



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

LICENCIATURA EN CIENCIAS AMBIENTALES

Escuela Nacional de Estudios Superiores,
Unidad Morelia

EVALUACIÓN DEL PERFIL DE
EMISIONES DE UN CALENTADOR
RESIDENCIAL DE INTERIORES
ALIMENTADO CON PELLETS DE
ORIGEN AGROINDUSTRIAL

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

LICENCIADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

P R E S E N T A

MARLON GÓMEZ VARGAS

DIRECTOR (A) DE TESIS: DR. VÍCTOR MANUEL RUÍZ GARCÍA
CODIRECTOR (A) DE TESIS: DR. RICARDO MUSULE LAGUNES

MORELIA, MICHOACÁN

MAYO, 2023.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



ESCUELA
NACIONAL
de ESTUDIOS
SUPERIORES
UNIDAD MORELIA

10
años
(2011-2021)

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES UNIDAD MORELIA
SECRETARÍA GENERAL
SERVICIOS ESCOLARES

MTRA. IVONNE RAMÍREZ WENCE

DIRECTORA

DIRECCIÓN GENERAL DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR

P R E S E N T E

Por medio de la presente me permito informar a usted que en la **sesión ordinaria 01** del **Comité Académico** de la **Licenciatura en Ciencias Ambientales** de la Escuela Nacional de Estudios Superiores (ENES) Unidad Morelia, celebrada el día **20 de febrero de 2023**, se acordó poner a su consideración el siguiente jurado para la presentación del Trabajo Profesional del alumno **Marlon Gómez Vargas** de la Licenciatura en **Ciencias Ambientales**, con número de cuenta **417063755**, con el trabajo titulado: **"Evaluación del perfil de emisiones de un calentador residencial de interiores alimentado con pellets de origen agroindustrial"**, bajo la dirección como tutor del **Dr. Víctor Manuel Ruíz García** y como co-tutor al **Dr. Ricardo Musule Lagunes**.

El jurado queda integrado de la siguiente manera:

Presidente:	Dr. José Núñez González
Vocal:	Dra. Montserrat Serrano Medrano
Secretario:	Dr. Víctor Manuel Ruíz García
Suplente:	Dr. Raúl Jesús Tauro Suárez
Suplente:	Mtro. Juan Carlos Vázquez Tinoco

Sin otro particular, quedo de usted.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Morelia, Michoacán a 12 de abril de 2023.


DRA. YUNUEN TAPIA TORRES
SECRETARIA GENERAL

CAMPUS MORELIA

Antigua Carretera a Pátzcuaro N° 8701, Col. Ex Hacienda de San José de la Huerta
58190, Morelia, Michoacán, México. Tel: (443)689.3500 y (55)5623.7300, Extensión Red UNAM: 80614
www.enesmorelia.unam.mx

Agradecimientos Institucionales

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y a la Escuela Nacional de Estudios Superiores Unidad Morelia (ENES Morelia), por ser mi hogar y formarme como Licenciado en Ciencias Ambientales con enfoque en Ecotecnologías, así como a los profesores de las distintas áreas por su tiempo y los conocimientos brindados. También agradezco el apoyo del Fondo de Sustentabilidad Energética a través del proyecto SENER-CONACYT 2014 No.246911 Clúster de Biocombustibles Sólidos, Línea de Generación de Energía Térmica y Eléctrica por los recursos económicos, maquinaria y equipos brindados para la elaboración de este trabajo de tesis.

Al Laboratorio de Innovación y Evaluación en Bioenergía (LINEB) del Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad (IIES) de la UNAM, Campus Morelia, que me ofreció el espacio y la capacitación necesaria para llevar a cabo la investigación, contando siempre con los materiales, el equipo profesional y con todas las medidas necesarias para la realización de esta tesis.

A mis tutores el Dr. Víctor Manuel Ruíz García y el Dr. Ricardo Musule Lagunes, de quienes he aprendido y han sido de gran ayuda para la elaboración de esta tesis, teniendo paciencia, guiándome y apoyándome durante las diferentes etapas de esta investigación. A los técnicos del LINEB Juan Carlos Vázquez Tinoco y Saraí Ramos Vargas, quienes me brindaron los conocimientos y la capacitación necesaria para el uso del equipo en el laboratorio y me apoyaron durante mi experimentación y el análisis de los resultados. Agradezco al personal del Laboratorio de Bioenergía y de la Unidad de Ecotecnologías, especialmente a los técnicos académicos M. en C. René D. Martínez Bravo y al M. I. Alfredo F. Fuentes Gutiérrez por el apoyo para llevar a cabo esta tesis.

A mis sinodales Dr. José Núñez González, Dra. Montserrat Serrano Medrano, Dr. Raúl Tauro, Dr. Víctor Manuel Ruíz García y Mtro. Juan Carlos Vázquez

Tinoco quienes tuvieron la amabilidad y el compromiso de aceptar ser parte de mi jurado y brindarme las correcciones pertinentes al trabajo de investigación.

Agradecimientos Personales

A mi familia, en particular a Violeta Vargas, Graciela Figueroa, Ramon Figueroa y Jesús Villanueva, quienes me han educado y apoyado a lo largo de mi vida y me han enseñado a luchar por lo que quiero.

A mis hermanos, Sandra, Claudia, Asaret y Geño, quienes me han alentado a estudiar y trabajar. Tomándolos como ejemplo, para nunca darme por vencido y alcanzar mis metas.

A mis amigos, Miguel, Abraham, Mariana, Haydeé, Claudia, Ariana, Mez, Isabel, Miguel Ángel, Kendal y Luis Mario, con los que he compartido la mayor parte de mi vida, he vivido momentos inolvidables y me han enseñado a ser una mejor persona.

A mis compañeros y amigos de la universidad, especialmente a Daniela Rodríguez, Brayan Manzo, José del Río, Coral Mota, Rodrigo Arriaga, Tziraat Molina, Daniella Americano, Alan Ortega, Ulises Álvarez, Juan Martínez, Aldair Valencia y Valeria Ávila, con quienes me he formado y he pasado por una de las etapas más divertidas, formativas y productivas de mi vida.

Resumen

Derivado del aumento de la demanda por el uso y la quema de combustibles fósiles en los últimos años, se ha optado por utilizar fuentes de energía renovables y tecnologías más eficientes, con tal de obtener un menor impacto en el ambiente. Los biocombustibles, especialmente los pellets de biomasa forestal han sido utilizados como un medio para la producción de calor, sustituyendo de este modo a los combustibles convencionales como la leña, el carbón y el gas LP en las tareas de calefacción doméstica.

El objetivo de este trabajo es evaluar el perfil de emisiones de un calentador residencial derivado del uso de residuos agroindustriales de cáscara de coco y nuez en forma de pellets como combustible, para satisfacer la tarea de calefacción de interiores.

Se realizó un análisis proximal de los pellets utilizados, siguiendo los lineamientos de la norma europea *UNE-EN 14785: 2007*, posteriormente se aplicó el protocolo de evaluación de dispositivos de calefacción doméstica alimentados con pellets de origen forestal, en donde se evaluó el desempeño energético del dispositivo, así como las emisiones con impacto al medio ambiente y a la salud de los usuarios.

Los resultados de la caracterización nos muestran que los pellets utilizados son de buena calidad para usos no industriales, mientras que, derivado del desempeño energético los valores en potencia nominal y reducida se encuentran dentro de los parámetros que establece el calefactor, por lo que pueden ser utilizados para tareas de calefacción de interiores.

Se encontró que si existen diferencias significativas entre el perfil de emisiones de los pellets utilizados; estas diferencias se deben principalmente al tipo de operación del calefactor y en menor medida al tipo de combustible utilizado. En cuanto a las emisiones con impacto a la salud reportadas en la investigación los valores de CO y PM_{2.5} se encuentran por debajo de los valores permitidos en la norma *ISO 19867-2:2018*.

El uso del dispositivo a potencia nominal mejora el desempeño energético del

calefactor de interiores y reduce las emisiones derivadas de su uso, independientemente del combustible utilizado.

Abstract

Derived from the increase in demand for the use and burning of fossil fuels in recent years, it has been decided to use renewable energy sources and more efficient technologies, in order to obtain a lower impact on the environment. Biofuels, especially forest biomass pellets, have been used as a means for heat production, thus replacing conventional fuels such as firewood, coal and gas in domestic heating tasks.

The objective of this work is to evaluate the emission profile of a residential heater derived from the use of agro-industrial residues of coconut Shell and walnut in the form of pellets as fuel, to satisfy indoor heating tasks.

A proximal analysis of the pellets used in the research was carried out following the guidelines of the European standard UNE-EN 14785:2007, subsequently the evaluation protocol for domestic heating devices fed with pellets of forest origin was applied, where the energy performance of the device, as well as emissions with an impact on the environment and health.

The results of the characterization show us that the pellets used are of good quality for non-industrial uses, while, derived from energy performance, the nominal and reduced power values are within the parameters established by the heater, so they can be used for indoor heating tasks.

It was found that there are significant differences between the emission profile of the pellets used: these differences are mainly due to the type of heater operation and to a lesser extent to the type of fuel used. Regarding the intra-domiciliary emissions reported in the investigation, the values of CO and PM_{2.5} are below the values allowed in the ISO 19867-2:2018 standard.

Using the device at rated power improves the energy performance of the indoor heater and reduces emissions from its use, regardless of the fuel used.

Índice General

Agradecimientos Institucionales	i
Agradecimientos Personales	ii
Resumen	iii
Abstract	iv
Índice General	v
Índice de Tablas	vii
Índice de Figuras	viii
Glosario	ix
Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Estado Actual.	1
1.2 Justificación.	4
1.3 Objetivo General.	7
1.4 Objetivos Particulares.	7
1.5 Hipótesis.	7
Capítulo 2. Marco Teórico	9
2.1 Calefacción de interiores.	9
2.2 Calefactor.....	9
2.2.1 Tipos de Calefactores.	12
2.3 Impactos negativos asociados a la calefacción de interiores.....	13
2.4 Bioenergía y biomasa.....	16
2.4.1 Propiedades fisicoquímicas de la biomasa.	17
2.5 Biocombustibles sólidos.	18
2.5.1 Tipos de combustibles sólidos.....	18
2.5.2 Clasificación de los pellets.	20
2.5.3 Potencial de los biocombustibles sólidos en México.....	22
2.6 Calefacción del hogar con pellets.....	25
2.7 Normativa para la calefacción de interiores.....	26
Capítulo 3. Materiales y métodos	28
3.1 Caracterización de los pellets.....	29
3.1.1 Poder Calorífico Superior (PCS).....	30
3.1.2 Humedad.	31
3.1.3 Porcentaje de cenizas.	32
3.1.4 Materia volátil.	33

3.1.5 Carbono fijo.....	33
3.2 Evaluación del desempeño energético.....	34
3.2.1 Potencia térmica nominal.....	34
3.2.2 Potencia térmica reducida.....	35
3.3 Evaluación del perfil de emisiones.....	35
3.3.1 Medición de emisiones en la chimenea y fugitivas.....	37
3.3.2 Factor de emisión de pellets de cáscara de coco y nuez.....	38
3.4 Comparación con el sistema de referencia.....	39
3.5 Diseño de experimento y análisis estadístico.....	39
Capítulo 4. Resultados y Discusión.....	41
4.1 Caracterización fisicoquímica de los pellets.....	41
4.2 Desempeño energético del calefactor de interiores.....	43
4.3 Emisiones resultantes de la combustión.....	44
4.3.1 Evaluación de emisiones con impacto a la salud (intradomiciliarias).....	44
4.3.2 Evaluación de emisiones con impactos al medio ambiente (atmosféricas).....	45
4.4 Análisis de Componentes Principales a las variables.....	46
4.5 Análisis de variables mediante el ANOVA de dos factores.....	48
4.6 Comparación de emisiones con pellets de pino y encino.....	48
Capítulo 5. Conclusiones.....	51
5.1 Retos y Limitantes.....	52
5.2 Recomendaciones.....	52
Fuentes Consultadas.....	54
Anexo A. Equipos utilizados.....	63
Anexo B. Tablas y figuras complementarias.....	68

Índice de Tablas

Tabla 2.1. Emisiones intramuros máximas permisibles de CO y PM _{2.5} derivadas de la combustión de combustibles domésticos con ventilación y sin ventilación. Obtenida de WHO (2014).....	14
Tabla 2.2. Factores de emisiones predeterminados, concentraciones equivalentes y porcentaje de hogares que cumplen los criterios especificados para PM _{2.5} . Obtenida de ISO (2018).....	15
Tabla 2.3. Factores de emisiones predeterminados, concentraciones equivalentes y porcentaje de hogares que cumplen los criterios especificados para CO. Obtenida de ISO (2018).....	15
Tabla 2.4. Características de los principales combustibles sólidos utilizados en México.	19
Tabla 2.5. Valores especificados en la norma europea EN 14961-2 para el uso de pellets. ..	21
Tabla 2.6. Potencial sustentable de los BCS provenientes del sector forestal. Obtenida de Tauro, 2018.	23
Tabla 2.7. Potencial sustentable de los BCS provenientes del sector agrícola. Obtenida de Tauro, 2018.	24
Tabla 3.1. Valores de potencial de calentamiento global. Obtenida de Quiñones-Reveles et al., (2021).....	38
Tabla 4.1. Caracterización fisicoquímica de los pellets utilizados.	41
Tabla 4.2 Comparativo de los parámetros de desempeño energético de los combustibles con diferente potencia de operación.....	43
Tabla 4.3. Tasas de emisión intramuros de CO y PM _{2.5}	45
Tabla 4.4 Emisiones atmosféricas totales de CO ₂ , CO, CH ₄ , NH ₃ , PM _{2.5} , NO, NO ₂ , NO _x y SO ₂	46
Tabla 4.5 Influencia de la condición y el tipo de pellet en la variable analizada.	48
Tabla 4.6 Factores de emisión de CO _{2e} por kilogramo de combustible seco consumido.	49
Tabla 4.7 Factores de emisión por kilogramo de combustible seco consumido.	68
Tabla 4.8 Factores de emisión de CO _{2e} por kilogramo de combustible seco.....	68

Índice de Figuras

Figura 2.1. Esquema de las principales partes de un calefactor.	10
Figura 2.2. Esquema de las partes de un calefactor de interiores alimentado con pellets.	11
Figura 3.1. Diagrama de flujo de la metodología de la investigación	28
Figura 3.8. Diagrama general del montado del calefactor, los puntos de muestreo y los contaminantes medidos.	36
Figura 4.1. Gráfico de análisis de componentes principales a las variables de emisiones atmosféricas, contra las observaciones tipo de pellet y potencia de operación.	47
Figura 4.2 Emisiones de CO _{2e} por kg de combustible seco consumido, con pellets de coco, nuez, pino y encino a potencia nominal y reducida.	50
Figura 3.2. Calorímetro marca Parr modelo 6100.	63
Figura 3.3. Balanza analítica OHAUS – EX225D.	63
Figura 3.4. Horno de secado esmaltado marca NOVATECH modelo HS60-ED.	63
Figura 3.5. Mufa marca NOVATECH modelo MD-20.	64
Figura 3.6. Calefactor de interiores SM-10.	64
Figura 3.7. Báscula marca Advance RH modelo BAPLE.	65
Figura 3.9. TESTO modelo 340 USA.	65
Figura 3.10. Q-Track. Dispositivo utilizado para medir la concentración de CO y CO ₂ , además de la temperatura del flujo.	65
Figura 3.11. Cromatógrafo Young Lin modelo 6500.	66
Figura 3.12. Sistema gravimétrico PEMS.	67
Figura 3.13. Medidor de flujo Defender 520.	67
Figura 3.14. Bombas de succión.	67

Glosario

%C: Porcentaje de carbón.

%H: Porcentaje de hidrógeno.

%N: Porcentaje de nitrógeno.

%S: Porcentaje de azufre.

°C: Grado centígrado.

µm: Micrómetro.

BCS: Biocombustibles sólidos.

BCSD: Biocombustibles sólidos densificados.

C: Carbono.

CH₄: Metano.

CN: Carbono negro.

CO: Monóxido de carbono.

CO₂: Dióxido de carbono.

CO₂ e: Dióxido de carbono equivalente.

EC: Carbón elemental.

EPOC: Enfermedad Pulmonar Obstructiva Crónica.

GEI: Gases de Efecto Invernadero.

GLP: Gas Licuado de Petróleo.

In: Pulgada.

kW: Kilowatt.

LINEB: Laboratorio de Innovación y Evaluación en Bioenergía.

mg/min: Miligramo por minuto.

MJ/kg: Mega Joules por kilogramo.

NMHC: Hidrocarburos no metánicos.

N: Nitrógeno.

N₂O: Óxido nitroso.

NO_x: Óxidos de nitrógeno.

OC: Carbono orgánico.

PCS: Poder Calorífico Superior.

PEMS: Sistema portátil de medición de emisiones.

PJ/año: Petajoules por año.

PM_{2.5}: Material particulado de dos punto cinco micras.

ppm: Partes por millón.

Q-Track: Monitor de la concentración de CO y CO₂.

REMBIO: Red Mexicana de Bioenergía.

S: Azufre.

SENER: Secretaría de Energía.

SO_x: Óxidos de azufre.

NMHC: Hidrocarburos no metánicos.

UNAM: Universidad Nacional Autónoma de México.

UNE-EN: Una Norma Española - Normalización Española.

Capítulo 1. Introducción.

1.1 Estado Actual.

El consumo de energía global ha ido en aumento constante, y es derivado principalmente de dos factores: el aumento de la población mundial y el desarrollo socioeconómico de las naciones. Este aumento en el consumo de energía se ha visto reflejado en el uso excesivo de los combustibles fósiles, entre los cuales se encuentran principalmente el carbón, el petróleo y el gas natural (*IEA, 2011; Yildirim et al., 2012*).

