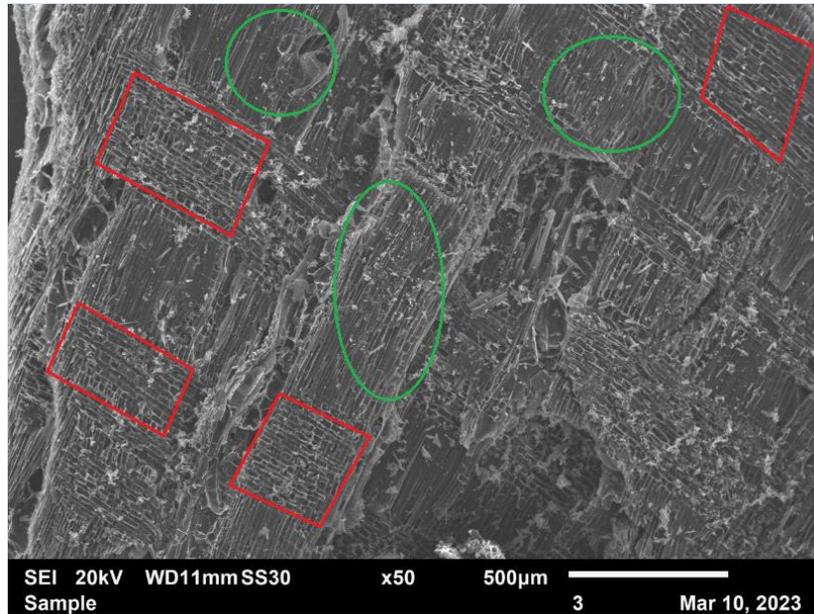
Para analizar la morfología del carbón vegetal se utilizó el Microscopio Electrónico de Barrido (SEM) marca JEOL modelo JSM-6010LA del laboratorio de microscopía del Instituto Tecnológico de Costa Rica con voltaje de 20kV. Las muestras utilizadas fueron las seleccionadas del proceso de tamizado y se adhirieron al portamuestras con cinta de carbono. Se realizó una primera prueba de análisis sin recubrimiento de oro en la muestra para verificar si la respuesta de la muestra era la adecuada, se concluyó innecesario el uso del recubrimiento debido a que la calidad de imagen obtenida fue alta. El mismo equipo de laboratorio se utilizó para obtener un análisis de la composición química por medio de la Espectroscopía de dispersión de Energía de rayos X (EDS).

El equipo utilizado para el análisis de morfología y composición química de las muestras de carbón vegetal se presenta en la figura 15, en la figura 15A y 15B se muestra el equipo y en la 16C el portamuestras con la cinta de carbón para adherencia de la muestra.



**Figura 15** Equipo JEOL JSM-6010LA para análisis de SEM y EDS.

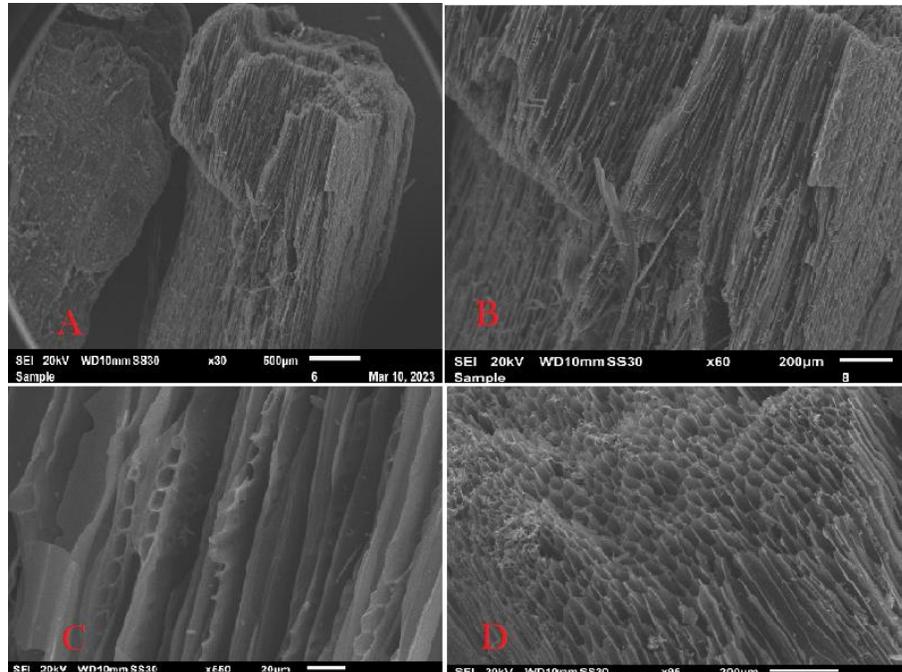
En la siguiente figura 16 se presenta una imagen a x50 aumentos obtenida por el equipo SEM en la que se observa una morfología heterogénea en su mayoría, existen zonas en las que hay presencia de uniformidad según sea una zona porosa o fibrosa. De la figura se observan zonas demarcadas en color rojo donde existe uniformidad de superficie y en color verde algunas áreas con fibras extensas.



