

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITERAL

Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas

**DISEÑO DE UN PROCESO PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE
BAGAZO DE CAFÉ EN UN CALDERO ACUOTUBULAR**

PROYECTO INTEGRADOR

Previo a la obtención del título de:

Ingeniero Químico

Presentado por:

Doménica Belén Feijoo Chávez

Diana Grace López Mora

GUAYAQUIL - ECUADOR

2023 - 2024

DEDICATORIA

A mis padres, Betsy Chávez y Manuel Feijoo, cuya dedicación y esfuerzo han sido fuente inagotable de apoyo a lo largo de mi existencia. A mi querida hermana y doctora favorita, Samantha Feijoo, cuyo cariño incondicional y esfuerzos incansables por mi bienestar han sido invaluable. A mi hermano Jared Pilozo, cuyas travesuras y crecimiento he tenido el privilegio de presenciar. A mis abuelitos, Irma Romero y Marco Feijoo, así como a mi amada mami María, quien, desde el cielo, seguramente me observa con orgullo. Un agradecimiento especial a mi tía Soraya Feijoo, mi confidente y consejera, una segunda madre cuando más lo he necesitado. A mi primo Rafael Jaramillo, presente desde el inicio de este proceso, brindándome su apoyo incondicional como un hermano. A mis amigos con quienes he compartido experiencias inolvidables. Por último, a One Direction, porque tengo fe que van a regresar.

Doménica Belén Feijoo Chávez

DEDICATORIA

A mis padres, Edgar López y Esther Mora, porque siempre creyeron en mí y me apoyaron con todo lo que estuvo a su alcance para que mi formación académica fuera todo lo que yo esté dispuesta a alcanzar. Ellos son los pilares de mi vida, quienes me motivan a no rendirme y me impulsan a seguir adelante, quienes me ayudaron a convertirme en la persona que me siento orgullosa de ser. A mi hermana Patricia López quién supo distraerme y alegrarme cuando lo necesitaba. A los amigos que hice en la carrera, por ayudarme con cada pequeño o gran detalle que necesité para avanzar con este proyecto y por su motivación, sin ustedes esto no fuera posible. Por último, a mi gato Baco quien me acompañó durante varias noches en la ejecución de mis actividades académicas.

Diana Grace López Mora

AGRADECIMIENTOS

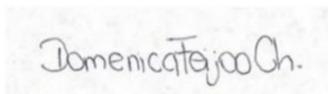
Ante todo, ponemos nuestra gratitud en Dios ya que, sin él, nada fuera posible. Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a los dedicados tutores, el Dr. Carlos Bucaram y la Mgtr. Irina León, cuya orientación y enseñanzas fueron esenciales para el éxito de este proyecto. Extendemos un agradecimiento especial al Ing. José Reinoso por sus consejos y ayuda en el laboratorio CDTS y a la Ing. Myriam Santos, profesora dedicada y amiga constante en nuestra carrera, en especial en este proyecto. Reconocemos con gratitud a la Q.F. Maribel Jaramillo e Ing. Tyrone Alcívar por confiar sus instalaciones en nosotras, siendo elementos clave para la realización experimental. También agradecemos a los pasantes de los laboratorios de química e hidrocarburos por su valiosa colaboración. Este logro no solo es el resultado de nuestro esfuerzo, sino también del apoyo generoso y la inspiración que hemos recibido de estas excepcionales personalidades. Estamos emocionalmente agradecidos por la oportunidad de aprender y crecer bajo su tutela.

DECLARACIÓN EXPRESA

Nosotras Doménica Belén Feijoo Chávez y Diana Grace López Mora acordamos y reconocemos que la titularidad de los derechos patrimoniales de autor del proyecto de graduación corresponderá los autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor los autores. La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por nosotras durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 12 de enero del 2024.



Doménica Feijoo



Diana López

EVALUADORES

PhD. Carlos Bucaram C.

Tutor de proyecto

Mgr. Irina León G.

Cotutora de proyecto

PhD. Suanny Mosquera R.

Profesor de Materia

RESUMEN

En las industrias de producción de café soluble en Ecuador, las calderas utilizadas dependen de combustibles fósiles, con un costo de \$4000/día para abastecer la demanda de 20-50 toneladas de vapor. El 54% del café verde ingresado se convierte en un residuo significativo en vertederos. Con el objetivo de reducir la dependencia de combustibles fósiles y la cantidad de residuos, se evalúa el potencial de generación energética a partir de pellets con bagazo de café en la simulación de una caldera acuotubular en Aspen Plus. Se caracterizaron 5 muestras de pellets con diferentes composiciones de bagazo de café y aserrín. El análisis determinó la muestra con mayor poder calórico, menor contenido de cenizas y emisiones reducidas de GEI. La muestra con puro bagazo de café presentó un poder calórico de 24.7MJ/kg, atribuido a su elevado contenido de carbono fijo y bajo porcentaje de cenizas. Se evidenció que 1kg de pellet generaba 8.26kg de vapor a 220°C y 196psi, reduciéndose el 99% de residuos. Se estima la percepción de ahorro tras 19.5 meses de inversión en la caldera concluyendo que los pellets de bagazo de café tienen propiedades energéticas significativas, logrando reducir residuos y disminuyendo la dependencia de recursos no renovables.

Palabras clave: Bagazo de café, fuel oil n°6, poder calórico, caldera acuotubular.

ABSTRACT

In Soluble Coffee Production Industries in Ecuador, the boilers used currently rely on fossil fuels, with a cost of \$4000/day to meet the demand for 20-50 tons of steam. Moreover, 54% of the green coffee entering the plant becomes a significant waste in landfills. With the goal of reducing dependence on fossil fuels and the amount of waste, the potential for energy generation from Spent Coffee Grounds (SCG) pellets is being evaluated through the simulation of a water-tube boiler in Aspen Plus. To achieve this, five samples of pellets with different compositions of SCG and sawdust were characterized. The analysis focused on determining the sample with the highest calorific value, lower ash content, and reduced emissions of GHG. The sample with 100% SCG exhibited a calorific value of 24.7MJ/g, attributed to its high fixed carbon content and low ash percentage. It was evident that each kg of SCG pellet produced 8.26kg of steam at 220°C and 196 psi, reducing waste by 99%. Additionally, it is estimated that, after 19.5 months of investment in the boiler, the coffee company anticipates substantial savings concluding that 100% SCG pellets demonstrate significant energy properties, effectively reducing waste and decreasing reliance on non-renewable resources.

Keywords: *Spent coffee grounds (SCG), fuel oil n° 6, caloric value, water tube boiler.*

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	I
ABSTRACT.....	II
ABREVIATURAS	VI
SIMBOLOGÍA	VII
ÍNDICE DE TABLAS	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	IX
ÍNDICE DE GRÁFICAS.....	X
CAPÍTULO 1.....	11
1.1. Introducción.....	12
1.2. Descripción del problema.....	12
1.3. Justificación.....	14
1.4. Objetivos.....	16
1.4.1. Objetivo general	16
1.4.2. Objetivos específicos.....	16
1.5. Marco teórico.....	17
1.5.1. Industria para la producción de café instantáneo.....	17
1.5.2. Calderas	18
1.5.3. Combustibles fósiles.....	19
1.5.4. Biomasa para uso energético	22
1.5.4.1. Bagazo de café como biomasa.....	22
1.5.5. Pellets.....	23
1.5.5.2.1. Aceite como aglutinante.....	24
1.5.6. Normas ISO 17225:2021 – Parte 2 y 6.....	24
1.5.6.1. Propiedades fisicoquímicas, energéticas y dimensiones regidas en norma ISO 17225:2021	25
CAPÍTULO 2.....	26
2. METODOLOGÍA	27
2.1. Diseño metodológico	27
2.2. Materias primas.....	29
2.2.1. Aserrín	29
2.3. Reactivos utilizados durante el tratamiento y caracterización de la materia prima	29

2.3.1.	Agua como aglutinante.....	29
2.3.2.	Hexano.....	29
2.3.	Recolección de muestras	30
2.4.	Secado inicial.....	30
2.5.	Filtrado.....	31
2.6.	Mezcla de materias primas	31
2.7.	Elaboración de pellets.....	32
2.8.	Secado de pellets	35
2.9.	Caracterización fisicoquímica del pellet.....	35
2.9.1.	Análisis inmediato	35
2.9.1.1.	Determinación de la humedad total.....	36
2.9.1.2.	Determinación del contenido de cenizas.....	36
2.9.1.3.	Determinación de material volátil.....	37
2.9.1.4.	Determinación de carbono fijo.....	38
2.9.2.	Determinación del poder calorífico	38
2.9.3.	Determinación del contenido de aceite.....	39
2.9.4.	Determinación de densidad	40
2.9.5.	Medición de dimensiones	41
2.9.6.	Determinación del contenido elemental	42
2.9.7.	Determinación del punto de ignición.....	43
2.10.	Determinación de la composición de gases de combustión	43
2.13.	Determinación de la composición óptima de bagazo de café y aserrín.....	45
2.14.	Modelado de una caldera acuotubular en Aspen	46
CAPÍTULO 3.....		50
3.	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	51
3.1.	Resultados en la obtención de aceite	51
3.2.	Resultados del análisis inmediato.....	52
3.3.	Resultados sobre las dimensiones de los pellets.....	53
3.4.	Resultados obtenidos en pruebas de densidad.....	54
3.5.	Resultados del punto de ignición del bagazo de café	55
3.6.	Resultados en la obtención del poder calorífico	56
3.7.	Resultados sobre la composición de gases de combustión.....	58

3.8.	Elección de la composición óptima	60
3.9.	Resultados del análisis elemental	61
3.10.	Resultados de la simulación	63
3.10.1.	Diagrama de flujo de proceso	63
3.10.2.	Tablas de resultados	65
3.11.	Resultados de dimensionamiento	69
3.12.	Resultados de estimación de costos	70
3.13.	Resultados de estimación de ahorro	71
CAPÍTULO 4.....		74
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	75
4.1.	Conclusiones.....	75
4.2.	Recomendaciones	76
BIBLIOGRAFÍA		77

ABREVIATURAS

CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
NO _x	Óxidos de nitrógeno
SCG	Spent Coffee Grounds
LCV	Lower Caloric Value – Poder Calórico Inferior
IVA	Impuesto al valor agregado
CSTR	Continuous Stirred Tank Reactor
ISO	International Organization for Standardization
ASTM	American Society for Testing and Materials
CDTS	Centro de Desarrollo Tecnológico Sustentable
FIMCP	Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
DPD	N,N-Dietil-p-fenilendiamina
BS	Base seca
BH	Base húmeda
C	Carbono
H	Hidrógeno
O	Oxígeno
N	Nitrógeno
S	Azufre
Cl	Cloro
EES	Engineering Equation Solver – Solucionador de ecuaciones de ingeniería
CAPCOST	Capital Cost – Costo Capital
CEPCI	Chemical Engineering Plant Cost Index – Índice de Costo de Planta de Ingeniería Química

SIMBOLOGÍA

°C	Grados Celsius
MJ/kg	Mega jules por kilogramos
J/g	Jules por gramos
g/mL	Gramos por mililitro
kg/m ³	Kilogramo por metro cúbico
mm	Milímetro
kg	Kilogramo
g	Gramo
cm	Centímetro
HP	Horsepower
%v/v	Porcentaje volumen-volumen
%LEL	Límites inferiores de explosividad
ppm	Partes por millón
atm	Atmósfera
psi	Pound-force per square inch – Libra fuerza por pulgada cuadrada
BTU	British Thermal Unit
kg/s	Kilogramos por segundo
kg/h	Kilogramos por hora
U	Coefficiente global de transferencia de calor
W	Watts
W/cm ² K	Watts por centímetros cuadrados Kelvin
cm ²	Centímetros cuadrados
m ²	Metros cuadrados
x	Calidad de la mezcla líquido-vapor
ASH	Cenizas en Aspen Plus

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Precios de los combustibles en Ecuador.....	21
Tabla 1.2. Resumen de estándares establecidos en la norma ISO 17225:2021 Parte 2 y 6.....	25
Tabla 2.1. Variables e indicadores.....	27
Tabla 2.2. Masa de bagazo de café y aserrín en las diferentes 5 muestras.....	32
Tabla 2.3. Método y técnica de análisis aplicados en los laboratorios externos para determinar el análisis elemental de la muestra seleccionada.....	42
Tabla 2.4. Equipos utilizados en la simulación de una caldera acuotubular en Aspen Plus V12.1.....	47
Tabla 2.5. Datos de entrada a la simulación en Aspen Plus V12.1.....	49
Tabla 3.1. Resultados obtenidos del análisis inmediato.....	52
Tabla 3.2. Dimensiones medidas de los diferentes pellets.....	53
Tabla 3.3. Resultados obtenidos en las pruebas de densidad.....	54
Tabla 3.4. Gases de combustión durante la quema de diferentes tipos de pellets.....	58
Tabla 3.5. Datos sobre gases de combustión de una caldera que trabaja con Fuel Oil nº6.....	60
Tabla 3.6. Resultados de análisis elemental realizado al bagazo de café en laboratorios externos.....	62
Tabla 3.7. Estados del agua-vapor en el sistema dentro de la simulación en Aspen V12.1.....	65
Tabla 3.8. Resultados de alimentación de pellets óptima.....	66
Tabla 3.9. Condiciones de las corrientes de aire en la simulación en Aspen Plus V12.1.....	67
Tabla 3.10. Gases de combustión a la salida de cada etapa al alimentar el flujo mínimo y máximo pellets en Aspen Plus V12.1.....	68
Tabla 3.11. Reducción de residuos.....	69
Tabla 3.12. Resultados de parámetros de diseño.....	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Diseño metodológico.....	28
Figura 2.2. Bandejas de aluminio con bagazo de café en su interior durante el proceso de secado en una estufa REBELK RS-40P.....	30
Figura 2.3. Partículas contenidas en el bagazo de café y aserrín que fueron retenidas por el colador.....	31
Figura 2.4. Peletizadora ubicada en CDTS puesta en marcha con la biomasa tratada.....	33
Figura 2.5. Temperaturas registradas durante la elaboración de pellet.....	34
Figura 2.6. Separación de pellets formados del polvo sin peletizar con ayuda de un tamiz.....	34
Figura 2.7. Secador de bandejas en donde los pellets fueron secados.....	35
Figura 2.8. Obtención del parámetro de humedad a través de una termobalanza marca KERN.....	36
Figura 2.9. Pellets en el interior de los crisoles antes y después de ingresar a la mufla.....	37
Figura 2.10. Bomba calorimétrica usada para la medición de poder calórico.....	39
Figura 2.11. Obtención de aceite por muestra mediante extracción Soxhlet.....	40
Figura 2.12. Pellet sumergido en el interior de una probeta con agua.....	41
Figura 2.13. Medición de la longitud de un pellet con el uso de un Vernier Digital.....	41
Figura 2.14. Detección punto de ignición.....	43
Figura 2.15. Obtención de gases de combustión durante la quema de los diferentes pellets elaborados.....	44
Figura 3.1. Diagrama de flujo de proceso de la simulación del caldero acuotubular en Aspen Plus V12.1.....	63
Figura 3.2. Subdiagrama de flujo de proceso en el equipo HOG-PARE de la simulación del caldero acuotubular en Aspen Plus V12.1.....	64
Figura 3.3. Curva de saturación del agua con los datos del sistema obtenida con el software EES.....	66
Figura 3.4. Captura de resultados del CAPCOST.....	71

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfico 1.1. Demanda de combustibles fósiles durante el año 2021 en Ecuador.....	20
Gráfico 3.1. Resultados del contenido de aceite extraído en cada muestra.....	51
Gráfico 3.2. Resultados del poder calórico en muestras de pellets diferentes.....	57
Gráfico 3.3. Estimación de ahorro mensual con una producción del 100% del vapor a partir de pellets.....	72
Gráfico 3.4. Estimación de ahorro mensual con una producción del 100% del vapor a partir de pellets.....	73

CAPÍTULO 1

1.1. Introducción

1.2. Descripción del problema

Las plantas de producción de café soluble en Ecuador consumen cantidades significativas de combustibles fósiles para la elaboración de su producto final. Los tostadores de granos de café de las plantas industriales usualmente utilizan Diésel como fuente de energía, mientras que en las calderas pirotubulares se utiliza Fuel oil n°6 el cual es denominado como “Búnker” en el Ecuador. Estas calderas son utilizadas para elevar la temperatura del agua alrededor de 220 °C y generar vapor de media presión (13-15 bar) el cual permitirá realizar procesos de calentamiento en etapas como extracción y evaporación (Arteaga Zambrano, 2018).