Debido al consumo dominante de los combustibles fósiles para satisfacer la creciente demanda de energía, se emiten gases de efecto invernadero, los cuales provocan que la radiación infrarroja proveniente del sol se mantenga en la atmósfera generando, de esta manera, el calentamiento del planeta. Los principales Gases de Efecto Invernadero (GEI) provenientes de la quema de los combustibles fósiles son el dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), clorofluorocarbonos (CFCs) y gases afines (*Echeverri-Londoño, 2006; IPCC, 2014*), este tipo de emisiones han ido en aumento desde hace varias décadas. Aunado a ello se han generado a nivel global problemáticas como el calentamiento global, el cual se debe en gran medida a la explotación desmesurada de los recursos finitos del planeta para satisfacer necesidades básicas, pero sobre todo de excesivo confort (*Edenhofer et al., 2011; Moreno-López et al., 2017*).

De acuerdo con lo reportado por la Secretaría de Energía de México (SENER, por sus siglas), los principales sectores a nivel mundial en los que se consume la energía son en primer lugar el sector industrial con un 29.2%, en segundo el sector transporte con un 28.8% y en tercer lugar el sector residencial con un 21.3% del consumo total mundial de energía durante el año 2017 (*SENER, 2019*).

El consumo por sector en México es muy similar, ya que su matriz energética

depende en un 84.82% de los combustibles fósiles. El consumo total de energía primaria en México fue de 7826.61 PJ en 2020, y las fuentes fósiles aportaron en total 6638.53 PJ aproximadamente de toda la energía utilizada en el país; con la siguiente distribución: petróleo el 56.32% con 4407.94 PJ, gas natural el 25.67% con 2009.04 PJ y el carbón el 2.83% con 221.49 PJ (*SENER, 2020*).

Dentro del sector residencial se toma en cuenta el consumo energético en hogares urbanos y rurales, en donde los combustibles más consumidos, son la leña con 250.31 PJ, seguido del gas LP con 246.45 PJ y en tercer lugar la energía eléctrica con 212.95 PJ. Estas fuentes de energía se utilizan para satisfacer necesidades como la cocción de alimentos, calentamiento de agua, calefacción, iluminación, transporte, enfriamiento de aire y refrigeración (*SENER, 2018*).

Es importante mencionar que el consumo energético para satisfacer necesidades básicas es distinto para el sector urbano que en el rural. Ya que esto está determinado por diversos factores tales como el desarrollo económico y poblacional (*Sánchez, 2012*). El factor económico tiene una gran relevancia, debido a que los estratos con mayor poder adquisitivo tienen un mayor número de electrodomésticos con lo que aumenta considerablemente su consumo energético (*Escoto et al., 2016 & de Buen et al., 2016*). Dentro del factor poblacional se encuentra el contexto en dónde se ubica la vivienda, ya que determina la disponibilidad de los combustibles utilizados para satisfacer las necesidades del hogar, así como el acceso a la energía eléctrica, lo que hace aún más notoria esta diferencia en los hogares (*Sánchez, 2012*).

Ante el agotamiento y el aumento del costo de los combustibles fósiles; la necesidad de aprovechar fuentes de energía limpias, renovables y asequibles se ha convertido en una meta global. Por lo cual, la búsqueda de alternativas energéticas, el aprovechamiento más eficiente de los recursos y el cambio en los patrones de consumo actuales, son preocupaciones a nivel global (*Larrañaga, 2010*).

Una de las energías renovables más importantes en el mundo es la biomasa, para el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés), su potencial en el sistema energético mundial puede alcanzar desde los 100 a los 300 EJ por año, lo que equivaldría entre un 20% y 60% del consumo mundial de energía en 2030 (*Edenhofer et al., 2011*).

La biomasa está comprendida por todos aquellos compuestos que se generan a través de la fotosíntesis y que debido a su alto contenido de carbono pueden ser utilizados para producir energía mediante procesos térmicos o químicos. A través de esta, es posible producir diferentes tipos de combustibles: sólidos, líquidos o gaseosos tales como los pellets, las briquetas, carbón vegetal, alcoholes, biogás e Hidrógeno, entre otros (*Vargas et al., 2008; Speight, 2020*).

Los pellets son una transformación de la biomasa para su uso energético, tienen una aplicación avanzada debido a que son limpios, de fácil manejo y permiten la capacidad de autoalimentarse en las estufas y calderas que se utilizan. Actualmente, su principal función es la producción de calor a distintas escalas: ya que han sido utilizados para producir energía eléctrica en sistemas de cogeneración, para el calentamiento residencial e incluso en conjuntos de viviendas mediante sistemas de combustión (*Hansen et al., 2009; Vinterbäck, 2004*).

En general, los pellets son desarrollados a partir de residuos de la industria maderera; sin embargo, debido al crecimiento acelerado de la demanda de los pellets en el norte global, es necesaria la inclusión de diversas fuentes de biomasa, que de igual manera cumplan con los estándares de calidad solicitados, como la dureza y la resistencia al transporte, preferentemente un poder calorífico superior al de la leña y un bajo contenido de cenizas (*Núñez et al., 2012; Shang et al., 2012*).

Esta industria presenta un aumento a nivel global durante los últimos años, debido principalmente a las ventajas ambientales que ofrecen los pellets, así como a la facilidad de almacenamiento, transporte y duración. Por lo que cada vez son más los países que realizan estudios para determinar el potencial que representa su uso, en un mercado que satisface más de 7.5 millones de toneladas al año a nivel mundial (*Di Giacomo & Taglieri, 2009; Goh et al., 2013*).

Desde hace varias décadas comenzó a consolidarse el pellet como un combustible utilizado en la calefacción, principalmente doméstica; lo cual se ve reflejado en la producción mundial de pellet, ya que para el 2019 se produjeron cerca de 40 millones de toneladas, de las cuales la mitad estaba destinada al mercado doméstico (*Ayala-Álvarez et al., 2021*). Durante sus inicios la industria había estado utilizando principalmente residuos de madera para la producción de estos, sin embargo, son cada vez más frecuentes la presencia de otras fuentes de biomasa, como los residuos agrícolas y agroindustriales (*Núñez et al., 2012*).

1.2 Justificación.

La calefacción es una necesidad básica del ser humano, en las zonas urbanas, esta necesidad se resuelve a través de grandes consumos eléctricos, gas natural y Gas Licuado de Petróleo (GLP). Por otro lado, en zonas rurales y periurbanas, estas tareas de confort térmico se llevan a cabo mediante el uso de fuegos abiertos (tres piedras o tipo “U”), desafortunadamente estas tecnologías presentan desempeños energéticos muy pobres, emisión de contaminantes con impacto al medio ambiente y a la salud de los usuarios e inclusive riesgo de incendios y quemaduras por la operación de estas tecnologías al interior del hogar (*Masera et al., 2011*).

La contaminación intramuros es una problemática muy relevante, ya que se ha reconocido como uno de los principales contribuyentes a la carga mundial de enfermedades respiratorias, debido a la exposición a altas concentraciones de

partículas respirables (PM_{2.5}), gases y otros compuestos tóxicos (como el monóxido de carbono), generados principalmente por la poca ventilación, el uso de dispositivos ineficientes y combustibles contaminantes al interior de los hogares (*Masera et al., 2007*). En México alrededor de 28 millones de personas usan la leña para cocinar sus alimentos y calentar su vivienda, tarea que realizan a través del fogón de tres piedras, lo que aumenta considerablemente la intoxicación que reciben las personas por estar expuestas al humo del fogón (*Díaz et al., 2011*).

Por lo tanto, la innovación en los dispositivos de calefacción, específicamente el uso de dispositivos limpios y eficientes en lugar de fuegos abiertos tiene el potencial de mitigar gases de efecto invernadero a corto plazo en el sector residencial. Así mismo, el cambio en el combustible utilizado también puede suponer una mejora sustancial, ya que al hacer uso de biocombustibles sólidos como los pellets se obtienen mejoras respecto a la biomasa tradicional, tales como un menor contenido de cenizas, C, S, N y por lo tanto menores tasas de emisión de NO_x y SO₂ (*Ruiz-García et al., 2018*).

Actualmente, la generación de residuos agroindustriales se ha convertido en una problemática a nivel mundial, debido a que en la mayoría de los casos no son procesados adecuadamente, lo que contribuye a la contaminación ambiental (*Corredor & Pérez, 2018; Saval, 2012*). De tal forma que el aprovechamiento de estos residuos podría dar solución a diferentes problemáticas ambientales originadas por la generación y disposición de estos; disminuir el uso de recursos naturales; generar empleo y recursos económicos durante su aprovechamiento (*Ramírez Bayas, 2012*).

En esta investigación se explora el uso de diversos residuos agroindustriales para la producción de pellets, debido a dos factores: 1) el aumento en el precio del GLP (principal combustible utilizado para la calefacción de interiores), originado por el agotamiento de este combustible y; 2) que los residuos provenientes de la agroindustria en su mayoría no tienen un uso y regularmente se

quemar sin ningún aprovechamiento energético e incontroladamente, lo que resulta en una contribución directa de GEI. Por lo que su uso en tecnologías modernas como los calefactores de interiores podría generar un valor agregado a estos residuos y a la vez, satisfacer las necesidades térmicas del sector residencial (*Uslu et al., 2010; Carvalho et al., 2013*).

Particularmente, en este estudio se explora el uso de la cáscara de coco (*Cocos nucifera*) y nuez pecana (*Carya illinoensis*) y su potencial para generar energía térmica a través de su combustión en un calefactor residencial de interiores alimentado con pellets. Se utilizaron los residuos de estas biomásas en primer lugar, porque son de los productos agrícolas que más han aumentado su producción en recientes años; aunado a ello, actualmente ya se encuentran en los primeros pasos de producción de pellets a pequeña escala (*Ávila-Arce et al., 2020; SADER, 2022*).

El principal interés es conocer las características físicas y químicas de los pellets elaborados a partir de los residuos mencionados, así como evaluar el desempeño energético y el perfil de emisiones generadas durante el uso del calefactor.

Con la finalidad de que los datos obtenidos contribuyan a tener un análisis general del desempeño de los combustibles utilizados y las tecnologías disponibles en México; conocer si existen ahorros energéticos y por ende una posible mitigación de GEI, así como una reducción de la contaminación intramuros.

Debido a que actualmente no se cuenta con suficiente información para conocer los impactos en términos de salud, emisiones al ambiente y desempeño en los dispositivos; esta investigación servirá de base para generar mecanismos de innovación que satisfagan la necesidad de calefacción, en el sector residencial mexicano. Asimismo, aportará información innovadora para impulsar el mercado mexicano de pellets de origen agroindustrial y el uso de calefactores.

1.3 Objetivo General.

Evaluar el perfil de emisiones de un calefactor residencial de interiores alimentado con pellets de residuos agroindustriales de cáscara de coco (*Cocos nucifera*) y nuez pecana (*Carya illinoensis*).

1.4 Objetivos Particulares.

- Caracterizar física y químicamente los pellets de residuos agroindustriales del mesocarpio de la cáscara de coco y el endocarpio de la cáscara de nuez pecana (poder calorífico, humedad, cenizas, carbono fijo y volátiles).
- Analizar el perfil de emisiones (dióxido de carbono, monóxido de carbono, metano, compuestos no metánicos, compuestos nitrogenados y dióxido de azufre) de un calefactor de interiores alimentado con los dos diferentes tipos de pellets.
- Evaluar los desempeños energéticos en potencia nominal y potencia reducida (tasas de consumo, potencia de operación, carbón residual y eficiencia de combustión).
- Comparar los perfiles de emisión obtenidos para los dos diferentes tipos de pellets con otras fuentes de energía de sistemas de calefacción de interiores de biomasa comercial como los pellets de pino y encino.

1.5 Hipótesis.

1. Si existieran diferencias entre los pellets, entonces habrá diferencias significativas ($p < 0.05$) en las propiedades fisicoquímicas de los pellets utilizados en esta investigación.
2. Si existieran diferencias entre los pellets utilizados como combustible y el cambio de potencia de operación del calefactor de interiores, entonces habrá diferencias significativas ($p < 0.05$) en el perfil de emisiones.

3. Sí se utilizan pellets de residuos agroindustriales, entonces habrá una menor cantidad de emisiones en comparación con los pellets de pino y encino.

Capítulo 2. Marco Teórico.

2.1 Calefacción de interiores.

La calefacción es definida como el conjunto de aparatos que conforman un sistema y sirven para calentar un lugar determinado, regularmente un hogar o un espacio delimitado. De forma general los sistemas de calefacción permiten elevar la temperatura de un determinado espacio, en relación con la temperatura exterior para generar una sensación de comodidad para los seres humanos.

La calefacción es una necesidad térmica básica para el ser humano, principalmente en regiones con baja temperatura, durante la época de lluvias o el periodo invernal, teniendo vital importancia tanto en zonas rurales como urbanas. En zonas rurales, se tiene evidencia de que cerca del 40% de la población mundial sigue utilizando algunos combustibles sólidos como la leña, el carbón vegetal, entre otros, para calentar sus hogares (*Bonjour et al., 2013*). En cambio, en las zonas urbanas es más común el uso de GLP e incluso hay cada vez más presencia de calefactores eléctricos, sin embargo, su uso no es una solución sostenible a largo plazo, ya que funcionan con combustibles finitos y que cada vez son más costosos para los usuarios.

La idea de calefacción ha estado ligada al ser humano desde hace cerca de 450,000 años, con el dominio del fuego. Sin embargo, las llamas sin control traían consigo una variedad de peligros, desde quemaduras hasta intoxicaciones y daños a la salud, generados por el humo. La implementación de algunas tecnologías como las chimeneas ayudaron a solucionar el control de la llama, pero no fue hasta la llegada de las estufas eficientes y particularmente de los calefactores que se redujeron las emisiones, de la mano de una combustión más eficiente.

2.2 Calefactor.

Un calefactor es un aparato que proporciona un flujo constante de aire caliente,

mediante una fuente de calor y un ventilador, que calienta el aire y lo emite al exterior, calentando el ambiente o espacio a su alrededor.

De manera general un calefactor está integrado por tres partes principales: 1) *un sistema de producción de calor*, que puede ser una caldera a base de algún combustible, un sistema de resistencias o a través de energía calorífica natural o residual; 2) *un sistema de reparto*, constituido por conductos a través de los cuales circula el calor y; 3) *un sistema de emisión*, generalmente radiador o rejillas de impulsión del aire. Estas partes se pueden apreciar en la *Figura 2.1*, en la cual se observa un calefactor de calentamiento de agua y aire, aunque también existen de calentamiento exclusivos para uno u otro.

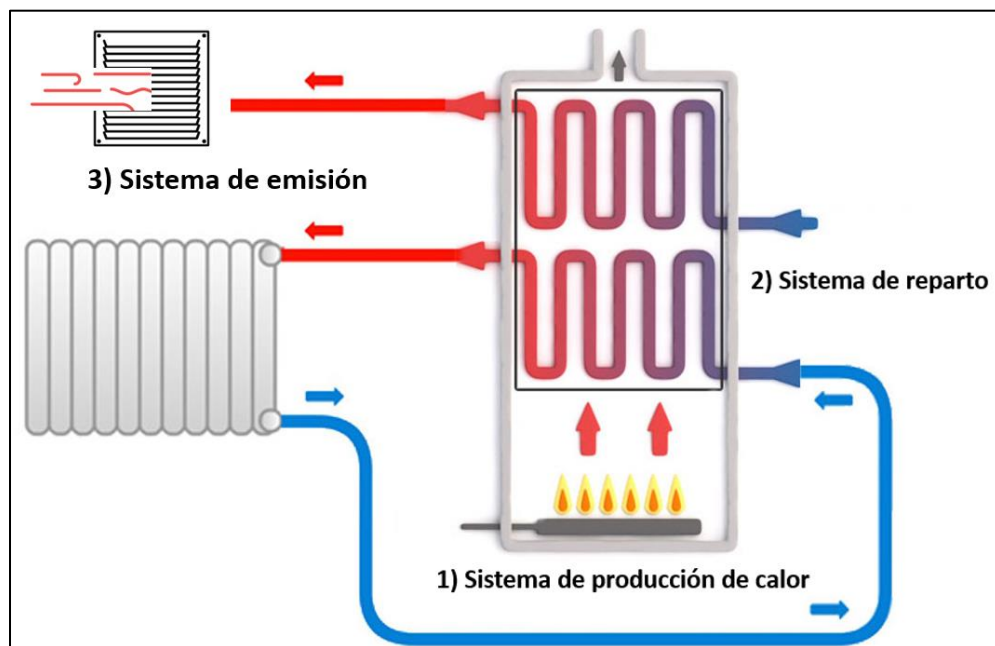


Figura 2.1. Esquema de las principales partes de un calefactor.

Elaboración propia.

Particularmente en esta investigación se utilizó un calefactor de interiores alimentado con pellets, tal como el que se puede apreciar en la *Figura 2.2*. Su funcionamiento es muy similar ya que, durante el encendido del dispositivo, una resistencia eléctrica, cercana al cenicero con pellets se calienta hasta iniciar la

combustión de los pellets, posterior a la primera llama, se arranca de forma automática la ventilación de la cámara de fuego, pasando un chorro de aire por el cenicero con el fin de avivar la llama. Tras el encendido, la estufa entra en funcionamiento cargando paulatinamente el cenicero a través del tornillo sin fin y ventilando la cámara.

