



Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga



**“Diseño y Construcción de un Horno Ahorrador de Energía
Ecológico”**

TITULACIÓN INTEGRAL

TESIS

Para Obtener el Grado de:

Ingeniero Mecatrónico

PRESENTA:

Johvany Méndez Martínez

TUTORES:

Dr. Enrique Javier Martínez Delgado

DE. Víctor Manuel Velasco Gallardo

Dr. José Alonso Dena Aguilar

Pabellón de Arteaga, Ags., septiembre del 2026



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE PABELLÓN DE ARTEAGA
SUBDIRECCIÓN ACADÉMICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍAS

Tesis:

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN HORNO AHORRADOR DE
ENERGÍA ECOLÓGICO”**

Presenta:

Johvany Méndez Martínez

Dirigida por:

Dr. Enrique Javier Martínez Delgado

DE. Víctor Manuel Velasco Gallardo

Dr. José Alonso Dena Aguilar

Pabellón de Arteaga, Ags., septiembre del 2026

AGRADECIMIENTOS

Esta Tesis representa el cierre de una importante etapa en mi vida, y su culminación no habría sido posible sin el apoyo incondicional de todas aquellas personas que han caminado a mi lado durante este trayecto.

Primeramente, agradezco profundamente a mis padres, quienes con su sacrificio, apoyo emocional, económico y espiritual hicieron posible el haber terminado mi carrera profesional. Su cariño y compromiso hacia mi educación contribuyó de manera significativa a ser una mejor persona tanto académica como socialmente.

También quiero agradecer profundamente a mi hermano, quien, con su apoyo incondicional, confianza y compromiso con mi educación me impulsó a seguir adelante. Su generosidad y disposición para ayudarme, especialmente en momentos en los que no contaba con los recursos necesarios para llevar a cabo diversas actividades relacionadas con mi trayectoria académica, fueron fundamentales para alcanzar esta meta.

A mis compañeros de carrera, tanto a quienes aún permanecen en mi vida como a aquellos con quienes los caminos se separaron, les agradezco por haber convertido esta experiencia en algo memorable. Juntos compartimos no solo conocimientos y proyectos, sino también risas, desveladas, frustraciones y victorias.

Asimismo, agradezco al DE. Víctor Manuel Velasco Gallardo y al Dr. Enrique Javier Martínez Delgado por su asesoría, confianza y por brindarme la oportunidad de participar en este proyecto. Su guía y experiencia fueron fundamentales para mi formación y para la culminación exitosa de este trabajo.

Extiendo también mi reconocimiento a todos los docentes que compartieron generosamente sus conocimientos y experiencias a lo largo de mi formación. Más allá de transmitir información, despertaron en mí la curiosidad por nuevas áreas del conocimiento, ampliaron mis horizontes intelectuales y me enseñaron a abordar los problemas con pensamiento crítico, creatividad y compromiso, valores que sin duda me acompañarán durante mi trayectoria profesional.

Finalmente, deseo expresar mi agradecimiento al Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga (ITPA) por brindarme la oportunidad de realizar mis residencias profesionales en sus instalaciones y por proporcionarme el entorno académico y tecnológico necesario para mi desarrollo profesional.

Pabellón de Arteaga, Ags.,

05/agosto/2026

M. en C. EDINGUER VÁZQUEZ AYALA
JEFE DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍAS

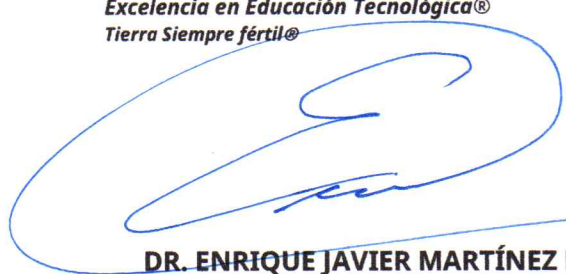
PRESENTE

Por medio del presente doy el visto bueno a la Tesis de Licenciatura titulada **"DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN HORNO AHORRADOR DE ENERGÍA ECOLÓGICO"** del estudiante **JOHVANY MÉNDEZ MARTÍNEZ** con numero de control 211050170 de la carrera de Ingeniería Mecatrónica. Dicho trabajo ya fue revisado por cada uno de los miembros del comité tutorial y el estudiante ya realizó los cambios sugeridos, por lo que autorizamos su impresión.

Sin otro particular, aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo, quedo de Usted.

ATENTAMENTE

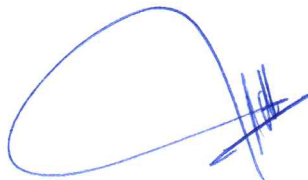
Excelencia en Educación Tecnológica®
Tierra Siempre fértil®



DR. ENRIQUE JAVIER MARTÍNEZ DELGADO
MIEMBRO DE COMITÉ TUTORIAL



DE. VÍCTOR MANUEL VELASCO GALLARDO
MIEMBRO DE COMITÉ TUTORIAL



DR. JOSÉ ALONSO DENA AGUILAR
MIEMBRO DE COMITÉ TUTORIAL

Pabellón de Arteaga, Ags.,

07/agosto/2026

JOHVANY MÉNDEZ MARTÍNEZ
ESTUDIANTE DE LA CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA
NO. DE CONTROL 211050170

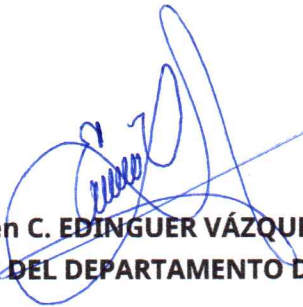
PRESENTE

Por medio de este conducto me permito comunicar a Usted que habiendo recibido los votos aprobatorios de los revisores de su trabajo de Tesis titulado: **"DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN HORNO AHORRADOR DE ENERGÍA ECOLÓGICO"**, hago de su conocimiento que puede imprimir dicho documento y continuar con los trámites para la presentación de su acto protocolario de titulación integral por Tesis.

Sin otro particular, aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo, quedo de Usted.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
Tierra Siempre fértil®



M. en C. EDINGUER VÁZQUEZ AYALA
JEFE DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍAS



RESUMEN

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN HORNO AHORRADOR DE ENERGÍA ECOLÓGICO”

Por: **JOHVANY MÉNDEZ MARTÍNEZ**

En la actualidad, la eficiencia energética constituye uno de los principales retos en los procesos térmicos empleados en aplicaciones domésticas e industriales, debido a las pérdidas de calor asociadas a un aislamiento deficiente y al uso inadecuado de los materiales. En este contexto, el presente trabajo tuvo como objetivo diseñar y construir un horno ahorrador de energía ecológico destinado a la cocción de alimentos mediante vapor, empleando materiales reciclados y aplicando criterios de transferencia de calor, aislamiento térmico y diseño mecánico asistido por computadora.

El prototipo desarrollado está constituido por un barril metálico reciclado de 200 litros, recubierto internamente con ladrillos refractarios y materiales provenientes de desechos de la industria de la construcción, con el propósito de reducir las pérdidas térmicas y favorecer una distribución más homogénea del calor. El diseño mecánico fue modelado mediante SolidWorks® y evaluado mediante análisis estructural y térmico. Los resultados de simulación mostraron un esfuerzo máximo de Von Mises de 49.78 MPa y un factor de seguridad cercano a 6, confirmando la estabilidad mecánica del sistema bajo las condiciones de operación consideradas.

Para validar experimentalmente el desempeño del horno, se realizaron pruebas de cocción de 70 mazorcas de maíz tierno-elote blanco (*Zea mays L.*) mediante vapor en dos condiciones: sin horno y utilizando el horno desarrollado. Los resultados mostraron que el tiempo de cocción se redujo de 1 hora con 40 minutos a 1 hora con 30 minutos, mientras que el consumo de gas disminuyó de 90 dm³ a 73 dm³, lo que representa una reducción aproximada del 18.9%. Asimismo, el horno alcanzó temperaturas internas cercanas a 250 °C, manteniendo condiciones adecuadas para la cocción y un mejor aprovechamiento del calor generado por la combustión.

Los resultados obtenidos demuestran que el horno propuesto constituye una alternativa viable para mejorar la eficiencia energética en procesos de cocción por vapor, aprovechando materiales de bajo costo y contribuyendo al desarrollo de soluciones tecnológicas con un enfoque sustentable.

Dirigido por:

Dr. Enrique Javier Martínez Delgado

DE. Víctor Manuel Velasco Gallardo

Dr. José Alonso Dena Aguilar

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.2 OBJETIVOS.....	2
1.2.1 Objetivo general.....	2
1.2.2 Objetivos específicos.....	3
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	3
1.4 HIPÓTESIS.....	4
1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES.....	4
II. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1 PRINCIPIOS DE LA COMBUSTIÓN.....	5
2.1.1 Combustión.....	5
2.1.2 Combustibles.....	6
2.1.3 Transferencia de calor.....	7
2.2 HORNOS.....	8
2.2.1 Horno de gas.....	8
2.2.2 Horno eléctrico.....	8
2.2.3 Horno de convección.....	9
2.3 DISEÑOS DE HORNOS.....	10
2.4 MANUFACTURA Y EFICIENCIA ENERGÉTICA DE UN HORNO DE COCCIÓN.....	11
2.5 MATERIALES REFRACTARIOS Y AISLANTES TÉRMICOS.....	12
2.5.1 Materiales refractarios.....	12
2.5.2 Materiales termoaislantes.....	13
2.6 CRITERIOS DE FALLA PARA MATERIALES DÚCTILES.....	14
III. METODOLOGÍA.....	16
3.1 DISEÑOS CONCEPTUAL Y MECÁNICO DEL HORNO.....	16
3.2 ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y TÉRMICO DEL HORNO.....	18
3.3 MANUFACTURA DEL HORNO.....	19
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	24
4.1 DISEÑO MECÁNICO DEL HORNO AHORRADOR DE ENERGÍA ECOLÓGICO.....	24

Ingeniería Mecatrónica
Diseño y Construcción de un Horno Ahorrador de Energía Ecológico

	Pág.
4.2 RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y TÉRMICO.....	29
4.3 CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO.....	31
4.3.1 Cámara de cocción.....	31
4.3.2 Tapa y chimenea.....	34
4.3.3 Plataforma de soporte portátil.....	37
4.3.4 Sistema de suministro de gas.....	37
4.3.5 Integración del sistema completo.....	40
4.4 EXPERIMENTACIÓN CON EL PROTOTIPO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	41
4.4.1 Etapa 1: Cocción convencional sin horno.....	42
4.4.2 Etapa 2: Cocción utilizando el horno ahorrador de energía ecológico.....	44
4.4.3 Comparación del desempeño térmico y energético.....	46
4.4 EXPERIMENTACIÓN CON EL PROTOTIPO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	41
V. CONCLUSIONES.....	48
VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	49
ANEXO 1. Pruebas experimentales bajo la configuración operativa de la Etapa 1 experimental [pruebas sin el uso del horno].....	53
ANEXO 2. Pruebas experimentales bajo la configuración operativa de la Etapa 2 experimental [pruebas con el uso del horno].....	55
ANEXO 3. Gráficos comparativos promedio de las pruebas experimentales bajo las configuraciones operativas de Etapa 1 vs Etapa 2 experimental.....	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Pág.
1 Triangulo de la combustión.....	5
2 Modos de transferencia de calor en un horno.....	7
3 Horno de gas de cocción.....	8
4 Horno eléctrico de cocción.....	9
5 Horno convector.....	10
6 Horno de tiro superior.....	11
7 Materiales refractarios diversos.....	13
8 Materiales termoaislantes.....	14
9 Dibujo técnico del horno ahorrador de energia ecológico de estudio.....	17
10 Formato de malla usando para los estudios.....	19
11 Ladrillos refractarios para el recubrimiento.....	22
12 Botes de mortero (izq.) y saco de marmolina (der.).....	22
13 Barril de 200 L (dentro de su empaque).....	23
14 Medidor de consumo de gas empleado.....	23
15 Cámara de cocción recubierto de material refractario: estructura general del cuerpo del horno....	24
16 Chimenea incorporada a la puerta del horno.....	25
17 Medidor de gas empelado empotrado en su base de soporte.....	25
18 Diseño mecánico completo del horno ahorrador de energía ecológico.....	26
19 Vista explosionada del diseño mecánico del horno.....	27
20 Sistema de suministro de energía al horno por gas LP.....	28
21 Quemador de gas.....	28
22 Análisis estructural FEA usando el criterio de Von Mises.....	29
23 Análisis térmico FEA del cuerpo del horno como un conjunto.....	30
24 Cámara de cocción con el recubrimiento refractario en sus paredes.....	32
25 Ensamble de ladrillos refractarios para la base de la cámara de cocción.....	32
26 Vista interna de la cámara de cocción recubierta con el material refractario.....	33
27 Elemento de sujeción (agarradera) e integración del quemador de gas en la carcasa cilíndrica....	33
28 Proceso de fabricación de recubriendo refractario en la tapa.....	34
29 Ensamble de cubierta refractaria en la tapa.....	35
30 Acabado final del interior refractario de la tapa.....	35
31 Vista superior de la tapa y chimenea.....	36
32 Vista completa de la tapa y chimenea del horno.....	36

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Horno Ahorrador de Energía Ecológico

Figura	Pág.
33	Plataforma de soporte portátil para el desplazamiento del horno..... 37
34	Medidor empotrado en una base metálica..... 38
35	Vista del soplete funcionado dentro de la cámara de cocción..... 38
36	Vista completa del sistema de suministro de energía por gas LP..... 39
37	Utensilios de comida para la puesta en operación del horno: estructura de soporte para la vaporera (izq.) y vaporera para la cocción (der.)..... 39
38	Vista completa del horno ahorrador de energía ecológico..... 41
39	Biomasa de prueba..... 42
40	Puesta de equipamiento para la experimentación de la Etapa 1..... 43
41	Sistema puesto en el interior del horno: vista de la biomasa dentro de la vaporera (izq.) y vaporera sellada (der.)..... 45
A1	Pesaje inicial de biomasa de prueba + vaporera de una prueba de Etapa 1..... 53
A2	Peso (kg) del sistema (vaporera + biomasa + agua) inicial (izq.) y final (der.) de una prueba de Etapa 1..... 53
A3	Flujo (dm^3) de consumo de gas LP inicial (izq.) y final (der.) de una prueba de Etapa 1..... 54
A4	Registro de la temperatura final interna de la vaporera en una prueba de Etapa 1..... 54
A5	Registro de la temperatura final en el interior del horno (T1) [lectura superior] y en el interior de la vaporera (T4) [lectura inferior] en una prueba de Etapa 2..... 55
A6	Peso (kg) del sistema (vaporera + biomasa + agua) inicial (izq.) y final (der.) de una prueba de Etapa 2..... 55
A7	Flujo (dm^3) de consumo de gas LP inicial (izq.) y final (der.) de una prueba de Etapa 2..... 56
A8	Comparativo del peso del sistema inicial y final en cada etapa..... 57
A9	Comparativo de la temperatura inicial y final en el interior de la vaporera en cada etapa..... 57
A10	Comparativo del consumo de combustible (gas LP) en cada etapa..... 58
A11	Comparativo del comportamiento térmico en el interior de la vaporera en cada etapa..... 58

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Pág.
1 Clasificación de combustibles industriales.....	6
2 Clasificación y Aplicaciones de Materiales Refractarios Industriales.....	13
3 Listado de acabado de materiales empleados en los diseños elaborados en SolidWorks®	17
4 Propiedades de los materiales para el análisis estructural FEA.....	18
5 Propiedades de los materiales para el análisis térmico FEA.....	18
6 Lista de materiales y relación de costos de manufactura del horno.....	21
7 Resultados experimentales promedio bajo la configuración operativa de la Etapa 1.....	43
8 Resultados promedio comparativos (inicial y final de cada ensayo) bajo la configuración operativa de la Etapa 1.....	44
9 Resultados experimentales promedio bajo la configuración operativa de la Etapa 2.....	45
10 Resultados promedio comparativos (inicial y final de cada ensayo) bajo la configuración operativa de la Etapa 2.....	46
11 Comparación promedio de los ensayos realizados bajo ambas configuraciones experimentales	47

I. INTRODUCCIÓN

Para garantizar el correcto funcionamiento de un horno, es indispensable que los materiales empleados en su construcción presenten una elevada resistencia a altas temperaturas, con el fin de evitar deformaciones, fisuras o procesos de fusión durante su operación. Por esta razón, se emplean comúnmente materiales refractarios y termoaislantes, tales como ladrillos refractarios y fibras cerámicas, los cuales poseen propiedades que les permiten soportar condiciones térmicas severas y reducir las pérdidas de calor hacia el exterior del sistema. Desde el punto de vista termodinámico, los procesos de cocción que emplean combustibles fósiles presentan pérdidas energéticas asociadas a la transferencia de calor hacia el ambiente y a la baja capacidad de aislamiento térmico de los materiales estructurales. En hornos fabricados con materiales metálicos, la alta conductividad térmica favorece la disipación de calor por conducción y convección, disminuyendo la eficiencia del proceso y aumentando el consumo de combustible. Por ello, la incorporación de materiales refractarios y el aprovechamiento adecuado de los gases de combustión constituyen estrategias fundamentales para mejorar el desempeño térmico de estos sistemas. En el diseño de hornos que operan mediante combustión a gas, es necesario considerar aspectos relacionados con la geometría de la cámara de combustión, la ubicación de los quemadores y la circulación de los gases calientes, con el propósito de garantizar una transferencia de calor eficiente y una distribución homogénea de la temperatura. Asimismo, la selección adecuada de materiales y la incorporación de sistemas de aislamiento térmico permiten reducir el consumo energético y mejorar las condiciones de operación del equipo.