**Figura 16** Micrografía SEM x50 aumentos carbón vegetal.

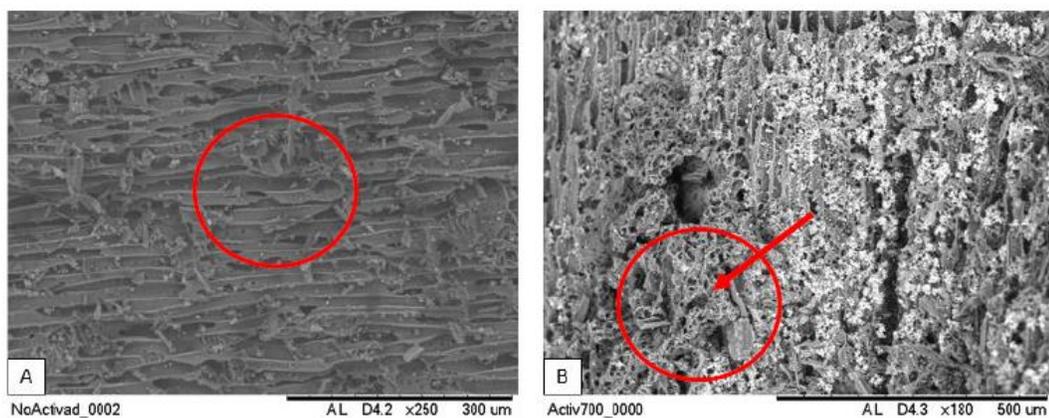
La morfología del carbón vegetal es bastante irregular según la muestra en análisis, así como la zona que se observa en equipo SEM, como en la figura que la morfología varía de manera considerable, en la siguiente figura 17 se observa mayor regularidad siendo en su mayoría una estructura fibrosa con tamaños homogéneos.

En la figura 17A se observa como en la mayoría de la superficie se mantiene con fibras de longitudes uniformes y a x550 aumentos se aprecia pequeños poros entre las capas de fibras.



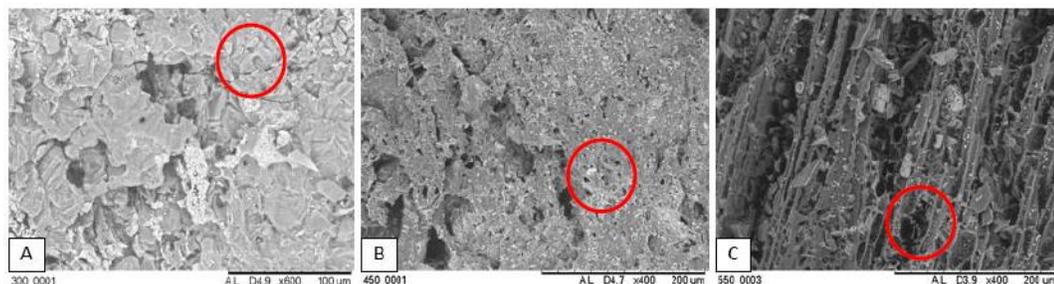
**Figura 17** Micrografía SEM. A) x30, B) x60, C) x550 y D) x95 aumentos.