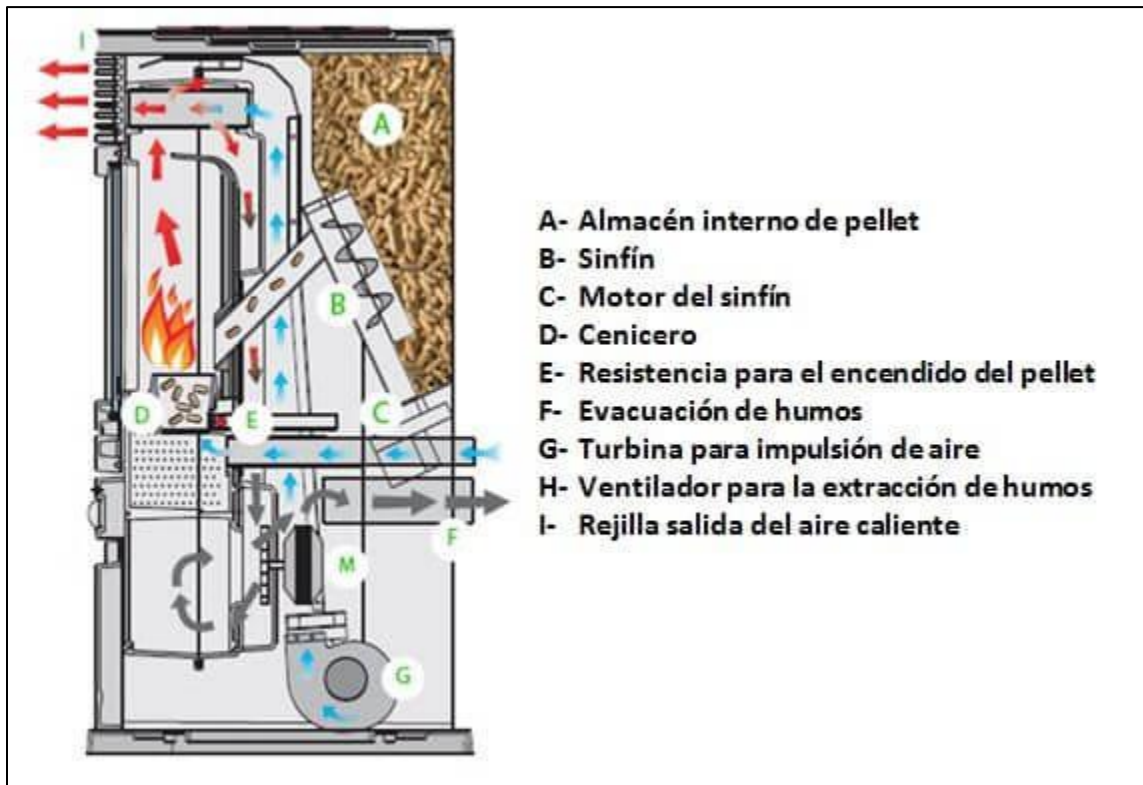


Figura 2.2. Esquema de las partes de un calefactor de interiores alimentado con pellets.

El dispositivo cuenta con varios sensores que hacen posible que esté se encienda y se apague al llegar a la temperatura deseada, la cual es indicada a través del panel de control; de tal forma que comience a calentarse de nuevo cuando haya bajado la temperatura por debajo de lo deseado.

El calefactor calienta principalmente, a través de su ventilación, haciendo pasar el aire frío que entra a la máquina a través de una boca en la parte trasera del dispositivo, pasa por el intercambiador y es expulsado por la parte frontal de forma

canalizada. En ningún momento este aire está en contacto con el fuego o los gases de la combustión, con la finalidad de extraer el humo que se genero durante la combustión y mantener una buena calidad del aire en el área que está siendo calentada.

Según sea el tamaño de la instalación existen dos tipos de calefactores, los locales en los que el dispositivo empleado emite calor para un solo cuarto o local y los centralizados en donde se produce calor en una sola caldera y se reparte hacia todos los lugares que se desean calentar.

2.2.1 Tipos de Calefactores.

Los calefactores se pueden clasificar de acuerdo con el origen de la energía que utilizan para generar calor, tal como se describe a continuación:

- a) *Combustible*: donde utiliza una caldera a base de un combustible sólido (leña, carbón, briquetas, chips o pellets), líquido (diésel, gasolina o combustóleo) o gaseoso (GLP).

Algunos de los inconvenientes están asociados directamente al tipo de combustible utilizado y por ende al tipo de combustión que estos permiten, los combustibles permiten una combustión continua, es decir que no termina hasta que se termina el combustible utilizado o se corta completamente la entrada de aire, pero su funcionamiento está limitado a la cantidad de combustible que puede almacenar. En el caso de los líquidos y gaseosos su funcionamiento es intermitente, ya que el calor se regula apagando y prendiendo el quemador y es más difícil que se mantenga la temperatura en un espacio abierto.

- b) *Electricidad*: en el cual se utilizan algunas resistencias para convertir la electricidad en calor a través del efecto joule. Su principal inconveniente es que, a pesar de su buen funcionamiento, el precio de la energía eléctrica en

comparación con los otros combustibles es muy elevado y que este sistema no podría ser utilizado en lugares en donde no hay acceso a este servicio.

- c) *Sistema híbrido*: que utiliza una bomba de calor y un sistema eléctrico de forma simultánea, en donde un programa determina cuando la bomba funciona y cuando se hace uso de la energía eléctrica para mantener la temperatura deseada. A pesar de ser los que tienen el mejor desempeño, son los menos utilizadas, porque el dispositivo como tal es el más costoso y solo está disponible en los países más desarrollados.

2.3 Impactos negativos asociados a la calefacción de interiores.

La mayoría de los impactos que se pueden atribuir a la calefacción de interiores, están asociados a la propia quema de los combustibles, los cuales son utilizados para obtener calor. Estos impactos se pueden concentrar en dos grupos: 1) *los impactos al medio ambiente*, generados principalmente por la presencia de los gases de efecto invernadero de larga y corta duración como el dióxido de carbono y el metano respectivamente, resultado de la combustión, los cuales contribuyen de manera directa al calentamiento global (*Smith et al., 2007; Arora & Jain, 2016*); y 2) *los impactos a la salud humana* ya que gran parte de las actividades humanas se realizan en interiores (escuelas, edificios, oficinas, etc.) y como menciona *Armendáriz-Arnez (2010)* “la contaminación intramuros se ha relacionado recurrentemente con infecciones respiratorias agudas, cáncer de pulmón, cataratas, ataques de asma e inclusive enfermedades cardiovasculares”. Como prueba de ello, durante el año 2010, la contaminación intradomiciliaria en dispositivos tradicionales fue el tercer factor de riesgo en mortalidad en el mundo con cerca de 3.5 millones de muertes en el año (*Lim et al., 2013*).

Los principales factores derivados de la contaminación intradomiciliaria que influyen en la salud de las personas son la concentración de contaminantes en el aire, la cual depende del tipo de combustible que se vaya a quemar, la cantidad de

materia y de que tan eficiente es la combustión; por otro lado, la exposición depende de la cantidad de contaminantes que se respiren y durante cuánto tiempo. También es importante mencionar que los efectos a la salud dependen no solamente de la exposición sino también de las características del individuo como la edad, sexo y si presenta alguna otra enfermedad (*Smith, 2013*).

Siguiendo esta idea la Organización Mundial de la Salud (WHO por sus siglas en ingles), publicó una guía en donde se hacen las recomendaciones y especificaciones que deben seguirse para reducir las emisiones intramuros, tal como se puede apreciar en la *Tabla 2.1* en donde se detallan las tasas de emisiones intramuros máximas permisibles por la actividad de combustión de combustibles domésticos.

Tabla 2.1. Emisiones intramuros máximas permisibles de CO y PM_{2.5} derivadas de la combustión de combustibles domésticos con ventilación y sin ventilación. Obtenida de WHO (2014).

RECOMENDACIÓN	TASAS OBJETIVO DE EMISIONES		INTENSIDAD DE RECOMENDACIÓN
Las tasas de emisión de la combustión doméstica de combustible no deben exceder los siguientes objetivos de tasa de emisión (ERTs) de PM _{2.5} y CO.	PM _{2.5} (sin ventilación)	0.23 (mg/min)	FUERTE
	PM _{2.5} (ventilado)	0.80 (mg/min)	
	CO (sin ventilación)	0.16 (g/min)	
	CO (ventilado)	0.59 (g/min)	

Por otro lado, la *International Organization for Standardization (2020)* emitió una guía distinta en la que se presentan distintos niveles de rendimiento, de acuerdo con los valores de concentración y la emisión registrada de dichos contaminantes. Estas guías se muestran en la *Tabla 2.2* y *2.3*, que corresponden a los niveles de PM_{2.5} y CO respectivamente.

Tabla 2.2. Factores de emisiones predeterminados, concentraciones equivalentes y porcentaje de hogares que cumplen los criterios especificados para PM_{2.5}. Obtenida de ISO (2018).

Nivel	Riesgo Relativo	Tasa de emisión normalizada (mg/min)	Concentraciones (µg/m ³)	Porcentaje de hogares que cumplen con el nivel
5	1.0	≤ 0.2	≤ 10	≥ 90
4	≤ 1.5	≤ 2.7	≤ 50	≥ 50
3	≤ 2.5	≤ 9.5	≤ 170	≥ 50
2	≤ 3.0	≤ 21	≤ 400	≥ 50
1	≤ 3.15	≤ 45	≤ 800	≥ 50
0	> 3.15	> 45	> 800	< 50

Nota: El nivel se expresa de 0 a 5, donde 0 es un valor para el rendimiento más bajo y 5 para el mejor rendimiento de acuerdo con los factores de emisión.

Tabla 2.3. Factores de emisiones predeterminados, concentraciones equivalentes y porcentaje de hogares que cumplen los criterios especificados para CO. Obtenida de ISO (2018).

Nivel	Factos de emisión (g/MJ _d)	Tasa de emisión normalizada (mg/min)	Concentración de 24h al 50% de cobertura (mg/m ³)	Porcentaje de hogares que cumplen con el nivel
5	≤ 3.0	≤ 133	≤ 2,3	≥ 90
4	≤ 4.4	≤ 190	≤ 3,2	≥ 80
3	≤ 7.2	≤ 315	≤ 5,4	≥ 60
2	≤ 11.5	≤ 500	≤ 8,8	≥ 40
1	≤ 18.3	≤ 800	≤ 14	≥ 20
0	> 18.3	> 800	> 14	< 20

Nota: Los informes se basan en el factor de emisión y la tasa de emisión normalizada. Las emisiones se expresan en g/MJ_d donde MJ_d se refiere a la energía en MJ entregada para la tarea. El nivel se expresa de 0 a 5, donde 0 es un valor para el rendimiento más bajo y 5 para el mejor rendimiento de acuerdo con los factores de emisión.

Con base en lo anterior se presenta el desafío de realizar la transición hacia

fuentes de energía renovables, que sean más limpias, accesibles para la mayor parte de la población y que de igual forma nos permitan satisfacer las necesidades energéticas de la población mundial.

2.4 Bioenergía y biomasa.

Una de las alternativas energéticas más relevantes para poder disminuir los impactos ambientales, favorecer la apertura de nuevos mercados con potencial para la generación de empleos y la disminución de los impactos a la salud de los usuarios es la del uso de la bioenergía (*Paneque et al., 2011*). Esta es un tipo de energía renovable que hace uso de la biomasa como fuente de energía; siendo la renovable con mayor participación a nivel mundial con un 12.4% de la energía primaria y en el caso de México con un 5.23% (*Kusch-Brandt, 2019; SENER, 2017*).

Esta energía es definida como la que se obtiene de la biomasa producida o que aún es constituyente de los seres vivos. Comprende a toda aquella materia que está destinada a producir energía específicamente, aquella que cumple diversas funciones, así como sus subproductos e incluso sus residuos (*FAO, 2018*).

La bioenergía es una fuente de energía utilizable con tecnologías modernas y también con tecnologías tradicionales como los fogones de leña (*García et al., 2013*). Sin embargo, es importante mencionar que, aunque la producción de biomasa es renovable, esta es limitada por factores como la disponibilidad de superficie, el agua destinada para su cultivo o la capacidad para transportarla (*Esteban, 2015*).

Algunas de las ventajas que presenta la biomasa es que:

- es la única renovable que puede sustituir a los combustibles fósiles en todos los mercados energéticos, porque permite producir calor, electricidad y biocarburantes líquidos (*Larrañaga, 2010*);

- puede ser almacenada, lo que permite planificar y dar certeza a su suministro; también puede ser producida y utilizada local o regionalmente, evitando el transporte de largas distancias (*García et al., 2013*);
- es posible producir distintos tipos de biocombustibles sólidos, líquidos y gaseosos, entre los cuales se encuentran las briquetas, los pellets, el carbón vegetal, alcoholes, biohidrocarburos, aceites de pirólisis, biogás e Hidrógeno, entre otros (*Speight, 2008*);
- generalmente, la utilización de estos biocombustibles constituye un ciclo cerrado de carbono, debido a que las emisiones se consideran neutras por el origen de la materia prima (*FAO, 2018*).

Derivado de todas estas aplicaciones, su uso a nivel mundial sigue siendo muy relevante, de manera más específica es la fuente de energía que más aporta a la demanda de energía renovable, en la actualidad, ésta representa el 47% de la energía renovable utilizada a nivel mundial (*REN21, 2014; García et al., 2015*).

Según lo reportado por *Chum et al. (2011)* se ha estimado que alrededor del 77% del consumo total de la biomasa a nivel global se da en los usos tradicionales en donde se encuentra principalmente la cocción de alimentos y la calefacción en el sector residencial, en países en vías de desarrollo que comúnmente la utilizan en forma de leña y carbón vegetal. Por otro lado, el 23% restante se utiliza en los usos modernos como la generación de energía eléctrica y calor en procesos industriales.

2.4.1 Propiedades fisicoquímicas de la biomasa.

La biomasa de manera general se caracteriza por tener bajas concentraciones de carbono y azufre, así como altas concentraciones de oxígeno y compuestos volátiles conformados principalmente por CO₂, CO, H₂ y por largas cadenas C_nH_m; composición que da origen al poder calorífico de la biomasa.

Cuando se realizan investigaciones relacionadas con el uso de la biomasa se

recomienda hacer una caracterización de la biomasa mediante dos tipos de análisis: a) análisis proximal: en el que se determinan valores como la humedad, el contenido de volátiles, carbono fijo y cenizas; b) análisis elemental: el cual sirve para determinar los contenidos de C, H, O, N, S, además de que sirve para determinar los balances de masa y energía de la combustión (*Bustamante-García et al., 2016; Corredor, 2008*).

2.5 Biocombustibles sólidos.

Los fines de esta investigación hacen necesaria la acotación a los biocombustibles sólidos, los cuales son “carburantes compuestos por materia orgánica, de origen vegetal o animal, susceptibles de utilizarse en aplicaciones energéticas; estos son obtenidos mediante procesos físicos, tales como la compactación, astillado o trituración, o como subproductos de actividades agrícolas y forestales. De manera general para la producción de energía térmica y eléctrica se emplean combustibles sólidos generados a través de biomasa residual de actividades forestales o agroindustriales” (*Ríos-Bádran et al., 2017*).

Estos biocombustibles pueden ser de *primera generación*: los cuales son provenientes directamente de los cultivos agrícolas y regularmente destinados a la alimentación humana; los de *segunda generación* son producidos a partir de materias primas que no son fuentes alimenticias o que son desechos de los de primera generación (*Salinas & Quezada, 2009; Rodríguez, 2018*).

A pesar de que la biomasa en comparación con otros combustibles posee una baja densidad energética, un alto contenido de humedad y un bajo poder calorífico; existen diversos métodos para mejorar estas características, entre los que destacan el densificado, la reducción gravimétrica, la pirolisis y la torrefacción (*Bustamante-García, 2016*).

2.5.1 Tipos de combustibles sólidos.

La biomasa sólida es muy importante, ya que puede tener ciertos roles a corto y

mediano plazo en la transición energética de México y el mundo ya que, al ser una fuente de energía renovable, distribuida alrededor del mundo y actualmente disponible para la mayoría de las personas, puede sustituir a los combustibles fósiles y satisfacer diversas necesidades como la generación de calor y energía eléctrica por mencionar algunas (*García & Masera, 2016*). Los principales combustibles sólidos y sus características generales se muestran en la *Tabla 2.4*.

Tabla 2.4. Características de los principales combustibles sólidos utilizados en México.

Elaboración propia a partir de REMBIO, 2018.

Nombre del Combustible	Características
<p style="text-align: center;">Leña</p> 	<p>Es la parte de los árboles o arbustos, proveniente de especies vegetales forestales o agrícolas leñosas, que son troceadas para utilizarse con fines energéticos.</p>
<p style="text-align: center;">Carbón Vegetal</p> 	<p>Es un material combustible frágil y poroso que se obtiene mediante el calentamiento de la madera en ausencia de aire, liberando de esta vapor y gases. De esta forma el carbón tiene un mayor contenido energético y solo una cuarta parte del peso inicial (<i>REMBIO, 2018</i>).</p>
<p style="text-align: center;">Astillas</p> 	<p>Son trozos pequeños de entre 5 y 100 mm, los cuales proceden de la fragmentación de materiales leñosos forestales o agrícolas, y que pueden estar formados tanto por madera como corteza. Su calidad dependerá de la materia prima que proceden y de la tecnología del astillado, generalmente se tienen las de primera clase provenientes de la industria forestal y las de segunda clase que vienen de los tratamientos silvícolas, agrícolas o forestales.</p>

<p style="text-align: center;">Briquetas</p> 	<p>Son cilindros de 50 a 130 mm de diámetro y de 5 a 30 mm de longitud, los cuales se fabrican por medio de prensas, en las que el material es sometido a grandes presiones y se calienta, generando en su interior productos adherentes que favorecen la cohesión del material, aunque en algunas ocasiones se añaden adherentes para facilitar su unión y reducir la presión (REMBIO, 2018).</p>
<p style="text-align: center;">Pellets</p> 	<p>Son cilindros pequeños de 6 a 8 mm de diámetro y de 10 a 40 mm de longitud. Estos se fabrican mediante prensas de granulación, con una materia prima más pequeña. La compactación se consigue de forma natural a través de la presión y la adición de temperatura.</p>

2.5.2 Clasificación de los pellets.

Los pellets se clasifican de acuerdo con la calidad que estos presentan, basándose principalmente en el origen de sus componentes y la presencia o no de partículas contaminantes en su interior. Esta clasificación se desprende de la certificación que emplean dos empresas principalmente: la primera perteneciente al “*European Pellet Council*” que otorga el certificado EN plus, siendo esta la más conocida en Europa y el mundo; por otro lado, se encuentra DIN plus el cual pertenece a la certificadora alemana DIN CERTCO. Es importante mencionar que debido a su mayor presencia en el mercado dichas clasificaciones solo aplican para los pellets de origen forestal de uso no industrial y que aún no existe una clasificación similar para los pellets de residuos agrícolas o agroindustriales (Navarro, 2021).