En este contexto, el presente trabajo desarrolla el diseño y la construcción de un horno ahorrador de energía ecológico empleando materiales reciclados y de bajo costo. Los diseños mecánicos fueron desarrollados mediante el software SolidWorks®, herramienta que también se utilizó para realizar el análisis estructural y térmico del sistema, con el propósito de verificar su estabilidad mecánica y su comportamiento térmico antes de la fabricación del prototipo. Posteriormente, el horno fue construido y evaluado experimentalmente mediante pruebas de cocción de alimentos, comparando su desempeño con respecto a un sistema convencional.

Además de contribuir al desarrollo de una alternativa tecnológica orientada a la eficiencia energética y al aprovechamiento de materiales reciclados, este proyecto permitió la aplicación práctica de conocimientos de diseño mecánico, análisis estructural, transferencia de calor y manufactura, consolidando competencias profesionales relacionadas con la solución de problemas de ingeniería y el desarrollo de tecnologías con enfoque sustentable.

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Diversos estudios han demostrado que las pérdidas energéticas en hornos dependen significativamente de las propiedades termoaislantes de las paredes y del modo de operación, por lo que la selección adecuada de materiales y el diseño del aislamiento constituyen factores clave para mejorar la eficiencia energética [1]. Adicionalmente, se observa que muchos de estos equipos no han sido diseñados considerando un análisis detallado de los mecanismos

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Horno Ahorrador de Energía Ecológico

de transferencia de calor por conducción, convección y radiación, lo que ocasiona tiempos prolongados para alcanzar la temperatura de operación y una distribución no uniforme de la temperatura en el interior del horno. Estas deficiencias reducen la confiabilidad y repetitividad de los procesos térmicos, características fundamentales en aplicaciones académicas y de investigación. Investigaciones recientes han reportado que la evaluación de los mecanismos de transferencia de calor y el análisis térmico de hornos permiten identificar las principales fuentes de pérdidas energéticas y optimizar la distribución de temperatura, contribuyendo a mejorar el desempeño global del sistema [2]. Otro aspecto relevante es la ausencia de modelos tridimensionales y documentación técnica que permitan comprender, analizar y optimizar el funcionamiento de estos sistemas. La falta de un diseño mecánico estructurado mediante herramientas de diseño asistido por computadora (CAD), como SolidWorks®, limita la posibilidad de realizar análisis térmicos y estructurales previos a la fabricación, dificultando la selección adecuada de materiales aislantes y estructurales que contribuyan al ahorro energético y a la sustentabilidad del proyecto. Asimismo, el empleo de herramientas de diseño asistido por computadora y simulación numérica facilita la evaluación previa del comportamiento térmico y estructural de los hornos, permitiendo reducir costos de fabricación y optimizar el diseño antes de la construcción del prototipo [3].

Por lo anterior, se identifica la necesidad de desarrollar un horno ahorrador de energía ecológico que integre criterios de diseño térmico y estructural, empleando materiales reciclados y herramientas de modelado y simulación que permitan evaluar su desempeño antes de su construcción. Asimismo, resulta indispensable contar con un prototipo funcional que permita validar experimentalmente el comportamiento térmico y el consumo energético del sistema, con el propósito de determinar su viabilidad técnica y su potencial para contribuir al ahorro energético y a la implementación de tecnologías sustentables en el ámbito académico.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general

Diseñar y construir un horno ahorrador de energía ecológico mediante herramientas de diseño asistido por computadora, aplicando principios de transferencia de calor, análisis estructural y selección adecuada de materiales, con el propósito de mejorar la eficiencia energética y contribuir al desarrollo de soluciones tecnológicas sustentables para aplicaciones académicas y de investigación.

1.2.2 Objetivos específicos

- Analizar los principios de transferencia de calor y los fenómenos térmicos involucrados en el funcionamiento de hornos de cocción que emplean combustión a gas.
- Diseñar el modelo mecánico tridimensional del horno ahorrador de energía ecológico utilizando SolidWorks®, considerando la geometría, los materiales y los ensambles requeridos para su fabricación.

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Horno Ahorrador de Energía Ecológico

- Realizar el análisis estructural y térmico del modelo mediante SolidWorks®, con el fin de evaluar su comportamiento mecánico y térmico bajo las condiciones de operación establecidas.
- Seleccionar materiales estructurales y aislantes que favorezcan la eficiencia térmica, la seguridad de operación y la sustentabilidad del sistema.
- Construir un prototipo funcional del horno ahorrador de energía conforme al diseño propuesto.
- Validar experimentalmente el desempeño del prototipo mediante pruebas de operación, evaluando parámetros como la temperatura alcanzada, el tiempo de cocción y el consumo energético del sistema.

1.3 JUSTIFICACIÓN

En la actualidad, el uso de hornos convencionales representa un alto consumo energético, lo cual genera un impacto negativo tanto económico como ambiental debido al uso ineficiente de la energía y a la emisión indirecta de contaminantes asociados a su operación. Ante la creciente necesidad de implementar soluciones sustentables, surge la importancia de desarrollar dispositivos que optimicen el aprovechamiento energético, reduzcan las pérdidas de calor y empleen materiales con menor impacto ambiental. Diversos estudios han señalado que los procesos térmicos constituyen una de las principales fuentes de consumo energético en la industria y que la mejora en la eficiencia de los hornos puede contribuir significativamente a la reducción del consumo de energía y de las emisiones asociadas [3]. Desde el punto de vista operativo, el diseño de un horno ecológico contribuye a la disminución del consumo energético, lo que se traduce en ahorros económicos a mediano y largo plazo, así como en una reducción del impacto ambiental derivado del uso de combustibles. Asimismo, la implementación de estrategias orientadas al aprovechamiento del calor y a la reducción de pérdidas térmicas constituye una de las alternativas más prometedoras para incrementar la eficiencia energética de los procesos térmicos, permitiendo un uso más racional de la energía disponible [4].

Adicionalmente, al incorporar criterios de eficiencia térmica y una adecuada selección de materiales, se mejora el aprovechamiento del calor generado, permitiendo alcanzar las temperaturas requeridas en menor tiempo e incrementando la productividad y disponibilidad del equipo para prácticas, pruebas o procesos internos. Esto representa una mejora directa en la eficiencia de los procesos donde se requiera el uso del horno, reduciendo tiempos muertos y optimizando la operación general. De igual manera, el empleo de herramientas de diseño asistido por computadora y simulación térmica facilita la evaluación del comportamiento del sistema antes de su fabricación, permitiendo optimizar el diseño y disminuir las pérdidas energéticas asociadas a la operación del horno [3]. Por otra parte, la construcción de un horno ahorrador de energía ecológico utilizando materiales reciclados representa una alternativa tecnológica viable y sustentable, ya que promueve el aprovechamiento de recursos disponibles y fomenta el desarrollo de soluciones de ingeniería orientadas al ahorro energético y la protección del medio ambiente.

1.4 HIPÓTESIS

Si se diseña y construye un horno ahorrador de energía ecológico empleando herramientas CAD/CAE, materiales con propiedades termoaislantes adecuadas y criterios de transferencia de calor, entonces será posible reducir el consumo energético y el tiempo de cocción respecto a un sistema convencional, sin afectar las condiciones térmicas requeridas para la cocción de alimentos por vapor.

1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES

Como alcance se tiene que:

- El proyecto se limita al desarrollo de un prototipo funcional de horno ahorrador de energía ecológico, cuya validación se realizó mediante pruebas de cocción por vapor, evaluando el tiempo de cocción y el consumo de gas de combustión.

Como limitaciones se cita:

- Las pruebas experimentales se realizaron bajo un diseño experimental exploratorio y únicamente utilizando mazorcas de elote como producto de evaluación.
- El proyecto no contempla actividades de reingeniería ni procesos de optimización posteriores al diseño y construcción del prototipo.

II. MARCO TEÓRICO

2.1 PRINCIPIOS DE LA COMBUSTIÓN

2.1.1 Combustión

La combustión es una reacción química exotérmica en la que un combustible reacciona con un agente oxidante, generalmente oxígeno, formando nuevos compuestos y liberando energía en forma de calor y, en algunos casos, luz. Dependiendo de la cantidad de oxígeno disponible y de las condiciones de operación, la combustión puede clasificarse como completa, incompleta o estequiométrica. La combustión completa ocurre cuando todos los componentes del combustible se oxidan totalmente, generando principalmente CO_2 y H_2O , mientras que la combustión incompleta se presenta cuando el oxígeno es insuficiente, produciendo compuestos como monóxido de carbono (CO), hidrógeno (H_2) y partículas de carbono, lo que disminuye la eficiencia energética e incrementa las emisiones contaminantes. Por su parte, la combustión estequiométrica corresponde a una combustión completa realizada con la cantidad exacta de oxígeno necesaria para oxidar completamente el combustible. Asimismo, la combustión se distingue de otros procesos de oxidación por la velocidad con la que ocurre y por la presencia de una llama estable durante la reacción. Para que este fenómeno tenga lugar, es necesaria la presencia simultánea de un combustible, un comburente y una fuente de energía de activación, elementos que conforman el denominado triángulo de la combustión, mostrado en la Figura 1 [5].

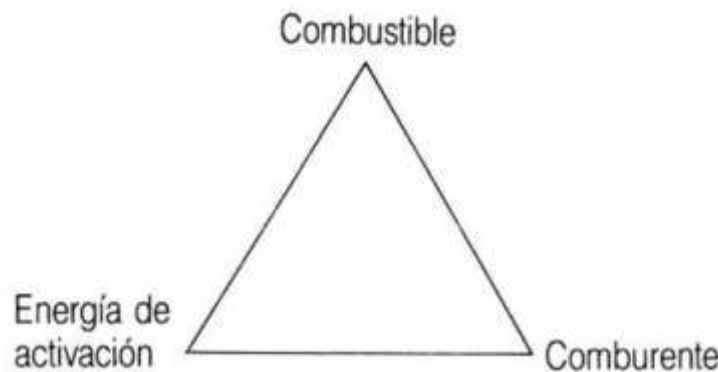


Figura 1. Triángulo de la combustión [5].

El aprovechamiento eficiente de la energía en los procesos térmicos depende en gran medida de que la combustión se realice bajo condiciones adecuadas, particularmente mediante una proporción equilibrada entre el combustible y el comburente. Cuando estas condiciones no se cumplen, se produce un desperdicio energético que se traduce en pérdidas económicas y en un incremento de la contaminación ambiental. Por el contrario, una

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Horno Ahorrador de Energía Ecológico

combustión eficiente se caracteriza por la generación constante de calor y por la mínima presencia de residuos visibles, como humo u hollín, lo que favorece un mejor desempeño energético del sistema [6].

2.1.2 Combustibles

Los combustibles empleados en el ámbito industrial están constituidos principalmente por mezclas de un número reducido de elementos químicos y pueden clasificarse de acuerdo con distintos criterios. Según su grado de procesamiento, se dividen en naturales, cuando se utilizan directamente en su estado original, y elaborados o manufacturados, cuando requieren tratamientos físicos o químicos previos para su aprovechamiento. Asimismo, pueden clasificarse de acuerdo con su estado físico en sólidos, líquidos y gaseosos [5]. En la Tabla 1, se presenta la clasificación de los combustibles utilizados a nivel industrial. Los combustibles sólidos se caracterizan por su bajo costo y amplia disponibilidad; sin embargo, su utilización implica mayores requerimientos de limpieza y mantenimiento debido a la acumulación de residuos como cenizas y escoria, además de generar un mayor impacto ambiental. Entre los principales combustibles sólidos se encuentran la leña, el carbón vegetal y el carbón mineral [6]. Por otra parte, los combustibles líquidos han sustituido en gran medida a los sólidos debido a sus ventajas operativas y energéticas. Estos presentan mayor facilidad para su transporte y almacenamiento, así como un mejor rendimiento térmico y una combustión más eficiente, contribuyendo a una menor emisión de contaminantes [6], [7]. Finalmente, los combustibles gaseosos representan una de las alternativas más eficientes, ya que se mezclan de manera más homogénea con el oxígeno del aire, favoreciendo una combustión más completa y un mayor aprovechamiento de la energía liberada. Entre los combustibles gaseosos más utilizados se encuentran el gas natural y el gas licuado de petróleo (GLP), ampliamente empleados en procesos térmicos y sistemas de cocción debido a su facilidad de manejo y elevado poder calorífico [6].

Tabla 1. Clasificación de combustibles industriales [5].

ESTADO	TIPO	DESCRIPCIÓN
Sólidos	Naturales	Maderas y residuos vegetales
		Carbón (turbas, hullas, antracita)
	Artificiales	Coque (carbón y petróleo)
		Aglomerados y briquetas
		Carbón vegetal.
Líquidos	Alcoholes	Naturales (fermentación, hidrólisis)
		Artificiales
	Residuales	Lejías negras
	Derivados del petróleo	Gasóleos
		Fuelóleos
Gaseosos	Residuales	Fuel Gas
	Gas natural	Diferentes familias
	Gases licuados del petróleo (GLP)	Propanos y butanos
	Artificiales o elaborados	De alto horno, coque, pobre, de agua, Ciudad
	Biogás	

2.1.3 Transferencia de calor

La transferencia de calor puede definirse como el proceso mediante el cual la energía térmica se desplaza de un cuerpo a otro, o entre diferentes regiones de un mismo cuerpo, como consecuencia de una diferencia de temperatura. Este fenómeno ocurre de manera natural siempre que exista un gradiente térmico, ya que el calor tiende a fluir desde la zona con mayor temperatura hacia la de menor temperatura hasta alcanzar el equilibrio térmico [8]. Los mecanismos mediante los cuales se produce este intercambio de energía se conocen como modos de transferencia de calor. Uno de ellos es la conducción, que ocurre cuando el calor se transfiere a través de un medio estacionario, ya sea sólido o fluido, debido a la interacción entre sus partículas. Otro mecanismo es la convección, la cual se presenta cuando el calor se transfiere entre una superficie y un fluido en movimiento que se encuentran a diferentes temperaturas, siendo el movimiento del fluido el responsable del transporte de la energía térmica, como se muestra en la Figura 2 [8], [6]. En los hornos, la transferencia de calor influye directamente en la eficiencia energética y en la integridad estructural del sistema. Las elevadas temperaturas y los ciclos térmicos pueden provocar deformaciones o deterioro de los materiales de construcción, por lo que es indispensable seleccionar materiales con adecuada resistencia térmica y considerar elementos estructurales que permitan absorber las variaciones dimensionales ocasionadas por los cambios de temperatura [9].