La dependencia de combustibles fósiles genera un impacto ambiental negativo debido al aumento en las emisiones de los gases de efecto invernadero tales como el monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂) y óxidos de nitrógeno (NO_x). Además, la obtención de combustibles fósiles implica la explotación de petróleo lo cual conlleva una destrucción de un hábitat natural. En otro aspecto, el empleo de dicho combustible genera gastos por concepto de compra, transporte y almacenamiento para la planta productora de café soluble.

El precio del combustible fósil como el Diésel y Búnker para las industrias en Ecuador no se encuentra subsidiado desde octubre del 2015, generando un elevado costo de producción para las plantas de café soluble (Arteaga Zambrano, 2018). Según el reporte de Petroecuador en octubre del 2023, el precio promedio del Diésel industrial por galón es de \$3,31, mientras que el precio del Búnker rodea los \$2.13 por cada galón.

Por otra parte, la producción de café soluble genera residuos sólidos los cuales deben ser dispuestos de acuerdo con las normativas ambientales pertinentes. No obstante, este proceso de disposición final conlleva gastos para la empresa productora ya sea en tratamientos previos o en transporte al lugar de disposición final. Entre los residuos generados por las plantas de café soluble se encuentra la borra o bagazo de café, SCG por sus siglas en inglés (Spent Coffee Grounds), en una proporción de aproximadamente el 45% del total de los residuos totales.

El SCG representa al residuo de café tostado y molido luego del proceso de extracción de las propiedades organolépticas de interés para la elaboración del café soluble y es considerado el residuo más abundante en este tipo de producción resultando en la generación de aproximadamente 6 millones de toneladas al año a nivel mundial (Ali et al., 2018).

Si bien las propiedades organolépticas como el sabor y el olor son extraídas en su mayor proporción de la materia prima (granos de café), el bagazo de café aún cuenta con otras propiedades aprovechables como las energéticas las cuales pueden contribuir al proceso de generación de vapor al mismo tiempo que reduce gastos relacionados a los combustibles utilizados y a la disposición final de los residuos sólidos.

Uno de los problemas principales del SCG como subproducto es que, al provenir del proceso de extracción, se trata de un residuo muy húmedo con materia orgánica lo cual implica que tenga una descomposición acelerada generando moho y mal olor. Uno de los tratamientos preliminares a realizar sería el secado del residuo. Sin embargo, una vez el residuo esté seco se tiene una variedad de opciones para reutilizarlo:

- El SCG cuenta con un alto contenido de nitrógeno en su composición química por lo que es un potencial biofertilizante.
- Pese a la extracción, el SCG aún cuenta con un fuerte olor característico del grano por lo que suele ser usado como plaguicida.
- En la industria cosmética se suele usar el SCG como exfoliante o incluso en mascarillas faciales.

Existen aún más opciones para aprovechar los componentes resguardados en este residuo rico en proteínas, lignina, polisacáridos, potasio, ácido palmítico, ácido cafeico, ácido clorogénico, vitamina E, fibra dietética y compuestos formados por las reacciones de Maillard como las melanoidinas (Rosas-morales et al., n.d.).

1.3. Justificación

La industria de café soluble instantáneo en Ecuador genera aproximadamente 1.3 toneladas de bagazo de café por cada tonelada de café soluble producido, lo cual representa miles de toneladas de este residuo producidas al año a escala industrial. El bagazo de café es un material con un poder calórico inferior (LCV) a los 20 MJ/kg cuando su contenido de humedad es inferior al 15% en base húmeda ya que está constituido en mayor proporción (superior al 50%) por carbono y debido a su elevado contenido oleico de aproximadamente el 15%.

El proceso de torrefacción se realiza en las industrias de café soluble y consiste en tostar los granos verdes, este proceso mejora las propiedades energéticas del bagazo de café elevando su poder calórico hasta los 32 MJ/kg debido a que la adición de calor ocasiona la formación de compuestos aromáticos creados a partir de los azúcares y aminoácidos presentes en los granos de café (Jeníček et al., 2022).

Actualmente se realiza un excesivo consumo de combustibles fósiles que contaminan el ambiente debido a las emisiones de gases de efecto invernadero, por lo que es de gran importancia buscar alternativas económicas y ecoamigables sobre cómo reemplazar las fuentes de energía en el sector industrial que es donde se genera un mayor impacto debido al uso de las calderas pirotubulares para la generación de vapor. El uso de biocombustibles, es decir combustibles provenientes de residuos biológicos (biomasa), para la producción energética reduce las emisiones de CO₂, NO_x y material particulado en la atmósfera a diferencia del uso de los derivados de petróleo (Botia, L. A., 2019).

De esta forma, la implementación de pellets a base de biomasa seca conformada por bagazo de café y aserrín en una caldera acuotubular permitirá disminuir el impacto ambiental negativo que se produce en la actualidad generando autosuficiencia energética y reducción de residuos orgánicos en las plantas de producción de café soluble a la vez que se promueve la producción sostenible en el país.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Evaluar el potencial de generación energética mediante la simulación de la generación de vapor a partir de la cuantificación del poder calórico de pellets constituidos por bagazo de café y aserrín a fin de la elaboración de una propuesta viable para la reducción de la dependencia actual de combustibles fósiles.

1.4.2. Objetivos específicos

- 1) Determinar las propiedades de aserrín y pellets de bagazo de café de una planta industrial ecuatoriana para su potencial aplicación como combustible alternativo.
- 2) Identificar las proporciones óptimas de bagazo de café y aserrín en pellets a través de ensayos experimentales para la obtención de un mayor aprovechamiento energético.
- 3) Diseñar un diagrama de flujo del proceso de generación de energía mediante la simulación de la obtención de vapor saturado en una caldera acuotubular.

1.5. Marco teórico

1.5.1. Industria para la producción de café instantáneo.

El café se cultiva en más de 70 países y es el segundo producto agrícola más importante a nivel mundial. En las últimas dos décadas, la producción de café ha aumentado de 5.6 a 8.3 millones de toneladas anuales, gracias a esfuerzos en naciones como Brasil, Vietnam y Colombia (Rodríguez et al., 2017). Según la FAO, en 2013 la producción global de café alcanzó 8.9 millones de toneladas, más del 30% desde 1999 (Zarrinbakhsh et al., 2016).

La fabricación de café instantáneo involucra inicialmente la selección y tostado de granos de café, seguido por la pulverización, extracción de los sólidos solubles en agua caliente y evaporación del solvente (Farah, 2009). El extracto altamente concentrado se deshidrata mediante técnicas como la liofilización (Hanif et al., 2019). Luego, se procede a la mezcla y envasado del producto en recipientes herméticos a fin de preservar su calidad, evitando la absorción de humedad.

Durante la generación de café instantáneo, se disuelve el sólido con agua caliente creando una solución de extracción con una concentración del 25-35% (Gosalvitr et al., 2023). Para lograr esto, el agua es bombeada a una temperatura de 80 °C a 90 °C a través del sólido molido (Gosalvitr et al., 2023). Por lo que, las calderas desempeñan un papel esencial al generar vapor de agua para calentar el proceso descrito.

Las principales empresas productoras de café instantáneo en el Ecuador son: Gare Industria de Alimentos y Comidas, Solubles Instantáneos C.A. y Compañía de Elaborados de Café ElCafé C.A.

1.5.2. Calderas

Existen diversos tipos de calderas, tales como las acuotubulares, que contienen agua en sus tubos con gases de escape de alta temperatura en la superficie externa de este para calentar el líquido, y las pirotubulares, que emplean un tubo (hogar) de fuego o gases calientes para calentar agua externa a estos a través de la combustión de combustibles fósiles.

1.5.2.1. Modelado de la generación de vapor. Existen simuladores que permiten modelar diferentes procesos, entre ellos la generación de vapor en una caldera. Para poder realizar la simulación de estos procesos, estos programas cuentan con equipos que modelan las operaciones unitarias conocidas como tambores flash, reactor CSTR, columna de destilación de platos, entre otros en los que se puede especificar parámetros de diseño y permite modelar escenarios. Estos programas también permiten el modelado de biomasa la cual pueden caracterizar mediante resultados obtenidos de los análisis inmediato, elemental y energético. Entre los simuladores conocidos se tiene:

- Aspen Plus
- Aveva PRO II
- Chemcad

1.5.3. Combustibles fósiles

Los combustibles fósiles son recursos naturales de origen orgánico que se generaron hace millones de años a partir de la acumulación y descomposición de restos de plantas y animales bajo condiciones de alta presión y temperatura en las profundidades de la tierra.

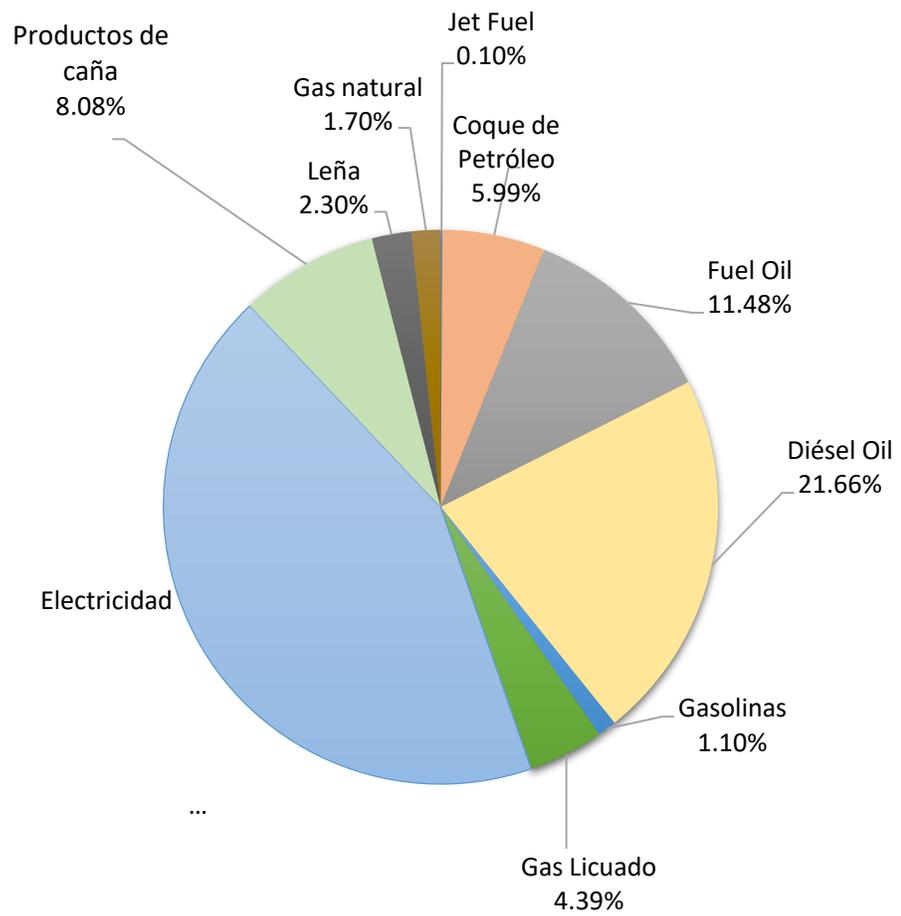
Estos recursos, que incluyen al carbón, petróleo y gas natural, son fundamentales como fuentes primarias de energía en todo el mundo. Debido a su alto contenido de carbono e hidrógeno, al ser quemados, liberan calor que se utiliza en aplicaciones como la generación de electricidad, calefacción, transporte y usos industriales (Al-Hamamre et al., 2012).

1.5.3.1. Combustibles fósiles con alta demanda en las industrias ecuatorianas. En

Ecuador durante el año 2021, el Diésel oil y el Fuel oil n°6 destacaron como los combustibles de preferencia en la industria, como lo evidencia el Gráfico 1. El Diésel oil tuvo una participación del 21.70%, mientras que el Fuel oil n°6 alcanzó un 11.50% en la matriz energética (Energía, sociedad y ambiente, 2021).