Según estas certificaciones, actualmente existen tres niveles de calidad estandarizadas de forma global, las cuales se describen a continuación:

- *Clase A1:* Se fabrican con madera que viene directamente de recursos forestales sin ningún tipo de tratamiento químico. Regularmente tienen un bajo contenido de cenizas y nitrógeno.
- *Clase A2:* Son similares a los de clase 1, pero tienen un mayor contenido de cenizas y nitrógeno, debido principalmente a la especie forestal que es utilizada.
- *Clase B:* Se fabrican a través de maderas recicladas y regularmente muestran otro tipo de componentes debido a los procesos por los que pudo haber pasado la madera.

En la *Tabla 2.5* se presentan los principales valores de los parámetros más relevantes que deben cumplir los pellets, los cuales van acorde a las normas de ensayo especificadas en la norma *EN- 14961-2*.

Tabla 2.5. Valores especificados en la norma europea *EN 14961-2* para el uso de pellets.

Obtenida de Duca et al., 2014.

PARÁMETRO	UNIDAD	Enplus-A1	Enplus-A2	EN-B
Diámetro	mm	6 ± 1 a 8 ± 1	6 ± 1 a 8 ± 1	6 ± 1 a 8 ± 1
Longitud	mm	3.15 ≤ L ≤ 40	3.15 ≤ L ≤ 40	3.15 ≤ L ≤ 40
Contenido de humedad	%	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Contenido de cenizas	%	≤ 0.7	≤ 1.5	≤ 3.0
Durabilidad mecánica	%	≥ 97.5	≥ 97.5	≥ 96.5
Poder Calorífico Inferior	MJ/kg	16.5 ≤ Q ≤ 19.5	16.5 ≤ Q ≤ 19.5	16.5 ≤ Q ≤ 19.5
Densidad a granel	kg/m ³	≥ 600	≥ 600	≥ 600
Contenido de N	%	≤ 0.3	≤ 0.5	≤ 1.0
Contenido de S	%	≤ 0.003	≤ 0.003	≤ 0.004
Contenido de Cl	%	≤ 00.2	≤ 00.2	≤ 0.003
Compartimiento de fusión de cenizas	°C	≥ 1200	≥ 1100	≥ 1100

Tipos de maderas para la producción de pellets		Troncos y residuos no tratados químicamente	Árboles enteros sin raíces, troncos, residuos de tala, cortezas y residuos no tratados químicamente	Bosque, plantación y otra madera virgen, residuos y madera usada no tratada químicamente
---	--	---	---	--

Como se puede observar en la tabla anterior uno de los valores más importantes para determinar la calidad de los pellets es el contenido de cenizas ya que, al ser un residuo de la combustión, la presencia de estas cenizas puede obstruir la ventilación al interior de los calefactores y por ende aumentar la materia volátil derivada de la mala combustión.

2.5.3 Potencial de los biocombustibles sólidos en México.

De forma general se estima que México tiene un potencial de producción sustentable de 3,000 a 3,459 PJ/año por medio de la bioenergía, sin utilizar tierras dedicadas a la producción de alimentos y respetando las áreas naturales protegidas, así como aquellas áreas con grandes coberturas de vegetación. Esta cifra equivale al 69% de la energía final en el año 2012 o al 38% de la producción de energía primaria de México en el mismo año, con lo que se puede afirmar que México tiene un gran potencial para hacer la transición energética a este tipo de combustibles e ir dejando de usar los combustibles fósiles (*García et al., 2016; Johnson et al., 2009*).

El uso de biocombustibles sólidos para uso energético comprende una amplia gama de fuentes primarias (cuando la biomasa se obtiene directamente para este fin): bosques nativos, plantaciones dedicadas y cultivos energéticos; así como las fuentes secundarias (como subproducto de alguna otra actividad económica): entre las que destacan los residuos del aprovechamiento forestal y de la industria maderera, así como los residuos de actividades agrícolas y agroindustriales (*Tauro et al., 2018*).

Los principales recursos de biomasa para uso energético en México pueden

provenir principalmente de los bosques y selvas nativas, seguidos por los residuos de cultivos o de la agroindustria (Ríos & Kaltschmitt, 2013).

De manera más específica la *Tabla 2.6*, muestra el potencial para la producción de BCS provenientes del sector forestal en donde, los bosques y selvas nativas podrían tener la mayor participación con una producción de 47 a 86 MtMS/año, seguidos de las plantaciones energéticas con un aporte de entre 9 y 62 MtMS/año y finalmente los residuos de la industria forestal con una participación de 3 a 4 MtMS/año (Tauro, 2018).

Tabla 2.6. Potencial sustentable de los BCS provenientes del sector forestal. Obtenida de Tauro, 2018.

Recurso Forestal	Potencial (MtMS/año)		Potencial (PJ/año)	
	Min.	Max.	Min.	Max.
Bosques nativos	47	86	930	1716
Plantaciones	9	62	170	1246
Residuos de la industria	3	4	60	71
TOTAL	59	152	1160	3033

Nota: Los valores presentan un estimado para un escenario futuro. *MtMS/año significa millones de toneladas de materia seca al año.

Por otro lado, el potencial para los BCS provenientes de la biomasa agrícola se muestran en la *Tabla 2.7*, en donde el potencial máximo proviene de los residuos de la cosecha de maíz, caña de azúcar, sorgo y trigo, debido a que estos cultivos generan cerca del 85% de todos los residuos agrícolas del país. Por otro lado, el bagazo de caña de azúcar y de agave, los olotes de maíz, la cascarilla de arroz, las cáscaras de cítricos, entre otros, tienen el potencial restante de producción sustentable en el país (Tauro, 2018; Valdez-Vazquez, 2010).

Tabla 2.7. Potencial sustentable de los BCS provenientes del sector agrícola. Obtenida de Tauro, 2018.

Cultivo	Residuos	Producción (MtMS/año)		Potencial (PJ/año)	
		Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Caña de azúcar	Puntas y hojas	2.5	7.6	38	57
Maíz	Rastrojo	14	33	210	248
Sorgo	Rastrojo	4.2	8.3	63	76
Trigo	Rastrojo	1.9	5.1	29	38
Otros	Rastrojo	2.2	6	32	45
Total de residuos primarios		24.8	60.1	372	464
Caña de azúcar	Bagazo	3	7.6	45	57
Maíz	Olote	2.8	6.6	42	50
Magüey	Bagazo	0.6	1.5	8	11
Café	Pulpa	0.1	0.4	2	3
Arroz	Cascarilla	0.03	0.1	0.5	1
Cítricos	Cáscara	0.1	0.1	1	2
Otros	Cáscaras-bagazo	0.2	0.3	2	3
Total de residuos secundarios		6.8	16.6	101	125
POTENCIA TOTAL				473	589

Nota: Los valores presentan un estimado para escenario futuro. El PCI es de 15 PJ/MtMS. La competencia por otros usos no fue contemplada.

El uso de residuos agrícolas con fines energéticos tiene la ventaja adicional de que regularmente este tipo de materia prima no tiene que competir con el uso de la tierra para la producción de alimentos, ya que estos son obtenidos de diversos procesos secundarios (Corredor & Pérez, 2018).

Una gran diversidad de residuos agroindustriales puede ser utilizada como materia prima alternativa para la producción de bioenergéticos, los cuales pueden contribuir a la reducción del uso de combustibles fósiles, la disminución de emisiones de GEI y la diversificación de la matriz energética (Muñoz et al., 2013). En diferentes partes del mundo ya se hace el aprovechamiento térmico de la biomasa, siendo la Unión Europea un ejemplo en las aplicaciones térmicas para la

producción de calor y agua caliente a través de la biomasa (*Muñoz-Muñoz et al., 2014*).

Particularmente, México cuenta con una superficie potencial para el cultivo de coco, de aproximadamente un millón de hectáreas; de las cuales, si se sembrará por lo menos el 50% de la superficie factible para cultivarse, se cubriría la demanda de sus productos derivados tales como el aceite vegetal y la fruta, con lo cual todos los remanentes podrían ser utilizados para la producción de biomasa con fines energéticos (*Ríos & Sánchez, 2002*).

Por otro lado, la producción de nuez ha aumentado en cerca del 80% durante los últimos años, alcanzando una producción de alrededor 110 mil toneladas; de las cuales el único aprovechamiento es la comercialización del fruto, por lo cual todos los residuos pueden ser utilizados con fines energéticos (*Orona et al., 2019*).

2.6 Calefacción del hogar con pellets.

Desde hace algunos años se ha incrementado el número de dispositivos que funcionan con la biomasa como principal fuente de energía, estos dispositivos son conocidos como calefactores de interiores o domésticos; entre las principales mejoras que estos dispositivos ofrecen es que tienen un mayor rendimiento, lo que se ve reflejado en una menor emisión de gases de efecto invernadero y al ser alimentados de forma automática generan un mayor confort en el usuario.

El sistema de calefacción de pellets cuenta con un compartimiento de carga de pellets y un sinfín automático que ajusta la cantidad necesaria de combustible para mantener la temperatura, así mismo tiene una resistencia eléctrica que se encarga de combustionar los pellets y una turbina interior para expulsar el aire caliente por sus rendijas. La principal diferencia con una estufa de leña es el tipo de combustible empleado y que se regula la alimentación y la temperatura de forma automática (*Navarro, 2021*).

Los calefactores que actualmente se encuentran en el mercado se pueden agrupar de acuerdo con la potencia del dispositivo tal y como se muestra a continuación (Sánchez, 2012):

- 1) *Calefactores domésticos (10-50 kW)*: son calefactores compactos, se caracterizan por tener sistemas de limpieza automática y el encendido/apagado es automático para confort del usuario.
- 2) *Calefactor colectivo compacto (50-100 kW)*: Son versiones más grandes que los calefactores domésticos, se caracterizan porque pueden admitir pellets o astillas para su combustión.
- 3) *Calefactor colectivo con alimentador inferior (<600 kW)*: El combustible se almacena en la parte inferior del dispositivo, por lo cual están destinadas a usarse con biomásas con bajo contenido de cenizas y pequeño tamaño de partículas, para evitar que se tapen las entradas de aire.
- 4) *Calefactor colectivo con parrilla móvil (>1000 kW)*: Estos son más caros ya que su alimentador permite usar combustibles de un tamaño no homogéneo. De tal forma que permite utilizar biomásas con alto contenido en humedad y cenizas.

Algunas de las ventajas que presenta el uso de pellets como combustible para la calefacción de interiores son: la baja emisión de GEI; mayor potencia calorífica en comparación con otros combustibles procedentes de la biomasa; precios competitivos; fácil almacenaje y transporte, con lo que se aumenta su vida útil.

2.7 Normativa para la calefacción de interiores.

A pesar de que en México existen diversos esfuerzos aislados para la producción de BCS como los pellets, actualmente al interior del país no existe tecnología propia para la creación de los dispositivos para su aprovechamiento y se hace uso de las tecnologías que llegan al mercado, por lo que es aún más difícil que exista alguna normativa que regule los combustibles o dispositivos que hacen uso de esta tecnología. Sin embargo, es importante mencionar que, actualmente es

factible comprar los pellets que se encuentran en el mercado internacional a través de plataformas en línea.

Debido a esto se utilizó la normativa europea *UNE-EN 14785* para aparatos de calefacción doméstica alimentados con pellets de madera como referencia en esta investigación, ya que se especifican los requisitos relativos al diseño, fabricación y montaje de las tecnologías de combustión; así como los métodos para la evaluación en términos de rendimiento y emisiones de los combustibles.

Capítulo 3. Materiales y métodos.

Se evaluarán dos biocombustibles sólidos densificados (pellets de coco y nuez) en un calefactor de interiores, como parte de los métodos se utilizarán protocolos para evaluar las características fisicoquímicas de los pellets y sus desempeños en tareas de calefacción de interiores, todo lo anterior para conocer los posibles beneficios en términos energéticos y de emisiones, comparados contra otros sistemas de calefacción alimentados con pellets de pino y encino.

En el diagrama de la *Figura 3.1* se muestra la metodología general para la elaboración de esta investigación en dónde destacan 5 etapas principales y se describen brevemente a continuación:

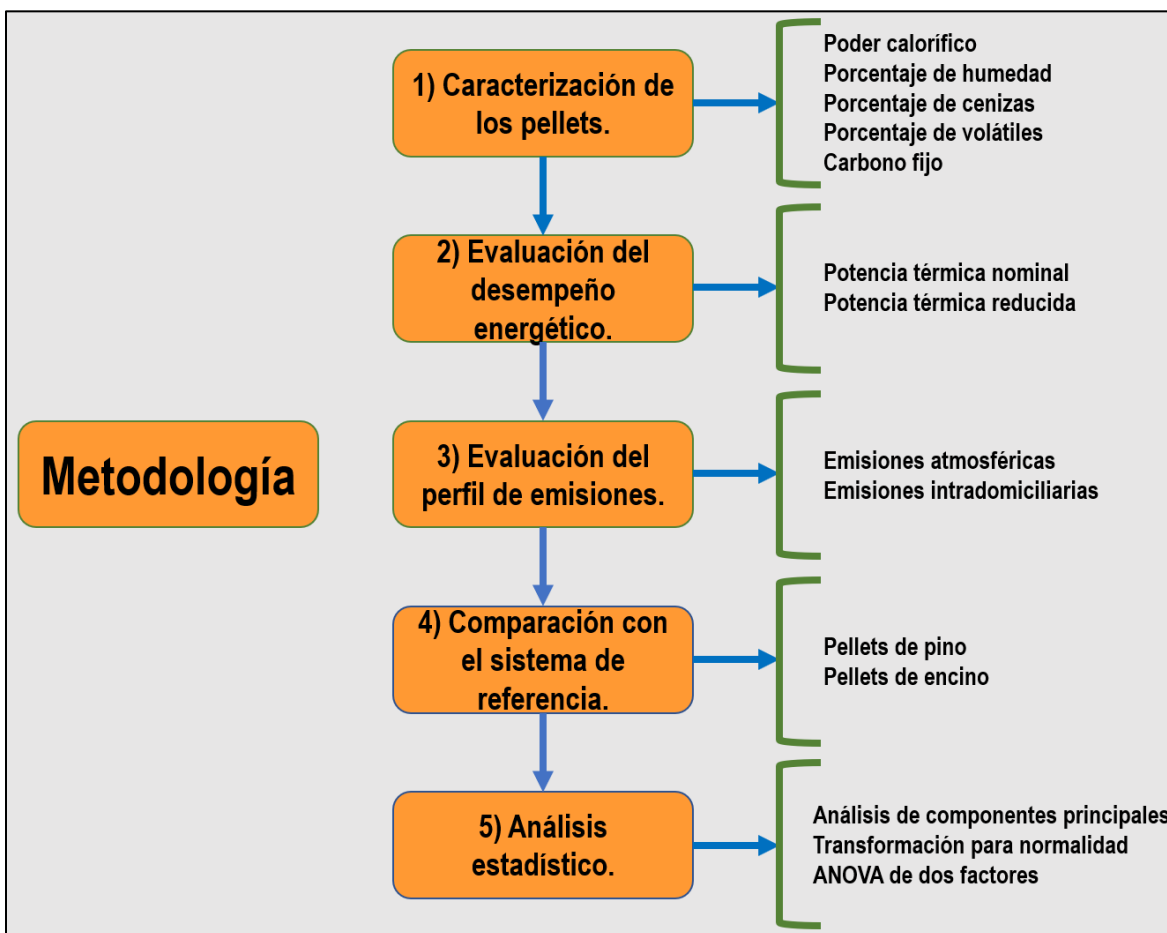


Figura 3.1. Diagrama de flujo de la metodología de la investigación. Elaboración propia.

- 1) *Caracterización de los pellets:* Se midieron diversos parámetros fisicoquímicos entre los cuales se encuentra el poder calorífico, % de humedad, % de cenizas y materiales volátiles, así como la determinación del carbono fijo de los pellets.
- 2) *Evaluación del desempeño energético del dispositivo:* Se realizaron pruebas a potencia térmica nominal y a potencia térmica reducida, procurando siempre tener las mismas condiciones durante los ensayos.
- 3) *Evaluación del perfil de emisiones:* Se midieron diferentes GEI, así como las partículas liberadas durante la combustión de la biomasa; midiendo de forma simultánea las emisiones intradomiciliarias y las atmosféricas, con la finalidad de determinar el porcentaje real de las emisiones.
- 4) *Análisis estadístico:* Se utilizaron como variables, todas las mediciones obtenidas del desempeño energético y el perfil de emisiones; las cuales se analizaron mediante un análisis de componentes principales para determinar los principales patrones y diferencias cuantitativas entre dichas variables. Adicionalmente se realizó un análisis ANOVA de dos factores para determinar si existían diferencias significativas entre el tipo de biomasa utilizada y/o la potencia térmica del dispositivo.
- 5) *Comparación con el sistema de referencia:* Se compararon los datos obtenidos en los análisis estadísticos para los pellets de coco y nuez, con pellets de pino y encino; tomando como unidad funcional la tasa de emisión para el calentamiento de interiores.