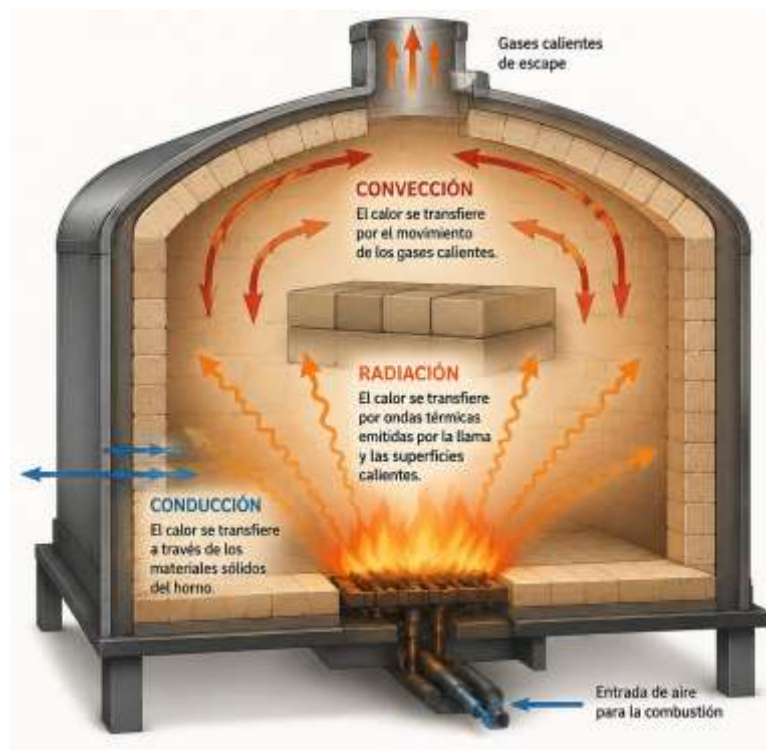


Figura 2. Modos de transferencia de calor en un horno.
Fuente: propia mediante ChatGPT (OpenAI, 2026).

2.2 HORNOS

Un horno es un equipo térmico diseñado para generar y mantener calor dentro de una cámara cerrada con el propósito de realizar procesos de cocción, secado, tratamiento térmico o calentamiento de materiales. Su funcionamiento se basa en la transferencia de calor hacia el producto mediante mecanismos de conducción, convección y radiación, permitiendo una distribución controlada de la temperatura en su interior. El horno desarrollado en este trabajo corresponde a un sistema de combustión a gas diseñado bajo criterios de eficiencia energética y aprovechamiento térmico, incorporando elementos de aislamiento y una configuración orientada a reducir las pérdidas de calor durante la cocción por vapor. Los hornos pueden clasificarse de acuerdo con la fuente de energía empleada para generar calor, siendo los más comunes los hornos de gas, eléctricos, de convección y solares [10].

2.2.1 Horno de gas

El horno de gas es uno de los equipos de cocción más utilizados debido a su facilidad de operación y a la rapidez con la que alcanza la temperatura de trabajo. En este tipo de horno, el calor se genera mediante la combustión de un gas combustible y se transmite hacia los alimentos principalmente por convección y radiación. Para obtener resultados adecuados es necesario realizar un precalentamiento y mantener un control de la temperatura durante la cocción, ya que una exposición excesiva al calor puede alterar las características del producto. En la Figura 3, se presenta una vista de un horno de gas convencional.



Figura 3. Horno de gas de cocción [10].

2.2.2 Horno eléctrico

El horno eléctrico genera calor mediante resistencias eléctricas ubicadas en el interior de la cámara de cocción. La transferencia de calor ocurre principalmente por radiación y convección natural, permitiendo realizar procesos de

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Horno Ahorrador de Energía Ecológico

cocción y asado con un control preciso de la temperatura. Este tipo de horno se caracteriza por su facilidad de operación, limpieza y estabilidad térmica, por lo que es ampliamente utilizado en aplicaciones domésticas y de laboratorio. En la Figura 4, se observa un horno eléctrico industrial.



Figura 4. Horno eléctrico de cocción [10].

2.2.3 Horno de convección

El horno de convección incorpora un sistema de circulación forzada de aire caliente que permite distribuir el calor de manera uniforme alrededor de los alimentos. Gracias a este mecanismo, es posible reducir los tiempos de cocción y mejorar la uniformidad térmica en comparación con los hornos convencionales que operan principalmente por radiación. La mayoría de los hornos de convección ofrecen funciones complementarias, como la cocción al vapor o la combinación de vapor y aire seco, ampliando las posibilidades técnicas en la preparación de alimentos. Algunos modelos incorporan una sonda térmica que permite controlar la temperatura interna del producto, asegurando que el núcleo alcance el nivel previamente programado. Entre sus componentes principales se encuentran un ventilador encargado de distribuir el calor y reducir la concentración de olores, un temporizador digital que interrumpe el funcionamiento al cumplirse el tiempo establecido, la sonda de temperatura y controles que regulan el tipo de calor aplicado, ya sea seco, húmedo o mixto. En la Figura 5, se observa un horno convector comercial.



Figura 5. Horno convector [11].

2.3 DISEÑOS DE HORNOS

El diseño de un horno requiere considerar tanto los aspectos térmicos como los estructurales, con el propósito de garantizar un funcionamiento eficiente y seguro. Los materiales empleados en su construcción deben presentar una elevada resistencia a las altas temperaturas, evitando deformaciones, fisuras o procesos de fusión. Por esta razón, es común utilizar ladrillos refractarios y fibra cerámica, materiales que poseen baja conductividad térmica y alta estabilidad ante ciclos de calentamiento y enfriamiento. Asimismo, es importante evitar la presencia de humedad en el interior del horno, ya que esta puede afectar su desempeño térmico y provocar un uso ineficiente del combustible. Como medida preventiva, se recomienda incorporar conductos o espacios que favorezcan la circulación del aire y la evacuación del vapor de agua generado durante la operación. La transferencia de calor a través de las paredes del horno ocurre principalmente mediante convección y conducción. La convección tiene lugar cuando los gases calientes transfieren energía térmica a las superficies internas, mientras que la conducción se produce a través de los materiales refractarios y aislantes, permitiendo la propagación del calor hacia el exterior [6].

En el diseño de hornos a gas deben considerarse diversos criterios relacionados con la geometría, la combustión y la evacuación de gases. Para lo anterior, es recomendable emplear configuraciones rectangulares o cilíndricas, disponer de quemadores con espacio suficiente para el desarrollo de la combustión, garantizar una adecuada mezcla entre el combustible y el aire, así como diseñar conductos y chimeneas con dimensiones apropiadas que permitan la evacuación eficiente de los gases de combustión. En los hornos de tiro superior, la chimenea debe poseer una altura mínima aproximada de dos metros y una sección transversal equivalente a la del conducto de evacuación [7]. En la Figura 6, se presenta un esquema de un horno de tiro superior.

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Horno Ahorrador de Energía Ecológico

Por ello, la selección adecuada de materiales resulta fundamental para reducir las pérdidas térmicas y mejorar la eficiencia energética del sistema. La selección de materiales debe priorizar la resistencia al choque térmico y la minimización de las pérdidas de calor por conducción. El núcleo de la cámara de cocción suele construirse con ladrillo refractario unido mediante mortero refractario, garantizando la estanqueidad y la acumulación de calor. La estructura externa puede fabricarse con acero al carbono o acero inoxidable, materiales que proporcionan soporte mecánico y protección al sistema. Asimismo, la evacuación de los gases de combustión se realiza mediante chimeneas metálicas diseñadas para favorecer el flujo natural y evitar el retorno de gases hacia la cámara de cocción. Finalmente, se emplean materiales aislantes, como la lana mineral o la fibra cerámica, para disminuir la transferencia de calor hacia el exterior y mantener temperaturas superficiales seguras [12], [13].

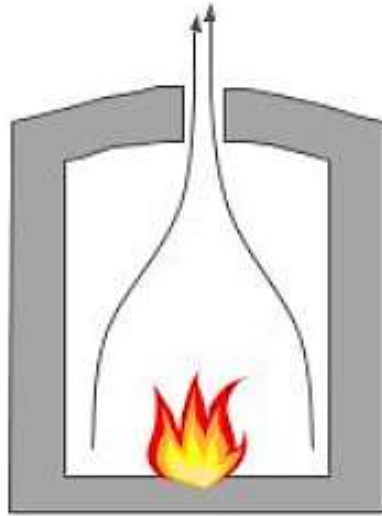


Figura 6. Horno de tiro superior [14].

2.4 MANUFACTURA Y EFICIENCIA ENERGÉTICA DE UN HORNO DE COCCIÓN

La manufactura de un horno, ya sea para aplicaciones domésticas o industriales, constituye un proceso de ingeniería interdisciplinario que integra principios de termodinámica, transferencia de calor, ciencia de materiales y diseño estructural. El objetivo principal es desarrollar un sistema capaz de generar, contener y transferir calor de manera eficiente hacia una carga específica, minimizando las pérdidas térmicas y optimizando el rendimiento energético [15]. El proceso de manufactura inicia con la preparación y conformación de los componentes que integran el horno, los cuales son elaborados mediante operaciones de corte, conformado, maquinado y unión. Posteriormente, estos elementos son ensamblados de acuerdo con las especificaciones de diseño, asegurando la correcta integración de las partes involucradas en la generación, contención y transferencia de calor. Esta etapa es fundamental, ya que una integración inadecuada puede afectar el desempeño térmico y la seguridad del sistema [16]. Una vez ensamblada la estructura, se procede a la instalación de los sistemas operativos encargados de la generación de calor, el control y la regulación del proceso. Asimismo, se verifica la hermeticidad del sistema con el propósito de

evitar fugas de energía o de fluidos de trabajo que puedan comprometer la eficiencia o representar un riesgo durante la operación. Posteriormente, se realizan pruebas de funcionamiento para evaluar el comportamiento del horno bajo condiciones reales o simuladas de operación, verificando aspectos como la estabilidad térmica, la distribución de temperatura, el consumo energético y el correcto desempeño de los sistemas de control [17].

En la actualidad, además del funcionamiento y la seguridad, la eficiencia energética constituye uno de los principales criterios en el diseño y fabricación de hornos. En México, la norma NOM-010-SESH-2012 establece requisitos relacionados con la seguridad y el funcionamiento de equipos que emplean combustibles gaseosos. Asimismo, durante la evaluación del equipo es común realizar pruebas orientadas a verificar la distribución térmica, el consumo energético, la seguridad de operación y el control de emisiones contaminantes, con el fin de garantizar un desempeño eficiente y seguro [18]. Finalmente, el proceso de manufactura concluye con las etapas de inspección y control de calidad, en las cuales se comprueba que el horno cumple con los requisitos técnicos establecidos. Estas actividades incluyen inspecciones visuales, pruebas operativas y validaciones de seguridad, asegurando que el equipo fabricado sea apto para su uso previsto y cumpla con los estándares de funcionamiento, eficiencia y seguridad requeridos [16].

En conjunto, la manufactura de un horno constituye un proceso sistemático que permite obtener equipos con un desempeño térmico adecuado y un aprovechamiento eficiente de la energía.

2.5 MATERIALES REFRACTARIOS Y AISLANTES TÉRMICOS

2.5.1 Materiales refractarios

Los materiales refractarios son compuestos inorgánicos no metálicos capaces de soportar temperaturas superiores a 538 °C sin presentar alteraciones significativas en sus propiedades físicas o químicas [19]. Estos materiales, mostrados en la Figura 7, se caracterizan por ser químicamente estables y poseer elevados puntos de fusión, debido a la fuerte interacción de sus enlaces iónicos y covalentes. Sin embargo, a temperatura ambiente presentan un comportamiento frágil y una limitada resistencia a esfuerzos de tensión [20], [21]. Los materiales refractarios son ampliamente utilizados como recubrimientos internos de hornos, reactores y equipos sometidos a altas temperaturas, especialmente en las industrias siderúrgica, metalúrgica, cerámica, del vidrio y petroquímica [22]. Su estructura policristalina y su microestructura influyen directamente en sus propiedades físicas y mecánicas, determinando su capacidad para resistir choques térmicos, ataques químicos y esfuerzos mecánicos durante la operación [21], [23]. Debido a estas características, los ladrillos refractarios constituyen uno de los materiales más empleados en la construcción de cámaras de combustión y hornos, ya que permiten almacenar calor y mantener la estabilidad térmica del sistema (ver Tabla 2).

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Horno Ahorrador de Energía Ecológico



Figura 7. Materiales refractarios diversos [25].

Tabla 2. Clasificación y Aplicaciones de Materiales Refractarios Industriales [12], [13], [24].

CLASIFICACIÓN	MATERIAL REFRACTARIO	DESCRIPCIÓN
Ladrillos refractarios	Ladrillos de Alúmina-Sílice	Dependiendo del porcentaje de Alúmina, se clasifican en arcilla refractaria (baja alúmina) o de alta alúmina. Son resistentes al choque térmico y a ambientes ácidos.
	Ladrillos de Magnesia	Utilizados principalmente en la industria del acero (hornos de arco eléctrico). Tienen un carácter básico y resisten muy bien la corrosión por escorias básicas.
	Ladrillos de Sílice	Ideales para las bóvedas de hornos de vidrio debido a su excelente resistencia a la carga a altas temperaturas y su expansión térmica predecible.
Refractarios Monolíticos (No conformados)	Hormigones (Castables)	Mezclas de agregados refractarios y un aglomerante. Se vierten en moldes como el concreto convencional.
	Masas de Pisado (Ramming Mixes)	Materiales granulares que se compactan mediante fuerza neumática o manual. Se usan mucho en los fondos de los hornos de inducción.
	Cementos y Morteros	Productos de grano fino que se utilizan para unir los ladrillos refractarios, asegurando que las juntas sean tan resistentes al calor como el bloque mismo.
Aislante	Fibra Cerámica Alfarera	Material ligero con muy baja conductividad térmica. Se presenta en mantas o módulos. Es ideal para hornos intermitentes que necesitan calentar y enfriar rápido.
	Ladrillos Aislantes	Son porosos y ligeros. Se colocan detrás de la cara "caliente" (los ladrillos densos) para proteger la estructura externa del horno.

2.5.2 Materiales termoaislantes

Los materiales termoaislantes se emplean para reducir las pérdidas de calor hacia el exterior del horno, mejorando la eficiencia térmica y disminuyendo el consumo energético. Entre los materiales más utilizados se encuentran los polvos de relleno, la lana de escoria, la lana de vidrio y la fibra cerámica (ver Tabla 2), algunos de los cuales se muestran en la Figura 8.

El uso de estos materiales resulta altamente favorable debido a sus propiedades, entre las que destacan su baja conductividad térmica, baja densidad, peso reducido y elevada resistencia a los cambios bruscos de temperatura.