Gráfico 1.1

Demanda de combustibles fósiles durante el año 2021 en Ecuador



Nota. Fuente: Ministerio de energía y minas

1.5.3.2. Precios de venta de combustibles a las industrias ecuatorianas.

Tabla 1.1

Precios de los combustibles en Ecuador

Producto	Unidad de medida	Precio en terminal (incluye el 12% de I.V.A)
Diesel 1 Industrial	Galones	\$3,312372
Diesel 2 Industrial	Galones	\$3,312372
Diesel Premium Industrial	Galones	\$3,586576
Fuel Oil No. 6 Industrial	Galones	\$2,131373
Fuel Oil Liviano	Galones	\$2,131373
Gas Licuado de Petróleo (GLP) Industrial	Kilogramos	\$0,811460
Gas Natural	Millón de BTUs	\$3,770500
Gas Natural Licuado	Millón de BTUs	\$7,353847

Nota. Fuente: PETROECUADOR, 2023

El empleo de combustibles fósiles no solo resulta costoso y limitado, sino que también conlleva problemas ambientales significativos (Al-Hamamre et al., 2012). Por esta razón, la opción de utilizar biomasa en calderas acuotubulares que abarcan desde unos pocos kilovatios hasta más de 100 megavatios (Nußbaumer, 2003) emerge como una alternativa rentable.

1.5.4. Biomasa para uso energético

La biomasa es la materia orgánica de las plantas que, a través de la fotosíntesis, convierte el dióxido de carbono en hidrocarburos. Cuando se utiliza como fuente de energía, se considera un combustible ecológico, ya que no aumenta la emisión de carbono en la atmósfera. Es una fuente importante de energía renovable y representa alrededor del 10% de la demanda global de energía (Chen et al., 2015). Se puede transformar en gases o combustibles líquidos y sólidos.

1.5.4.1. Bagazo de café como biomasa. Es un residuo significativo durante la producción de café instantáneo y constituye una importante fuente de desperdicio orgánico en vertederos. Aproximadamente se generan 650 kilogramos de SCG a partir de una tonelada de café verde (Mussatto et al., 2011). Finalmente, la propiedad fundamental como combustible radica en su valor calorífico.

1.5.4.2. Poder calorífico. Se define como la cantidad de calor por unidad de masa que este es capaz de liberar durante la combustión a presión constante y 25 °C (Chávez Porras & Rodríguez González, 2016). En el caso de los SCG húmedos, este asciende a aproximadamente 8.4 MJ/kg, mientras que los SCG secos presentan valores caloríficos inferiores que oscilan entre 19.3 y 24.9 MJ/kg (Nosek et al., 2020).

1.5.4.3. Punto de ignición. Hace referencia a la temperatura mínima a la que una sustancia empieza a arder y es capaz de mantener la flama sin la necesidad de una fuente de ignición externa.

1.5.4.4. Humedad. Se refiere a la cantidad de agua contenida en el combustible, la cual puede ser superficial o retenida en los poros de la biomasa.

El uso de biomasa presenta desafíos debido a su alto contenido de humedad y su baja densidad. Por lo que, la forma compacta de los pellets facilita el almacenamiento y transporte, asegurando una fuente de biomasa seca y lista para su uso en sistemas de calefacción.

1.5.5. Pellets

Los pellets son pequeños cilindros o gránulos comprimidos fabricados a partir de materiales biológicos, como residuos de madera o desechos agrícolas, y se utilizan principalmente como una fuente de energía renovable (Nosek et al., 2020). Son una alternativa respetuosa con el ambiente al ser comparada con los combustibles fósiles, ya que su producción y quema emiten menos emisiones de carbono (Jezeršká et al., 2023).

1.5.5.1. Peletización. Denominada densificación de biomasa es un proceso que emplea fuerza mecánica para compactar residuos de biomasa en partículas sólidas uniformes, como pellets, briquetas y troncos, con el propósito de incrementar la densidad energética de 40-200 kg/m³ a 600-1400 kg/m³ (Chen et al., 2015). La calidad del material peletizado depende de factores como las fuentes de fibras, tamaño de las partículas, porcentaje de humedad, temperatura y velocidad de procesamiento (Peng et al., 2012).

1.5.5.2. Aglutinante. Sustancias capaces de endurecerse a corto o largo plazo y en consecuencia es capaz de unir materiales heterogéneos. Los aglutinantes pueden ser orgánicos, resinas, polímeros o inorgánicos (Gomá, 1979).

1.5.5.2.1. *Aceite como aglutinante.* Sustancia líquida o semilíquida compuesta principalmente por lípidos, como ésteres de glicerol y ácidos grasos, que puede ser de origen vegetal, animal o mineral. Su característica distintiva radica en su capacidad para almacenar y liberar energía debida a la alta concentración de enlaces carbono-hidrógeno presentes en su estructura química (Al-Hamamre et al., 2012).

1.5.6. *Normas ISO 17225:2021 – Parte 2 y 6*

La Organización Internacional de Normalización es una federación mundial encargada de la creación de estándares. En el 2021 se publicó la última actualización de la norma ISO 17225 la cual proporciona principios de clasificación para los biocombustibles sólidos y sirve como estándar de calidad.

El apartado 2 de esta norma se encarga de respaldar el uso de pellets de biomasa con contenido de madera para usos residenciales, comercial pequeño, público y generación de energía industrial (ISO 17225-2, 2021). Mientras que, el apartado 6 habla sobre los requisitos establecidos para aquellos pellets elaborados sin madera.

1.5.6.1. Propiedades fisicoquímicas, energéticas y dimensiones regidas en norma ISO 17225:2021

Tabla 1.2

Resumen de estándares establecidos en la norma ISO 17225:2021 Parte 2 y 6

Nota. Fuente: ISO 17225-2, 2021 y ISO 17225-6, 2021

Parámetro	Rango ISO 17225-2	Rango ISO 17225-6
Humedad (%)	< 10	≤ 12
Cenizas (%)	< 3	≤ 6
Poder calorífico (MJ/kg)	≥ 16.5	≥ 14.5
Nitrógeno (%)	< 0.3	≤ 1.5-2.0
Densidad (kg/m ³)	≥ 600	≥ 600
Azufre (%)	< 0.05	≤ 0.20
Longitud (mm)	3.15 < L ≤ 40	3.15 < L ≤ 40
Diámetro (mm)	6 ± 1	6 ± 1

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

2.1. Diseño metodológico

La presente investigación se fundamenta en un diseño metodológico de análisis de las variables descritas en la Tabla 2.1. La metodología está estructurada en cuatro fases distintivas tal como se presenta en la Figura 2.1. La primera etapa se concentra en el secado del bagazo de café húmedo, seguida por la peletización y el secado de los pellets obtenidos que presenten humedad superior al 10%. La tercera etapa se enfoca en el análisis de datos sobre los pellets, abordando un análisis inmediato, elemental, energético para la determinación del poder calorífico y la cuantificación del aceite. El último paso implica la simulación de una caldera acuotubular en Aspen Plus, integrando los datos recopilados.

Adicional a los análisis mencionados, se realiza también el cálculo de la densidad y medición de dimensiones (diámetro y longitud) de los pellets para garantizar que estos cumplan con lo estipulado en la normativa ISO 17225:2021 Parte 2 o 6 según corresponda.

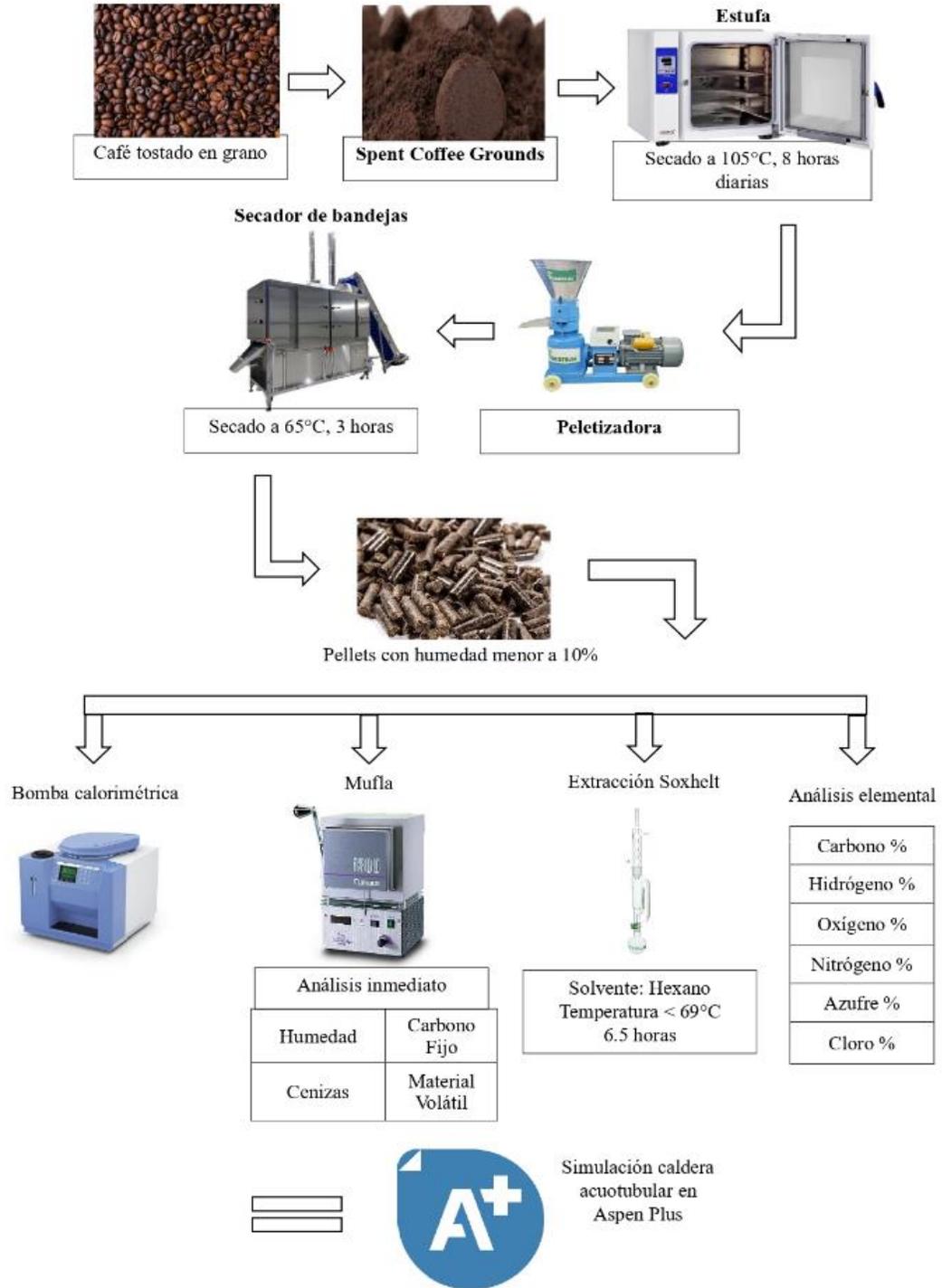
Tabla 2.1

Variables e indicadores

Variable	Definición conceptual	Indicador	Metodología
Mezclas de biorresiduos (<i>Independiente</i>)	Bagazo de café y aserrín recolectados como muestra.	Porcentaje de proporción (%). Flujo másico (kg/s)	Mezcla por agitación.
Poder calorífico (<i>Dependiente</i>)	Cantidad de energía contenida por unidad de masa.	Poder calorífico (MJ/kg).	Norma ASTM D-240

Figura 2.1

Diseño metodológico



2.2. Materias primas

2.2.1. Aserrín

Subproducto del proceso de trituración o serrado de madera, se utiliza en la producción de pellets de biomasa los cuales son pequeños cilindros comprimidos de material biodegradable. Estos pellets representan una fuente eficiente y renovable de energía, aprovechando el aserrín.

2.3. Reactivos utilizados durante el tratamiento y caracterización de la materia prima

2.3.1. Agua como aglutinante

En la producción de pellets de biomasa, se incorporan componentes para fortalecer las partículas de biomasa, mejorando la estabilidad mecánica y reduciendo la higroscopicidad (Sermyagina et al., 2022). El agua, utilizada como aglutinante en el proceso de peletización de biomasa, no altera las características fisicoquímicas del pellet, ya que se evapora durante la formación de este. Esto permite que el pellet conserve sus cualidades originales mientras se beneficia de la cohesión proporcionada por el agua.

2.3.2. Hexano

El hexano, un disolvente orgánico derivado del petróleo, se caracteriza por ser incoloro, volátil y de rápida evaporación. Ampliamente utilizado en la extracción de aceites de muestras, su eficacia radica en su capacidad para disolver grasas y aceites.

2.3. Recolección de muestras

Se recolectó la muestra del bagazo de café directamente de una planta industrial ecuatoriana encargada de la elaboración de café soluble para su comercialización en el mercado nacional y extranjero. Por otro lado, el aserrín utilizado se lo recolectó como desecho de un taller artesanal en Milagro, Ecuador.

2.4. Secado inicial

El bagazo de café recolectado presentó una alta humedad inicial, por lo que fue necesario secarlo a 105 °C en una estufa Rebelk RS-40P por aproximadamente 8 horas diarias por 3 días completando hasta 20 horas de secado interrumpido. El secado se realizó en bandejas con un espesor de 5 cm por lo que fue necesario el mezclado de la muestra, con ayuda de una espátula de metal con mango de madera, cada 3 horas para un secado uniforme. Se realizó el procedimiento hasta alcanzar una humedad aproximada del 14%.

Figura 2.2

Bandejas de aluminio con bagazo de café en su interior durante el proceso de secado en una estufa REBELK RS-40P.



2.5. Filtrado

El bagazo obtenido contaba con partículas grandes y completas de café tostado que no habían sido molidas en su totalidad lo cual sería un obstáculo al elaborar los pellets en la maquinaria, por lo que con la ayuda de un colador se filtró estas partículas para trabajar únicamente con el material molido.

De igual forma, el tamaño que presentaban las partículas de aserrín no era uniforme y presentaba partículas demasiado grandes para ser peletizadas por lo que se procedió a filtrarlas con un colador.

Figura 2.3

Partículas contenidas en el bagazo de café y aserrín que fueron retenidas por el colador.



2.6. Mezcla de materias primas

Se prepararon 2 kg de cada muestra a peletizarse haciendo uso de las proporciones en masa SCG/aserrín: 100/0, 50/50, 40/60, 30/70, 0/100.

Para esto se pesó la cantidad necesaria de cada residuo en una balanza gramera marca OHAUS y se colocó la masa pesada en un recipiente grande donde se homogeneizó mecánicamente la mezcla por varios minutos.