3.1 Caracterización de los pellets.

En esta investigación se utilizaron dos tipos de pellets de residuos agrícolas distintos los cuales son producidos en México; uno por la empresa Todo Pellet, los cuales se elaboran en la ciudad de Guanajuato, Guanajuato y que utilizan como

materia prima los residuos de la cáscara de *Cocos nucifera* y; el otro elaborado por la empresa San Mateo, los cuales se elaboran en la ciudad de Durango, Durango, México, a partir de la cáscara de *Carya illinoensis*, generada durante el proceso de obtención de la nuez.

Las pruebas realizadas fueron la determinación del poder calorífico, humedad, porcentaje de cenizas y materia volátil, estas se realizaron en el Laboratorio de Innovación y Evaluación en Bioenergía (LINEB), teniendo como base las especificaciones propuestas en la norma *UNE-EN 14785:2006*, así como algunas normas internacionales más particulares para cada una de las pruebas. Es importante mencionar que solo se realizaron las pruebas de caracterización fisicoquímica en los pellets de coco, ya que los pellets de nuez ya habían sido caracterizados en otra investigación (*Musule et al., 2022*). Los equipos de medición, así como las imágenes ilustrativas se detallan en el *Anexo A* de esta investigación.

3.1.1 Poder Calorífico Superior (PCS).

Se utilizó un calorímetro marca Parr modelo 6100 (*Figura 3.2*), se tomó una muestra de 1 g de pellet de *Cocos nucifera*, esta se pesó con ayuda de una balanza analítica OHAUS – EX225D con una precisión de 0.00001 g (*Figura 3.3*). La muestra se colocó en la bomba calorimétrica junto con un conductor de cobre aislado con silicón y cubierto de malla, para el encendido eléctrico en el sistema de combustión, junto con oxígeno a alta presión, con la finalidad de llevar a cabo una combustión controlada. Posteriormente se introdujo la bomba calorimétrica dentro de la cámara isotérmica que contenía agua destilada a temperatura y volumen controlados. La combustión se generó a través de la diferencia de potencial generada por un capacitor eléctrico, unido a la parte superior de la bomba por medio de dos conductores.

El calorímetro mide los cambios de temperatura en el agua, los cuales son producto del calor desprendido por el combustible, lo que permite calcular el poder calorífico superior de la muestra, tomando como base la *ecuación 1*.

$$Q = mC_p(T_1 - T_2)$$

Ecuación 1.

Donde Q es el calor contenido el combustible; m es la masa total del combustible, Cp es la capacidad calorífica del mismo y; T₁-T₂ es la diferencia entre las temperaturas registradas.

Se realizaron tres repeticiones para conocer la variabilidad de los resultados. El calorímetro se calibró con ácido benzoico, previo al set de pruebas tal como establece la *ISO 18125:2017*.

3.1.2 Humedad.

El porcentaje de humedad de los pellets de coco se realizó siguiendo el procedimiento de la norma internacional *ISO 18134-3:2015*, se realizaron tres repeticiones.

Se utilizaron crisoles de porcelana para contener las muestras y un horno de secado esmaltado NOVATECH (*Figura 3.4*) para alcanzar una temperatura de 100 +/- 3 °C durante 60 minutos. Posteriormente, los crisoles vacíos se colocaron en un desecador hermético para atemperarlos. Posteriormente, se pesaron los crisoles con ayuda de una balanza analítica OHAUS – EX225D con una precisión de 0.00001 g, para conocer su peso sin muestra. Se pesó 1 g de la muestra de pellets de *Cocos nucifera* y se colocó en el crisol y se introdujo en el horno de secado a una temperatura de 100 +/- 3 °C, realizando pesajes cada 20 minutos hasta obtener un peso constante. Los crisoles con las muestras se atemperaron en un desecador hermético para evitar que las muestras absorbieran la humedad del ambiente. Finalmente, se utilizó la balanza analítica para determinar los pesos. La humedad se determinó con la *ecuación 2*:

$$M_{ad} = \frac{(m_2 - m_3)}{(m_2 - m_1)} * 100$$

En donde M_{ad} es la humedad en base húmeda; m_1 es la masa en gramos del crisol vacío; m_2 es la masa en gramos del crisol más la muestra antes del secado y; m_3 es la masa en gramos del crisol y la muestra después del secado.

Es importante señalar que este procedimiento se realizó en un cuarto aislado herméticamente, en el que se controlaban de manera precisa la temperatura y la humedad, para que las muestras sufrieran la menor alteración posible; así mismo se utilizó indumentaria básica de laboratorio (guantes de látex, bata de laboratorio, cubrebocas, malla para el cabello y lentes de seguridad), para no interferir con el proceso de secado.

3.1.3 Porcentaje de cenizas.

El porcentaje de cenizas de los pellets se determinó siguiendo el procedimiento propuesto en la norma internacional *ISO 18122:2015*, se realizaron 3 repeticiones.

Se utilizaron crisoles de porcelana y una mufla marca NOVATECH MD-20 (*Figura 3.5*) para calentarlos a 550°C durante una hora. Posteriormente, se colocaron en un desecador para atemperarlos y finalmente ser pesados con ayuda de la balanza analítica OHAUS – EX225D con una precisión de 0.00001 g. Se añadió una muestra de 1 g de pellet de coco a los crisoles y estos se colocaron en la mufla a una temperatura de 550 °C durante dos horas. Los crisoles con las muestras se atemperaron en el desecador hermético y finalmente, se pesaron con ayuda de la balanza analítica para determinar el peso de las cenizas. El porcentaje de cenizas se determinó con la *ecuación 3*:

$$\% \text{ de Cenizas }_{base\ seca} = \frac{(m_3 - m_1)}{(m_2 - m_1)} * 100 * \frac{100}{100 - M_{ad}}$$

En donde m_1 es la masa en gramos del crisol vacío; m_2 es la masa en gramos del crisol más la muestra de pellets; m_3 es la masa en gramos del crisol más la ceniza resultante de la combustión y; M_{ad} es el contenido de humedad en porcentaje de la porción de la muestra usada para este cálculo.

3.1.4 Materia volátil.

El contenido de materia volátil se determinó siguiendo el procedimiento de la norma internacional *ISO 18123:2015*, teniendo como variante el uso de una mufla en lugar del equipo especializado que se describe en la norma, ya que no se cuenta con dicho equipo dentro del LINEB; se realizaron 3 repeticiones.

Se utilizaron crisoles de porcelana y una mufla marca NOVATECH MD-20 para calentarlos a 900 °C durante 5 minutos. Posteriormente, se colocaron en el desecador para atemperarlos y se pesaron con ayuda de una balanza analítica OHAUS – EX225D con una precisión de 0.00001 g. Se añadió 1 g de pellet de coco y los crisoles fueron tapados para evitar el intercambio de oxígeno y otros gases con la muestra. Posteriormente, se colocaron en la mufla a 900 °C durante 5 minutos y se sacaron a desecador durante 15 minutos. Finalmente, los crisoles con las muestras se pesaron con ayuda de la balanza analítica y se registraron los datos obtenidos. Para el cálculo de la materia volátil expresada en porcentaje se utilizó la *ecuación 4*:

$$\%V_d = 100 \left[\frac{(m_2 - m_3)}{m_2 - m_1} - M_{ad} \right] * \left(\frac{100}{100 - M_{ad}} \right)$$

Ecuación 4.

En donde m_1 es la masa en gramos del crisol vacío con su tapa; m_2 es la masa en gramos del crisol, la tapa y la porción de muestra añadida antes del calentamiento; m_3 es la masa en gramos del crisol, la tapa y el residuo después del calentamiento y; M_{ad} es la humedad como porcentaje en masa de la porción de la muestra analizada.

3.1.5 Carbono fijo.

Este parámetro corresponde al carbono residual de las muestras, de tal forma que

este se pudo determinar al conocer los valores de la humedad, materia volátil y el contenido de cenizas. El cálculo del carbono fijo se expresa en porcentaje y se calculó con ayuda de la *ecuación 5*:

$$\% \text{ Carbono fijo} = 100 - \%M_{ad} - \% \text{ Cenizas} - \% V_d$$

Ecuación 5.

En donde M_{ad} es el porcentaje de humedad de la muestra y V_d es el porcentaje de material volátil de la misma.

3.2 Evaluación del desempeño energético.

Las pruebas para la evaluación del desempeño energético del calefactor de interiores se llevaron a cabo en el LINEB, utilizando los métodos de ensayo de la norma española *UNE-EN 14785:2006*. En la cual se recomienda hacer al menos dos tipos de pruebas diferenciadas entre sí por la potencia térmica a la que se lleva el dispositivo. Cabe aclarar que para cada tipo de pellet (cáscara de coco y nuez) se realizaron 5 pruebas a potencia nominal y 5 pruebas a potencia reducida.

3.2.1 Potencia térmica nominal.

Se refiere a la máxima potencia que puede ser alcanzada por el dispositivo según las especificaciones del fabricante; en el caso de esta investigación se utilizó un calefactor de interiores alimentado con pellets modelo SM-10 (*Figura 3.6*), teniendo una potencia máxima de 7kW. Para conocer el consumo del combustible utilizado se subió el calefactor de interiores a una báscula marca Advance RH modelo BAPLE con una precisión de 20 g (*Figura 3.7*), para tomar el peso al inicio y término de cada prueba.

La norma establece que para las pruebas a potencia nominal se debe de prender el dispositivo media hora antes de iniciar las mediciones, con la finalidad de que la combustión se estabilice. Estas pruebas tuvieron una duración de 4 horas, sin tomar en cuenta el encendido previo. Se monitoreó que la combustión se llevara

de manera regular y se registró el consumo de combustible cada 30 minutos.

3.2.2 Potencia térmica reducida.

Se refiere a la mínima potencia que puede ofrecer el dispositivo según las especificaciones del fabricante; en este caso se utilizó una potencia de 3 kW. Se monitoreó el peso del combustible cada 30 minutos.

La prueba inició en frío, con un encendido previo de 30 minutos para lograr las condiciones óptimas en la combustión. Las pruebas a potencia reducida tuvieron una duración de 8 horas, posteriores al encendido previo. Se registró la temperatura ambiental y la del calefactor cada 30 minutos.

3.3 Evaluación del perfil de emisiones.

Para determinar las emisiones resultantes de la combustión de pellets dentro del calefactor de interiores, se midieron simultáneamente las emisiones atmosféricas (se ventilan al exterior por medio de la chimenea) y las emisiones intradomiciliarias (se quedan al interior del hogar a través de fugas, y también se conocen como emisiones fugitivas), durante las evaluaciones de potencia térmica nominal y reducida.

Las pruebas se llevaron a cabo en el Laboratorio de Innovación y Evaluación de Bioenergía (LINEB), donde se utilizó una doble campana para capturar las emisiones en la chimenea y las fugitivas, la cual está diseñada con base en las especificaciones de la norma internacional *ISO/TR 19867-3:2018*. La metodología se basa en los experimentos propuestos por Ruíz-García (2018) y Ruíz-García *et al.*, 2018. Cada una de estas campanas posee un tren de muestreo, que incluye medición de emisiones en tiempo real, temperatura y presión de los gases (todos los parámetros son medidos cada 2 s). Los contaminantes medidos fueron Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de Carbono (CO₂), Metano (CH₄), Compuestos no Metánicos (NMHC) y Material Particulado mayor a 2.5 micras

(PM_{2.5}), Óxido de Nitrógeno (NO), Dióxido de Nitrógeno (NO₂), Óxidos de Nitrógeno (NO_x) y Dióxido de Azufre (SO₂).

En la *Figura 3.8* se muestra el diagrama para el montaje del calefactor al interior de las campanas de emisiones, así como del acomodo de los equipos de medición de los diferentes contaminantes presentes durante la combustión de los pellets.

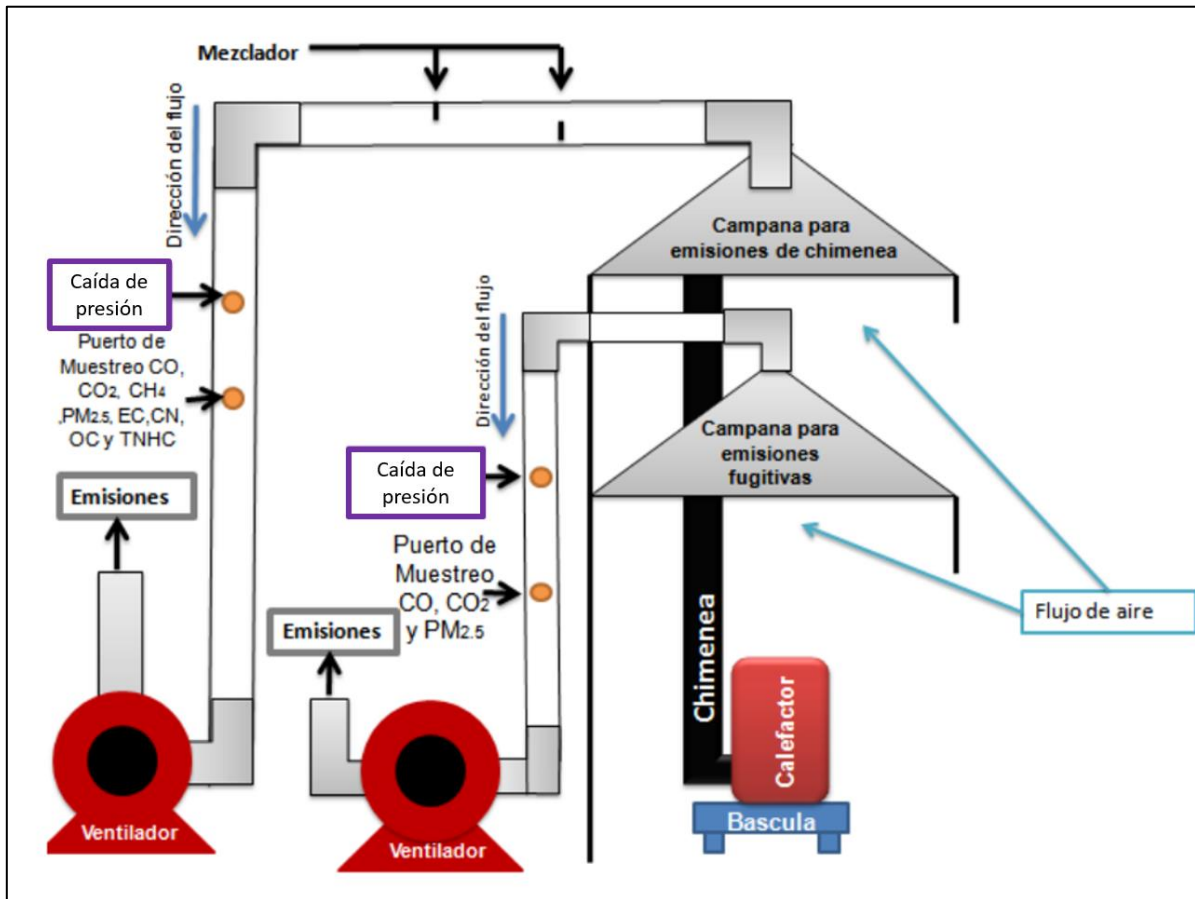


Figura 3.8. Diagrama general del montaje del calefactor, los puntos de muestreo y los contaminantes medidos. Obtenido de Arizaga-Murguía (2020).

El uso de la doble campana permite separar y medir las emisiones fugitivas y las emisiones de la chimenea. También permite medir simultáneamente ambos tipos de emisiones, reduciendo los tiempos de medición y la variabilidad de los datos.

3.3.1 Medición de emisiones en la chimenea y fugitivas.

En el tren de muestreo para las emisiones de la chimenea, se utilizan mezcladores, para asegurar la mezcla de los contaminantes presentes en el flujo y tomar muestras uniformes en los puntos de muestreo. Los puntos de muestreo corresponden a los siguientes contaminantes: CO, CO₂, CH₄, PM_{2.5}, NO₂, NO, NO_x SO₂, los cuales son succionados a través de ventiladores que al ser muestreados son mandados a la atmósfera.

En el tren de muestreo para las emisiones fugitivas, no se utilizaron mezcladores ya que las emisiones son más cercanas a los puntos de muestreo. En este tren se instalaron dispositivos para tomar la muestra del CO, CO₂ y PM_{2.5} de forma horizontal, respecto a la caída de presión, para obtener una muestra compuesta. Al ser muestreados, estos son mandados a la atmósfera con ayuda de los ventiladores.

Para la medición del CO, se utilizó el equipo de medición *TESTO modelo 340 USA* (Figura 3.9), que tiene una celda electroquímica que permite mediciones en tiempo real, con lo que se asegura de medir las concentraciones a lo largo de las pruebas. En la medición del CO₂ se utilizó el equipo Q-TRACK (Figura 3.10) que cuenta con un sensor infrarrojo no dispersivo para su medición. Para las concentraciones de CH₄ y NHMC se utilizó un cromatógrafo *Young Lin modelo 6500 Corea* (Figura 3.11), el cual utiliza Helio como gas de arrastre y aire seco e Hidrógeno para el detector de ionización de flama.

La medición de PM_{2.5} se midió a través del método gravimétrico (Figura 3.12), el cual nos permite conocer la masa acumulada de una muestra en filtros de fibra de vidrio. El flujo de muestras para las emisiones en la chimenea fue de 4 L/min con un filtro de 47 mm; mientras que para las emisiones fugitivas fue de 16.7 L/min con un filtro de 102 mm. Este proceso se lleva a cabo con la ayuda de un medidor de flujo *Defender 520* (Figura 3.13), para calibrar el flujo a los filtros y procurar que

sean muestreos isocinéticos (es decir, que se intenta igualar la velocidad de los aerosoles con los de la muestra), para igualar la velocidad se colocaron bombas de succión para mantener el flujo requerido para la toma de las muestras (*Figura 3.14*). Se usaron filtros de 4 in de diámetro con 1 μm de grosor. Estos filtros fueron pesados antes y después de terminar las pruebas para conocer la masa emitida durante las pruebas.