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Horno Ahorrador de Energía Ecológico

Además, algunos materiales aislantes presentan una alta capacidad para reflejar la radiación térmica, lo que contribuye a conservar el calor en el interior del horno y a mantener temperaturas superficiales seguras en la estructura externa. En el diseño de hornos modernos, la combinación de materiales refractarios y termoaislantes permite incrementar la eficiencia energética del sistema, ya que los primeros proporcionan resistencia mecánica y estabilidad térmica, mientras que los segundos minimizan las pérdidas de calor y mejoran el aprovechamiento de la energía generada durante la combustión [21], [23].



Figura 8. Materiales termoaislantes [26].

2.6 CRITERIOS DE FALLA PARA MATERIALES DÚCTILES

El análisis estructural de componentes mecánicos requiere el empleo de criterios que permitan predecir el comportamiento de los materiales sometidos a estados complejos de esfuerzo. En materiales dúctiles, la falla no se asocia necesariamente con la fractura del elemento, sino con el inicio de la fluencia o deformación plástica permanente, la cual ocurre cuando los esfuerzos internos alcanzan el límite elástico del material [27].

Las teorías de falla permiten relacionar los resultados obtenidos en ensayos de tensión uniaxial con los estados multiaxiales de esfuerzo presentes en componentes reales. Entre los criterios más utilizados para materiales dúctiles destacan la teoría del esfuerzo cortante máximo, propuesta por Henri Tresca, y la teoría de la energía de distorsión, conocida como criterio de Von Mises [28].

El criterio de Tresca establece que la fluencia inicia cuando el esfuerzo cortante máximo alcanza el mismo valor obtenido en una prueba de tensión simple. Debido a su naturaleza conservadora, este criterio suele conducir a

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Horno Ahorrador de Energía Ecológico

diseños con mayores márgenes de seguridad, aunque puede subestimar la capacidad real del material bajo ciertas condiciones de carga [29].

Por otra parte, el criterio de Von Mises considera que la falla se produce cuando la energía de distorsión alcanza un valor crítico asociado al límite elástico del material. Este criterio ha demostrado un mejor ajuste a los resultados experimentales y, por ello, constituye el estándar empleado en la mayoría de los programas de análisis por elemento finito (FEA), incluyendo SolidWorks® Simulation [28], [29], [30].

En la presente investigación, el análisis estructural del horno se realizó mediante SolidWorks® Simulation, empleando el criterio de Von Mises para evaluar la distribución de esfuerzos y verificar que los componentes diseñados operen dentro del rango elástico del material seleccionado. Este enfoque permite identificar zonas críticas y validar la integridad estructural del prototipo antes de su fabricación

III. METODOLOGÍA

3.1 DISEÑOS CONCEPTUAL Y MECÁNICO DEL HORNO

Para la elaboración de los diseños mecánicos CAD-3D del horno ahorrador de energía ecológico, se empleó el software SolidWorks® para definir las dimensiones, componentes y funcionamiento del sistema. El diseño se estableció bajo una geometría cilíndrica ($\varnothing 57 \text{ cm} \times 87.2 \text{ cm}$) considerando los siguientes componentes principales:

- **Carcasa cilíndrica:** Estructura principal del horno encargada de contener los componentes internos y proporcionar soporte mecánico al sistema. Su forma cilíndrica favorece una distribución uniforme del calor y facilita el aprovechamiento del espacio interno.
- **Tapa:** Elemento superior desmontable que permite el acceso a la cámara de cocción para la introducción y extracción de la carga. Asimismo, contribuye a minimizar las pérdidas de calor durante la operación.
- **Chimenea:** Conducto encargado de evacuar los gases generados durante la combustión y favorecer el tiro natural del sistema, contribuyendo a una combustión más eficiente y segura.
- **Cámara de cocción:** Espacio interno destinado a alojar la vaporera y los alimentos a procesar, donde se aprovecha el calor generado por la combustión para realizar la cocción por vapor.
- **Plataforma de soporte portátil:** Estructura que sostiene el horno y sus accesorios, proporcionando estabilidad mecánica y facilitando el transporte y la movilidad del prototipo.
- **Revestimiento refractario:** Capa de material refractario instalada en las superficies internas del horno y la tapa con la finalidad de resistir altas temperaturas, almacenar energía térmica y reducir las pérdidas de calor hacia el exterior.
- **Medidor de consumo de gas:** Instrumento utilizado para monitorear el suministro y consumo de gas durante la operación del horno, instalado sobre una estructura que garantiza su estabilidad y facilidad de lectura.
- **Quemador de gas:** Dispositivo encargado de mezclar el combustible con el aire y generar la llama necesaria para el proceso de combustión. Equipado con una válvula Besthelg que permite regular el flujo de gas y controlar la intensidad de la llama.
- **Cilindro de gas LP:** Recipiente destinado al almacenamiento y suministro del gas LP utilizado como combustible del sistema, equipado con una válvula de seguridad para controlar la salida del combustible hacia el quemador.

En la Figura 9, se presenta un dibujo técnico acotado del horno (cotas en centímetros). En la Tabla 3, se describen los tipos de acabados de materiales empleados en la elaboración de los diseños. Dado que Solidworks® no dispone de materiales refractarios específicos, se implementaron materiales cerámicos personalizados con propiedades térmicas y mecánicas conocidas.

Ingeniería Mecatrónica
Diseño y Construcción de un Horno Ahorrador de Energía Ecológico

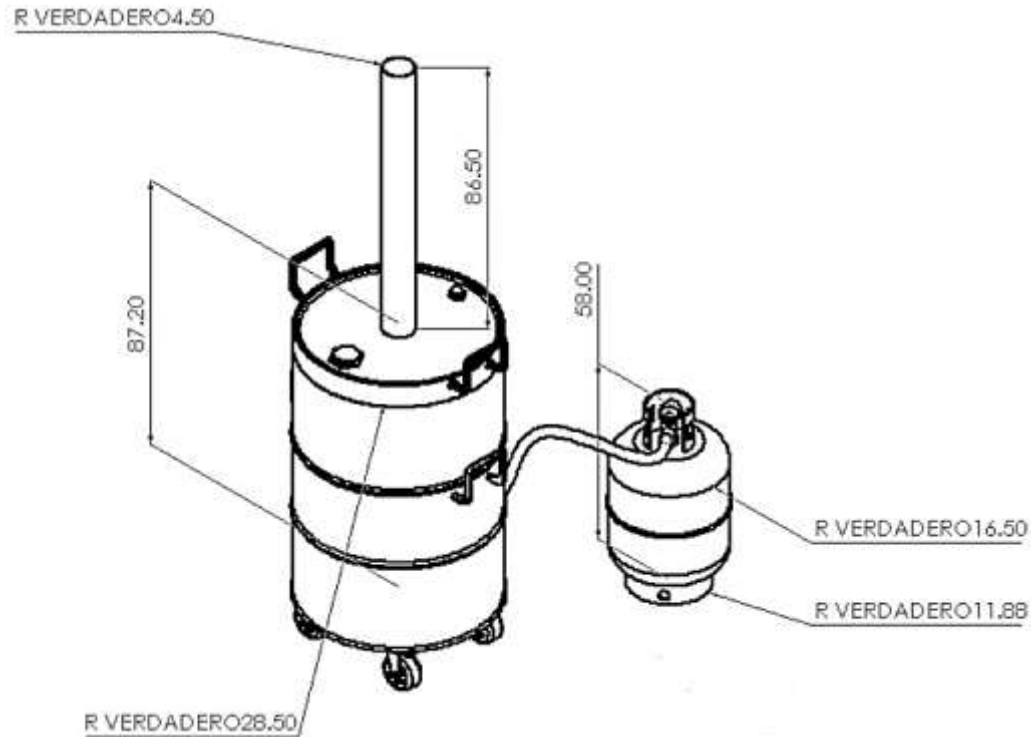


Figura 9. Dibujo técnico del horno ahorrador de energía ecológico de estudio.

Tabla 3. Listado de acabado de materiales empleados en los diseños elaborados en SolidWorks®.

COMPONENTE	MATERIAL EN SOLIDWORKS®	TIPO DE MATERIAL	OBSERVACIONES TÉCNICAS
Barril de soporte	AISI 1020	Acero Comercial / Acero Dulce	El espesor del barril depende del fabricante (≈ 1.2 mm) y del tipo de luidos almacenado.
Cemento portrand	Cerámico personalizado	Consumible	Se asume continuidad térmica entre ladrillos.
Cámara de cocción (Ladrillo refractario)	Ladrillo personalizado	Cerámica personalizada	Definir densidad, calor específico conductividad térmica.
Vaporera	AISI 304	Acero inoxidable	Se considera buena conductividad térmica y estabilidad dimensional por su carácter alimentario.
Tubo tronera (Chimenea)	ASTM A36	Acero al carbono estructural	Se considera exposición directa a temperatura elevada.
Puerta del horno (estructura)	AISI 1020	Acero Comercial / Acero Dulce	Se recomienda usar el mismo material y especiaciones que el barril.
Puerta del horno (recubrimiento)	Ladrillo personalizado	Cerámica personalizada	Se sugiere que se empear las especificaciones de la cámara de cocción como las del cemento.
Agarraderas del horno	ASTM A36	Acero al carbono estructural	Incluye tanto las del cuerpo de horno como las de la chimenea.
Soplete	Hierro gris	Hierro fundido	Se considera con buena resistencia térmica.

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Horno Ahorrador de Energía Ecológico

COMPONENTE	MATERIAL EN SOLIDWORKS®	TIPO DE MATERIAL	OBSERVACIONES TÉCNICAS
Manguera tanque – soplete	NBR (Caucho de nitrilo)	Caucho	Se usa como referencia del paso del gas del tanque al soplete.
Tanque de gas	AISI 1020	Acero estructural de baja aleación	No se considera un elemento estructural. Utilizada para visualizar el funcionamiento.
Llantas de deslizamiento (soporte)	Acero galvanizado	Acero estructural	Se considera junto con la agarradera y la estructura anclada ala solera.
Llantas de deslizamiento (llanta)	Nailon 101	Platicos	Se considera el peso del horno repartido en las cuatro llantas.
Solera base	Acero estructural	Acero al carbono estructural	Modelado como solera de acero de 1/8.

3.2 ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y TÉRMICO DEL HORNO

Mediante el uso del software SolidWorks® Simulation se llevó a cabo un estudio y análisis simple estructural y/o térmico por el método de elementos finitos (FEA, en sus siglas en inglés) de la cámara de calentamiento del horno para validar su respuesta a cargas mecánicas y térmicas. En la Figura 10, se muestra la etapa de mallado del diseño.

En las Tablas 4 y 5 se detallan las condiciones de la simulación empleadas.

Tabla 4. Propiedades de los materiales para el análisis estructural FEA.

Propiedades del material	Magnitud	Propiedades del material	Magnitud
Tipo	Acero de bajo carbono	Módulo de compresibilidad (K)	166.7 GPa
Densidad	7850 kg/m ³	Módulo de corte (G)	77.5 GPa
Módulo de Young (E)	200 GPa	Coefficiente isotrópico de expansión térmica.	11.7 x 10 ⁻⁶ /C°
Coefficiente de Poisson	0.29	Limite elástico	300 MPa

Tabla 5. Propiedades de los materiales para el análisis térmico FEA.

Propiedad	Lamina de acero	Refractario con muestra
Densidad [kg/m ³]	7850	1960
Conductividad térmica [W/m·K]	51.9	1.41
Calor específico [J/kg·K]	486	845
Coefficiente de expansión térmica [10 ⁻⁶ /K]	11.7	5.3
Emisividad	0.75	0.85

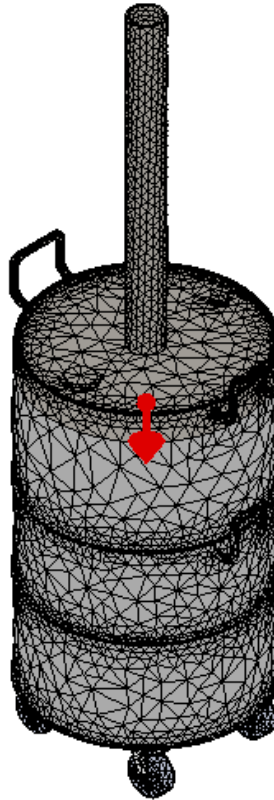


Figura 10. Formato de malla usando para los estudios.

3.3 MANUFACTURA DEL HORNO

La construcción del horno ahorrador de energía ecológico se realizó a partir del diseño mecánico previamente desarrollado y validado, en el cual se definieron las dimensiones generales, los materiales de construcción y el principio de funcionamiento del sistema. Debido a ello, la etapa de manufactura se enfocó principalmente en la fabricación, ensamblaje e integración de los componentes que conforman el prototipo.

La manufactura del horno se llevó a cabo mediante técnicas convencionales de fabricación estructural y mampostería refractaria, orientadas a la construcción de un sistema de confinamiento térmico para cocción eficiente. El prototipo se desarrolló utilizando un tambo de acero de 200 L ($\varnothing 57 \times 87.2$ cm) de capacidad nominal como envolvente estructural principal, provisto de una tapa removible refractaria ($\varnothing 57 \times 5$ cm, que cuenta con aberturas aproximadas de $\varnothing 10$, 5 y 2 cm para salida de gases, de vertido y de ventilación, respectivamente) y revestido internamente con ladrillos cerámicos de arcilla cocida y mortero refractario especializado. Esta configuración permitió conformar una cámara de cocción ($\varnothing 52 \times 81$ cm) cerrada con un volumen útil de 0.17 m^3 y aislamiento térmico, además de integrar un sistema de suministro de combustible a base de gas LP. El monitoreo y registro de la temperatura en la cámara de cocción se realizó mediante un termómetro digital TASI TA612C equipado con termopar tipo K/J/T, con un rango de medición de -200 a 1372 °C. Las operaciones de manufactura

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Horno Ahorrador de Energía Ecológico

incluyeron corte, cizallado, perforación, desbaste, conformado y unión de materiales metálicos, empleando herramientas manuales y maquinaria convencional. Entre los equipos utilizados destacan una máquina soldadora de micro alambre marca LINCOLN ELECTRIC, una sierra cinta horizontal universal marca Makita y una esmeriladora de mano, además de otros equipos auxiliares. Por otra parte, la construcción del revestimiento refractario se realizó mediante técnicas convencionales de albañilería, utilizando herramientas como paletas de albañil, espátulas, llanas y cinceles. Asimismo, en la carcasa cilíndrica y la tapa se incorporaron agarraderas metálicas para facilitar su manipulación.

La manufactura del prototipo se dividió en diferentes etapas con el propósito de facilitar su construcción y ensamblaje. Inicialmente, la carcasa cilíndrica se obtuvo a partir de un barril metálico reciclado de 200 L, el cual fue limpiado, cortado y acondicionado para alojar los demás elementos del sistema. Posteriormente, se fabricó la tapa removible mediante el acondicionamiento de la sección superior del barril e incorporación de elementos de sujeción. La chimenea se construyó a partir de un tubo metálico unido a la parte superior de la carcasa para permitir la evacuación de los gases de combustión. En el interior se conformó la cámara de cocción, instalando los soportes necesarios para alojar la vaporera y garantizar una adecuada distribución del calor. Asimismo, se fabricó una plataforma de soporte portátil mediante perfiles metálicos soldados y ruedas, proporcionando estabilidad y facilidad de desplazamiento al prototipo. Finalmente, se aplicó el revestimiento refractario en la carcasa y la tapa y se integró el sistema de suministro de energía, compuesto por un medidor de consumo de gas KumHo DMiT KG-2, un quemador de gas de tipo mechero (plato No. 4, Ø14 cm) de 24 orificios marca Vulcano provisto con tubo de 22.5 cm de largo con válvula Besthelg y un cilindro de gas LP con válvula INGUSA cap. 9 kg, realizando las conexiones y verificaciones necesarias para garantizar una operación segura y eficiente del horno.