Tabla 2.2

Masa de bagazo de café y aserrín en las diferentes 5 muestras

Mezcla	Bagazo de café	Aserrín
1	2 kg	0 kg
2	1 kg	1 kg
3	0.8 kg	1.2 kg
4	0.6 kg	1.4 kg
5	0 kg	2 kg

2.7. Elaboración de pellets

La elaboración del pellet se dio en una máquina peletizadora. Para este proceso se utilizó la máquina peletizadora fabricada en el Centro de Desarrollo Tecnológico Sustentable (CDTS) de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción (FIMCP) de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL). Como se muestra en la Figura 2.4, esta máquina cuenta con una matriz o plato de acero de carbono de 25.6 cm de diámetro interno con espesor de 3.8 cm perforado con 64 agujeros de 6 mm de diámetro para la fabricación del pellet, además cuenta con un rodillo rotador “muelas” de 10.43 cm de diámetro y 5.46 cm de espesor propulsado por un motor eléctrico de 5 HP de la marca ABB Motors modelo 3GQA112301-ADAX y un reductor ortogonal de la marca

Bonfiglioli modelo W 86 U 30 P100 B5 B3 para obtener la velocidad deseada (Benítez Peralta & Calderón Espinoza, 2022).

Figura 2.4

Peletizadora ubicada en CDTS puesta en marcha con la biomasa tratada.



La peletizadora se calienta debido a la fricción entre el rodillo y el plato alcanzado una temperatura máxima de 119.7 °C lo cual permite que se active el aglutinante, que en este caso se trata del aceite propio del bagazo de café y agua agregada a la mezcla directamente dentro de la tolva del equipo hasta alcanzar una humedad de peletización de alrededor del 17% en base húmeda, y el material compactado rueda por los agujeros de la matriz (Benítez Peralta & Calderón Espinoza, 2022).

Figura 2.5

Temperaturas registradas durante la elaboración de pellets.



La alimentación de la máquina peletizadora fue de 2 kg de mezcla para que la mezcla pueda compactarse en su interior sin vaciarse rápidamente. Sin embargo, parte de la materia prima ingresada no lograba tener la forma compacta esperada, por lo que, con ayuda de un tamiz se separaban los pellets formados del polvo sobrante, por consiguiente, se recirculó la mezcla a peletizarse hasta que se active el aglutinante.

Figura 2.6

Separación de pellets formados del polvo sin peletizar con ayuda de un tamiz



2.8. Secado de pellets

Para la elaboración de pellets, la biomasa debe tener una humedad de peletización alrededor del 17% lo cual es superior a lo establecido por la normativa ISO 17225:2021, por lo que, se realizó un proceso de secado posterior a la peletización.

El secado post peletización se realizó en un secador de bandejas elaborado por la FIMCP, al igual que la peletizadora, a una temperatura de 65 °C por 2.5 horas.

Figura 2.7

Secador de bandejas en donde los pellets fueron secados.



2.9. Caracterización fisicoquímica del pellet

2.9.1. Análisis inmediato

Los porcentajes obtenidos a continuación serán en base húmeda (BH), para su conversión a base seca (BS) se aplicará la fórmula:

$$BS = \frac{BH}{1 - BH} \quad (2.1)$$

2.9.1.1. Determinación de la humedad total. Se hizo uso de una termobalanza de la marca KERN modelo DBS 60-3 en la cual se colocó una masa de pellets de aproximadamente 2.5 g y se esperó un tiempo de operación entre 10 a 15 minutos hasta que el equipo arroje el resultado.

Figura 2.8

Obtención del parámetro de humedad a través de una termobalanza marca KERN.



2.9.1.2. Determinación del contenido de cenizas. El procedimiento se realizó siguiendo las especificaciones sujetas en la norma ISO 18122:2105. Para ello, se colocó 1.7 g de la muestra en un crisol sin tapa en una mufla durante 1 hora a 250 °C, 2 horas a 550 °C y 2 horas a 750 °C. Se realizó mediciones a las 3 horas y a las 5 horas notando que no existían diferencia significativa en los pesos obtenidos. Posteriormente se dejó secar el crisol en un desecador por 30 minutos para luego realizar la medición de masa final.

Para la obtención del valor porcentual del contenido de cenizas se aplica la siguiente ecuación:

$$\%Cenizas = \left(\frac{masa_{f\ total} - masa_{crisol}}{masa_{i\ muestra}} \right) * 100 \quad (2.2)$$

Figura 2.9

Pellets en el interior de los crisoles antes y después de ingresar a la mufla.



2.9.1.3. Determinación de material volátil. La determinación se realizó siguiendo el procedimiento establecido en la norma ISO 18123:2015 de colocar 1.3 g de muestra en un crisol con tapa en una mufla a 950 °C durante 7 minutos. Luego sacar el crisol y colocarlo en un desecador por 30 minutos para que se enfríe y realizar la medición del peso.

Para encontrar el valor porcentual del contenido de material volátil se usa la fórmula:

$$\% MV = \left(\frac{(masa_{i\ muestra} + masa_{crisol}) - masa_{f\ total}}{masa_{i\ muestra}} \right) * 100 \quad (2.3)$$

2.9.1.4. Determinación de carbono fijo. El contenido de carbono fijo se lo obtiene, mediante la aplicación de la norma ASTM D-1762, como el remanente en el análisis inmediato, es decir; al 100% de la muestra se le resta el contenido porcentual de cenizas, material volátil y humedad. Considerar que los procedimientos y cálculos anteriores se realizaron en base húmeda.

2.9.2. Determinación del poder calorífico

Se midió el poder calorífico mediante una bomba calorimétrica de la marca IKA modelo C-200 donde se colocaron alrededor de 0.5 g de la muestra (1 pellet) para que realizara combustión completa dentro del equipo. Pasados alrededor de 20 minutos, el equipo arroja resultados en J/g a partir de una serie de cálculos basados en la norma ASTM D-240.

Figura 2.10

Bomba calorimétrica usada para la medición de poder calórico.



2.9.3. Determinación del contenido de aceite

Se realizó la extracción de aceite de las muestras mediante Extracción Soxhlet, aunque el equipo era de 150 mililitros de capacidad, fueron necesarios 180 ml de hexano como disolvente por cada muestra debido a pérdidas por evaporación. Se colocaron aproximadamente 15 g de muestra en un dedal elaborado con papel filtro dentro del equipo Soxhlet. Se utilizó una manta de calentamiento de la marca Barnstead Electrothermal modelo CM0850/CEX1 para elevar la temperatura del disolvente hasta un valor inferior a los 69 °C para evitar mayores pérdidas del disolvente por evaporación.

Se realizó el procedimiento por alrededor de 6.5 horas en las cuales se completaban 4 sifonadas.

Figura 2.11

Obtención de aceite por muestra mediante extracción Soxhlet.



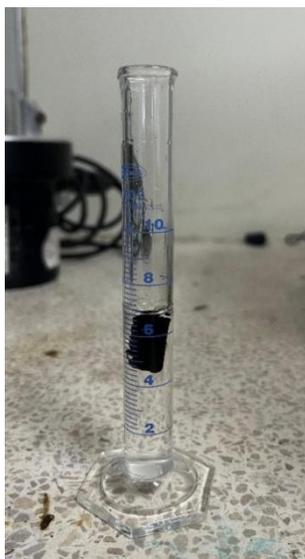
2.9.4. Determinación de densidad

Se utilizó una probeta graduada de 5 ml con agua para medir el volumen de fluido desplazado por el pellet (método de la inversión) y también se usó la balanza analítica de la marca ADAM modelo PW 245 para determinar la masa de la muestra. Con los datos de volumen y masa se aplicó la definición de densidad para su cálculo, es decir; dividir la masa para el volumen. Las unidades en las que se reportan los resultados son g/ml.

$$\rho \left(\frac{g}{mL} \right) = \frac{m_{\text{pellet}}}{V_{\text{probeta+pellet}} - V_{\text{probeta}}} \quad (2.4)$$

Figura 2.12

Pellet sumergido en el interior de una probeta con agua.



2.9.5. Medición de dimensiones

Se realizó la medición de longitud y diámetro de los pellets elaborados utilizando un calibrador de vernier digital. Se tomó una muestra aleatoria de 10 pellets por cada lote de diferente composición.

Figura 2.13

Medición de la longitud de un pellet con el uso de un Vernier Digital



2.9.6. *Determinación del contenido elemental*

Se realizó el análisis del contenido de Carbono, Hidrógeno, Oxígeno, Nitrógeno, Azufre y Cloro (C, H, O, N, S y Cl) a través de los servicios prestados por laboratorios externos donde se requieren de aproximadamente 200 g de muestra por análisis y utilizan técnicas de análisis como gravimetría, espectrometría y volumetría.

Tabla 2.3

Método y técnica de análisis aplicados en los laboratorios externos para determinar el análisis elemental de la muestra seleccionada

Elemento analizado	Técnica de análisis	Método aplicado
C	Gravimetría	INCOTEC NTC 5403:2013
H	Espectrometría	ASTM E1019
O	Espectrometría	ASTM E1019
N	Volumetría	AOAC
S	Gravimetría	INEN 0237
Cl	Volumetría	NTE INEN 241:2013

Nota. Fuente(s): Calidad del suelo. determinación del carbono orgánico., s. f, Standard test methods for determination of carbon, sulfur, nitrogen, and oxygen in steel, iron, nickel, and cobalt alloys by various combustion and inert gas fusion techniques, s. f, Official Methods of Analysis, 22nd Edition (2023) - AOAC INTERNATIONAL, 2023, Fertilizantes o abonos. Determinación de azufre, 1997.

2.9.7. Determinación del punto de ignición

Se aplicó la normativa ASTM D-92 para realizar el procedimiento del método de Cleveland de la copa abierta que consiste en colocar en una copa abierta a la atmósfera la muestra y someterla a una fuente de ignición de forma indirecta a su vez que se aproxima una flama a la superficie de la muestra sin realizar contacto.

Figura 2.14

Detección punto de ignición.



2.10. Determinación de la composición de gases de combustión

Se utilizó el instrumento de detección de gases Dräger X-am 5600 el cual es capaz de medir hasta 5 gases: CO₂ (%v/v), CH₄ (%LEL), O₂ (%v/v), CO (ppm) y NH₃ (ppm) mediante un sensor infrarrojo que permite la medición de hidrocarburos explosivos y gases de combustión (Draeger.Web WWW - Draeger Master, s. f.).

Cabe destacar que el equipo cuenta con una limitante en cuanto al rango de concentraciones capaz de medir, el límite máximo medible del CO₂ es de 5% v/v (Draeger, 2021). Cuando este límite se excede, el equipo empieza a registrar las siglas “FF”.

Se realizó únicamente la medición de la concentración de CO y CO₂ quemando 1 pellet por cada muestra en un crisol de boca ancha aplicando contacto directo con la llama de un mechero de Bunsen y la biomasa. Una vez encendido el pellet, apagar la llama del mechero y acercar el detector de gases a los gases emitidos a unos 5 cm del pellet ardiendo hasta que este se apague. La prueba tuvo que realizarse estrictamente en una sorbona y el equipo no debía alejarse mucho del pellet combustionando porque la medición cambiaba drásticamente. Se guardó todos los datos presentados y se escogió como el dato correcto al valor promedio en el que se estabiliza la medición del equipo.

Figura 2.15

Obtención de gases de combustión durante la quema de los diferentes pellets elaborados.



2.13. Determinación de la composición óptima de bagazo de café y aserrín

La composición óptima de bagazo de café y aserrín, cuidadosamente determinada para cumplir con la normativa ISO 17225:2021 Parte 2 o 6, se destaca por ofrecer resultados excepcionales en términos de calidad de biocombustibles sólidos.

La elección meticulosa de una proporción que mantiene el contenido de cenizas por debajo del 3% asegura un producto final con bajos niveles de residuos incombustibles (Capela et al., 2022). Cabe destacar que, las cenizas resultantes de la combustión de biomasa pueden ocasionar problemas considerables en los componentes internos del sistema de combustión, dando lugar a inconvenientes como la acumulación de depósitos (aglomeración y ensuciamiento), corrosión y erosión (Capela et al., 2022). Estos problemas no solo acortan la vida útil del equipo, sino que también conllevan a aumentos en los costos de mantenimiento.

La decisión de mantener la humedad por debajo del 10% es esencial para garantizar una combustión eficiente y reducir las emisiones no deseadas, contribuyendo a la mejora de la calidad del aire. Además, la elección de un poder calorífico superior a 16.5 MJ/kg no solo garantiza un rendimiento energético óptimo, sino que también favorece una combustión más limpia y controlada, reduciendo las emisiones de gases como el monóxido de carbono.

Al seguir las directrices de la norma en cuanto a las dimensiones, con una longitud de $(3.15 < L \leq 40 \text{ mm})$ y un diámetro de $(6 \pm 1 \text{ mm})$, se asegura la uniformidad y facilidad de manejo en diversos sistemas de calefacción.

2.14. Modelado de una caldera acuotubular en Aspen

Se utilizó el documento “SIMULACIÓN DE UNA CALDERA BAGACERA MEDIANTE EL SOFTWARE ASPEN PLUS PARA DETERMINAR SU DESEMPEÑO ENERGÉTICO” como base para la elaboración de la estructura principal de la simulación de la caldera acuotubular a estudiar en el Software Aspen Plus V12.1 (Contreras, 2019). Se divide el proceso en 4 etapas:

- 1) **Hogar o cámara de combustión:** Se producen los gases de combustión necesarios para el intercambio de calor. En esta etapa, el intercambiador es capaz de cambiar el estado físico del agua de líquido a vapor saturado. Luego, se realiza una purgar del 1% del flujo de agua.
- 2) **Área de sobrecalentamiento del vapor:** El vapor saturado se sobresatura con un sobre calentador para llevar el vapor saturado a condiciones deseadas de temperatura y presión.
- 3) **Área de precalentamiento de aire:** Aquí se realiza intercambio de calor entre los gases y el aire suministrado y que posteriormente se utilizará en el hogar. Se utiliza 1 equipo de precalentamiento de aire.
- 4) **Economizador o precalentamiento de agua:** Se calienta el agua de suministro en 1 equipo que luego entrará al hogar para convertirse en vapor.

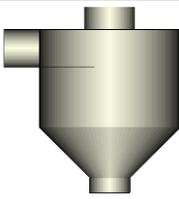
Se escoge el método termodinámico de Peng-Robinson y se coloca a la biomasa como un componente no convencional utilizando 6 coeficientes numéricos para el modelo de caracterización HCOALGEN y DCOALIGT que el simulador utilizará para calcular la entalpia y la densidad de los componentes. El modelo HCOALGEN requiere datos del análisis inmediato: PROXANAL y elemental: ULTANAL Y SULFANAL (Contreras, 2019).

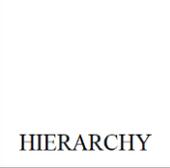
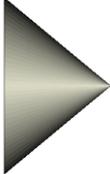
Es importante considerar que los datos de análisis se ingresan en base seca a excepción del dato de humedad el cual se ingresa en base húmeda y que los datos del análisis elemental deben considerar las cenizas; es decir, que la suma del porcentaje de C, H, O, N, S, Cl y cenizas sea 100%.