Estudios realizados sobre la activación de carbón por medio de la impregnación de hidróxido de potasio a diferentes temperaturas presentan cambios en la morfología del carbón con un aumento en la porosidad del carbón y mayor aun cuando el proceso de activación se realiza a mayores temperaturas. Como comparación se puede apreciar el cambio en la morfología en la siguiente figura:



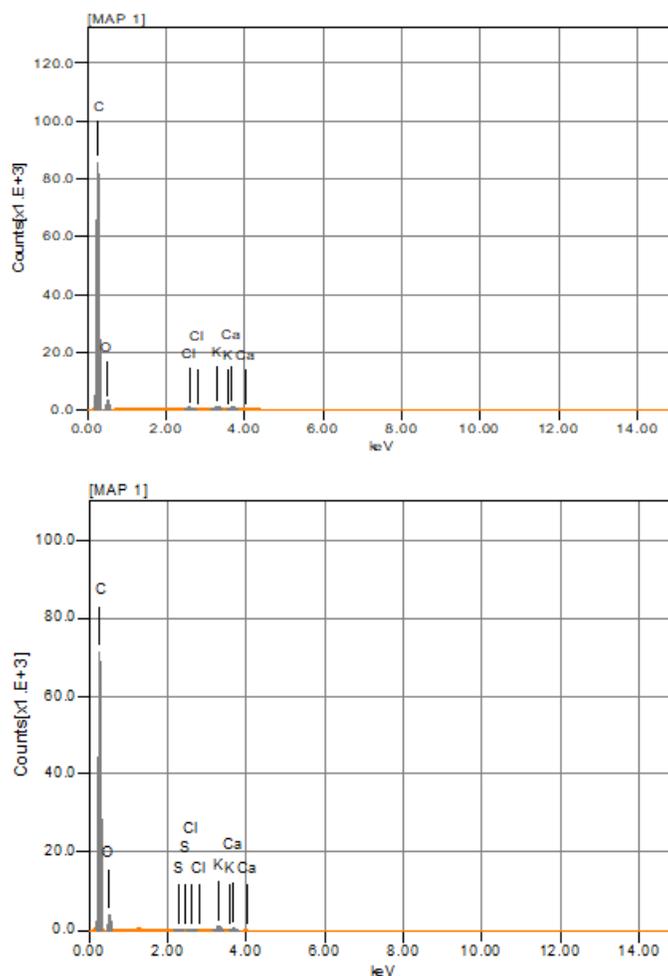
**Figura 18** Micrografía SEM de a) carbón vegetal y b) carbón activado a 700 °C. Fuente: (Cubero Montero, 2021)

En la figura 19 se presentan resultados obtenidos por estudios previos donde se realizó la activación del carbón vegetal a diferentes temperaturas mostrando una diferencia en la morfología del carbón activado:



**Figura 19** Micrografía SEM de carbón activado a 300 °C a), 450 °C b) y 550 °C c). Fuente: (Cubero Montero, 2021)

En la siguiente figura 20 se presenta el resultado obtenido de la prueba de EDS aplicada a las muestras de carbón vegetal, se evidencia presencia de elementos como carbón, cloro, potasio, azufre y calcio, en su mayor porcentaje el carbón y los demás elementos se consideran como trazas contaminantes del proceso de quemado de la madera para convertirla en carbón vegetal.



**Figura 20** Elementos presentes en el carbón vegetal obtenido por EDS.

Comparando lo obtenido por la prueba de EDS para el carbón vegetal con muestras de carbón activado se puede evidenciar una disminución de la concentración del porcentaje presente de carbono y calcio, así como, un aumento del porcentaje de oxígeno, potasio y sin presencia de agentes residuales como el cloro (Cubero Montero, 2021).

Como resumen de los resultados obtenidos las muestras de carbón vegetal analizadas por EDS hay mayor presencia del porcentaje de carbono y oxígeno que en comparación con muestras de carbón activado por hidróxido de potasio. Además, se obtuvo presencia de elementos considerados como trazas contaminantes por el proceso de pirólisis para la obtención del carbón vegetal, entre ellos se puede mencionar el cloro y azufre, el aluminio se considera como trazas del porta muestras.

La morfología de las muestras analizadas por SEM indica que el carbón vegetal presenta una morfología heterogénea, en su mayoría se encontró patrones de poros con tamaños similares y zonas con fibras de longitud. Las muestras activadas por hidróxido de potasio analizadas por otros estudios indican que a mayor temperatura de trabajo se obtiene mayor aumento en la porosidad de las muestras.