La preparación de los filtros se realizó en un cuarto cerrado herméticamente para mantener la temperatura a 23 +/- 2°C y una humedad relativa de 35 +/- 5%, con la finalidad de asegurar un correcto pesaje de los filtros y las muestras recolectadas. Para estabilizar los filtros a estas condiciones se dejaron expuestos en el cuarto de pesado previo y posterior a la muestra durante un lapso de 48 horas.

El análisis para determinar el contenido de OC y EC, se realizó por el método termo óptico descrito en el trabajo de López Orozco (2018), utilizando un medidor de carbono por detección coulométrica modelo *CM-150* marca *UIC*. En donde el análisis de las muestras se hace a través de la determinación de la concentración del CO₂.

3.3.2 Factor de emisión de pellets de cáscara de coco y nuez.

Para la realización de este cálculo se utilizaron los valores de potencial de calentamiento presentados en la *Tabla 3.1*.

Tabla 3.1. Valores de potencial de calentamiento global. Obtenida de Quiñones-Reveles et al., (2021).

Valores de potencial de calentamiento global (GWP) para un horizonte a 100 años.		
Emisión	GWP	Referencia
CO ₂	1	IPCC Fifth Assessment Report (AR5) 2014
CO	1.9	IPCC Fourth Assessment Report (AR4) 2007
CH ₄	28	IPCC Fifth Assessment Report (AR5) 2014
NMHC	12	Edwards and Smith, 2002
EC	680	MacCarty et al., 2008
OC	-79	MacCarty et al., 2008

En la tabla anterior se muestra la proporcionalidad que tienen los GEI respecto a su potencial de calentamiento global, valor establecido en $\text{CO}_{2\text{eq}}$, el cual es una medida utilizada a nivel global y se obtiene mediante la equivalencia de los distintos GEI con el CO_2 .

3.4 Comparación con el sistema de referencia.

Para la comparación de los resultados obtenidos en esta investigación se estableció un sistema de referencia el cual está constituido por 2 combustibles distintos: los pellets de pino y encino, los cuales son los combustibles de forestal más utilizados actualmente para la calefacción de interiores. La unidad funcional utilizada fue $\text{gCO}_{2\text{e}} / \text{kg}$ con la finalidad de poder comparar las emisiones totales de cada uno de los combustibles.

3.5 Diseño de experimento y análisis estadístico.

El procesamiento de los datos y los análisis estadísticos que se utilizaron en esta investigación se realizaron con ayuda del paquete de datos estadístico XLSTAT.

- Caracterización fisicoquímica de los combustibles. De acuerdo con los datos obtenidos para las variables (poder calorífico, % de humedad, % de cenizas, materia volátil y carbono fijo), se realizó únicamente un análisis descriptivo y comparativo entre los valores resultantes de cada parámetro.
- Desempeño energético: De acuerdo con los datos obtenidos para los parámetros de desempeño energético del calefactor de interiores (tasa de quemado, potencia de operación, carbón residual y eficiencia de combustión), se realizó únicamente un análisis descriptivo y comparativo entre los valores de cada parámetro.
- Perfil de emisiones resultante de la combustión: Se realizó un análisis de componentes principales a las variables obtenidas (CO_2 , CO , CH_4 , NMHC, $\text{PM}_{2.5}$, NO , NO_2 , NO_x y SO_2), para realizar un primer análisis exploratorio y observar los principales patrones y diferencias cualitativas entre el conjunto de las variables analizadas. Adicionalmente se realizaron pruebas de

normalidad en las variables antes mencionadas y en aquellas que no la cumplieron (CO, CH₄, NMHC y SO₂) se hizo una transformación por rangos como proponen *Conover & Iman (1981)*, lo que hace factible su análisis mediante pruebas paramétricas.

Finalmente se analizaron las variables mediante un Análisis de Varianza (ANOVA) de dos factores, para determinar si existían diferencias significativas entre las variables debido al tipo de biomasa y/o la potencia del dispositivo. Utilizando como factor 1 el tipo de biomasa con dos niveles (pellet de coco y nuez); mientras que el factor 2 se asoció a la potencia del dispositivo con dos niveles (potencia nominal y reducida).

- Comparación con el sistema de referencia: El perfil de emisiones obtenido fue transformado a un factor de emisión por energía entregada por el combustible (KgCO_{2e}/MJ). Para el cálculo del CO_{2e}, se utilizó el potencial de calentamiento global de cada uno de los gases. Finalmente se realizó un análisis descriptivo y comparativo entre los sistemas evaluados (pellets de coco y nuez).

Capítulo 4. Resultados y Discusión.

4.1 Caracterización fisicoquímica de los pellets.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la caracterización fisicoquímica de los pellets utilizados en este estudio, haciendo énfasis en que solo se realizaron estas pruebas para los pellets de *Cocos nucifera*, debido a que la caracterización de los pellets de nuez se obtuvo del trabajo de *Musule et al. (2022)*.

En la *Tabla 4.1* se muestran los valores obtenidos para el poder calorífico, los porcentajes de humedad, materia volátil, cenizas y carbono fijo respectivamente.

Tabla 4.1. Caracterización fisicoquímica de los pellets utilizados.

Tipo de Pellet	Poder Calorífico Superior (MJ/kg)	% Humedad	% Materia volátil	% Cenizas	% Carbono fijo
Cáscara de Coco	19.13 ± 0.08	9.16 ± 0.16	83.87 ± 0.52	3.54 ± 0.04	12.59 ± 0.56
Cáscara de Nuez*	19.23 ± 0.05*	8.57 ± 0.3 *	80.63 ± 0.62	2.34 ± 0.2*	17.03 ± 0.82

Nota: Los datos se presentan como promedio ± su desviación estándar, teniendo una n=3.
*Para el caso de los pellets de nuez estos valores fueron tomados del trabajo de *Musule et al. (2022)*. **NR indica que los valores no fueron reportados en el trabajo mencionado.

De acuerdo con los valores obtenidos para los pellets de coco, se puede apreciar que estos de manera general son de buena calidad, ya que se encuentran dentro de los valores estándares mencionados en la norma europea *EN 14961-2*, misma que se presenta en la *Tabla 2.3*. Siendo el valor del porcentaje de cenizas el único parámetro, que se encuentra fuera del valor estipulado en la norma, teniendo un 0.6% más alto el contenido de cenizas de lo recomendado en dicha norma. Cabe resaltar que el pellet de coco fue el que tuvo el mayor contenido de humedad, sin embargo, este no sobrepasó el 10% que establecen las normas de calidad de pellets, mientras que, para el resto de los valores, estos se mantienen sin

diferencias considerables.

Para el caso de los pellets de nuez podemos apreciar que estos pellets cumplen con todos los valores de los requerimientos fisicoquímicos que fueron evaluados en esta investigación, de acuerdo con lo considerado en la norma europea.

Según lo reportado por *Camargo & Williams (2012)* el contenido de cenizas está relacionado con el poder calorífico superior, de tal manera que, si se tiene un alto contenido de cenizas, encontraremos una disminución en el poder calorífico, ya que la presencia de las cenizas dificulta la transferencia del calor. Lo cual se puede apreciar en la *Tabla 4.1*, ya que los pellets de coco al tener un mayor porcentaje de cenizas presentan un valor más bajo en el poder calorífico.

De acuerdo con los valores presentados en otros trabajos en los que caracterizaron pellets de biomasa forestal (*Boada & Vargas, 2015; Carrillo Paniagua, 2015*), el porcentaje de cenizas varía entre 1.3% y 2.9%, teniendo un porcentaje de cenizas muy similar a los encontrados en esta investigación, a pesar de que estas biomásas no son forestales. Por otro lado, los porcentajes de humedad varían entre el 8% al 10.9% y el poder calorífico superior entre el 18.9 y 24.2 MJ/kg; como se puede observar estos valores son más altos y estas variaciones dependen principalmente por el tipo de biomasa utilizado y si es que hubo alguna mezcla de materiales durante la elaboración de los pellets.

Teniendo en cuenta estos valores se puede decir que los pellets de cáscara de nuez y coco que fueron utilizados en esta investigación son de calidad clase B, es decir, que podrían competir con aquellos pellets que son producidos con madera virgen de plantaciones o residuos y madera usada que no es tratada químicamente, los cuales se pueden utilizar en tareas de calefacción de interiores, de acuerdo con las especificaciones presentes en la norma europea *EN 14961-2*.

4.2 Desempeño energético del calefactor de interiores.

Para la presentación de los valores del desempeño energético del calefactor de interiores se decidió presentar los parámetros de tasa de quemado, potencia de operación, carbón residual, eficiencia térmica y de combustión. Para los diferentes tipos de pellets y la potencia de operación del calefactor.

Tabla 4.2 Comparativo de los parámetros de desempeño energético de los combustibles con diferente potencia de operación.

Operación	Tipo de Pellet	Tasa de quemado (g/min)	Potencia disponible (kW)	Carbón residual (g)	Eficiencia de Combustión (%)
Nominal	Cáscara de Coco	14.05± (0.89)	4.11 ± (0.26)	118 ± (30.17)	97.43 ± (0.59)
	Cáscara de Nuez	16.06± (1.23)	4.73 ± (0.36)	78.4± (24.25)	97.34± (0.49)
Reducida	Cáscara de Coco	8.24± (0.73)	2.42 ± (0.21)	193.63 ± (80.55)	95.60 ± (0.4)
	Cáscara de Nuez	12.45± (0.23)	3.66 ± (0.07)	59.2 ± (2.86)	94.59 ± (0.46)

Nota: Los datos se presentan como promedio ± su desviación estándar, teniendo una n=5.

Como se observa en la *Tabla 4.2*, el pellet de cáscara de coco presenta un consumo menor en comparación con los pellets de cáscara de nuez, ya que este presenta una mayor tasa de quemado en los dos tipos de operación.

Usando la potencia reducida del calefactor con los pellets de coco se obtuvo una potencia disponible de 2.4 KW, la cual se encuentra debajo de la potencia requerida por el fabricante; mientras que en caso de los pellets de nuez fue de 3.66, por lo que se encuentra dentro del rango especificado. Por otro lado, en la potencia nominal los pellets de coco tuvieron una potencia de 4.11 KW; mientras que los pellets de nuez lograron una potencia 4.73 KW. Con lo que ambas

potencias se encuentran dentro de las especificaciones del fabricante.

El carbón residual es toda aquella ceniza que queda al finalizar cada una de las pruebas, siendo el pellet de coco el que presenta una mayor cantidad de carbón residual en cada una de las condiciones de operación.

Finalmente, la eficiencia de combustión de los combustibles se encuentra en un nivel óptimo en ambas potencias de operación. Aunque es importante resaltar que se obtiene una mejora en la eficiencia al utilizar la potencia nominal del calefactor de interiores.

De acuerdo con lo reportado por *Ortiz & Cruz (2016)*, los biocombustibles que son elaborados a partir de la cáscara de biomasa, tienen un alto potencial como energético, debido a los altos contenidos de lignina y celulosa que los componen; tal es el caso para los pellets de nuez, en los cuales se obtuvo un alto poder calorífico superior y por ende una alta potencia disponible dentro del calefactor de interiores, similares a los pellets de origen forestal.

4.3 Emisiones resultantes de la combustión.

4.3.1 Evaluación de emisiones con impacto a la salud (intradomiciliarias).

Como se mencionó los gases y partículas que tienen un impacto directo en la salud de las personas son el CO y la PM_{2.5}, es por ellos que en la *Tabla 4.3* muestra las tasas de emisiones de CO y PM_{2.5} intramuros por tipo de pellet y prueba.

Tabla 4.3. Tasas de emisión intramuros de CO y PM_{2.5}.

Operación	Tipo de Pellet	Tasa de emisión CO (mg/min)	Tasa de emisión PM2.5 (mg/min)
Nominal	Cáscara de Coco	9.8 ± (4.19)	1.5 ± (1.4)
	Cáscara de Nuez	3.6 ± (2.54)	0.8 ± (0.98)
Reducida	Cáscara de Coco	7.7 ± (2.42)	1.7 ± (1.38)
	Cáscara de Nuez	6.6 ± (5.15)	0.66 ± (0.32)

Nota: Los resultados en la tabla se presentan como un promedio ± su desviación estándar, teniendo una n=5.

La tasa de emisiones de CO para los pellets de coco fue más alta en comparación con las de los pellets de nuez, para las dos potencias de operación. Es importante mencionar que, en ambos casos, los valores se encuentran dentro del nivel 5 determinado en la norma ISO (19867-2:2018) que se puede observar en la *Tabla 2.3*, por lo que se podría decir que tienen un muy buen desempeño.

Por otro lado, en las tasas de emisión de material particulado los pellets de nuez tienen una menor tasa de emisión que la que obtuvieron los pellets de coco, en ambas potencias de operación. Sin embargo, en este aspecto es importante destacar, que solo alcanzan el nivel 4, determinado en la norma ISO (19867-3:2018), en donde se establece una tasa de emisión normalizada ≤ 2.7 mg/min.

4.3.2 Evaluación de emisiones con impactos al medio ambiente (atmosféricas).

En la *Tabla 4.4* se muestran las emisiones que tienen un impacto directo en el medio ambiente, ya sea en forma de GEI como lo son el CO₂, CO, CH₄ y NMHC; impactos a la salud e incluso generar daños a los equipos de combustión como es el caso de los compuestos nitrogenados y el dióxido de azufre.

Tabla 4.4 Emisiones atmosféricas totales de CO₂, CO, CH₄, NMHC, PM2.5, NO, NO₂, NO_x y SO₂.

Operación	Tipo de Pellet	g de CO ₂	g de CO	g de CH ₄	g de NMHC	g de PM2.5	g de NO	g de NO ₂	g de NO _x	g de SO ₂
Nominal	Cáscara de Coco	3859 ±184.76	65 ±14.73	4.1 ±2.54	1.42 ±1.05	7.4 ±2.26	5 ±0.72	0.26 ±0.04	5.3 ±0.76	2 ±0.81
	Cáscara de Nuez	5097 ±490.67	88 ±16.63	1.9 ±1.18	0.63 ±0.23	6.7 ±1.60	4.8 ±1.30	0.25 ±0.07	5 ±1.37	0.04 ±0.05
Reducida	Cáscara de Coco	5094 ±496.14	149 ±17.56	8.6 ±4.16	3.6 ±1.86	22.7 ±7.30	5.6 ±1.23	0.29 ±0.06	6 ±1.30	1 ±1.57
	Cáscara de Nuez	6727 ±615.74	246 ±43.71	4.1 ±0.65	1.5 ±0.22	17.3 ±2.34	9.5 ±0.83	1 ±0.04	10 ±0.88	0 0

Nota: Los valores en la tabla se presentan como un promedio ± su desviación estándar, teniendo una n=5.

De manera general podemos apreciar que los pellets de nuez tienen una menor emisión en todas las variables que fueron medidas excepto en el caso de del CO₂ y el CO, en donde los pellets de coco tuvieron una menor emisión. Estas diferencias pueden originarse por la composición misma de cada uno de los pellets.

Es importante resaltar que independientemente del tipo de combustible que sea utilizado, las emisiones se ven reducidas al utilizar la potencia nominal del calefactor de interiores, esto en todas las variables que fueron analizadas.

4.4 Análisis de Componentes Principales a las variables.

En la *Figura 4.1* se muestra el resultado del ACP realizado a las variables que se presentaron en la *Tabla 4.4*, con la finalidad de hacer un análisis exploratorio y ver los patrones que se podrían generar entre las observaciones.

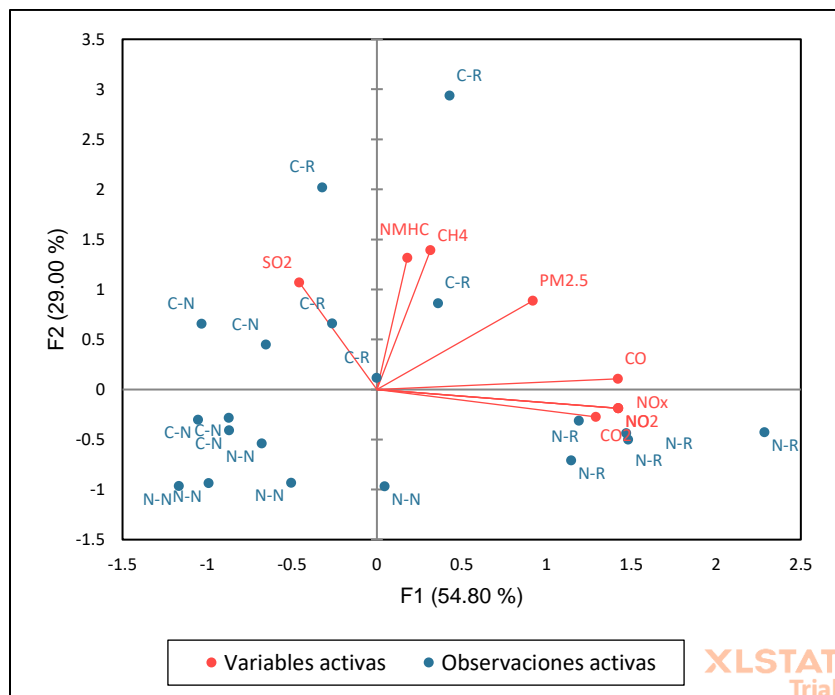


Figura 4.1. Gráfico de análisis de componentes principales a las variables de emisiones atmosféricas, contra las observaciones tipo de pellet y potencia de operación.