Los materiales empleados en la manufactura del horno ahorrador de energía ecológico se agruparon por módulos y se presentan en la Tabla 6. Se seleccionaron materiales de fácil adquisición y alta resistencia mecánica y térmica, entre los que destacan solera comercial de acero de 1/8", vaporera comercial (Ø41.5×49 cm, cap. 0.08 m³), un cilindro de gas LP de 9 kg de capacidad, ladrillos cerámicos de arcilla cocida y mortero refractario, entre otros. La carcasa cilíndrica del horno se obtuvo a partir de un barril metálico de 200 L nuevo (originalmente utilizado para el almacenamiento de aceite lubricante), el cual fue sometido a procesos de reacondicionamiento para su revestimiento. Cabe señalar que no se realizó un estudio de rentabilidad económica, ni se consideraron los costos asociados a mano de obra, transporte o impuestos aplicables.

De las Figuras 11 a la 14, se muestran algunas vistas de algunos de los materiales de manufactura empleados.

Ingeniería Mecatrónica
Diseño y Construcción de un Horno Ahorrador de Energía Ecológico

Tabla 6. Lista de materiales y relación de costos de manufactura del horno.

MÓDULO	MATERIAL	CANTIDAD	CAPACIDAD	COSTO (\$, MXN)
Carcasa cilíndrica	Barril para aceite	1	200 L	\$200.00
Cámara de cocción	Marmolina	1	40 kg	\$120.00
	Cemento portland	1	20 kg	\$110.00
	Pega piso perdura	1	20 kg	\$150.00
	Ladrillos base	15	24×11×4 cm	\$52.50
	Ladrillos cuerpo	42	24×11×4 cm	\$147.00
Chimenea	Tubo tronera	1	4 in	\$84.00
	Cople tubo tronera	1	4 in	\$45.00
	Ladrillos techo	15	24×11×4 cm	\$52.50
Sistema de consumo de gas	Soplete	1	Mediano	\$257.00
	Manguera tanque - soplete	1	3/8 in	\$280.00
	Tanque de gas (9 kg cap.)	1	9 kg	\$880.00
	Soporte quemador	1		\$100.00
Plataforma de soporte portátil	Llantas de deslizamiento	4	100 kg	\$1,700.00
	Solera de acero 1/8	1	3 m	\$200.00
Recipiente de cocción	Vaporera	1	Ø41.5×49 cm (0.08 m ³)	\$1,800.00
TOTAL				\$6,178.00

Ingeniería Mecatrónica
Diseño y Construcción de un Horno Ahorrador de Energía Ecológico



Figura 11. Ladrillos refractarios para el recubrimiento.



Figura 12. Botes de mortero (izq.) y saco de marmolina (der.).

Ingeniería Mecatrónica
Diseño y Construcción de un Horno Ahorrador de Energía Ecológico



Figura 13. Barril de 200 L (dentro de su empaque).



Figura 14. Medidor KumHo DMiT KG-2 de consumo de gas empleado.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 DISEÑO MECÁNICO DEL HORNO AHORRADOR DE ENERGÍA ECOLÓGICO

Los diseños mecánicos del horno ahorrador de energía ecológico fueron desarrollados mediante SolidWorks® y se presentan a través de diferentes vistas, acercamientos y perspectivas isométricas, con el propósito de facilitar la comprensión de su configuración geométrica y funcional. Los modelos obtenidos constituyeron una base técnica para la manufactura del prototipo, ya que permitieron definir la disposición y el ensamblaje de los elementos estructurales y operativos que integran el sistema. Las Figuras 15 a 21 muestran las principales vistas del horno, permitiendo identificar tanto los componentes internos como externos y la interacción entre ellos. Cabe señalar que el modelado del cilindro de gas LP, la válvula reguladora, las mangueras y el medidor de consumo de gas tuvo únicamente fines ilustrativos y representativos, por lo que sus dimensiones no corresponden necesariamente a las de los componentes comerciales empleados en la construcción del prototipo. Asimismo, por consideraciones relacionadas con el proceso de patente y protección intelectual del diseño, no se incluyen las cotas dimensionales del modelo. De manera general, el horno ahorrador de energía ecológico está constituido por los siguientes elementos: (1) carcasa cilíndrica fabricada a partir de un barril metálico reciclado de 200 L, (2) tapa removible, (3) chimenea, (4) cámara de cocción, (5) plataforma de soporte portátil, (6) revestimiento refractario, (7) medidor de consumo de gas, (8) quemador de gas con válvula Besthelg y (9) cilindro de gas LP de 9 kg de capacidad.

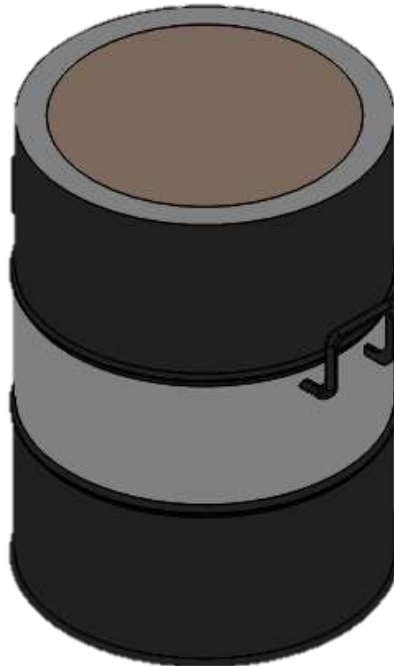


Figura 15. Cámara de cocción recubierto de material refractario: estructura general del cuerpo del horno.

Ingeniería Mecatrónica
Diseño y Construcción de un Horno Ahorrador de Energía Ecológico

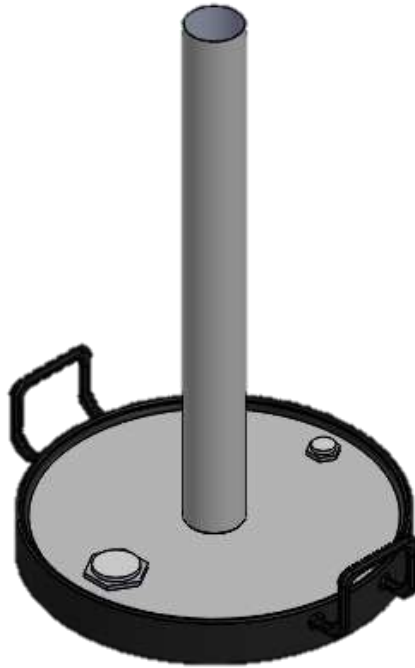


Figura 16. Chimenea incorporada a la puerta del horno.

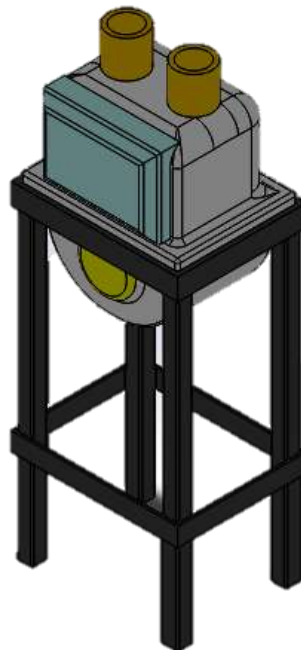


Figura 17. Medidor de gas empelado empotrado en su base de soporte.

Ingeniería Mecatrónica
Diseño y Construcción de un Horno Ahorrador de Energía Ecológico

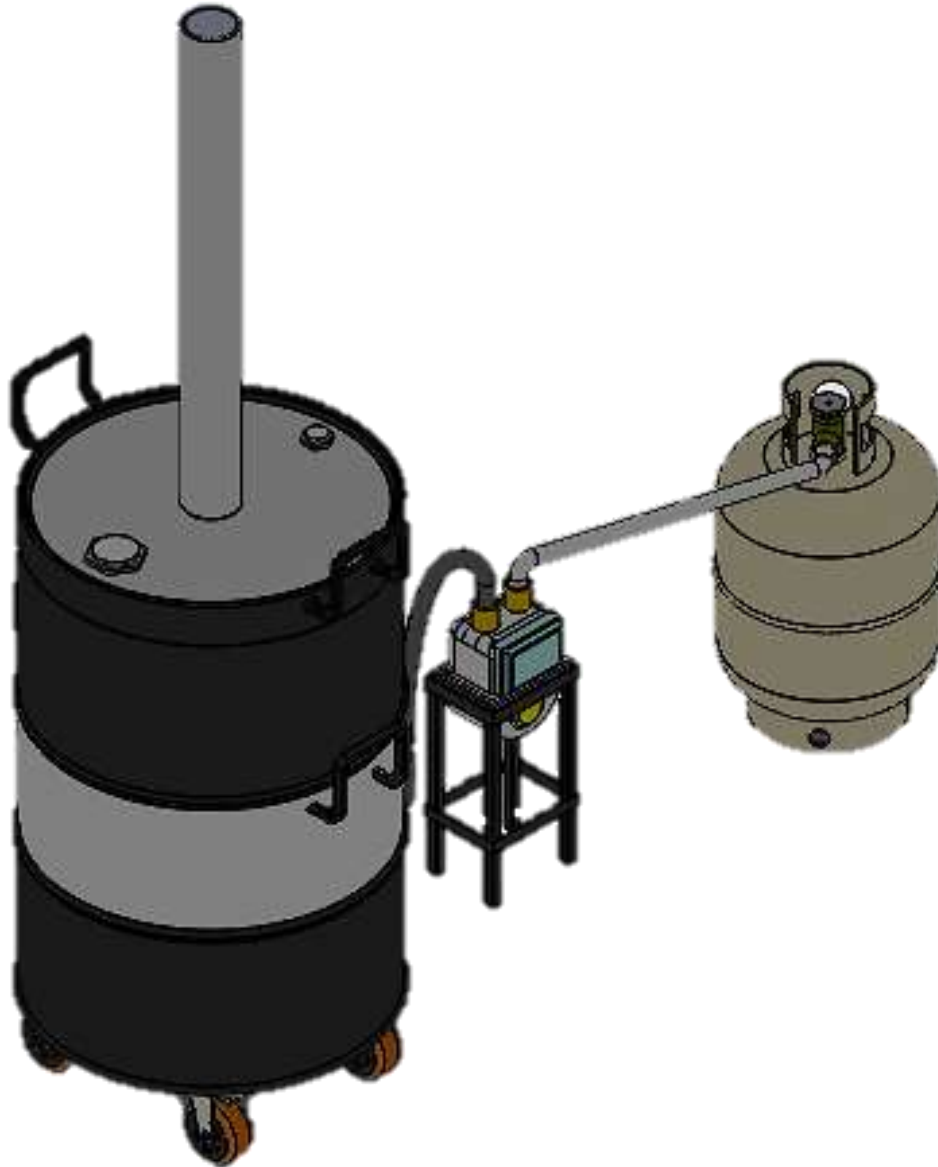


Figura 18. *Diseño mecánico completo del horno ahorrador de energía ecológico.*

Ingeniería Mecatrónica
Diseño y Construcción de un Horno Ahorrador de Energía Ecológico

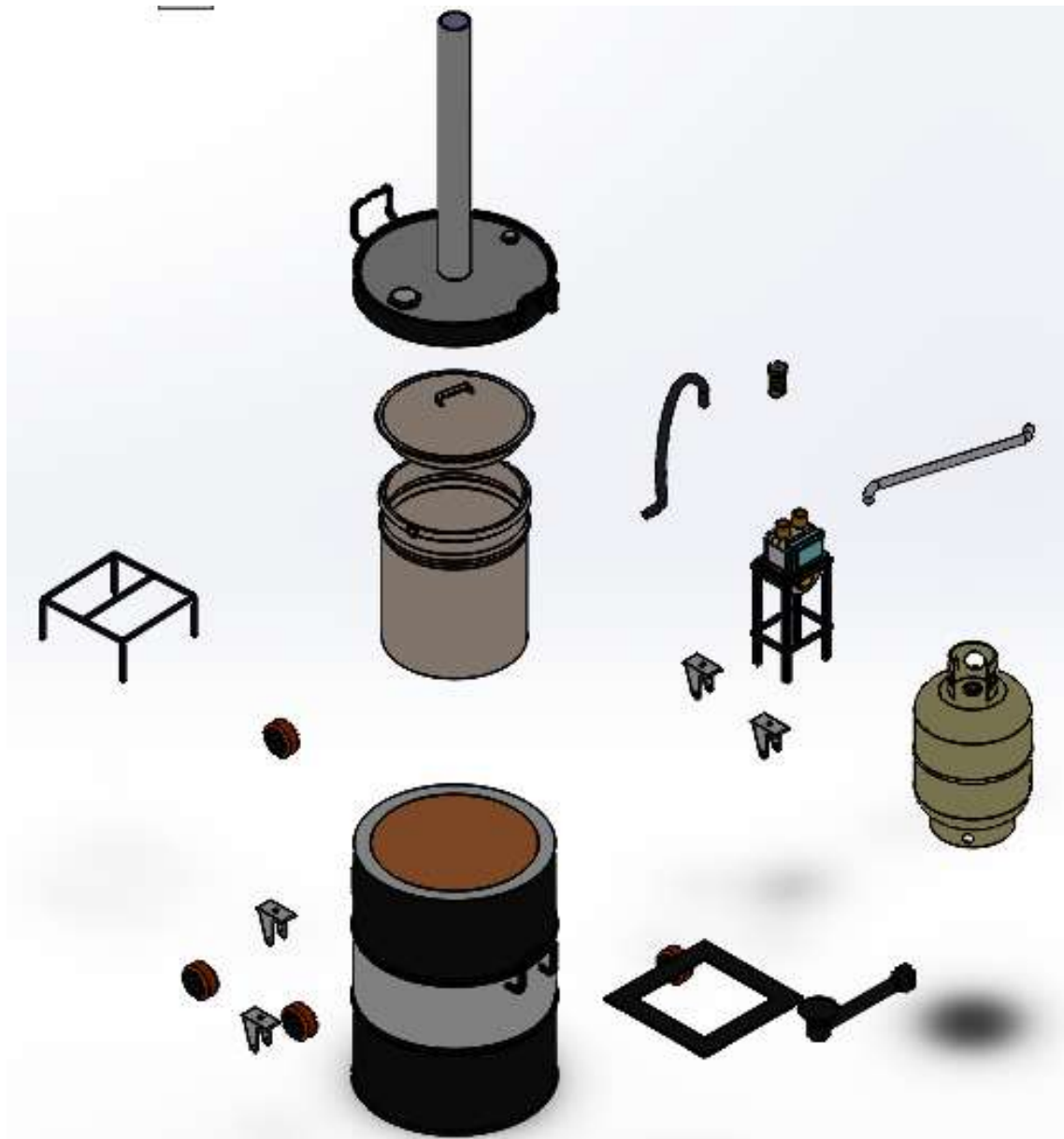


Figura 19. Vista explosionada del diseño mecánico del horno.