Tabla 2.4

Equipos utilizados en la simulación de una caldera acuotubular en Aspen Plus V12.1.

Icono	Nombre del equipo	Función en el proceso	Etiqueta
	RYield	Calcular la distribución real de los rendimientos de cada componente para el bagazo de café.	DECOMP
	RGibbs	Se lo utiliza como cámara de combustión.	COMBUST

	HeatX	Precalentar hasta 100 °C el aire usado en la combustión con gases de combustión provenientes de los sobre calentadores.	AIR-SOBR
	HeatX	Aumentar la temperatura del agua de alimentación a 90 °C con gases provenientes del AIR-SOBR.	ECONOM
	HeatX	Calentamiento del agua proveniente del ECONOM.	HOG
	HeatX	Aumentar la temperatura del vapor saturado hasta una temperatura de vapor sobrecalentado (200 °C).	SUP-HE
	Flash2	Separar el vapor saturado de los líquidos residuales.	FLASH
	SSplit	Separar la corriente de productos de combustión en gases y cenizas.	SEPAR

	Hierarchy	Contiene el equipo de calentamiento de agua y el flash que separa líquidos residuales del vapor.	HOG-PARE
	Mixer	Mezcla el agua de purga con agua fresca.	MIXER

Es importante considerar los siguientes datos de entrada a la simulación a fin de conocer la cantidad de pellets de SCG necesarios para generar la cantidad de vapor requerida a las condiciones adecuadas para que las operaciones de la planta de producción de café soluble no se vean afectadas.

Tabla 2.5

Datos de entrada a la simulación en Aspen Plus V12.1.

Flujo de vapor (kg/s)	Temperatura del vapor (°C)	Presión del vapor (psi)
0.23 – 0.57	220	196

CAPÍTULO 3

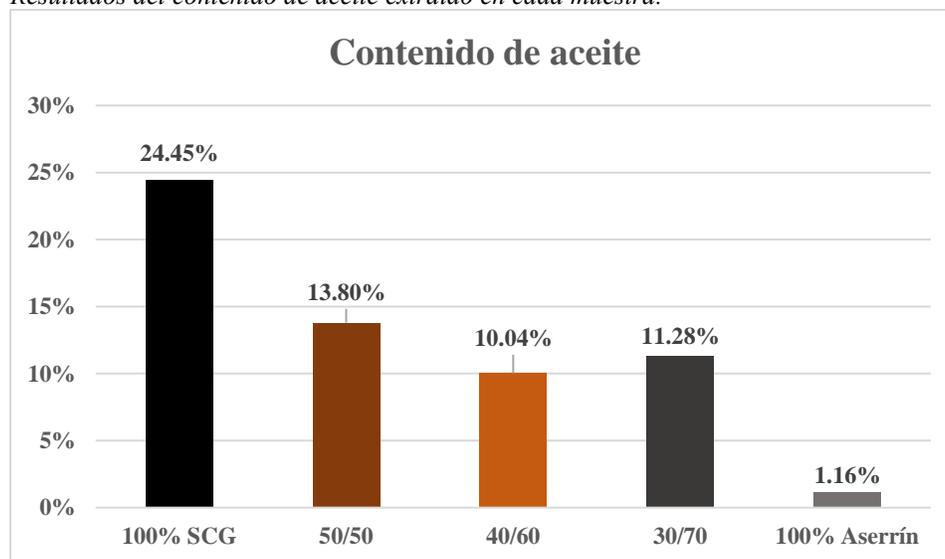
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1. Resultados en la obtención de aceite

En el Gráfico 3.1 se observa un aumento en el contenido de aceite a medida que se incrementa la concentración de bagazo de café. Este fenómeno se atribuye a que el residuo tratado proviene de una mezcla de café arábica y robusta, que contienen diversos tipos de lípidos. Aunque el contenido de aceite en el grano de café generalmente oscila entre el 11% y el 20%, en este estudio se registró un porcentaje excepcionalmente alto, alcanzando el 24.45% en el bagazo de café.

Gráfico 3.1

Resultados del contenido de aceite extraído en cada muestra.



Es importante señalar que el aserrín utilizado, proveniente de madera previamente extraída, no mostró grandes cantidades de aceite. Este resultado es típico en este tipo de aserrín tratado, ya que la madera extraída recientemente tiene sustancias como la lignina concentrada en su superficie, formando una capa que puede impedir la unión entre las partículas de madera.

3.2. Resultados del análisis inmediato

La Tabla 3.1 muestra que el contenido de humedad varía en diferentes proporciones en los pellets de bagazo de café (SCG) y aserrín. Se observa que la proporción 50:50 tiene el contenido de humedad más bajo, mientras que el resto de las muestras se asemejan en el contenido de humedad. Cabe destacar que las muestras de pellets elaboradas cumplen con el requisito de humedad menor a 10% acorde a la norma ISO 17225:2021 Partes 2 y 6.

Tabla 3.1

Resultados obtenidos del análisis inmediato

Muestra	Humedad (%)	Cenizas (%)	Material volátil (%)	Carbono fijo (%)
100% SCG	2.4	0.61	79.09	17.90
50:50	1.84	6.19	75.23	16.73
40:60	3.455	6.88	74.59	15.08
30:70	3.45	9.10	73.67	13.78
100% Aserrín	3.2	11.04	72.25	13.62

Por parte de los otros resultados obtenidos, considerando su uso posterior en una caldera, revelan que la proporción de bagazo de café puro podría ofrecer beneficios significativos en la generación de vapor gracias a su mayor contenido de carbono fijo, indicativo de una mayor estabilidad térmica. Esto podría contribuir a una combustión más eficiente en la caldera, generando calor de manera consistente (Gani et al., 2023). En contraste, las muestras que poseían aserrín, al mostrar disminuciones en el carbono fijo, podrían aumentar la resistencia térmica de los pellets durante su quema en la caldera, afectando la eficiencia del equipo. Además, el aumento del contenido de cenizas en

proporciones con aserrín podría afectar la calidad de la combustión y la formación de impurezas inorgánicas (Gani et al., 2023).

Cabe destacar que, el porcentaje de cenizas que se aproxima a la norma referenciada es el de bagazo de café.

3.3. Resultados sobre las dimensiones de los pellets

Se observó que las medidas de los pellets elaborados fueron bastantes parecidas entre sí independientemente de la composición de la mezcla utilizada tal como se refleja en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2

Dimensiones medidas de los diferentes pellets.

Muestra	Longitud (mm)	Desviación	Diámetro (mm)	Desviación
100% SCG	22.41	1.68223	7.01	0.16633
50:50	22.21	1.36500	7.09	0.05676
40:60	22.74	1.37210	7.05	0.05270
30:70	25.93	2.47613	7.14	0.3306
100% Aserrín	26.08	2.77361	6.99	0.17288

La muestra 100% Aserrín, las mezclas 30:70 y 40:60 presentan longitudes mayores, lo cual podría relacionarse con un contenido de aceite más bajo reportado en el Gráfico 3.1 y, por ende, una menor aglutinación durante la formación de pellets. Esto concuerda con la literatura que indica que el aceite actúa como agente aglutinante. Por otro lado, la muestra 100% SCG con la concentración más alta de aceite tiene dimensiones intermedias. Estas

observaciones sugieren que, aunque el aceite favorece la cohesión, su exceso puede llevar a una expansión excesiva durante la peletización (Tumuluru, 2018).

Todos los pellets elaborados cumplen con los estándares de dimensiones para la longitud y para el diámetro regidos en la ISO 17225:2021 Partes 2 y 6.

3.4. Resultados obtenidos en pruebas de densidad

La Tabla 3.3 presenta que los resultados de densidad obtenidos para todos los pellets elaborados cumplen con los establecido por la normativa ISO 17225:2021 Partes 2 y 6, es decir, que la densidad de los pellets es mayor a 600 kg/m^3 .

Tabla 3.3

Resultados obtenidos en las pruebas de densidad.

Muestra	Densidad (g/ml)	Desviación
100% SCG	1.126	0.1140
50:50	1.036	0.0695
40:60	0.957	0.0870
30:70	0.813	0.0619
100% Aserrín	1.066	0.0684

La muestra 30:70 revela una densidad más baja, correlacionada con la mayor proporción de aserrín. Cabe destacar que, en la realización de pellets con aserrín, parte de la materia prima que se reingresaba estaba pulverizada debido a que no fue transformada en pellet inmediatamente, lo que puede influir en la densidad dado al tamaño de la partícula trabajada. Este patrón coincide con estudios previos sobre la relación entre contenido de humedad, tamaño de partícula y densidad de pellets (Tumuluru, 2018).

Además, en los resultados de longitud y diámetro presentados en la Tabla 3.2 se observa que las muestras con más aserrín tienden a tener dimensiones mayores y menor densidad, sugiriendo una influencia de la humedad en estas propiedades. Aunque la concentración de aceite no aparece como factor clave en la densidad (Tumuluru, 2018), podría contribuir a la cohesión de las partículas, afectando indirectamente las propiedades físicas.

También, el efecto de la compactación del pellet influye en la densidad de éste, puesto que un pellet compacto comprende mayor cantidad de masa en un mismo volumen. Los análisis de compactibilidad realizados demostraron que a mayor contenido de SCG se tiene menor compactibilidad (Martín, n.d.). Además, de forma pulverizada se comprobó que la densidad del aserrín es mucho más baja que la del SCG, lo cual explica la disminución de densidad a mayor cantidad de aserrín. La subida de densidad para el pellet de 100% Aserrín se debe entonces a que, debido a la falta de SCG, el aserrín pudo compactarse de mejor forma.

3.5. Resultados del punto de ignición del bagazo de café

El punto de ignición para la muestra de bagazo de café fue de 136 °C a condiciones ambientales de 28 °C y presión atmosférica experimentada en la ESPOL campus Gustavo Galindo de aproximadamente 0.995 atm, lo cual indica que a esta temperatura es posible el inicio de la deseada combustión cuando la muestra es expuesta a una fuente de calor ya que comienza la emisión de gases inflamables.

El conocimiento del dato de punto de ignición permite a los operadores de planta o el encargado del manejo del combustible tener contexto sobre el tema de seguridad y gestión de riesgos, ya que proporciona información relacionada a la inflamabilidad del sólido. Además, este dato es importante para la correcta manipulación, almacenamiento y transporte del combustible.

El búnker, al ser un combustible líquido, presenta lo que se conoce como punto de inflamación el cual hace referencia a la temperatura mínima en la que un líquido emite vapores capaces de formar una mezcla inflamable con el aire. El punto de inflamación del Fuel oil n°6 es de 60 °C (COPEC, 2019) la cual es poco menos de la mitad del punto de ignición del SCG.

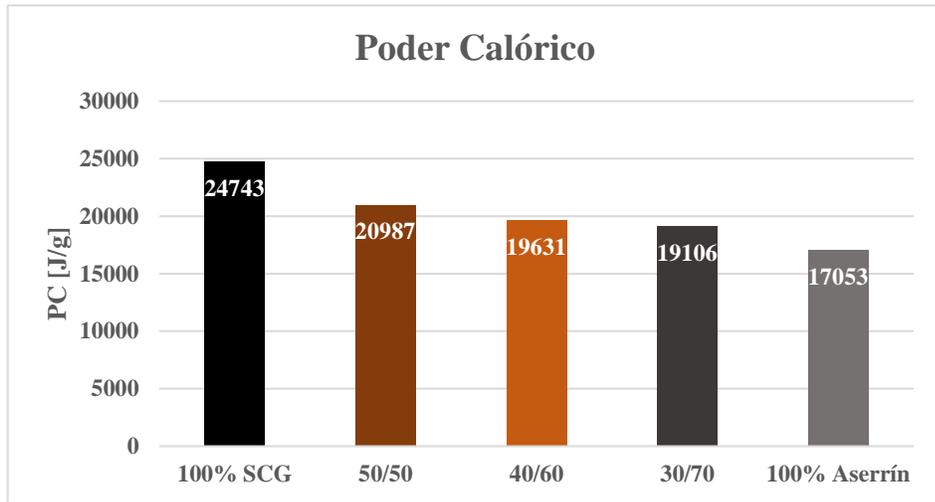
La temperatura de ignición es un valor más alto que la temperatura de inflamación puesto que en la primera ya se mantiene la flama de forma autónoma. La temperatura de inflamación normal de una biomasa suele estar en un rango de 370 °C a 650 °C (Benavides, 2022) por lo que su temperatura de ignición normal es más alta. En este caso, la temperatura de ignición del SCG es bastante baja en comparación con estos datos.

3.6. Resultados en la obtención del poder calorífico

Las pruebas del poder calórico revelaron que el pellet constituido únicamente por bagazo de café presenta un poder calórico de 24.7 MJ/kg, mientras que el pellet cuya composición se trata sólo de aserrín presenta un poder calórico de 17.1 MJ/kg. En el Gráfico 3.2. se muestran valores intermedios como resultado de poder calórico para las mezclas de estas biomásas.

Gráfico 3.2

Resultados del poder calorífico en muestras de pellets diferentes.



La muestra 100% Aserrín muestra el poder calorífico más bajo, lo cual se puede atribuir a su mayor contenido de cenizas, indicativo de minerales inorgánicos con baja capacidad calórica. Por otro lado, las muestras con proporciones variables de bagazo de café y aserrín presentan un patrón de disminución del poder calorífico a medida que aumenta la proporción de aserrín. Este fenómeno puede asociarse al menor contenido de carbono fijo en el aserrín en comparación con el bagazo de café, ya que el carbono fijo contribuye significativamente al poder calorífico al actuar como fuente principal de energía durante la combustión.

Adicionalmente, el material volátil, que incluye compuestos orgánicos fácilmente evaporables, puede influir en el poder calorífico al contribuir a una combustión más eficiente. La presencia de aceite como aglutinante puede tener un papel relevante en la cohesión de las partículas y, por ende, en la liberación de energía durante la combustión.

Es esencial destacar que la compactibilidad del pellet elaborado no afecta significativamente el resultado del poder calorífico del SCG, ya que también se realizó un proceso de trituración de la muestra para aumentar el área de contacto. Los valores obtenidos de poder calorífico para el SCG indican un potencial energético significativo y no aprovechado en este residuo, superando los valores típicos de esta biomasa seca 8.4 – 20.9 MJ/kg (Nosek et al., 2020). Además, la baja humedad del pellet, alcanzada mediante un proceso de secado específico para condiciones húmedas como las de Guayaquil, contribuye a una mayor densidad energética y está directamente relacionada con el poder calorífico.