Nota: La primera letra de las observaciones activas hace referencia al tipo de pellet (coco o nuez) y la segunda letra hace referencia a la potencia de operación del dispositivo (nominal o reducida).

Como se puede observar existen dos agrupaciones principales, la primera de ellas en la parte izquierda de la gráfica en donde se encuentran las observaciones de coco y nuez a potencia nominal, con lo que podemos decir que estas observaciones son las que tendrán los valores más pequeños en cuanto a las variables activas. La segunda agrupación, corresponde a las observaciones de coco y nuez a potencia reducida, se encuentran del lado derecho, por lo que estos tendrán valores más altos, respecto a las variables.

Por otro lado, se puede inferir que la mayoría de las diferencias que existen entre las observaciones, se deben principalmente al tipo de operación y no tanto al tipo de pellet, ya que la potencia nominal se encuentra en mayor medida del lado izquierdo y las observaciones de potencia reducida se encuentran del lado derecho.

4.5 Análisis de variables mediante el ANOVA de dos factores.

En la *Tabla 4.5* se muestran los resultados que arrojo el análisis de varianza, es importante recordar que la finalidad de este, es determinar si existen diferencias significativas entre las variables analizadas y las condiciones de operación.

Tabla 4.5 Influencia de la condición y el tipo de pellet en la variable analizada.

Variable	Pellet	Operación	Interacción	Condición más influyente
CO ₂	X	X		<i>Pellet</i>
CO	X	X		<i>Operación</i>
CH ₄	X	X		<i>Operación</i>
NMHC	X	X		<i>Operación</i>
PM _{2.5}		X		<i>Operación</i>
NO	X	X	X	<i>Operación</i>
NO ₂	X	X	X	<i>Operación</i>
NO _x	X	X	X	<i>Operación</i>
SO ₂	X	X		<i>Pellet</i>

Nota: Las variables analizadas cumplen con una distribución normal. Cada una de las variables contó con 20 observaciones cada una y tienen un nivel de confianza del 95%.

Todas las variables tienen una influencia directa derivada por el tipo de operación del calefactor de interiores y podemos ver que es la condición que es más influyente en todas las variables, excepto en el CO₂ y el SO₂, dónde el tipo de pellet es la condición más influyente.

La interacción del tipo de pellet con la operación solo tiene importancia en las variables NO, NO₂ y NO_x.

4.6 Comparación de emisiones con pellets de pino y encino.

Para comparar de manera adecuada los valores obtenidos en esta investigación con los de una investigación similar, se transformaron las emisiones totales de aquellos valores que tienen un impacto directo como GEI: CO₂, CO, CH₄ y NMHC, a su equivalente en CO_{2e}. Es importante recalcar que las emisiones presentadas

son por kilogramo de pellet seco consumido.

Tabla 4.6 Factores de emisión de CO_{2e} por kilogramo de combustible seco consumido.

Operación	Tipo de Pellet	g CO _{2e} de CO ₂	g CO _{2e} de CO	g CO _{2e} de CH ₄	g CO _{2e} de NMHC	g CO _{2e} Total
Nominal	Cáscara de Coco	1625.84 ± 65.48	51.84 ± 10.82	48.89 ± 38.77	7.36 ± 6.71	1733.92 ± 121.78
	Cáscara de Nuez	1699.64 ± 24.95	56.07 ± 10.12	18.03 ± 12.68	2.53 ± 1.06	1776.27 ± 48.82
Reducida	Cáscara de Coco	1551.88 ± 65.48	86.53 ± 10.82	73.99 ± 38.77	13.35 ± 6.71	1725.75 ± 121.78
	Cáscara de Nuez	1675.12 ± 5.62	115.88 ± 10.10	29.00 ± 3.66	4.54 ± 0.62	1824.54 ± 20.00
Factor de Conversión		1.00	1.90	28.00	12.00	

Nota: Los valores en la tabla se presentan como un promedio ± su desviación estándar, teniendo una n=5.

Los valores presentes en la *Tabla 4.6* se obtuvieron multiplicando el valor de conversión (potencial de calentamiento de cada uno de los gases) mostrado en la *Tabla 3.1*, por los gramos reportados en la *Tabla 4.7* presente en los Anexos B.

En todos los casos la principal fuente de gases de efecto invernadero proviene del CO₂, seguido del CO y el CH₄. Estos valores nos muestran que no hay diferencias significativas entre los dos tipos de pellets evaluados en esta investigación; sin embargo, es importante mencionar que en los pellets de nuez se reducen las emisiones de CO_{2e} al utilizar la operación nominal del calefactor de interiores. Por otro lado, esto no ocurre en los pellets de coco y esto se debe principalmente a que se generó una mayor emisión de CO₂ en la operación nominal, aunque en el resto de los GEI si se ve una disminución de las emisiones.

Los valores reportados en esta investigación son comparados con lo reportado en el trabajo de *Arizaga-Murguía (2020)*, en el cual se evaluaron dos tipos de pellets de origen forestal. En la *Figura 4.2* se muestra una gráfica que se obtuvo a partir de los valores presentados en la *Tabla 4.8* presente en los Anexos B.

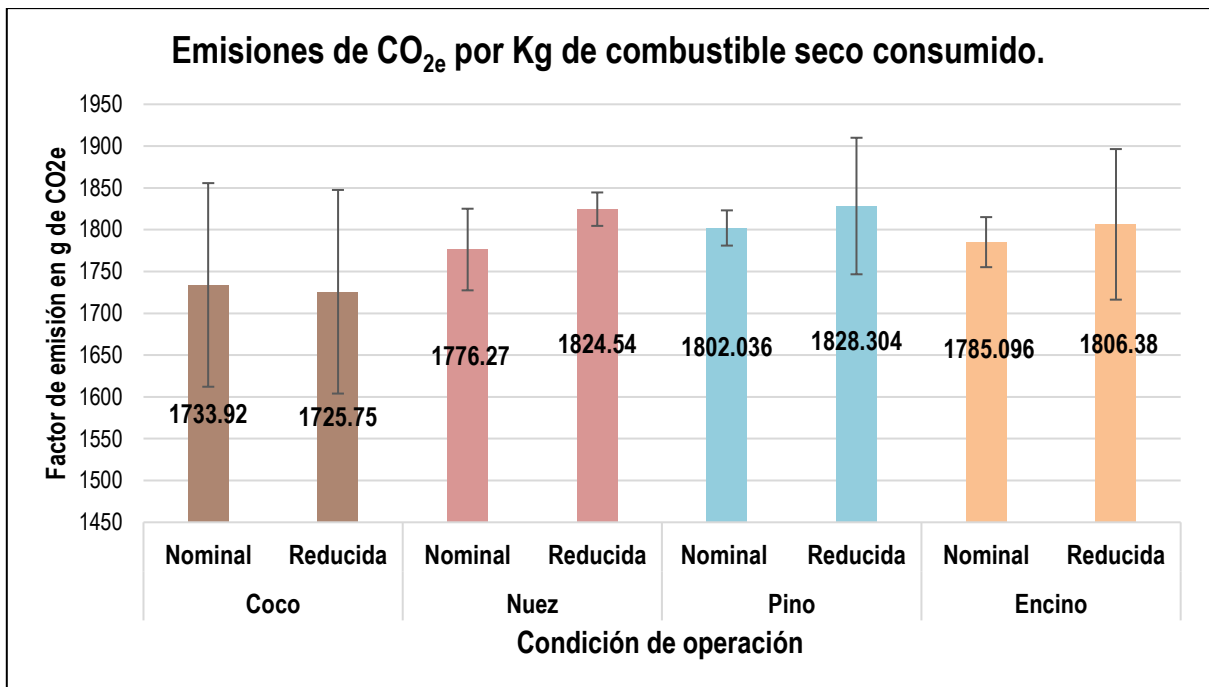


Figura 4.2 Emisiones de CO_{2e} por kg de combustible seco consumido, con pellets de coco, nuez, pino y encino a potencia nominal y reducida.

Nota: Los valores tienen una n= 5 y se muestran con su desviación estándar.

Como se aprecia en la *Figura 4.2* los pellets de origen agroindustrial tienen emisiones muy similares a los de origen forestal, teniendo en cuenta solo las emisiones de CO₂, CO, CH₄ y NMHC, con las que se hicieron los cálculos.

La potencia nominal hace que la combustión sea más eficiente y por lo tanto que las emisiones de CO_{2e} sean menores en comparación con la potencia reducida, esto sucede en todos los casos excepto con los pellets de coco.

Por otro lado, si bien se podría decir que los pellets de coco tienen una menor contribución de CO_{2e}, este podría no ser el caso, ya que su desviación estándar es muy elevada, por lo que aumentar el número de muestras podría elevar su factor de emisión y por lo tanto no ser el pellet con menor cantidad de emisiones.

Capítulo 5. Conclusiones.

- La caracterización fisicoquímica (análisis proximal), demostró que los pellets de residuos de coco y nuez evaluados en esta investigación, cumplen con la mayoría de los valores estándares propuestos en la norma europea *UNE-EN 14785*, correspondiendo a una clasificación de tipo B. Ya que el porcentaje de cenizas se encuentra en los rangos permisibles más altos, siendo en los pellets de coco el más elevado, lo que podría generar problemas durante la combustión, por la falta de aire en la cámara de combustión.
- El desempeño energético del calefactor de interiores se comporto de manera similar al utilizar los pellets de coco y nuez. De acuerdo con los análisis utilizados, no existen diferencias significativas entre el tipo de pellet utilizado; con lo cual ambos pueden ser utilizados como combustible en el calefactor de interiores.
- Las tasas de emisión intradomiciliarias de CO y PM_{2.5} reportadas en esta investigación se encuentran por debajo de los estándares presentados en la norma *ISO (19867-2:2018)*, teniendo los pellets de nuez una menor emisión que los de coco, sin embargo, ambos pellets cumplen con las recomendaciones más altas para la emisión de CO y material particulado, con lo cual, la exposición al aire caliente derivado del calefactor, no representa ningún daño a la salud de los usuario, independientemente del combustible utilizado.
- Existen diferencias significativas entre los perfiles de emisiones de los pellets utilizados. Estas diferencias se deben principalmente al tipo de operación del calefactor de interiores y en menor medida al tipo de combustible utilizado (residuos de coco y nuez).
- El uso del dispositivo a potencia nominal mejora el desempeño energético

del calefactor de interiores y reduce las emisiones derivadas de su uso, independientemente del combustible utilizado. Con lo que se obtienen emisiones similares a los pellets de origen forestal.

- El pellet agroindustrial de residuos de coco aparenta tener un mejor desempeño en comparación con el de residuos de nuez, en cuanto a emisiones dentro del calefactor de interiores. Sin embargo, esto podría cambiar al aumentar el número de repeticiones, debido a los altos valores obtenidos en su desviación estándar.

5.1 Retos y Limitantes.

- No existe una normativa a nivel internacional ni mucho menos a nivel nacional para la creación y aprovechamiento de pellets de origen agroindustrial, por lo que se siguieron las normativas propuestas para los pellets de origen forestal.
- Al no existir un protocolo en términos de emisiones fugitivas durante un proceso de calefacción, se utilizó la normativa ISO en términos de cocción de alimentos como referencia durante este estudio.
- La presencia de grandes cantidades de carbón residual (cenizas y pellets mal combustionados), originadas principalmente por el uso prolongado del calefactor de interiores con estos pellets, ocasiona problemas de ventilación, por lo que el proceso de combustión se ve afectado, llegando incluso a apagarse el calefactor durante las pruebas a potencia reducida. Lo que puede disminuir el confort de los usuarios, al hacer necesaria la limpieza del dispositivo.

5.2 Recomendaciones.

- Realizar un análisis elemental para conocer la composición química de los

biocombustibles utilizados y poder relacionarlo con los valores arrojados en el perfil de emisiones.

- Realizar un experimento similar, siguiendo la misma metodología, para poder contar con un mayor número de muestras, así como contar con diferentes tipos de pellets forestales y agroforestales, para poder realizar un análisis más robusto de los resultados.
- Realizar un análisis económico (costo-beneficio) para conocer la factibilidad socioeconómica de utilizar este tipo de tecnologías de combustión alimentadas con estos pellets, en el contexto mexicano.
- Evaluar estos pellets y otros de producción regional en un calefactor distinto, para poder generalizar su uso en diferentes tecnologías.
- Se requiere desarrollar innovación tecnológica nacional que cumpla con los estándares mínimos de desempeño térmico, que sea de accesible y de fácil uso para las personas.
- Creación de una normativa nacional, para mantener un estándar de calidad para la creación, distribución y el uso de biocombustibles sólidos densificados como los pellets. Se recomienda comenzar con una normativa flexible y en función del tiempo hacerla más estricta.
- Finalmente, continuar con el apoyo a trabajos de investigación en dispositivos para la calefacción doméstica, con la finalidad de formar una base de datos y robustecer los análisis estadísticos en el tema.

Fuentes Consultadas

Arizaga-Murguía, S. L. (2020). Evaluación del uso de residuos forestales de pino y encino en forma de pellet para satisfacer tareas de calefacción: mitigación, calidad del aire y ahorros energéticos. [Tesis de Licenciatura, Universidad Intercultural Indígena de Michoacán].

Armendáriz-Arnez, C. (2010). *Evaluación de PM_{2.5} y PAHS como indicadores de contaminación intramuros por combustión de leña: Su relación con factores de exposición*. [Tesis de Doctorado]. Universidad Nacional Autónoma de México.

Arora, P., & Jain, S. (2016). A review of chronological development in cookstove assessment methods: Challenges and way forward. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 203-220.

Arriaga-Suárez, R. A. (2021). Evaluación del perfil de emisiones de un microgasificador a base de pellets para satisfacer la tarea de realizar tortillas de comal en el contexto mexicano: retos, limitantes y beneficios. [Tesis de Licenciatura, UNAM, ENES Morelia] https://tesiuam.dgb.unam.mx/F/KP33PY2RS24MHP93DNGMY4G9VFJ8N4UYE2TU1VRV27HB5ID5G1-38218?func=find-b&local_base=TES01&request=evaluaci%C3%B3n+perfil+de+emisiones&find_code=WRD&adjacent=N&filter_code_2=WYR&filter_request_2=&filter_code_3=WYR&filter_request_3=

Ávila Arce, A., González Milán, D. D. J., Montaña Méndez, I. E., & Vizcaíno Villareal, L. A. (2020). Análisis de la competitividad y comercialización de nuez pecanera mexicana en el mercado internacional. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 11(4), 895-904.

Ayala Álvarez, I. R., Salas, A., Kruscalla, N., & Cerda González, S. R. (2021). *Identificación de nuevas tecnologías para la elaboración de pellet destinado a calefacción* (Doctoral dissertation, Universidad de Talca (Chile). Instituto de Innovación Basado en Ciencia).

Boada, L. E. A., & Vargas, F. E. S. (2015). Caracterización físico-química de pellets producidos a partir de mezclas 50/50 carbón bituminoso/madera residual. *Informador técnico*, 79(1), 18-25.

Bonjour, S., Adair-Rohani, H., Wolf, J., Bruce, N. G., Mehta, S., Prüss-Ustün, A., Lahiff, M., Rehfuess, E. A., Mishra, V., & Smith, K. R. (2013). Solid fuel use for

household cooking: Country and regional estimates for 1980-2010. *Environmental Health Perspectives*, 121(7), 784–790. <https://doi.org/10.1289/ehp.1205987>

Bustamante García, V., Carrillo Parra, A., Prieto Ruíz, J. Á., Corral-Rivas, J. J., & Hernández Díaz, J. C. (2016). Química de la biomasa vegetal y su efecto en el rendimiento durante la torrefacción: revisión. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 7(38), 5-23.

Carrillo Paniagua, T. (2015). Caracterización de pellets con fines energéticos elaborados a partir de residuos forestales.

Carvalho, L., Wopienka, E., Pointner, C., Lundgren, J., Verma, V. K., Haslinger, W., & Schmidl, C. (2013). Performance of a pellet boiler fired with agricultural fuels. *Applied energy*, 104, 286-296.

Callejas, E. S., & Quezada, V. G. (2009). Los biocombustibles. *El cotidiano*, (157), 75-82.

Camargo, N., & Williams, D. (2012). Uso de residuos agrícolas para la producción de biocombustibles en el departamento del Meta. *Tecnura*, 16(34), 142-156.

Chum, H., Faaij, A., Moreira, J., Berndes, G., Dhamija, P., Dong, H., ... & Cerutti, O. M. (2011). Bioenergy. In *Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 209-332).

Conover, W. J., & Iman, R. L. (1981). Rank transformations as a bridge between parametric and nonparametric statistics. *The American Statistician*, 35(3), 124-129.

Corredor, O. F. (2008). Evaluación del potencial energético de la biomasa residual proveniente de cultivos energéticos. *Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander*, 7.

Corredor, Y. A. V., & Pérez, L. I. P. (2018). Aprovechamiento de residuos agroindustriales en el mejoramiento de la calidad del ambiente. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 59-72.

De Buen O., Hernández F., Navarrete J. (2016). Análisis de la evolución del consumo eléctrico residencial entre 1982 y 2014 e impactos de ahorro de energía por políticas públicas. Comisión Nacional para el Uso Eficiente de Energía. Cuadernos de la Conuee, núm. 1.

Díaz, R., Masera, O. & Berrueta, V. (2011). Cuadernos Temáticos sobre BIOENERGÍA: Estufas de leña. Obtenida de <https://rembio.org.mx/cuadernos-tematicos/>

Di Giacomo, G., & Taglieri, L. (2009). Renewable energy benefits with conversion of woody residues to pellets. *Energy*, 34(5), 724-731.