Ingeniería Mecatrónica
Diseño y Construcción de un Horno Ahorrador de Energía Ecológico

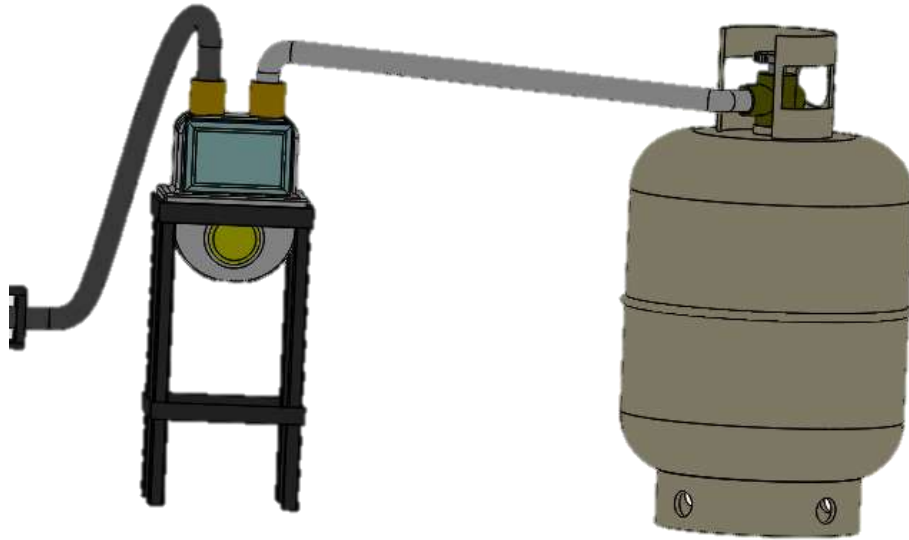


Figura 20. Sistema de suministro de energía al horno por gas LP.



Figura 21. Quemador de gas.

4.2 RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y TÉRMICO

Con el propósito de evaluar la integridad mecánica y el comportamiento térmico del horno ahorrador de energía ecológico, se realizaron simulaciones mediante el método de elementos finitos (FEA) utilizando SolidWorks® Simulation. El análisis estructural se efectuó empleando el criterio de Von Mises, mientras que el análisis térmico permitió estudiar la distribución de temperatura en el conjunto bajo condiciones de operación representativas.

La Figura 22 muestra la distribución del esfuerzo equivalente de Von Mises obtenida para la estructura del horno. El esfuerzo máximo registrado fue de 4.978×10^7 N/m² (49.78 MPa), valor considerablemente inferior al límite elástico del acero de bajo carbono utilizado en la simulación, estimado en 3.516×10^8 N/m² (351.6 MPa). Esto indica que el esfuerzo máximo corresponde aproximadamente al 14.2 % de la capacidad resistente del material, por lo que la estructura opera completamente dentro del régimen elástico y no se prevé la aparición de deformaciones plásticas bajo las condiciones evaluadas. Asimismo, el factor de seguridad obtenido fue cercano a 6, lo que evidencia un margen adecuado frente a la falla por fluencia y confirma la estabilidad mecánica del diseño. Las mayores concentraciones de esfuerzo se localizaron en regiones con cambios geométricos y zonas próximas a las restricciones del modelo; sin embargo, aun en estas áreas críticas los valores permanecieron muy por debajo del límite permisible del material. Estos resultados sugieren que el diseño posee un amplio margen de seguridad estructural y que, en trabajos futuros, podrían explorarse estrategias de optimización orientadas a reducir el peso o la cantidad de material empleado sin comprometer la estabilidad mecánica ni la seguridad operativa del sistema.

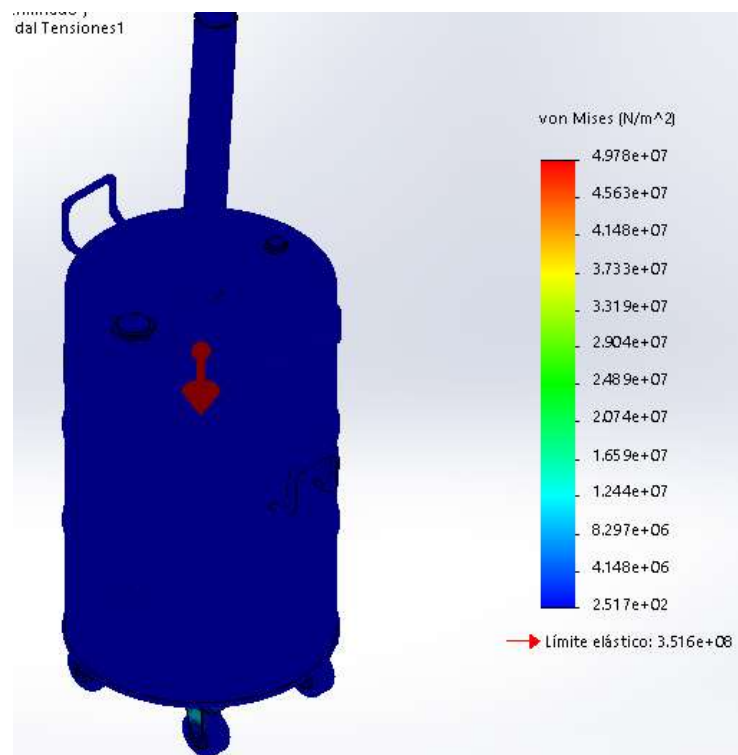


Figura 22. Análisis estructural FEA usando el criterio de Von Mises.

Ingeniería Mecatrónica Diseño y Construcción de un Horno Ahorrador de Energía Ecológico

Por otra parte, la Figura 48 presenta la distribución de temperatura obtenida del análisis térmico del horno. Se observó que la región superior interna de la cámara de cocción alcanzó las temperaturas más elevadas, cercanas a los 300 °C, representadas por las tonalidades rojas. A medida que el calor se transfirió a través del cuerpo del recipiente, la temperatura disminuyó gradualmente, evidenciando un comportamiento característico de la conducción térmica en materiales metálicos. Las paredes laterales mostraron temperaturas intermedias, predominando tonalidades verdes y celestes, mientras que la parte inferior del sistema registró los valores más bajos, comprendidos aproximadamente entre 25 °C y 50 °C. El gradiente térmico observado entre la zona superior e inferior confirma que el calor se concentra principalmente en la cámara de cocción y se disipa progresivamente hacia las regiones externas del horno. Este comportamiento es consistente con la geometría propuesta y con las condiciones de frontera establecidas en la simulación, además de evidenciar la efectividad del revestimiento refractario para limitar las pérdidas térmicas hacia el exterior. En conjunto, los resultados estructurales y térmicos demuestran que el diseño propuesto posee una adecuada estabilidad mecánica y una distribución de temperatura favorable para aplicaciones de cocción por vapor.

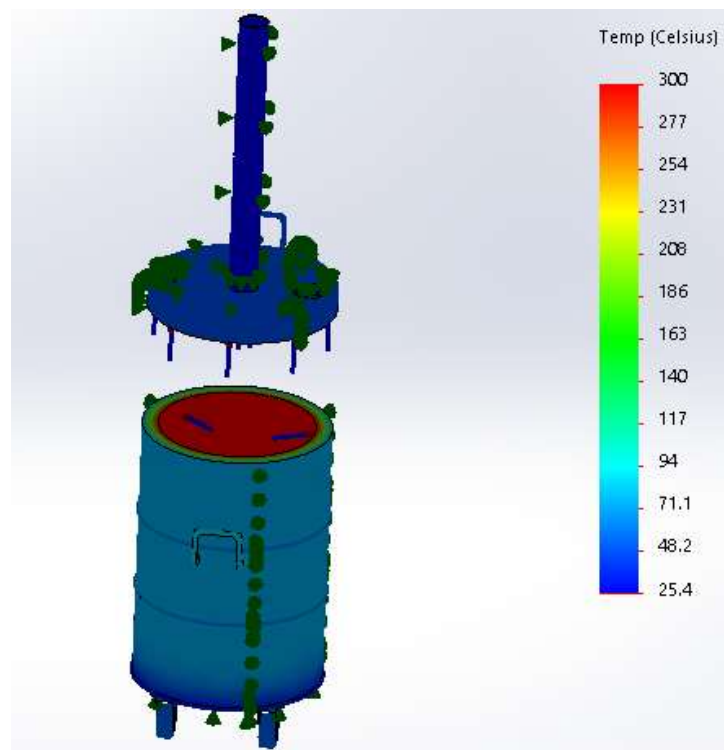


Figura 23. Análisis térmico FEA del cuerpo del horno como un conjunto.

4.3 CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO

Mediante la aplicación de técnicas convencionales de manufactura metálica y mampostería refractaria se llevó a cabo la construcción del horno ahorrador de energía ecológico. La evaluación del prototipo se centró en verificar su estabilidad estructural, la integridad del revestimiento refractario, la capacidad de la cámara de cocción para confinar el calor y el correcto funcionamiento del sistema de suministro de gas. Las Figuras 24 a 38 muestran las principales etapas de construcción e integración de los módulos que conforman el sistema.

4.3.1 Cámara de cocción

La cámara de cocción se construyó utilizando como estructura principal un barril metálico reciclado de 200 L, originalmente empleado para el almacenamiento de aceite lubricante. La selección de este elemento respondió a su elevada resistencia mecánica y a la posibilidad de reutilizar un material industrial, promoviendo así criterios de sustentabilidad y economía circular. Inicialmente, se realizó el corte de la parte superior del barril, conservando una sección que posteriormente funcionó como tapa removible. Durante esta operación se empleó enfriamiento con agua para evitar alteraciones metalúrgicas ocasionadas por el incremento local de temperatura generado por el corte. El revestimiento interno de la cámara se fabricó mediante técnicas de mampostería refractaria, utilizando ladrillos cerámicos de arcilla cocida unidos con una mezcla de cemento, mortero refractario y marmolina. Los ladrillos fueron colocados verticalmente sobre la superficie lateral del cilindro, dejando pequeños espacios entre ellos para favorecer la adherencia del mortero y mejorar el confinamiento térmico. Posteriormente, la base fue recubierta con una capa adicional de ladrillo refractario, cuyos elementos fueron perfilados para adaptarse a la geometría circular del recipiente. Con el propósito de incrementar el aislamiento térmico y proporcionar un acabado más uniforme, se añadió una segunda capa de material cerámico sobre la base inferior de la cámara. Asimismo, se soldaron dos agarraderas laterales fabricadas con barra de acero, facilitando la manipulación del horno durante su operación y traslado. Finalmente, se realizó una perforación lateral de 2 pulgadas de diámetro para instalar el quemador de gas, permitiendo el suministro controlado del calor hacia el interior de la cámara de cocción. Las Figuras 24 a 27 muestran las diferentes etapas de construcción de este módulo.

Ingeniería Mecatrónica
Diseño y Construcción de un Horno Ahorrador de Energía Ecológico



Figura 24. Cámara de cocción con el recubrimiento refractario en sus paredes.



Figura 25. Ensamble de ladrillos refractarios para la base de la cámara de cocción.

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Horno Ahorrador de Energía Ecológico



Figura 26. Vista interna de la cámara de cocción recubierta con el material refractario.



Figura 27. Elemento de sujeción (agarradera) e integración del quemador de gas en la carcasa cilíndrica.

4.3.2 Tapa y chimenea

La tapa removible se obtuvo a partir de la sección superior del barril original, conservando la misma geometría cilíndrica del sistema. Sobre su superficie interna se aplicó un revestimiento refractario similar al utilizado en la cámara de cocción, con el propósito de reducir las pérdidas térmicas y mejorar el confinamiento del calor. En la parte central de la tapa se instaló una chimenea fabricada con tubo metálico de aproximadamente 1 m de longitud y 9 cm de diámetro. Este componente cumple una doble función: permitir la evacuación controlada de los gases generados durante la combustión y favorecer la circulación natural del aire dentro del horno, contribuyendo a mantener condiciones adecuadas de operación. Adicionalmente, se incorporaron dos agarraderas metálicas para facilitar el montaje y desmontaje de la tapa durante las pruebas experimentales. Las Figuras 28 a 32 presentan evidencias del proceso de fabricación e integración de este módulo.



Figura 28. Proceso de fabricación de recubriendo refractario en la tapa.

Ingeniería Mecatrónica
Diseño y Construcción de un Horno Ahorrador de Energía Ecológico



***Figura 29.** Ensamble de cubierta refractaria en la tapa.*



***Figura 30.** Acabado final del interior refractario de la tapa.*

Ingeniería Mecatrónica
Diseño y Construcción de un Horno Ahorrador de Energía Ecológico



***Figura 31.** Vista superior de la tapa y chimenea.*



***Figura 32.** Vista completa de la tapa y chimenea del horno.*

4.3.3 Plataforma de soporte portátil

La plataforma de soporte se diseñó con el objetivo de proporcionar estabilidad estructural y facilitar el desplazamiento del horno. La estructura fue fabricada mediante perfiles de acero soldados entre sí, formando una base cuadrada de aproximadamente 40 cm por lado. En cada vértice se instalaron ruedas pivotantes con sistema de bloqueo, permitiendo movilizar el equipo de manera segura y fijarlo durante su operación. Las dimensiones y capacidad de carga de las ruedas fueron seleccionadas para soportar el peso total del horno sin afectar su estabilidad ni su funcionamiento. La Figura 33 muestra la plataforma concluida.



Figura 33. Plataforma de soporte portátil para el desplazamiento del horno.

4.3.4 Sistema de suministro de gas

El sistema de suministro de energía se integró utilizando un cilindro comercial de gas LP de 9 kg de capacidad, un quemador de gas equipado con válvula Besthelg y un medidor de consumo de gas tipo diafragma. El quemador fue instalado lateralmente en la cámara de cocción mediante un adaptador metálico que permitió ajustar la distancia entre la fuente de calor y el interior del horno. El medidor de gas se montó sobre una estructura metálica fabricada con PTR de $\frac{3}{4}$ de pulgada y ángulo de acero, proporcionando una posición estable y segura para el monitoreo del consumo de combustible. Todo el sistema fue conectado mediante mangueras y accesorios comerciales, verificando la hermeticidad y el correcto funcionamiento antes de las pruebas experimentales. Asimismo, se incorporaron los utensilios de cocción y una base metálica para soportar la vaporera dentro de la cámara, garantizando una adecuada separación respecto al quemador y favoreciendo una distribución más uniforme del calor. Con la integración de este módulo se completó la construcción del horno ahorrador de energía ecológico. Las Figuras 34 a 37 muestran las diferentes etapas de ensamblaje e instalación del sistema de gas y los accesorios de cocción.

Ingeniería Mecatrónica
Diseño y Construcción de un Horno Ahorrador de Energía Ecológico



Figura 34. Medidor empotrado en una base metálica.



Figura 35. Vista del soplete funcionado dentro de la cámara de cocción.

Ingeniería Mecatrónica
Diseño y Construcción de un Horno Ahorrador de Energía Ecológico



Figura 36. Vista completa del sistema de suministro de energía por gas LP.



Figura 37. Utensilios de comida para la puesta en operación del horno: estructura de soporte para la vaporera (izq.) y vaporera para la cocción (der.).

4.3.5 Integración del sistema completo

Una vez contruidos los módulos que conforman el horno ahorrador de energía ecológico, se procedió a su integración para obtener el prototipo funcional. El sistema completo quedó conformado por una carcasa cilíndrica fabricada a partir de un barril metálico reciclado de 200 L, revestida internamente con ladrillo cerámico de arcilla cocida y mortero refractario, formando una cámara de cocción con capacidad aproximada de 0.141 m³. La parte superior del horno se complementó con una tapa removible provista del mismo revestimiento térmico y una chimenea metálica, cuya función es facilitar la evacuación de los gases generados durante la combustión y favorecer la circulación del aire en el interior del sistema. El horno fue montado sobre una plataforma portátil fabricada con perfiles de acero y ruedas pivotantes con sistema de bloqueo, proporcionando estabilidad estructural y facilidad de desplazamiento. Asimismo, se incorporaron agarraderas metálicas tanto en la carcasa como en la tapa, permitiendo una manipulación segura durante las etapas de operación y mantenimiento. El suministro de energía se realizó mediante un sistema de gas LP compuesto por un cilindro comercial de 9 kg de capacidad, un quemador de gas equipado con válvula Besthelg y un medidor de consumo tipo diafragma montado sobre una estructura metálica independiente. Este arreglo permitió regular y monitorear el flujo de combustible suministrado al quemador, así como registrar el consumo de gas durante las pruebas experimentales. Adicionalmente, se integró una base metálica para soportar la vaporera dentro de la cámara de cocción, manteniendo una separación adecuada respecto a la fuente de calor y favoreciendo una distribución térmica más uniforme. La Figura 38 muestra el prototipo completamente ensamblado, donde se aprecia la integración de los diferentes módulos estructurales, térmicos y energéticos que conforman el horno ahorrador de energía ecológico. La construcción del sistema permitió obtener un equipo funcional, portátil y con capacidad para realizar procesos de cocción por vapor bajo condiciones controladas de temperatura y consumo de combustible.