3.7. Resultados sobre la composición de gases de combustión

La composición de CO₂ en los gases de combustión de las muestras con un contenido de aserrín superior al 60% superó el valor de 5 (%v/v) imposibilitando conocer un valor exacto sobre estas concentraciones debido a la limitación del equipo utilizado. Por otro lado, la Tabla 3.4 muestra valores entre 80 – 500 ppm de CO para todas las muestras.

Tabla 3.4

Gases de combustión durante la quema de diferentes tipos de pellets.

Muestras	CO₂ (%v/v)	CO (ppm)
100% SCG	3.202	82.67
50:50	2.5348	184.88
40:60	>5	492.19
30:70	>5	455.08
100% Aserrín	>5	234.52

A partir de cierto momento durante la combustión se notó un cambio visual en los gases: el color de estos se asemejaba al color del vapor. Cuando esto sucede es debido a que se está evaporando la cantidad remanente de agua en el pellet y es por este motivo que en la medición de gases se notó que las concentraciones de los demás componentes disminuyen debido a la presencia del vapor de agua.

Según (Nosek et al., 2020), la concentración de CO₂ en los gases de combustión de la muestra de 100% SCG debería estar entre 3.54% - 4.05% (v/v) lo cual no se cumple para el caso de la muestra de SCG utilizada en este proyecto. Se observa que la muestra presenta menores concentraciones de este compuesto en sus gases de combustión. De igual forma, la concentración de CO debería estar entre 1600 y 2000 ppm para el SCG, no obstante, la Tabla 3.4 refleja que todas las muestras presentan concentraciones inferiores a estos valores.

Las bajas concentraciones de estos compuestos reflejan que la biomasa utilizada realmente no emite altas concentraciones de estos contaminantes del aire lo cual es favorable para el ambiente. Se observa que las mezclas menos contaminantes son: 100% SCG y 50:50, pero dado que la mezcla 50:50 presenta una mayor concentración de CO y este es el contaminante más peligroso dentro de los analizados, se declara que la mezcla menos contaminante es la mezcla de 100% SCG.

Una caldera que funciona a base de Fuel oil n°6 presenta en sus gases de chimenea una composición de CO entre 6.5 a 37.9 ppm y para el CO₂ se tiene un rango de 10.210 a 14.414%v/v como se puede evidenciar en la Tabla 3.5 (Ortuño, 2014). Se aprecia una reducción bastante considerable de las emisiones de CO₂ para los pellets de SGC, pero un aumento notorio para las emisiones de CO.

Tabla 3.5

Datos sobre gases de combustión de una caldera que trabaja con Fuel Oil n°6.

Promedio	CO ppm	CO2%
Caldera No. 1	6.5	10.210
Caldera No. 2	15.9	13.059
Caldera No. 3	11.5	11.472
Caldera No. 4	37.9	14.414

Fuente: (Ortuño Valdivieso, 2014)

Las altas concentraciones de CO se dan debido a la poca dureza o compresibilidad del pellet de SGC. La presencia de altas concentraciones de CO y bajas concentraciones de CO₂ pueden ser indicativo de una combustión incompleta ya que en la combustión completa el subproducto común es el dióxido de carbono que se forma a partir de la combinación del carbono con el oxígeno presente. La combustión incompleta puede significar que no se ha proporcionado la suficiente cantidad de oxígeno para convertir todo el carbono a CO₂.

Pese a que las concentraciones de CO sean superiores a las del CO₂, estas aún se mantienen muy por debajo del estándar límite máximo establecido por la STN EN 303-5 2012 cuya concentración es de 2400 ppm (Nosek et al., 2020).

3.8. Elección de la composición óptima

De acuerdo con los resultados obtenidos sobre las cinco muestras estudiadas, los requisitos sobre la humedad, densidad y dimensiones son completados con respecto a las normas ISO 17225:2021 Parte 2 y 6.

Para la elección de la muestra con mayor conveniencia para ser usada como fuente de energía, se toma en consideración que los pellets que son elaborados en su totalidad con bagazo de café poseen una mayor cantidad de carbono fijo, por lo que, el poder calórico resulta ser alto en contraste con el resto de las muestras analizadas, lo cual beneficiaría la combustión en el interior de la caldera. Durante la quema de las muestras, se registró cantidades menores de emisión de dióxido de carbono y monóxido de carbono en comparación a las muestras que poseían aserrín. Además, posterior a su quema se produce menor cantidad de residuos inorgánicos tales como cenizas, las cuales suelen obstaculizar el proceso de combustión, a su vez, el intercambio de energía para la generación de vapor vivo. Por lo que, la muestra de 100% SCG es seleccionada para realizar el respectivo análisis elemental y con ello la simulación del proceso de producción de vapor a partir de una caldera acuotubular.

3.9. Resultados del análisis elemental

Los resultados del análisis elemental de la muestra de bagazo de café expuestos en la Tabla 3.6 revelan un contenido significativo de carbono (53.64%), indicando una presencia abundante de compuestos orgánicos en la muestra. El hidrógeno está alrededor de 6.23%, mientras que el oxígeno representa un 39.08%, siendo el componente principal que se espera en materiales orgánicos. El nitrógeno está presente en un 0.14%, un valor relativamente bajo que podría estar relacionado con el procesamiento del bagazo o influencias durante el ciclo de crecimiento del café, como la fertilización del suelo (Nosek et al., 2020). El azufre y el cloro contribuyen con un 0.28% y un 0.01%, respectivamente.

Tabla 3.6

Resultados de análisis elemental realizado al bagazo de café en laboratorios externos.

Carbono (%)	53.6376
Hidrógeno (%)	6.2325
Oxígeno (%)	39.0792
Nitrógeno (%)	0.1432
Azufre (%)	0.2762
Cloro (%)	0.0102
ASH	0.6211
Total	100%

Nota: Los resultados para el C, N, S y Cl fueron obtenidos de análisis realizados en la presente investigación mediante laboratorios externos, los resultados de H y O corresponden a estimaciones basadas en documentos científicos (Gómez et al., 2004).

Para insertar los datos de la Tabla 3.6 en la simulación de Aspen Plus es necesario mantener el número de decimales registrados ya que de dicha forma se asegura que la suma exacta de los componentes y las cenizas en la caracterización ULTANAL sea igual al 100% y no exista un error en el programa.

3.10. Resultados de la simulación

3.10.1. Diagrama de flujo de proceso

Figura 3.1

Diagrama de flujo de proceso de la simulación del caldero acuotubular en Aspen Plus V12.1.

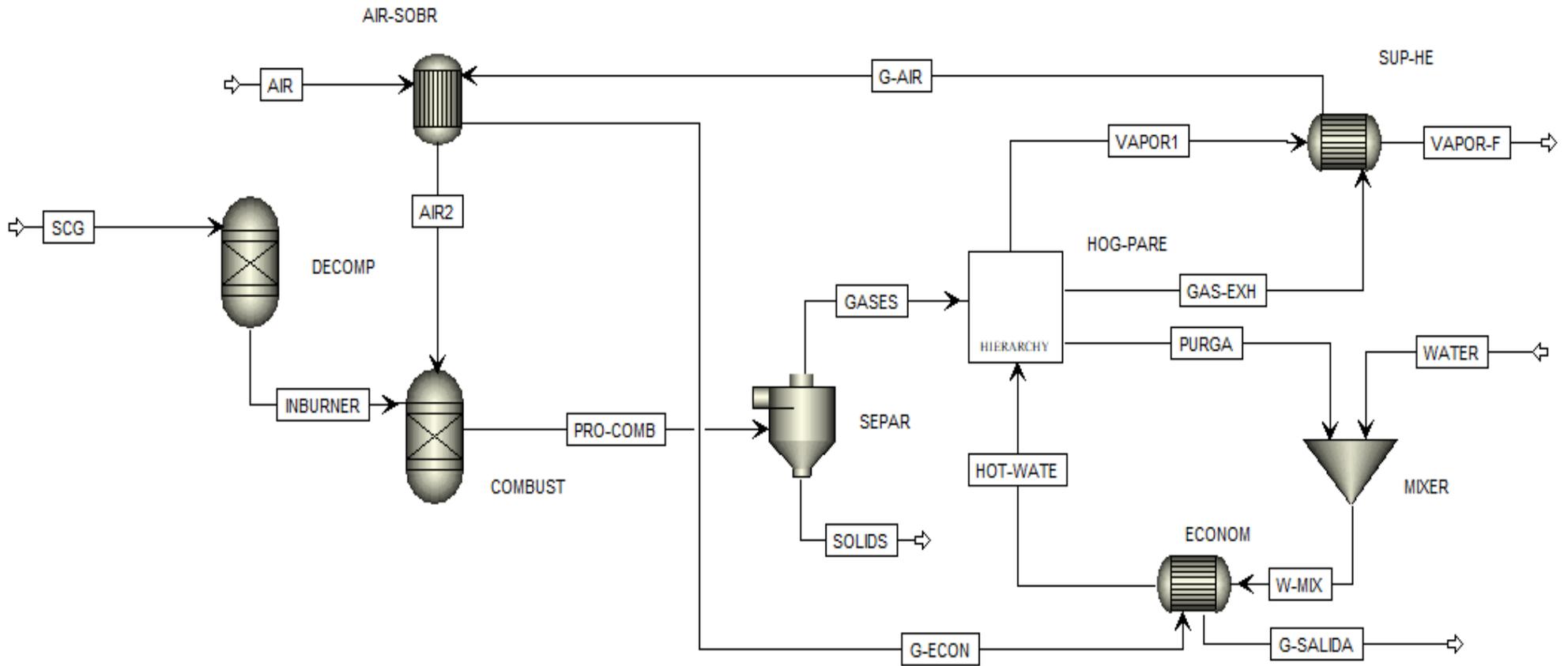
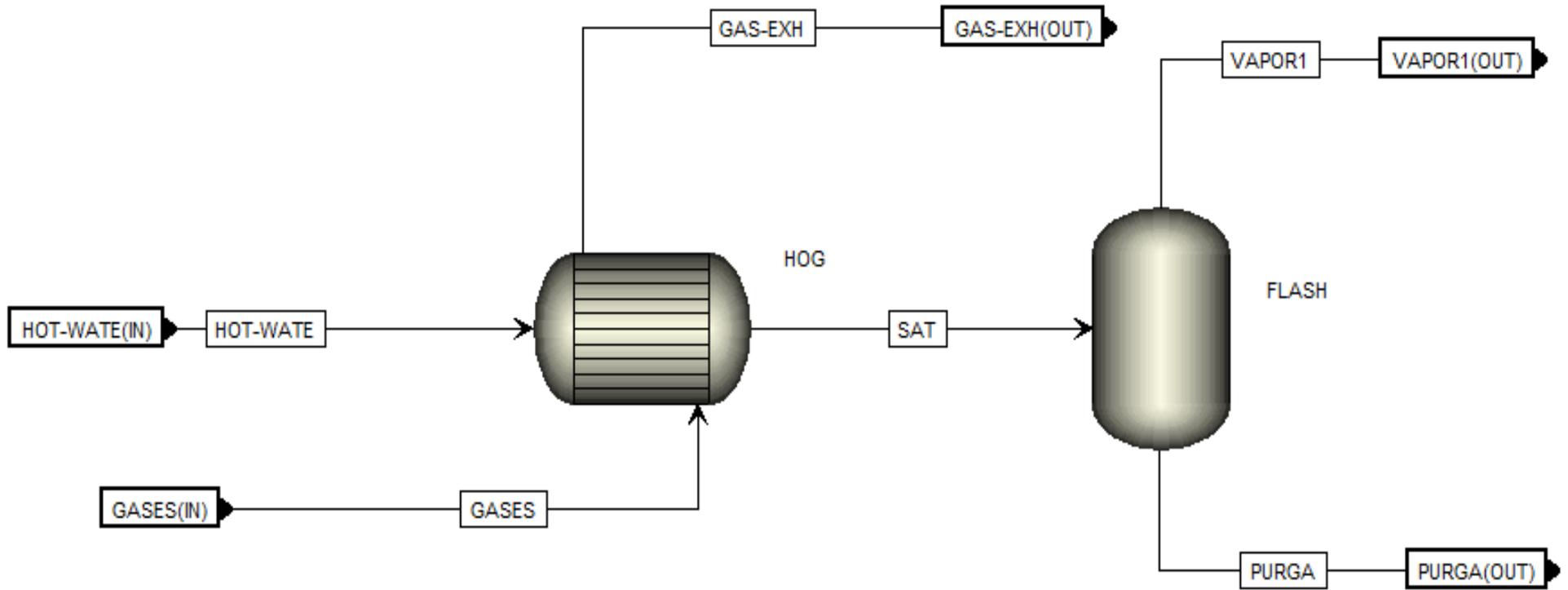


Figura 3.2

Subdiagrama de flujo de proceso en el equipo HOG-PARE de la simulación del caldero acuotubular en Aspen Plus V12.1.



3.10.2. Tablas de resultados

Tabla 3.7

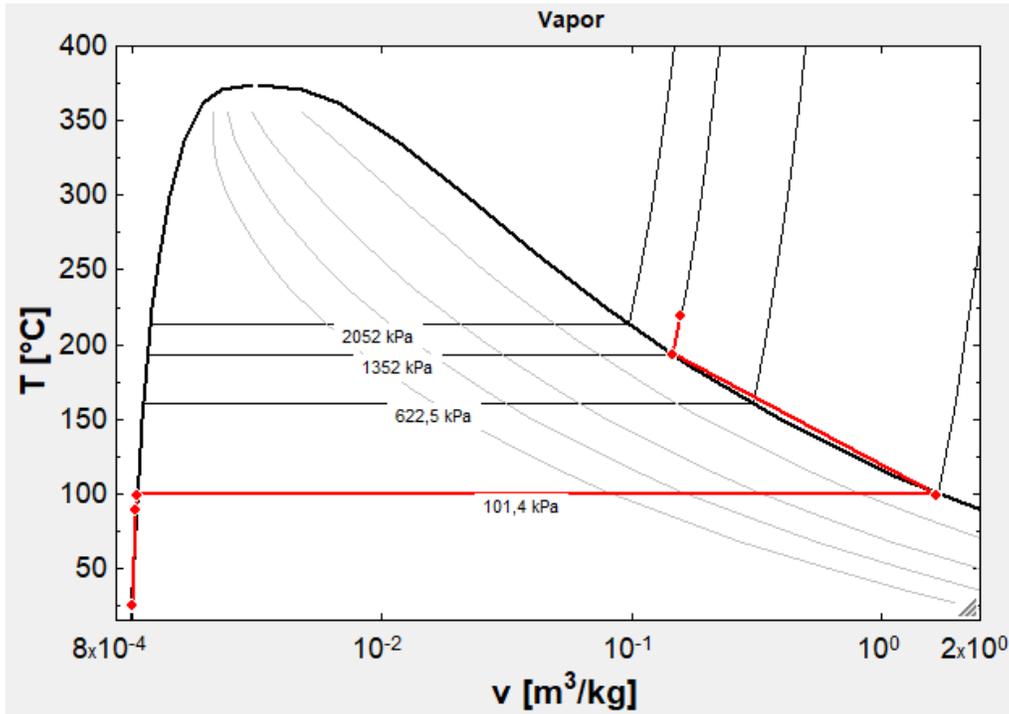
Estados del agua-vapor en el sistema dentro de la simulación en Aspen V12.1.