Duca, D., Riva, G., Pedretti, E. F., & Toscano, G. (2014). Wood pellet quality with respect to EN 14961-2 standard and certifications. *Fuel*, 135, 9-14.

Echeverri Londoño, C. A. (2006). Estimación de la emisión de gases de efecto invernadero en el municipio de Montería (Córdoba, Colombia). *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 5(9), 85-96.

Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Seyboth, K., Matschoss, P., Kadner, S., ... & von Stechow, C. (2011). IPCC special report on renewable energy sources and climate change mitigation. *Prepared By Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK.*

Escoto A., Sánchez L., Pérez G. (2016). Hogares y energía eléctrica en México. *Revista Espinhaço*. 5(2). 30-40.

Esteban, A. (2015). El debate de la bioenergía en el medio rural: entre la soberanía y el extractivismo. *Soberanía alimentaria, biodiversidad y culturas*, (23), 0010-15.

European Committee for Standardization. (2006). Residential Space Heating Appliances Fired by Wood Pellets—Requirements and Test Methods; EN 14785: 2006. Brussels, Belgium: European Committee for Standardization.

FAO. (2018). Curso: De la Biomasa a la Energía Renovable. Dendroenergía en Argentina. <http://www.fao.org/alc/cursos/biomasa/home/pag/4>

García, C. A., & Masera, O. (2016). Estado del arte de la bioenergía en México. *Red Temática de Bioenergía del Conacyt.*

García, C. A., Riegelhaupt, E., & Masera, O. (2013). Escenarios de bioenergía en México: potencial de sustitución de combustibles fósiles y mitigación de GEI. *Revista Mexicana de Física*, 59(2), 93-103.

García, C. A., Riegelhaupt, E., Ghilardi, A., Skutsch, M., Islas, J., Manzini, F., & Masera, O. (2015). Sustainable bioenergy options for Mexico: GHG mitigation and costs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 545-552.

Giraldo, L. M., Correa, H. M., Gutiérrez, J. B., & Castano, C. C. (2007). Aprovechamiento del residuo agroindustrial del mango común (*Mangifera indica* L.) en la obtención de azúcares fermentables. *Ingeniería y ciencia*, 3(6), 41-62

Goh, C. S., Junginger, M., Cocchi, M., Marchal, D., Thrän, D., Hennig, C., ... & Deutmeyer, M. (2013). Wood pellet market and trade: a global perspective. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 7(1), 24-42.

Hansen, M. T., Jein, A. R., Hayes, S., & Bateman, P. (2009). English handbook for wood pellet combustion. *Europe: National Energy Foundation*.

IPCC, C. C. (2014). Mitigation of climate change. Contribution of working group III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change.

ISO 18125:2017. Biocombustibles sólidos. Determinación del poder calorífico.

ISO 18134-3:2015. Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido de humedad. Método de secado en estufa. Parte 3. Humedad de la muestra para análisis general.

ISO 18122:2015. Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido de cenizas.

ISO 18123:2015. Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido en materia volátil.

ISO/TR 19867-3:2018. Clean cookstoves and clean cooking solutions Harmonized laboratory test protocols— Part 3: Voluntary performance targets for cookstoves based on laboratory testing.

Johnson, T. M., Alatorre, C., Romo, Z., & Liu, F. (2010). *Mexico-Estudio sobre la disminucion de emisiones de carbono*. The World Bank.

Kusch-Brandt, S. (2019). Urban Renewable Energy on the Upswing: A Spotlight on Renewable Energy in Cities in REN21's "Renewables 2019 Global Status Report".

Larrañaga, M. M. (2010). La bioenergía: estrategia para una economía

verde. *Ambienta: la revista del Ministerio de Medio Ambiente*, (93), 90-100.

López Orozco, M. (2018). Evaluación comparativa de emisiones de carbono negro, carbono elemental y carbono orgánico provenientes de los principales dispositivos de cocción con leña, en ciclos de cocinado (tesis de maestría en ciencias en ingeniería química). Universidad Michoacana De San Nicolas de Hidalgo.

Lim, S. S., Vos, T., Flaxman, A. D., Danaei, G., Shibuya, K., Adair-Rohani, H., ... & Pelizzari, P. M. (2012). A comparative risk assessment of burden of disease and injury attributable to 67 risk factors and risk factor clusters in 21 regions, 1990–2010: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2010. *The lancet*, 380(9859), 2224-2260.

Masera, O., Edwards, R., Arnez, C. A., Berrueta, V., Johnson, M., Bracho, L. R., ... & Smith, K. R. (2007). Impact of Patsari improved cookstoves on indoor air quality in Michoacán, Mexico. *Energy for Sustainable Development*, 11(2), 45-56.

Masera, O., Coralli, F., García, C., Riegelhaupt, E., Arias, T., Vega, J., ... & Cecotti, L. (2011). La bioenergía en México. Situación actual y perspectivas. Red Mexicana de Bioenergía, AC, México, 7-8

Moreno-Lopez, M., Alarcón-Herrera, M. T., & Martin-Dominguez, I. R. (2017). Feasibility of pelletizing forest residues in Northern Mexico. *Waste and biomass valorization*, 8(3), 923-932.

Moyano, M. P. P. (2012). Confort térmico. *Universidad de Cuenca, Cuenca*.

Muñoz M, D., Cuatin, M. F., & Pantoja, A. J. (2013). Potencial energético de residuos agroindustriales del departamento del Cauca, a partir del poder calorífico inferior. *Bioteología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 11(2), 156-163.

Musule, R., Pale-Ezquivel, I., Gordillo-Cruz, E., Gómez-Luría, D., Equihua-Sánchez, M., Aguilar-Sánchez, P., ... & García-Bustamante, C. A. (2022). A Comparative Analysis of Different Types of Mexican Agroindustrial Pellets Using High-Throughput Instrumental Techniques. *BioEnergy Research*, 1-17.

Muñoz-Muñoz, D., Pantoja-Matta, A. J., & Cuatin-Guarin, M. F. (2014). Aprovechamiento de residuos agroindustriales como biocombustible y biorefinería. *Bioteología en el sector agropecuario y agroindustrial*, 12(2), 10-19.

Navarro, D. (2021). Qué son los pellets. Características, tipos, precios, ventajas y

desventajas. Recuperado el 15 de mayo de 2022 de Estufasguía Sitio web: <https://estufasguia.com/blog/estufa-de-pellets/que-son-los-pellets/>

Núñez, C. A. F., Fajardo, C. A. G., & Vargas, F. E. S. (2012). Producción y uso de pellets de biomasa para la generación de energía térmica: una revisión a los modelos del proceso de gasificación. *ITECKNE: Innovación e Investigación en Ingeniería*, 9(1), 21-30.

Orona Castillo, I., Sangerman-Jarquín, D. M., Cervantes Vázquez, M. G., Espinoza Arellano, J. D. J., & Núñez Moreno, J. H. (2019). La producción y comercialización de nuez pecanera en México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 10(8), 1797-1808.

Paneque Corrales, M., Román Figueroa, C., Vásquez Panizza, R., Arriaza, J. M., Morales, D., & Zulantay, M. (2011). Bioenergía en Chile.

Quiñones-Reveles, M. A., Ruiz-García, V. M., Ramos-Vargas, S., Vargas-Larreta, B., Masera-Cerutti, O., Ngangyo-Heya, M., & Carrillo-Parra, A. (2021). Assessment of Pellets from Three Forest Species: From Raw Material to End Use. *Forests*, 12(4), 447.

Ramírez Bayas, S. G. (2012). *Aprovechamiento de residuos Agroindustriales, cascarilla de arroz (Oriza sativa) y residuos de papa (Solanum tuberosum) para la producción de Trichoderma spp* (Bachelor's thesis, Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos. Carrera de Ingeniería Bioquímica).

REMBIO. (2018). Biocombustibles Sólidos. Consultado en mayo 05, 2022, de Red Mexicana de Bioenergía en Sitio web: <https://rembio.org.mx/biocombustibles-solidos/>

REN21. (2014). Renewables 2014. Global Status Report, Paris: Renewable EnergyPolicy Network for the 21st Century.

REN21, R. (2017). Global Status Report, REN21 Secretariat, Paris, France. In *Tech. Rep.* (pp. 91-93).

Rios, M., & Kaltschmitt, M. (2013). Bioenergy potential in Mexico—status and perspectives on a high spatial distribution. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 3(3), 239-254.

Ríos-Badrán, I. M., Santos-Cruz, J., & Gutiérrez-Antonio, C. (2017). Biocombustibles sólidos: una solución al calentamiento global. *Ciencia*, 68 número 4, p.i1-i10.

Ríos, G. L., & Sánchez, D. G. (2002). Manejo de la palma de coco (*Cocos nucifera* L.) en México. *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente*, 8(1), 39.

Rodríguez, R. P. (2018). Combustibles alternativos de segunda y tercera generación para motores de combustión interna. *Anales de la Academia de Ciencias de Cuba*, 8(1).

Ruiz García, V. (2018). Evaluación Comparativa Del Desempeño Energético, Emisiones Intramuros Y A La Atmosfera De Diferentes Modelos De Estufas Eficientes De Leña [Universidad Nacional Autónoma de México]. <https://patentimages.storage.googleapis.com/41/b5/ca/69ffeea861af61/US8949899.pdf>

Ruiz-García, V. M., Edwards, R. D., Ghasemian, M., Berrueta, V. M., Princevac, M., Vázquez, J. C., ... & Masera, O. R. (2018). Fugitive emissions and health implications of plancha-type stoves. *Environmental science & technology*, 52(18), 10848-10855.

SADER (2022). Producción de copra y coco en México. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Gobierno de México. Obtenido de <https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/produccion-de-copra-y-coco-en-mexico?idiom=es>

Sánchez L. (2012) Hogares y consumo energético en México. *Revista Digital Universitaria*, Vol. 13, núm. 10. 2-5.

Sánchez, D. (2012). Biocombustibles y calderas de biomasa. La biomasa, una oportunidad para las entidades locales. http://www.crana.prg/themed/crana/files/docs/212/172/4biomasa_cener_david_snc_hez.pdf

Sánchez Riaño, A. M., Gutiérrez Morales, A. I., Muñoz Hernández, J. A., & Rivera Barrero, C. A. (2010). Bioethanol Production from agroindustrial lignocellulosic byproducts. *Revista Tumbaga*, 5, 61-91.

Saval, S. (2012). Aprovechamiento de residuos agroindustriales: pasado, presente

y futuro. *BioTecnología*, 16(2), 14-46.

SENER. (2017). Balance Nacional de Energía. http://www.energia.gob.mx/res/PE%7B_%7Dy%7B_%7DDT/pub/2013/Balance%7B_%7D2013.pdf

SENER (2018). Balance Nacional de Energía 2017. Secretaría de Energía. Dirección General de Planeación e Información Energéticas. México 2018. 11-121.

SENER. (2019). Balance Nacional de Energía. 2 de octubre de 2020, de Secretaría de Energía Sitio web: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/528054/Balance_Nacional_de_Energia_a_2018.pdf

SENER. (2021). Balance Nacional de Energía. Secretaría de Energía. Sitio web: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/707654/BALANCE_NACIONAL_ENERGIA_0403.pdf.

Shang, L., Nielsen, N. P. K., Dahl, J., Stelte, W., Ahrenfeldt, J., Holm, J. K., ... & Henriksen, U. B. (2012). Quality effects caused by torrefaction of pellets made from Scots pine. *Fuel Processing Technology*, 101, 23-28.

Smith, K. R., Dutta, K., Chengappa, C., Gusain, P. P. S., Masera, O., Berrueta, V., ... & Shields, K. N. (2007). Monitoring and evaluation of improved biomass cookstove programs for indoor air quality and stove performance: conclusions from the Household Energy and Health Project. *Energy for Sustainable Development*, 11(2), 5-18.

Smith, K. R. (2013). Biofuels, air pollution, and health: a global review.

Speight, J. (2008). Synthetic fuels handbook: properties, process and performance.

Speight, J. G. (2020). *Synthetic fuels handbook: properties, process, and performance*. McGraw-Hill Education.

Statistics, I. E. A. (2011). CO2 emissions from fuel combustion-highlights. *IEA, Paris* <http://www.iea.org/co2highlights/co2highlights.pdf>. Cited July.

Tauro, R., Serrano-Medrano, M., & Masera, O. (2018). Solid biofuels in Mexico: a sustainable alternative to satisfy the increasing demand for heat and power. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 20(7), 1527-1539.

Tauro, R. (2018). Pellets de residuos agroindustriales y forestales: Evaluación de factibilidad para la generación de energía térmica. México: Universidad Nacional Autónoma de México.

Uslu, A., Gomez, N., & Belda, M. (2010). Demand for lignocellulosic biomass in Europe. *Elobio Biofuels Policies for Dynamic Markets*.

Valdez-Vazquez, I., Acevedo-Benítez, J. A., & Hernández-Santiago, C. (2010). Distribution and potential of bioenergy resources from agricultural activities in Mexico. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(7), 2147-2153.

Vargas, F. S., Guerrero, C., & Arango, J. (2008). Tecnologías para el aprovechamiento de los Biocombustibles. *Bogotá: Universidad Nacional de Colombia*.

Vinterbäck, J. (2004). Pellets 2002: the first world conference on pellets. *Biomass and Bioenergy*, 27(6), 513-520.

World Health Organization. (2014). WHO guidelines for indoor air quality: household fuel combustion. World Health Organization.

Yildirim, E., Saraç, Ş., & Aslan, A. (2012). Energy consumption and economic growth in the USA: Evidence from renewable energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(9), 6770-6774.

Anexo A. Equipos utilizados.

Figura 3.2. Calorímetro marca Parr modelo 6100.
Dispositivo utilizado para determinar el poder calorífico de los pellets de coco.



Figura 3.3. Balanza analítica OHAUS – EX225D.
Equipo utilizado para pesar las muestras de los pellets para la caracterización de los pellets de coco y también para el pesado de los filtros de materia particulada.



Figura 3.4. Horno de secado esmaltado marca NOVATECH modelo HS60-ED.
Se utilizó para el secado de los crisoles y las muestras de pellets, eliminando el contenido de humedad.



Figura 3.5. Mufa marca NOVATECH modelo MD-20.
En la que se llevaron a cabo las pruebas para determinar el porcentaje de cenizas y materiales volátiles.



Figura 3.6. Calefactor de interiores SM-10.

Dispositivo en el cual se combustionaron los pellets y a través del cual se midieron las emisiones.



Figura 3.7. Báscula marca Advance RH modelo BAPLE.

Este dispositivo fue utilizado para pesar el calefactor de interiores antes y después de terminar las pruebas para determinar el consumo del combustible.



Figura 3.9. TESTO modelo 340 USA.

Utilizado para medir la concentración de CO₂.



Figura 3.10. Q-Track. Dispositivo utilizado para medir la concentración de CO y CO₂, además de la temperatura del flujo.



Figura 3.11. Cromatógrafo Young Lin modelo 6500.
Este equipo fue utilizado para medir las concentraciones del metano y los compuestos no metánicos.



Figura 3.12. Sistema gravimétrico PEMS.
Permite obtener las muestras de las concentraciones del material particulado.



Figura 3.13. Medidor de flujo Defender 520.
Nos permite calibrar el flujo de las bombas de succión.



Figura 3.14. Bombas de succión.
Estas fueron utilizadas para obtener la succión necesaria en los trenes de muestreo de las emisiones atmosféricas y las emisiones intradomiciliarias respectivamente.



Anexo B. Tablas y figuras complementarias.

Tabla 4.7 Factores de emisión por kilogramo de combustible seco consumido.

Operación	Tipo de Pellet	CO2	CO	CH4	NMHC	PM2.5	NO	NO2	NOx	SO2
Nominal	Coco	1626 65.48	27.28 5.70	1.75 1.38	0.61 0.56	3.13 2.48	2.11 0.48	0.11 0.03	2.22 0.50	0.67 0.50
	Nuez	1700 24.95	29.51 5.33	0.64 0.45	0.21 0.09	2.24 0.45	1.59 0.35	0.08 0.02	1.67 0.36	0.01 0.02
Reducida	Coco	1552 65.48	45.54 5.70	2.64 1.38	1.11 0.56	7.00 2.48	1.73 0.48	0.09 0.03	1.82 0.50	0.42 0.50
	Nuez	1675 5.62	60.99 5.32	1.04 0.13	0.38 0.05	4.32 0.45	2.37 0.09	0.12 0.00	2.49 0.10	0.00 0.00

Nota: Los valores en la tabla se presentan como un promedio \pm su desviación estándar, teniendo una n=5.

Tabla 4.8 Factores de emisión de CO_{2e} por kilogramo de combustible seco.

Operación	Tipo de Pellet	CO2	CO	CH4	NMHC	Total
Nominal	Coco	1625.84 65.48	51.84 10.82	48.89 38.77	7.36 6.71	1733.92 121.78
	Nuez	1699.64 24.95	56.07 10.12	18.03 12.68	2.53 1.06	1776.27 48.82
	Pino*	1763 13	18 3	0.108 0.057	0.151 0.064	1802.036 21.064
	Encino*	1744 24	20 3	0.024 0.004	0.202 0.01	1785.096 29.932
Reducida	Coco	1551.88 65.48	86.53 10.82	73.99 38.77	13.35 6.71	1725.75 121.78
	Nuez	1675.12 5.62	115.88 10.10	29.00 3.66	4.54 0.62	1824.54 20.00
	Pino*	1681 38	68 21	0.323 0.064	0.755 0.164	1828.304 81.66
	Encino*	1643 37	80 24	0.187 0.146	0.512 0.282	1806.38 90.072
Factor de Conversión		1.00	1.90	28.00	12.00	

Nota: Los valores en la tabla se presentan como un promedio \pm su desviación estándar, teniendo una n=5. Los valores con un * fueron obtenidos de Arizaga-Murguía (2020).