Figura 38. Vista completa del horno ahorrador de energía ecológico.

4.4 EXPERIMENTACIÓN CON EL PROTOTIPO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con el propósito de evaluar el desempeño térmico y energético del horno ahorrador de energía ecológico, se desarrolló un protocolo experimental exploratorio utilizando mazorcas de maíz tierno-elote blanco (*Zea mays* L.) como producto de prueba, ver Figura 39. La experimentación se realizó por triplicado y se dividió en dos etapas: la primera consistió en la cocción convencional mediante una vaporera expuesta al ambiente, mientras que la segunda se realizó incorporando la misma vaporera dentro de la cámara de cocción del horno desarrollado. En total se emplearon 140 elotes, distribuidos equitativamente entre ambas etapas. Durante los ensayos se monitorearon las

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Horno Ahorrador de Energía Ecológico

variables de tiempo de cocción, temperatura, flujo volumétrico de gas y masa del sistema. Los resultados son expresados en términos de los promedios obtenidos de las pruebas por etapa. El suministro energético se realizó mediante un cilindro de gas LP con capacidad nominal de 9 kg, cargado al 90% antes de cada experimento. Las mediciones de masa del cilindro correspondieron al peso total del recipiente metálico más el combustible contenido en su interior, por lo que las variaciones registradas representan la cantidad de gas consumido durante cada prueba. Asimismo, las mediciones se realizaron utilizando una báscula digital de plataforma RagaBasics con capacidad de 200 kg.



Figura 39. Biomasa de prueba.

4.4.1 Etapa 1: Cocción convencional sin horno

La primera etapa (Etapa 1) consistió en la cocción de 70 elotes utilizando una vaporera comercial ($\varnothing 41.5 \times 49$ cm, cap. 0.08 m^3) expuesta a condiciones ambientales, sin la incorporación del horno. Para lo anterior, se empleó el sistema de suministro de energía establecido, ver Figura 40. Esta prueba tuvo como finalidad establecer una línea base para comparar el desempeño térmico y energético del prototipo. El proceso requirió un tiempo total promedio de cocción de 100 min. La evolución temporal promedio de las variables medidas se presenta en la Tabla 7, mientras que la Tabla 8 resume las condiciones iniciales y finales promedio de los experimentos de esta etapa. Los resultados mostraron que la temperatura de la vaporera aumentó desde 23.6°C hasta 94.1°C , alcanzando una diferencia de 70.5°C respecto a la condición inicial. El calentamiento presentó una tendencia gradual y sostenida, aproximándose al punto de ebullición después de aproximadamente 60 min de operación. Respecto al consumo energético, el medidor de gas registró un consumo acumulado de 90 dm^3 de gas LP. Paralelamente, el peso total del cilindro (recipiente más combustible) disminuyó aproximadamente 0.05 kg al finalizar el experimento. Debido a que esta diferencia es pequeña en comparación con la masa total del cilindro y a la resolución del instrumento empleado, el

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Horno Ahorrador de Energía Ecológico

análisis energético se fundamentó principalmente en las lecturas volumétricas proporcionadas por el medidor de gas. Por otra parte, la masa total de la vaporera disminuyó 1.25 kg debido a la evaporación del agua empleada durante la cocción. Asimismo, la masa promedio de los elotes incrementó aproximadamente 20 g por unidad, pasando de 320 g a 340 g, comportamiento asociado a la absorción de humedad durante el proceso térmico. En el Anexo 1, se presentan demás vistas de la experimentación ejecutada en la Etapa 1.



Figura 40. Puesta de equipamiento para la experimentación de la Etapa 1.

Tabla 7. Resultados experimentales promedio bajo la configuración operativa de la Etapa 1.

Tiempo (min)	Temperatura vaporera (°C)	Peso (kg)	Flujo (dm ³)
0	23.6	19.35	159
10	36.2	19.35	173
20	47.8	19.35	180
30	58.7	19.35	191
40	70.3	19.30	198
50	81.1	19.30	210
60	89.5	19.30	217
70	90.3	19.30	227
80	91.4	19.30	233
90	93.8	19.30	240
100	94.1	19.30	249

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Horno Ahorrador de Energía Ecológico

Tabla 8. Resultados promedio comparativos (inicial y final de cada ensayo) bajo la configuración operativa de la Etapa 1.

Indicador	Inicial	Final	Diferencia
Peso (kg) [vaporera + 70 elotes + agua 90% cap.]	53.90	52.65	1.25
Peso unitario (g) [elote]	320	340	20
Peso (kg) [cilindro + combustible]	19.35	19.30	0.05
Temperatura (°C) [interna de la vaporera]	23.6	94.1	70.5
Flujo (dm ³) [medidor de consumo de gas]	159	249	90

4.4.2 Etapa 2: Cocción utilizando el horno ahorrador de energía ecológico

La segunda etapa (Etapa 2) se realizó colocando la vaporera dentro de la cámara de cocción del horno, generando un ambiente térmicamente aislado y controlado, ver Figura 41. El objetivo de esta configuración fue evaluar el efecto del confinamiento del calor sobre el tiempo de cocción y el consumo energético. La temperatura se monitoreó mediante dos termopares independientes: uno colocado en la vaporera y otro en la cámara interna del horno. Los resultados mostraron que la temperatura del horno alcanzó valores cercanos a 248.6 °C, mientras que la vaporera llegó a una temperatura máxima de 94.1 °C, estabilizándose alrededor de 93.7 °C al finalizar el experimento. El tiempo total de cocción fue de 90 min, es decir, 10 min menor que el requerido en la cocción convencional realizada en la Etapa 1. El medidor de gas registró un consumo acumulado de 73 dm³ de gas LP, mientras que el peso total del cilindro disminuyó aproximadamente 0.05 kg, variación que nuevamente resultó limitada por la resolución de la báscula utilizada. En la Etapa 2, la masa total de la vaporera disminuyó 12.70 kg, evidenciando una tasa de evaporación considerablemente mayor debido al confinamiento térmico y a la transferencia de calor adicional proporcionada por la cámara del horno. Por otra parte, la masa promedio de los elotes aumentó aproximadamente 20 g por unidad, alcanzando un valor promedio final de 370 g, lo que indica que el grado de hidratación y cocción fue similar al obtenido en la etapa 1. La evolución temporal promedio de las variables medidas se presenta en la Tabla 9, mientras que la Tabla 10 resume las condiciones iniciales y finales promedio de los experimentos de esta etapa. En el Anexo 2, se presentan demás vistas de la experimentación ejecutada en la Etapa 2.

Ingeniería Mecatrónica
Diseño y Construcción de un Horno Ahorrador de Energía Ecológico



Figura 41. Sistema puesto en el interior del horno: vista de la biomasa dentro de la vaporera (izq.) y vaporera sellada (der.).

Tabla 9. Resultados experimentales promedio bajo la configuración operativa de la Etapa 2.

Tiempo (min)	Temperatura vaporera (°C)	Temperatura Horno (°C)	Peso (kg)	Flujo (dm ³)
0	34.1	148.4	19.30	250
10	49.7	189.0	19.30	257
20	61.4	210.4	19.30	265
30	62.2	212.5	19.25	275
40	72.2	239.8	19.25	283
50	81.4	238.1	19.25	290
60	90.2	242.6	19.25	300
70	93.4	241.1	19.25	308
80	94.1	230.3	19.25	316
90	93.7	248.6	19.25	323

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Horno Ahorrador de Energía Ecológico

Tabla 10. Resultados promedio comparativos (inicial y final de cada ensayo) bajo la configuración operativa de la Etapa 2.

Indicador	Inicial	Final	Diferencia
Peso (kg) [vaporera + 70 elotes + agua 90% cap.]	57.90	45.20	12.7
Peso unitario (g) [elote]	350	370	20
Peso (kg) [cilindro + combustible]	19.30	19.25	0.05
Temperatura (°C) [interna de la vaporera]	34.1	93.7	59.6
Flujo (dm ³) [medidor de consumo de gas]	250	323	73

4.4.3 Comparación del desempeño térmico y energético

La comparación global entre ambas etapas (Etapa 1 y Etapa 2) se presenta en la Tabla 11. Los resultados evidenciaron que la implementación del horno permitió –durante la Etapa 2– reducir el consumo de gas LP de 90 dm³ a 73 dm³, equivalente a un ahorro de 17 dm³ y a una reducción relativa del 18.89%. Asimismo, el tiempo total de cocción disminuyó de 100 min a 90 min, representando una mejora del 10% respecto al método de la Etapa 1. Desde el punto de vista térmico, el horno generó un ambiente de alta temperatura alrededor de la vaporera, favoreciendo una transferencia de calor más eficiente y acelerando la etapa inicial del calentamiento. El confinamiento térmico redujo las pérdidas de calor por convección hacia el ambiente, permitiendo un mejor aprovechamiento de la energía suministrada por el quemador. Adicionalmente, la mayor pérdida de masa observada en la vaporera durante la Etapa 2 evidenció una evaporación más intensa del agua de cocción, resultado del incremento en la transferencia de calor hacia el recipiente. Sin embargo, ambas etapas produjeron un aumento similar en la masa promedio de los elotes, indicando que el nivel de cocción e hidratación alcanzado fue equivalente. En conjunto, los resultados experimentales demuestran que el horno ahorrador de energía ecológico mejora el aprovechamiento del calor generado por el sistema de combustión, disminuye el consumo de gas LP y reduce el tiempo requerido para la cocción, validando así la hipótesis planteada en esta investigación. En el Anexo 3, se presentan gráficos representativos del comparativo promedio obtenido.

Ingeniería Mecatrónica
Diseño y Construcción de un Horno Ahorrador de Energía Ecológico

Tabla 11. Comparación promedio de los ensayos realizados bajo ambas configuraciones experimentales.

Indicador	Etapla 1 [sin el horno]	Etapla 2 [con el horno]	Diferencia
Peso (kg) inicial [vaporera + 70 elotes + agua 90% cap.]	53.90	57.90	4
Peso (kg) final [vaporera + 70 elotes + agua sobrante]	52.65	45.20	7.45
Peso unitario (g) [elote]	320	350	30
Temperatura (°C) inicial [interna de la vaporera]	23.6	34.1	10.5
Temperatura (°C) final [interna de la vaporera]	94.1	93.7	0.4
Flujo (dm ³) [medidor de consumo de gas]	90	73	17
Tiempo (min) de cocción	100	90	10

V. CONCLUSIONES

En la presente investigación se diseñó, construyó y evaluó experimentalmente un horno ahorrador de energía ecológico destinado a la cocción de alimentos por vapor, integrando herramientas de diseño asistido por computadora, análisis por elementos finitos y técnicas convencionales de manufactura. El prototipo desarrollado incorporó una carcasa cilíndrica fabricada a partir de un barril metálico reciclado de 200 L, un revestimiento refractario y un sistema de suministro de gas LP, constituyendo una alternativa tecnológica orientada al ahorro energético y al aprovechamiento de materiales reutilizables.

Los resultados del análisis estructural mediante SolidWorks® Simulation demostraron que el diseño opera dentro del régimen elástico bajo las condiciones evaluadas. El esfuerzo máximo equivalente de Von Mises fue de 49.78 MPa, valor considerablemente menor al límite elástico del acero de bajo carbono empleado (300 MPa), obteniéndose un factor de seguridad cercano a 6. Asimismo, el análisis térmico mostró una distribución adecuada del calor y temperaturas internas cercanas a 300 °C, confirmando la capacidad del sistema para concentrar y conservar la energía térmica.

La experimentación realizada con 70 mazorcas de maíz tierno-elote blanco (*Zea mays L.*) permitió comparar el desempeño del sistema con y sin el uso del horno. Los resultados evidenciaron una disminución del tiempo de cocción de 100 a 90 minutos, equivalente a una reducción del 10%. De igual manera, el consumo de gas LP disminuyó de 90 dm³ a 73 dm³, representando un ahorro energético aproximado del 18.9%. Además, la cámara interna del horno alcanzó temperaturas cercanas a 250 °C, favoreciendo una transferencia de calor más uniforme y acelerando el proceso de calentamiento.

En consecuencia, se concluye que el horno ahorrador de energía ecológico constituye una alternativa viable para aplicaciones académicas, experimentales y de pequeña escala gastronómica, al combinar eficiencia energética, simplicidad constructiva y reutilización de materiales, validando así la hipótesis y los objetivos planteados en esta investigación.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Hadała, B., Malinowski, Z., and Rywotycki, M. (2017). Energy losses from the furnace chamber walls during heating and heat treatment of heavy forgings. *Energy*, 139, 298-314. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.121>
- [2] Gomez, R. S., Porto, T. R., Magalhães, H. L., Moreira, G., André, A. M., Melo, R. B., and Lima, A. G. (2019). Natural gas intermittent kiln for the ceramic industry: A transient thermal analysis. *Energies*, 12(8), 1568. <https://doi.org/10.3390/en12081568>
- [3] Filipponi, M., Rossi, F., Presciutti, A., De Ciantis, S., Castellani, B., and Carpinelli, A. (2016). Thermal analysis of an industrial furnace. *Energies*, 9(10), 833. <https://doi.org/10.3390/en9100833>
- [4] Zhao, J., Ma, L., Zayed, M. E., Elsheikh, A. H., Li, W., Yan, Q., and Wang, J. (2021). Industrial reheating furnaces: A review of energy efficiency assessments, waste heat recovery potentials, heating process characteristics and perspectives for steel industry. *Process Safety and Environmental Protection*, 147, 1209-1228. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.01.045>
- [5] San José, R. G. (2001). *Combustión y combustibles*. Disponible en https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/57763109/COMBUSTION_Y_COMBUSTIBLES-libre.pdf?1542173620=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DCOMBUSTION_Y_COMBUSTIBLES.pdf&Expires=1781646526&Signature=bEs6icIjTYEid5I5MrZyVXSCs6liItEjGdo7ywJfsxI3hxdPPPKm5JcITJkhp6DaCew2MlrH7iBnC3tmbGN5PBC-LTWRmWT9QOtBcqVezADT30kimNiFeXVg1IqGkXIMKvEnG0mG2i8nZfWvo6ECSGxf29PrweY6cgvQQmrtlhiXEKR-L-mQ08m1SOLCB20ohXw5y4mbI1WaVXcHu3XOJcSehtDqaoabK~dsrmh9rPhEUATf4rgBKDnps4UwI82Q~4KBTI9YTA4wUYRWY1B5GcHPC2rPtSwhrYJNKz7XrFeF0bi-9PCbZJrAC0ZJp7FO97YREhXG~cjDHsn2jOnpqA__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA
- [6] Lozano-Hernández, M. N., Ramírez-Osorio, J. A., and Vásquez-Granados, C. N. (2014). *Hornos de gas para ceramistas* (Informe final de investigación). Universidad de El Salvador. Disponible en https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/78648525/Hornos_20de_20gas_20para_20ceramistas_20Uso_20de_20tecnolog_C3_ADas_20apropiadas_20para_20su_20aplicaci_C3_B3n_20en_20el_20campo_20labor-libre.pdf?1642125652=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DHornos_de_gas_para_ceramistas_Uso_de_tec.pdf&Expires=1781646666&Signature=Cjc7X-GnT6sxoLnjOPiBUGsvV5KmXJcFYUvsQWJgrtgOp4dKZm7Ir6NunEWjL~BKvYPSBpxfjYDRp06GMkQZ1rhz0w8mMzDnuBMqMxXbVelHIoa9SgKGMQ49zh5Gn3XUYLESk0JPP79UumRMxUhKTon~pYJuzCCCqngx1qRr7224FcIGGgNrbJbjDIWFHEvRDFzFLCCC9fGiXilG5GL8VvRclvCLm-