Corriente	Temperatura (°C)	Presión (psi)
Agua de alimentación (WATER)	25	14.7
Entrada al economizador (W-MIX)	26.745	14.7
Salida del economizador (HOT-WATE)	90	14.7
Salida del “hogar” (SAT)	101.906	14.7
Salida del separador flash (VAPOR1)	193.716	196
Vapor final (VAPOR-F)	220	196

Como se observa en la Figura 3.3, el agua de alimentación se carga al sistema en estado de líquido subenfriado, luego el economizador aumenta su temperatura, pero mantiene el estado subenfriado del líquido. En el hogar del caldero se convierte el agua en vapor mediante un aumento de temperatura a presión constante debido al intercambio de calor con los gases obtenidos de la combustión de los pellets. La salida de la caldera es una mezcla líquido-vapor saturado con calidad $x=0.99$, por lo que se realiza una purga del líquido presente en la mezcla usando un separador flash donde se aumentan tanto presión como temperatura al vapor saturado de salida. Luego se realiza otro aumento de temperatura a presión constante para sobresaturar el vapor hasta el valor de 220 °C que es la temperatura deseada para el proceso de elaboración de café soluble.

Figura 3.3

Curva de saturación del agua con los datos del sistema obtenida con el software EES



Con un flujo de alimentación de pellets óptimo se obtiene que el valor de la temperatura de la entrada de gases será superior a la temperatura de la corriente de producto que se quiere calentar para que cada proceso detallado en la Figura 3.1 pueda ejecutarse. En este diagrama se revela que todas las etapas de calentamiento tienen como fuente de calor a los gases de combustión.

La Tabla 3.8 detalla que alimentar 0.069 kg/s de pellets permite obtener el límite máximo requerido para la industria de café soluble de 0.57 kg/s de vapor.

Tabla 3.8

Resultados de alimentación de pellets óptima

Flujo (kg/s)	Temperatura (°C)	Presión (psi)
0.027 – 0.069	25	14,7

Al disminuir la cantidad de biomasa se disminuye la cantidad y temperatura de los gases producidos y no se podrán realizar todos los intercambios de calor deseados, por eso el rango de flujo de alimentación mostrado en la Tabla 3.8 es el óptimo para generar entre 20 – 50 toneladas de vapor al día necesarias para la operación de la planta.

Por otra parte, precalentar el aire a presión constante previo a la combustión mejora la eficiencia del proceso, sin embargo, precalentar el aire en exceso también puede llegar a disminuir la eficiencia ya que todo el calor generado en la combustión se concentra en esta etapa. La temperatura óptima a precalentar el aire es 100 °C a partir de un flujo de entrada de 25 °C a 1 atm como se muestra en la Tabla 3.9.

Tabla 3.9

Condiciones de las corrientes de aire en la simulación en Aspen Plus V12.1

Corriente	Aire de entrada al precalentador (AIR)	Aire de salida del precalentador (AIR-2)
Flujo (kg/s)		0.6 – 1.8
Temperatura (°C)	25	100
Presión (psi)	14.7	14.7

El flujo de aire alimentado también influye en los resultados obtenidos ya que normalmente se requiere de un exceso de oxígeno para garantizar la combustión, no obstante, ingresar una cantidad excesiva reducirá la eficiencia debido a que la temperatura del aire es inferior a la de los gases de combustión por lo que la mezcla de estos dos alcanzará una temperatura más cercana a 100 °C a medida que se ingresa más aire. Tampoco debería ingresar menos de la cantidad de oxígeno estequiométricamente requerida puesto que no se aprovecharían todos los pellets.

El flujo óptimo de aire es de 1.8 kg/s para la cantidad de pellets alimentados a la caldera acuotubular cuando se requiere 0.57 kg/s de vapor, mientras que el flujo óptimo de aire es de 0.6 kg/s para los 0.027 kg/s de pellets capaces de producir 0.23 kg/s de vapor.

En la Tablas 3.10 se puede apreciar que, para el flujo óptimo de pellets alimentados, tanto para el límite máximo como para el límite mínimo de flujo vapor de vapor, con su correspondiente flujo óptimo de aire anteriormente mencionado, se tiene que a la temperatura de salida de los gases de combustión en cada proceso es superior a la temperatura máxima a alcanzarse en el siguiente proceso.

Tabla 3.10

Gases de combustión a la salida de cada etapa al alimentar mínimo y máximo de pellets en Aspen Plus V12.1

Corriente	Temperatura con flujo mínimo (°C)	Temperatura con flujo máximo (°C)	Temperatura siguiente proceso (°C)
Salida cámara de combustión (PRO-COMB)	898.962	1017.16	102 + cambio de fase
Salida del “hogar” (GAS-EXH)	250.723	261.644	220
Salida del sobrecalentador (G-AIR)	234.776	241.854	100
Salida del calentador de aire (G-ECON)	165.1	173.964	90
Salida del economizador (G-SALIDA)	78.5794	71.7695	-

En la Tabla 3.11 se observa que la caldera generará una reducida cantidad de cenizas la cual tendrá que ser gestionada por la planta de producción, pero la reducción de la masa de residuos es superior al 99% si se aprovecha el bagazo para la generación de vapor.

Tabla 3.11

Reducción de residuos

Bagazo producido (kg/s)	Cenizas producidas (kg/s)	Reducción de masa de residuos
0.067	0.00016 – 0.00042	99.77% - 99.39%

3.11. Resultados de dimensionamiento

Tabla 3.12

Resultados de parámetros de diseño

	Pre calentador de aire	Sobrecalentador de vapor	Economizador
Configuración	Contracorriente	Contracorriente	Contracorriente
U (W/cm²K)	0.0842	0.0842	0.0842
LMTD (°C)	137.49	251.05	60.83
Q (W)	140688.41	31654.89	166144.77
A (m²)	12.15	1.50	32.43

3.12. Resultados de estimación de costos

Se utilizó como herramienta para la estimación de costos a la hoja de cálculo CAPCOST_2017 con un CEPCI de 794 (actualizado en septiembre 2023) para conocer que la inversión aproximada en equipos que la empresa productora de café soluble tendría que realizar sería de \$1744000 sin incluir el costo de la máquina peletizadora.

Los equipos se presupuestaron para ser construidos con acero inoxidable puesto que este material es resistente las altas presiones y temperaturas que requieren alcanzarse en el proceso de generación de vapor, además de que, debido a su inminente contacto con oxígeno ya que se requiere del suministro de aire, es importante evitar corrosión en el equipo para alargar su tiempo de vida.

La herramienta utilizada permite un área de transferencia de calor mayor o igual a 10 m² por lo que, dado que todos los intercambiadores de calor utilizados utilizan la misma fuente de calor (gases de combustión de los pellets) y tienen el mismo coeficiente de transferencia de calor U, se evaluó en el CAPCOST como un solo intercambiador de calor con un área de transferencia de calor total de 46.1 m².

El capital mencionado incluye un secador rotatorio del bagazo de café, un recolector y un tanque de almacenamiento para este tal como se muestra en la Figura 3.4.

Figura 3.4

Captura de resultados del CAPCOST

Secadores	Tipo	Área (metros cuadrados)					Costo de compra del equipo
Dy-101	Rotatorio	10					\$ 79,000
Recolector de polvo	Tipo	Flujo de gas (metros cúbicos/s)					Costo de compra del equipo
Dc-101	Ciclón	7					\$ 24,000
Intercambiadores de calor	Tipo	Presión carcasa (barg)	Presión tubos (barg)	Material	Área (metros cuadrados)	Costo de compra del equipo	
E-101	Múltiples tubos	1	13	Acero inoxidable	46.1	\$ 110,000	
Reactores	Type	Volumen (metros cúbicos)					Costo de compra del equipo
R-101	Chaqueta sin agitación	18					\$ 36,000
Recipientes a presión	Orientación	Altura/Ancho (metros)	Diámetro (metros)	Material	Presión (barg)	Costo de compra del equipo	
V-101	Vertical	3	1	Acero inoxidable	13	\$ 51,300	
V-102	Vertical	3	2	Acero inoxidable	1.01	\$ 67,600	
Totales						\$ 367,900	
Costo total del módulo						\$ 1,000,000	
Costo total de base						\$ 1,290,000	
Costo total del equipo						\$ 367,900	
Factor Lang						4.74	
Costo Factor Lang						\$ 1,744,000	

Una peletizadora de biomasa cuya capacidad de carga máxima se encuentra cerca de 400 kg/h (0.11 kg/s) permite suplir la demanda de pellets requerida invirtiendo \$12000 en la adquisición del equipo. Con este equipo se completa una inversión total de \$1756000.

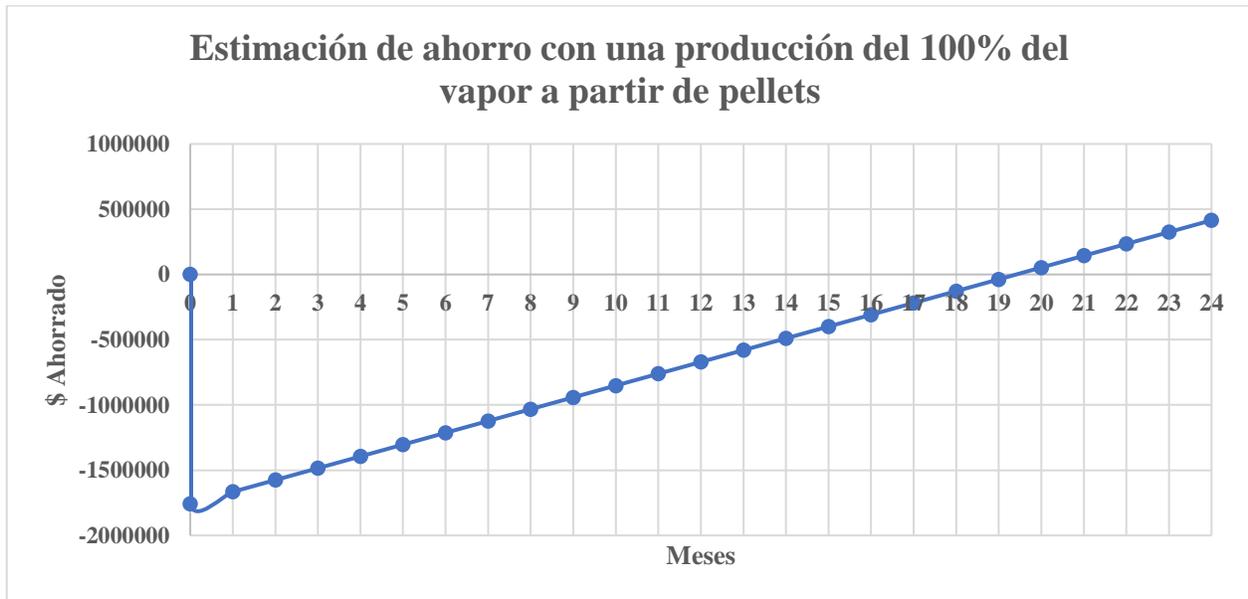
3.13. Resultados de estimación de ahorro

Las plantas productoras de café soluble consumen entre 2200 a 2500 galones de Fuel oil n°6 diarias, lo que representa entre \$4000 a \$4500 al día siendo un fuerte costo de producción para la empresa. Utilizando la caldera acuotubular no se requerirá de realizar este gasto recurrente pues se haría uso del bagazo de café que ya posee la empresa, lo cual implicar un ahorro superior a \$100000 mensuales.

Considerando la adquisición de nuevo personal a la planta debido al nuevo proceso de peletizado, se realizó una estimación del ahorro realizado al reemplazar la caldera pirotubular actual por la caldera acuotubular propuesta. En la Gráfico 3.3 se aprecia que, pese a la depreciación lineal y el pago de nuevos salarios, la empresa empieza a percibir el ahorro generado de la fuerte inversión a partir de los 19.5 meses de producción con la caldera acuotubular usando bagazo de café en vez de Fuel oil n°6.

Gráfico 3.3

Estimación de ahorro mensual con una producción del 100% del vapor a partir de pellets.

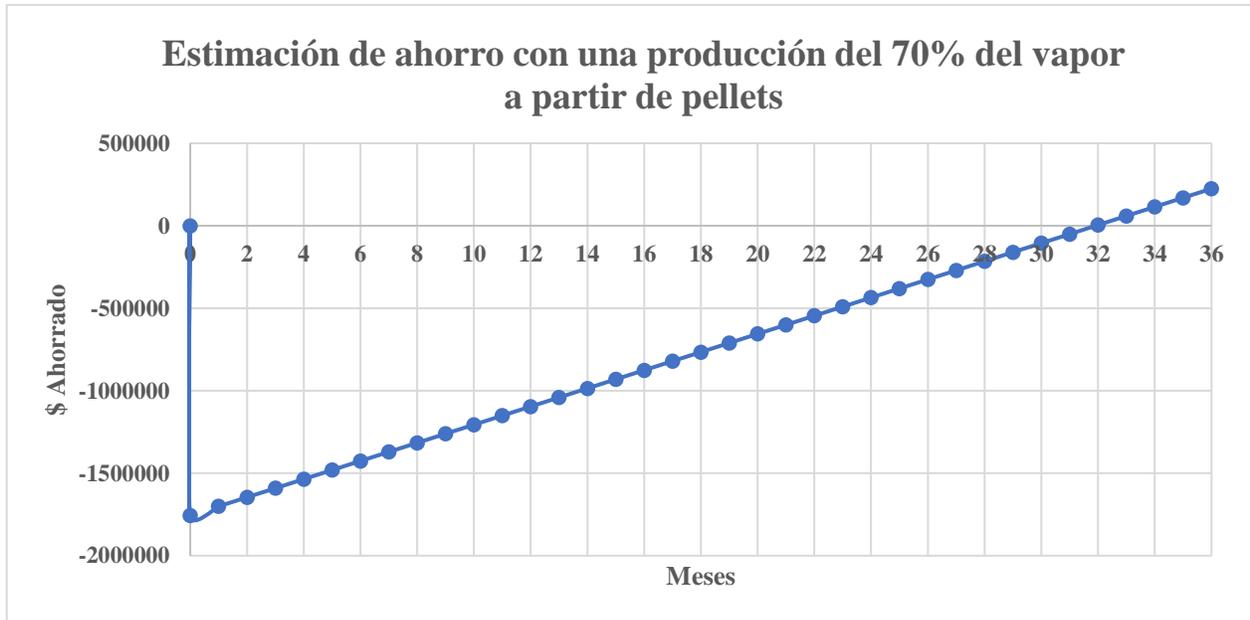


Para una estimación más conservadora dado que la cantidad pellets disponibles es ligeramente inferior a la de pellets requeridos, se propone generar el vapor requerido usando un sistema híbrido que incluya un 70% de vapor obtenido por la caldera acuotubular propuesta y el 30% faltante con la existente caldera pirotubular a base de

búnker. Esta propuesta representaría un ahorro significativo de forma paralela al resultado anterior como se muestra en el Gráfico 3.4.