Ingeniería Mecatrónica
Diseño y Construcción de un Horno Ahorrador de Energía Ecológico

- BuzwBRrQHAhFRXJp9VvAi-
45zu4LHxruT2NMXukBKSGqdfBQlOeXt05KMdF6e4AQPTk6UVsKIPLOEmYlzcLTdt7NqVjplnV8s9g
a82kmRr5JugbPD-NuT5HpQ__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA
- [7] Rhodes, D. (1984). *Hornos para Ceramistas*. España: 1ª Edición, Ediciones CEAC, S.A
https://books.google.com.ec/books/about/Hornos_para_ceramistas.html?hl=es&id=slIpAAAACAAJ
- [8] Incropera, F. P. and DeWitt, D. P. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor*. Pearson Educación.
https://www.google.com.mx/books/edition/Fundamentos_de_transferencia_de_calor/QqfJw4tpIjcC?hl=es&gbpv=0
- [9] Askeland, D. R. and Wright, W. J. (2017). *Ciencia e ingeniería de materiales* (7.ª ed.). Cengage Learning Editores, S.A. de C.V.
https://www.google.com.mx/books/edition/Ciencia_e_ingenier%C3%ADa_de_materiales/v0T2twEACAAJ?hl=es
- [10] Grüner, H. and Metz, R. (2005). *Procesos de cocina* (Vol. 25). Ediciones Akal.
- [11] KitchenMax Store. (s. f.). *Horno de convección*. https://kitchenmax.mx/products/horno-torrey-hec-4v-cqhec4v0039-horno-de-conveccion-electrico-restaurant-panaderia-cocina-industrial?pr_prod_strat=e5_desc&pr_rec_id=e0e751a7f&pr_rec_pid=9205274312925&pr_ref_pid=8178818580701&pr_seq=uniform
- [12] Schacht, C. (2004). *Refractories Handbook*. CRC Press.
<https://api.taylorfrancis.com/content/books/mono/download?identifierName=doi&identifierValue=10.1201/9780203026328&type=googlepdf>
- [13] Carniglia, S. C. and Barna, G. L. (1992). *Handbook of Industrial Refractories Technology: Principles, Types, Properties, and Applications*. Noyes Publications. <https://books.google.com.mx/books?id=j6O-Yc8nUmEC>
- [14] Artes Cerámicas. (s. f.). *Sistemas de ventilación y salida de gases de hornos*. <https://artesceramicas.com/2024/09/13/sistemas-de-ventilacion-y-salida-de-gases-en-hornos/>
- [15] Çengel, Y. A. and Ghajar, A. J. (2020). *Transferencia de calor y masa: fundamentos y aplicaciones*. McGraw-Hill.
https://books.google.com.mx/books/about/Transferencia_de_calor_y_masa.html?id=VX0K0QEACAAJ&redir_esc=y
- [16] Kalpakjian, S. and Schmid, S. R. (2002). *Manufactura, ingeniería y tecnología* (4ª ed.). Pearson educación.
https://www.google.com.mx/books/edition/Manufactura_ingenier%C3%ADa_y_tecnolog%C3%ADa/gilYI9_KKAoC?hl=es&gbpv=0
- [17] Groover, M. P. (1997). *Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas*. Prentice Hall.

Ingeniería Mecatrónica
Diseño y Construcción de un Horno Ahorrador de Energía Ecológico

- https://www.google.com.mx/books/edition/Fundamentos_de_manufactura_moderna/tcV0l37tUr0C?hl=es&gbpv=0
- [18] Secretaría de Energía. (2023). *NOM-010-SESH-2012, Aparatos domésticos para cocinar alimentos que utilizan gas L.P. o gas natural*. Especificaciones y métodos de Prueba. DOF. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5300565
- [19] Roy, J., Chandra, S., and Maitra, S. (2019). Nanotechnology in castable refractory. *Ceramics International*, 45(1), 19-29. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.09.261>
- [20] Hancock, D., Homfray, D., Porton, M., Todd, I., and Wynne, B. (2018). Refractory metals as structural materials for fusion high heat flux components. *Journal of nuclear materials*, 512, 169-183.. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2018.09.052>
- [21] Carrión, M. V. and Pilaquinga, F. (2020). Nanotecnología aplicada en materiales refractarios: una revisión. *infoANALÍTICA*, 8(2), 21-45. <https://infoanalitica-puce.edu.ec/index.php/infoanalitica/article/download/141/160>
- [22] Inoriza, R. (2003). Introducción a los materiales refractarios. *Técnica Industrial*, 248, 54-57. <https://www.tecnicaindustrial.es/wp-content/uploads/Numeros/6/43/a43.pdf>
- [23] Moreno, L. M. V. (2008). *Materiales industriales. Teoría y aplicaciones*. Instituto Tecnológico Metropolitano. <https://www.google.com.ec/search?tbm=bks&q=Materiales+industriales.+Teor%C3%ADa+y+aplicaciones&sei=-TIyavKiJcPmwN4PnaTNoQQ>
- [24] Díaz, L. A. and Torrecillas, R. (2002). Arcillas cerámicas: una revisión de sus distintos tipos, significados y aplicaciones. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 41(5), 459-470. <https://digital.csic.es/bitstream/10261/4676/1/arcillas.pdf>
- [25] JuCos. (12/06/2024). *¿Sabes algo sobre materiales refractarios?*. Zibo Jucos Co., Ltd. <https://www.jucosfirebrick.com/info/do-you-know-anything-about-refractory-material-96999389.html>
- [26] Alema Arquitectura. (s. f.). *Tipos de aislamiento térmico para una casa*. <https://alemarquitectura.com/aislamiento-termico-casa/>
- [27] Budynas, R. G. and Nisbett, J. K. (2008). *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley (8ª ed.)*. McGraw-Hill Interamericana de España S.L. https://www.google.com.mx/books/edition/DISE%C3%91O_EN_INGENIER%C3%8DA_MEC%C3%81NICA_DE_SHIG/4_bdPgAACAAJ?hl=es-419
- [28] Çengel, Y. A. (2006). *Mecánica de fluidos*. McGraw-Hill Interamericana de España S.L. https://www.google.com.mx/books/edition/Mec%C3%A1nica_de_fluidos/rAU1AAAACAAJ?hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwjG9IrRz42VAxWbHNAFHVDzMZEQiqUDegQIEBAC
- [29] Hibbeler, R. C. (2006). *Mecánica de Materiales*. Pearson Educación. https://www.google.com.mx/books/edition/Mecanica_de_Materiales/iCBye0_IEXsC?hl=es-419&gbpv=0

Ingeniería Mecatrónica
Diseño y Construcción de un Horno Ahorrador de Energía Ecológico

- [30] Norton, R. L. and Sánchez-García, G. (1999). *Diseño de máquinas*. Pearson educación, Prentice Hall.
https://www.google.com.mx/books/edition/Dise%C3%B1o_de_m%C3%A1quinas/BA5kPQAACAAJ?hl=es-419

ANEXO 1

Pruebas experimentales bajo la configuración operativa de la Etapa 1 experimental [pruebas sin el uso del horno]



Figura A1. Pesaje inicial de biomasa de prueba + vaporera de una prueba de Etapa 1.



Figura A2. Peso (kg) del sistema (vaporera + biomasa + agua) inicial (izq.) y final (der.) de una prueba de Etapa 1.

Ingeniería Mecatrónica
Diseño y Construcción de un Horno Ahorrador de Energía Ecológico



Figura A3. Flujo (dm^3) de consumo de gas LP inicial (izq.) y final (der.) de una prueba de Etapa 1.



Figura A4. Registro de la temperatura final interna de la vaporera en una prueba de Etapa 1.

ANEXO 2

Pruebas experimentales bajo la configuración operativa de la Etapa 2 experimental [pruebas con el uso del horno]



Figura A5. Registro de la temperatura final en el interior del horno (T1) [lectura superior] y en el interior de la vaporera (T4) [lectura inferior] en una prueba de Etapa 2.



Figura A6. Peso (kg) del sistema (vaporera + biomasa + agua) inicial (izq.) y final (der.) de una prueba de Etapa 2.

Ingeniería Mecatrónica
Diseño y Construcción de un Horno Ahorrador de Energía Ecológico



Figura A7. Flujo (dm^3) de consumo de gas LP inicial (izq.) y final (der.) de una prueba de Etapa 2.

ANEXO 3

Gráficos comparativos promedio de las pruebas experimentales bajo las configuraciones operativas de Etapa 1 vs Etapa 2 experimental

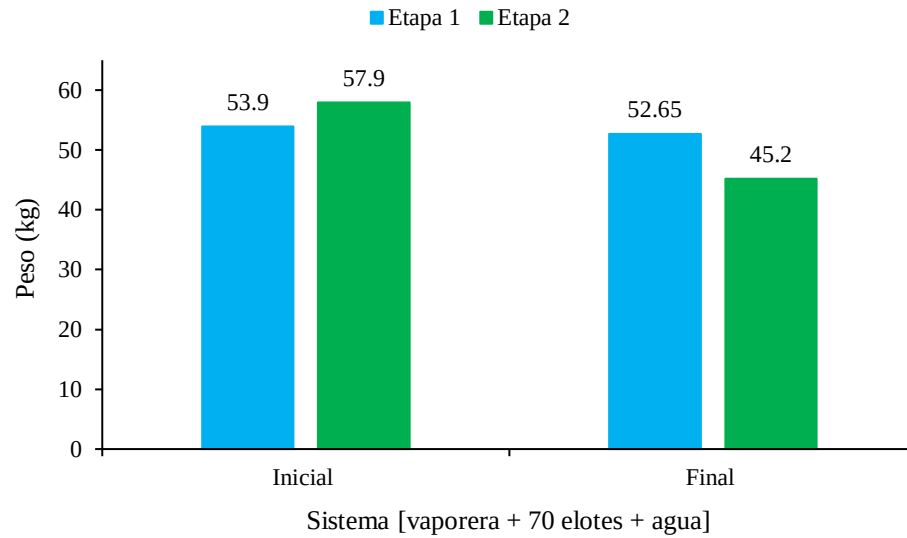


Figura A8. Comparativo del peso del sistema inicial y final en cada etapa.

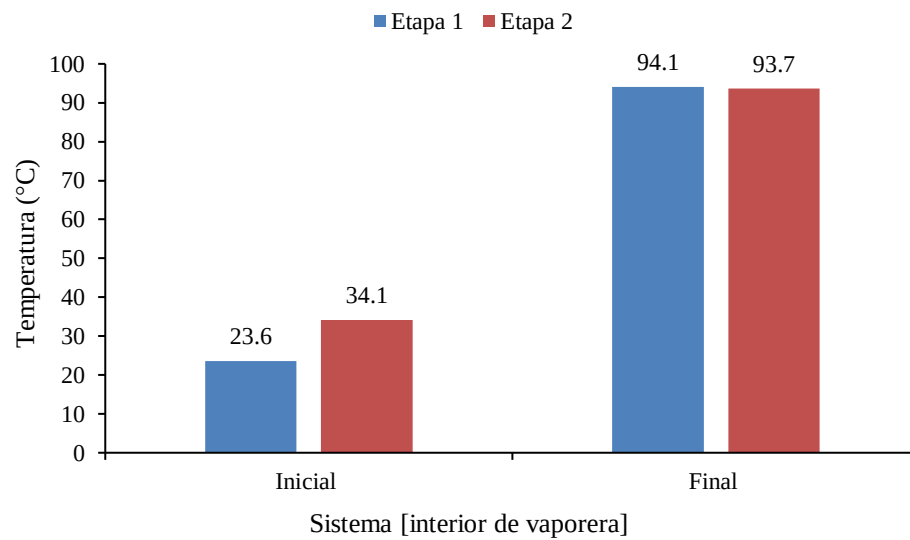


Figura A9. Comparativo de la temperatura inicial y final en el interior de la vaporera en cada etapa.

Ingeniería Mecatrónica

Diseño y Construcción de un Horno Ahorrador de Energía Ecológico

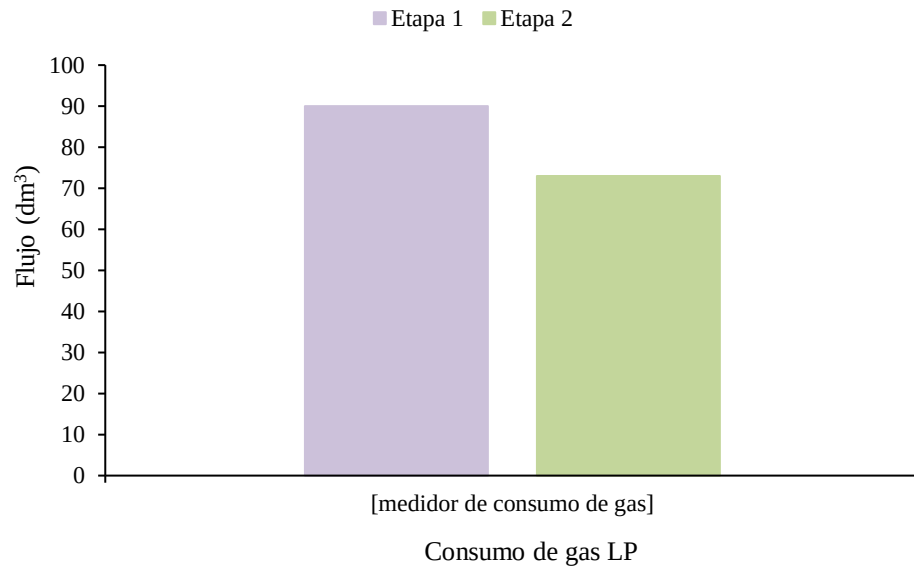


Figura A10. Comparativo del consumo de combustible (gas LP) en cada etapa.

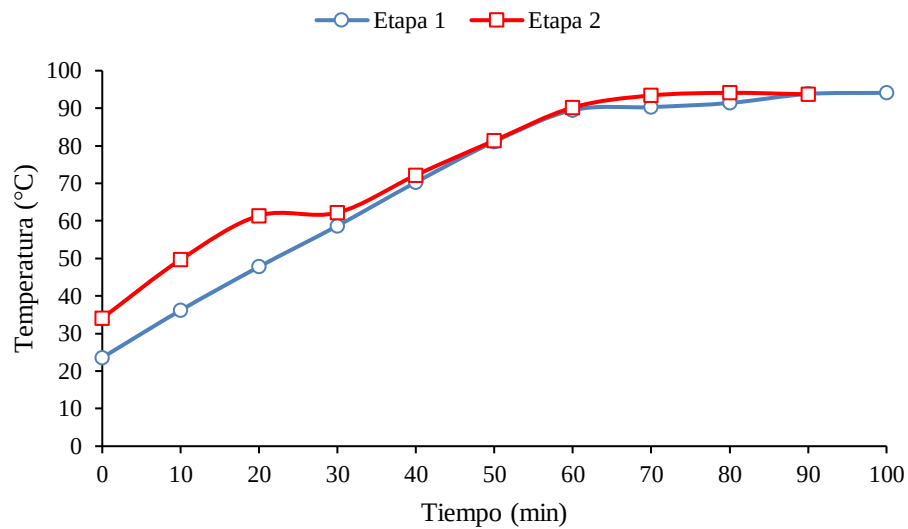


Figura A11. Comparativo del comportamiento térmico en el interior de la vaporera en cada etapa.