Gráfico 3.4

Estimación de ahorro mensual con una producción del 100% del vapor a partir de pellets



Para este caso, la empresa empieza a percibir el ahorro posterior a la inversión a partir de los 32 meses iniciada la producción.

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- El contenido de aceite en el bagazo de café es más alto a lo reportado en documentos científicos lo cual puede deberse a la mezcla de distintos tipos de granos de café de tipo robusta y arábica utilizados en la fórmula de la empresa para la elaboración de su café soluble comercial.
- El bagazo de café debe tener una humedad de entrada a la peletizadora ligeramente superior a 17% en base húmeda para que los pellets puedan elaborarse rápidamente con una humedad de salida de 17% BH. Para que los pellets presenten las propiedades reportadas en este documento y para que pueda cumplir con las ISO 17225 Partes 2 y 6, es estrictamente necesario secarlos a la salida del peletizado.
- El elevado poder calórico del bagazo de café es consecuencia de la alta cantidad de carbono fijo y del también elevado contenido de aceite que permite que la elaboración de pellets no sea tan complicada y que no se altere la composición natural del desecho ya que no requiere la adición de aglutinante.
- El aserrín utilizado no aportó de forma positiva a la constitución de un mejor pellet comparado con aquel que fue elaborado únicamente por SCG, no obstante, es una alternativa bastante atractiva en caso de déficit de bagazo de café para la empresa.
- La caldera acuotubular requerirá de un flujo máximo de pellets de 0.069 kg/s el cual es bastante cercano a lo obtenido con los residuos de la producción de café soluble y que, de implementarse la propuesta de una generación del 100% de vapor con pellets, se observarán ahorros a partir de los 19.5 meses de producción y una reducción de residuos sólidos superior al 99%. No obstante, una propuesta más

conservadora de una producción del 70% de vapor requerido mediante la cadera acuotubular reflejará una percepción de ahorro a partir de los 32 meses.

4.2. Recomendaciones

- Secar el bagazo de café directamente en el suelo o en parcelas de la planta. Esta práctica no solo evita los altos costos de energía asociados con secadores, sino que también capitaliza la eficiencia del secado al sol. El tipo de intercambio de calor por convección bajo la exposición solar directa acelera significativamente el proceso, garantizando un secado rápido y eficaz. Además de los beneficios económicos, esta medida abraza una perspectiva sostenible al aprovechar de manera óptima los recursos naturales, añadiendo un enfoque ecoamigable a la operación.
- Almacenar los pellets de bagazo de café debido a las propiedades hidrofóbicas inherentes al café, que pueden propiciar la absorción de humedad y afectar sus propiedades. Para garantizar la integridad del producto, se sugiere utilizar recipientes herméticos anticorrosivos para un almacenamiento seguro y eficiente. Este enfoque preserva las características fundamentales de los pellets y permite que los no utilizados durante una jornada se guarden para su aprovechamiento en el futuro.
- Evaluar la resistencia al aplastamiento, abrasión e impacto de los pellets de bagazo de café. Estos datos serán clave para mejorar las estrategias de almacenamiento y logística, asegurando su integridad física y facilitando su aplicación eficiente en operaciones energéticas.

BIBLIOGRAFÍA

- Ali, H. S., Mansour, A. F., Kamil, M. M., & Hussein, A. M. S. (2018). Formulation of nutraceutical biscuits based on dried spent coffee grounds. *International Journal of Pharmacology*, 14(4), 584-594. <https://doi.org/10.3923/ijp.2018.584.594>
- Al-Hamamre, Z., Foerster, S., Hartmann, F., Kröger, M., & Kaltschmitt, M. (2012). Oil extracted from spent coffee grounds as a renewable source for fatty acid methyl ester manufacturing. *Fuel*, 96, 70-76. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.01.023>
- Arshadi, M., Gref, R., Geladi, P., Dahlqvist, S., & Lestander, T. A. (2008). The influence of raw material characteristics on the industrial pelletizing process and pellet quality. *Fuel Processing Technology*, 89(12), 1442-1447. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2008.07.001>
- Arteaga Zambrano, B. L. (2018). MANUAL CONTABLE PARA EL CONTROL FINANCIERO DE CUENTAS DE COSTO “DIÉSEL Y BUNKER”: INDUSTRIA CAFETALERA ASKELGADO. Universidad Tecnológica Empresarial de Guayaquil.
- Benavides, K. (2022). SUBPRODUCTOS DEL CAFÉ COMO ALTERNATIVA ENERGÉTICA EN INDUSTRIA SOLUBILIZADORA DE CAFÉ.
- Benítez Peralta, D., & Calderón Espinoza, M. (2022). Rediseño de una máquina peletizadora del laboratorio del Centro de Desarrollo Tecnológico Sustentable (CDTS) para pruebas con biomasa [PROYECTO INTEGRADOR Previo la obtención del Título de: Ingeniero Mecánico]. ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL.
- Botia, L. A. (2019). Beneficios ambientales que generaría la incorporación del biocombustible en el sector aeronáutico en Colombia. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10654/35896>.

- Capela, M. N., Tobaldi, D. M., Seabra, M., Da Cruz Tarelho, L. A., & Labrincha, J. (2022). Characterization of ashes produced from different biomass fuels used in combustion systems in a pulp and paper industry towards its recycling. *Biomass and Bioenergy*, 166, 106598. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106598>
- Carraretto, C. (2004). Biodiesel as alternative fuel: experimental analysis and energetic evaluations. *Energy*, 29(12-15), 2195-2211. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2004.03.042>
- Calidad del suelo. determinación del carbono orgánico. (s. f.). <https://tienda.icontec.org/gp-calidad-del-suelo-determinacion-del-carbono-organico-ntc5403-2021.html>
- Chávez Porras, Á., & Rodríguez González, A. (2016). Aprovechamiento de residuos agrícolas y forestales. *Revista Academia & Virtualidad*, 9(2), 90-107.
- Chen, W., Peng, J., & Bi, X. (2015). A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 44, 847-866. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.12.039>
- Contreras, J. (2019). SIMULACIÓN DE UNA CALDERA BAGACERA MEDIANTE EL SOFTWARE ASPEN PLUS PARA DETERMINAR SU DESEMPEÑO ENERGÉTICO. In *Universidad Autónoma de Bucaramanga (Vol. 1, Issue 1)*. Universidad Autónoma de Bucaramanga.
- COPEC. (2019). Hoja de datos de seguridad: Petróleo combustible N°6.
- Draeger.Web WWW - Draeger Master. (s. f.). https://www.draeger.com/es_csa/Products/X-am-5600
- Energía, sociedad y ambiente. (2020). En *Balance energético nacional 2021*. Ministerio de minería y Minas.
- Farah, A. (2009). Coffee as a speciality and functional beverage. En *Elsevier eBooks* (pp. 370-395). <https://doi.org/10.1533/9781845695569.3.370>

- Instituto Nacional Ecuatoriano de Normalización INEN 237 (1997). Fertilizantes o abonos. Determinación de azufre.
- Gani, A., Adisalamun, A., D, M. R. A., Suhendrayatna, S., Reza, M., Erdiwansyah, E., Saiful, S., & Desvita, H. (2023). Proximate and ultimate analysis of Corncob biomass waste as raw material for biocoke fuel production. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 8, 100525. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100525>
- Gomá, F. (1979). *El cemento Portland y otros aglomerantes* (1era Edición). Editores Técnicos Asociados.
- Gómez, A., Klose, W., Rincón, S. L., & Wiest, W. (2004). Transformación termoquímica de la biomasa residual del proceso de extracción del aceite de palma: tecnologías y perspectivas. *Palmas*, 388–394.
- Hidalgo Segovia, C. Solange., & Rivera Garces, S. Giuliana. (2017). Obtención de carbón activado a partir del bagazo del café como una propuesta de utilización del residuo de una industria cafetera. *Escuela Superior Politécnica Del Litoral*, 106.
- ISO 17225-2. (2021). ISO 17225-2:2021. Solid biofuels-Fuel specifications and classes-Part 2: Graded wood pellets Biocombustibles solidos.
- Jeníček, L., Tunklová, B., Malat'ák, J., Neškudá, M., & Velebil, J. (2022). Use of Spent Coffee Ground as an Alternative Fuel and Possible Soil Amendment. *Materials*, 15(19). <https://doi.org/10.3390/ma15196722>
- Kang, S. B., Oh, H. Y., Kim, J. J., & Choi, K. S. (2017). Characteristics of spent coffee ground as a fuel and combustion test in a small boiler (6.5 kW). *Renewable Energy*, 113, 1208-1214. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.06.092>
- Martín, F. (n.d.). Pélets y briquetas. In *Ecología* (pp. 54–62).

- Mussatto, S. I., Machado, E. M. S., Martins, S., & Teixeira, J. A. (2011). Production, composition, and application of coffee and its industrial residues. *Food and Bioprocess Technology*, 4(5), 661-672. <https://doi.org/10.1007/s11947-011-0565-z>
- Nosek, R., Tun, M. M., & Juchelková, D. (2020). Energy utilization of spent coffee grounds in the form of pellets. *Energies*, 13(5), 1235. <https://doi.org/10.3390/en13051235>
- Nußbaumer, T. (2003). Combustion and co-combustion of biomass: fundamentals, technologies, and primary measures for emission reduction. *Energy & Fuels*, 17(6), 1510-1521. <https://doi.org/10.1021/ef030031q>
- Obernberger, I., & Thek, G. (2004). Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour.
- Official Methods of Analysis, 22nd Edition (2023) - AOAC INTERNATIONAL. (2023, 10 noviembre). AOAC INTERNATIONAL. <https://www.aoac.org/official-methods-of-analysis/>
- Ortuño Valdivieso, L. A., Ing. (2014). Recuperación de CO₂ generado por la combustión de búnker C en las calderas de una fábrica de bebidas carbonatadas, para reducir las emisiones. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Peng, J., Bi, H. T., Sokhansanj, S., & Lim, J. (2012). A study of particle size effect on biomass torrefaction and densification. *Energy & Fuels*, 26(6), 3826-3839. <https://doi.org/10.1021/ef3004027>
- PETROECUADOR. (s. f.). PRECIOS DE VENTA EN TERMINAL PARA LAS COMERCIALIZADORAS SECTOR AÉREO SECTORES PESQUERO Y ATUNERO SECTOR AUTOMOTRIZ CALIFICADAS Y AUTORIZADAS A NIVEL NACIONAL [Conjunto de datos]. En PERIODO DE VIGENCIA: DEL 12 DE OCTUBRE AL 11 DE NOVIEMBRE DE 2023.
- Rengifo, P. H. (2016). Aprovechamiento de residuos de biomasa secundaria como combustible. *Ingenium*, 1(1), 26–30. <http://journals.continental.edu.pe/index.php/ingenium/article/view/389>

- Rodríguez, N. R., Bedoya, E. V., Betancur, L. F. R., & Girón, S. M. M. (2017). Characterization and typification of coffee production systems (*Coffea Arabica* L.), Andes Municipality. *Revista Facultad Nacional de Agronomía*, 70(3), 8327-8339. <https://doi.org/10.15446/rfna.v70n3.66332>
- Rosas-morales, M., Hernández, D. C., & Ríos-cortés, A. M. (s. f.). APROVECHAMIENTO DEL BAGAZO DE RESIDUOS COFFEE BAGASSE , A NEW ALTERNATIVE TO ENRICH. 26, 136-146.
- Sermyagina, E., Martinez, C. M., Lahti, J., Nikku, M., Mänttari, M., Kallioinen-Mänttari, M., & Vakkilainen, E. (2022). Characterization of pellets produced from extracted sawdust: effect of cooling conditions and binder addition on composition, mechanical and thermochemical properties. *Biomass and Bioenergy*, 164, 106562. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106562>
- Standard test methods for determination of carbon, sulfur, nitrogen, and oxygen in steel, iron, nickel, and cobalt alloys by various combustion and inert gas fusion techniques. (s. f.). <https://www.astm.org/e1019-18.html>
- Tumuluru, J. S. (2018). Effect of pellet Die diameter on density and durability of pellets made from high moisture woody and herbaceous biomass. *Carbon Resources Conversion*, 1(1), 44-54. <https://doi.org/10.1016/j.crcon.2018.06.002>
- Tuntiwiwattanapun, N., Monono, E., Wiesenborn, D. P., & Tongcumpou, C. (2017). In-situ transesterification process for biodiesel production using spent coffee grounds from the instant coffee industry. *Industrial Crops and Products*, 102, 23-31. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.03.019>
- Wang, P., Yu, J., Liu, X., & Millán, M. (2023). On the effect of pellet density on biomass pyrolysis in a pressurized fixed bed reactor. *Fuel*, 354, 129191. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.129191>

Wannapeera, J., Fungtammasan, B., & Worasuwanarak, N. (2011). Effects of temperature and holding time during torrefaction on the pyrolysis behaviors of woody biomass. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 92(1), 99-105. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2011.04.010>

Zarrinbakhsh, N., Wang, T., Rodriguez-Urbe, A., Misra, M., & Mohanty, A. K. (2016). Characterization of wastes and coproducts from the coffee industry for composite material production. *Bioresources*, 11(3). <https://doi.org/10.15376/biores.11.3.7637-7653>